

Orano NPS DOSSIER DE SURETE TN EAGLE®	Diffusion normale Orano		
	CHAPITRE 1.5		
	Préparateur / signature	Date	
	Vérificateur / signature	Date	
Identification : DOS-18-016280-013 Version : 7.0 Page 1 / 20			

CARACTERISTIQUES DE PERFORMANCES DU COLIS TN EAGLE®

Sommaire

État des révisions	2
1. Objet	3
2. Description et définitions	3
3. Performances d'un point de vue mécanique	7
4. Performances d'un point de vue thermique	10
5. Performances d'un point de vue confinement	12
6. Performances d'un point de vue radioprotection	13
7. Performance d'un point de vue sûreté-criticité	15
8. Conditions d'utilisation de l'emballage TN Eagle®	18
9. Programme d'entretien périodique	19
10. Programme d'assurance qualité	20
11. Références	20

État des révisions

Version	Date	Objet et historique des révisions	Préparé par / Vérifié par
1.0	03/2020	Création du document	
2.0	10/2020	Mise à jour des versions de l'arrêté TMD et du code IMDG applicables	
3.0	07/22	Ajout du contenu composé de 26 REP type 17x17 et du panier associé (type 3) Mise à jour de la figure du §2.1 Ajout d'un paragraphe sur la résistance des anneaux de blindage et sur la résistance de l'anneau de manutention dans le §3.1 Mise à jour des contenus dans le §5 Mise à jour du §6.1 Ajout du panier type 3 dans le §7.1 Correction du critère dans le §7.3 Mise à jour du §8 Mise à jour des versions applicables des règlements dans les références	
4.0	10/22	Suppression de la version 18-41 de l'emballage, du contenu associé et du panier type 1	
5.0	04/2024	Ajout de la version 16-45 de l'emballage, associée au contenu 1 et du panier type 1 (§1, §2.3, §5, §7.1 et §7.2). Ajout de la version 16-41 de l'emballage, associée aux contenus 4 et 5 et du panier type 3 (§1, §2.3, §5, §7.1 et §7.2). Ajout de la version 16-48 de l'emballage, associé au contenu 6 et du panier type 4 (§1, §2.3, §5, §7.1 et §7.2). Ajout de la version 18-41 de l'emballage, associé au contenu 7 et du panier type 5. Mise à jour du §2.1, description du colis suite à l'ajout des différentes versions. Ajout du §2.8 – mécanisme de vieillissement. Mise à jour des contenus dans le §5. Mise à jour des §7, §7.1 et 7.2 liés à l'ajout des contenus. Ajout de la plaque en silicone dans le §6.1 Ajout des capots nommés « H.S.A. » et « Standard » au §2.2. Précision des masses maximales admissibles du colis suivant le type de capots au § 2.7. Mise à jour des éditions des règlements applicables au §10. Corrections éditoriales.	
6.0	06/2026	Mise à jour des configurations autorisées § 2.1. Ajout du système AEA pour le capot de tête au §2.2. Mise à jour des masses autorisées §2.7.	
7.0	Voir ci-dessus	Mise à jour de la teneur Pu des assemblages MOX du contenu 4. Mise à jour de la densité des assemblages UOX du contenu 4.	

1. Objet

L'objet de ce chapitre est de décrire les caractéristiques des performances du modèle de colis TN Eagle® version 18-45, 16-41, 16-45, 16-48 ou 18-41 destiné au transport par voie routière, ferroviaire ou maritime, ainsi qu'à l'entreposage temporaire jusqu'à 60 ans en tant que colis de type B(U) contenant des matières fissiles au regard de la réglementation <1>.

Le colis TN Eagle® est destiné au transport de :

- Au maximum 26 assemblages combustibles irradiés de type REP : comportant au maximum 2 assemblages combustibles à oxyde mixte Uranium-Plutonium (MOX) complétés par des assemblages combustibles à oxyde d'uranium (UO_2), chargés dans un panier de type 3.

Le colis TN Eagle® est destiné au transport et à l'entreposage intermédiaire de :

- 61 assemblages combustibles irradiés de type REB à oxyde d'uranium (UO_2), chargés dans un panier de type 1,

ou

- 76 assemblages combustibles irradiés de type REB à oxyde d'uranium (UO_2), chargés dans un panier de type 2,

ou

- 26 assemblages combustibles irradiés de type REP : au maximum 12 assemblages à oxyde mixte Uranium-Plutonium (MOX) complétés par des assemblages combustibles à oxyde d'uranium (UO_2), chargés dans un panier de type 3,

ou

- 26 assemblages combustibles irradiés de type REP à oxyde d'uranium (UO_2), chargés dans un panier de type 3,

ou

- 26 assemblages combustibles irradiés de type REP à oxyde d'uranium (UO_2), chargés dans un panier de type 4,

ou

- 32 assemblages combustibles irradiés de type REP à oxyde d'uranium (UO_2), chargés dans un panier de type 5.

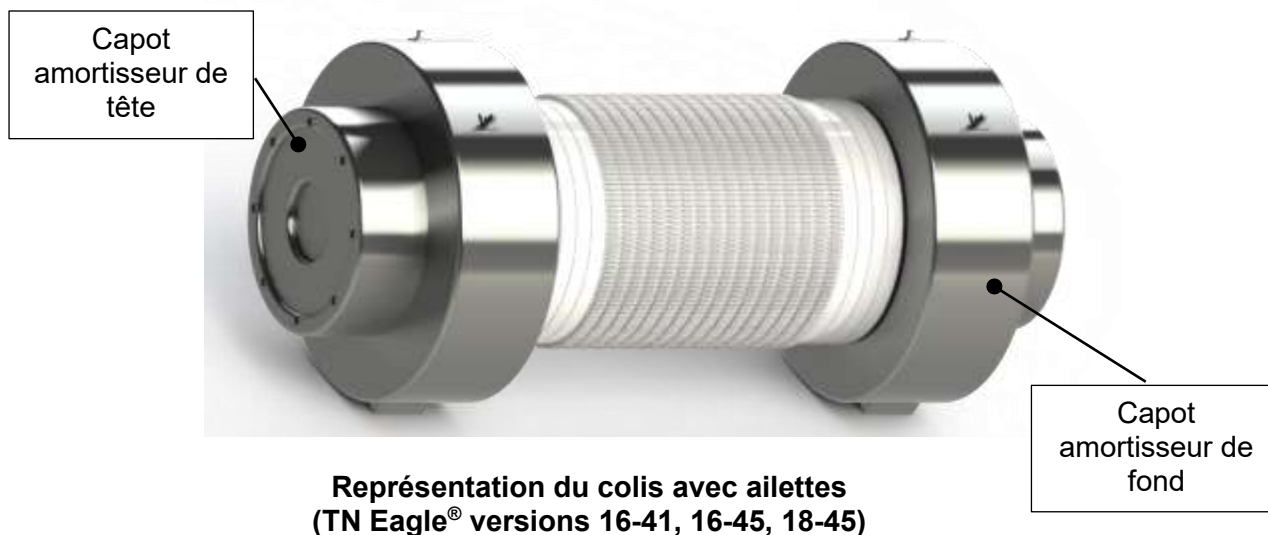
2. Description et définitions

2.1. Descriptions du colis

Le combustible nucléaire irradié issu du fonctionnement des réacteurs nucléaires à eau légère pressurisée (REP) ou des réacteurs nucléaires à eau bouillante (REB), est constitué à partir de crayons de combustibles assemblés en réseau.

Le colis TN Eagle® permet de réaliser le transport et l'entreposage à sec de ces assemblages combustibles REP irradiés ou d'assemblages combustibles REB irradiés.

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



Les dimensions générales hors-tout du colis avec ses capots amortisseurs sont présentées dans le tableau suivant :

Version		16-41	16-45	18-45	16-48	18-41
Masse maximale du colis en configuration de transport (kg)	Capots option H.S.A	127 900	-			
	Capots option Standard-AEA	133 920	-	-	133 920	
	Capots option H.S.A-AEA	144 720				
Longueur totale du colis (m)		8.7	9.1	9.1	9.4	8.7
Diamètre total du colis (m)		3.55 ⁽¹⁾⁽²⁾ 4.0 ⁽³⁾				

(1) Colis équipé de capots « H.S.A ».

(2) Colis équipé de capots option « H.S.A-AEA ».

(3) Colis équipé du capots option « Standard-AEA ».

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

2.2. Descriptions de l'emballage

Les principaux composants de l'emballage sont :

- un corps constitué par :
 - une virole et un fond en acier forgé,
 - une protection neutronique (résine) entourant radialement l'emballage en partie courante insérée dans des anneaux de blindage métallique assurant la dissipation thermique.
- un système de fermeture constitué par :
 - un couvercle primaire en acier maintenu par des vis et muni d'un joint d'étanchéité métallique et d'un joint de test métallique ou élastomère. Le couvercle primaire est muni d'un orifice donnant accès à la cavité. Cet orifice est obturé par une tape munie d'un double joint d'étanchéité métallique,
 - un couvercle secondaire en acier, coiffant le couvercle primaire, maintenu par des vis et muni d'un joint d'étanchéité métallique et d'un joint de test en élastomère. Le couvercle secondaire est muni d'un orifice donnant accès à l'espace entre couvercles. Cet orifice est obturé par une tape munie d'un double joint d'étanchéité métallique.
- des protections anti-chocs constituées par :
 - deux capots amortisseurs (en tête et en fond) assurant la protection mécanique et thermique du colis en conditions normales et accidentelles de transport, dans le sens axial et dans le sens radial. Deux types de capots nommés « H.S.A. » et « Standard » peuvent équiper l'emballage dont la différence est liée à la présence de matériaux amortisseurs différents. Les capots de tête peuvent être équipés d'un système nommé AEA permettant l'absorption complémentaire d'énergie en cas de chute sur poinçon correspondant aux options « H.S.A-AEA. » et « Standard-AEA ».
 - un amortisseur interne métallique fixé sur le couvercle primaire côté cavité assurant la protection mécanique du couvercle vis-à-vis du contenu dans le sens axial.

Il est justifié que le vieillissement des composants de l'emballage durant son utilisation ne remet pas en cause les exigences réglementaires.

2.3. Descriptions du contenu

Le contenu radioactif est constitué de cinq types d'aménagement interne :

- Panier type 1 associé au contenu radioactif 1 placé dans la version 16-45 de l'emballage,
- Panier type 2 associé au contenu radioactif 2 placé dans la version 18-45 de l'emballage,
- Panier type 3 associé aux contenus radioactifs 3, 4 et 5 placés dans la version 16-41 de l'emballage,
- Panier type 4 associé au contenu radioactif 6 placé dans la version 16-48 de l'emballage,
- Panier type 5 associé au contenu radioactif 7 placé dans la version 18-41 de l'emballage.

Aménagements internes :

Les paniers sont :

- constitués par un empilement de galettes circulaires espacées par des entretoises et ajourés par des usinages de section rectangulaire, délimitant les emplacements longitudinaux de section carrée dans lesquels sont placés des plats en aluminium. Ces plats délimitants alors les logements continus pour l'insertion des assemblages,
- équipés de tirants en acier inoxydable munis d'un système de rondelles ressort permettant la dilatation thermique différentielle des composants.

Il est justifié que le vieillissement des composants des paniers durant leur utilisation ne remet pas en cause les exigences réglementaires.

Contenu radioactif autorisé :

Le contenu radioactif autorisé est constitué au maximum de :

- Contenu radioactif 1 : 61 assemblages combustibles REB à oxyde d'uranium (UO_2) irradiés complets ou incomplets, non encapsulés et non endommagés placés dans le panier type 1, pour la version 16-45,
- Contenu radioactif 2 : 76 assemblages combustibles REB à oxyde d'uranium (UO_2) irradiés complets ou incomplets, non encapsulés et non endommagés placés dans le panier type 2, pour la version 18-45,
- Contenu radioactif 3 : 26 assemblages combustibles REP irradiés complets ou incomplets et non encapsulés dont au maximum 12 assemblages à oxyde mixte Uranium-Plutonium (MOX) complétés par des assemblages à oxyde d'uranium (UO_2), placés dans le panier type 3, pour la version 16-41,
- Contenu radioactif 4 : au maximum 26 assemblages combustibles REP irradiés, complets, non encapsulés et non endommagés dont au maximum 2 assemblages à oxyde mixte Uranium-Plutonium (MOX) complétés par des assemblages à oxyde d'uranium (UO_2), placés dans le panier type 3, pour la version 16-41,
- Contenu radioactif 5 : 26 assemblages combustibles REP à oxyde d'uranium (UO_2) irradiés, complets, non encapsulés et non endommagés placés dans le panier type 3, pour la version 16-41, Contenu radioactif 6 : 26 assemblages combustibles REP à oxyde d'uranium (UO_2) irradiés, complets, non encapsulés et non endommagés, placés dans le panier type 4, pour la version 16-48,
- Contenu radioactif 7 : 32 assemblages combustibles REP à oxyde d'uranium (UO_2) irradiés, complets, non encapsulés et non endommagés placés dans le panier type 5, pour la version 18-41.

Le contenu radioactif autorisé limite les paramètres importants pour la sûreté qui sont utilisés dans le dossier de sûreté, en particulier :

- la géométrie de l'assemblage,
- l'enrichissement maximal, le taux de combustion moyen maximal et le temps de refroidissement minimal des assemblages combustibles,
- la masse maximale de métal lourd dans l'assemblage,
- la puissance thermique totale maximale dégagée par l'assemblage,
- 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. Barrière d'étanchéité

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

Première barrière :

La première barrière d'étanchéité est constituée par :

- la virole épaisse et son fond,
- le couvercle primaire en acier et son joint d'étanchéité métallique interne,
- la tôle d'orifice et son joint d'étanchéité métallique interne.

Deuxième barrière :

La deuxième barrière d'étanchéité est constituée par :

- la virole épaisse et son fond,
- le couvercle secondaire en acier et son joint d'étanchéité métallique interne,
- la tape d'orifice et son joint d'étanchéité métallique interne.

2.5. Enceinte de confinement

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

2.6. Système d'isolement

Le système d'isolement est constitué par :

- la virole épaisse et son fond,
- le contenu radioactif (assemblages combustibles),
- les deux barrières d'étanchéité décrites au paragraphe 2.4.

2.7. Bilan de masse

La masse maximale du colis TN Eagle® est de :

- 133 920 kg pour l'emballage équipé de l'ensemble capots option « Standard-AEA »
- 127 900 kg pour l'emballage équipé de capots option « H.S.A ».
- 144 720 kg pour l'emballage équipé de capots option « H.S.A-AEA ».

2.8. Mécanismes de vieillissement

Les mécanismes de vieillissement du colis sont pris en compte dans les analyses des performances du colis. Il est tenu compte des conditions d'utilisation et des durées d'utilisation de l'emballage.

Il est ainsi montré que les mécanismes de vieillissement ne remettent pas en cause la sûreté du colis en considérant :

- les effets d'humidité ambiante,
- les effets de l'irradiation,
- les effets de la température du colis,
- les effets de la fatigue sur les composants.

3. Performances d'un point de vue mécanique

3.1. Conditions de transport de routine

Tenue de l'enceinte de confinement :

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

- la géométrie et les matériaux des différents composants,
- la température de chaque composant. Les valeurs de température considérées sont conservatives vis-à-vis de celles déterminées dans l'analyse thermique en conditions de transport de routine,
- les accélérations réglementaires en conditions de transport de routine,
- la pression interne de design et la pression dans l'espace inter-couvercles.

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

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

Résistance des structures annexes :

La tenue mécanique des structures annexes de l'emballage TN Eagle® composées des éléments suivants est vérifiée, à savoir :

- les structures acier délimitant les compartiments résine, soumis à une pression interne (correspondant au dégazage de la résine),
- les capots amortisseurs soumis à une pression interne (due à un dégagement gazeux), aux différentiels de pression en fonction de l'altitude en transport et une accélération longitudinale (correspondant aux accélérations réglementaires en conditions de transport de routine).

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

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

Résistance de l'aménagement interne :

La résistance 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.

Résistance des anneaux de blindage :

La résistance mécanique des anneaux de blindage de l'emballage TN Eagle® est vérifiée en évaluant les efforts induits :

- par la virole forgée sur l'anneau (dus au frettage),
- par la dilatation thermique de la résine,
- par la pression interne dans les anneaux,
- par le châssis de transport (prenant appui sur les anneaux).

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

Résistance de l'anneau de manutention :

La résistance mécanique de l'anneau de manutention aux sollicitations mécaniques rencontrées en conditions de transport de routine est vérifiée.

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

En configuration de manutention, toutes les contraintes dans les éléments cités ci-dessus sont inférieures aux limites élastiques des matériaux.

En conditions de routine de transport, les contraintes de compression et de cisaillement sont inférieures aux limites élastiques définies pour le matériau de l'anneau de manutention.

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 pour l'emballage par les analyses de sûreté à l'issue des épreuves de chute de 9 m des conditions accidentelles de transport.

La tenue mécanique des composants structurels de l'aménagement interne TN Eagle® est vérifiée, à savoir :

- les galettes soumises aux sollicitations dues à une accélération radiale majorante des assemblages combustibles et de l'aménagement interne lors d'une chute latérale du colis de 30 cm,
- les entretoises soumises aux sollicitations dues à une accélération longitudinale majorante de l'aménagement interne lors d'une chute axiale du colis de 30 cm.

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

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

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

3.3. Conditions accidentelles de transport

Conformément à la réglementation pour les colis contenant des matières fissiles, le colis doit subir le cumul des épreuves de chute 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).

Méthodologie de démonstration :

La stratégie de démonstration retenue est de démontrer le maintien de l'étanchéité de l'emballage au cours des chutes réglementaires par calculs numériques et/ou par similitude à des emballages ayant subi avec succès des essais de chute pour l'emballage équipé de capots « Standard ».

La stratégie de démonstration retenue est de démontrer le maintien de l'étanchéité de l'emballage au cours des chutes réglementaires par calculs numériques et/ou par similitude à des emballages ayant subi avec succès des essais de chute et/ou par un essai de chute sur une maquette représentative de l'emballage pour l'emballage équipé de capots « H.S.A. ».

Démarche :

Toutes les configurations possibles de chute libre de 9 mètres et de 1 mètre sur poinçon sont analysées, afin de sélectionner les cas de chute pertinents à analyser et les méthodologies associées. De manière synthétique, il est retenu que :

- les chutes de 9 m sont justifiées par calculs numériques,
- les chutes de 1 m sur poinçon, par similitude d'essais de chute.

Pour les justifications par calculs numériques, la justification du bon comportement de l'emballage en chute est étayée par :

- la comparaison à des chutes sur des maquettes d'emballage,
- l'utilisation de la modélisation validée sur de nombreux recalages numériques d'essais de chute réalisés précédemment sur des emballages similaires et sur une chute latérale avec une maquette représentative du colis,
- des critères de justification plus restrictifs que ceux constatés au cours d'essais de chute concluants.

Dans ce cadre, les calculs sont réalisés à l'aide du logiciel éléments finis LS-DYNA.

Les résultats des calculs numériques ont également permis de recueillir les données d'entrée nécessaires aux justifications complémentaires qui sont l'analyse du non-risque de rupture fragile à -40°C pour les composants sensibles à ce phénomène.

Par ailleurs, une chute latérale de 9,3 m d'une maquette représentative de l'emballage équipé de capots « H.S.A. » a été réalisée.

Résultats :

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

Dans le cas de la chute latérale, les modèles de calcul utilisés pour les démonstrations de chute de 9 m ont été validés au travers d'un recalage numérique des résultats des essais de chute réalisés sur des maquettes échelle 1/3 ou 1/6 suivant le type de capot. Les maquettes échelle 1/3 étaient représentative du système de fermeture de l'emballage ainsi que du corps de l'emballage. Les recalages numériques ont permis de mettre en évidence que dans l'ensemble les résultats de l'essai de chute étaient bien recalés et que le modèle numérique restait pénalisant par rapport aux sollicitations réelles subies par la maquette.

Les niveaux de contraintes et la géométrie de la virole forgée permettent d'écarter le risque de rupture fragile à -40°C .

Conclusion :

Les analyses et les chutes réalisées montrent que l'emballage, quelle que soit sa version et quel que soit son type de capot, résiste aux différentes conditions d'épreuve de chute sans subir de dommages susceptibles de nuire au confinement du contenu, à l'efficacité du blindage par rapport à l'exigence réglementaire, à la capacité de dissipation thermique et au maintien de la sous-criticité du colis.

4. Performances d'un point de vue thermique

Les températures atteintes par les constituants de l'emballage TN Eagle® sont déterminées afin de vérifier la sûreté du colis et le respect des exigences réglementaires <1>.

4.1. Analyse thermique de l'emballage TN Eagle® en conditions de transport de routine

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

Paramètres du contenu importants pour l'étude :

La principale caractéristique du contenu radioactif utilisée est la puissance thermique résiduelle maximale par assemblage.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude :

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

- la géométrie de l'emballage et de ses aménagements internes,
- les matériaux de l'emballage et de ses aménagements internes,
- la cavité est remplie d'hélium.

Hypothèses importantes pour l'étude :

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- la température ambiante maximale réglementaire,

- l'ensoleillement réglementaire,
- le colis est transporté horizontalement,
- les échanges thermiques se font par conduction, convection et rayonnement.

Méthode d'analyse :

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

La puissance des assemblages combustibles est appliquée directement sur les assemblages représentés par un volume homogénéisé considérant les caractéristiques thermiques des gaines, des pastilles et du gaz de remplissage de la cavité, à savoir l'hélium. Le profil de puissance thermique des assemblages combustibles est pris en compte.

L'étude est réalisée en tenant compte :

- des plans de chargement autorisés,
- et l'influence de la position du contenu dans la cavité.

Résultats de l'étude :

Les températures maximales atteintes en conditions de transport de routine sont inférieures aux limites admissibles pour l'ensemble des éléments confrontés à la sûreté, à savoir les joints d'étanchéité du système de fermeture, la résine.

4.2. Analyse thermique de l'emballage TN Eagle® 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 Eagle® en conditions accidentelles de transport

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

- les conditions de feu réglementaires (800°C pendant 30 minutes),
- la température ambiante maximale réglementaire avant et après le feu,
- l'ensoleillement réglementaire avant et après le feu,
- le colis est en position horizontale avant le feu et verticale pendant et après le feu,
- les dommages sur les capots et le corps de l'emballage résultants des épreuves de chute sont pris en compte,
- la ruine partielle des assemblages combustibles.

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.

Résultats de l'étude :

Les températures maximales atteintes en conditions accidentelles de transport sont inférieures aux limites admissibles pour les joints métalliques du système de fermeture.

Par ailleurs, il est démontré une marge suffisante sur le critère en température des composants permettant ainsi de gérer les conséquences d'une éventuelle post combustion du bois des capots.

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

5. Performances d'un point de vue confinement

L'enceinte de confinement est définie au paragraphe 2.5.

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

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

L'analyse de confinement du modèle de colis TN Eagle® est réalisée les caractéristiques des contenus présentées au paragraphe 2.3, rappelées ci-dessous :

	Contenus radioactifs 1 et 2	Contenu radioactif 3		Contenu radioactif 4		Contenu radioactif 5	Contenu radioactif 6	Contenu radioactif 7
Combustible	UO ₂	UO ₂	MOX	UO ₂	MOX	UO ₂	UO ₂	UO ₂
Taux de combustion moyen GWj/tU)	≤ 72	≤ 55	≤ 50	≤ 55,7	≤ 48,6	≤ 50	≤ 50	≤ 50
Enrichissement initial (%)	≤ 5	≤ 4,3	-	≤ 4,2	≤ 0,3	≤ 4,65	≤ 4,5	≤ 4,65
Teneur en plutonium initiale (%)	-	-	≤ 7	-	≤ 10,478	-	-	-
Durée de refroidissement (année)	≥ 1,5	≥ 5	≥ 5	12	4	10	10	10

5.1. En conditions normales de transport

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude :

Les principales caractéristiques utilisées sont les suivantes :

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

Hypothèses importantes pour l'étude :

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- une pression externe du colis à une valeur très pénalisante de 0,60 bar abs,
- la durée de transport réglementaire minimale de 1 an,
- un taux de rupture de gaine de crayons combustibles à 100 %,
- le taux de relâchement des gaz de fission (dit RGF) conformément aux recommandations de l'ASN.

Méthode de calcul :

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

Résultats de l'étude :

Les critères réglementaires sont respectés.

5.2. En conditions accidentelles de transport

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

- les températures maximales des gaz et des joints sont issues de l'analyse thermique en accidentelles de transport,
- la pression initiale dans la cavité prise égale à la pression atmosphérique maximale de 1,05 bar abs.

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

6. Performances d'un point de vue radioprotection

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

- conditions de transport de routine :
 - 10 mSv/h en tout point des surfaces externes du colis, pour un envoi sous utilisation exclusive,
 - 2 mSv/h en tout point des surfaces externes du colis et 0,1 mSv/h à 1 m des surfaces externes du colis pour un envoi sous utilisation non exclusive.
- conditions normales de transport : en tout point du colis pas d'augmentation supérieure à 20 % du débit d'équivalent de dose maximal évalué en conditions de transport de routine,
- conditions accidentelles de transport : 10 mSv/h en tout point situé à 1 m des surfaces externes de l'emballage.

6.1. En conditions de transport de routine

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude :

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

Le blindage radial en zone centrale est principalement constitué par :

- une virole en acier,
- des anneaux de blindage et la résine placée à l'intérieur.

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

- un fond en acier,
- une plaque de résine neutrophage optionnelle et la plaque de fond,
- un capot amortisseur de fond constitué d'acier et de bois.

Le blindage axial côté couvercle est constitué par :

- un couvercle (couvercle primaire) en acier,
- un couvercle (couvercle secondaire) en acier,
- un capot amortisseur de tête constitué d'acier et de bois.

Paramètres du contenu importants pour l'étude :

- le taux de combustion,
- la durée de refroidissement,
- la position des assemblages dans l'aménagement interne,
- la masse de métal lourd par assemblage,
- la longueur active.

Méthode de calcul :

Les sources gamma primaires et neutrons de la partie active sont calculées avec le code ORIGEN-ARP 5.1 du formulaire SCALE 6.

Les sources gamma issus de l'activation des embouts sont calculées par le code APOLLO2 version 2.5.

Les DED sont calculés par le code Monte-Carlo TRIPOLI 4.7.

Pour les calculs de DED, la bibliothèque de sections efficaces utilisée est la bibliothèque CEA V5.0, basée sur JEFF-3.1.1. Les particules peuvent être de type neutron ou gamma. Les coefficients de conversion de flux en dose sont issus de la CIPR 74 (édition 96) selon la recommandation CIPR 60.

Résultats de l'étude :

Prenant en compte un vieillissement de la résine sur une durée de 1 an à la puissance maximale, les critères réglementaires de débits d'équivalent de dose en conditions de transport de routine sont respectés.

6.2. En conditions normales de transport

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

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

6.3. En conditions accidentelles de transport

Les évaluations de débits d'équivalent de dose en conditions accidentelles de transport sont faites en considérant les endommagements suivants de l'emballage :

- la disparition partielle de la résine,
- l'écrasement des capots et une disparition majorante du bois des capots amortisseurs.

De manière pénalisante, il est également retenu comme hypothèses :

- la ruine partielle des assemblages combustibles.

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

7. Performance 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 normales de transport suivies des conditions accidentelles de transport (c'est-à-dire résultant du cumul des épreuves des conditions normales et conditions accidentelles de transport),
- un réseau de 5N colis (N étant le nombre permettant de définir la valeur du coefficient réglementaire – Criticality Safety Index CSI) en conditions normales de transport,
- un réseau de 2N colis en conditions accidentelles de transport.

En complément, il est également évalué la réactivité du colis au chargement et déchargement sous eau dans les conditions d'exploitation. L'emballage et son contenu (panier et assemblages) sont intègres avec présence d'eau dans tous les espaces libres de la cavité.

Ces différents cas (réglementaires ou non) décrits ci-dessus sont pris en compte en considérant les deux configurations de calcul suivantes :

- première configuration de calcul : assemblages intègres et cavité remplie d'eau,
- deuxième configuration de calcul : tous les assemblages ruinés et pénétration d'eau limitée dans la cavité.

L'objectif de cette étude est de vérifier la sous-criticité dans les conditions réglementaires de transport pour le colis chargés des contenus radioactifs décrits au paragraphe 2.3.

Les critères de sous-criticité retenus sont les suivants :

- $k_{\text{eff}} \leq 0,95$ pour un colis isolé,
- $k_{\text{eff}} \leq 0,98$ pour un réseau de colis.

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

Paramètres du contenu importants pour l'étude :

Dans cette étude, les assemblages combustibles sont considérés intègres.

L'étude prend en compte les caractéristiques des assemblages combustibles suivantes pour les différents contenus :

- l'enrichissement initial (% massique),
- le nombre de crayons,
- la section fissile,
- les caractéristiques des pastilles,
- les caractéristiques de la gaine.

Paniers type 1 (chargé de son contenu radioactif 1) et type 2 (chargé de son contenu radioactif 2) :

Pour un enrichissement initial maximal de 5 %, les assemblages combustibles sont supposés non irradiés.

Panier type 3 (chargé de son contenu radioactif 3) :

Pour un enrichissement initial maximal de 4,15 % pour les assemblages UO_2 et pour une teneur en plutonium inférieure à 6,94 % pour les assemblages MOX, les assemblages combustibles sont supposés non irradiés.

Pour un enrichissement initial maximal de 4,3 % pour les assemblages UO_2 , il est pris en compte un taux de combustion minimal des assemblages de 3200 MWj/tU.

Panier type 3 (chargé de son contenu radioactif 4) :

Pour un enrichissement initial maximal de 4,2 % pour les assemblages UO_2 et pour une teneur en plutonium à 11,48 % pour les assemblages MOX, les assemblages combustibles sont supposés non irradiés.

Panier type 3 (chargé de son contenu radioactif 5) :

Pour un enrichissement initial maximal de 4,15 % pour les assemblages UO_2 , les assemblages combustibles sont supposés non irradiés.

Pour un enrichissement initial maximal de 4,65 % pour les assemblages UO_2 , il est pris en compte un taux de combustion minimal des assemblages de 3200 MWj/tU.

Panier type 4 (chargé de son contenu radioactif 6) :

Pour un enrichissement initial maximal de 4,15 % pour les assemblages UO_2 , les assemblages combustibles sont supposés non irradiés.

Pour un enrichissement initial maximal de 4,5 % pour les assemblages UO_2 , il est pris en compte un taux de combustion minimal des assemblages de 3200 MWj/tU.

Panier type 5 (chargé de son contenu radioactif 7) :

Pour un enrichissement initial maximal de 4,15 % pour les assemblages UO_2 , les assemblages combustibles sont supposés non irradiés.

Pour un enrichissement initial maximal de 4,65 % pour les assemblages UO_2 , il est pris en compte un taux de combustion minimal des assemblages de 3200 MWj/tU.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude :

L'emballage TN Eagle® est modélisé par des viroles concentriques à l'intérieur desquelles est chargé un panier comportant des logements où sont placés les assemblages combustibles.

L'étude prend en compte la teneur surfacique en bore du panier.

Dans le modèle de calcul, les capots, et les grilles des assemblages combustibles ainsi que les pieds et les têtes en acier inoxydable ne sont pas modélisés.

Hypothèses importantes pour l'étude :

De manière pénalisante, le calcul du coefficient de multiplication (k_{eff}) est effectué pour un colis isolé dans les conditions de chargement sous eau (cavité de l'emballage remplie d'eau).

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

Méthodes de calcul :

Pour les contenus REB, l'étude a été réalisée avec le code de calcul Monte-Carlo TRIPOLI (voie de référence du formulaire CRISTAL V1.2).

Pour les contenus REP, l'étude a été réalisée avec le schéma de calcul APOLLO-MORET (voie standard du formulaire CRISTAL V1.2) qui est basé sur l'utilisation de la bibliothèque CEA pour les milieux fissiles et les milieux de structure.

Résultats :

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

7.2. Colis isolé avec un contenu ruiné et une quantité d'eau limitée dans la cavité

Paramètres du contenu importants pour l'étude :

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

- Pour les contenus radioactifs 1, 2, 5, 6 et 7 :
 - un enrichissement maximal de 5 %,
 - 20 tonnes d' UO_2 ,
 - une masse volumique maximale d' UO_2 de $10,96 \text{ g/cm}^3$.
- Pour le contenu radioactif 3 :
 - un enrichissement maximal de 4,3 % pour les assemblages UO_2 et une teneur en plutonium de 6,94 % pour les assemblages MOX,
 - 6,6 tonnes de métal lourd pour les assemblages UO_2 et 5,6 tonnes de métal lourd pour les assemblages MOX,
 - une masse volumique maximale d' UO_2 de $10,96 \text{ g/cm}^3$,
 - une masse volumique maximale d' $(\text{U-Pu})\text{O}_2$ de $11,0 \text{ g/cm}^3$.
- Pour le contenu radioactif 4 :
 - un enrichissement maximal de 4,2 % pour les assemblages UO_2 et une teneur en plutonium de 11,48 % pour les assemblages MOX,
 - 6,6 tonnes de métal lourd pour les assemblages UO_2 et 5,6 tonnes de métal lourd pour les assemblages MOX,

- une masse volumique maximale d'UO₂ de 10,58 g/cm³,
- une masse volumique maximale d'(U-Pu)O₂ de 11,02 g/cm³.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude :

Le colis TN Eagle[®] est modélisé par une succession de sphères concentriques comprenant :

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

Hypothèses importantes pour l'étude :

Le modèle d'emballage est constitué d'une double barrière d'étanchéité étanche à l'issue des épreuves réglementaires, dont les contrôles avant transport pour vérifier la bonne fermeture, le séchage et l'étanchéité sont renforcés pour se prémunir de l'erreur humaine, et qui permet ainsi de considérer une introduction partielle d'eau dans la cavité conformément au paragraphe 680 du règlement de l'AIEA <1>.

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

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

L'étude prend en compte une pénétration d'eau majorante dans la cavité limitée à 1 litre.

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

Méthode de calcul :

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

Résultats :

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

7.3. Réseau de colis

Le cas d'un réseau de colis est couvert par le cas du colis isolé du fait de l'épaisseur importante de la virole en acier qui isole neutroniquement son contenu (épaisseur supérieure à 200 mm). Ainsi, le respect du critère de $k_{eff} \leq 0,95$ pour le colis isolé (toutes incertitudes comprises) permet d'assurer le respect du critère réglementaire pour un réseau infini de colis.

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

8. Conditions d'utilisation de l'emballage TN Eagle[®]

Ce paragraphe a pour objet de présenter les instructions minimales de chargement, de déchargement et de transport de l'emballage TN Eagle[®].

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

- la cavité doit être remplie avec un gaz neutre (hélium) avant transport,
- vérifier les couples de serrage des vis ainsi que le niveau d'étanchéité de l'espace inter-joint du couvercle primaire et de son orifice, si le couvercle secondaire a été retiré depuis les derniers contrôles,
- vérifier les couples de serrage des vis ainsi que le niveau d'étanchéité de l'espace inter-joint du couvercle secondaire et de son orifice,
- vérifier la non-contamination des surfaces externes de l'emballage et du véhicule de transport en conformité avec les limites réglementaires,
- vérifier les débits d'équivalent de dose autour du colis et du véhicule de transport en conformité avec les limites réglementaires,
- mesurer les températures des surfaces accessibles. Si la température des surfaces accessibles dépasse le critère réglementaire, le transport se fait avec mise en place de barrières thermiques,
- vérifier la mise en place de l'étiquetage réglementaire.

Le colis doit être transporté en position horizontale.

Lors d'un transport ferroviaire, un étiquetage spécifique (selon règlement RID) doit être mis en place de façon à interdire le triage à la bosse.

9. Programme d'entretien périodique

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

Le programme d'entretien comprend notamment :

- le remplacement des joints des barrières d'étanchéité. Le contrôle de l'état des surfaces externes de l'emballage,
- le contrôle de l'état des composants des systèmes vissés (barrières d'étanchéités, capots) afin de vérifier le maintien de leurs fonctions de sûreté,
- le contrôle de l'étanchéité de l'enceinte de confinement.

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.

Un programme particulier pour les emballages transportés après une période d'entreposage est aussi présenté.

10. Programme d'assurance qualité

Les réglementations de transport des colis de matières radioactives en vigueur à la date du présent document <1> font obligation d'appliquer des programmes d'assurance de la qualité pour :

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

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

11. Références

<1> Règlements applicables :

- Règlement de transport des matières radioactives de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA), norme de sûreté, SSR-6, édition 2018 (Rev.1).
- Accord européen relatif au transport des marchandises dangereuses par route (ADR), édition applicable 2023.
- Règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses (RID), édition applicable 2023.
- Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voies de navigation intérieure (ADN), édition applicable 2023.
- Arrêté du 29 mai 2009 modifié relatif aux transports de marchandises dangereuses par voies terrestres (dit « arrêté TMD »).
- Règlement relatif à la sécurité des navires (RSN), division 411 du 1^{er} janvier 2019, annexé à l'arrêté du 23 novembre 1987 modifié.
- Code maritime international des marchandises dangereuses de l'Organisation Maritime Internationale (code IMDG), édition 2022 applicable au 1^{er} janvier 2024.

<2> Note technique NTE-25-004438-000 vers. 1.0 – « Modèle de colis TN Eagle® - Analyses complémentaires des capots de transport option AEA »