

État des révisions

Ind.	Date	Objet et historique des révisions	Préparé par / Vérifié par
1.0	04/2018	Création du document	

1. OBJET

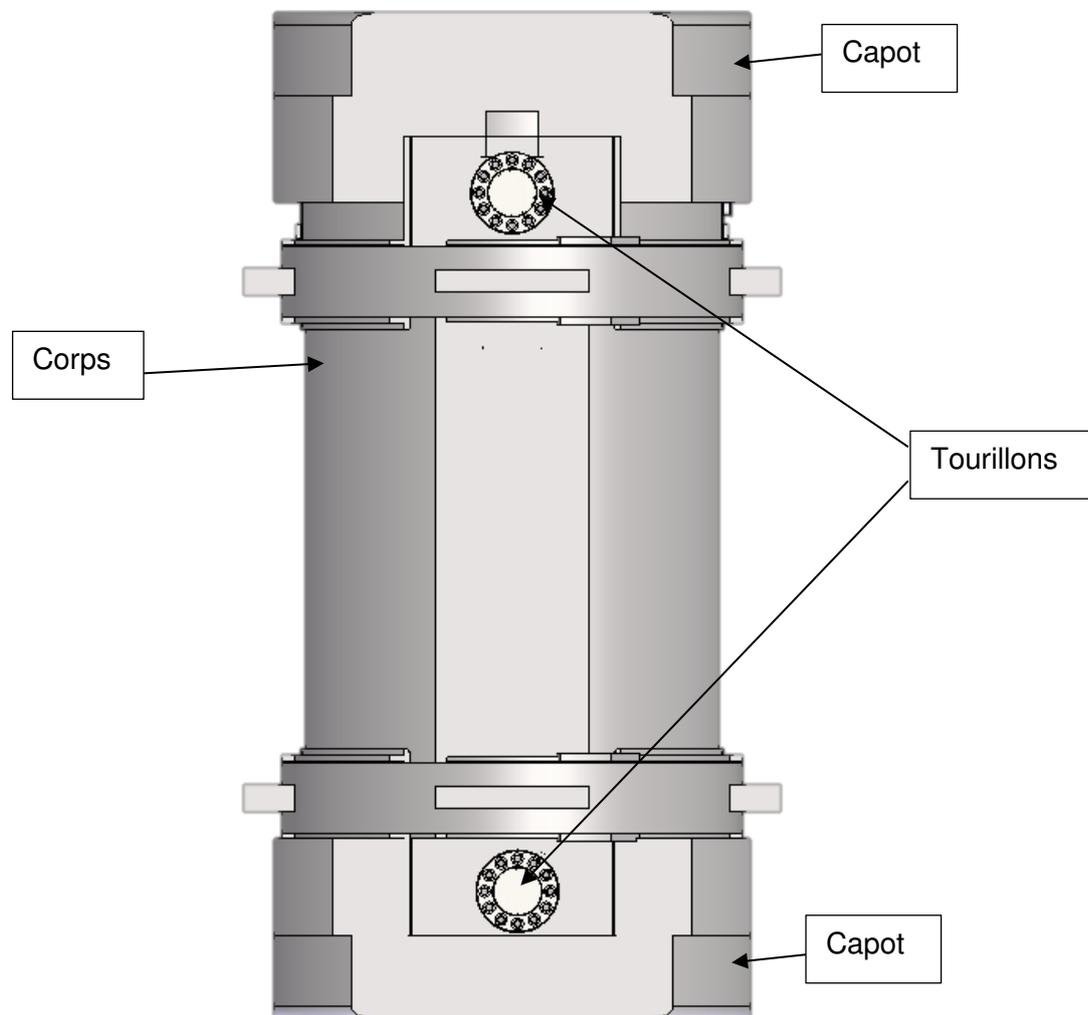
L'objet de ce chapitre est de décrire les caractéristiques de performances du modèle du colis TN[®] 24 D, destiné au stockage et au transport par voie routière, ferroviaire ou maritime d'assemblages combustibles irradiés de type 17x17 en tant que colis de type B(U) contenant des matières fissiles au regard de la réglementation <1>.

2. DESCRIPTIONS ET DEFINITIONS

2.1. Description du colis

Le combustible nucléaire irradié issu du fonctionnement des réacteurs nucléaires à eau pressurisée est constitué à partir de crayons de combustible assemblés en réseau. Le colis TN[®] 24 D permet de réaliser le transport et le stockage de ces assemblages combustibles irradiés de type 17x17.

De forme générale cylindrique, le colis TN[®] 24 D est illustré sur la figure suivante :



L'emballage TN[®] 24 D est cylindrique. Les dimensions générales hors-tout du colis sont :

- Longueur : 5 799 mm
- Largeur : 3021 mm

Le colis TN[®] 24 D est transportable par voie terrestre (routier et ferroviaire), maritime ou fluviale.

2.2. Description de l'emballage

Les principaux composants de l'emballage sont :

- Un corps constitué par :
 - Une virole en acier forgé et d'un fond en acier forgé soudé à la virole.
 - Six tourillons fixés sur la virole (quatre en partie haute et deux en partie basse) et utilisés pour la manutention, le basculement et l'arrimage.
 - Une protection neutronique en résine entourant radialement l'emballage en partie courante recouverte par une enveloppe externe en acier et intégrant des conducteurs thermiques en cuivre.
- Un système de fermeture constitué par :
 - Un couvercle primaire en acier maintenu sur sa bride par des vis et muni de joints d'étanchéité métalliques. Le couvercle primaire est muni d'un orifice donnant accès à la cavité. Le couvercle primaire est équipé d'une protection neutronique (résine) en partie supérieure, confiné par une enveloppe en acier.
 - Un couvercle secondaire en acier, coiffant le couvercle primaire, maintenu par des vis et muni de joints d'étanchéité en élastomère. Le couvercle secondaire est muni d'un orifice donnant accès à l'espace entre couvercles.
- Des protections anti-chocs constituées par :
 - Pour la protection axiale : deux capots amortisseurs en tête et en fond de l'emballage assurant la protection mécanique et thermique du colis en conditions normales et accidentelles de transport. Ils sont constitués d'une structure en acier inoxydable renforcée par des goussets et renfermant des blocs de bois.
 - Pour la protection radiale (selon l'orientation):
 - deux blocs en aluminium maintenus ensemble par 2 demi-couronnes
 - Capots en tête et en fond.

2.3. Description du contenu

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

Description du panier

Le panier est composé d'un empilement de profilés en aluminium enrichi en bore assemblés de manière à former 28 logements carrés. Le panier est constitué de 48 niveaux de profilés. Il est entouré de 4 lunules en acier inoxydable fixés à la virole, et permettant de fermer les logements périphériques.

Contenu radioactif autorisé

Le contenu radioactif autorisé est constitué au maximum de 28 assemblages combustibles REP irradiés de type 17 x 17.

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

- La géométrie de l'assemblage.
- La présence d'hélium dans l'assemblage.

Identification :

DOS-18-006188-003

Version : 1.0

Page 5 sur 24

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

Combustible	UO ₂
Enrichissement initial maximal en uranium 235	3,30%
Taux de combustion moyen maximal	55 000 MWj/tU
Durée de refroidissement minimale	8 ans

- La puissance thermique 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. Barrières d'étanchéité

L'emballage TN[®] 24 D est constitué d'un corps épais dont une seule ouverture est fermée par une barrière d'étanchéité indépendante décrite ci-après.

Cette barrière d'étanchéité est constituée par :

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

2.5. Enceinte de confinement

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

2.6. Système d'isolement

Le système d'isolement est constitué par :

- Le contenu radioactif (assemblages combustibles) et l'aménagement interne.
- La barrière d'étanchéité décrite au paragraphe 2.4.

2.7. Bilan de masse

La masse totale maximale du colis TN[®] 24 D est de 118100 kg.

La masse autorisée en transport est celle utilisée de façon générique dans les études de sûreté (pour les études de manutention et d'arrimage, une masse maximale de 119 000 kg est utilisée de façon conservative).

3. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE MECANIQUE

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.
- La pression interne de design 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 de 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[®] 24 D composées des éléments suivants est vérifiée, à savoir :

- L'enveloppe externe soumise à une pression interne.
- Les protections anti-chocs.
- Les vis de fixations des capots amortisseurs soumises à une accélération longitudinale.

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

Résistance de l'aménagement interne

La résistance des différents aménagements internes aux sollicitations mécaniques et contraintes thermiques rencontrées en conditions de transport de routine sont vérifiées.

Arrimage et manutention

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

La tenue mécanique des tourillons, des vis de fixation et du corps au droit de la liaison est justifiée vis-à-vis du code ASME et de la norme ISO 10276 pour des chargements statiques représentatifs des accélérations vues en transport et en manutention, ainsi qu'à la fatigue suite au cumul des cycles de sollicitation en transport et en manutention.

Les études permettent de justifier la tenue des tourillons pour une utilisation de 50 ans.

3.2. Conditions normales de transport

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

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

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), afin de définir les essais de chutes à réaliser : les séquences de chutes retenues pour être testées physiquement sont celles maximisant les dommages possibles sur le système de fermeture de la barrière d'étanchéité et les sollicitations possibles dans le système de fixation des capots de tête et de fond.

Les épreuves de chute ont été réalisées avec quatre maquettes à l'échelle 1/3 de modèle de colis similaires au TN[®] 24 D.

Séquences de chute pour la première maquette

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

- Chute n°1 : Chute d'une hauteur de 9,20 mètres sur capot amortisseur de tête. L'inclinaison est telle que le centre de gravité de la maquette est aligné avec le point d'impact.
- Chute n°2 : Chute d'une hauteur de 1,20 mètre sur poinçon au niveau du centre du couvercle secondaire. Le point d'impact est aligné avec le centre du couvercle secondaire.
- Chute n°3 : Chute latérale sur la génératrice de l'emballage d'une hauteur de 9,20 mètres sur capots amortisseurs avec un premier impact côté tête.
- Chute n°4 : Chute axiale d'une hauteur de 9,20 mètres sur capot amortisseur de tête.
- Chute n°5 : Chute d'une hauteur de 9,20 mètres sur capot amortisseur de fond. L'inclinaison est telle que le centre de gravité de la maquette est aligné avec le point d'impact.
- Chute n°6 : Chute horizontale d'une hauteur de 9,20 mètres sur génératrice passant par les tourillons.

Les angles de chute correspondent aux configurations les plus pénalisantes.

Séquences de chute pour la deuxième maquette

Les séquences de chutes réglementaires effectuées pour la deuxième maquette sont répertoriées ci-dessous.

- Chute n°1 : Chute avec angle d'une hauteur de 1,03 mètres sur poinçon sur un bloc aluminium de la couronne amortisseur de fond sur une génératrice passant par les tourillons.
- Chute n°2 : Chute avec angle d'une hauteur de 1,03 mètres sur poinçon sur le système de fixation des deux demi-couronnes situées côté tête.
- Chute n°3 : Chute quasi latérale d'une hauteur de 9,21 mètres sur la génératrice de l'emballage avec impact sur les blocs amortisseurs en aluminium, avec premier impact côté tête.
- Chute n°4 : Chute quasi latérale d'une hauteur de 9,21 mètres sur la génératrice de l'emballage avec impact sur les capots amortisseurs, avec premier impact côté tête.

Les angles de chute correspondent aux configurations les plus pénalisantes.

Séquences de chute pour la troisième maquette

Les séquences de chutes réglementaires effectuées pour la troisième maquette sont répertoriées ci-dessous.

- Séquence n°1
 - Chute n°1 : Chute d'une hauteur de 1,05 mètre sur poinçon sur la couronne en aluminium côté tête avec une inclinaison de l'axe de l'emballage par rapport à la verticale.
 - Chute n°2 : Chute latérale d'une hauteur de 9,35 mètres sur génératrice passant par les tourillons avec un premier impact localisé sur le capot côté fond avec une légère inclinaison de l'axe de l'emballage par rapport à l'horizontale.
- Séquence n°2
 - Chute n°3 : Chute d'une hauteur de 1,55 mètre sur poinçon au niveau de la tôle d'orifice du couvercle secondaire avec une inclinaison de l'axe de l'emballage par rapport à la verticale. Le point d'impact est aligné avec le centre de la tôle d'orifice du couvercle secondaire.
 - Chute n°4 : Chute oblique d'une hauteur de 9,35 mètres sur capot amortisseur de tête au niveau de la tôle d'orifice du couvercle secondaire. Cette chute est réalisée de manière à ce que l'impact se cumule (au niveau de la déformation du capot puisqu'il s'agit du même capot) avec l'impact du poinçon précédent. L'inclinaison est telle que le centre de gravité de la maquette est aligné avec le point d'impact.
- Séquence n°3
 - Chute n°5 : Chute axiale d'une hauteur de 9,35 mètres sur capot amortisseur de tête.
- Séquence n°4
 - Chute n°6 : Chute oblique d'une hauteur de 9,35 mètres sur capot amortisseur de fond. L'inclinaison est telle que le centre de gravité de la maquette est aligné avec le point d'impact.
- Séquence n°5
 - Chute n°7 : Chute d'une hauteur de 1,30 mètre sur poinçon au niveau du centre du couvercle secondaire. Le point d'impact est aligné avec le centre du couvercle secondaire

Les angles de chute correspondent aux configurations les plus pénalisantes.

Séquences de chute pour la quatrième maquette

Les séquences de chutes réglementaires effectuées pour la quatrième maquette sont répertoriées ci-dessous.

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

Identification :

DOS-18-006188-003

Version : 1.0

Page 9 sur 24

- Séquence n°3
 - Chute n°4 : Chute latérale d'une hauteur de 1,02 mètre sur poinçon sur capot amortisseur de fond.
 - Chute n°5 : Chute oblique d'une hauteur de 9,15 mètres sur le coin du capot amortisseur de fond.
- Séquence n°4
 - Chute n°6 : Chute oblique d'une hauteur de 9,00 mètres sur capot amortisseur de tête.
- Séquence n°5
 - Chute n°7 : Chute d'une hauteur de 1,28 mètre sur poinçon au niveau du centre du couvercle secondaire.
 - Chute n°8 : Chute axiale d'une hauteur de 9,00 mètres sur le capot amortisseur de tête.

Les angles de chute correspondent aux configurations les plus pénalisantes.

Principe de définition des maquettes de chute

La similitude entre l'emballage TN[®] 24 D et les maquettes est étudiée : il est démontré que les quatre maquettes sont représentatives de l'emballage échelle 1, chargé de son panier et de ses assemblages (modélisés par un lest lors des essais de chute, différence considérée sans conséquences sur la représentativité des maquettes).

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

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

Résultats des chutes pour la première maquette

Les essais de chute 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 chute.

Identification :

DOS-18-006188-003

Version : 1.0

Page 10 sur 24

Chute n°1

- Lors de la chute, le premier impact a eu lieu sur l'arête du capot amortisseur de tête. Un écrasement du capot amortisseur de tête a été constaté.



Après la chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de l'emballage de la maquette n°1 conservent un niveau d'étanchéité suffisant.

Chute n°2

- Lors de la chute, le poinçon a pénétré le capot amortisseur de tête au travers de l'enveloppe externe et est venu mater le centre du couvercle secondaire.
- Après la chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de l'emballage de la maquette n°1 conservent un niveau d'étanchéité suffisant.

Chute n°3

- Lors de la chute, le premier impact a eu lieu sur l'arête du capot amortisseur de tête. La maquette a ensuite rebondi et un deuxième impact a eu lieu au niveau du capot amortisseur de fond. Un écrasement de l'enveloppe externe de l'emballage au niveau du capot amortisseur de tête a été constaté.



- Après la chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de l'emballage de la maquette n°1 conservent un niveau d'étanchéité suffisant.

Chute n°4

- Lors de la chute, les capots amortisseurs ont parfaitement assuré leur fonction en s'écrasant.
- Après la chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de l'emballage de la maquette n°1 conservent un niveau d'étanchéité suffisant.

Identification :

DOS-18-006188-003

Version : 1.0

Page 11 sur 24

Chute n°5

- Lors de la chute, le premier impact a eu lieu sur l'arête du capot amortisseur de fond. Un écrasement du capot amortisseur de fond a été constaté.
- Après la chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de l'emballage de la maquette n°1 conservent un niveau d'étanchéité suffisant.

Chute n°6

- Lors de la 2^{ème} chute, l'impact a eu lieu simultanément sur les tourillons qui ont été écrasés.
- Après la chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de l'emballage de la maquette n°1 conservent un niveau d'étanchéité suffisant.

Résultats des chutes pour la deuxième maquette

Les essais de chute 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.

Chute n°1

- Lors de la chute, le poinçon a impacté le bloc aluminium puis le corps de l'emballage pour finalement fléchir sous le poids de l'emballage.

Chute n°2

- Lors de la chute, le poinçon a flambé sous la sollicitation de la maquette. Un matage local au niveau de l'impact a été constaté.

Chute n°3

- Lors de la chute, le premier impact a eu lieu sur le bloc amortisseur en aluminium côté tête et le deuxième impact a eu lieu sur le bloc amortisseur en aluminium côté fond.



Chute n°4

- Lors de la chute, le premier impact a eu lieu côté tête et un second côté fond. Le premier impact côté tête s'avère plus faible que le deuxième impact localisé côté fond. Un écrasement du capot amortisseur de tête a été constaté.

Identification :

DOS-18-006188-003

Version : 1.0

Page 12 sur 24

Résultats des chutes pour la troisième maquette

Les essais de chute 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 n°1

- Lors de la 1^{ère} chute, la couronne n'a pas subi de dommage significatif
- Lors de la 2^{ème} chute, les capots amortisseurs ont parfaitement assuré leur fonction en s'écrasant. La photo ci-après montre les déformations résultant du premier impact qui s'est déroulé simultanément sur le capot amortisseur de fond, le tourillon dont l'extrémité amincie a été cisailée et la couronne aluminium côté fond dont l'écrasement a provoqué un affaissement local de la résine. Le deuxième impact a été amorti par les deux couronnes aluminium et le capot amortisseur de tête sans impacter le tourillon. Le panier a été déformé au niveau des profilés d'extrémité de trois logements.



- À la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de la maquette n°3 conservent un niveau d'étanchéité suffisant.

Séquence n°2

- Lors de la 1^{ère} chute, le poinçon a pénétré le capot amortisseur de tête au travers de l'enveloppe externe et est venu mater le centre de la tige d'orifice du couvercle secondaire. Le poinçon a ensuite fléchi. La photo ci-après montre l'empreinte laissée par le poinçon au niveau de la tige d'orifice du couvercle secondaire.



Identification :

DOS-18-006188-003

Version : 1.0

Page 13 sur 24

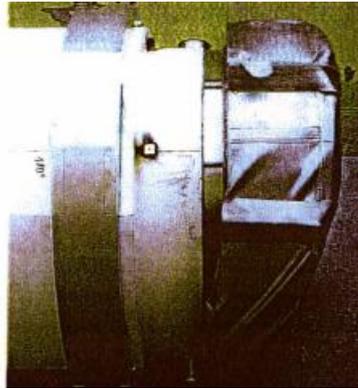
- Lors de la 2^{ème} chute, le premier impact a eu lieu sur l'arête du capot amortisseur de tête. La maquette a ensuite rebondi et un deuxième impact a eu lieu au niveau du capot amortisseur de fond. Un écrasement du capot amortisseur de tête a été constaté.
- À la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de la maquette n°3 conservent un niveau d'étanchéité suffisant.

Séquence n°3

- Lors de la chute, les capots amortisseurs ont parfaitement assuré leur fonction en s'écrasant. Les plaques de blindage en extrémité supérieure du panier ont flambé.
- À la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de la maquette n°3 conservent un niveau d'étanchéité suffisant.

Séquence n°4

- Lors de la chute, le premier impact a eu lieu sur l'arête du capot amortisseur de fond. La maquette a ensuite rebondi et un deuxième impact a eu lieu au niveau du capot amortisseur de tête. Un écrasement du capot amortisseur de fond a été constaté (voir photo ci-dessous).



À la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de la maquette n°3 conservent un niveau d'étanchéité suffisant.

Séquence n°5

- Lors de la chute, le poinçon a pénétré le capot amortisseur de tête au travers de l'enveloppe externe et est venu impacter le centre du couvercle secondaire.

Résultats des chutes pour la quatrième maquette

Les essais de chute 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 n°1

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

Séquence n°2

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



- À la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de la maquette n°4 conservent un niveau d'étanchéité suffisant.

Séquence n°3

- Lors de la 1^{ère} chute, le poinçon a pénétré le capot amortisseur de fond. Suite à l'impact, l'emballage s'est couché sous son propre poids et le poinçon a fléchi.
- Lors de la 2^{ème} chute, le premier impact a eu lieu sur l'arête du capot amortisseur de fond. La maquette a ensuite rebondi et un deuxième impact a eu lieu au niveau des couronnes.
- À la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de la maquette n°4 conservent un niveau d'étanchéité suffisant.

Séquence n°4

- Lors de la chute, le premier impact a eu lieu sur l'arête du capot amortisseur de tête. La maquette a ensuite rebondi et un deuxième impact a eu lieu au niveau des couronnes.
- À la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de la maquette n°4 conservent un niveau d'étanchéité suffisant.

Séquence n°5

- Lors de la 1^{ère} chute, le poinçon a pénétré le capot amortisseur de tête au travers de l'enveloppe externe sans impacter le couvercle secondaire.
- Lors de la 2^{ème} chute, les capots amortisseurs ont parfaitement assuré leur fonction en s'écrasant.
- À la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de la maquette n°4 conservent un niveau d'étanchéité suffisant.

Identification :

DOS-18-006188-003

Version : 1.0

Page 15 sur 24

Comportement de l'emballage TN[®] 24 D 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.

Les essais de chutes présentés ci-avant et destinés à vérifier la tenue mécanique de l'emballage se sont déroulés à température ambiante. Des coefficients permettant de prendre en compte le comportement du bois en température sont donc utilisés afin de prendre en compte soit les effets de la température minimale 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 et de l'aménagement interne et du contenu qui sont sollicitées en chute. La tenue de ces éléments est vérifiée.

La résistance de l'emballage TN[®] 24 D 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.

L'absence de risque de rupture fragile de l'enceinte de confinement à -40°C est également vérifié.

Conclusion

Suite aux épreuves réglementaires des chutes en conditions accidentelles de transport, la barrière de l'emballage TN[®] 24 D conserve son étanchéité, et ce pour toutes les configurations de chute.

La démonstration de la résistance du panier dans les différentes configurations de chute est basée sur les accélérations déterminées lors des analyses faites pour le colis par une méthode analytique. Les calculs prenant en compte les effets dynamiques permettent de vérifier la tenue des éléments constituant le panier.

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

4. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE THERMIQUE

Les températures atteintes par les constituants de l'emballage TN[®] 24 D dans les diverses configurations de transport sont déterminées afin de vérifier la sûreté du colis et le respect des exigences réglementaires <1>.

4.1. Analyse thermique de l'emballage TN[®] 24 D en conditions de transport de routine

Paramètres du contenu importants pour l'étude

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

Identification :

DOS-18-006188-003

Version : 1.0

Page 16 sur 24

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

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

- Les matériaux et la géométrie 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 conservativement considéré 24 heures sur 24.
- Le colis transporté horizontalement.
- Les zones de bois des capots côté tête et côté fond de l'emballage sont considérées comme adiabatiques. Les capots sont représentés par les épaisseurs d'acier jouant le rôle de pont thermique. Les blocs de bois ne sont pas représentés.
- Les échanges thermiques se font par conduction, rayonnement et convection.

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. Pour tous les cas de calcul, le panier est centré radialement dans la cavité.

Les températures atteintes en section chaude sont obtenues par un modèle 2D utilisant la puissance linéique maximale.

Les températures des joints sont calculées par un modèle 3D où le panier est calé côté tête.

Résultats de l'étude

Les températures maximales atteintes en conditions de transport de routine sont inférieures aux limites admissibles pour les joints métalliques, la résine du corps et du couvercle primaire, des assemblages combustibles.

4.2. Analyse thermique de l'emballage TN[®] 24 D 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[®] 24 D en conditions accidentelles de transport

Hypothèses

Les mêmes hypothèses que pour les conditions de transport de routine sont internes hormis les hypothèses complémentaires suivantes :

- Les conditions de feu réglementaires (800°C pendant 30 minutes).
- Les conditions initiales avant feu correspondent aux conditions normales de transport.
- L'effet de poinçonnement sur le capot amortisseur de tête est pris en compte.

Identification :

DOS-18-006188-003

Version : 1.0

Page 17 sur 24

Résultats de l'étude

Les températures maximales atteintes en conditions accidentelles de transport dans les joints métalliques du couvercle primaire, ne dépassent pas les limites admissibles.

Les températures maximales atteintes en conditions accidentelles de transport sont supérieures aux limites admissibles pour la résine du corps. La résine devrait être dégradée sur un ou deux centimètres seulement. De plus, la résine n'est pas un élément combustible susceptible d'augmenter la durée d'incendie ou son intensité. Par ailleurs, de façon très pénalisante, les analyses de débits d'équivalents de dose sont réalisées en conditions accidentelles de transport en considérant une disparition totale de la résine durant l'incendie et il est démontré que les critères sont respectés (voir paragraphe 6).

5. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE CONFINEMENT

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 1287. Cette étude tient compte :

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

5.1. En conditions normales de transport

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les principales caractéristiques utilisées sont les suivantes :

- Le taux de fuite maximal de l'enceinte de confinement vérifié avant le transport.
- Les températures maximales des gaz et des joints issues de l'analyse thermique en conditions normales de transport.
- 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 :

- La pression externe du colis est de 0,60 bars abs.
- La durée de transport est de 1 an.
- Un taux maximum de crayons combustibles présentant une rupture de leur gaine égal à 100%.
- Un taux de relâchement des gaz de fission (dit RGF) conforme aux recommandations de l'ASN.

Méthode de calcul

Le relâchement d'activité est calculé analytiquement en prenant en compte les produits de fission sous forme de gaz et aérosols. Le taux de fuite de radionucléides est calculé en termes de valeurs de A_2 en considérant que le taux de fuite de la barrière d'étanchéité en conditions de transport de routine est garanti.

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 maximale à l'intérieur de la cavité est prise égale à la pression atmosphérique maximale de 1,05 bar abs.

Les résultats montrent une marge significative par rapport au critère réglementaire de 1 A₂ cumulé sur une semaine.

6. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE RADIOPROTECTION

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

- Conditions de transport de routine : 2 mSv/h en tout point des surfaces externes du colis et 0,1 mSv/h en tout point situé à 2 mètres des surfaces latérales externes du véhicule.
- Conditions normales de transport : pas d'augmentation du débit d'équivalent de dose supérieure à 20% en tout point du colis.
- Conditions accidentelles de transport : 10 mSv/h en tout point situé à 1 m des surfaces externes de l'emballage.

6.1. En conditions de transport de routine

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Les caractéristiques typiques des assemblages combustibles considérées dans cette analyse sont les suivantes :

- Le taux de combustion.
- Le taux d'enrichissement en ²³⁵U.
- La masse d'uranium par assemblage.
- La durée de refroidissement.
- La longueur active des assemblages.
- Le nombre de cycle d'irradiation et la durée d'un cycle.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

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

Le blindage radial est principalement constitué, de l'intérieur vers l'extérieur, par :

- Une virole interne en acier au carbone.
- Une couche de résine traversée par des conducteurs thermiques en cuivre.
- Une structure externe en acier au carbone.

Identification :

DOS-18-006188-003

Version : 1.0

Page 19 sur 24

Le blindage axial côté couvercle est principalement constitué par :

- Un couvercle primaire en acier au carbone.
- Une couche de résine.
- Une tôle d'acier inoxydable.
- Un couvercle secondaire en acier inoxydable.
- Un capot amortisseur constitué d'acier et de bois

Le blindage axial côté fond est principalement constitué par :

- Un fond en acier au carbone.
- Un capot amortisseur constitué d'acier et de bois

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- La densité de la résine est prise à sa valeur minimale.
- Les conducteurs thermiques et la résine sont modélisés comme un unique milieu homogène.
- Tout le bois des amortisseurs est considéré comme homogène.
- Le panier et les assemblages sont considérés comme un unique milieu homogène

Méthode de calcul

Le calcul est composé de deux étapes :

- L'évaluation des sources gammas et des neutrons.
- L'évaluation des débits d'équivalent de dose des neutrons et des gammas autour de l'emballage.

Les évaluations des sources radioactives et des produits d'activation des assemblages combustibles ont été réalisées à l'aide du code ORIGEN 2.

Les débits d'équivalent de dose gamma et neutron ont été déterminés à l'aide des codes MERCURE IV et SN1D.

Résultats de l'étude

Les critères réglementaires de débits d'équivalent de dose en conditions de transport de routine sont respectés.

6.2. En conditions normales de transport

Il est considéré que la géométrie de l'emballage n'est pas endommagée. Par conséquent, la capacité de blindage en conditions normales de transport est considérée comme étant la même qu'en conditions de transport de routine.

Les critères associés aux conditions normales de transport sont donc respectés.

6.3. En conditions accidentelles de transport

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

- Dans la direction radiale, de manière pénalisante, on considère que la résine et les conducteurs thermiques ont été endommagés pendant l'incendie et ont complètement disparus.
- Dans la direction axiale, de manière pénalisante, on considère que la résine dans le couvercle primaire, et les capots amortisseurs ont été endommagés et ont complètement disparus.

Les critères réglementaires de débits d'équivalent de dose en conditions accidentelles de transport sont respectés.

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

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

- Le colis isolé en conditions de routine.
- Le colis isolé en conditions normales de transport.
- Le colis isolé en conditions normales de transport suivies des conditions accidentelles de transport (c'est-à-dire résultant du cumul des épreuves des conditions normales et accidentelles de transport).
- Un réseau de 5N colis en conditions normales de transport.
- Un réseau de 2N colis en conditions accidentelles de transport.

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

- Configuration A : assemblages intacts et cavité remplie d'eau ainsi que la prise en compte d'un dépassement de la zone active au-delà de la zone borée du panier. Deux cas de glissement sont étudiés :
 - Dépassement de 115,5 mm de la zone active des assemblages au delà de la zone borée du panier ;
 - Dépassement de 89,5 mm de la zone active des assemblages au delà de la zone borée du panier.
- Configuration B : tous les assemblages sont ruinés et il y a une pénétration limitée d'eau dans la cavité.

Les critères de sous-criticité retenus sont les suivants :

- $k_{\text{eff}} + 3 \sigma \leq 0,95$ pour un colis isolé.
- $k_{\text{eff}} + 3 \sigma \leq 0,98$ pour un réseau de colis.

7.1. Colis isolé avec contenu intègre et 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 REP 17x17 suivantes :

- Le nombre de crayons.
- La section fissile.

Identification :

DOS-18-006188-003

Version : 1.0

Page 21 sur 24

- Les caractéristiques de la gaine.
- Les caractéristiques des pastilles.
- Le taux d'enrichissement en ^{235}U .

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

L'emballage TN[®] 24 D, décrit au paragraphe 2.2, est chargé d'un panier comportant des logements où sont placés les assemblages combustibles.

L'étude prend en compte la teneur en bore dans le panier.

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 accidentelles de transport cumulées aux conditions normales de transport.

La couche de résine, considérée comme entièrement brûlée, est remplacée par de l'eau. La couche d'eau de 200 mm servant à la réflexion des neutrons est directement appliquée sur la virole en acier.

Méthode de calcul

L'étude est réalisée avec le schéma de calcul APOLLO2-MORET4 qui est basé sur l'utilisation des données nucléaire JEF2.2, et la bibliothèque CEA93.

Le calcul se déroule en deux parties :

- L'étude de l'assemblage combustible et des milieux de structure de l'emballage avec le code APOLLO2
- Le calcul du k_{eff} de l'emballage par le code Monte-Carlo MORET4.B.4.

Résultats de l'étude

Le critère de sous-criticité retenu pour un colis isolé est respecté dans tous les cas de chargement : $k_{\text{eff}} + 3 \sigma \leq 0,95$.

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

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Dans cette étude, les assemblages combustibles sont considérés ruinés.

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

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

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

L'emballage TN[®] 24 D est modélisé par une succession de sphères concentriques comprenant :

- La matière fissile pour laquelle deux types de forme sont étudiées : une forme homogène ($\text{UO}_2 + \text{eau}$) et une forme hétérogène (fragements d'oxyde de rayons variables).
- Une épaisseur d'acier.
- Une épaisseur d'eau.

Identification :

DOS-18-006188-003

Version : 1.0

Page 22 sur 24

Hypothèses importantes pour l'étude

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 7 jours 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 donc en compte une pénétration limitée d'eau dans la cavité.

La couche de résine, considérée comme entièrement brûlée, est remplacée par de l'eau. La couche d'eau de 200 mm servant à la réflexion des neutrons est directement appliquée sur la virole en acier.

Méthode de calcul

L'étude a été réalisée avec le schéma de calcul APOLLO2-MORET2 (voie standard du formulaire CRISTAL).

Résultats

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

7.3. Réseau de colis

Le cas d'un réseau de colis est couvert par le cas du colis isolé du fait de l'épaisseur importante de la virole en acier qui isole neutroniquement son contenu. Ainsi, le respect du critère de $k_{\text{eff}} + 3 \sigma \leq 0.95$ pour le colis isolé permet d'assurer le respect du critère réglementaire de $k_{\text{eff}} + 3 \sigma \leq 0.98$ pour un réseau infini de colis.

8. CONDITIONS D'UTILISATION DE L'EMBALLAGE TN[®] 24 D

Ce paragraphe a pour objet de présenter les instructions minimales de chargement, de déchargement et de transport de l'emballage TN[®] 24 D.

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

- Avant chaque transport, la cavité doit être remplie avec un gaz neutre (hélium).
- Vérifier les couples de serrage des vis du couvercle primaire et de sa tôle d'orifice par deux chaînes de contrôle indépendantes.
- Effectuer un test d'étanchéité de l'espace inter-joints du couvercle primaire et de son orifice.
- Vérifier la non-contamination des surfaces extérieures 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.

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 saut de l'emballage lors du triage en gare.

9. PROGRAMME D'ENTRETIEN PERIODIQUE

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 contrôle des joints des barrières d'étanchéité.
- Le contrôle de l'état des surfaces externes de l'emballage.
- Le contrôle de l'état des composants des systèmes vissés (barrières d'étanchéités, capots et tourillons) afin de vérifier le maintien de leurs fonctions de sûreté.
- Le contrôle de l'étanchéité de l'enceinte de confinement.
- Le contrôle des débits d'équivalent de dose autour de l'emballage.
- Le contrôle des tourillons assurant la manutention et l'arrimage du colis, incluant la détection de défaut.

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 l'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, utilisations, 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 de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique, collection sécurité n°6, édition de 1985 (revue en 1990)
- Règlement de transport des matières radioactives de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA), normes de sûreté, SSR-6, édition 2012.
- Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (ADR), édition 2017.
- Règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses (RID), édition 2017.
- Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voies de navigation intérieure (ADN), édition 2017.
- 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, annexé à l'arrêté du 23 novembre 1987 modifié.
- Code maritime international des marchandises dangereuses de l'Organisation Maritime Internationale (code IMDG), édition 2017.