

TN International				CHAPITRE 1.5				
DOSSIER DE SURETE EMBALLAGE TN G3				Préparation	Noms	Signatures	Date	
Réf.	DOS-13-00084300-050	Rév	3	Vérification				

Form : PM04-3-MO-3 rév. 2

Page 1/29

Version publique : les informations non-publiques sont masquées par un rectangle noir ■

CARACTERISTIQUES DE PERFORMANCES DU COLIS

SOMMAIRE

1. OBJET.....	3
2. DESCRIPTION ET DEFINITIONS	3
3. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE MECANIQUE	7
4. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE THERMIQUE	15
5. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE CONFINEMENT	19
6. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE RADIOPROTECTION	21
7. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE SURETE-CRITICITE.....	24
8. CONDITIONS D'UTILISATION	26
9. PROGRAMME D'ENTRETIEN PERIODIQUE.....	27
10. PROGRAMME D'ASSURANCE QUALITE	28
11. REFERENCES	28

ETAT DE LA REVISION

Révision	Date	Modifications	Préparé par / Vérifié par
0			
1		<ul style="list-style-type: none"> - - - - 	
2	Mai 2017	Refonte du document.	
3	Voir 1 ^{ère} page	Prise en compte des commentaires Mise à jour de la longueur hors tout de l'emballage Mise à jour des pressions de tarage des soupapes	

1. OBJET

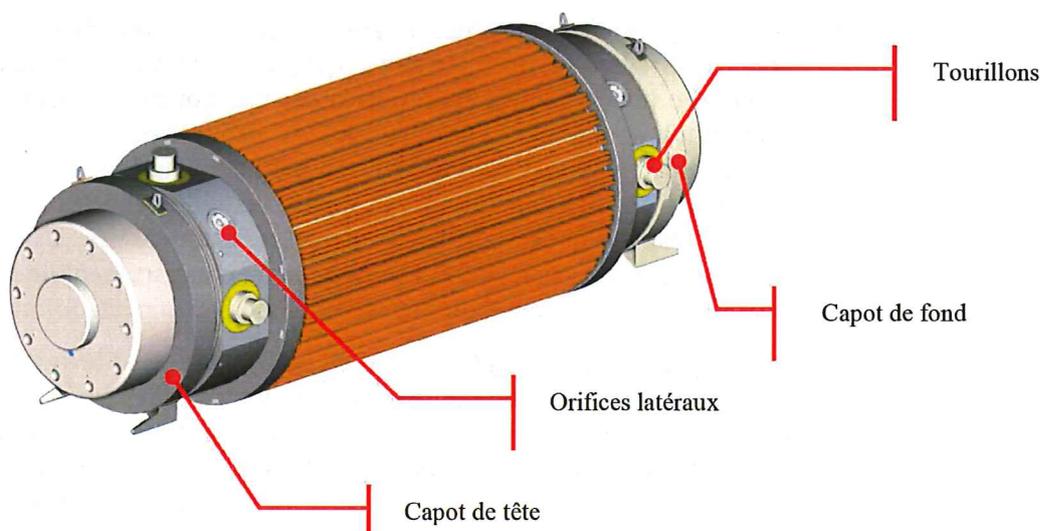
L'objet de ce chapitre est de décrire les caractéristiques des performances du colis TN[®]G3 version L ou version S, destiné au transport par voie routière, ferroviaire ou maritime, sous utilisation exclusive, d'assemblages combustibles REP 17x17 irradiés en tant que colis de type B(M) contenant des matières fissiles au regard de la réglementation <1>.

2. DESCRIPTION ET DEFINITIONS

2.1 Description du colis

Le combustible nucléaire utilisé issu du fonctionnement des réacteurs civils de puissance à eau légère pressurisée est constitué à partir de crayons de combustibles assemblés en réseau. Le traitement de ces produits nécessite leur transport entre les différents lieux d'utilisation (centrales nucléaires) et de traitement (usine). Le colis TN[®]G3 permet de réaliser ces transports.

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



Les dimensions générales hors-tout du colis sont :

- Longueur = 7,7 m (version L) et 7,2 m (version S) ;
- Diamètre externe = 2,5 m

Destiné au transport des assemblages de type REP 17 × 17 irradiés à oxyde d'uranium, le modèle de colis TN[®]G3 se décline en deux versions suivant le contenu envisagé :

- Version S : pour les assemblages combustibles de longueur active nominale de 12 pieds (environ 3,6 m),

- Version L : pour les assemblages combustibles de longueur active nominale de 14 pieds (environ 4,3 m).

Le colis TN[®]G3 est transportable par voie terrestre (routier ou ferroviaire), maritime ou fluviale.

2.2 Description de l'emballage

Les principaux composants de l'emballage sont :

- Un corps en acier forgé comportant une cavité interne et muni, à l'extérieur, d'un habillage comprenant un matériau de blindage neutronique et une structure de dissipation thermique avec des ailettes de refroidissement. Le corps forgé est composé de plusieurs parties (fond et virole) soudées sur la totalité de leur épaisseur. Des tourillons vissés sur le corps (4 en tête et 2 en fond) forment les points de préhension pour la manutention et l'arrimage pour le transport. Des orifices latéraux (1 en tête et 2 en fond) permettent un accès à la cavité ; ils sont obturés par un double système de fermeture vissé et équipé de joints élastomères. Aux extrémités de la zone ailetée, deux porte-jupes constitués d'un capotage en acier inoxydable contiennent une couronne en aluminium amortisseur permettant de limiter l'incidence des chocs lors des épreuves de chute réglementaires des conditions normales et accidentelles de transport.
- Un système de fermeture de la cavité, formé d'un bouchon maintenu par une bride de serrage en acier fixée par des vis, et un couvercle en acier maintenu par des vis. Le bouchon comprend également une couche de matériau de blindage neutronique et de protection contre les rayonnements gamma, ainsi qu'un amortisseur permettant de limiter le choc du contenu lors des épreuves de chute réglementaires des conditions normales et accidentelles de transport. Ce bouchon est muni de 2 orifices équipés respectivement d'un raccord rapide donnant accès à la cavité de l'emballage et au compartiment de l'amortisseur. Ils sont obturés par un capuchon de raccord vissé et équipé de joints élastomères.
- Deux capots amortisseurs (en tête et en fond) protégeant le système de fermeture et le fond de l'emballage contre les chocs des conditions normales et accidentelles de transport. Ces capots sont constitués d'un capotage en acier inoxydable, rempli de deux types de matériaux amortisseurs (l'un en aluminium, l'autre en mousse). Les capots sont emboîtés sur le corps de l'emballage au moyen d'une couronne d'emboîtement en acier inoxydable, et maintenus en place par des vis. Le capot de tête est également équipé d'une plaque épaisse anti-poinçonnement afin de protéger le système de fermeture lors des épreuves des conditions accidentelles de transport.

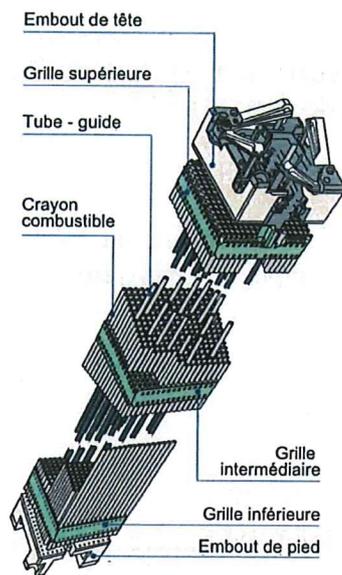
La version L diffère uniquement de la version S par une longueur en partie courante plus longue.

2.3 Description du contenu

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

L'aménagement interne est composé d'un panier et de cales destinés à recevoir les assemblages combustibles.

- Le panier de l'emballage TN[®]G3 consiste en un assemblage vissé d'éléments en aluminium, d'éléments en aluminium enrichi en bore et d'éléments de renfort en acier inoxydable, délimitant douze logements longitudinaux de section rectangulaire dans lesquels sont placés les assemblages combustibles. Ces éléments sont emboîtés en périphérie dans des lunules en aluminium qui ferment extérieurement les logements. La manutention de l'ensemble est assurée par l'intermédiaire de 4 tirants en acier inoxydable. La longueur du panier est adaptée à la version S ou L de l'emballage.
- Chaque combustible est supporté par une cale en acier déposée au fond de chaque logement. Ces cales permettent de positionner les assemblages dans la cavité.



Le schéma de principe ci-contre illustre la constitution d'un assemblage combustible pour réacteur à eau sous pression (REP).

Il comprend des crayons combustibles formant un réseau incomplet 17x17 à pas carré. 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.
- L'enrichissement maximal, le taux de combustion moyen maximal et le temps de refroidissement minimal des assemblages combustibles, résumés dans le tableau suivant :

	Contenu n°1	Contenu n°2
Combustible	UO ₂	
Enrichissement maximal en ²³⁵ U	5 %	
Taux de combustion moyen maximal	62 000 MWj/tU	70 000 MWj/tU
Durée de refroidissement minimal	12 mois	24 mois

- La masse maximale d'uranium dans l'assemblage.

- La puissance thermique maximale dégagée par l'assemblage.
- Les sources de rayonnement maximales exprimées sous forme d'un système d'inéquations permettant de respecter les exigences réglementaires de débit d'équivalent de dose du modèle de colis.
- La quantité et l'activité des radioéléments présents dans les crayons après leur irradiation dans le réacteur et après la durée de refroidissement requise.
- La quantité totale maximale admissible d'eau présente dans les crayons inétanches et la durée de transport maximale de transport admissible associée au transport de ces crayons.

2.4 Barrières d'étanchéité

L'emballage TN[®]G3 est constitué d'un corps épais dont chaque ouverture est fermée par 2 barrières d'étanchéité indépendantes décrites ci-après.

Corps épais

Le corps épais est constitué de la virole épaisse en acier forgé, du fond en acier forgé, et de la soudure pleine pénétration liant ses composants entre eux.

Première barrière

La première barrière d'étanchéité est constituée par :

- Le bouchon et son joint élastomère,
- Les 2 capuchons de raccord rapide et leur joint élastomère présents sur le bouchon,
- Les 3 tampons et leur joint élastomère présents sur chaque orifice latéral,
- Les 3 sièges de tampon et leur joint élastomère présents sur chaque orifice latéral.

Deuxième barrière

La deuxième barrière d'étanchéité est constituée par :

- Le couvercle et son joint élastomère,
- Le capuchon de raccord rapide et son joint élastomère présent sur le couvercle,
- Les 3 opercules et leur joint élastomère présents sur chaque orifice latéral.

2.5 Enceinte de confinement

L'enceinte de confinement est constituée par le corps épais et ses 2 barrières d'étanchéité décrites au § 2.4.

2.6 Système d'isolement

Le système d'isolement est constitué par :

- La masse de métal lourd et l'enrichissement du contenu radioactif,
- Le corps épais en acier forgé et les deux barrières d'étanchéité décrits au § 2.4.

2.7 Bilan de masses

La masse maximale autorisée du colis TN[®]G3 en transport est de 117 000 kg.

La masse autorisée au transport est celle utilisée de façon générique dans les études de sûreté : par exemple pour la tenue des tourillons, l'énergie de chute pour les conditions accidentelles. Les composants analysés dans ces études tels que les tourillons, les amortisseurs (capots, porte jupe), le système de fermeture et ses vis, sont identiques entre les versions S ou L. Ainsi, la masse autorisée au transport est la même pour les deux versions.

3. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE MECANIQUE

3.1 Conditions de transport de routine

Arrimage et manutention

L'arrimage et la manutention du colis sont réalisés par les 3 paires de tourillons vissés sur le corps forgé.

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

Les études permettent de justifier la tenue des tourillons pour une utilisation de 40 ans.

Tenue à la pression

La virole épaisse, son fond soudé, le bouchon et sa bride de serrage constituent une enceinte à pression dimensionnée à une pression relative de 7 bars selon les règles de calcul du code ASME Division 1 Sous-section NB. Cette pression de dimensionnement est bien supérieure aux pressions pouvant être rencontrées en conditions réglementaires de transport.

Le couvercle est justifié pour une pression relative de 2 bars selon les règles de calcul du code ASME Division 1 Sous-section NB.

Les autres enceintes fermées sont justifiées pour une pression de 0,1 bar relatif (pour les caissons sur le corps et sur le bouchon) ou 0,02 bar relatif (pour les caissons étanches des capots), compte tenu de la présence de valves de surpression tarée au plus à ces pressions.

3.2 Conditions normales de transport

Les analyses de sûreté étudient l'épreuve réglementaire de chute libre de 30 cm de hauteur. Les autres épreuves réglementaires (gerbage, aspersion et pénétration d'une barre) **ne modifient pas les performances du colis.**

Endommagements

Les amortisseurs (capots, supports de jupe du corps) ne subissent pas de dégradation significative et le panier maintient sa géométrie lors de l'épreuve de chute libre.

3.3 Conditions accidentelles de transport

L'ensemble des analyses de chute est réalisée en considérant une énergie de chute correspondant à une masse totale de colis de 117 tonnes.

Conformément à la réglementation pour les colis contenant des matières fissiles, le colis doit subir le cumul des épreuves de chutes des conditions normales et accidentelles de transport. Ce cumul est pris en compte en rehaussant de 30 cm la hauteur de chute libre de l'épreuve accidentelle (soit 9,3 m au lieu de 9 m).

Ensemble des chutes étudiées

Toutes les configurations possibles de chute libre de 9 mètres et de 1 mètre sur poinçon sont étudiées ; soit au total 11 chutes libres et 13 chutes sur poinçon.

Les séquences de chutes retenues pour être testées physiquement sont celles maximisant :

- les dommages possibles aux barrières d'étanchéité du système de fermeture (séquences AT, AF, OT, OC et LT définies ci-après) ou,
- les sollicitations possibles dans le système de fixation des capots de tête et de fond (séquence QH définie ci-après).

Lorsque nécessaire, des modèles numériques du colis sont construits afin de simuler les configurations de chutes à l'aide du logiciel de calcul dynamique LS-DYNA3D. Les études réalisées avec ces modèles permettent en particulier de :

- valider les configurations de chute les plus pénalisantes à réaliser sur la maquette, comprenant le choix de l'angle de chute et de la génératrice d'impact.
- valider le caractère pénalisant des géométries (jeux dans le système de fermeture...) et des matériaux de la maquette de chute.

Principe de définition de la maquette de chute

Les épreuves de chutes ont été réalisées avec une maquette pénalisante du modèle de colis à l'échelle 1/3 ; c'est-à-dire que toutes les dimensions sont réduites d'un tiers.

Les règles de similitude sont appliquées afin de garantir que les contraintes mécaniques dans les composants de la maquette sont a 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.

La maquette de chute a été fabriquée de manière à simuler le comportement le plus défavorable du modèle de colis. Ainsi :

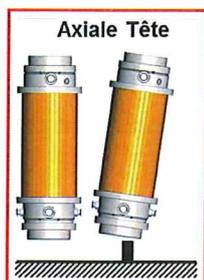
- Les matériaux amortisseurs sont caractérisés par une contrainte d'écrasement pouvant varier sur la plage permise par le modèle. Selon les configurations de chute, les amortisseurs de la maquette sont volontairement plus mous, ou plus durs que la plage autorisée par le modèle.
- Les matériaux des composants de structure dont on teste la résistance (composants constituant les deux barrières d'étanchéité par exemple) sont volontairement dégradés sur la maquette par rapport au minimum requis par le modèle.

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.

Séquence Axiale Tête (AT)

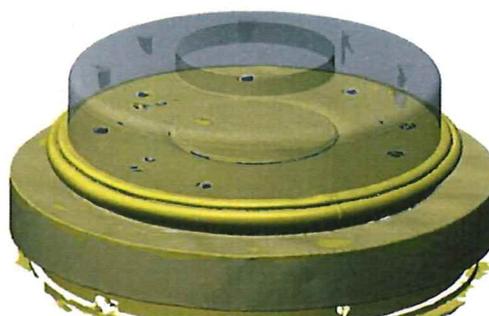


La 1^{ère} chute est une chute libre de 9,3 mètres dans l'axe du colis côté système de fermeture. Cette chute sollicite l'étanchéité des deux barrières. En particulier, cette chute a été réalisée avec l'impact différé du contenu.

La 2^{ème} chute est une chute libre sur poinçon au centre du couvercle afin de maximiser les effets de flexion et poinçonnement pouvant remettre en cause son étanchéité.

- Lors de la 1^{ère} chute : le capot amortisseur a parfaitement assuré sa fonction en s'écrasant (voir le scan 3D ci-contre présentant le capot avant et après la chute).

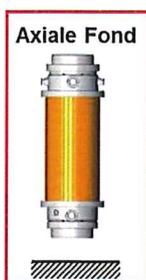
Durant cette chute, le contenu était retenu à l'opposé du système de fermeture durant la chute libre. Le contenu est venu percuter le bouchon avec un retard. Cet effet appelé « impact différé » sollicite au maximum le système de fermeture. Afin de protéger le bouchon et ses vis de cette sollicitation, un amortisseur à l'intérieur de la cavité permet d'absorber ce choc. L'efficacité de cet amortisseur a ainsi pu être validée.



- Lors de la 2^{ème} chute : le poinçon a perforé le capot écrasé par la 1^{ère} chute mais a été arrêté par la plaque anti-poinçonnement incluse dans le capot, avant tout dommage sur le couvercle (2^{ème} barrière d'étanchéité du colis).
- A la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de l'emballage TN[®]G3 conservent un bon niveau d'étanchéité.



Séquence Axiale Fond (AF)

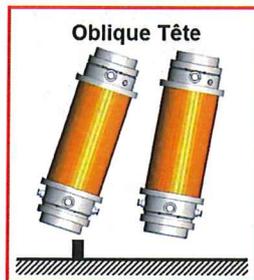


Cette chute libre de 9,3 mètres a été réalisée dans l'axe du colis côté fond. Elle sollicite le système de fermeture en flexion sous son propre poids, ainsi que d'éventuels phénomènes vibratoires.

- Lors de la chute : le capot amortisseur a parfaitement assuré sa fonction en s'écrasant (voir le scan 3D ci-contre présentant le capot après la chute).
- A la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de l'emballage TN[®]G3 conservent un bon niveau d'étanchéité.



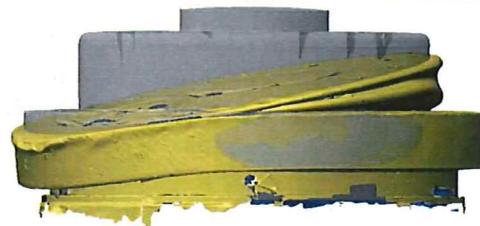
Séquence Oblique Tête (OT)



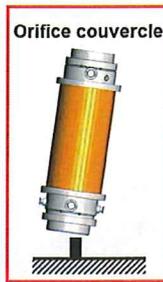
La 1^{ère} chute libre sur poinçon vise à endommager au maximum le capot amortisseur de tête qui sert lors de la chute suivante.

La 2^{ème} chute libre de 9,3 mètres sur le même capot endommagé sollicite le système de fermeture. Le point d'impact est aligné avec le centre de gravité afin de prévenir le basculement du colis ; toute l'énergie de chute est ainsi reprise lors de l'impact.

- Lors de la 1^{ère} chute : le poinçon a perforé le capot, puis la maquette a basculé. Ce basculement provoqué en n'alignant pas le centre de gravité et le point d'impact a pour but de maximiser les dommages sur le capot amortisseur.
- Lors de la 2^{ème} chute : le capot amortisseur a parfaitement assuré sa fonction en s'écrasant (voir le scan 3D ci-contre présentant le capot avant et après la chute).
- A la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de l'emballage TN[®]G3 conservent un bon niveau d'étanchéité.



Séquence Orifice Couvercle (OC)



Cette chute libre sur poinçon vise à perforer la plaque anti-poinçonnement du capot de tête et endommager l'orifice présent sur le couvercle faisant partie de l'enceinte de confinement.

Lors de cette chute, le poinçon a perforé le capot et a été arrêté par la plaque anti-poinçonnement incluse dans le capot, sans la perforer, empêchant ainsi tout dommage sur le couvercle et son orifice (2^{ème} barrière d'étanchéité du colis).



A la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de l'emballage TN[®]G3 conservent un bon niveau d'étanchéité.

Séquence Latérale Tête (LT)



La 1^{ère} chute libre sur poinçon vise à endommager au maximum le capot amortisseur de tête qui sert lors de la chute suivante.

La 2^{ème} chute libre de 9,3 mètres sur le même capot endommagé sollicite le système de fermeture avec un angle. Le point d'impact n'étant pas aligné avec le centre de gravité, le basculement provoque un 2^{ème} impact côté fond.

- Lors de la 1^{ère} chute : le poinçon a perforé la couronne aluminium du capot (zone cerclée rouge ci-contre), puis la maquette a basculé. Les dommages sur le capot amortisseur sont ainsi maximum avant la chute suivante.



- Lors de la 2^{ème} chute : le capot amortisseur a parfaitement assuré sa fonction en s'écrasant (voir la photo ci-contre).

Le basculement naturel de la maquette a provoqué un deuxième impact côté fond repris par le support de jupe.

- A la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de l'emballage TN[®]G3 conservent un bon niveau d'étanchéité.



Séquence Quasi-Horizontale (QH)

Quasi-Horizontale



Le colis chute dans une position quasi-horizontale. Le faible angle par rapport à l'horizontale génère un premier impact sur le support de jupe côté fond.

La rotation du colis autour du point d'impact provoque un effet de fouettement augmentant les dommages lors du deuxième impact côté tête, et crée en particulier un effet d'éjection du capot de tête.

La tenue du capot de tête est indispensable pour assurer une isolation thermique du système de fermeture lors l'épreuve réglementaire de feu.

- Après la chute (photo ci-contre), les vis de fixation du capot de tête sont restées intègres maintenant le capot solidaire du colis.
- A la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de l'emballage TN[®]G3 conservent un bon niveau d'étanchéité.



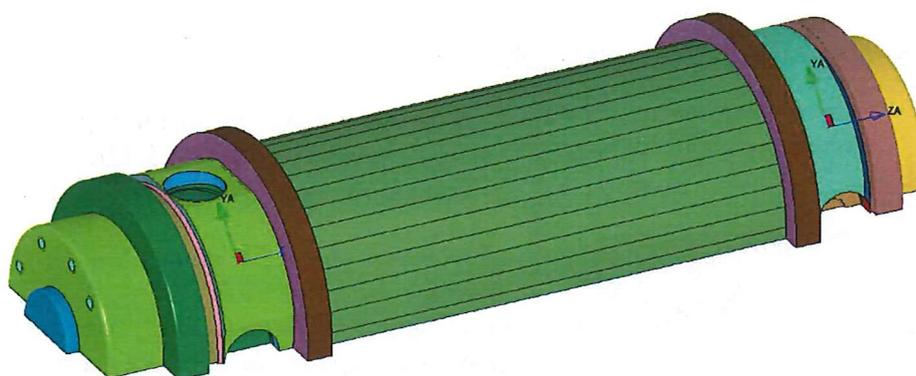
Fin de campagne de chutes

A la suite de l'ensemble des séquences de chutes décrites ci-avant, des mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent un bon niveau d'étanchéité de la soudure du corps forgé acier de la maquette.

Modélisation numérique

La modélisation numérique (demi-modèle illustré ci-après) permet de reproduire le comportement observé sur la maquette lors de toutes les chutes libres de 9,3 m, à l'aide du logiciel de calcul dynamique LS-DYNA3D.

Cette étape de recalage du modèle permet en particulier de reproduire correctement l'accélération globale lors de la chute, la déformation des amortisseurs externes, et de majorer numériquement les efforts dans les vis du système de fermeture (bouchon et couvercle) qui ont été mesurés lors des chutes à l'aide de vis instrumentées. Dans le cas particulier de la séquence AT, le modèle reproduit également l'accélération vue par le contenu (effet de l'impact différé) et la déformation de l'amortisseur interne.



Par la suite, les principes de modélisation du modèle numérique de la maquette validé par la chute réalisée sont appliqués au modèle de colis afin de :

- valider les plages de variation des composants du colis ;
- dans le cas particulier de la chute OT, valider la tenue du système de fermeture en tenant compte d'un impact différé du contenu ;
- déterminer l'accélération maximale permettant de vérifier la tenue mécanique du panier ;
- valider l'absence de risque de rupture brutale à -40 °C de la bride de serrage du bouchon : l'intensité de contrainte maximale reste inférieure à la ténacité du matériau, sur la base d'un défaut normalisé. Un facteur de sécurité réglementaire de 1,4 est considéré.
- valider la tenue du système vissé des capots ; dans cet objectif des essais complémentaires réalisés sur des essais élémentaires représentatifs du système vissé des capots de la maquette et du modèle d'emballage ont permis de qualifier un critère de tenue en rupture.

Enfin, les résultats numériques confirment l'étanchéité du modèle en démontrant que le taux de compression des joints d'étanchéité après chute reste suffisant. Ces calculs couvrent toute la plage possible de température (de -40 °C aux températures maximales des conditions normales de transport) en fonction des variations

possibles des propriétés des matériaux et de leur évolution au cours du temps (déformation rémanente à la compression des joints).

Suite aux épreuves réglementaires des chutes en conditions accidentelles de transport, les deux barrières de l'emballage TN[®]G3 conservent leur étanchéité, et ce pour toutes les configurations de chute.

Un modèle numérique spécifique du panier permet d'en démontrer la résistance lors des différentes configurations de chutes, en se basant sur les accélérations déterminées par les modèles numériques du colis. Les calculs dynamiques LS-DYNA3D permettent de vérifier la non rupture (déformation inférieure à la limite à la rupture du matériau) de la structure en acier haute résistance assurant la cohésion du panier. Ces calculs couvrent toute la plage possible de température (de -40 °C aux températures maximales des conditions normales de transport) en fonction des variations possibles des propriétés des matériaux.

Les autres endommagements de l'emballage concernent principalement les éléments amortisseurs (capots et couronnes de porte jupe).

La virole et le fond sont constitués entièrement d'acier dont le risque de rupture brutale à - 40 °C est écarté par la garantie de sa non-fragilité à cette température. Seule la soudure virole / fond fait l'objet d'une analyse mécanique écartant le risque de rupture brutale à - 40 °C.

4. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE THERMIQUE

4.1 En conditions de transport de routine

Paramètres du contenu importants pour l'étude

La caractéristique utilisée dans cette étude est la puissance linéique maximale définie dans la définition du contenu autorisé.

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,
- la présence d'hélium dans la cavité,
- la virole en acier, son épaisseur,
- les conducteurs en cuivre, leur épaisseur,
- la convection entre les ailettes externes de refroidissement qui est caractérisée par un recalage sur un essai thermique sur une maquette tranche représentative du colis à l'horizontal, c'est-à-dire dans sa position de transport.

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- La température ambiante réglementaire,
- l'ensoleillement réglementaire appliqué de manière pénalisante 24h/24h.

Méthode d'analyse

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 simplifications du modèle sont :

- Un demi-modèle est réalisé compte tenu de la symétrie du modèle de colis.
- La puissance des assemblages combustibles est directement appliquée sur les parois des logements. Le profil de puissance thermique des assemblages combustibles est pris en compte. 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 (à mi-longueur) 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.
- Les ailettes externes favorisant le refroidissement du colis ne sont pas représentées. Le modèle tient compte des ailettes par l'intermédiaire d'un coefficient d'échange convectif calculé à partir d'un essai thermique réalisé sur une tranche d'emballage.

Les différentes positions des assemblages combustibles et du panier dans la cavité pouvant conduire à majorer les températures des composants sensibles de l'emballage (joints de confinement et résine) sont étudiées.

Résultats de l'étude

Le champ de températures 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. 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

Les épreuves réglementaires relatives aux conditions normales de transport n'affectent pas le comportement thermique du colis. Les températures atteintes par le colis en conditions normales de transport sont identiques à celles atteintes en conditions de transport de routine et les conclusions restent applicables.

4.3 En conditions accidentelles de transport

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les calculs tiennent compte des endommagements suivants :

- Perforation d'un caisson de résine du corps suite à une chute sur poinçon au droit de l'orifice.
- La mousse dans les capots amortisseurs n'est pas prise en compte ; seules la plaque anti-poinçonnement, la virole d'emboîtement et la couronne aluminium des capots sont modélisés ; la plaque anti-poinçonnement est modélisée au plus près du corps de l'emballage.
- Le compartiment amortisseur sous le bouchon est considéré écrasé.

Pour le refroidissement après feu, le colis est considéré en position la plus pénalisante vis-à-vis des échanges dans la zone ailetée, c'est-à-dire en position verticale. L'échange convectif dans la zone ailetée a été caractérisé par des essais thermiques sur maquette plaque.

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 avec le même modèle qu'en conditions de transport de routine.

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 dans la zone ailetée égal au coefficient recommandé par la réglementation de $10 \text{ W/m}^2/\text{K}$ représentatif d'une convection forcée dans un incendie englobant, augmenté par l'accroissement de surface totale des ailettes.
- 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. le coefficient d'échange convectif dans la zone ailetée est celui de la convection naturelle du colis en position verticale (position plus pénalisante pour la convection). Ce coefficient est issu d'un recalage sur un essai thermique.
- b. L'émissivité des surfaces externes reste à 0,8.

Les différentes positions des assemblages combustibles et du panier dans la cavité pouvant conduire à majorer les composants sensibles de l'emballage (joints de confinement et résine) sont étudiées.

Résultats de l'étude

L'exposition des joints à :

- 1 an en continu à la température maximale obtenue en conditions de transport de routine et 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 TN[®]G3 inclut le cas du colis contenant des assemblages combustibles mais aussi pour le colis vide d'assemblage. L'enceinte de confinement est définie au § 2.5.

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 des gaz tritium et krypton à travers les joints élastomère ;
- Les fuites de gaz radioactif ;
- Les fuites de particules aérosols radioactives.

5.1 Conditions de transport de routine

En Conditions de Transport de Routine, la pression d'utilisation normale maximale est négative ce qui prévient toute fuite vers l'extérieur.

5.2 En conditions normales de transport

Paramètres du contenu importants pour l'étude

La quantité et l'activité des radioéléments sont déterminées sur la base des caractéristiques du combustible suivantes :

Historique d'irradiation	Contenu n°1	Contenu n°2
Combustible	UO ₂	
Taux de combustion moyen	62 000 MWj/tU	70 000 MWj/tU
Durée de refroidissement	12 mois	24 mois

Dans le cas d'un transport avec au moins un crayon inétanche, la quantité d'eau totale apportée par ce(s) crayon(s) est prise en compte.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les principales caractéristiques utilisées sont les suivantes :

- Les taux de fuite **maximaux** de chacune des barrières d'étanchéité vérifiés avant expédition.
- La pression maximale de remplissage du colis défini dans les conditions d'utilisation.
- La pression de vapeur saturante due à la présence d'eau dans les crayons inétanches.
- Les températures maximales des gaz et des joints issues de l'analyse thermique.

- Le volume libre dans la cavité.
- La nature et la géométrie des joints des barrières d'étanchéité qui impactent les fuites par perméation.

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- Le taux de crayons ruptés en conditions normales de transport est de 5 %.
- Le taux de relâchement des gaz de fission (dit RGF) est conforme aux recommandations de l'ASN.
- La pression externe du colis est de 0,85 bar ; cette pression limite le transport à une altitude de 1000 m par rapport au niveau de la mer.
- La durée de transport de 275 jours pour le contenu sans crayon inétanche, et de 60 jours avec au moins un crayon inétanche.

Méthode de calcul

La méthodologie décrite dans la norme ISO 12807 est basée sur un scénario en 2 phases :

- A. La phase de rentrée d'air : pendant la durée de transport (275 jours pour les contenus sans inétanche ; 60 jours pour les contenus comprenant au moins un crayon inétanche), la pression atmosphérique est supposée majorante (1,1 bar absolu). 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.
- B. La phase de relâchement d'activité : à la fin de la période de transport, la pression atmosphérique chute brutalement à 0,85 bar. Cette fois, le flux de fuite se fait de l'intérieur vers 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 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.

Dans le cas d'un transport avec au moins un crayon inétanche, de l'eau résiduelle peut subsister à l'intérieur du crayon. La radiolyse de cette eau conduit à générer du dihydrogène. La quantité de gaz produite doit rester inférieure à la limite inférieure d'inflammabilité dans la cavité, qui est déterminée en considérant les températures maximales des gaz issues de l'étude thermique en conditions accidentelles de transport. Cette limite sert de critère pour les mesures d'hydrogène requises avant expédition (voir paragraphe 8), permettant le calcul de la durée de transport.

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): 2 mSv/h au contact du colis et 0,1 mSv/h à 2 m du colis.
- Conditions normales de transport (CNT): moins de 20 % d'augmentation de l'intensité de rayonnement maximale au contact du colis.
- Condition accidentelles de transport (CAT): 10 mSv/h à 1 m du colis.

6.1 En conditions de transport de routine

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Les sources de rayonnement du contenu radioactif maximal sont limitées par la définition d'un système d'inéquations présenté dans la définition du contenu.

Pour les critères réglementaires à 2 mètres du colis, l'étude d'un chargement typique est réalisée avec les principales caractéristiques combustibles suivantes :

Historique d'irradiation	Contenu n°1	Contenu n°2
Combustible	UO ₂	
Taux de combustion moyen	60 000 MWj/tU	70 000 MWj/tU
Durée de refroidissement	24 mois	30 mois

Le profil d'irradiation des assemblages combustibles est pris en compte.

L'activation des pièces d'embout des assemblages combustibles durant leur irradiation en cœur 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 principalement formé par :

- la virole épaisse en acier,

- une couche de résine de blindage neutronique, traversée par des conducteurs en cuivre,
- une enveloppe externe constituée de plaques de cuivre.

Le blindage radial, en dehors de la zone centrale, est principalement formé par :

- la virole épaisse en acier dont l'épaisseur est localement réduite au niveau du système de fermeture et sous les tourillons,
- des caissons de résine protégés par les tôles de fermeture en acier,
- des tourillons contenant un bloc de résine et leur couronne de résine protégée par une tôle d'acier recouvrant les têtes de vis.

Le blindage axial en tête est principalement constitué par :

- les parties massives en acier du système de fermeture (bouchon, bride de serrage, couvercle) et la plaque anti-poinçonnement contenue dans le capot de tête,
- la couche de blindage supplémentaire contenue dans le bouchon,
- la couche de résine contenue dans le bouchon et sa tôle de fermeture en acier.

Le blindage axial en fond est principalement constitué par :

- le fond forgé de la virole,
- une couche de résine et sa tôle 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 20 ans en continu (chargement de la puissance maximale dans l'emballage pendant 20 ans).

Méthode de calcul

Les calculs de débits d'équivalent de dose ont été menés à l'aide du code TRIPOLI 4.4. Il permet de résoudre l'équation du transport des particules dans une géométrie à trois dimensions par la méthode de Monte Carlo. La bibliothèque des sections efficaces utilisée est ENDF/B-VI.

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 par le contenu radioactif maximal prévu pour le colis qui est défini par des inéquations de transport caractérisant les termes sources neutrons et gamma acceptables.

Les points dimensionnants se situent :

- Pour le TN[®]G3 version L : au contact à l'interface support de jupe-tourillon côté fond et à 2 m en radial mi-hauteur à 0° ;
- Pour le TN[®]G3 version S : au contact à l'interface support de jupe-tourillon côté tête et à 2 m en radial mi-hauteur à 80°.

6.2 En conditions normales de transport

En conditions de transport de routine, les débits d'équivalents de doses au contact du colis en axial tête et fond et en extrémité du support de jupe sont très faibles au regard du critère réglementaire. Suite aux épreuves des conditions normales de transport, les débits d'équivalents de dose au contact des zones endommagées (amortisseurs constitués des capots et du support de jupe) sont toujours faibles et sont couverts par le point dimensionnant au contact du colis, à l'interface support de jupe-tourillon. Il n'y a donc pas d'augmentation notable des débits d'équivalent de dose à la surface du colis en CNT.

Il est justifié que le colis ne dépasse pas le critère des CNT à l'issue des épreuves réglementaires des CNT.

6.3 En conditions accidentelles de transport

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les calculs tiennent compte des endommagements suivants :

- Disparition de la moitié de l'épaisseur de résine et de la totalité de la mousse des capots.

Résultats de l'étude

Il est justifié que le contenu radioactif maximal prévu pour le colis défini par les inéquations respecte le critère réglementaire de débit d'équivalent de dose à 1 m en conditions accidentelles de transport.

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

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

- le colis isolé en conditions de 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.

Les transports étant réalisés à sec, les conditions de transport de routine et conditions normales de transport sont couvertes par une seule configuration du colis en conditions accidentelles de transport en considérant le contenu ruiné.

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 Colis isolé

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Dans cette étude, les assemblages combustibles sont considérés comme ruinés, c'est-à-dire que seul l'oxyde d'uranium est modélisé dans la configuration géométrique la plus pénalisante (sous forme d'une sphère).

La matière est considérée hétérogène pour majorer la réactivité du colis.

L'enrichissement et la masse de métal lourd sont les principales caractéristiques du combustible importantes pour cette étude.

L'enrichissement maximal initial avant irradiation est pris en compte.

La masse totale maximale d'oxyde d'uranium des 12 assemblages combustibles est prise en compte.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les matériaux de structure de l'emballage et de l'aménagement interne ne sont pas pris en compte. La matière est entourée de 200 mm d'eau.

Hypothèses importantes pour l'étude

Le modèle d'emballage TN[®]G3 est constitué d'une double barrière d'étanchéité réputée étanche à l'issue des épreuves réglementaires, dont les contrôles avant transport pour vérifier la bonne fermeture, le séchage et l'étanchéité sont renforcés pour se prémunir de l'erreur humaine, et qui permet ainsi de considérer une introduction partielle d'eau dans la cavité conformément au paragraphe 680 du règlement de l'AIEA.

La quantité maximale d'eau présente dans le colis prend en compte les origines suivantes :

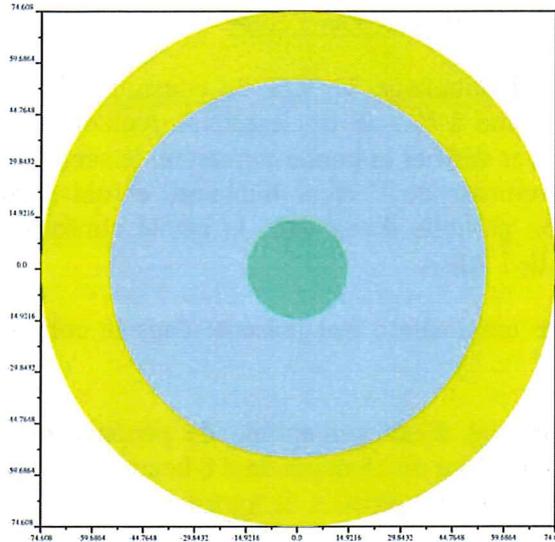
- la quantité d'eau susceptible de pénétrer lors d'une immersion sous une hauteur d'eau de 15 m pendant 8 heures à l'issue des épreuves réglementaires des conditions normales de transport,
- la quantité d'eau susceptible de pénétrer lors d'une immersion sous une hauteur d'eau de 0,9 m pendant une période étendue à 1 semaine à l'issue des épreuves réglementaires des conditions accidentelles de transport,
- la quantité d'eau potentiellement présente après le séchage de la cavité à une pression maximale de 10 mbar,
- la quantité d'eau contenue dans l'hydrate de bore issue de l'eau de piscine au moment du chargement,
- la quantité d'eau présente dans les crayons inétanches.

Méthode de calcul

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

Le modèle illustré sur la figure ci-après se traduit de la manière suivante (de l'intérieur vers l'extérieur) :

- mélange hétérogène UO_2 + eau (réseau de fragments de sphérules de rayons variables),
- milieu fissile UO_2 sec sous forme de sphère,
- eau de 200 mm d'épaisseur.



Résultats de l'étude

La réactivité maximale du colis est obtenue pour une quantité d'eau bien supérieure à la quantité d'eau susceptible d'être présente dans le colis.

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

7.2 Réseau de colis

L'emballage TN[®]G3 est constitué d'une virole épaisse en acier (épaisseur supérieure à 200 mm) qui isole neutroniquement son contenu. Ainsi, le respect du critère de $k_{\text{eff}} \leq 0,95$ pour le colis isolé (toutes incertitudes comprises) permet d'assurer le respect du critère réglementaire pour un réseau infini de colis.

Ainsi, l'indice de sûreté criticité vaut $\text{CSI} = 0$.

8. CONDITIONS D'UTILISATION

L'emballage est conçu pour être chargé et déchargé verticalement sous eau (cas de l'immersion en piscine ou de l'accostage sous fosse de chargement) ou à sec (cas de l'accostage sous cellule).

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,
- le drainage et séchage de la cavité.
- le remplissage en hélium de la cavité à une pression maximale définie,
- la bonne fermeture (couple de serrage des vis) et le niveau d'étanchéité (taux de fuite) de tous les composants constituant les deux barrières d'étanchéité.

- L'ensemble des opérations effectuées pour vérifier le séchage de la cavité, la fermeture de la cavité et le niveau d'étanchéité du colis doit être contrôlé par une personne différente de celle qui les a réalisés afin de vérifier la conformité au respect des exigences.
- Dans le cas d'un transport avec au moins un crayon inétanche, des mesures dans le temps du taux de dihydrogène sont requises, afin de déterminer la durée maximale de transport sur la base de la Limite Inférieure d'Inflammabilité (LII) minimale définie. La durée maximale séparant la fermeture de l'ouverture de l'enveloppe de confinement ne doit pas excéder 60 jours. Les dispositions suivantes doivent être réalisées :
 - L'expéditeur s'assure que le transporteur dispose du temps nécessaire (aléas compris) pour réaliser le transport. Le transporteur présente à l'expédition les garanties du respect de la durée de transport (hors aléas).
 - Après l'arrivée sur le site destinataire, une fois le transfert de responsabilité du colis vers le destinataire réalisé, le destinataire doit garantir que l'ouverture du colis est réalisée dans un temps compté à partir de la fermeture de l'enveloppe de confinement de l'emballage qui ne doit pas dépasser la durée maximale diminuée de 7 jours.
- 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.
- si, à la fois, l'emballage contient au moins un assemblage de combustible usé et le transport est effectué sans barrière thermique, le contrôle des surfaces accessibles en conformité avec la limite réglementaire de 85 °C.
- la mise en place de l'étiquetage réglementaire.

9. PROGRAMME D'ENTRETIEN PERIODIQUE

L'emballage est conçu pour une durée de vie d'au moins 40 ans. 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 sa durée de vie ;
- le contrôle de l'état des composants des systèmes vissés (barrières d'étanchéités, capots et tourillons) afin de vérifier le maintien de leurs fonctions de sûreté.

- le contrôle des tourillons assurant la manutention et l'arrimage du colis, incluant la détection de défaut, le démontage des composants, et un test en charge après remontage.

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 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 de 2012.

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

- Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (ADR) ;
- 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 (code IMDG de l'OMI) ;
- Instructions techniques pour la sécurité du transport aérien des marchandises dangereuses (IT de l'OACI) ;
- 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) ;
- Instruction du 26 juin 2008 relative aux règles techniques et procédures administratives applicables au transport commercial par aéronef et le règlement CE N°859/2008 du 20 août 2008 (EU OPS1).

