


Formulaire : PM04-4-MO-6 rév.02

<b>Orano TN</b>  <b>DOSSIER DE SURETE</b>    <b>TN° 24 BH</b>	<b>Diffusion limitée Orano - Autorités - Exploitants</b>		
	<b>CHAPITRE 00-3</b>		
	Préparateur / signature [REDACTED]	Date [REDACTED]	
	Vérificateur / signature [REDACTED]	Date [REDACTED]	
<b>Identification :</b>	<b>DOS-18-007338-054</b>	<b>Version :</b> 1.0	<b>Page 1 / 21</b>

TN International


## CARACTERISTIQUES DE PERFORMANCES DU COLIS

### Sommaire

#### État des versions

1. Objet	3
2. Descriptions et définitions	3
3. Performances d'un point de vue mécanique	6
4. Performances d'un point de vue thermique	11
5. Performances d'un point de vue confinement	14
6. Performances d'un point de vue radioprotection	15
7. Performances d'un point de vue sûreté-criticité	17
8. Condition d'utilisation de l'emballage TN° 24 BH	19
9. Programme d'entretien périodique	20
10. Programme d'assurance qualité	21
11. Références	21

**État des versions**

Version	Date	Objet et historique des révisions	Préparé par / Vérifié par
1.0	Voir 1ère page	Création du document	

## 1. Objet

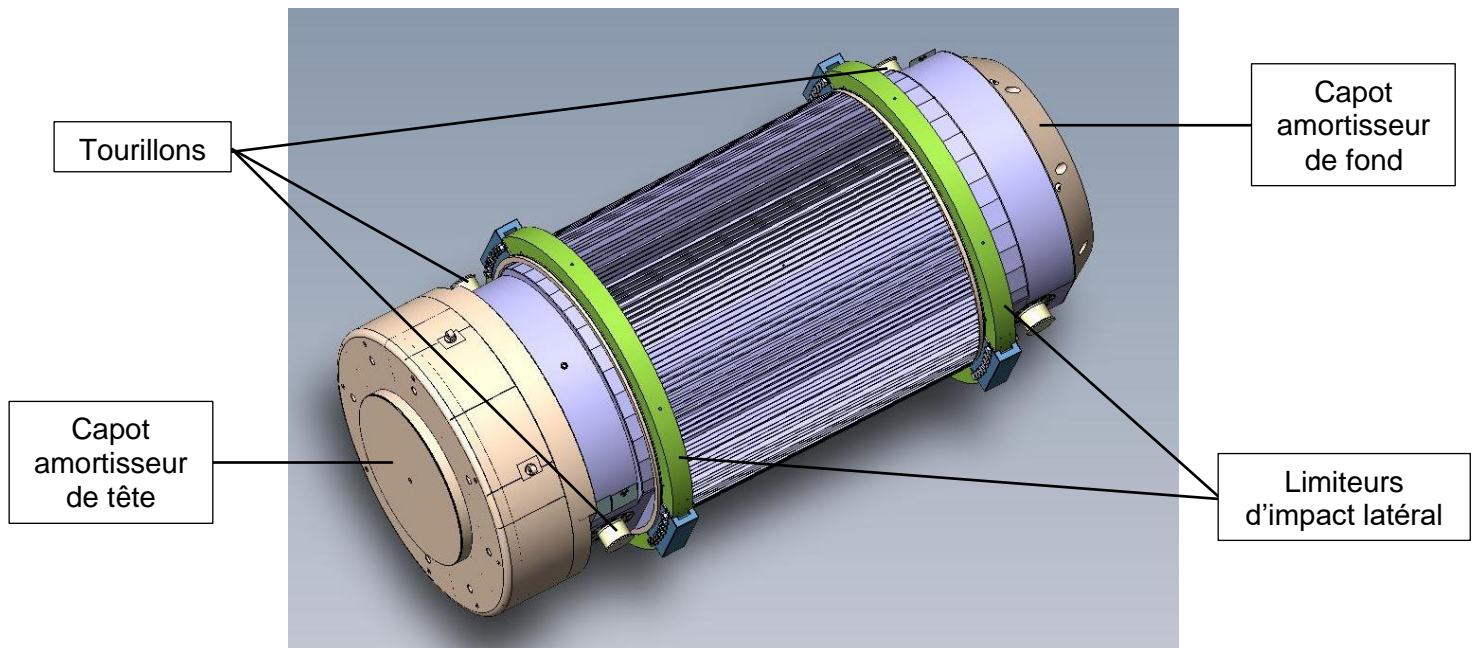
L'objet de ce chapitre est de décrire les caractéristiques des performances du modèle de colis TN<sup>®</sup> 24 BH chargé de son panier option 1, 2, 3 ou 4, destiné au transport par voie routière, ferroviaire ou fluviale d'au maximum 69 assemblages combustibles irradiés de type REB; en tant que colis B(U) contenant des matières fissiles au regard de la réglementation <1>.

## 2. Descriptions et définitions

### 2.1. Descriptions du colis

Le combustible nucléaire issu du fonctionnement des réacteurs civils de puissance à eau bouillante (abrégé REB) est constitué de crayons combustible assemblés en réseaux. Le colis TN<sup>®</sup> 24 BH permet de réaliser le transport et l'entreposage à sec intermédiaire de ces assemblages combustibles irradiés.

De forme générale cylindrique, le colis est illustré sur la figure ci-après.



Les dimensions générales hors-tout du colis sont :

- Longueur : 6 383 mm,
- Diamètre : 2 990 mm (avec les couronnes amortissantes en aluminium équipé d'interface de montage standard) ou 3 090 mm (avec les couronnes amortissantes en aluminium équipé d'interface de montage en U).

Le colis TN<sup>®</sup> 24 BH est transportable par voie terrestre (routier ou ferroviaire) ou fluviale.

### 2.2. Descriptions de l'emballage

Les principaux composants de l'emballage sont :

- Un corps constitué :
  - d'une virole en acier forgé et un fond en acier forgé soudé à la virole.
  - de quatre tourillons fixés sur la virole (deux en partie haute et deux en partie basse) utilisés pour la manutention, le basculement et l'arrimage.
  - d'une protection neutronique (résine) entourant radialement l'emballage en partie courante recouverte par une enveloppe externe en acier et intégrant des conducteurs thermiques en cuivre. Dans le fond de l'emballage, la protection neutronique et gamma est complétée par des plaques de plomb fixées à la virole en acier forgé.

- Un système de fermeture constitué :
  - o d'un couvercle primaire en acier maintenu sur sa bride par des vis et muni d'un joint d'étanchéité métallique et d'un autre joint élastomère. Le couvercle primaire est muni d'un orifice donnant accès à la cavité. Cet orifice est obturé par une tige munie d'un double joint métallique et d'un tampon muni d'un joint d'étanchéité métallique. Le couvercle primaire est équipé d'une protection neutronique (résine) en partie supérieure, entouré d'un capotage en acier.
  - o d'un couvercle secondaire en acier, monté sur le couvercle primaire, maintenu par des vis et muni de joints d'étanchéité élastomère. Le couvercle secondaire est muni d'un orifice donnant accès à l'espace inter-couvercle. Cet orifice est obturé par une tige maintenue par des vis et munie de deux joints d'étanchéité élastomère.
- Des protections antichocs constituées :
  - o Pour la protection radiale : de deux couronnes en aluminium constituées chacune de deux demi-couronnes assemblées et montées sur deux demi-supports (standards ou en U) en acier qui assurent la liaison avec le corps de l'emballage.
  - o Pour la protection axiale : deux capots amortisseurs (en tête et en fond) assurant la protection mécanique lors de chutes verticales ou obliques, et pour le capot amortisseur de tête une protection thermique est assurée en conditions accidentelles de feu.

### 2.3. Descriptions du contenu

Le contenu est constitué de l'aménagement interne (nommé panier) et des assemblages combustibles à transporter.

#### Aménagement interne :

L'emballage TN 24 BH peut être chargé de plusieurs options de panier : option 1, 2, 3 et 4.

Le panier (option 1, 2, 3 ou 4) de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 BH consiste en un empilement de profilés entrecroisés et emboîtés les uns dans les autres, délimitant des logements de section carrée dans lesquels sont placés les assemblages combustibles.

L'ensemble des paniers est :

- constitué de profilés en aluminium enrichi en bore ou en aluminium non-boré,
- fermé aux quatre points cardinaux par des lunules en aluminium reprenant la forme de la cavité et équipées de rainures pour recevoir les profilés emboîtés du panier qui y sont vissés,
- fermé aux orientations 45°, 135°, 225° et 315° par des profilés (différents selon les options) sur toute la hauteur du panier qui lui servent de renfort.
- équipé d'encoches usinées sur la partie la plus basse pour permettre le remplissage et la vidange uniforme des logements,
- muni de 4 tirants en acier traversant les profilés de renfort en aluminium pour maintenir le panier axialement.

Les particularités différenciant les options de panier sont les suivantes :

- Pour les paniers options 1 et 2 :

Les paniers option 1 et 2 délimitent 69 logements longitudinaux pour le transport des assemblages combustibles REB.

Les paniers option 1 et 2 diffèrent uniquement par la hauteur des profilés et le nombre de niveaux empilés.

Il existe, pour chacun, six types de paniers qui se distinguent par la teneur minimale en bore des profilés en aluminium (types A, AB, B, C, D et type 3). Ces six types sont regroupés en trois familles : « type1 », « type 2 » et « type 3 ».

- Pour les paniers options 3 ou 4 :

Les paniers option 3 ou 4 sont constitués des profilés en aluminium emboîtés avec des renforts en acier formant 65 logements longitudinaux pour le transport d'assemblages combustibles REB. Ils diffèrent également des options 1 et 2 par le nombre de niveaux de profilés et leurs hauteurs.

La configuration et le matériau des renforts aux orientations 45°, 135°, 225° et 315° sont modifiés par rapport aux options 1 et 2.

Les lunules sont équipées de plaques anti-perforation en acier pour éviter leur endommagement par les renforts en acier.

#### Contenu radioactif autorisé :

Le contenu radioactif autorisé est constitué d'au maximum 69 (pour le panier option 1 ou 2) ou 65 (pour le panier option 3 ou 4) assemblages combustible REB irradiés complets, non encapsulés et non endommagés.

Le contenu maximal autorisé définit les paramètres importants pour la sûreté. Ceux-ci sont utilisés dans le dossier de sûreté, en particulier :

- la géométrie de l'assemblage,
- l'enrichissement initial maximal, le taux de combustion moyen maximal et le temps de refroidissement minimal des assemblages combustibles, résumés dans le tableau suivant :

<b>Combustible</b>	UO <sub>2</sub>
<b>Taux de combustion moyen (MWj/tU)</b>	≤ 63 000
<b>Enrichissement initial en uranium 235 (%)</b>	≤ 5
<b>Durée de refroidissement (années)</b>	≥ 0,5

- la masse maximale d'uranium dans l'assemblage,
- la puissance thermique maximale et linéique maximale dégagée par l'assemblage,
- la quantité et l'activité des radioéléments présents dans les crayons après leur irradiation en réacteur et après la durée de refroidissement requise,
- les sources de rayonnement maximales exprimées sous forme d'inéquations permettant de respecter les exigences réglementaires de débit d'équivalent de dose du modèle de colis.

## 2.4. Barrières d'étanchéité

L'emballage TN<sup>®</sup> 24 BH est constitué d'un corps épais dont chaque ouverture est fermée par deux barrières d'étanchéité indépendantes décrites ci-après.

#### Première barrière :

La première barrière d'étanchéité est constituée par :

- la virole épaisse et son fond soudé,
- le couvercle primaire en acier et son joint d'étanchéité métallique interne,
- le tampon fermant l'orifice d'accès à la cavité et son joint d'étanchéité métallique, ou la tige d'orifice et son joint d'étanchéité métallique interne.

#### Deuxième barrière :

La deuxième barrière d'étanchéité est constituée par :

- la virole épaisse et son fond soudé,

Identification :

DOS-18-007338-054

Version : 1.0

Page 6 sur 21

- le couvercle secondaire en acier et son joint d'étanchéité interne en élastomère,
- la tôle d'orifice et son joint d'étanchéité interne en élastomère.

## 2.5. Enceinte de confinement

L'enceinte de confinement est constituée de la première barrière d'étanchéité décrite au paragraphe 2.4.

## 2.6. Système d'isolement

Le système d'isolement est constitué par :

- le contenu radioactif (assemblages combustibles) et l'aménagement interne,
- les deux barrières d'étanchéité décrites au paragraphe 2.4.

## 2.7. Bilan de masse

La masse maximale de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 BH chargé (quel que soit l'option de panier) est 135 000 kg. La masse autorisée en transport est celle utilisée de façon générique dans les études de sûreté.

# 3. Performances d'un point de vue mécanique

## 3.1. Conditions de transport de routine

### Tenue de l'enceinte de confinement :

La tenue mécanique de l'enceinte de confinement en conditions de transport de routine est vérifiée à partir des données d'entrée suivantes :

- La géométrie et les matériaux des différents composants.
- La température de chacun des composants. Les valeurs de températures considérées sont conservatives vis-à-vis de celles déterminées dans l'analyse thermique en conditions de transport de routine.
- La pression interne de design.

La conformité au code ASME des différents éléments constituant l'enceinte de confinement est vérifiée.

Les jeux entre les couvercles primaire et secondaire, et la virole sont suffisants pour éviter tout risque d'interaction mécanique en cas de dilatation thermique des composants.

### Résistance des structures annexes :

La tenue mécanique des structures annexes de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 BH composées des éléments suivants est vérifiée :

- L'enveloppe externe soumise à une pression interne (correspondant au dégazage de la résine).
- Les tôles des capots amortisseurs soumises à une pression interne (due à un dégagement gazeux) et une accélération longitudinale (correspondant aux accélérations vue par l'emballage en transport).
- Les vis de fixation des capots amortisseurs.

Les valeurs de température considérées sont conservatives vis-à-vis de celles déterminées dans l'analyse thermique en conditions de transport de routine.

Toutes les contraintes dans les éléments cités ci-dessus sont inférieures aux limites élastiques des matériaux.

### Résistance de l'aménagement interne :

La résistance des différents aménagements internes aux sollicitations mécaniques et contraintes thermiques rencontrées en conditions de transport de routine ainsi que sa libre dilatation dans la cavité sont vérifiées.

#### Arrimage et manutention :

L'arrimage et la manutention du colis sont réalisés par quatre tourillons fixés sur la virole par des vis.

La tenue mécanique des tourillons, des vis de fixation et du corps au droit de la liaison est justifiée vis-à-vis du code ASME et de la norme ISO 10276 pour des chargements statiques représentatifs des accélérations vues en transport et en manutention, 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 50 ans.

### **3.2. Conditions normales de transport**

Les analyses de sûreté étudiant l'épreuve réglementaire de chute libre de 30 cm de hauteur (conditions normales de transport) sont couvertes par les analyses de sûreté à l'issue des épreuves de chutes de 9 m des conditions accidentelles de transport (voir § suivant).

Les autres épreuves réglementaires (gerbage, aspersion et pénétration d'une barre) sont sans impact sur la sûreté du colis.

### **3.3. Conditions accidentelles de transport**

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

#### Ensemble de chutes étudiées :

Toutes les configurations possibles de chute libre de 9 mètres et de 1 mètre sur poinçon sont analysées, afin de définir les essais de chutes à réaliser : les séquences de chutes retenues pour être testées physiquement sont celles maximisant les dommages possibles sur le système de fermeture des barrières d'étanchéité et les sollicitations possibles dans le système de fixation des capots de tête et de fond.

Les épreuves de chute ont été réalisées avec deux maquettes à l'échelle 1/3 de modèles de colis similaires au TN<sup>®</sup> 24 BH.

#### Séquences de chutes pour la première maquette :

Les séquences de chutes réglementaires effectuées pour la première maquette sont répertoriées ci-dessous :

- Séquence n°1
  - Chute n°1 : Chute d'une hauteur de 1,02 mètre sur poinçon sur la butée anti-poinçon de la couronne en aluminium côté fond avec une inclinaison de l'axe de l'emballage par rapport à la verticale.
- Séquence n°2
  - Chute n°2 : Chute d'une hauteur de 1,02 mètre sur poinçon sur la couronne en aluminium située côté fond avec une inclinaison de l'axe de l'emballage par rapport à la verticale.
  - Chute n°3 : Chute latérale de 9,00 mètres sur génératrice passant par les tourillons avec un premier impact côté tête et une inclinaison de l'axe de l'emballage par rapport à l'horizontale.
- Séquence n°3

Identification :

DOS-18-007338-054

Version : 1.0

Page 8 sur 21

- Chute n°4 : Chute latérale de 1,02 mètre sur poinçon sur capot de fond avec une inclinaison de l'axe de l'emballage par rapport à l'horizontale.
- Chute n°5 : Chute oblique de 9,15 mètres sur le coin du capot de fond.
- Séquence n°4
  - Chute n°6 : Chute oblique d'une hauteur de 9,00 mètres sur capot amortisseur de tête.
- Séquence n°5
  - Chute n°7 : Chute d'une hauteur de 1,28 mètre sur poinçon au niveau du centre du couvercle secondaire.
  - Chute n°8 : Chute axiale d'une hauteur de 9,00 mètres sur le capot amortisseur de tête.
- Chute n°9 : Chute axiale d'une hauteur de 9,00 mètres sur le capot amortisseur de fond. Les accélérations ont été déterminées analytiquement.

Les angles de chute correspondent aux configurations les plus pénalisantes.

#### Séquence de chute pour la deuxième maquette :

La chute réglementaire effectuée pour la seconde maquette est décrite ci-dessous.

- Chute n°1 : Chute d'une hauteur de 1,55 mètre sur poinçon au niveau de la tôle d'orifice du couvercle secondaire avec une inclinaison de l'axe de l'emballage par rapport à la verticale. Le point d'impact est aligné avec le centre de la tôle d'orifice du couvercle secondaire.

L'angle de chute correspond à la configuration la plus pénalisante.

#### Principe de définition des maquettes de chute :

Concernant la similitude entre l'emballage TN® 24 BH et les maquettes, il est démontré que les deux maquettes sont représentatives de l'emballage échelle 1, chargé de son panier et de lests représentatifs de ses assemblages.

Ainsi, il est montré que le comportement mécanique en chute de 9 mètres ou de 1 mètre sur poinçon de l'emballage TN® 24 BH est au moins équivalent à celui des maquettes, notamment en ce qui concerne le maintien de l'étanchéité du colis et le comportement des amortisseurs.

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

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

#### Résultats des chutes pour la première maquette :

Les essais de chute ont fait l'objet des conclusions suivantes :

- Le maintien des composants impactés par la chute,
- Les accélérations mesurées à la fréquence de filtrage justifiée par rapport aux modes propres de l'emballage et de son aménagement interne ; ces accélérations sont utilisées pour la démonstration de la tenue mécanique de l'emballage et de son aménagement interne dans les différentes configurations de chute pour toute la plage de température possible des conditions normales de transport,
- Les taux de fuites mesurés pour les enceintes d'étanchéité après chacune des séquences de chutes.

#### Séquence n°1

- Lors de la chute, la couronne n'a pas subi de dommage significatif.



Identification :

DOS-18-007338-054

Version : 1.0

Page 9 sur 21

- Les contrôles d'étanchéité n'ont pas été réalisés juste après cette séquence mais après la séquence n°2.

### Séquence n°2

- Lors de la 1ère chute, le poinçon a flambé suite à l'impact sur la couronne de fond puis a glissé le long du corps qui l'a fait fléchir jusqu'à impacter la couronne de tête.
- Lors de la 2ème chute, le premier impact a eu lieu simultanément sur la couronne aluminium de tête et sur le tourillon. Le deuxième impact a été amorti par la couronne aluminium de fond. La photo ci-après montre les déformations résultant du premier impact sur la couronne de tête et le tourillon.



- À la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de la maquette n°1 conservent un bon niveau d'étanchéité.

### Séquence n°3

- Lors de la 1ère chute, le poinçon a pénétré le capot amortisseur de fond. Suite à l'impact, l'emballage s'est couché sous son propre poids et le poinçon a fléchi.
- Lors de la 2ème chute, le premier impact a eu lieu sur l'arête du capot amortisseur de fond. La maquette a ensuite rebondi et un deuxième impact a eu lieu au niveau des couronnes.
- À la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de la maquette n°1 conservent un bon niveau d'étanchéité.

### Séquence n°4

- Lors de la chute, le premier impact a eu lieu sur l'arête du capot amortisseur de tête. La maquette a ensuite rebondi et un deuxième impact a eu lieu au niveau des couronnes. La photo ci-après montre les déformations induites sur le capot amortisseur de tête.



- À la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de la maquette n°1 conservent un bon niveau d'étanchéité.

#### Séquence n°5

- Lors de la 1ère chute, le poinçon a pénétré le capot amortisseur de tête au travers de l'enveloppe externe sans impacter le couvercle secondaire.
- Lors de la 2<sup>ème</sup> chute, les capots amortisseurs ont parfaitement assuré leur fonction en s'écrasant.
- À la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de la maquette n°1 conservent un bon niveau d'étanchéité.

#### Résultat de la chute pour la deuxième maquette :

L'essai de chute a fait l'objet des relevés suivants :

- Le maintien des composants impactés par la chute
- Les accélérations mesurées à la fréquence de filtrage justifiée par rapport aux modes propres de l'emballage et de son aménagement interne ; ces accélérations sont utilisées pour la démonstration de la tenue mécanique de l'emballage et de son aménagement interne dans les différentes configurations de chute pour toute la plage de température possible des conditions normales de transport.
- Les taux de fuites mesurés pour les enceintes d'étanchéité

Lors de la chute, le poinçon a pénétré le capot amortisseur de tête au travers de l'enveloppe externe et est venu mater le centre de la tôle d'orifice du couvercle secondaire. Le poinçon a ensuite fléchi.

À la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de la maquette n°2 conservent un bon niveau d'étanchéité.

#### Comportement de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 BH lors des épreuves de chutes à la température minimale réglementaire et maximale en conditions normales de transport :

Suivant les cas de chutes, la détermination des accélérations à l'échelle 1 est réalisée soit par des comparaisons analytiques avec les résultats d'essais de chutes, soit par la réalisation de calculs numériques basés sur un recalage de la première maquette à l'échelle 1/3.

Les essais de chutes présentés ci-avant destinés à vérifier la tenue mécanique de l'emballage se sont déroulés à température ambiante. Des coefficients permettant de prendre en compte le comportement du bois en température sont donc utilisés afin de prendre en compte soit les effets de la température minimale réglementaire de  $-40^{\circ}\text{C}$ , soit de la température maximale en conditions normales de transport.

La prise en compte de ces coefficients permet de calculer de nouvelles accélérations pénalisantes pour la vérification de la tenue des éléments constituant les enceintes primaires et secondaires, ainsi que l'aménagement interne et le contenu de l'emballage, qui sont sollicités en chute. La tenue de ces éléments est vérifiée.

La résistance de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 BH lors des conditions accidentelles de chute, avec la prise en compte du comportement des capots amortisseurs entre la température minimale réglementaire de  $-40^{\circ}\text{C}$  (cf. <1>) et la température maximale en conditions normales de transport est donc vérifiée.

#### Conclusion :

Suite aux épreuves réglementaires de chute en conditions accidentelles de transport, les deux barrières de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 BH conservent leurs étanchéités, et ce pour toutes les configurations de chute.

Les niveaux de contraintes et la géométrie de la virole forgée permettent d'écarter le risque de rupture fragile à  $-40^{\circ}\text{C}$ .

La démonstration de la résistance du panier en conditions accidentelles de chutes est réalisée en utilisant une méthode analytique pour les paniers options 1 et 2 et en utilisant un modèle numérique spécifique du panier pour l'option 3. Les calculs se basent sur les accélérations déterminées lors des analyses faites pour le TN 24 BH. Les calculs prenant en compte les effets dynamiques permettent de vérifier la tenue des différents éléments constituant le panier. Ces calculs couvrent toute la plage possible de température (de  $-40^{\circ}\text{C}$  aux températures maximales des conditions normales de transport) en fonction des variations possibles des propriétés des matériaux.

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, à la capacité de dissipation thermique et au maintien de la sous-criticité du colis.

## **4. Performances d'un point de vue thermique**

Les températures atteintes par les constituants de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 BH sont déterminées afin de vérifier la sûreté du colis et le respect des exigences réglementaires (cf. <1>).

Dans cette analyse, 3 configurations sont étudiées :

- Panier option 1&2 muni de plats en aluminium boré de type 1 ou 2,
- Panier option 1&2 muni de plats en aluminium boré de type 3,
- Panier options 3 et 4.

### **4.1. Analyse thermique de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 BH en conditions de transport de routine**

L'objet de cette étude est l'analyse thermique du modèle de colis TN<sup>®</sup> 24 BH en conditions de transport de routine, muni de son aménagement interne chargé des contenus décrits au paragraphe 2.3.

#### Paramètres, du contenu, importants pour l'étude :

La principale caractéristique du contenu utilisée est la puissance thermique résiduelle maximum totale du contenu.

#### Paramètre de l'emballage important pour l'étude :

Les principales caractéristiques de l'emballage utilisées sont les suivantes :

- Matériaux et géométrie de l'emballage et de ses aménagements internes,

Identification :

DOS-18-007338-054

Version : 1.0

Page 12 sur 21

- Le type de panier (options 1&2 type 1, 2 ou 3, option 3 ou 4),
- La cavité remplie en Hélium.

#### Hypothèses importantes pour l'étude :

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- La température ambiante maximale réglementaire,
- L'ensoleillement réglementaire,
- Le colis transporté horizontalement,
- Les échanges thermiques se font par conduction, convection et rayonnement.

#### 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 éléments finis avec le module TMG interfacé avec I-DEAS.

La puissance des assemblages combustibles est directement appliquée sur les parois des logements du panier. 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-hauteur) et des propriétés d'émissivité des gaines et des parois de panier.

L'analyse thermique de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 BH muni d'un panier option 1 ou 2 est réalisée grâce à la modélisation 3D et 2D. L'analyse thermique est réalisée en 3 parties :

- La 1<sup>ère</sup> partie consiste en l'étude de trois cas utilisant un modèle thermique 3D, avec plan de chargement homogène :
  - o Cas 1 : Panier centré axialement et radialement et assemblages combustibles non modélisés (avec l'aluminium boré type 1 et type 3)
  - o Cas 2 : Panier centré radialement en contact avec le couvercle primaire et assemblages combustibles non modélisés (avec aluminium boré type 1)
  - o Cas 3 : Panier décentré radialement en contact avec le couvercle primaire et assemblages combustibles non modélisés (avec aluminium boré type 1)
- La 2<sup>ème</sup> partie consiste à évaluer le gradient circonférentiel de l'emballage TN 24 BH suivant 2 cas :
  - o Cas 1 : Panier et assemblages combustibles centrés radialement,
  - o Cas 2 : prise en compte du décentrage des assemblages combustibles et du panier.
- La 3<sup>ème</sup> partie consiste en une série de calculs 2D réalisée afin de déterminer l'influence de plans de chargement hétérogènes (avec aluminium boré type 1).

L'analyse thermique de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 BH muni d'un panier option 3 ou 4 est réalisée par modélisation 3D et 2D. L'analyse thermique est réalisée en 3 parties :

- La 1<sup>ère</sup> partie consiste en l'étude de deux cas utilisant un modèle thermique 3D :
  - o Cas 1 : Panier en contact avec le couvercle primaire et assemblages combustibles non modélisés,
  - o Cas 2 : Panier centré axialement dans la cavité et assemblages combustibles non modélisés.
- La 2<sup>ème</sup> partie consiste en l'étude de deux cas utilisant un modèle thermique 2D :
  - o Cas 1 : Assemblages combustibles non modélisés et puissance thermique appliquée directement sur les parois des logements,
  - o Cas 2 : Assemblages combustibles modélisés et centrés radialement dans leur logement.

Identification :

DOS-18-007338-054

Version : 1.0

Page 13 sur 21

- La 3<sup>ème</sup> partie consiste en l'étude de deux cas utilisant un modèle thermo-fluidique 2D :
  - o Cas 1 : Panier centré radialement et assemblages non modélisés
  - o Cas 2 : Panier décentré dans la cavité et assemblages modélisés et décentrés dans leur logement.

#### Résultats de l'étude :

La température maximale de la surface externe de l'emballage dépasse la température admise en conditions de routine de transport mais une prescription sur le critère est possible si une bâche de protection thermique est utilisée lors du transport.

Les températures maximales atteintes en conditions de transport de routine sont inférieures aux limites admissibles.

#### **4.2. Analyse thermique de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 BH 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. Analyse thermique de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 BH en conditions accidentelles de transport**

Les mêmes hypothèses que pour les conditions de transport de routine (paragraphe 4.1) sont retenues hormis les hypothèses complémentaires suivantes :

- Les conditions de feu réglementaires (800°C pendant 30 minutes)
- Les dégâts provoqués par une chute sur poinçon de 1 mètre avec impact radial à angle droit sur le capot amortisseur de tête et avec impact axial au droit de la tige d'orifice du couvercle secondaire sont pris en compte.

#### 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 éléments finis avec le module TMG interfacé avec I-DEAS.

Les calculs suivants sont réalisés :

- Panier option 1 ou 2 muni de plats en aluminium boré de type 1 ou 2,
- Panier option 1 ou 2 muni de plats en aluminium boré de type 3,
- Panier option 3 ou 4.

#### Résultats de l'étude :

Les températures maximales atteintes en conditions accidentelles de transport sont inférieures aux limites admissibles et tous les critères sont respectés.

Concernant la tenue en feu de la résine, compte tenu des températures maximales atteintes, celle-ci devrait être dégradée sur quelques centimètres à l'issue de l'épreuve de feu. Cette conséquence est prise en compte dans les évaluations de débits d'équivalents de dose en conditions accidentelles de transport (voir §6). Il est à noter que la résine n'est pas un élément combustible susceptible d'augmenter la durée de l'incendie ou son intensité.

## 5. Performances d'un point de vue confinement

L'enceinte de confinement est définie au paragraphe 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 :

- Des fuites de gaz radioactifs,
- Des fuites de particules aérosols radioactives.

L'analyse de confinement du modèle de colis TN 24 BH est réalisée pour un contenu pénalisant dont les caractéristiques sont fournies ci-dessous :

<b>Combustible</b>	UO <sub>2</sub>
<b>Taux de combustion moyen (MWj/tU)</b>	≤ 80 000
<b>Enrichissement initial en uranium 235 (%)</b>	≤ 3.78
<b>Durée de refroidissement (années)</b>	≥0.5

### 5.1. En conditions normales de transport

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude :

Les principales caractéristiques utilisées sont les suivantes :

- Le taux de fuite maximal de l'enceinte de confinement vérifié avant le transport.
- Les températures maximales des gaz et des joints en conditions normales de transport considérées comme conservatives vis-à-vis de celles déterminées dans l'analyse thermique.
- La pression maximale à l'intérieur de la cavité calculée à l'issue de la durée du transport.
- Le volume libre de la cavité.

Hypothèses importantes pour l'étude :

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- La pression externe du colis est de 0,60 bar abs.
- La durée du transport est considérée de manière conservative égale à 1 an,
- Le taux maximum de crayons combustibles présentant une rupture de leur gaine est de 100 %.
- Le taux de relâchement des gaz de fission (dit  $\tau_{RGF}$ ) est conforme aux recommandations de l'ASN.

Méthode de calcul :

Le relâchement d'activité est calculé analytiquement en prenant en compte les produits de fission sous forme de gaz et les aérosols. Le taux de fuite de radionucléides est calculé en termes de valeurs de  $A_2$  en considérant que les taux de fuite des barrières d'étanchéité en conditions de transport de routine et en conditions accidentelles de transport sont garantis.

Résultats de l'étude :

Les critères réglementaires sont respectés.

## 5.2. En conditions accidentelles de transport

Les différences principales avec le calcul en conditions normales de transport sont les suivantes :

- Les températures maximales des gaz et des joints sont issues de l'analyse thermique en conditions accidentelles de transport.
- La pression maximale à l'intérieur de la cavité est prise égale à la pression atmosphérique maximale de 1,05 bar abs.

Les résultats montrent une marge significative par rapport au critère réglementaire de 1 A<sub>2</sub> cumulé sur une semaine.

## 6. Performances d'un point de vue radioprotection

Les critères réglementaires <1> en termes de débits d'équivalent de dose sont les suivants :

- En conditions de transport de routine : 2 mSv/h en tout point des surfaces externes du véhicule de transport ; de façon pénalisante, il est retenu un critère de 2 mSv/h en tout point des surfaces externes du colis.
- Conditions normales de transport : pas d'augmentation du débit d'équivalent de dose supérieure à 20 % par rapport à celles en conditions de transport de routine en tout point du colis.
- Conditions accidentelles de transport : 10 mSv/h en tout point situé à 1 m des surfaces externes de l'emballage.

### 6.1. En conditions de transport de routine

#### 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 constitué par :

- une virole en acier,
- une couche de résine (avec les ailettes de cuivre),
- une tôle externe en acier.

Le blindage axial côté fond de l'emballage est principalement constitué par :

- Un fond en acier,
- Un capot amortisseur de fond,

Le blindage axial côté tête est constitué par :

- un couvercle (couvercle primaire) en acier,
- une tôle d'acier inoxydable austénitique,
- un couvercle (couvercle secondaire) d'acier inoxydable martensitique,
- un capot amortisseur de tête.

L'emballage TN<sup>®</sup> 24 BH comprends quatre tourillons vissés sur la virole. Ils peuvent être des tourillons standards ou des tourillons creux.

#### Hypothèses importantes pour l'étude :

De façon pénalisante, la résine du couvercle primaire n'est pas prise en compte dans les calculs des débits d'équivalent de dose.

#### Paramètres du contenu importants pour l'étude :

Les sources de rayonnement du contenu radioactif maximal sont limitées par le respect d'inéquations présentées avec la définition des contenus.

Identification :

DOS-18-007338-054

Version : 1.0

Page 16 sur 21

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

L'activation des embouts métalliques des assemblages combustibles durant leur irradiation en réacteur est prise en compte.

#### Méthode de calcul :

Les émissions de neutrons et gamma de la longueur active des assemblages combustibles sont calculés par le code ORIGEN-ARP.

Les gammas issus de l'activation du Cobalt des embouts métalliques sont calculés par le code APPOLO2 2.5.

Les calculs de débits d'équivalent de dose ont été menés à l'aide du code TRIPOLI 4.7. Il permet de résoudre l'équation de transport des particules dans une géométrie à trois dimensions par la méthode de Monte Carlo.

La bibliothèque de sections efficaces utilisée est la bibliothèque CEA V5.0, basé sur JEFF-3.1.1, les particules peuvent être de type neutron ou gamma.

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

Les sources induites (dites sources gamma 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 au contact 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 inéquations ont été déterminées sur un quart d'emballage en 13 points dimensionnants en conditions de transport de routine au contact de l'emballage :

- Tourillon bas,
- Fond radial de l'emballage,
- Fond axial de l'emballage.

Les inéquations doivent être vérifiées par symétrie sur chacun des 4 quarts du colis.

#### Résultats de l'étude :

Les critères réglementaires de débits d'équivalent de dose pour un emballage muni d'un panier option 1, 2, 3 ou 4 en conditions de transport de routine sont respectés.

## **6.2. En conditions normales de transport**

Le seul dommage attendu en conditions normales de transport par rapport au modèle de calcul utilisé en conditions de transport de routine est un léger écrasement de la partie externe des capots amortisseurs. Il est démontré que ces endommagements ne sont pas susceptibles de générer une augmentation supérieure à 20 % de débit d'équivalent de dose maximal évalué en conditions de routine de transport.

Les épreuves résultant des conditions normales n'ont pas d'influence sur les débits d'équivalent de dose autour du colis.



### 6.3. En conditions accidentelles de transport

De manière pénalisante, les endommagements de l'emballage considérés en conditions accidentelles de transport sont les suivants :

- Résine modélisée en air, sauf pour la section courante de l'emballage où l'épaisseur de résine a été réduite.
- Disparition totale du bois et des tôles en acier des capots amortisseurs.

Le respect des inéquations de transport en conditions de routine de transport garantit le respect des critères réglementaires à 1 mètre en conditions accidentelles.

Le critère réglementaire de débits d'équivalent de dose en conditions accidentelles de transport à 1 mètre est respecté en considérant le contenu radioactif maximal autorisé.

## 7. Performances d'un point de vue sûreté-criticité

La sûreté-criticité doit être assurée, suivant la réglementation, pour 5 cas de criticité :

- Un colis isolé en conditions de routine (c'est-à-dire tel que présenté au transport),
- Un colis isolé en conditions normales de transport (c'est-à-dire résultant des épreuves réglementaires des conditions normales de transport),
- Un colis isolé en condition accidentelles cumulées aux conditions normales de transport,
- Un réseau de 2N colis en conditions accidentelles de transport (N est le nombre de colis admissible)
- Un réseau de 5N colis en conditions normales de transport.

Les cinq cas réglementaires décrits ci-dessus sont pris en compte en considérant les deux configurations de calcul suivantes :

- Première configuration de calcul : assemblages intacts et cavité remplie d'eau,
- Deuxième configuration de calcul : tous les assemblages ruinés et pénétration d'eau de 1 litre maximum.

Le critère de sous-criticité retenu est le suivant :

- $k_{\text{eff}} + 3\sigma \leq 0,950$  pour un colis isolé et pour une réseau de colis.

### 7.1. Colis isolé avec un contenu intègre et la cavité remplie d'eau

#### Paramètres du contenu importants pour l'étude :

Dans cette étude, les assemblages combustibles sont considérés intègres.

L'étude prend en compte les caractéristiques et le nombre (69 ou 65 en fonction de l'option du panier) d'assemblages combustibles REB, des crayons et du combustible, décrits au paragraphe §2.3.

La totalité des crayons peut être remplacé par des crayons reconstitués en acier, Zircaloy ou contenant un poison neutronique consommable.

Par ailleurs, pour les assemblages chargés dans le panier option 4, les paramètres d'irradiation en cœur de réacteur pénalisants sont pris en compte.

#### Paramètres de l'emballage importants pour l'étude :

L'emballage TN<sup>®</sup> 24 BH est modélisé par des couches concentriques à l'intérieur desquelles est chargé un panier comportant des logements où sont placés les assemblages combustibles.

L'étude prend en compte la teneur massique en bore des paniers (options 1&2 types A, AB, B, C, D, type 3 et option 3 ou 4).

Identification :

DOS-18-007338-054

Version : 1.0

Page 18 sur 21

Hypothèses importantes pour l'étude :

De manière pénalisante, le calcul du coefficient de multiplication ( $k_{\text{eff}}$ ) est effectué pour un colis isolé dans les conditions de routine de transport, selon la réglementation AIEA <1>.

Les calculs de criticité sont limités à un colis isolé dans la mesure où la réactivité d'un réseau de colis infini est équivalente à la réactivité d'un colis isolé selon les conditions de réflexion totale issues de <1>.

De manière pénalisante, la couche de résine, considérée comme entièrement disparue, est remplacée par de l'eau et la virole externe en acier n'est pas modélisée. La couche d'eau de 200 mm servant à la réflexion des neutrons est directement appliquée sur la paroi externe de la virole en acier forgé.

Méthode de calcul :

L'étude a été réalisée :

- Avec le schéma de calcul APPOLO2-MORET4 (voie standard du formulaire CRISTAL V0.2) pour les contenus REB1, REB2, REB4, REB14 et REB16,
- Avec le schéma de calcul APPOLO2-MORET4 (voie standard du formulaire CRISTAL V0.1) pour les contenus REB2, REB5, REB6, REB7, REB8, REB9, REB10, REB11, REB12 et REB15,
- Avec le schéma de calcul APPOLO2-MORET4 (voie standard du formulaire CRISTAL V1.2) pour les contenus REB3, REB13, REB17, REB18, REB19, REB20, REB21, REB22 et REB23,
- Avec le schéma de calcul SCALE 6.2.1 pour les contenus REB24, REB25, REB26, REB27, REB28.

La procédure de calculs comprend deux parties pour les paniers options 1, 2 et 3 :

- o L'étude de l'assemblage combustible et des milieux de structure avec le code APOLLO2,
- o Le calcul du  $k_{\text{eff}}$  de l'emballage par le code Monte-Carlo MORET4.

La procédure de calcul comprend deux parties pour le panier option 4 :

- o La détermination de la composition isotopique de l'assemblage combustible après irradiation avec le module TRITON et de sa séquence t-depl,
- o Le calcul du  $k_{\text{eff}}$  de l'emballage par le code Monte-Carlo KENO-V.a.

Résultats :

Le critère de sûreté-criticité retenu pour un colis isolé est respecté dans tous les cas de chargement :  $k_{\text{eff}} \leq 0,95$ .

**7.2. Colis isolé avec un contenu ruiné et pénétration d'eau dans la cavité**Paramètres du contenu importants pour l'étude :

L'étude prend en compte les caractéristiques enveloppes des assemblages combustibles :

- L'enrichissement initial en uranium 235,
- La densité,
- La masse d'uranium.

Par ailleurs, pour les assemblages chargés dans le panier option 4, les paramètres d'irradiation en cœur de réacteur pénalisant sont pris en compte.

Identification :

DOS-18-007338-054

Version : 1.0

Page 19 sur 21

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude :

L'emballage TN<sup>®</sup> 24 BH est modélisé par une succession de sphères concentriques comprenant :

- La matière fissile dont une partie est mélangée avec de l'eau et le reste est considéré comme sec,
- Une épaisseur d'acier,
- Une épaisseur d'eau.

Hypothèses importantes pour l'étude :

Le modèle d'emballage est constitué d'une double barrière d'étanchéité étanche à l'issue des épreuves réglementaires (voir les paragraphes 0 et 4), 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 <1>.

On considère une quantité maximale d'eau dans le colis enveloppe de la quantité d'eau susceptible de pénétrer dans la cavité suite aux épreuves d'immersion :

- Immersion sous une hauteur d'eau de 15 m pendant 8 heures à l'issue des épreuves réglementaires des conditions normales de transport,
- Immersion sous une hauteur d'eau de 0,9 m pendant 8 heures à l'issue des épreuves réglementaires des conditions accidentelles de transport.

L'étude prend en compte une pénétration d'eau enveloppe dans la cavité de 1 litre.

De manière conservatrice, la couche de résine, considérée comme entièrement disparue, est remplacée par de l'eau et la virole externe en acier n'est pas modélisée. La couche d'eau de 200 mm servant à la réflexion des neutrons est directement appliquée sur la paroi externe de la virole en acier.

Méthode de calcul :

L'étude a été réalisée avec le schéma de calcul APOLLO2-MORET4 (voie standard du formulaire CRISTAL) qui est basé sur l'utilisation de la bibliothèque CEA93 pour les milieux fissiles et les milieux de structure.

Résultats :

Le critère de sûreté-criticité retenu pour un colis isolé est respecté dans tous les cas de chargement :  $k_{\text{eff}} \leq 0,95$ .

### 7.3. Réseau de colis

Le cas d'un réseau de colis est couvert par le cas du colis isolé du fait de l'épaisseur importante de la virole en acier qui isole neutroniquement son contenu (épaisseur supérieure à 200 mm). 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  $ISC = 0$ .

## 8. Condition d'utilisation de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 BH

Ce paragraphe a pour objet de présenter les instructions minimales de chargement, de déchargement et de transport de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 BH.

Particulièrement avant toute opération de transport, les étapes de vérification suivantes doivent être passées en revue :

- La cavité doit être remplie avec :
  - o un gaz neutre (hélium) à 200 mbar abs. à l'ambiante pour un emballage chargé,
  - o de l'air ou un gaz neutre à 500 mbar abs. à l'ambiante pour un emballage vide.

- L'emballage doit être en configuration de transport : capots amortisseurs et limiteurs d'impact latéraux en place. Colis transporté horizontalement.
- Vérifier l'option et le type de panier avant de le charger dans l'emballage.
- Vérifier les couples de serrage des vis des couvercles primaire et secondaire (incluant les tampons et les vis de tape) et les faire contrôler par une personne différente de celle qui a réalisé la vérification.
- Vérifier la graisse sur les filets et sous les têtes des vis concernées.
- Effectuer un test d'étanchéité de l'espace inter-joint du couvercle primaire et de son orifice.
- Effectuer un test d'étanchéité de l'espace inter-joint du couvercle secondaire et de son orifice.
- Effectuer un contrôle visuel des joints et des gorges de joint du couvercle primaire et s'assurer du bon état du couvercle secondaire et de ses joints EPDM.
- Vérifier la non-contamination des surfaces externes de l'emballage et du véhicule de transport en conformité avec les limites réglementaires.
- Vérifier les débits d'équivalent de dose autour du colis et du véhicule de transport en conformité avec les limites réglementaires et conformément aux zones de contrôles radiologiques définies.
- Mesurer les températures des surfaces accessibles et calculer la température corrigée TC :
  - Mesurer la température maximale des surfaces externes accessibles  $T_S$  et la température ambiante  $T_A$ ,
  - Calculer la température corrigée :  $TC = T_S + 38 - T_A$
  - Si TC dépasse le critère réglementaire, le transport se fait avec mise en place de barrières thermiques.

## 9. Programme d'entretien périodique

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

Le programme d'entretien comprend notamment :

- Le remplacement des joints des barrières d'étanchéité.
- Le contrôle de l'état des surfaces externes de l'emballage.
- 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 de l'étanchéité de l'enceinte de confinement.
- Le contrôle des débits d'équivalent de dose autour de l'emballage.
- 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 qualité

Les réglementations de transport des colis de matières radioactives en vigueur à la date du présent document <1> 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.

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

## 11. Références

<1> Règlements applicables :

- Règlement de transport des matières radioactives de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA), norme de sûreté, SSR-6, édition 2012.
- Accord européen relatif au transport des marchandises dangereuses par route (ADR), édition applicable 2019.
- Règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses (RID), édition applicable 2019.
- Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voies de navigation intérieure (ADN), édition applicable 2019.
- Arrêté du 29 mai 2009 modifié relatif aux transports de marchandises dangereuses par voies terrestres (dit « arrêté TMD »).