

Identification :

DOS-18-012233-004

Version : 3.0

Page 2 sur 26

Etat de la révision

Rev.	Date	Modifications	Prepared by / Verified by
Ancienne référence : DOS-07-00080476-004			
00	11/2016	Création du document	
01	12/2016	Corrections mineures	
Nouvelle référence : DOS-18-012233-004			
1.0	14/09/2018	Prise en compte de la possibilité de transporter un nombre quelconque d'assemblages combustibles et/ou de chemises sans assemblage	
2.0	13/11/2020	Suppression du cas des assemblages REB 9x9 Changement du taux de rupture de gaines en CNT à 5% Modifications mineures	
3.0	Voir 1 ^{ère} Page	Mise à jour de la réglementation applicable Modifications formelles (non tracées)	

1. OBJET

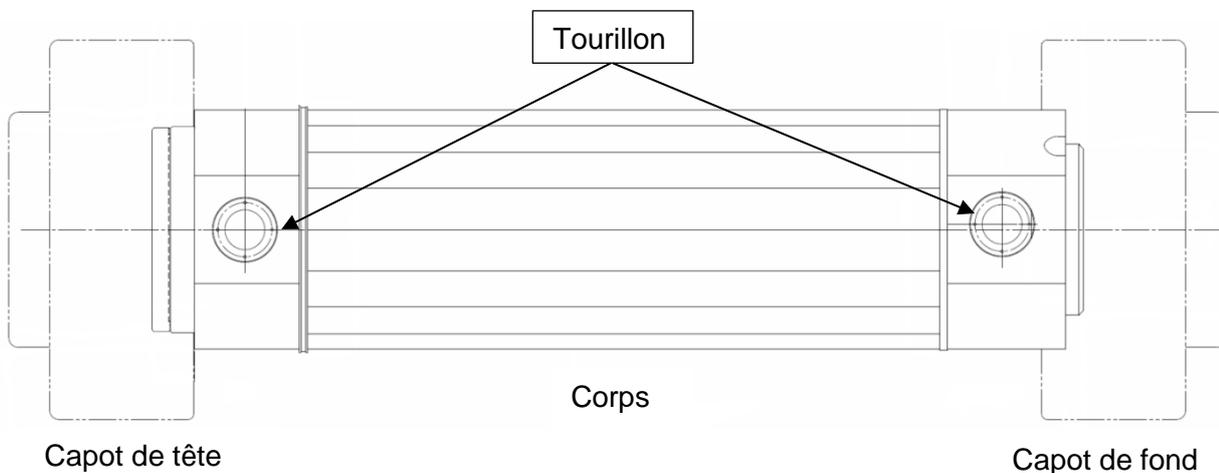
L'objet de ce chapitre est de décrire les caractéristiques de performances du modèle de colis TN[®] 9/4, destiné au transport par voie routière d'au maximum 7 d'assemblages combustibles irradiés REB 10x10-B, REB 10x10-C et/ou REB 10x10-D et/ou de chemises seules sans assemblage, en tant que colis de type B(U) contenant des matières fissiles au regard de la réglementation [1].

2. DESCRIPTIONS ET DEFINITIONS

2.1. Description du colis

Le combustible nucléaire irradié issu du fonctionnement des réacteurs civils de puissance à eau bouillante REB est constitué à partir 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 stockage. Le colis TN[®]9/4 permet de réaliser ces transports.

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



Les dimensions générales hors-tout du colis sont :

- Longueur : 6 680 mm
- Diamètre : 2 100 mm

Le colis TN[®]9/4 est transportable par voie routière uniquement.

2.2. Description de l'emballage

Les principaux composants de l'emballage sont :

- Un corps composé, en partie courante, d'une virole en acier, surmontée d'une couche de plomb, puis d'une couche de résine neutrophage et enfin d'une virole externe en acier. 4 tourillons sont fixés sur le corps (2 en partie haute de l'emballage et 2 en partie basse) permettant la manutention et l'arrimage de l'emballage sur ses supports de transport. En partie basse, le corps est traversé par un orifice, ce dernier étant obturé par une tape d'orifice maintenue par des vis et munie de joints d'étanchéité en élastomère.
- Un couvercle secondaire fermant le corps, maintenu par des vis et muni de joints d'étanchéité en élastomère. Le couvercle secondaire est muni d'un orifice, ce dernier étant obturé par une tape d'orifice maintenue par des vis et munie de joints d'étanchéité en élastomère.
- Un ensemble, composé d'un canister en acier fermé par un couvercle primaire en acier muni de joints d'étanchéité en élastomère et maintenu par une couronne de serrage vissée, qui vient se loger dans la cavité délimitée par le corps de l'emballage. Le couvercle primaire est muni d'un orifice de drainage obturé par une tape d'orifice maintenue par des vis et munie

de joints d'étanchéité en élastomère. Le canister permet de recevoir le contenu (aménagement interne et assemblages combustibles).

- Deux capots amortisseurs (en tête et en fond) montés sur l'emballage et assurant la protection mécanique et thermique du colis en conditions normales et accidentelles de transport.

2.3. Description du contenu

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

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

Le panier est constitué d'un empilement de plats en aluminium enrichi en bore, de 4 lunules en acier inoxydable fermant les logements périphériques du panier, d'une plaque de tête en acier inoxydable, d'une plaque de fond en acier inoxydable et de 4 équerres de maintien en aluminium, le tout étant assemblé de manière à former 7 logements.

Les assemblages combustibles REB sont constitués d'un réseau à pas carré. Quelques crayons sont vissés à leurs extrémités sur deux embouts en acier inoxydable et servent ainsi d'entretoises, tandis que les autres, libres, sont maintenus en place par des grilles d'espacement. Le réseau peut être incomplet. D'autre part, certains crayons peuvent contenir un poison neutronique.

Les assemblages combustibles REB peuvent être chemisés par une chemise en alliage de zirconium.

Les chemises en alliage de zirconium peuvent être transportées seules, sans leur assemblage combustible.

Le contenu autorisé limite les paramètres importants pour la sûreté et ceux utilisés dans le dossier de sûreté ; en particulier :

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

Type d'assemblage	REB 10×10-B	REB 10×10-C	REB 10×10-D
Enrichissement initial max en uranium 235 (%)	5	5	5
Taux de combustion maximal (MWj/tU)	72 000	72 000	75 600
Durée de refroidissement minimum	6 mois		

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

2.4. Barrières d'étanchéité

L'emballage TN[®]9/4 est un emballage constitué de deux barrières d'étanchéité indépendantes l'une de l'autre décrites ci-après :

- L'enceinte primaire constituée par le canister et son système de fermeture (couvercle primaire, couronne de serrage et tape de l'orifice du couvercle primaire, chacun munis de leur joint élastomère),
- L'enceinte secondaire constituée par le corps de l'emballage et son système de fermeture (couvercle secondaire muni de son joint élastomère) et les tapes des orifices du couvercle secondaire et du fond (munies de leur joint élastomère).

2.5. Enceinte de confinement

L'enceinte de confinement est constituée de l'enceinte primaire décrite au §2.4.

2.6. Système d'isolement

Le système d'isolement est constitué par :

- La masse de métal lourd et l'enrichissement du contenu radioactif,
- Les deux barrières d'étanchéité décrites au paragraphe 2.4.

2.7. Bilan des masses

La masse maximale autorisée du colis TN[®]9/4 en transport est de 40 000 kg.

La masse autorisée au transport est celle utilisée de façon générique dans les études de sûreté : par exemple pour la tenue des tourillons, l'énergie de chute pour les conditions accidentelles.

3. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE MECANIQUE

3.1. Conditions de transport de routine

Tenue à la pression

La tenue des enceintes primaire et secondaire est justifiée, selon les règles de calcul du code ASME Section III Division 1 Sous-section NE « Composant de classe MC », aux sollicitations suivantes (couvrant les conditions de transport de routine) :

- Pression interne de design,
- Accélération en manutention et en transport,
- Gradients thermiques pénalisants du canister,
- Phénomènes liés aux cycles de sollicitations (cycle de pression, de température, vibrations, chocs).

La conformité au code ASME des différents éléments constituant les enceintes de confinement primaire et secondaire est vérifiée.

Arrimage et manutention

L'arrimage et la manutention du colis sont réalisés par 4 tourillons vissés sur le corps.

La tenue mécanique des tourillons, des vis de fixation et du corps au droit de la liaison est justifiée 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 routier uniquement et en manutention.

Les études permettent de justifier la tenue des tourillons pour une utilisation de 200 cycles de transport.

Résistance des structures annexes

La tenue mécanique des structures annexes de l'emballage TN[®]9/4 composées des éléments suivants est vérifiée, à savoir :

- les tôles des capots soumises à une pression interne (issue du dégazage du matériau amortisseur) et une accélération longitudinale (correspondant aux accélérations en transport),
- l'enveloppe externe soumise à une pression interne (correspondant au dégazage de la résine),
- les vis de fixations des capots,
- les oreilles de manutention des capots.

Toutes les contraintes dans les éléments cités ci-dessus sont inférieures aux limites admissibles des aciers préconisés. La précontrainte de serrage des vis est suffisante.

Résistance de l'aménagement interne

La résistance de l'aménagement interne aux sollicitations mécaniques et contraintes thermiques rencontrées en conditions de transport de routine, ainsi que sa libre dilatation dans la cavité, sont vérifiées.

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.

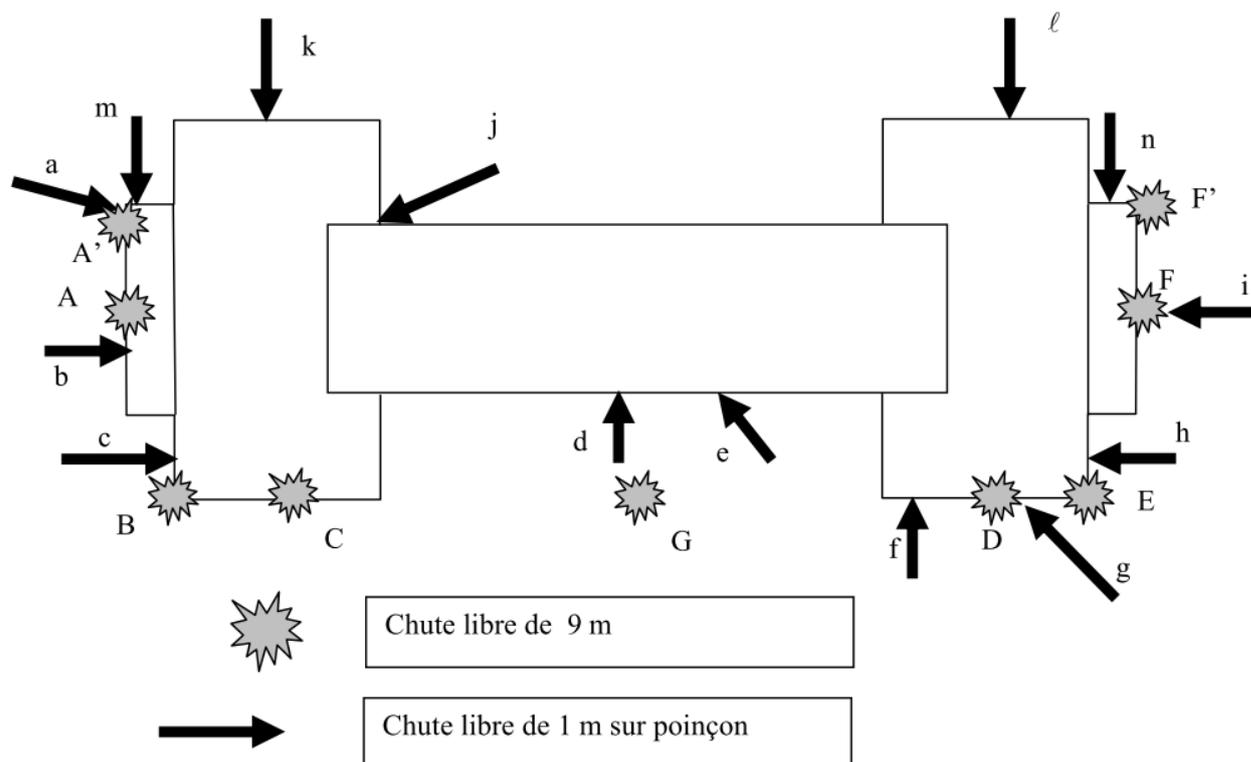
Les autres épreuves réglementaires (gerbage, aspersion et pénétration d'une barre) sont sans impact sur la sûreté du colis.

3.3. Conditions accidentelles de transport

L'ensemble des analyses de chute est réalisé en considérant une énergie de chute correspondant à une masse totale de colis de 40 tonnes.

Ensemble de chutes étudiées

Toutes les configurations possibles de chute libre de 9 mètres et de 1 mètre sur poinçon sont analysées (soit au total 10 chutes libres et 14 chutes sur poinçon, symbolisées ci-dessous respectivement par des points d'impacts et des flèches), afin de définir les essais de chutes à réaliser : les séquences de chutes retenues pour être testées physiquement sont celles maximisant les dommages possibles aux barrières d'étanchéité du système de fermeture et les sollicitations possibles dans le système de fixation des capots de tête et de fond (séquences 1 à 6 définies ci-après).



Les séquences de chutes réglementaires effectuées pour le colis sont répertoriées ci-dessous. La figure ci-après donne une vue d'ensemble des différentes chutes retenues.

- Séquence n°1
 - Chute de 1 mètre sur poinçon avec impact du poinçon au centre du couvercle secondaire.
 - Chute libre de 9 mètres axiale sur le capot de tête.
- Séquence n°2
 - Chute de 1 mètre sur poinçon avec impact du poinçon sur la couronne de centrage du capot de fond et axe du poinçon aligné sur le centre de gravité du colis.
 - Chute latérale libre de 9 mètres sans effet de coup de fouet (chute à plat).
- Séquence n°3
 - Chute latérale libre de 9 mètres avec fouettement avec premier impact côté fond.

Identification :

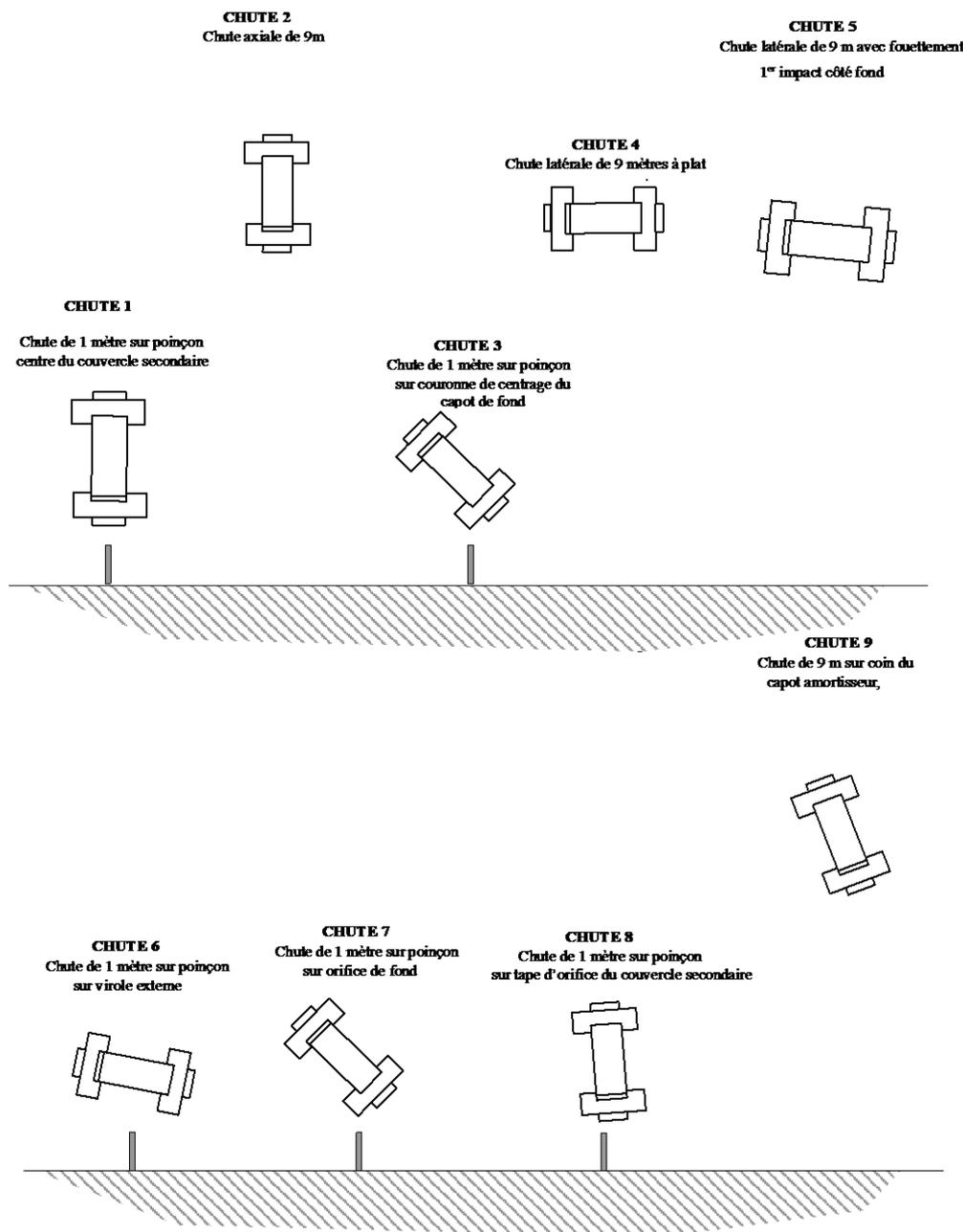
DOS-18-012233-004

Version : 3.0

Page 8 sur 26

- Séquence n°4
 - Chute de 1 mètre sur poinçon avec angle avec impact du poinçon sur la virole externe du colis.
- Séquence n°5
 - Chute de 1 mètre sur poinçon avec impact du poinçon sur l'orifice du fond.
- Séquence n°6
 - Chute de 1 mètre sur poinçon avec impact du poinçon sur la tôle de l'orifice du couvercle secondaire et axe du poinçon aligné sur le centre de gravité du colis.
 - Chute libre de 9 mètres oblique sur le capot de tête, avec impact du capot au même endroit que l'impact du poinçon.

Les angles de chute correspondent aux configurations les plus pénalisantes.



Principe de définition de la maquette de chute

Les épreuves de chutes ont été réalisées avec une maquette du modèle de colis à l'échelle 1/3 ; 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 équivalentes à celles des composants du modèle d'emballage. Le comportement mécanique en chute sera donc comparable sur la maquette et sur le colis.

La maquette de l'emballage échelle 1/3 est représentative de l'emballage échelle 1. Il est démontré que les différences de fabrication entre la maquette et le modèle de colis sont conservatives ou sans incidence notable sur la représentativité de la maquette lors des chutes sur poinçon ou lors des chutes de 9 mètres.

Le panier et le contenu sont représentés par un lest. Ce lest tient compte de la répartition de masse du contenu et de la masse manquante du canister due à sa simplification. Les orifices de la maquette sont représentatifs de ceux de l'emballage TN[®]9/4 échelle 1.

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.

Conformément à la réglementation, à l'intérieure d'une séquence de chutes, aucune modification ou changement de composant n'est possible. En revanche, certains composants sont changés entre deux séquences (capots, vis, joint d'étanchéité...).

Résultat des chutes

Les essais de chutes ont fait l'objet des relevés suivants :

- 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 (axiale, oblique, latérale avec fouettement et à plat) pour toute la plage de température possible des conditions normales de transport.
- Les taux de fuites mesurés pour les enceintes d'étanchéité après chaque séquence de chutes.

Séquence 1

La 1^e chute est une chute libre axiale de 1,58 m sur poinçon avec impact du poinçon sur le capot de tête, au centre du couvercle secondaire.

La 2^e chute est une chute libre axiale de 9,34 m sur le capot de tête. La maquette a été chauffée afin de vérifier le comportement du plomb en température lors de la chute.

- Lors de la 1^e chute : le poinçon a déchiré la tôle de fermeture du bois du capot et a ensuite compacté le bois du capot. Le poinçon a ensuite flambé. Une légère déformation du couvercle a été constatée mais sans conséquence sur l'étanchéité de l'enceinte secondaire.

- Lors de la 2^e chute : le capot amortisseur a parfaitement assuré sa fonction en s'écrasant. La maquette a rebondi et un deuxième impact a eu lieu après le premier impact. Le tube de passage d'une des vis de fermeture du capot a flambé ; tous les autres tubes de passages ont coulissé. La photo ci-après montre l'écrasement du capot et l'impact du poinçon suite aux deux chutes (une zone du capot a été découpée afin de démonter la vis dont le tube de passage a flambé).



- A la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur hélium montrent que les deux barrières de l'emballage TN[®]9/4 conservent un bon niveau d'étanchéité.

Séquence 2

La 1^e chute est une chute libre de 1,48 m sur poinçon avec impact du poinçon sur le capot de fond, au niveau de l'extrémité de la couronne de centrage du capot. Lors de la chute l'emballage est incliné par rapport à la verticale afin que le centre de gravité de la maquette soit à la verticale du point d'impact.

La 2^e chute est une chute libre latérale à plat de 9,34 m. La maquette a été chauffée avant l'épreuve de chute afin de maximiser les écrasements des matériaux amortisseurs (température des capots représentatives de celle évaluée en conditions normales de transport, voir paragraphe 4.1).

- Lors de la 1^e chute : le poinçon a perforé le capot jusqu'à la couronne de centrage du capot. Le poinçon a ensuite ripé sur cette couronne vers l'extérieur du capot et est venu en butée sur la virole externe du corps. Aucune déformation n'est constatée sur la couronne de centrage du capot de fond.
- Lors de la 2^e chute : Les capots se sont écrasés et les toles externes se sont pliées. Une légère déchirure a été constatée sur la capot de fond sans perte de bois. La photo ci-après montre l'impact du poinçon et l'écrasement du capot de fond à l'issue des deux chutes.



Identification :

DOS-18-012233-004

Version : 3.0

Page 11 sur 26

- A la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur hélium montrent que les deux barrières de l'emballage TN[®]9/4 conservent un bon niveau d'étanchéité.

Séquence 3

La chute est une chute libre latérale avec fouettement de 9,34 m.

- Lors de la chute : les deux capots ont parfaitement assuré leur fonction en s'écrasant (voir photo ci-après). De légères déchirures sont constatées sur les tôles externes des capots sans conséquences pour la tenue à l'épreuve de feu. Le tourillon côté tête a également été déformé (sans conséquences sur l'enceinte de confinement).

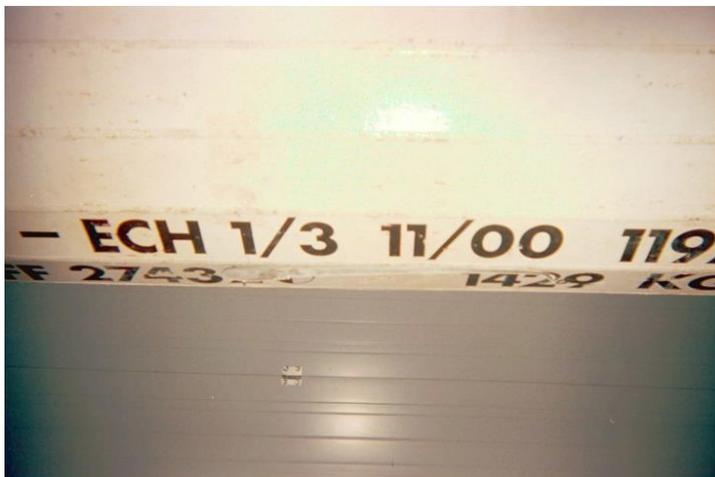


- A la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur hélium montrent que les deux barrières de l'emballage TN[®]9/4 conservent un bon niveau d'étanchéité.

Séquence 4

La chute est une chute libre latérale de 1,04 m sur poinçon avec impact du poinçon sur la virole externe, avec une légère inclinaison par rapport à l'horizontale.

- Lors de la chute : le poinçon a légèrement enfoncé le plat de la virole externe puis a ripé sur la surface en rayant celle-ci (voir photo ci-après).



- A la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur hélium montrent que les deux barrières de l'emballage TN[®]9/4 conservent un bon niveau d'étanchéité.

Séquence 5

La chute est une chute libre sur poinçon de 1,49 m sur le capot de fond pour découvrir l'orifice de fond, avec une légère inclinaison par rapport à l'horizontale.

- Lors de la chute : le poinçon a perforé et éventré la tôle externe du capot. Néanmoins, l'orifice côté fond reste protégé par une hauteur de bois relativement importante.



- A la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur hélium montrent que les deux barrières de l'emballage TN®9/4 conservent un bon niveau d'étanchéité.

Séquence 6

La 1^{ère} chute est une chute libre oblique de 1,58 m sur poinçon avec impact du poinçon sur le capot de tête. Lors de la chute l'emballage est incliné par rapport à la verticale afin que le centre de gravité de la maquette soit à la verticale du point d'impact. L'impact du poinçon est aligné avec la tige de l'orifice du couvercle secondaire.

La 2^{ème} chute est une chute libre oblique de 9,34 m sur le capot de tête.

- Lors de la 1^{ère} chute : le poinçon a perforé la tôle externe du capot sans impacter la tôle anti-poinçonnement.
- Lors de la 2^{ème} chute : le capot a assuré sa fonction et s'est écrasé. La photo ci-après montre la déformation du capot à la suite des deux chutes.



- A la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur hélium montrent que les deux barrières de l'emballage TN[®]9/4 conservent un bon niveau d'étanchéité.

Comportement de l'emballage TN[®]9/4 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 à l'échelle 1/3 de la chute latérale à plat.

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 dans les analyses analytiques et numériques réalisées suite aux chutes.

Les essais de chutes présentés ci-avant et destinés à vérifier la tenue mécanique de l'emballage se sont déroulés à température ambiante (excepté pour les chutes pour lesquelles la maquette a été chauffée). 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°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 qui sont sollicitées en chute. La tenue de ces éléments est vérifiée.

La résistance de l'emballage TN[®]9/4 lors des conditions accidentelles de chute, avec la prise en compte du comportement des capots amortisseurs entre la température minimale réglementaire de -40°C <1> et la température maximale en conditions normales de transport est donc vérifiée.

Conclusion

Suite aux épreuves réglementaires des chutes en conditions accidentelles de transport, les deux barrières de l'emballage TN[®]9/4 conservent leur étanchéité, et ce pour toutes les configurations de chute.

Le choix des matériaux et des procédés de soudure utilisés dans la fabrication de l'emballage écarte le risque de rupture fragile à - 40°C.

Un modèle numérique spécifique du panier permet d'en démontrer la résistance lors des différentes configurations de chutes, en se basant sur les accélérations déterminées lors des analyses faites pour le colis. Les calculs prenant en compte les effets dynamiques permettent de vérifier la non-rupture (déformation inférieure à la limite à la rupture du matériau) des différents éléments constituant le panier. Ces calculs couvrent toute la plage possible de température (de -40 °C aux températures maximales des conditions normales de transport) en fonction des variations possibles des propriétés des matériaux.

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

4. PERFORMANCE D'UN POINT DE VUE THERMIQUE

Les températures atteintes par les constituants de l'emballage TN[®]9/4 dans ces diverses configurations de transport, sont déterminées afin de vérifier la sûreté du colis et le respect des exigences réglementaires [1].

Dans cette analyse, il est tenu compte :

- de la puissance thermique totale dépendant du type de gaz de remplissage de la cavité,
- des limites d'utilisation des matériaux constituant l'emballage,
- des limites d'utilisation des matériaux constituant l'aménagement interne,
- des conditions de routine et accidentelles de transport définies par la réglementation.

Les températures atteintes par les différents composants de l'emballage n'excèdent pas les limites d'utilisation de leurs matériaux.

4.1. Analyse thermique de l'emballage TN[®]9/4 en conditions de transport de routine

L'objet de cette étude est l'analyse thermique du modèle de colis TN[®]9/4 en conditions de transport de routine, muni de son aménagement interne chargé de 7 assemblages combustibles REB.

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Les caractéristiques utilisées dans cette étude sont la puissance thermique totale par assemblage et le profil axial de puissance thermique des assemblages définis pour le contenu. Ces puissances sont également fonction du gaz de remplissage de la cavité (hélium et air ou azote).

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les principales caractéristiques de l'emballage influant sur les études thermiques sont :

- les matériaux et la géométrie du panier,
- la présence du mélange air/hélium ou d'azote dans les cavités (avec la puissance thermique associée),
- les conducteurs en cuivre, leur épaisseur,
- le canister en acier, son épaisseur,
- la virole en acier, son épaisseur.

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,
- le positionnement de l'emballage est horizontal,
- les échanges thermiques se font par conduction, rayonnement et convection :
 - le rayonnement entre le colis et l'extérieur est pris en compte,
 - les échanges à l'intérieur des jeux sont pris en compte (rayonnement et conduction),
- les capots amortisseurs du colis ne sont pas modélisés et les surfaces de l'emballage en contact avec ceux-ci sont considérées adiabatiques.

Méthode d'analyse

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

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-longueur) et des propriétés d'émissivité des gaines et des parois de panier.

Deux configurations ont été évaluées avec un modèle 3D : un cas calé tête (panier et assemblages en appui sur le couvercle primaire) et un cas calé fond (panier et assemblages en appui sur le fond du canister).

Un modèle 2D de la partie centrale de l'emballage a été utilisé afin de déterminer l'influence (dans la section la plus chaude) du gradient circonférentiel et du décentrement radial du panier, des assemblages et du canister dû à la position horizontale de transport sur les températures. Un modèle 2D a aussi été utilisé pour déterminer les configurations de chargement les plus pénalisantes, avec une répartition de la puissance des assemblages homogène ou hétérogène.

Résultats de l'étude

La température maximale des composants sensibles à la température est compatible avec leur critère d'intégrité ; en particulier :

- Joint d'étanchéité : la température maximale des joints permet de justifier le non-endommagement des joints sur un nombre de cycles de transport compatible avec la fréquence de remplacement en maintenance. Par ailleurs, la dilatation du joint dans sa gorge est suffisamment faible pour garantir un taux de remplissage inférieur au critère acceptable.
- Résine neutrophage : la température maximale de la résine reste inférieure à sa limite d'utilisation.

4.2. Analyse thermique de l'emballage TN[®]9/4 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[®]9/4 en conditions accidentelles de transport

L'objet de cette étude est l'analyse thermique du modèle de colis TN[®]9/4 en conditions accidentelles de transport, muni de son panier chargé de 7 assemblages combustibles REB.

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Les caractéristiques utilisées dans cette étude sont la puissance thermique totale par assemblage et le profil axial de puissance thermique des assemblages définis pour le contenu.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les principales caractéristiques de l'emballage influant sur les études thermiques sont :

- les matériaux et la géométrie du panier,
- la présence du mélange air/hélium dans les cavités (avec la puissance thermique associée),
- les conducteurs en cuivre, leur épaisseur,
- le canister en acier, son épaisseur,
- la virole en acier, son épaisseur.

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- la température ambiante est de 800°C et l'ensoleillement est nul pendant l'épreuve de feu,
- la température ambiante est de 38°C et l'ensoleillement est conforme à la réglementation avant et après feu,
- le positionnement de l'emballage est horizontal,
- les capots sont modélisés de manière simplifiée en tenant compte de la perte de bois pénalisante liée aux épreuves de poinçonnement et les surfaces de l'emballage en contact avec ceux-ci sont considérées adiabatiques,
- les échanges thermiques se font par conduction, rayonnement et convection :
 - le rayonnement entre le colis et l'extérieur est pris en compte,
 - les échanges à l'intérieur des jeux sont pris en compte (rayonnement et conduction),
 - les échanges par convection autour de l'emballage 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 volumes finis avec le module TMG interfacé avec I-DEAS.

Le calcul est réalisé en régime transitoire selon le synoptique suivant :

- Le champ de température initial du colis est celui des conditions de transport de routine ayant conduit aux températures les plus élevées concernant les joints d'étanchéité du système de fermeture.
- Pendant la période réglementaire de 30 minutes, le feu est simulé par :
 - une température ambiante réglementaire de 800°C.
 - un coefficient d'échange convectif 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 0,85 conformément à la réglementation.
- Après feu, l'émissivité des surfaces externes reste à 0,8.

Les calculs ont été réalisés avec le panier et les assemblages en appui sur le couvercle primaire de l'emballage (cas « calé tête » en conditions de transport de routine) afin de maximiser les températures des joints du système de fermeture ainsi qu'avec le panier et les assemblages en appui sur le fond du canister (cas « calé fond », en conditions de transport de routine), afin de maximiser les températures des joints de la tôle de fond.

Les résultats intègrent l'influence du décentrage radial et du gradient circonferentiel déterminée en conditions de transport de routine.

Résultats de l'étude

La température maximale des joints d'étanchéité reste inférieure à leur critère d'exposition continue en température garantissant leur intégrité. Par ailleurs, la dilatation des joints dans leurs gorges est suffisamment faible pour garantir un taux de remplissage inférieur au critère acceptable.

5. PERFORMANCE D'UN POINT DE VUE CONFINEMENT ET RADIOLYSE

L'analyse de confinement du modèle de colis TN[®]9/4 inclut le cas du colis contenant des assemblages combustibles, mais aussi pour le colis vide d'assemblage. L'enceinte de confinement est définie au § 2.5.

Les critères réglementaires de relâchement d'activité sont vérifiés par calcul analytique en suivant la méthodologie décrite dans la norme ISO 12807. Cette étude tient compte de :

- la perméation des gaz tritium et krypton à travers les joints élastomères ;
- les fuites de gaz radioactifs ; les fuites de particules aérosols radioactives.

Par ailleurs, une analyse du phénomène de radiolyse de l'eau présente dans la cavité à l'issue de séchage est réalisée en conditions accidentelles de transport couvrant ainsi les conditions normales de transport.

5.1. En conditions normales de transport

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Les sources radioactives sont déterminées sur la base des caractéristiques du combustible suivantes :

Historique d'irradiation	REB 10x10-D
Taux de combustion maximal	75 600 MWj/tU
Durée de refroidissement	6 mois

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude :

Les principales caractéristiques utilisées sont les suivantes :

- Le taux de fuite maximal de l'enceinte de confinement vérifié avant expédition.
- La pression maximale de remplissage du colis définie dans les conditions d'utilisation.
- Les températures maximales des gaz et des joints issus de l'analyse thermique.
- Le volume libre dans la cavité.

Identification :

DOS-18-012233-004

Version : 3.0

Page 18 sur 26

- La nature et la géométrie des joints de l'enceinte de confinement qui impactent les fuites par perméation.

Hypothèses importantes pour l'étude :

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- Le taux de crayons ruptés en conditions normales de transport est de 5 %.
- Le taux de relâchement des gaz de fission (dit RGF) est conforme aux recommandations de l'ASN.
- La pression externe du colis est de 0,60 bars abs., conformément à la réglementation.
- La durée de transport de 1 an.

Méthode de calcul :

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

- A. La phase de rentrée d'air : pendant la durée de transport (1 an), 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, et augmente la pression dans la cavité. Il n'y a pas de relâchement d'activité pendant cette phase.
- B. La phase de relâchement d'activité : à la fin de la période de transport, la pression atmosphérique chute brutalement à 0,60 bar abs. Cette fois, le flux de fuite se fait de l'intérieur vers l'extérieur. Le relâchement d'activité reste inférieur au critère réglementaire de $10^{-6} A_2/h$.

Résultats de l'étude :

Le critère réglementaire est respecté.

5.2. En conditions accidentelles de transport

En ce qui concerne l'analyse de confinement, les différences principales avec le calcul en conditions normales de transport sont les suivantes :

- Le taux de crayons ruptés en conditions accidentelles de transport est de 100%.
- Les températures maximales des gaz et des joints sont issues des calculs thermiques en conditions accidentelles de feu (paragraphe 4.3).

Les résultats montrent une marge significative par rapport au critère réglementaire de 1 A_2 cumulé sur une semaine.

Le risque de radiolyse est étudié en prenant en compte les hypothèses pénalisantes suivantes :

- prise en compte d'une quantité pénalisante d'eau résiduelle après séchage ;
- l'intégralité de l'hydrogène de l'eau se transforme en dihydrogène ;
- la nature du gaz de remplissage ;
- la rentrée d'air pendant un an en considérant de manière pénalisante une seule enceinte (enceinte primaire).

Les résultats montrent que le pourcentage de dihydrogène présent dans la cavité suite à la radiolyse d'une quantité pénalisante d'eau, reste inférieur à la limite inférieure d'inflammabilité (LII) des chargements associés.

6. PERFORMANCE D'UN POINT DE VUE RADIOPROTECTION

Les critères retenus de débit d'équivalent de dose (DED) couvrant les conditions réglementaires de transport [1] sont les suivants :

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

6.1. En conditions de transport de routine

6.1.1. Au contact

Paramètres du contenu importants pour l'étude

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

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

L'activation des pièces d'embout des assemblages combustibles durant leur irradiation en cœur est prise en compte.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

La protection contre les rayonnements est assurée par la nature et l'épaisseur des matériaux de l'emballage.

Le blindage radial est principalement formé par :

- une virole interne en acier,
- une épaisseur de plomb et une épaisseur de résine neutrophage (considérée vieillie),
- une virole externe en acier.

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

- la virole interne en acier dont l'épaisseur est localement élargie aux extrémités du colis,
- des surblindages en plomb,
- des tourillons en acier inoxydable, diamétralement opposés, et entourés par les plats de l'enveloppe externe.

Le blindage axial en tête est principalement constitué, de l'intérieur vers l'extérieur :

- du couvercle primaire constitué d'acier et de plomb,
- du couvercle secondaire constitué d'acier,
- du capot de tête constitué d'acier et de bois.

Le blindage axial en fond est principalement constitué, de l'intérieur vers l'extérieur :

- du fond du canister constitué d'acier,
- du fond de l'emballage constitué d'acier et de plomb,
- du capot de fond constitué d'acier et de bois.

Méthode de calcul

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 du 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, les particules peuvent être de type neutron ou gamma.

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

Les sources induites (sources secondaires) créées par les réactions des neutrons sur les éléments de la résine neutrophage sont prises en compte.

Résultats de l'étude

Le respect des critères de débit d'équivalent de dose 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 3 points dimensionnants en conditions de transport de routine au contact de l'emballage :

- tourillon bas,
- zone radiale au niveau des tourillons bas à 45°,
- zone radiale au niveau des tourillons bas à 85°.

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

6.1.2. A 2 mètres de l'emballage

L'évaluation des DED en conditions de transport de routine à 2 mètres de l'emballage TN[®]9/4 est réalisée avec un chargement typique.

Les calculs d'évolution du combustible sont effectués avec le code ORIGEN ARP.

Les calculs d'activation des pieds, des plénums et des têtes sont effectués avec le code APOLLO 2 version 2.5 patch 5. La détermination des DED gamma et neutron est réalisée avec le code TRIPOLI 4.4.

Le code TRIPOLI 4.4 est un code de calcul du transport de particules tridimensionnel et polycinétique basé sur la méthode de MONTE-CARLO.

La bibliothèque de sections efficaces utilisée est la bibliothèque ENDF/B-VI, les particules peuvent être de type neutron ou gamma.

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

L'emballage TN[®]9/4 chargé de 7 assemblages REB 10×10 respecte les critères réglementaires de débits d'équivalent de dose à 2 mètres.

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 des capots amortisseurs. On évalue la distance minimale entre la source et la partie écrasée du capot, et l'augmentation de DED induite par la diminution de cette distance.

Il est alors démontré qu'en conditions normales de transport, les débits d'équivalent de dose relatifs aux conditions de transport de routine ne subissent pas d'augmentation supérieure à 20 %.

6.3. En conditions accidentelles de transport

Les endommagements de l'emballage considérés en conditions accidentelles de transport sont les suivants :

- Disparition partielle de la résine au niveau de la section courante.
- Disparition totale des tôles externes et du bois des capots,
- Prise en compte du tassement du plomb, par une ouverture de hauteur enveloppe aux extrémités hautes et basses de la zone de plomb.

En conditions accidentelles de transport, l'emballage TN 9/4 chargé de 7 assemblages combustibles REB 10x10 respecte les critères réglementaires de débits d'équivalent de dose à 1 mètre de l'emballage en considérant le contenu radioactif maximal utilisé lors des conditions de transport de routine.

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

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

- le colis isolé en conditions de routine (c'est-à-dire tel que présenté au transport),
- le colis isolé en conditions normales de transport (c'est-à-dire résultant des épreuves réglementaires des conditions normales de transport),
- le colis isolé en condition accidentelles de transport (c'est-à-dire résultant du cumul des épreuves des conditions normales et conditions accidentelles de transport),
- l'agencement de 5 N colis (N étant le nombre permettant de définir la valeur du coefficient réglementaire – Criticality Safety Index CSI) en conditions normales de transport,
- l'agencement de 2 N colis en conditions accidentelles de transport.

L'objectif de cette étude est de vérifier la sous-criticité dans les conditions réglementaire de transport pour le colis équipé de son panier à 7 logements et chargé d'au maximum 7 assemblages combustibles REB 10x10-B, REB 10x10-C et/ou REB 10x10-D irradiés à oxyde d'uranium, chemisés ou non.

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 : assemblages ruinés et pénétration limitée d'eau dans la cavité.

Les critères de sous-criticité retenus sont les suivants :

- $K_{\text{eff}} \leq 0,95$ pour un colis isolé endommagé, toutes incertitudes comprises.
- $K_{\text{eff}} \leq 0,98$ pour un réseau infini de colis (endommagés ou non), toutes incertitudes comprises.

Nota : On entend par colis « non endommagé » l'état du colis à l'issue des épreuves des conditions normales de transport. On entend par colis « endommagé » l'état du colis à l'issue des épreuves des conditions normales de transport, suivies des épreuves des conditions accidentelles de transport.

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.

La densité maximale et l'enrichissement maximal du combustible sont pris en compte.

Les variations des dimensions géométriques des éléments contribuant à la réactivité du contenu (diamètre de pastille, dimension des gaines, dimension des chemises) sont prises en considération afin de majorer la réactivité du colis.

Les assemblages sont décrits par des milieux fissiles homogènes équivalents à un réseau infini de crayons entourés d'eau.

Les différents milieux constituant le panier sont considérés avec les densités minimales.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

La résine ainsi que les conducteurs de cuivre contenus dans l'espace inter-virole ont complètement disparu. De manière pénalisante, la virole externe en acier inoxydable n'est pas considérée.

Les conducteurs de cuivre traversant la virole de plomb en partie courante ne sont pas considérés : le plomb présente ainsi une densité réduite.

Hypothèses importantes pour l'étude

De façon pénalisante, le modèle de colis considéré pour les calculs est infini suivant sa plus grande dimension, endommagé (géométrie résultant des épreuves réglementaires en conditions accidentelles : conducteurs de cuivre et résine négligés, présence d'eau dans tous les espaces libres de l'emballage) et directement entouré par 200 mm d'eau.

Méthode de calcul

Les calculs ont été réalisés avec le schéma de calcul APOLLO1-MORET3 pour les contenus REB 10×10-B ou REB 10×10-C et avec le schéma APOLLO2-MORET4 pour le contenu REB 10×10-D. Il est justifié que le mélange des différents types d'assemblages en proportion quelconque est autorisé.

Résultats :

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

7.2. Colis isolé avec ruine du contenu et de l'aménagement interne

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Les assemblages sont considérés ruinés et non irradiés. Une masse maximale de métal lourd enveloppe de la définition du colis et l'enrichissement maximal du combustible sont considérés. De manière pénalisante, la matière fissile est regroupée sous forme de sphère, de demi-sphère ou de cylindre dans la cavité du canister. Les gaines et la structure (chemises et capsule) ne sont pas prises en compte dans les calculs.

Il est vérifié que la description hétérogène de la matière fissile permet de majorer la réactivité du colis.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

L'aménagement interne est constitué d'acier, d'aluminium et de d'aluminium boré. Dans cette étude, la ruine de l'aménagement interne est considérée. De manière pénalisante, une masse correspondant à la masse d'acier, d'aluminium et d'aluminium boré de l'aménagement interne est considérée comme réflecteur.

La résine ainsi que les conducteurs de cuivre contenus dans l'espace inter-virole ont complètement disparu. De manière pénalisante, la virole externe en acier inoxydable n'est pas considérée.

Les conducteurs de cuivre traversant la virole de plomb en partie courante ne sont pas considérés : le plomb présente ainsi une densité réduite.

Hypothèses importantes pour l'étude

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

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,

Méthode de calcul

Les calculs ont été réalisés avec le schéma de calcul APOLLO2-MORET4.

Résultats

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

7.3. Réseau de colis

Dans le cas d'un contenu intègre, et dans le cas de la ruine totale du colis, une réflexion totale est appliquée sur la face externe de la virole, ce qui couvre la configuration d'un agencement infini de colis.

Le critère de sûreté-criticité retenu pour un réseau de colis est respecté dans tous les cas de chargement : $K_{eff} \leq 0,98$, toutes incertitudes comprises.

Ainsi, l'indice de sûreté criticité vaut $CSI = 0$.

8. CONDITIONS D'UTILISATION DE L'EMBALLAGE TN[®]9/4

Ce paragraphe a pour objet de présenter les instructions minimales de chargement, de déchargement et de transport des assemblages combustibles dans l'emballage TN[®]9/4.

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

- les combustibles chargés doivent respecter l'ensemble des caractéristiques techniques définies par le contenu autorisé,
- le drainage et séchage des cavités,
- le remplissage en gaz neutre (hélium ou azote) du volume libre du canister chargé et de l'inter-cavité (volume libre situé entre le canister et l'enceinte secondaire) à une pression maximale définie (dans le cas d'un transport à vide, les volumes libres du canister et de l'intercavité seront remplis indifféremment avec de l'air, de l'azote ou de l'hélium),
- la bonne fermeture (couple de serrage des vis de la bague de serrage du couvercle primaire, du couvercle secondaire et des tapes d'orifice) et le niveau d'étanchéité (taux de fuite) de tous les composants constituant les deux barrières d'étanchéité,
- l'ensemble des opérations effectuées pour vérifier le séchage et la fermeture des cavités, et le niveau d'étanchéité du colis doit être contrôlé par une personne différente de celle qui les a réalisées afin de vérifier la conformité au respect des exigences,
- la vérification de la non contamination des surfaces externes de l'emballage en conformité avec les limites réglementaires,
- le contrôle des débits d'équivalent de dose autour du colis en conformité avec les limites réglementaires (en particulier autour des points singuliers comme les tourillons),
- les températures des surfaces accessibles : si la température des surfaces accessibles dépasse 85°C, le transport se fait avec mise en place de barrières thermiques,
- dans le cas d'une configuration de transport susceptible de modifier la dissipation thermique, vérifier qu'une étude thermique prenant pour hypothèses la puissance thermique résiduelle du chargement, les caractéristiques de la configuration de transport utilisée (type de canopy, lèche frite, bâche, ...), et la position du colis sur le moyen de transport, a bien été réalisée et a permis de démontrer le

respect du critère de la température externe maximale du corps en partie radiale de l'emballage en conditions normales de transport,

- la mise en place de l'étiquetage réglementaire.

Le colis doit être transporté en position horizontale.

9. PROGRAMME D'ENTRETIEN PERIODIQUE

L'emballage est conçu pour une durée de vie d'au moins 40 ans. Le programme d'entretien prévu au cours de l'utilisation de l'emballage est défini en fonction de deux types de périodicités suivant les composants importants pour la sûreté : le nombre de cycles de transport réalisés et la durée d'utilisation.

Le programme d'entretien comprend notamment :

- le remplacement des joints des barrières d'étanchéité pour une durée compatible avec sa durée de vie,
- le contrôle de l'état des composants des systèmes vissés (barrières d'étanchéités, capots et tourillons) afin de vérifier le maintien de leurs fonctions de sûreté,
- le contrôle des tourillons assurant la manutention et l'arrimage du colis, incluant la détection de défaut, le démontage des composants, et un test en charge après remontage.

Tout emballage présentant un ou des composants ne satisfaisant pas aux critères spécifiés dans le programme d'entretien est mis hors service jusqu'à ce que l'action corrective appropriée soit effectuée.

Tout composant devenu non conforme peut être réparé ou accepté en l'état si une analyse complémentaire démontre que cela ne remet pas en cause les conclusions du dossier de sûreté. Dans le cas contraire, le composant doit être remplacé.

10. PROGRAMME D'ASSURANCE QUALITE

Les réglementations de transport en vigueur à la date du présent document font obligation d'appliquer des programmes d'assurance de la qualité pour :

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

des colis de matières radioactives.

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

11. REFERENCES

[1] Règlements applicables :

- Règlement de transport des matières radioactives, norme de sûreté de l'Agence International de l'Energie Atomique, n° SSR-6, édition de 2012.
- Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (ADR) – Edition 2019
- Arrêté relatif aux transports de marchandises dangereuses par voies terrestres (arrêté TMD)