


AREVA TN NUCLEAR LOGISTICS OPERATIONS	DIFFUSION LIBRE AREVA			
DOSSIER DE SURETE	DOSSIER PUBLIC			
EMBALLAGE TN 112	Préparation	Date	Signature	Identification
				DOS-06-00037317-001
	Vérification	Date	Signature	Rév. 00 Page 1 / 27

TN International

DESCRIPTION ET PERFORMANCES DU MODÈLE DE COLIS TN 112

Sommaire

ÉTAT DES RÉVISIONS	2
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	15
5. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE CONFINEMENT	18
6. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE RADIOPROTECTION	21
7. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE SÛRETÉ-CRITICITÉ	23
8. CONDITIONS D'UTILISATION	25
9. PROGRAMME D'ENTRETIEN PÉRIODIQUE	26
10. PROGRAMME D'ASSURANCE QUALITÉ	26
11. RÉFÉRENCES	27

ÉTAT DES RÉVISIONS

Rév.	Date	Objet et historique des révisions	Préparé par / Vérifié par
00		Création du document	

1. OBJET

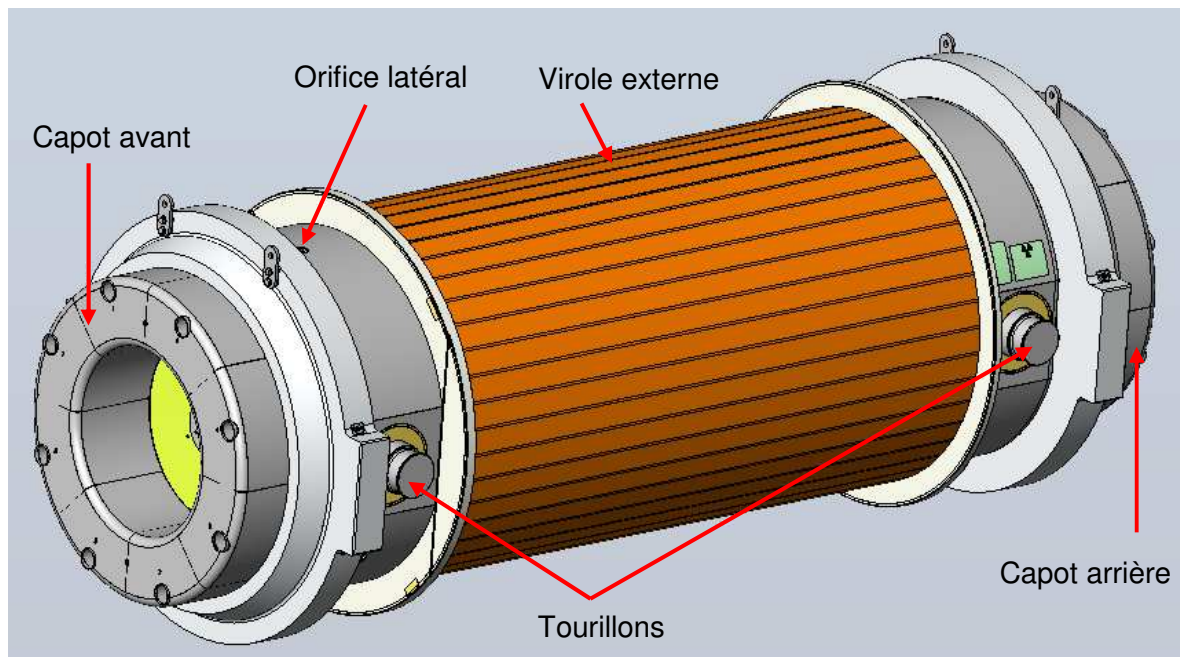
L'objet de ce chapitre est de décrire les caractéristiques des performances du colis TN[®]112 destiné au transport par voie routière, ferroviaire, fluviale ou maritime, d'assemblages combustibles REP 17 × 17 irradiés, dans un aménagement interne, en tant que colis de type B(M) contenant des matières fissiles au regard de la réglementation <1>.

2. DESCRIPTIONS ET DÉFINITIONS

2.1 Description du colis

Le combustible nucléaire usé issu du fonctionnement des réacteurs civils de puissance à eau légère pressurisée est constitué de crayons de combustible 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[®]112 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 = 7,001 m ;
- Largeur = 2,790 m.

Le colis TN[®]112 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 primaire en acier forgé comportant une cavité interne, composé d'une virole et d'un fond soudés sur la totalité de leur épaisseur.

En section courante, il est muni à l'extérieur de la virole de profilés en aluminium remplis de plomb, assurant les fonctions de dissipation thermique et de protection contre le rayonnement.

- Un corps secondaire en acier forgé composé d'une virole secondaire soudée sur la totalité de son épaisseur à ses extrémités sur la bride de tête et sur la bride de fond.
- Un habillage comprenant un matériau de blindage neutronique et une structure de dissipation thermique avec des ailettes de refroidissement.
- Des tourillons vissés dans le corps secondaire (2 en tête et 2 en fond) constituent les points de préhension pour la manutention, le basculement et servent à l'arrimage en transport.
- Aux extrémités de la zone ailetée, deux couronnes circulaires en acier inoxydable et aluminium dénommées « support de jupe » à l'avant et « guide de jupe » à l'arrière permettent de fixer une jupe de protection contre la contamination pendant les opérations de chargement et déchargement en piscine et sert aussi d'amortisseur complémentaire en conditions accidentelles de chute.

Le système de fermeture est constitué des sous-ensembles suivants :

- Un système de fermeture du corps primaire et de la cavité, constitué d'un bouchon maintenu par une couronne de serrage en acier fixée par des vis dans le corps primaire.

Le bouchon comprend une couche de matériau de blindage neutronique et de protection contre les rayonnements gamma.

Il est muni de 3 orifices donnant accès à la cavité de l'emballage. Deux orifices, munis d'un tampon et d'un obturateur blindé, donnent accès au fond de la cavité. Le troisième, muni d'un capuchon, donne accès en tête de la cavité.

- Un système de fermeture de fermeture du corps secondaire, en acier, constitué d'un couvercle, maintenu par des vis.

Le couvercle est muni d'un orifice obturé par un capuchon.

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 :

- Le capot avant est constitué d'un capot amortisseur constitué de matériaux amortisseurs (bois et aluminium), d'un raidisseur en acier inoxydable et d'une protection thermique. Le raidisseur comporte une plaque anti-poinçonnement afin de protéger le système de fermeture secondaire lors des épreuves des conditions accidentelles de transport.

Le capot avant est emboîté sur la bride secondaire de tête. Il est fixé par des vis et des pions.

- Le capot arrière est constitué d'un capot amortisseur constitué de matériaux amortisseurs (bois et aluminium) et d'un raidisseur en acier inoxydable et bois.

Le capot arrière est emboîté sur la bride de fond secondaire. Il est fixé par des vis et des pions.

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 destiné à recevoir les assemblages combustibles.

Le panier de l'emballage TN[®]112 consiste en un assemblage d'éléments en aluminium, d'éléments en aluminium enrichi en bore et de renforts 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 plaque supérieure du panier est composée de plats entrecroisés en titane. Le maintien de l'empilement axial des éléments du panier est assuré par des tirants en acier inoxydable.

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, la teneur maximale en oxyde mixte d'uranium et de plutonium, le taux de combustion moyen maximal et le temps de refroidissement minimal des assemblages combustibles, résumés dans le tableau suivant :

	Contenu n°1 ou 2		
	12 assemblages combustibles irradiés à oxydes UO ₂ (UOX) ou UO ₂ -PuO ₂ (MOX) en proportion quelconque		
Type d'assemblage	UOX 17x17	MOX 17x17	
Taux de combustion moyen maximal par assemblage (MWj/tU) :	55 000	45 000	52 000
Durée de refroidissement minimale :	180 j	500 j	839 j
Enrichissement maximal en ²³⁵ U des pastilles	≤ 4,55 %	Voir tableau suivant	
Teneur initiale maximale en Pu	/		

Enrichissement en ²³⁵U et teneur en Pu maximales des pastilles MOX

	Contenu n°1		Contenu n°2	
	Enrichissement maximal en ²³⁵ U des pastilles UO ₂	≤ 0,7 %	≤ 0,3 %	≤ 0,3 %
Teneur initiale maximale en Pu	≤ 8,2 %	≤ 8,9 %	≤ 10,20 %	≤ 11,21 %

Nota : les critères de définition des contenus présentés ci-dessus ne sont pas exhaustifs.

- La puissance thermique maximale par assemblage.
- La composition isotopique des pastilles à oxyde mixte d'uranium et de plutonium.
- Le nombre maximal de crayons inétanches présents dans le contenu, leur puissance thermique et la puissance thermique totale du chargement.

2.4 Barrières d'étanchéité

L'emballage TN[®]112 est constitué de deux barrières étanches indépendantes l'une de l'autre :

- L'enceinte primaire constituée par :
 - le corps primaire, constitué de la virole et de son fond soudé,
 - son système de fermeture, comprenant :
 - le bouchon muni de son joint intérieur,
 - la couronne de fixation,
 - les 2 tampons d'orifice munis de leur joint intérieur,
 - le capuchon d'orifice muni de son joint intérieur.

- L'enceinte secondaire constituée par :
 - Le corps secondaire, constitué de la virole secondaire soudée à la bride secondaire de tête et à la bride de fond,
 - son système de fermeture
 - le couvercle muni de son joint intérieur,
 - le capuchon d'orifice du couvercle muni de son joint intérieur.

Les viroles et les fonds et brides sont soudés entre eux par des soudures « pleine pénétration ».

2.5 Enceinte de confinement

L'enveloppe de confinement est délimitée par l'une des deux enceintes décrites précédemment (primaire ou secondaire).

2.6 Système d'isolement

Le système d'isolement vis-à-vis des autres colis est assuré par :

- la masse de métal lourd et l'enrichissement du contenu,
- le panier,
- le corps primaire, le corps secondaire et les systèmes de fermeture.

2.7 Masse du colis

La masse maximale autorisée du colis TN[®]112 en transport est de 115,5 t.

3. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE MÉCANIQUE

3.1 Conditions de transport de routine

Arrimage et manutention

L'arrimage et la manutention du colis sont réalisés par les 2 paires de tourillons vissés dans le corps secondaire forgé.

La tenue des tourillons est justifiée pour des chargements statiques représentatifs des accélérations vues en transport, ainsi qu'en prenant en compte 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

Chacune des deux enceintes de confinement (primaire et secondaire), comprenant les vis de fixation, constitue une enceinte à pression dimensionnée pour résister à une pression interne relative de 7 bars selon les règles de calcul du code ASME, Section III, Division 1, Sous-section NE. Cette pression de dimensionnement est bien supérieure aux pressions pouvant être rencontrées en conditions réglementaires de transport.

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) sont sans impact sur la sûreté du colis.

Endommagements

L'emballage ne subit pas de dommages susceptibles de nuire ni au confinement du contenu ni à l'efficacité du blindage 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 115,5 t.

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

Les configurations les plus pénalisantes de chute libre de 9 mètres et de 1 mètre sur poinçon sont étudiées ; soit au total 5 chutes de 9m et 3 chutes de 1m sur poinçon.

Les séquences de chutes retenues pour être testées physiquement sont celles maximisant les sollicitations et dommages possibles :

- aux deux barrières d'étanchéité, en particulier à leurs systèmes de fermeture, ou,
- aux éléments de fixations des capots de tête et de fond.

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.

Trois maquettes de chute à l'échelle 1/3 ont été utilisées pour réaliser le programme de chutes. Elles sont représentatives du modèle de colis, pour les essais effectués.

Les maquettes de chute ont été conçue et fabriquée de manière à simuler le comportement le plus défavorable du modèle de colis. Ainsi les différences de concept ou de fabrication sont pénalisantes ou sans incidence notable sur la représentativité de la maquette lors des chutes sur poinçon ou lors des chutes de 9 mètres.

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 présentées succinctement ci-après.

Définition et liste des chutes testées

Deux angles définissent l'orientation de l'emballage lors des chutes :

- l'angle de chute par rapport à l'horizontale,
- l'angle définissant la génératrice d'impact.

L'ensemble des chutes réalisées est listé dans le tableau suivant.

Séquence	Chute testée (CAT)		Inclinaison principale du colis			Zone d'impact du composant visée
	Chute de 1m sur poinçon	Chute de 9m	Axiale	Oblique	Latérale	
1	X			X		virole externe ailetée
2	X			X		oreille (couronne externe) du capot de tête
		X			X	oreille (couronne externe) du capot de fond
3		X	X			capot de tête
4		X	X			capot de fond
5		X		X		capot de tête
6	X			X		raidisseur de tête
		X			X	capot de fond

La génératrice d'impact varie d'une séquence de chute à l'autre.

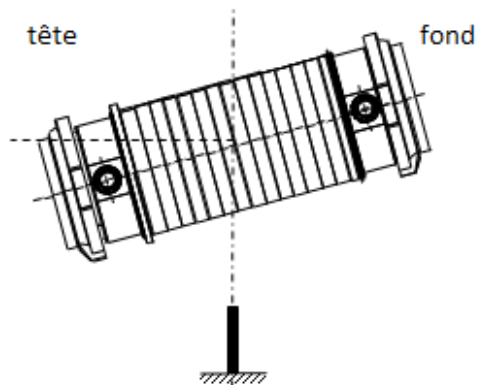
Déroulement et constats des essais de chutes

Chaque chute fait l'objet de vérifications et constats avant chute et après chute.

Pendant la chute, la maquette est instrumentée et génère des mesures accélérométriques.

Après chute, les dommages causés sont analysés et des relevés dimensionnels réalisés afin de vérifier la géométrie après chute et de déduire les hauteurs d'écrasement des composants impactés. Des tests d'étanchéité sont réalisés à la fin d'une séquence de chutes.

SEQUENCE 1

S1 - chute oblique sur poinçonZone d'impact du composant visée :

virole externe ailetée

Constats après chute :

- Léger matage de la virole secondaire.

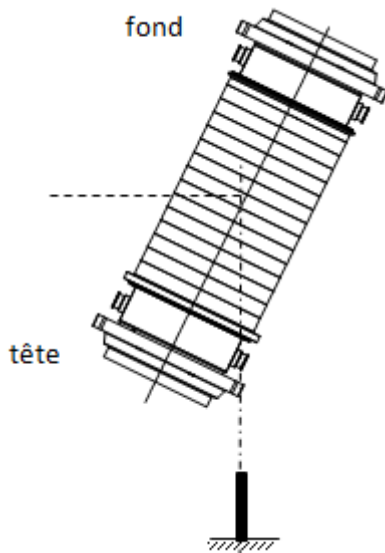


CONSTATS FIN DE SEQUENCE 1 :

Étanchéité

- Contrôles d'étanchéité satisfaisants.

SEQUENCE 2

S2 - chute oblique sur poinçonZone d'impact du composant visée :

couronne externe du capot de tête

Déroulement de la chute

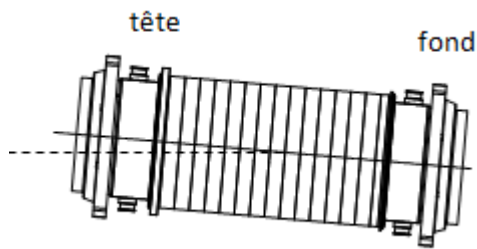
Le poinçon a d'abord impacté l'oreille du capot (génératrice 90°) en venant traverser celui-ci. Après impact de la zone d'amortissement axiale du capot sur le sol, la maquette a basculé générant deux impacts secondaires du poinçon sur le tourillon et sur le support de jupe.

Constats après chute :

- Desserrage de certaines vis du capot de tête ainsi qu'une vis du capot de fond.

- Léger impact du capot de fond lors de l'impact secondaire mais sans conséquence.



S2 - chute latérale de 9 m (quasi-horizontale)Zone d'impact du composant visée :

Chute latérale premier impact capot de fond, zone oreille

Constats après chute :

- Déformation de l'oreille du capot de fond.
- Pas de rupture de vis de fixation du capot de fond.
- Sur le capot de tête, cisaillement d'une vis lors de l'impact.
- Pas d'impact du tourillon de tête ni du support de jupe.



(fond)

Cette chute démontre le non-endommagement des ailettes en cas de chute latérale sur la génératrice tourillons.

CONSTATS FIN DE SEQUENCE 2 :

Capots et raidisseurs

- Déformation des pions du capot de fond entraînant un matage local de leur zone de contact avec la bride.
- Casse de certaines vis du capot de tête lors du desserrage.
- Encastrement des deux raidisseurs dans les brides.
- Déformation des goussets du raidisseur de tête par l'impact.
- Pas de rupture des vis du capot de fond, même lors du desserrage.

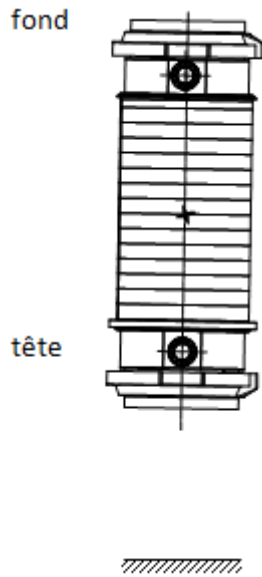
Brides

- Déformation importante de la bride de tête entraînant une déformation du caisson de résine créant un jeu autour du tourillon et une rupture locale des soudures du caisson sur la bride.

Étanchéité

- Contrôles d'étanchéité satisfaisants.

SEQUENCE 3

S3 - chute axiale de 9 mZone d'impact du composant visée :

capot de tête

Constats après chute :

- Seul le bois a impacté la cible. Ecrasement du bois du caisson de bois du capot de tête sur la circonférence
- Pas d'impact sur la partie aluminium du capot.
- Pas de desserage des vis du capot de tête.



CONSTATS FIN DE SEQUENCE 3 :

Capots et raidisseurs

- Ecrasement uniforme sur la circonférence du caisson de bois du capot de tête.
- Faible déformation du raidisseur de tête.

Systèmes de fermeture

- Couvercle maté au niveau des raidisseurs circulaires.
- Couronne de fixation du bouchon également matée localement.

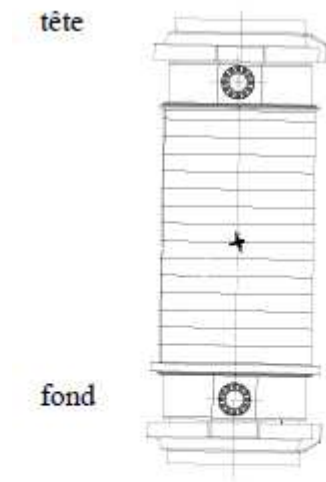
Brides

- Déformations négligeables de la bride de tête.

Étanchéité

- Contrôles d'étanchéité satisfaisants.

SEQUENCE 4

S4 - chute axiale de 9 mZone d'impact du composant visée :

capot de fond

Constats après chute :

- Encastrement du capot dans la bride mais sans contact avec le caisson de résine.
- Pas de rupture de vis.



CONSTATS FIN DE SEQUENCE 4 :

Capots et raidisseurs

- Léger desserrage des vis du capot, mais pas de rupture de celles-ci.
- Zone d'amortissement axiale désolidarisée du capot.
- Légère déformation du raidisseur.

Systèmes de fermeture

- Maintien du serrage de toutes les vis de la couronne.
- Desserrage de certaines vis du couvercle secondaire.
- Pas de déformation notable sur les systèmes de fermeture.

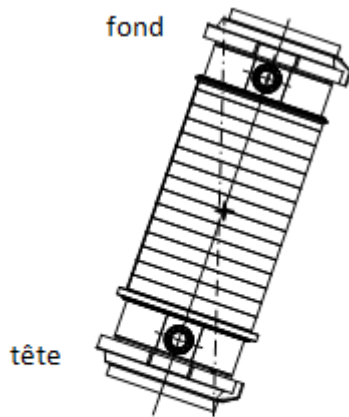
Brides

- Déformations négligeables des brides aussi bien en fond qu'en tête.

Étanchéité

- Contrôles d'étanchéité satisfaisants.

SEQUENCE 5

S5 - chute oblique de 9 mZone d'impact du composant visée :

Capot de tête

Domages causés et constats :

- Rupture de la soudure de la tôle de protection du caisson de résine.



CONSTATS FIN DE SEQUENCE 5 :

Capots et raidisseurs

- Léger desserrage de certaines vis, mais pas de rupture de vis.
- Impact de l'aluminium du capot sur une certaine largeur avec écrasement de celui-ci.
- Arrachage du caisson de résine soudé sur la virole par le capot,
- Encastrement du capot sur la bride qui a engendré une faible augmentation du jeu entre le capot et le caisson.
- Déformation négligeable du raidisseur.

Systèmes de fermeture

- Pas de desserrage des vis du couvercle et de la couronne.
- Matage local du couvercle par le raidisseur.
- Pas de trace d'impact de la couronne sur le couvercle.
- Faible augmentation du jeu entre le couvercle et la couronne.

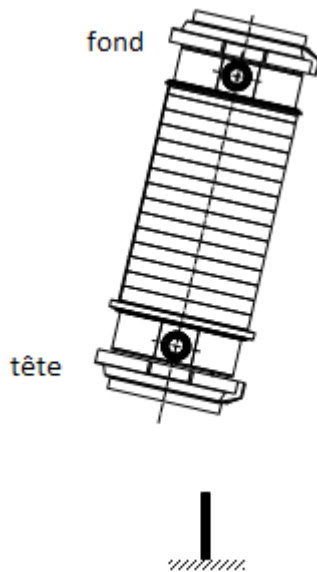
Brides

- Déformations des brides négligeables aussi bien en fond qu'en tête.

Étanchéité

- Contrôles d'étanchéité satisfaisants.

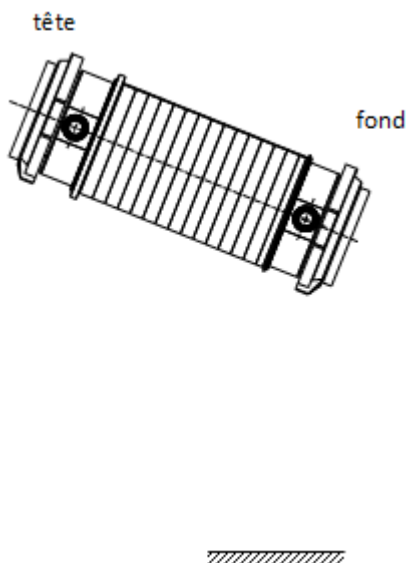
SEQUENCE 6

S6 - chute de 1 m sur poinçonZone d'impact du composant visée :

raidisseur de tête au centre de la zone située entre les deux goussets circulaires

Domages causés :

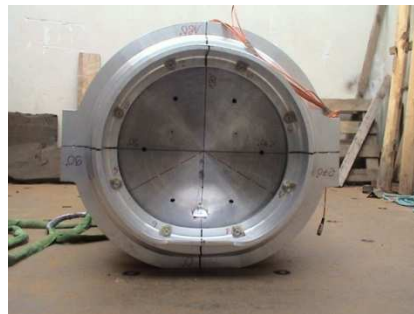
- Déformation locale du raidisseur de tête

S6 - chute latérale de 9 mZone d'impact du composant visée :

Capot de fond

Domages causés :

- Ecrasement des capots sur la génératrice d'impact.
- Pas de rupture de vis de fixation des capots.
- Impact des supports de jupe et des ailettes.



CONSTATS FIN DE SEQUENCE 6 :

Capots et raidisseurs

- Déformation des pions du capot de fond entraînant un matage local de leur zone de contact avec la bride.
- Lors du desserrage du capot de tête et de fond, casse de certaines vis et flexion d'autres vis.
- Encastrement des deux raidisseurs dans les brides.

Brides

- Déformation importante des brides entraînant une déformation des caissons de résine et une rupture locale des soudures des caissons sur la bride.
- Ovalisation de la cavité.

Étanchéité

- Contrôles d'étanchéité satisfaisants.

Conclusion des essais du programme des chutes réalisées

Suite aux épreuves des chutes en conditions accidentelles de transport, les enveloppes de confinement des maquettes ne présentent aucune déformation susceptible de nuire à leur étanchéité, et ce pour toutes les configurations de chute. Les capots d'extrémité restent solidaires du corps de la maquette ainsi que les raidisseurs de fond, de tête et l'isolant thermique confiné dans le raidisseur de tête.

La diminution de blindage est négligeable et ne consiste qu'en une perforation locale des capots ou de la virole externe en cuivre.

Les autres endommagements des maquettes concernent principalement les éléments amortisseurs (capots et couronnes de porte jupe) prévus pour reprendre la majorité de l'énergie de chute.

Les essais de chute réalisés ont par ailleurs permis de déterminer les accélérations maximales (correspondant à des décélérations mesurées lors des chutes) à prendre en compte dans les calculs complémentaires des démonstrations de sûreté de la résistance de l'emballage et de son aménagement interne, dans les conditions accidentelles de transport.

Ces accélérations sont déterminées pour les 4 cas suivants :

- chute axiale sur capot de tête,
- chute axiale sur capot de fond,
- chute oblique,
- chute latérale.

Analyses complémentaires au programme de chutes

En complément des essais réalisés, il a été vérifié par des études :

- que la variation des caractéristiques mécaniques du bois en température ainsi que l'influence des caractéristiques mécaniques de l'aluminium des capots ont une faible incidence et ne remettent pas en cause les résultats des essais de chutes,
- que le risque de rupture fragile à -40°C est écarté, en particulier pour la couronne du bouchon, car celle-ci est constituée d'un acier sensible au risque de rupture fragile.

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 maximale par assemblage, correspondant à une puissance linéique maximale, définie pour le 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,
- le remplissage en hélium de la cavité et de l'espace inter-viroles,
- la virole primaire en acier, son épaisseur,
- les profilés en aluminium dans le milieu inter-viroles, leur épaisseur,
- la virole secondaire en acier, son épaisseur,
- les conducteurs en cuivre soudés sur la virole secondaire,

- les ailettes externes de refroidissement en cuivre soudés sur la virole externe, qui favorisent le refroidissement par convection,
- la valeur des jeux entre les composants du colis,
- les propriétés thermiques des matériaux,
- la position horizontale du colis, en 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. Le calcul thermique est réalisé selon la méthode des volumes finis avec le module TMG interfacé avec I-DEAS.

Le modèle numérique est un modèle 3D représentant tous les composants du colis TN 112 (emballage, panier, systèmes de fermeture et capots).

Les principales hypothèses et simplification du modèle sont :

- 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 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 thermique. 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 en fin de fabrication, et d'un coefficient d'échange radiatif calculé à partir d'un modèle numérique représentant une ailette.

Les différentes configurations de calculs ci-dessous permettent de tenir compte de toutes les positions possibles du contenu dans la cavité.

- configuration 1 = panier et assemblages positionnés côté fond de l'emballage,
- configuration 2 = panier et assemblages positionnés côté bouchon de l'emballage,
- configuration 3 = panier et assemblages positionnés côté bouchon de l'emballage avec décentrement radial du panier dans la cavité.

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 :

- Joints d'étanchéité : la température maximale des joints permet de justifier leur non-endommagement sur un nombre de cycles de transport compatible avec leur fréquence de remplacement en maintenance. Par ailleurs, la dilatation des joints dans leur gorge vérifie un taux de remplissage inférieur à 100%.
- Plomb du milieu inter-viroles : la température maximale du plomb reste inférieure à sa température de fusion,
- Résine neutrophage : la température maximale de la résine reste inférieure à sa limite d'utilisation.

Dans le cas d'un emballage chargé de 12 assemblages combustibles REP 17 × 17 dissipant la puissance maximale autorisée, la température des surfaces accessibles dépasse 85°C. L'utilisation d'une barrière thermique est nécessaire conformément aux prescriptions réglementaires.

4.2 En conditions normales de transport

Les épreuves 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 du §4.1 restent applicables.

4.3 En conditions accidentelles de transport

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les calculs tiennent compte des endommagements suivants :

- l'ovalisation des viroles consécutives aux épreuves de chutes réglementaires,
- la configuration du milieu inter-viroles (position des jeux entre les composants du milieu inter-viroles et caractéristiques de ces composants).

NB : l'intégrité des capots amortisseurs est préservée après les chutes réglementaires.

Pendant la phase de refroidissement après feu, le colis est considéré en position verticale, position pénalisante vis-à-vis des échanges convectifs dans la zone ailetée.

Hypothèses importantes pour l'étude

La principale hypothèse utilisée est la suivante :

- 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 de la manière suivante :

- A. Le champ de température initial du colis est celui des conditions de transport de routine ayant conduit aux températures des joints d'étanchéité du colis les plus élevées.
- B. Pendant la durée réglementaire de 30 minutes, le feu est simulé par :
 - une température ambiante réglementaire de 800°C,
 - un coefficient d'échange convectif dans la zone ailetée égal au coefficient recommandé par la réglementation de 10 W/m²/K représentatif d'une convection forcée dans un incendie englobant,
 - l'émissivité des flammes de 0,9 et l'absorptivité des surfaces externes de 0,8 conformément à la réglementation.
- C. Après feu :
 - 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 effectué suite à un essai thermique.
 - l'émissivité des surfaces externes reste à 0,8.

Les configurations de calcul 1 et 2 indiquées au §4.1 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 (température supposée constante pendant 7 jours de manière pénalisante),

conduit à des endommagements cumulés très inférieurs à 1.

Enfin, les taux de remplissage des gorges de 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[®]112 inclut le cas du colis contenant des assemblages combustibles ainsi que celui du 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 élastomères ;
- les fuites de gaz radioactif ;
- les fuites de particules aérosols radioactives.

L'analyse de confinement établit également des critères pour que la limite inférieure d'inflammabilité du dihydrogène à l'intérieur du colis ne soit pas atteinte pendant toute la durée de transport.

5.1 Conditions de transport de routine

En Conditions de Transport de Routine, il est démontré que la pression dans la cavité de l'emballage reste inférieure à la pression de dimensionnement des enceintes de confinement.

La présence de crayons inétanches est permise dans le contenu. L'étude de la limite inférieure d'inflammabilité du dihydrogène limite :

- leur nombre dans le contenu,
- la puissance maximale unitaire des assemblages du chargement.

Le débit d'activité relâchée est calculé en Conditions Normales de transport et en Conditions Accidentelles de Transport.

5.2 En conditions normales de transport

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Les sources radioactives sont déterminées avec le code ORIGEN-ARP, sur la base des caractéristiques suivantes des combustibles pouvant être transportés :

Type de combustible	UO ₂	MOX
Taux de combustion moyen maximal par assemblage (MWj/t _{ML})	55 000	52 000
Durée de refroidissement minimale (jours)	180	500

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 :

- le taux de fuite maximal de chacune des barrières d'étanchéité (voir §2.4), vérifiés avant expédition,
- la pression maximale de remplissage du colis définie dans les conditions d'utilisation,
- la pression de vapeur d'eau due à la présence d'eau dans les crayons inétanches (pour les contenus comportant des crayons inétanches),
- les températures 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 – Release rate of Gas Fission) dans la cavité est pris égal à la valeur pour laquelle les caractéristiques des assemblages irradiés REP 17 × 17 sont les plus pénalisantes, conformément aux recommandations de l'ASN,

- La pression externe du colis est de 0,85 bar ; cette pression limite le transport à une altitude de 1200 m par rapport au niveau de la mer.
- La durée de transport de 1 an pour le contenu sans crayon inétanche, et de 60 jours avec au moins un crayon inétanche.
- La quantité maximale d'eau susceptible de pénétrer à l'intérieur de l'emballage est calculée en supposant que celui-ci est immergé verticalement sous 15 m d'eau pendant 8 heures suite aux conditions normales de transport.
- 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. Le volume d'eau contenu dans les crayons inétanches est donc pris en compte.

Méthode de calcul

La méthodologie de calcul du débit d'activité relâchée appliquée est décrite dans la norme ISO 12807. Elle est basée sur un scénario en 2 phases :

- A. La phase de rentrée d'air : pendant la durée de transport (1 an pour les contenus sans crayon inétanche ; 60 jours pour les contenus comprenant au moins un crayon inétanche), la pression atmosphérique est supposée majorante (1,04 bar absolu). Le colis étant en dépression, le flux de fuite se fait de l'extérieur vers l'intérieur, faisant augmenter 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 durée de transport, la pression atmosphérique chute brutalement à 0,85 bar absolu, ce qui engendre un flux de fuite de l'intérieur vers l'extérieur. Le relâchement d'activité calculé est comparé au critère réglementaire de $10^{-6} A_2/h$.

Enfin, la quantité de dihydrogène produite est évaluée et il est vérifié que la limite inférieure d'inflammabilité dans la cavité n'est pas atteinte. Celle-ci est déterminée pour différentes puissances de chargement en considérant les températures maximales des gaz dans la cavité issues de l'étude thermique en conditions normales et accidentelles de transport.

Résultat de l'étude

Le débit d'activité relâchée, tous chargements confondus, est inférieur au critère réglementaire de $10^{-6} A_2/h$. Le critère réglementaire est respecté.

5.3 En conditions accidentelles de transport

Hypothèses importantes pour l'étude

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

- Le taux de rupture de crayons en conditions accidentelles de transport est de 100%.
- Les températures des gaz et des joints sont issues des calculs thermiques en conditions accidentelles de transport, engendrées par l'épreuve de feu (cf. § 4.3).
- La quantité maximale d'eau susceptible de pénétrer à l'intérieur de l'emballage est calculée en supposant que celui-ci est immergé verticalement sous 0,9 m d'eau pendant 8 heures suite aux conditions accidentelles de transport.

Résultat de l'étude

La pression interne maximale, atteinte en cas de rupture de toutes les gaines des assemblages, ne dépasse pas la pression de dimensionnement des deux enceintes de confinement.

Le débit d'activité relâchée, tous chargements confondus, est inférieur au critère réglementaire de 1 A₂ cumulé sur une semaine, avec une marge significative.

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. Il est vérifié que la quantité de dihydrogène produite reste inférieure à la limite inférieure d'inflammabilité dans la cavité, qui est déterminée pour différentes puissances de chargement en considérant les températures maximales des gaz issues de l'étude thermique en conditions normales et accidentelles 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.
- Conditions 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 des contenus radioactifs sont limitées par la définition des contenus.

Le calcul des débits d'équivalent de doses sont réalisés en étudiant 3 chargements représentatifs et enveloppes des contenus, dont les assemblages combustibles présentent les principales caractéristiques suivantes :

Chargements étudiés :	12 UO ₂	12 MOX	12 MOX
Taux de combustion moyen maximal par assemblage (MWj/t _{ML})	55 000	52 000	45 000
Durée de refroidissement minimale (jours)	180	839	500

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 également 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 en partie courante, de l'intérieur vers l'extérieur de l'emballage, est principalement formé par :

- la virole primaire en acier,
- le plomb contenu dans les profilés en aluminium,
- la virole secondaire en acier,
- la couche de résine traversée par les conducteurs en cuivre,
- l'enveloppe externe formée par les conducteurs en cuivre soudés entre eux.

Le blindage radial aux extrémités, de l'intérieur vers l'extérieur de l'emballage, est principalement formé par :

- les brides primaire et secondaire de tête et de fond,
- des caissons de résine protégés par des 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, de l'intérieur vers l'extérieur de l'emballage, est principalement formé par :

- en tête,
 - le bouchon comportant une partie massive en acier et une couche de résine fermée par une tôle de fermeture en acier,
 - la couronne de fixation,
 - le couvercle en acier,
 - le raidisseur de tête amovible (acier),
- en fond :
 - le fond du corps primaire,
 - la bride de fond du corps secondaire,
 - le caisson de résine du fond,
 - le raidisseur de fond (acier).

Hypothèses importantes pour l'étude

Dans cette étude, les hypothèses suivantes ont été prises :

- Le milieu inter-viroles est modélisé par un milieu homogène de densité équivalente représentative du milieu.
- L'effet du vieillissement en température de la résine a été pris en compte.

Méthode de calcul

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

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

Les valeurs de débit d'équivalent de dose ne dépassent pas les valeurs réglementaires pour les conditions de transport de routine.

6.2 En conditions normales de transport

Les épreuves mécaniques résultant des conditions normales de transport impactent uniquement les capots amortisseurs.

Les critères réglementaires de débits d'équivalent de dose sont respectés.

6.3 En conditions accidentelles de transport

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les calculs tiennent compte des endommagements suivants :

- Destruction partielle de la résine suite à l'épreuve thermique des CAT,
- Influence du tassement de plomb suite aux épreuves de chutes des CAT,
- Influence du poinçonnement de la résine suite aux épreuves de chutes des CAT.

Résultat de l'étude

Les valeurs de débit d'équivalent de dose ne dépassent pas la valeur réglementaire à 1m pour les conditions accidentelles de transport.

7. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE SÛRETÉ-CRITICITÉ

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

- le colis isolé en conditions de 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 des 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 considérant le contenu ruiné.

L'analyse est basée sur le calcul du coefficient de multiplication (k_{eff}) d'un colis isolé et d'un réseau de colis, dans les conditions réglementaires de modération et de réflexion, et la vérification du respect des critères retenus ci-dessous :

$$k_{eff} + 3\sigma \leq 0,950 \text{ pour un colis isolé,}$$

$$k_{eff} + 3\sigma \leq 0,980 \text{ pour un réseau de colis,}$$

où σ représente l'écart type.

7.1 Colis isolé

Hypothèses concernant le contenu importantes pour l'étude

Dans cette étude, les assemblages combustibles sont considérés ruinés, c'est-à-dire que toute la matière fissile est modélisée dans la configuration géométrique la plus pénalisante (sphères concentriques), sans éléments de structure de l'assemblage.

La masse de métal lourd et l'enrichissement (pour les assemblages type UO₂) ou la teneur en plutonium (pour les assemblages type MOX), sont les principales caractéristiques du combustible importantes pour cette étude.

La quantité maximale de matières fissiles (masse totale maximale d'oxyde d'uranium ou d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium) est prise en compte (enrichissement maximal initial avant irradiation pour les assemblages à oxyde d'uranium, teneur initiale maximale en plutonium avant irradiation pour les assemblages à oxyde mixte d'uranium et de plutonium).

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Le colis est isolé et entouré d'une couronne d'eau de 20 cm d'épaisseur.

L'emballage est considéré endommagé, ce qui est intégré dans le modèle par des simplifications consistant à ne pas prendre en compte certains composants, par exemple en les remplaçant par de l'eau, afin de maximiser les réflexions neutroniques et de minimiser les propriétés absorbantes de certains matériaux de l'emballage. Ces simplifications sont pénalisantes vis-à-vis de la réactivité du colis.

Hypothèses importantes pour l'étude

Dans l'étude, il est considéré, que :

- la matière fissile est localisée de manière pénalisante en dehors de la partie empoisonnée (comportant un poison neutronique) du panier,
- le combustible est non irradié (enrichissement plus conséquent en matière fissile).

Les calculs sont réalisés en considérant l'introduction d'une quantité limitée d'eau. Cette hypothèse est justifiée, conformément à la réglementation <1>, par la présence de deux barrières d'étanchéité qui restent étanches à l'issue des épreuves réglementaires des conditions accidentelles de transport et dont les contrôles avant transport pour vérifier la bonne fermeture, le séchage et l'étanchéité sont renforcés pour se prémunir du risque d'erreur humaine.

Les quantités maximales d'eau dans le colis prises en compte sont pénalisantes par rapport à celles calculées dans les études de confinement dans lesquelles les origines suivantes sont prises en compte :

- 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 8h à l'issue des épreuves réglementaires des conditions accidentelles de transport,
- la quantité d'eau présente dans les crayons inétanches.

La réactivité maximale du colis est recherchée en faisant varier le rapport de modération de la matière fissile.

Codes de calcul

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

Résultat 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

La modélisation du modèle de colis considérée pour le colis isolé est reprise pour l'étude de sûreté-criticité du réseau de colis en considérant une réflexion optique des neutrons à la surface du système d'isolement.

Résultat 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 réseau de colis en transport est assurée.

L'indice de sûreté-criticité CSI est égal à 0.

8. CONDITIONS D'UTILISATION

L'emballage transporté sous utilisation exclusive, en position horizontale sur un châssis de transport. Il peut être transporté par voie routière, ferroviaire, fluviale ou maritime.

Les opérations de chargement et de déchargement des assemblages combustibles sont effectuées avec l'emballage en position verticale, sous eau.

Les principales opérations et vérifications ci-dessous permettent de vérifier le respect des critères réglementaires 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,
- le contrôle de la bonne fermeture (couple de serrage des vis) et du 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 contrôlées par une personne différente de celle qui les a réalisées, comme requis par le système qualité, afin de s'assurer du respect des exigences,
- Pour les chargements comportant au moins un crayon inétanche, la durée de fermeture de l'enceinte de confinement étant limitée à 60 jours, 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,
- le contrôle de la non contamination de l'emballage et la vérification du respect des limites réglementaires,
- le contrôle des débits d'équivalent de dose autour du colis et la vérification du respect des limites réglementaires,
- dans le cas d'un transport comportant au moins un assemblage combustible, la mesure de la température des surfaces accessibles et si celle-ci dépasse 85°C, la mise en place de barrières thermiques,

- la mise en place de l'étiquetage réglementaire.

Pour le cas de l'emballage transporté à vide, sans assemblage, les instructions d'utilisation de l'emballage sont adaptées au niveau de risque de sorte que certaines opérations ne sont pas requises dans ce cas. Par exemple, le drainage de la cavité n'est pas suivi d'un séchage, du fait de l'absence de contenu fissile et de l'absence de risque de radiolyse de l'eau.

9. PROGRAMME D'ENTRETIEN PÉRIODIQUE

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 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 après une durée compatible avec leur 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(s), 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 en vigueur à la date du présent document font obligation d'appliquer des programmes d'assurance de la qualité pour :

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

des colis de matières radioactives.

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

11. RÉFÉRENCES

- <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) ;
- 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).