

Orano TN DOSSIER DE SURETE TN-MTR	CHAPITRE 00-1		 orano
	Préparateur / signature	Date	
	Vérificateur / signature	Date	
Identification :		DOS-18-006566-050	Version : 1.0 Page 1 / 26

TN International

CARACTERISTIQUES DES PERFORMANCES DU COLIS

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	3
2. DESCRIPTION ET DEFINITIONS	3
3. PERFORMANCES D’UN POINT DE VUE MECANIQUE	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 DES DEBITS D’EQUIVALENT DE DOSE.....	16
7. PERFORMANCES D’UN POINT DE VUE SURETE-CRITICITE.....	19
8. CONDITIONS D’UTILISATION	25
9. PROGRAMME D’ENTRETIEN PERIODIQUE.....	25
10. PROGRAMME D’ASSURANCE QUALITE	26
11. REFERENCES	26

ETAT DE LA REVISION

Révision	Date	Modifications	Préparé par / Vérifié par
1.0	Cf. 1 ^e page	Création du document	

1. INTRODUCTION

L'objet de ce chapitre est de décrire les caractéristiques des performances du modèle de colis TN-MTR, destiné au transport par voie routière, ferroviaire ou maritime, chargé de matière irradiée en tant que colis de type B(U) contenant des matières fissiles au regard de la réglementation <1>.

2. DESCRIPTION ET DEFINITIONS

2.1 Description du colis

L'emballage TN-MTR est conçu pour transporter des éléments combustibles ou réflecteurs, irradiés ou non, de réacteurs de recherche en fonction des caractéristiques du contenu radioactif transporté.

L'emballage est conçu et dimensionné pour être compatible avec les installations et leurs moyens de manutention.

De forme cylindrique, le modèle de colis TN-MTR est illustré sur la figure ci-dessous.

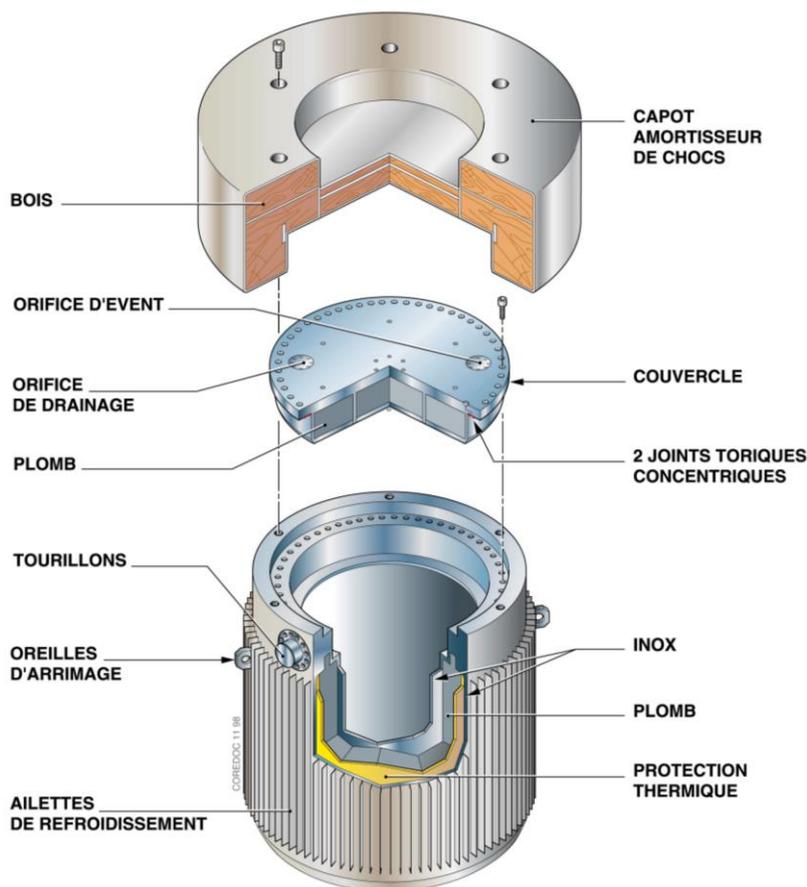


Schéma de l'emballage TN-MTR

Les dimensions générales hors-tout du colis sont :

- Longueur = 2,008 m
- Diamètre externe = 2,080 m

Le colis TN-MTR est transportable par voie routière et/ou maritime et/ou ferroviaire.

2.2 Description de l'emballage

Les trois principaux composants de l'emballage sont le corps, le couvercle et le capot amortisseur.

- Le corps est un cylindre constitué d'une protection radiologique en plomb, entouré d'une protection thermique en résine pour le cas de feu, enveloppées dans deux enceintes en acier inoxydable. La surface externe de l'emballage est équipée d'ailettes pour limiter la température de surface.
- Le couvercle est constitué :
 - soit d'une protection radiologique en plomb, entouré par une enveloppe d'acier inoxydable. Ce couvercle est dit de type « STANDARD ». Il est équipé de deux orifices pour assurer l'exploitation de l'emballage.
 - soit de 3 parties distinctes en acier inoxydable : le couvercle, le bouchon et la couronne. Ce couvercle est dit de type « SEC ». Il est également équipé de deux orifices pour assurer l'exploitation de l'emballage.
- Le capot amortisseur est constitué de blocs de bois enfermés dans une enveloppe métallique.

L'enveloppe de confinement est constituée par la cavité du corps, par le couvercle, par les tapes des orifices et par les joints interne du couvercle et des tapes.

En cours de transport, l'emballage est arrimé par 4 cales et 4 sangles.

2.3 Description du contenu

Le contenu de l'emballage est constitué d'un aménagement interne et des éléments combustibles ou source sous forme spéciale en irradiateur ou non.

- Panier RHF et éléments combustibles associés : le panier RHF est constitué d'un cylindre d'acier inoxydable massif constituant la structure du panier dans lequel sont aménagés trois logements pour les éléments et trois trous destinés à diminuer la masse du panier. Les éléments combustibles sont irradiés ou non, composé de plaques cintrées suivant une développante de cercle et enfilées dans les rainures de deux viroles concentriques en aluminium.
- Panier MTR-68 et éléments combustibles associés : le panier MTR-68 est composé d'un empilement de disques ajourés en acier inoxydable et en aluminium boré. Ce panier comporte 68 logements complets. Les éléments combustibles transportés dans l'emballage TN-MTR sont irradiés ou non et issus de réacteurs de recherche.
- Panier MTR-52 et éléments combustibles associés : le panier MTR-52 est composé d'un empilement de disques ajourés en acier inoxydable et en aluminium boré. Ce panier comporte 52 logements. Les éléments combustibles transportés dans l'emballage TN-MTR sont irradiés ou non, et issus de réacteurs de recherche.

- Le panier MTR-52S et éléments combustibles associés : le panier MTR-52S est composé d'un empilement de disques ajourés en acier inoxydable et en aluminium boré. Ce panier comporte 52 logements. Les éléments combustibles transportés dans l'emballage TN-MTR sont irradiés ou non, et issus de réacteurs de recherche. Si les éléments combustibles sont ruptés avant transport, ils doivent être transportés dans des bouteillons.
- Panier MTR-52SV2 et éléments combustibles associés : le panier MTR-52SV2 est composé d'un empilement de disques en acier inoxydable et en matériaux neutrophages. Ce panier comporte 52 logements. Les éléments combustibles transportés dans l'emballage TN-MTR sont irradiés ou non, et issus de réacteurs de recherche. Si les éléments combustibles sont ruptés avant transport, ils doivent être transportés dans des bouteillons.
- Le panier MTR-44 et éléments combustibles ou réflecteurs associés : le panier MTR-44 est composé d'un empilement de disques ajourés en acier inoxydable et en aluminium boré. Ce panier comporte 44 logements. Les éléments ou plaques combustibles ou éléments réflecteurs transportés dans l'emballage TN-MTR sont irradiés ou non, et issus de réacteurs de recherche.

Les contenus autorisés limitent les paramètres importants pour la sûreté qui sont utilisés dans le dossier de sûreté, en particulier :

- La géométrie et la masse maximale admissible.
- L'enrichissement maximal, le taux de combustion maximal, le temps de refroidissement minimal des éléments combustible.
- La masse maximale de métal lourd admissible par étui.
- La puissance thermique maximale du contenu.

2.4 Enceinte de confinement

L'enceinte de confinement est le volume délimité par les éléments suivants :

- fond de l'enceinte interne du corps ;
- virole de l'enceinte interne du corps ;
- bride jusqu'au joint interne du couvercle ;
- joint interne du couvercle ;
- disque supérieur du couvercle ;
- joints internes des tapes des orifices A et B ;
- tapes des orifices A et B pour le couvercle de type standard ou pour le couvercle de type SEC

2.5 Système d'isolement

Le système d'isolement est constitué :

- du contenu fissile ou d'éléments à plaques,
- de l'aménagement interne,

- de l'emballage auquel on a retiré son capot amortisseur et sur lequel la résine a disparu,
- de bouteillons en cas de transport d'éléments ruptés et / ou à plaques désassemblées.

2.6 Bilan de masses

Le tableau ci-dessous présente les masses maximales du contenu et du colis TN-MTR en configuration de transport.

Elément	Masse (kg)
Masse maximale du contenu (aménagement interne plus chargement)	2 800
Masse maximale du corps	16 250
Masse maximale du couvercle	2 700
Masse maximale du capot amortisseur	1 650
Masse maximale du colis autorisée au transport	23 400

La masse autorisée au transport est celle utilisée de façon générique dans les études de sûreté.

3. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE MECANIQUE

3.1 Conditions de transport de routine

L'emballage est dimensionné pour être transporté par voie routière, maritime ou ferroviaire.

Tenue aux accélérations

Le colis est conçu pour résister aux accélérations représentatives des conditions de transport de routine. Ces accélérations ne sont pas susceptibles d'engendrer des dommages au colis.

Tenue à la pression

Les exigences concernant l'enceinte de confinement sont :

- tenue à la pression interne maximale admissible en situation normale de service ;
- tenue à l'épreuve poussée d'immersion pour les colis présentant une activité maximale supérieure à $10^5 A_2$.

La pression interne admissible en situation normale de service est vérifiée suivant les règles du CODAP95 et conclut au bon comportement du colis. Cette pression vaut 11 bar pour une pression intérieure ou extérieure.

La tenue mécanique à l'épreuve poussée d'immersion, soit une pression manométrique extérieure de 2 MPa est vérifiée par des calculs analytiques en comparant les contraintes dans l'acier à 1,5 fois la limite élastique.

La conformité aux exigences est vérifiée.

Arrimage et manutention

Les dispositifs de manutention sont constitués de deux tourillons fixés à la bride de l'emballage à l'aide de vis. Le dispositif d'arrimage est assuré par quatre oreilles d'arrimage soudés à la virole externe de l'emballage TN-MTR.

En conditions de transport :

- seuls les points d'arrimage de l'emballage (oreille d'arrimage) sont sollicités ;
- la tenue des oreilles d'arrimage est garantie en statique et en fatigue.

Pendant les phases de manutentions, seuls les tourillons sont sollicités.

En conditions de manutention, la tenue des tourillons est garantie en statique et en fatigue.

Pour faciliter les opérations de manutention, l'emballage est transporté en position verticale.

3.2 Conditions normales de transport

Les analyses de sûreté étudient les conséquences des épreuves réglementaires simulant les conditions normales de transport.

Les études montrent que :

- La conséquence de l'aspersion d'eau est d'humidifier la surface externe de l'emballage, sans en modifier les caractéristiques.
- L'emballage peut supporter sans dommage l'épreuve de gerbage.
- L'énergie mise en jeu pour l'épreuve de pénétration est très inférieure à celle des essais de chutes, cette épreuve est donc sans conséquence sur l'emballage.
- L'épreuve de chute libre d'une hauteur de 30 cm de haut ne modifie pas notablement la géométrie de l'emballage compte tenu des très faibles déformations constatées.

Endommagements

L'étanchéité de l'emballage est conservée lors des chutes de 30 cm.

L'enveloppe de confinement est préservée et les déformations de l'enceinte externe de l'emballage sont faibles.

L'effet des déformations de l'emballage sur l'augmentation des débits d'équivalent de dose est étudié au paragraphe 6.2.

3.3 Conditions accidentelles de transport

Ce paragraphe détaille les conséquences des épreuves réglementaires simulant les conditions accidentelles de transport applicables au modèle de colis TN-MTR.

En particulier, dans la suite du paragraphe, l'ensemble des analyses de chute est réalisé en considérant une masse totale de colis de 23,4 tonnes.

Conformément à la réglementation pour les colis contenant des matières fissiles, les analyses de sûreté-criticité prennent en compte le cumul des épreuves de chutes des conditions normales et accidentelles de transport.

Tenue à l'épreuve d'immersion

Selon le §3.1, la pression admissible dans la cavité est de 11 bar pour une pression intérieure ou extérieure. Cette valeur est supérieure à la pression d'épreuve d'immersion dans l'eau : 1,5 bar ce qui assure la résistance de l'emballage.

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. La maquette de l'emballage est représentative de l'emballage échelle 1, et les différences de concept ou de fabrication sont pénalisantes ou sans incidence notable sur la résistance de la maquette ou sur son comportement dynamique.

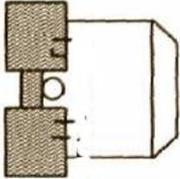
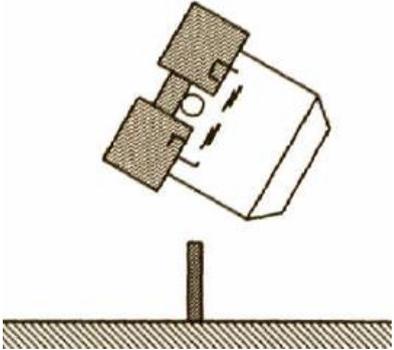
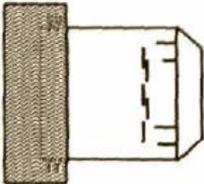
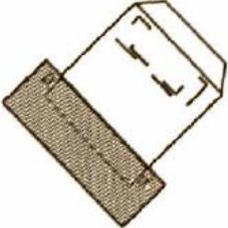
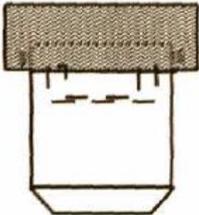
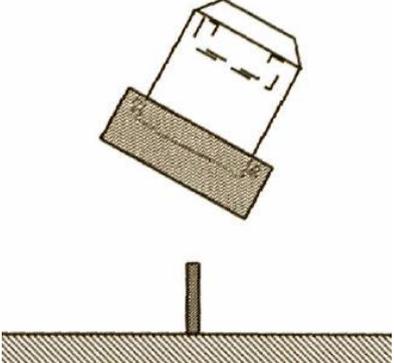
La maquette du panier utilisée lors des essais est représentative du chargement mécanique le plus pénalisant sur la cavité de l'emballage.

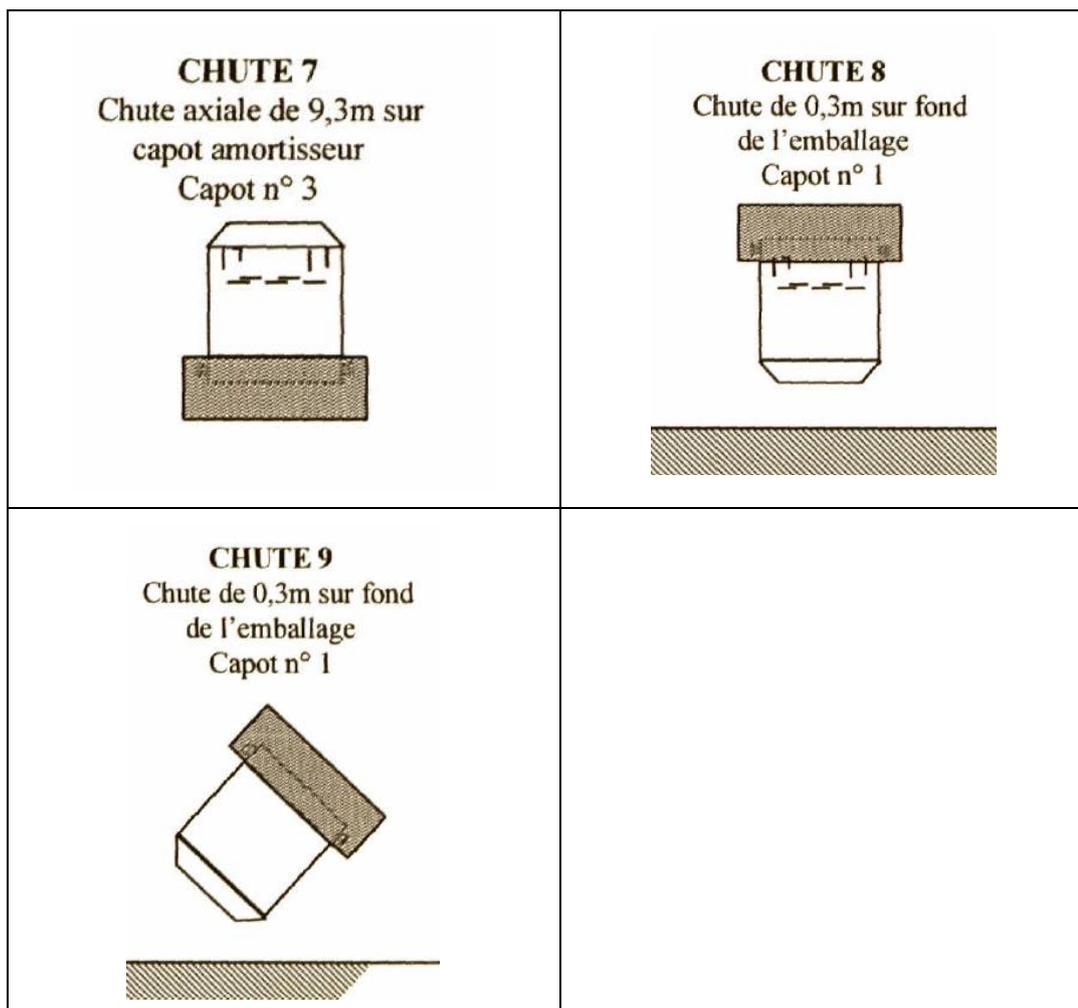
Ce panier est représentatif du comportement dynamique du panier MTR-68 en cas de chute latérale. Le chargement de ce panier est réalisé par des aiguilles, simulant de façon pénalisante le chargement des assemblages combustibles. Le panier est lesté, à l'aide d'une cale, à une masse enveloppe des contenus de l'emballage TN-MTR.

Ensemble des chutes étudiées

Toutes les configurations de chute définies par les conditions accidentelles des règles de l'AIEA, susceptibles de remettre en cause l'étanchéité de l'enveloppe de confinement, l'intégrité de la protection radiologique et thermique et du système d'isolement du modèle de colis sont étudiées.

Les 9 séquences de chutes retenues et réalisées lors de ce programme d'essais sont détaillées dans le tableau ci-dessous.

<p>CHUTE 1 Chute latérale de 9 m, axe perpendiculaire aux tourillons Capot n° 1</p> 	<p>CHUTE 2 Chute latérale de 1 mètre sur virole Capot n° 1</p> 
<p>CHUTE 3 Chute latérale de 9,15m, axe parallèle aux tourillons Capot n° 2</p> 	<p>CHUTE 4 Chute de 9,25m sur coin du capot amortisseur, axe parallèle aux tourillons Capot n° 2</p> 
<p>CHUTE 5 Chute de 9,3m sur fond de l'emballage Capot n° 1</p> 	<p>CHUTE 6 Chute de 1,3 mètre sur capot amortisseur Capot n° 3</p> 



Résultats

Les essais de chutes réalisés sur une maquette échelle ½ de l'emballage TN-MTR ont démontré que l'emballage TN-MTR résiste aux séquences de chutes réglementaires définies par le règlement AIEA <1>.

Il est vérifié que l'étanchéité de l'emballage est maintenue, même après une succession de chutes bien plus sévères que la séquence réglementaire.

Il est vérifié également que les déformations de l'emballage après chutes et a fortiori de l'enceinte de confinement sont faibles.

Tenue mécanique de l'emballage

La modélisation numérique à l'aide des logiciels de calcul dynamique LS-DYNA permet de reproduire le comportement observé sur la maquette.

Une étape de recalage du modèle permet en particulier de reproduire correctement le comportement mécanique global de la maquette lors des chutes.

Les résultats des simulations numériques effectuées pour analyser l'influence des chutes à basse température et à la température maximale atteinte dans les conditions normales de transport confirment le maintien de l'étanchéité du colis et l'intégrité du système de fermeture de l'emballage. Ces calculs couvrent l'ensemble des directions

de chute sur toute la plage possible de température réglementaire et prend en compte les variations possibles des propriétés des matériaux.

Tenue mécanique des aménagements interne

Les calculs mécaniques des aménagements internes de l'emballage TN-MTR et de leur contenu sont réalisés, soit de manière analytique, soit à l'aide de codes de calculs par élément finis. Les deux codes suivants sont utilisés :

- ANSYS pour l'étude des paniers MTR-68, MTR-52 et MTR-52S pour partie ;
- IDEAS pour l'étude des paniers RHF, MTR-52S pour partie et MTR-44.

Les résultats montrent, en tenant compte des phénomènes d'amplification dynamique, que les contraintes dans les paniers pour éléments combustibles de type MTR sont acceptables et que les déformations sont négligeables.

Il est également démontré la conservation de la géométrie et de l'intégrité des éléments combustibles MTR à plaques planes ou courbes pour des éléments irradiés ou non, ainsi que la tenue mécanique des systèmes de calage, des étuis et bouteillons utilisés.

Conclusion

Suite aux épreuves réglementaires des chutes en conditions accidentelles de transport, l'emballage TN-MTR conserve son étanchéité.

Les analyses montrent que l'emballage résiste aux différentes conditions d'épreuve de chute sans subir de dommages susceptibles de nuire au confinement du contenu, à l'efficacité du blindage et au maintien de la sous-criticité du colis.

Les calculs mécaniques sur la résistance des paniers, de leurs contenus, des systèmes de calage, des étuis et bouteillons utilisés montrent que les contraintes dans les paniers ainsi que les déformations des paniers et des systèmes de calage sont acceptables et que l'intégrité des contenus, des paniers, des étuis et bouteillons est conservée.

4. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE THERMIQUE

Méthode d'analyse en conditions de transport de routine, conditions normales de transport et conditions accidentelles de transport

Emballage

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

Les ailettes ne sont pas représentées, cependant, leur influence sur les échanges convectifs est prise en compte par l'application d'un coefficient correcteur sur le coefficient d'échange convectif.

Le couvercle est modélisé par la couche de plomb et l'enveloppe métallique externe.

La virole de renfort et les orifices ne sont pas modélisés.

Le capot est modélisé par ses tôles et ses différentes nuances de bois.

Du fait des symétries géométriques et des conditions aux limites, les calculs sont réalisés avec 1/4 du modèle.

Aménagements interne de l'emballage

Les calculs sont réalisés à l'aide de codes de calculs par éléments finis avec des conditions aux limites imposées. Selon les contenus étudiés, deux codes sont utilisés : ANSYS et IDEAS.

Les résultats obtenus peuvent être corrigés analytiquement en fonction de la puissance thermique maximale définie pour chacun des paniers, et en fonction des températures maximales de parois de cavité.

4.1 En conditions de transport de routine

Les températures atteintes par le colis en conditions de transport de routine sont couvertes par celles atteintes en conditions normales de transport.

4.2 En conditions normales de transport

Paramètres des contenus importants pour l'étude

Les caractéristiques utilisées dans cette étude sont une puissance thermique interne enveloppe de la puissance maximale autorisée et la position des différents contenus dans l'emballage.

Pour l'analyse thermique des aménagements internes de l'emballage TN-MTR, la puissance thermique varie suivant chaque panier et contenu.

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 de l'emballage.

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- le colis est transporté en position vertical,
- la température extérieure est la température réglementaire de 38°C,
- l'ensoleillement réglementaire est appliqué de manière pénalisante 24h/24h,
- le fond de l'emballage est considéré adiabatique,
- le panier est considéré centré radialement dans la cavité et posé sur le fond de l'emballage,
- le gaz de remplissage de la cavité est pris de façon pénalisante comme de l'air,
- la puissance thermique interne maximale dans l'emballage est une puissance enveloppe de la puissance maximale autorisée. Dans le modèle de calcul, cette puissance est appliquée volumiquement en partie supérieure du panier et sur une hauteur représentative des parties actives des éléments combustibles.

Résultats de l'étude

Pour toutes les configurations, la température maximale des composants sensibles à la température reste acceptable ; en particulier :

- Joint d'étanchéité : la température maximale des joints est inférieure à leur température maximale d'utilisation. L'absence de risque d'extrusion des joints de l'enceinte de confinement est démontrée.
- Plomb : la température maximale du plomb reste inférieure à sa température de fusion.
- Résine neutrophage : la température maximale de la résine reste inférieure à sa température maximale d'utilisation.

Les températures maximales atteintes par les matériaux des paniers et autres aménagements internes sont compatibles avec les caractéristiques de ces matériaux. Les températures maximales atteintes par les assemblages combustibles ou sources radioactives sont également acceptables en conditions normales de transport.

4.3 En conditions accidentelles de transport

Paramètre du contenu importants pour l'étude

Les caractéristiques utilisées dans cette étude sont une puissance enveloppe de la puissance maximale autorisée. Dans le modèle, la puissance est appliquée sur le milieu homogène représentant la partie active du panier. Afin de maximiser la température des joints, le jeu axial entre le contenu et le couvercle est considéré nul pendant et après le feu.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les calculs tiennent compte des endommagements de l'emballage à l'issue des épreuves de chutes réglementaires :

- les déformations subies par le corps de l'emballage après les épreuves de chutes sont considérées négligeables,
- le capot présente une perforation au droit du tourillon, simulant les conséquences d'une chute de 1 m sur poinçon,

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, puis température ambiante de 38°C en considérant l'ensoleillement appliqué conservativement 24h/24 ;
- lors de la phase de feu, la conductivité de la résine décroît linéairement afin de simuler sa combustion ;
- les températures des composants de l'emballage sont maximisées par la prise en compte du gradient circonférentiel présent sur la zone ailetée ;
- le colis est considéré, de manière pénalisante, en position horizontale durant la phase de refroidissement ;

- le gaz de remplissage de la cavité est pris de façon pénalisante comme de l'air ;
- le panier est considéré centré dans la cavité et posé au fond de l'emballage ;
- Le jeu radial panier-cavité est pris à 2 mm. L'influence du jeu radial est évaluée avec un cas de calcul spécifique dans lequel ce jeu est considéré nul pendant et après la phase de feu

Résultats de l'étude

La température atteinte par les joints est inférieure à leur température maximale d'utilisation, ce qui garantit l'étanchéité de l'enceinte de confinement à l'issue des conditions accidentelles de transport

La température maximale du plomb reste inférieure à sa température de fusion.

Les températures maximales atteintes par les matériaux des paniers et autres aménagements internes, en conditions accidentelles de transport, sont compatibles avec les caractéristiques de ces matériaux. Les températures maximales atteintes par les assemblages combustibles ou sources radioactives sont également acceptables.

5. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE CONFINEMENT

L'analyse de confinement du modèle de colis TN-MTR est réalisée pour les différents contenus transportable dans ce colis. L'enveloppe 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 :

- de la perméation de gaz à travers les joints élastomère ;
- des fuites de gaz radioactif ;
- des fuites de particules aérosols radioactives.

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Pour chaque contenu, des valeurs pénalisantes de volumes et d'activités des radionucléides sont prises en compte. Les caractéristiques des éléments MTR (enrichissement en ^{235}U , taux de combustion, temps de refroidissement) varient suivant le contenu étudié.

Les principaux paramètres entrant en compte dans les calculs de relâchement d'activité sont :

- le volume total des gaz de fission contenus dans les éléments combustibles ;
- l'activité des gaz de fission contenus dans les éléments combustibles ;
- l'activité des aérosols contenus dans les éléments combustibles.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les principales caractéristiques utilisées sont les suivantes :

- le taux de fuite SLR de l'enceinte de confinement contrôlé avant transport ;
- la pression de remplissage du colis définie dans les conditions d'utilisation ;
- le volume libre de la cavité ;
- les températures des gaz et des joints issues de l'analyse thermique ;

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- une partie seulement de la matière est susceptible de participer au relâchement d'activité en condition normale de transport ;
- de manière pénalisante, l'ensemble de la matière est susceptible de participer au relâchement d'activité en condition accidentelle de transport ;
- une pression externe égale à 0,6 bar est considérée ;
- les calculs sont réalisés en considérant le gaz de remplissage le plus pénalisant.

Méthode de calcul

La méthodologie adoptée est basée sur un scénario en 2 phases :

- La phase d'entrée d'air : pendant la durée de transport (1 an ou inférieure à 1 an selon les contenus), la pression atmosphérique est supposée maximale. Le colis étant en dépression, le flux de fuite se fait de l'extérieur vers l'intérieur, et augmente la pression dans la cavité. Il n'y a pas de relâchement d'activité pendant cette phase.
- La phase de relâchement d'activité : à la fin de la période de transport, la pression atmosphérique chute brutalement à 0,6 bar. Cette fois, le flux de fuite se fait de l'intérieur vers l'extérieur.

Résultats de l'étude

Les résultats de calcul permettent de déterminer une masse maximale d'uranium contenue dans les éléments combustibles ruptés avant transport. Ce critère est :

- valable pour un contenu incluant des éléments combustibles initialement ruptés chargés dans des bouteillons transportables dans l'emballage;
- donné en fonction du temps de refroidissement.

Il est démontré le respect des exigences réglementaires concernant le relâchement d'activité en conditions normales et accidentelles de transport pour les différents aménagements internes et contenus enveloppes des contenus autorisés en TN-MTR.

Les exigences réglementaires <1> concernant le relâchement d'activité en conditions normales et accidentelles de transport sont :

- en conditions normales de transport : $\leq 10^{-6} A_2/h$;
- en conditions accidentelles de transport : $\leq 1 A_2/semaine$.

Il est également démontré que la pression interne de transport maximale atteinte en conditions normales et accidentelles de transport reste inférieure à la pression d'utilisation normale maximale réglementaire de 7 bar et à la pression que peut subir l'enceinte de confinement.

6. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE DES DEBITS D'EQUIVALENT DE DOSE

Les critères retenus de débit d'équivalent de dose couvrant les conditions de transport telles que définies dans la réglementation <1> sont les suivants :

- conditions de transport de routine (CTR) : 2 mSv/h au contact du colis, 2 mSv/h au contact de la surface externe du véhicule et 0,1 mSv/h à 2 m des plans verticaux des parois latérales du véhicule ;
- conditions normales de transport (CNT): pas d'augmentation de plus de 20 % de l'intensité de rayonnement maximale au contact du colis ;
- conditions accidentelles de transport (CAT): 10 mSv/h à 1 m de la surface externe du colis.

Méthode de calcul :

Selon les contenus transportés, les termes sources sont calculés à partir des données sur les éléments fournis par l'exploitant et à l'aide des codes ORIGEN 2.1 et BDN, du code APOLLO 2.5 et du formulaire DARWIN 2.2.2, ou du code CESAR 5.3. Les débits d'équivalent de dose sont ensuite calculés avec les codes MERCURE V et SN1D, ou TRIPOLI 4.7 selon les contenus.

6.1 En conditions de transport de routine

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Pour chaque panier et chaque contenu étudié, une configuration de chargement pénalisante est prise en compte.

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 formé par :

- une virole interne en acier ;
- une couche de plomb et une couche de résine ;
- une virole externe en acier.

Le blindage axial à travers le couvercle est constitué de :

- Pour le couvercle de l'emballage de type « standard » :
 - Disque interne en acier
 - Couche de blindage en plomb
 - Disque extérieur en acier

- Pour le couvercle de l'emballage de type « SEC » :
 - Bague en acier
 - Bouchon en acier
 - Couvercle en acier

La virole de renfort et les tubes d'orifice du couvercle ont également été modélisés. La densité des tubes d'orifice a été recalculée pour prendre en compte le trou d'évacuation.

- Pour le capot amortisseur
 - tôle en acier
 - couronne en bois
 - tôle en acier
 - couronne en bois
 - enceinte externe en acier

Le blindage axial de fond est constitué d'une :

- enceinte interne en acier
- couche de blindage en plomb
- couche de résine (isolant)
- enceinte externe en acier

Hypothèses importantes pour l'étude

Véhicule

L'emballage TN-MTR est transporté dans un caisson dédié. La paroi externe du véhicule de transport n'est pas modélisée. Par ailleurs, selon les contenus étudiés, la distance entre la paroi de l'emballage et la paroi du véhicule peut être négligée de manière pénalisante.

Contenu en panier RHF

Les principales hypothèses sont les suivantes :

- l'emballage est équipé de son couvercle « standard » ;
- les débits de dose mesurés sont des DED gamma (il a été démontré que les sources de neutrons sont négligeables par rapport aux sources gamma).

Contenus en panier MTR-68, MTR-52, MTR-52S, MTR-52SV2, MTR-44

Les principales hypothèses pour les éléments combustibles irradiés à plaque MTR sont les suivantes (cette analyse reste valable lorsque les éléments combustibles sont chargés dans des étuis) :

- l'emballage est équipé de son couvercle « standard » ;
- le panier MTR-52 est considéré de manière pénalisante car enveloppe des paniers MTR-52S et MTR-52SV2 en termes de DED.

Les principales hypothèses pour les éléments combustibles irradiés UO₂ en panier MTR-44 sont les suivantes (cette analyse reste valable lorsque les éléments combustibles sont chargés dans des étuis) :

- l'emballage est équipé de son couvercle « standard ».

Les principales hypothèses pour les éléments réflecteurs en panier MTR-44 sont :

- l'emballage est équipé de son couvercle « standard » ou de son couvercle «SEC» ;
- l'absorption des rayonnements gamma dans le panier et dans les éléments réflecteurs eux-mêmes est négligée ;
- les éléments réflecteurs ne contenant pas d'émetteurs neutroniques, le débit d'équivalent de dose neutron est nul.

Résultats de l'étude

Le respect des critères réglementaires de débit d'équivalent de dose en conditions de transport de routine est garanti pour les contenus enveloppes des contenus à transporter, ainsi que lorsque les éléments combustibles sont chargés en étuis.

6.2 En conditions normales de transport

L'analyse en conditions normales de transport prend en compte les endommagements (écrasement) du capot et le déplacement du contenu dans la cavité.

Résultats :

Il est justifié que l'intensité de rayonnement maximale au contact du colis n'augmente pas de plus de 20 % à l'issue des épreuves réglementaires des conditions normales de transport.

6.3 En conditions accidentelles de transport

Hypothèses importantes pour l'étude

Emballage

Pour les conditions accidentelles de transport, les hypothèses pénalisantes suivantes sont retenues :

- le capot amortisseur et la résine sont considérés comme disparu (résine remplacée par de l'air) ;
- l'effet du tassement du plomb en chute axiale sur fond est pris en compte ;
- l'effet de l'écrasement du plomb en chute oblique sur fond est pris en compte.

Contenu

Pour les éléments combustibles irradiés à plaque MTR, les calculs de DED en conditions accidentelles de transport sont réalisés pour les contenus enveloppes et

pour le panier qui présente les DED les plus élevés en conditions de transport de routine quel que soit le point de mesure et la distance considérée.

Pour les éléments réflecteurs en panier MTR-44, la source peut occuper une position quelconque dans la cavité.

Résultats de l'étude

Il est justifié que les contenus radioactifs prévus pour le colis respectent le critère réglementaire de débit d'équivalent de dose à 1 m à l'issue du cumul des épreuves des conditions accidentelles de transport.

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

Le système d'isolement est défini au paragraphe 2.5.

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

- le colis isolé en conditions 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 des conditions normales de transport) ;
- le colis isolé en conditions 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.

Les critères de sûreté-criticité retenus pour la plupart des paniers sont les suivants :

- $k_{\text{eff}} + 3\sigma \leq 0,950$ pour le colis isolé ; toutes incertitudes comprises,
- $k_{\text{eff}} + 3\sigma \leq 0,980$ pour le colis en réseau ; toutes incertitudes comprises.

Certains contenus font toutefois l'objet de critères de sûreté-criticité spécifiques. Par exemple, pour les paniers MTR-52S et MTR-52SV2, chargés avec des éléments MTR à plaques désassemblées ou avec des éléments ruptés, ces critères sont :

- En colis isolé : $k_{\text{eff}} + 3\sigma \leq 0,930$
- En réseau infini de colis : $k_{\text{eff}} + 3\sigma \leq 0,930$

Hypothèses importantes pour l'étude

Pour les calculs en colis isolé, le colis est entouré d'une couche d'eau de 20 cm d'épaisseur.

L'enrichissement en ^{235}U , la masse d' ^{235}U par élément et le rapport $V/^{235}\text{U}$ respectent les critères définis pour chaque contenu.

Les principales hypothèses considérées pour tous les paniers sont :

- la résine est détruite et est remplacée par de l'air ou de l'eau selon la configuration la plus pénalisante ;
- le capot amortisseur a disparu.

Méthode de calcul pour tous les paniers

La méthode spécifique au colis TN-MTR dite « V/U » est utilisée pour la plus grande partie des contenus. Cette méthode ne tient pas compte de la géométrie de la plaque. Le milieu fissile est ainsi constitué d'un mélange homogène formé de la matière composant l'âme fissile, d'une partie de la gaine et du modérateur. Un calcul peut être enveloppe de plusieurs combustibles dans le cas où les critères relatifs au rapport V/U, à la masse d' ^{235}U par élément combustible et à l'enrichissement en ^{235}U sont respectés.

Le conservatisme de la méthode V/U est justifié dans les études de sûreté-criticité de l'emballage TN-MTR en comparant les résultats obtenus avec cette méthode, aux résultats obtenus en tenant compte de modélisation plus réalistes du contenu.

L'étude a permis de montrer qu'en termes de sûreté-criticité, la méthode V/U définie à partir d'un rapport V/U nominal est pénalisante.

Codes de calcul

Le code de calcul utilisé varie en fonction du contenu considéré et sont les suivants :

- Schémas de calcul APOLLO 1 - MORET III ou APPOLO 2 - MORET IV ;
- Schéma de calcul SCALE 4.3 - KENO V utilisant 27 groupes NDF4 de la bibliothèque de sections efficaces pour déterminer le k_{eff} ;
- Schéma de calculs MCNP5 avec les bibliothèques de sections efficaces ENDF-V, ENDF-VI et ENDF-VII.

Une étude de qualification des schémas de calcul utilisé dans les démonstrations de sûreté criticité du modèle de colis TN-MTR a été réalisée.

7.1 Panier RHF

7.1.1 Colis isolé

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses considérées sont :

- 3 éléments sont insérés dans les alvéoles du panier RHF
- la pénétration illimitée d'eau dans l'emballage est autorisée et par conception, il ne peut pas y avoir de vidange différentielle ;

Résultats de l'étude

Le panier RHF peut être chargé au maximum de 3 éléments combustibles RHF.

La réactivité maximale du colis obtenue avec une quantité d'eau illimitée est inférieure à 0,950.

Ainsi, la sûreté-criticité du colis isolé en transport est assurée à l'issue du cumul des épreuves des conditions normales et accidentelles de transport.

7.1.2 Réseau infini de colis

La modélisation du colis, les hypothèses, ainsi que la méthode de calcul sont reprises de l'étude du colis isolé en prenant en compte un réseau infini de colis.

Le panier RHF peut être chargé au maximum de 3 éléments combustibles RHF.

La réactivité maximale obtenue pour un réseau infini de colis est inférieure à 0,980.

L'indice de sûreté criticité vaut $CSI = 0$.

7.2 Panier MTR-68

7.2.1 Colis isolé

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses considérées sont :

- 64 éléments combustibles sont insérés dans le panier et au centre 4 logements sont laissés vacants ;
- la pénétration illimitée d'eau dans l'emballage est autorisée et par conception, il ne peut pas y avoir de vidange différentielle ;
- la taille des logements est légèrement pénalisant par rapport à leur taille maximale.

Résultats de l'étude

La réactivité maximale du colis obtenue avec une quantité d'eau illimitée est inférieure à 0,950 dans les conditions suivantes :

- les éléments combustibles de types différents ne sont pas mélangeables sauf exception ;
- les combustibles peuvent être transportés dans des étuis en aluminium non-étanches et prévus pour ne pas générer de vidange différentielle.

Ainsi, la sûreté-criticité du colis isolé en transport est assurée à l'issue du cumul des épreuves des conditions normales et accidentelles de transport.

7.2.2 Réseau infini de colis

La modélisation du colis, les hypothèses, ainsi que la méthode de calcul sont reprises de l'étude du colis isolé en prenant en compte un réseau infini de colis.

La réactivité maximale obtenue pour un réseau infini de colis est inférieure à 0,980.

L'indice de sûreté criticité vaut $CSI = 0$.

7.3 Panier MTR-52

7.3.1 Colis isolé

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses considérées pour tous les différents contenus radioactifs autorisés dans le panier MTR-52 sont :

- l'eau remplit tous les espaces vides de la cavité ;
- la matière fissile ne peut pas passer d'un logement à l'autre ;

Résultats de l'étude

La réactivité maximale du colis obtenue avec une quantité d'eau illimité est inférieure à 0,950.

Ainsi, la sûreté-criticité du colis isolé en transport est assurée à l'issue du cumul des épreuves des conditions normales et accidentelles de transport.

7.3.2 Réseau infini de colis

Pour chaque contenu, les modèles géométriques de l'emballage ainsi que les hypothèses concernant les milieux fissiles sont identiques à ceux et celles de l'étude dans la configuration d'un colis isolé endommagé.

Pour le calcul en réseau de colis, la cavité interne de l'emballage est remplie d'eau.

La modélisation du colis ainsi que la méthode de calcul sont reprises de l'étude du colis isolé en prenant en compte un réseau infini de colis.

La réactivité maximale obtenue pour un réseau infini de colis est inférieure à 0,980.

L'indice de sûreté criticité vaut $CSI = 0$.

7.4 Panier MTR-52S

7.4.1 Colis isolé

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses considérées pour tous les différents contenus radioactifs autorisés dans le panier MTR-52S sont :

- l'eau remplit tous les espaces vides de la cavité ;
- la matière fissile ne peut pas passer d'un logement à l'autre ;

- le conditionnement de la matière fissile ne doit pas donner lieu à une possibilité de vidange différentielle.

Les hypothèses supplémentaires spécifiques à certains éléments sont :

- pour les éléments à plaques désassemblées ou des éléments ruptés :
 - Tout élément rupté et/ou plaque désassemblée doit être chargé dans des bouteillons,
 - le bouchon du bouteillon a une hauteur variable de manière à prendre en compte la géométrie de la tulipe de manutention.

Résultats de l'étude

La réactivité maximale du colis obtenue avec une quantité d'eau illimitée est inférieure au critère de sûreté-criticité retenu selon les contenus. Ainsi, la sûreté-criticité du colis isolé en transport est assurée à l'issue du cumul des épreuves des conditions normales et accidentelles de transport.

7.4.2 Réseau infini de colis

La modélisation du colis, les hypothèses, ainsi que la méthode de calcul sont reprises de l'étude du colis isolé en prenant en compte un réseau infini de colis.

La réactivité maximale obtenue pour un réseau infini de colis est inférieure au critère de sûreté criticité retenu selon les contenus.

Pour certains contenus constitués d'éléments combustible MTR avec gaine en aluminium contenant divers alliages fissiles, l'indice de sûreté criticité vaut $CSI = 5 (50/N, \text{ avec } N=10)$.

Pour les autres contenus, l'indice de sûreté criticité vaut $CSI = 0$.

7.5 Panier MTR-44

7.5.1 Colis isolé

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses considérées sont :

- l'eau peut pénétrer dans tous les espaces vides du colis, y compris à l'intérieur des logements ;
- la matière fissile ne peut pas passer d'un logement à l'autre ;
- le conditionnement de la matière fissile ne doit pas donner lieu à une possibilité de vidange différentielle. Les éléments combustibles peuvent être placés dans des étuis perforés.

Un dépassement limité de la partie active du panier est toléré, dépendant du contenu.

Résultats de l'étude

La réactivité maximale du colis, obtenue avec une quantité d'eau illimitée, est inférieure à 0,950.

Ainsi, la sûreté-criticité du colis isolé en transport est assurée à l'issue du cumul des épreuves des conditions normales et accidentelles de transport.

7.5.2 Réseau infini de colis

La modélisation du colis ainsi que la méthode de calcul sont reprises de l'étude du colis isolé en prenant en compte un réseau infini de colis.

La réactivité maximale obtenue pour un réseau infini de colis est inférieure à 0,980.

L'indice de sûreté criticité vaut $CSI = 0$.

7.6 Panier MTR-52SV2

7.6.1 Colis isolé

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses considérées pour tous les différents contenus radioactifs autorisés dans le panier MTR-52SV2 sont :

- l'eau remplit tous les espaces libres dans la cavité ;
- la matière fissile ne peut pas passer d'un logement à l'autre ;
- le conditionnement de la matière fissile ne doit pas donner lieu à une possibilité de vidange différentielle.

Résultats de l'étude

La réactivité maximale du colis obtenue avec une quantité d'eau illimitée est inférieure au critère de sûreté-criticité retenu. Par ailleurs, le mélange des éléments de type combustibles de type différents est possible sous condition.

Ainsi, la sûreté-criticité du colis isolé en transport est assurée à l'issue du cumul des épreuves des conditions normales et accidentelles de transport.

7.6.2 Réseau infini de colis

La modélisation du colis ainsi que la méthode de calcul sont reprises de l'étude du colis isolé en prenant en compte un réseau infini de colis.

La réactivité maximale obtenue pour un réseau infini de colis est inférieure au critère de sûreté criticité retenu selon les contenus.

L'indice de sûreté criticité vaut $CSI = 0$.

8. CONDITIONS D'UTILISATION

L'emballage est conçu pour le transport :

- des éléments combustibles ou réflecteurs sous eau avec le couvercle standard ;
- des éléments combustibles à sec avec les couvercles SEC ou standard.

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

- la vérification que la matière radioactive chargée respecte l'ensemble des caractéristiques techniques définies par le contenu autorisé, y compris le plan de chargement ;
- la bonne fermeture (couple de serrage des vis) et le niveau d'étanchéité (taux de fuite) de tous les composants constituant la barrière d'étanchéité ;
- la mise en place de l'étiquetage réglementaire ;
- le remplissage de la cavité avec le gaz approprié suivant le contenu ;
- la mise en place des scellés ;
- le contrôle des débits d'équivalent de dose autour du colis en conformité avec les limites réglementaires ;
- la vérification de la non-contamination de l'emballage en conformité avec les limites réglementaires.

L'emballage vide éventuellement chargé d'aménagements internes peut être transporté en tant que colis excepté, sous réserve du respect des critères de contamination et d'intensité de rayonnement spécifiques.

En cas de transport ferroviaire, le triage par gravité est interdit et l'étiquette RID n°15 doit être apposée sur le wagon dans lequel est transporté le colis.

Un contrôle visuel des soudures des oreilles d'arrimage doit être réalisé avant chaque expédition.

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 des barrières d'étanchéité pour une durée compatible avec leur durée de vie ;
- le contrôle de l'état des composants des systèmes vissés afin de vérifier le maintien de leurs fonctions de sûreté ;
- le contrôle des tourillons, assurant la manutention du colis, et des oreilles d'arrimage.

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 document 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, Agence Internationale de l'Energie Atomique – Prescriptions, SSR-6, Edition 2012.

Les règles de conception et d'épreuves de l'édition 2012 du Règlement de l'AIEA sont reprises dans les 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) ;
- Code maritime international des marchandises dangereuses (code IMDG de l'OMI) ;
- Arrêté du 29 mai 2009 modifié relatif aux transports de marchandises dangereuses par voies terrestres (arrêté TMD) ;
- Arrêté du 23 novembre 1987 modifié relatif à la sécurité des navires, division 411 du règlement annexé (arrêté RSN).