


<p>Orano NPS</p> <p>DOSSIER DE SÛRETÉ</p> <p>TN® 17 MAX / TN® JA</p>	<p>Diffusion limitée Orano - Autorités</p> <p>CHAPITRE 1.5</p> <p>CARACTÉRISTIQUES DE PERFORMANCES DU COLIS</p>													
	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border-bottom: 1px solid black; text-align: center; font-size: small;">Préparation</td> <td style="border-bottom: 1px solid black; text-align: center; font-size: small;">Date</td> <td style="border-bottom: 1px solid black; text-align: center; font-size: small;">Signature</td> </tr> <tr> <td style="background-color: black; height: 20px;"></td> <td style="background-color: black; height: 20px;"></td> <td style="background-color: black; height: 20px;"></td> </tr> <tr> <td style="border-bottom: 1px solid black; text-align: center; font-size: small;">Vérification</td> <td style="border-bottom: 1px solid black; text-align: center; font-size: small;">Date</td> <td style="border-bottom: 1px solid black; text-align: center; font-size: small;">Signature</td> </tr> <tr> <td style="background-color: black; height: 20px;"></td> <td style="background-color: black; height: 20px;"></td> <td style="background-color: black; height: 20px;"></td> </tr> </table>	Préparation	Date	Signature				Vérification	Date	Signature				
Préparation	Date	Signature												
Vérification	Date	Signature												
Identification :	DOS-18-004202-007	Version. 5.0	Page 1 / 31											

Version publique, les informations confidentielles sont masquées par un rectangle noir : [REDACTED]

Sommaire

État des révisions	2
1. Objet	3
2. Description et définitions	3
3. Performances d'un point de vue mécanique	9
4. Performances d'un point de vue thermique	16
5. Performances d'un point de vue confinement	19
6. Performances d'un point de vue des débits d'équivalent de dose	21
7. Performances d'un point de vue sûreté-criticité	25
8. Conditions d'utilisation	29
9. Programme d'entretien périodique	30
10. Programme d'assurance qualité	30
11. Référence	31

État des révisions

Révision	Date	Objet et historique des révisions	Préparé par / Vérifié par
Ancienne référence : DOS-13-00079717-050			
00			
01			
Nouvelle référence : DOS-18-004202-007			
Version	Date	Objet et historique des versions	Préparé par / Vérifié par
1.0			
2.0			
3.0			
4.0			
5.0			

1. Objet

L'objet de ce chapitre est de décrire les caractéristiques de performance du colis TN[®] 17 MAX et de sa variante TN[®] JA, destinés au transport par voie terrestre (routier ou ferroviaire), maritime ou fluviale, sous-utilisation exclusive, d'assemblages combustibles REP 15×15 irradiés ou de combustibles de réseau circulaire irradiés en tant que colis de type B(M) contenant des matières fissiles au regard de la réglementation <1>.

2. Description et définitions

2.1. Description du colis

Le traitement des combustibles nucléaires nécessite leur transport entre divers lieux d'utilisation (centrales nucléaires) et de traitement (usine). Le colis TN[®] 17 MAX permet de réaliser ces transports.

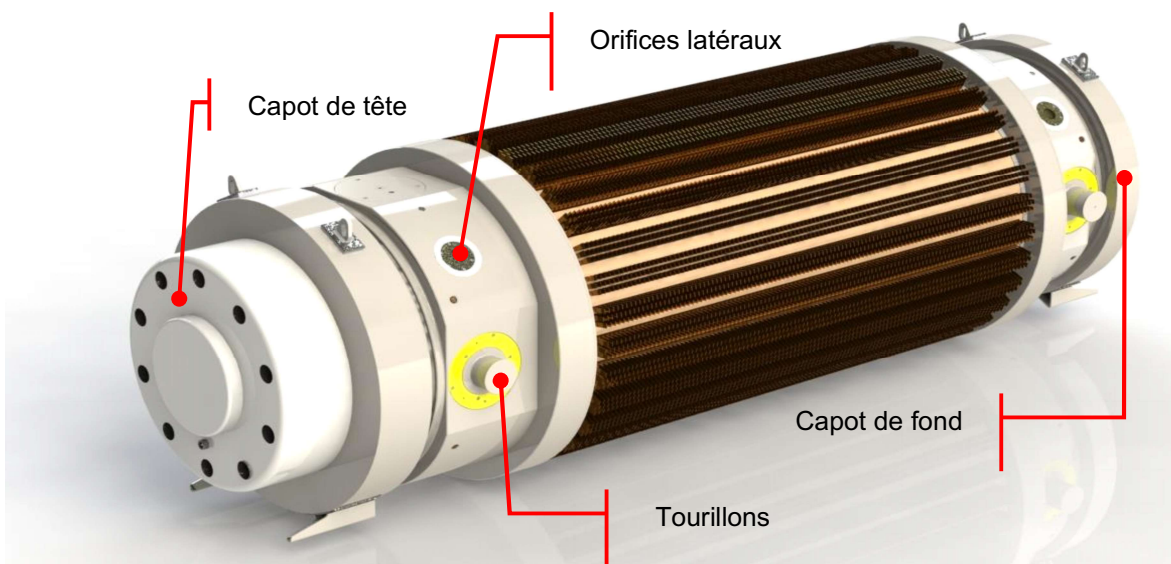
Il existe deux variantes d'emballage du modèle de colis :

- La variante standard appelée TN[®] 17 MAX,
- La variante appelée TN[®] JA.

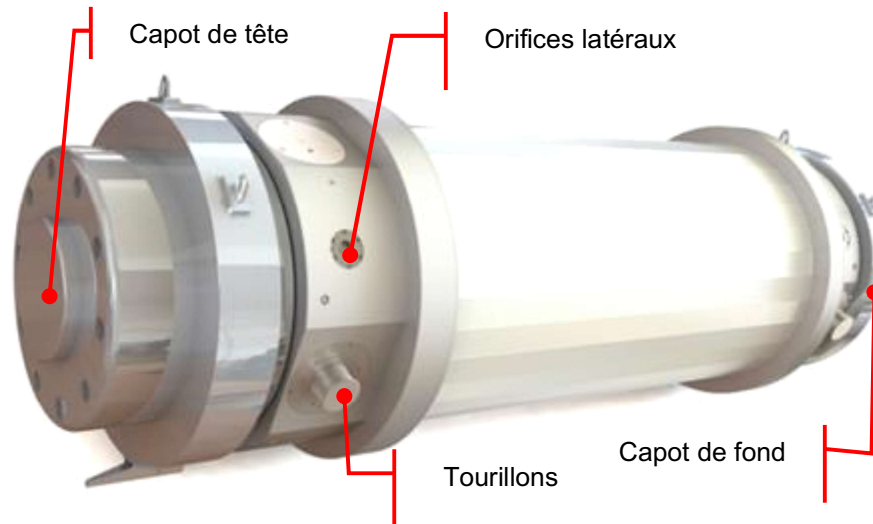
La variante TN[®] JA diffère de la variante standard TN[®] 17 MAX essentiellement par son corps qui n'est pas équipé d'ailettes de refroidissement.

La variante TN[®] JA peut être équipé des mêmes capots amortisseurs que la version standard TN[®] 17 MAX ou de capots rallongés qui diffèrent à la fois par leurs longueurs et par les caractéristiques mécaniques de la mousse amortisseur.

De forme générale cylindrique, l'emballage TN[®] 17 MAX est illustré sur la figure ci-dessous tel que présenté au transport, en position horizontale.



L'emballage TN[®] JA est illustré sur la figure ci-dessous tel que présenté au transport, en position horizontale.



Les dimensions générales hors-tout du modèle de colis TN[®] 17 MAX sont :

	TN [®] 17 MAX / TN [®] JA avec "capots courts"	TN [®] JA avec "capots longs"
Longueur	6,8 m	7,4 m
Diamètre externe	2,15 m	

Le modèle de colis TN[®] 17 MAX est destiné au transport d'assemblages de type REP 15×15 irradiés à oxyde d'uranium, de type REP 15×15 irradiés à oxyde mixte d'uranium et de plutonium et de combustibles en réseau circulaire à oxyde d'uranium et à oxyde mixte d'uranium et de plutonium.

Le modèle de colis TN[®] 17 MAX est transportable par voie terrestre (routier ou ferroviaire), maritime ou fluviale.

2.2. Description de l'emballage

Les principaux composants des emballages sont :

- Un corps en acier forgé comportant une cavité interne et muni, à l'extérieur, d'un habillage comprenant un matériau de blindage neutronique et une structure de dissipation thermique avec des ailettes de refroidissement (le corps de l'emballage TN[®] JA n'est pas muni d'ailettes de refroidissement). Le corps forgé est composé de plusieurs parties (fond et virole) soudées sur la totalité de leur épaisseur. Des tourillons vissés sur le corps (2 à l'avant et 2 à l'arrière) forment les points de préhension pour la manutention et l'arrimage. Des orifices latéraux (1 à l'avant et 2 à l'arrière) permettent un accès à la cavité ; ils sont obturés par un double système de fermeture vissé et équipé de joints élastomères. Aux extrémités de la zone ailetée, deux porte-jupes constitués d'un capotage en acier inoxydable contiennent une couronne en aluminium amortisseur permettant de limiter l'incidence des chocs lors des épreuves de chute réglementaires des conditions normales et accidentelles de transport.

- Un système de fermeture de la cavité, formé d'un bouchon maintenu par une bride de serrage en acier fixée par des vis, et un couvercle en acier maintenu par des vis. Le bouchon comprend également une couche de matériau de blindage neutronique et de protection contre les rayonnements gamma, ainsi qu'un amortisseur permettant de limiter le choc du contenu lors des épreuves de chute réglementaires des conditions normales et accidentelles de transport. Ce bouchon est muni de 2 orifices équipés d'un raccord rapide donnant accès respectivement à la cavité de l'emballage et au compartiment de l'amortisseur. Ils sont obturés par un capuchon de raccord vissé et équipé de joints élastomères.
- Deux capots amortisseurs (en tête et en fond) protégeant le système de fermeture et le fond de l'emballage contre les chocs des conditions normales et accidentelles de transport. Ces capots sont constitués d'un capotage en acier inoxydable, rempli de deux types de matériaux amortisseurs (l'un en aluminium, l'autre en mousse). Les capots sont emboîtés sur le corps de l'emballage au moyen d'une couronne d'emboîtement en acier inoxydable, et maintenus en place par des vis. Le capot de tête est également équipé d'une plaque épaisse anti-poinçonnement afin de protéger le système de fermeture lors des épreuves des conditions accidentelles de transport.

2.3. Description des contenus

Les contenus du modèle de colis TN[®] 17 MAX sont constitués par l'aménagement interne de la cavité et les assemblages combustibles usés.

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

2.3.1. Contenu REP 15×15 (contenu n°1)

Le contenu n°1 est constitué d'assemblage REP 15×15 irradiés à oxyde d'uranium, de type REP 15×15 irradiés à oxyde mixte d'uranium et de plutonium. Il doit être transporté dans l'emballage TN[®] 17 MAX.

- Le panier de l'emballage TN[®] 17 MAX consiste en un assemblage vissé d'éléments en aluminium enrichi en bore et d'éléments de renfort en acier inoxydable, délimitant neuf logements longitudinaux de section rectangulaire dans lesquels sont placés les assemblages combustibles. Ces éléments sont emboîtés en périphérie dans des lunules en acier qui ferment extérieurement les logements. La manutention de l'ensemble est assurée par l'intermédiaire de 4 tirants en acier inoxydable.
- Chaque assemblage combustible est supporté par une cale en acier déposée au fond de chaque logement. Ces cales permettent de positionner les assemblages combustibles dans la cavité.



La photo ci-contre illustre un assemblage combustible pour réacteur à eau sous pression (REP).

Il comprend des crayons combustibles formant un réseau incomplet 15×15 à pas carré. Les emplacements sans combustible sont occupés par des tubes qui servent à la fois d'entretoises entre les embouts d'extrémité et de guides pour les barres de contrôle.

Des grilles sont fixées sur ces tubes et assurent le positionnement transversal et longitudinal des crayons.

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

- La géométrie de l'assemblage combustible,
- L'enrichissement maximal en ^{235}U , la teneur en plutonium maximale, le taux de combustion moyen maximal et le temps de refroidissement minimal des assemblages combustibles, résumés dans le tableau suivant :

Historique d'irradiation	Contenu n°1	
	UOX	MOX
Combustible	UO ₂	UO ₂ - PUO ₂
Enrichissement maximal en ^{235}U	5 %	0,3%
Teneur en plutonium maximale	-	10,1%
Taux de combustion moyen maximal	60 GWj/t _{ML}	
Durée de refroidissement	360 jours	730 jours

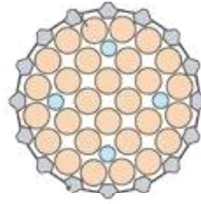
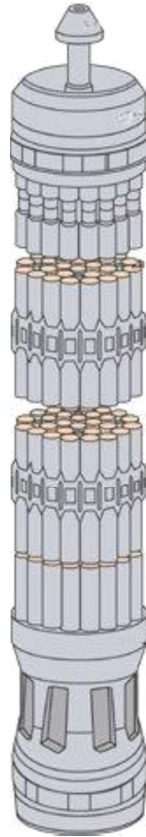
- La masse maximale d'uranium dans l'assemblage combustible,
- La puissance thermique maximale dégagée par l'assemblage combustible,
- Les sources de rayonnement maximales exprimées sous forme d'un système d'inéquations permettant de respecter les exigences réglementaires de débit d'équivalent de dose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

2.3.2. Contenu assemblage de réseau circulaire (contenu n°2)

Le contenu n°2 est constitué d'assemblages en réseau circulaire à oxyde d'uranium et à oxyde mixte d'uranium et de plutonium. Il doit être transporté dans l'emballage TN[®] JA.

- Le panier de l'emballage TN[®] JA consiste en un empilement de galettes circulaires en acier inoxydable espacées les unes des autres par des entretoises. Chaque niveau formé par deux galettes successives enserre 32 couples de tubes en acier inoxydable et tube en aluminium enrichi au bore délimitant 32 logements dans lesquels sont placés les assemblages combustibles. La manutention de l'ensemble est assurée par 4 tirants munis d'oreilles de levage.

- Chaque assemblage combustible est supporté par une cale en acier déposée au fond de chaque logement. Ces cales permettent de positionner les assemblages combustibles dans la cavité.



La photo ci-contre illustre un assemblage de crayons combustibles formant un réseau circulaire.

Ils comprennent des crayons combustibles formant un réseau circulaire. Ils peuvent également contenir des crayons ne contenant pas de matière fissile servant d'entretoise entre les pièces d'extrémité.

Des grilles assurent le positionnement transversal et longitudinal des crayons.

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

- La géométrie de l'assemblage combustible,
- L'enrichissement maximal en ²³⁵U, la teneur en plutonium fissile maximale, le taux de combustion moyen maximal et le temps de refroidissement minimal des assemblages combustibles, résumés dans les tableaux suivants :

	Contenu n°2					
	UOX		MOX			
	Type 1	Type 2	Type 1	Type 2	Type 3 ⁽¹⁾	
Combustible	UO ₂	UO ₂	(U-PU)O ₂	(U-PU)O ₂	UO ₂	(U-PU)O ₂
Enrichissement en ²³⁵ U maximal (% _m)	1,96	3,29	1,387	0,790	3,890	0,800
Teneur fissile en Pu maximale (% _m)	-	-	2,554	3,149	-	4,818
Taux de combustion moyen maximal (GWj/t _{ML})	20	30	20	35	35	
Temps de refroidissement minimal (année)	18,25	18,25	18,25	26	26	

⁽¹⁾ Les assemblages MOX type 3 contiennent quelques crayons à oxyde d'uranium (UOX).

- La masse d'uranium et de plutonium dans l'assemblage combustible,
- La puissance thermique moyenne dégagée par l'assemblage combustible,
- La quantité et l'activité des radioéléments présents dans les crayons combustibles après leur irradiation dans le réacteur et après la durée de refroidissement requise.

2.4. Barrières d'étanchéité

Les emballages TN[®] 17 MAX et TN[®] JA sont constitués d'un corps épais dont chaque ouverture est fermée par 2 barrières d'étanchéité indépendantes décrites ci-après.

Corps épais

Le corps épais est constitué de la virole épaisse en acier forgé, du fond en acier forgé et de la soudure pleine pénétration liant ces composants entre eux.

Première barrière

La première barrière d'étanchéité est constituée par :

- le bouchon et son joint interne en élastomère,
- les 2 capuchons de raccord rapide, et leur joint élastomère, présents sur le bouchon,
- les 3 tampons primaires, et leur joint élastomère, présents sur chaque orifice latéral,
- les 3 sièges de tampon, et leur joint élastomère, présents sur chaque orifice latéral.

Deuxième barrière

La deuxième barrière d'étanchéité est constituée par :

- le couvercle et son joint interne en élastomère,
- le capuchon de raccord rapide, et son joint élastomère, présent sur le couvercle,
- les 3 opercules, et leur joint interne en élastomère, présents sur chaque orifice latéral.

2.5. Enceinte de confinement

L'enceinte de confinement est constituée par le corps épais et ses 2 barrières d'étanchéité décrites au paragraphe 2.4.

2.6. Système d'isolement

Le système d'isolement est constitué par :

- les contenus et ses caractéristiques telles que décrites au chapitre 1.3 ; en particulier la masse de métal lourd et l'enrichissement des contenus radioactifs,
- le corps épais en acier forgé et les deux barrières d'étanchéité décrits au paragraphe 2.4.

2.7. Bilan de masses

La masse maximale du colis autorisée en transport est de 82 000 kg.

La masse utilisée de façon générique dans les études de sûreté est la masse maximale du colis autorisée en transport.

3. Performances d'un point de vue mécanique

3.1. Conditions de transport de routine

Arrimage et manutention

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

La tenue des tourillons est justifiée pour des chargements statiques représentatifs des accélérations vues en transport 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 40 ans.

Tenue à la pression

La virole épaisse, son fond soudé, le bouchon et sa bride de serrage constituent une enceinte à pression dimensionnée à une pression relative de 7 bars selon les règles de calcul du code ASME Division 1 Sous-section NB. Cette pression de dimensionnement est bien supérieure aux pressions pouvant être rencontrées en conditions réglementaires de transport.

Le couvercle est justifié pour une pression relative de 3,4 bars selon les règles de calcul du code ASME Section III, Division 1, Sous-section NB.

Les autres enceintes fermées sont justifiées pour une pression de 0,1 bar relatif (pour les caissons sur le corps et sur le bouchon) ou 0,02 bar relatif (pour les caissons étanches des capots), compte tenu de la présence de soupapes de sécurité tarée au plus à ces pressions.

3.2. Conditions normales de transport

Les analyses de sûreté étudient l'épreuve réglementaire de chute libre de 30 cm de hauteur. Les autres épreuves réglementaires (gerbage, aspersion et pénétration d'une barre) ne modifient pas les performances du colis.

Endommagements

Les amortisseurs (capots, supports de jupe du corps) ne subissent pas de dégradation significative et le panier maintient sa géométrie lors de l'épreuve de chute libre.

3.3. Conditions accidentelles de transport

L'ensemble des analyses de chute est réalisé en considérant une énergie de chute correspondant à une masse totale de colis de 82 tonnes.

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

Les épreuves de chutes réalisées avec une maquette à l'échelle 1/3 représentative du modèle de colis TN® G3 sont utilisées pour démontrer le respect des exigences réglementaires du modèle de colis TN® 17 MAX.

Ensemble des chutes étudiées

Toutes les configurations possibles de chute libre de 9 mètres et de 1 mètre sur poinçon sont étudiées ; soit au total 11 chutes libres et 13 chutes sur poinçon.

Les séquences de chutes retenues pour être testées physiquement sont celles maximisant :

- les dommages possibles aux barrières d'étanchéité du système de fermeture (séquences AT, AF, OT, OC et LT définies ci-après) ou,
- les sollicitations possibles dans le système de fixation des capots de tête et de fond (séquence QH définie ci-après).

Lorsque nécessaire, des modèles numériques du colis sont construits afin de simuler les configurations de chutes à l'aide du logiciel de calcul dynamique LS-DYNA3D. Les études réalisées avec ces modèles permettent en particulier de :

- valider les configurations de chute les plus pénalisantes à réaliser sur la maquette, comprenant le choix de l'angle de chute et de la génératrice d'impact.
- valider le caractère pénalisant des géométries (jeux dans le système de fermeture...) et des matériaux de la maquette de chute.

Principe de définition de la maquette de chute

Les épreuves de chutes ont été réalisées avec une maquette pénalisante du modèle de colis TN[®] G3 à l'échelle 1/3 ; c'est-à-dire que toutes les dimensions sont réduites d'un tiers. Les emballages TN[®] 17 MAX, TN[®] JA et TN[®] G3 sont similaires en termes de designs et de matériaux. Seules les dimensions diffèrent entre le concept d'emballage TN[®] G3 et le concept des emballages TN[®] 17 MAX et TN[®] JA (le concept d'emballage TN[®] JA est néanmoins dépourvu d'ailettes de refroidissement). Les essais de chute de la maquette échelle 1/3 de l'emballage TN[®] G3 sont ainsi utilisés pour démontrer l'intégrité et le maintien de l'étanchéité du modèle des emballages TN[®] 17 MAX et TN[®] JA, suite aux épreuves mécaniques représentatives du cumul des conditions normales et accidentelles de transport.

Les règles de similitude sont appliquées afin de garantir que les contraintes mécaniques dans les composants de la maquette sont à minima les mêmes que celles dans les mêmes composants du modèle d'emballage TN[®] G3 et par similitude aux modèles d'emballage TN[®] 17 MAX et TN[®] JA. Le comportement mécanique en chute sera donc le même sur la maquette et sur le colis.

Les règles de similitudes amènent à définir une hauteur de chute corrigée pour tenir compte :

- des écarts de masse entre celle de la maquette et la masse maximale du modèle de colis TN[®] G3,
- du complément d'énergie de chute nécessaire à apporter à la maquette en raison des différences d'échelle de la hauteur écrasée des éléments amortisseurs entre la maquette et le modèle d'emballage TN[®] G3.

La maquette de chute a été fabriquée de manière à simuler le comportement le plus défavorable du modèle de colis. Ainsi :

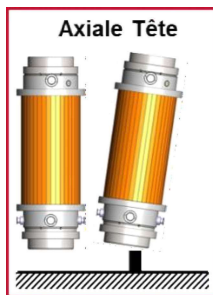
- Les matériaux amortisseurs sont caractérisés par une contrainte d'écrasement pouvant varier sur la plage permise par le modèle. Selon les configurations de chute, les amortisseurs de la maquette sont volontairement plus mous, ou plus durs que la plage autorisée par le modèle,
- Les matériaux des composants de structure dont on teste la résistance (composants constituant les deux barrières d'étanchéité par exemple) sont volontairement dégradés sur la maquette par rapport au minimum requis par le modèle.

Ainsi, le principe de similitude permet de garantir que les résultats de la maquette sont valables pour le modèle d'emballage TN[®] G3 et par similitude aux modèles d'emballage TN[®] 17 MAX et TN[®] JA.

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

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

Séquence Axiale Tête (AT)

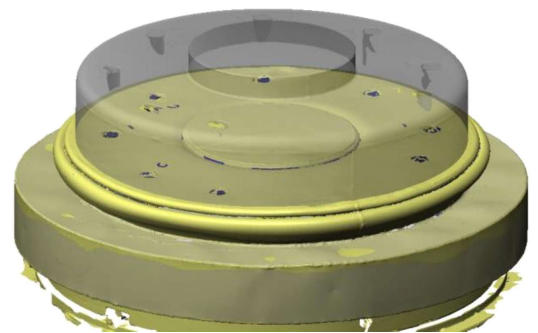


La 1^{ère} chute est une chute libre de 9,3 mètres dans l'axe du colis côté système de fermeture. Cette chute sollicite l'étanchéité des deux barrières. En particulier, cette chute a été réalisée avec l'impact différé du contenu.

La 2^{ème} chute est une chute libre sur poinçon au centre du couvercle afin de maximiser les effets de flexion et poinçonnement pouvant remettre en cause son étanchéité.

- Lors de la 1^{ère} chute : le capot amortisseur a parfaitement assuré sa fonction en s'écrasant (voir le scan 3D ci-contre présentant le capot avant et après la chute).

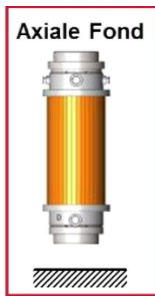
Durant cette chute, le contenu était retenu à l'opposé du système de fermeture durant la chute libre. Le contenu est venu percuter le bouchon avec un retard. Cet effet appelé « impact différé » sollicite au maximum le système de fermeture. Afin de protéger le bouchon et ses vis de cette sollicitation, un amortisseur à l'intérieur de la cavité permet d'absorber ce choc. L'efficacité de cet amortisseur a ainsi pu être validée.



- Lors de la 2^{ème} chute : le poinçon a perforé le capot écrasé par la 1^{ère} chute mais a été arrêté par la plaque anti-poinçonnement incluse dans le capot, avant tout dommage sur le couvercle (2^{ème} barrière d'étanchéité du colis).
- 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 conservent un bon niveau d'étanchéité.



Séquence Axiale Fond (AF)

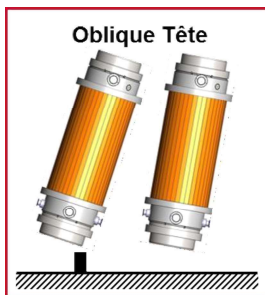


Cette chute libre de 9,3 mètres a été réalisée dans l'axe du colis côté fond. Elle sollicite le système de fermeture en flexion sous son propre poids, ainsi que d'éventuels phénomènes vibratoires.

- Lors de la chute : le capot amortisseur a parfaitement assuré sa fonction en s'écrasant (voir le scan 3D ci-contre présentant le capot après la chute).
- À la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de la maquette conservent un bon niveau d'étanchéité.



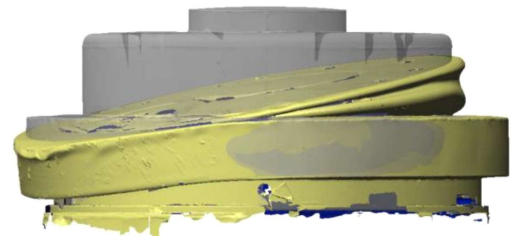
Séquence Oblique Tête (OT)



La 1^{ère} chute libre sur poinçon vise à endommager au maximum le capot amortisseur de tête qui sert lors de la chute suivante.

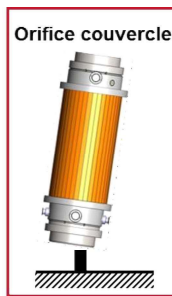
La 2^{ème} chute libre de 9,3 mètres sur le même capot endommagé sollicite le système de fermeture. Le point d'impact est aligné avec le centre de gravité afin de prévenir le basculement du colis ; toute l'énergie de chute est ainsi reprise lors de l'impact.

- Lors de la 1^{ère} chute : le poinçon a perforé le capot, puis la maquette a basculé. Ce basculement provoqué en n'alignant pas le centre de gravité et le point d'impact a pour but de maximiser les dommages sur le capot amortisseur.
- Lors de la 2^{ème} chute : le capot amortisseur a parfaitement assuré sa fonction en s'écrasant (voir le scan 3D ci-contre présentant le capot avant et après la chute).



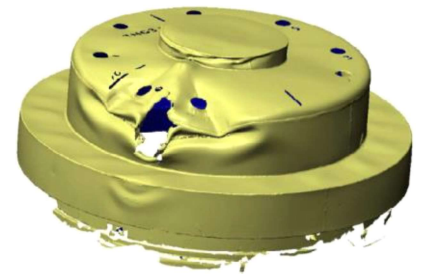
- À la fin de la séquence de chute, les mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent que les deux barrières de la maquette conservent un bon niveau d'étanchéité.

Séquence Orifice Couvercle (OC)



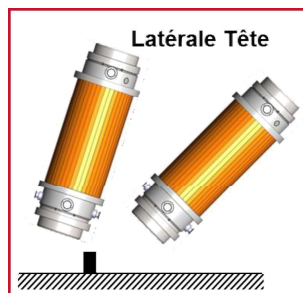
Cette chute libre sur poinçon vise à perforer la plaque anti-poinçonnement du capot de tête et endommager l'orifice présent sur le couvercle faisant partie de l'enceinte de confinement.

Lors de cette chute, le poinçon a perforé le capot et a été arrêté par la plaque anti-poinçonnement incluse dans le capot, sans la percer, empêchant ainsi tout dommage sur le couvercle et son orifice (2^{ème} barrière d'étanchéité du colis).



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 conservent un bon niveau d'étanchéité.

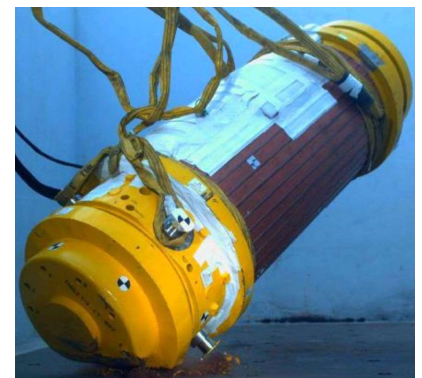
Séquence Latérale Tête (LT)



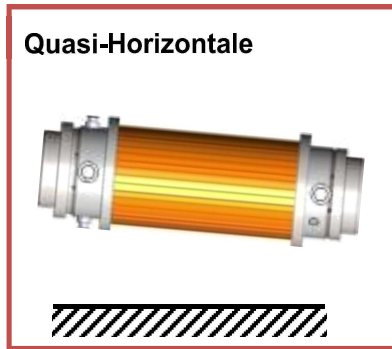
La 1^{ère} chute libre sur poinçon vise à endommager au maximum le capot amortisseur de tête qui sert lors de la chute suivante.

La 2^{ème} chute libre de 9,3 mètres sur le même capot endommagé sollicite le système de fermeture avec un angle. Le point d'impact n'étant pas aligné avec le centre de gravité, le basculement provoque un 2^{ème} impact côté fond.

- Lors de la 1^{ère} chute : le poinçon a perforé la couronne aluminium du capot (zone cerclée rouge ci-contre), puis la maquette a basculé. Les dommages sur le capot amortisseur sont ainsi maximum avant la chute suivante.
- Lors de la 2^{ème} chute : le capot amortisseur a parfaitement assuré sa fonction en s'écrasant (voir la photo ci-contre).
- Le basculement naturel de la maquette a provoqué un deuxième impact côté fond repris par le support de jupe.
- 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 conservent un bon niveau d'étanchéité.



Séquence Quasi-Horizontale (QH)



Le colis chute dans une position quasi-horizontale. Le faible angle par rapport à l'horizontale génère un premier impact sur le support de jupe côté fond.

La rotation du colis autour du point d'impact provoque un effet de fouettement augmentant les dommages lors du deuxième impact côté tête, et crée en particulier un effet d'éjection du capot de tête.

La tenue du capot de tête est indispensable pour assurer une isolation thermique du système de fermeture lors de l'épreuve réglementaire de feu.

- Après la chute (photo ci-contre), les vis de fixation du capot de tête sont restées intègres maintenant le capot solidaire du colis.
- 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 conservent un bon niveau d'étanchéité.



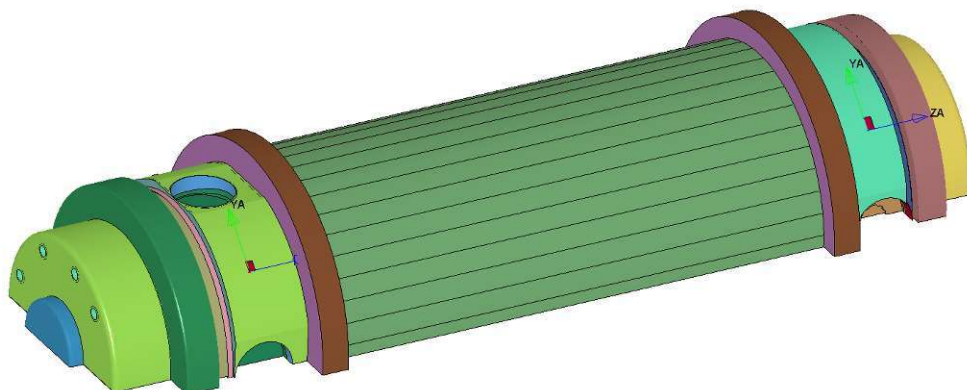
Fin de campagne de chutes

À la suite de l'ensemble des séquences de chutes décrites ci-avant, des mesures d'étanchéité normalisées par gaz traceur Hélium montrent un bon niveau d'étanchéité de la soudure du corps forgé acier de la maquette.

Modélisation numérique

La modélisation numérique (demi-modèle illustré ci-après) permet de reproduire le comportement observé sur la maquette lors de toutes les chutes libres de 9,3 m, à l'aide du logiciel de calcul dynamique LS-DYNA3D.

Cette étape de recalage du modèle permet en particulier de reproduire correctement l'accélération globale lors de la chute, la déformation des amortisseurs externes, et de majorer numériquement les efforts dans les vis du système de fermeture (bouchon et couvercle) qui ont été mesurés lors des chutes à l'aide de vis instrumentées. Dans le cas particulier de la séquence AT, le modèle reproduit également l'accélération vue par le contenu (effet de l'impact différé) et la déformation de l'amortisseur interne.



Par la suite, les principes de modélisation du modèle numérique de la maquette validés par la chute réalisée sont appliqués aux emballages TN[®] 17 MAX et TN[®] JA afin de :

- prendre en compte les différences de dimensions entre les deux concepts d'emballages TN[®] G3 et TN[®] 17 MAX,
- valider les plages de variation des composants du colis,
- dans le cas particulier des chutes AT et OT, valider la tenue du système de fermeture en tenant compte d'un impact différé du contenu,
- déterminer l'accélération maximale permettant de vérifier la tenue mécanique du panier,
- valider l'absence de risque de rupture fragile à - 40°C de la bride de serrage : l'intensité de contrainte maximale reste inférieure à la ténacité du matériau, sur la base d'un défaut normalisé. Un facteur de sécurité réglementaire de 1,4 est considéré,
- valider la tenue du système vissé des capots ; dans cet objectif des essais complémentaires réalisés sur des essais élémentaires représentatifs du système vissé des capots de la maquette et du modèle d'emballage ont permis de qualifier un critère de tenue en rupture.

Enfin, les résultats numériques confirment l'étanchéité du modèle en démontrant que le taux de compression des joints d'étanchéité après chute reste suffisant. Ces calculs couvrent toute la plage possible de température (de - 40°C aux températures maximales des conditions normales de transport) en fonction des variations possibles des propriétés des matériaux et de leur évolution au cours du temps (déformation rémanente à la compression des joints).

Suite aux épreuves réglementaires de chutes en conditions accidentelles de transport, les deux barrières des emballages TN[®] 17 MAX et TN[®] JA conservent leur étanchéité, et ce pour toutes les configurations de chute.

Un modèle numérique spécifique du panier permet d'en démontrer la résistance lors des différentes configurations de chutes, en se basant sur les accélérations déterminées par les modèles numériques du colis. Les calculs dynamiques LS-DYNA3D permettent de vérifier la non rupture (déformation inférieure à la limite à la rupture du matériau) de la structure en acier haute résistance assurant la cohésion du panier. Ces calculs couvrent toute la plage possible de température (de - 40°C aux températures maximales des conditions normales de transport) en fonction des variations possibles des propriétés des matériaux.

Les autres endommagements de l'emballage concernent principalement les éléments amortisseurs (capots et couronnes de porte jupe).

La virole et le fond sont constitués entièrement d'acier dont le risque de rupture fragile à - 40°C est écarté par la garantie de sa non-fragilité à cette température. Seule la soudure virole / fond fait l'objet d'une analyse mécanique écartant le risque de rupture fragile à - 40°C.

4. Performances d'un point de vue thermique

4.1. En conditions de transport de routine

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Les caractéristiques utilisées dans cette étude sont :

- la puissance linéique moyenne maximale définie dans la description du contenu autorisé pour l'emballage TN[®] 17 MAX,
- la puissance maximale admissible définie dans la description du contenu autorisé pour l'emballage TN[®] JA.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les principales caractéristiques des emballages TN[®] 17 MAX et TN[®] JA influant sur les études thermiques sont :

- les matériaux et la géométrie du panier,
- la présence d'hélium dans la cavité,
- la virole en acier, son épaisseur,
- les conducteurs en cuivre, leur épaisseur,
- pour l'emballage TN[®] 17 MAX (l'emballage TN[®] JA étant dépourvu d'ailettes, il n'est pas concerné), la convection entre les ailettes externes de refroidissement qui est caractérisée par un recalage sur un essai thermique sur une maquette tranche de l'emballage TN[®] G3 dont le système d'ailettes est similaire à l'emballage TN[®] 17 MAX. Cette maquette est représentative du colis à l'horizontal, c'est-à-dire dans sa position de transport.

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- la température ambiante réglementaire,
- l'ensoleillement réglementaire appliqué de manière pénalisante 24h/24h.

Méthode d'analyse

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

Les principales hypothèses et simplifications du modèle sont :

- Un quart de modèle est réalisé compte tenu de la symétrie du modèle de colis.
- La puissance des assemblages combustibles est directement appliquée sur les parois des logements. Le profil de puissance thermique des assemblages combustibles est pris en compte. Le calcul de la température des crayons des assemblages est réalisé par un modèle spécifique tenant compte des températures dans la section la plus chaude du colis (à mi-longueur) et des propriétés d'émissivité des gaines et des parois de panier.
- Le panier se dilate plus que le corps sous l'effet de la température, ce qui a tendance à réduire le jeu radial de montage du panier dans la cavité. Cette réduction du jeu est favorable pour l'évacuation de la puissance. Par un calcul itératif, le jeu à chaud est déterminé en considérant le jeu à froid le plus grand.
- Pour l'emballage TN[®] 17 MAX (l'emballage TN[®] JA étant dépourvu d'ailettes, il n'est pas concerné), les ailettes externes favorisant le refroidissement du colis ne sont pas représentées. Le modèle tient compte des ailettes par l'intermédiaire d'un coefficient d'échange convectif calculé à partir d'un essai thermique réalisé sur une tranche d'emballage.

Les différentes positions des assemblages combustibles et du panier dans la cavité pouvant conduire à majorer les températures des composants sensibles de l'emballage (joints de confinement et résine) sont analysées.

Résultats de l'étude

Le champ de températures dans le colis est utilisé dans les différentes parties du dossier de sûreté.

La température des composants sensibles à la température sont compatibles avec leur critère d'intégrité, en particulier :

- les joints d'étanchéité : la température maximale des joints permet de justifier le non-endommagement des joints sur un nombre de cycles de transport compatible avec la fréquence de remplacement en maintenance (voir paragraphe 9). Par ailleurs, la dilatation du joint dans sa gorge vérifie un taux de remplissage inférieur à 100 %,
- la résine neutrophage : la température maximale de la résine reste inférieure à sa limite d'utilisation.

4.2. 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. En conditions accidentelles de transport

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les calculs tiennent compte des endommagements suivants :

- perforation d'un caisson de résine du corps suite à une chute sur poinçon au droit de l'orifice,
- la mousse dans les capots amortisseurs n'est pas prise en compte ; seules la plaque anti-poinçonnement, la virole d'emboîtement et la couronne aluminium des capots sont modélisées ; la plaque anti-poinçonnement est modélisée au plus près du corps de l'emballage,
- le compartiment amortisseur du bouchon est considéré écrasé,
- dispersion d'un pourcentage de matière combustible en tête des assemblages.

Pour le refroidissement après feu, le colis est considéré en position la plus pénalisante, c'est-à-dire en position verticale. Pour l'emballage TN[®] 17 MAX, l'échange convectif dans la zone ailetée a été caractérisé par des essais thermiques sur une maquette plaque représentative (l'emballage TN[®] JA étant dépourvu d'ailettes, il n'est pas concerné).

Hypothèses importantes pour l'étude

La principale hypothèse utilisée consiste en l'application d'une température ambiante de 800°C pendant 30 minutes autour du colis conformément à la réglementation.

Méthode d'analyse

Cette étude a été réalisée avec le code de calcul I-DEAS/TMG avec le même modèle qu'en conditions de transport de routine.

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

- A. Le champ de température initial du colis est celui des conditions de transport de routine ayant conduit aux températures les plus élevées concernant les joints d'étanchéité du colis.
- B. Pendant la période réglementaire de 30 minutes, le feu est simulé par :
 - a. une température ambiante réglementaire de 800°C.
 - b. un coefficient d'échange convectif sur toutes les surfaces autre que la zone ailetée de l'emballage TN[®] 17 MAX, égal au coefficient recommandé par la réglementation de 10 W/m²/K représentatif d'une convection forcée dans un incendie englobant augmenté par l'accroissement de surface totale des ailettes. Dans la zone ailetée de l'emballage TN[®] 17 MAX, ce coefficient est augmenté par l'accroissement de surface totale des ailettes.
 - c. L'émissivité des flammes de 0,9 et l'émissivité des surfaces externes de 0,8 conformément à la réglementation.

C. Après feu,

- a. Pour l'emballage TN[®] 17 MAX (l'emballage TN[®] JA étant dépourvu d'ailettes, il n'est pas concerné), le coefficient d'échange convectif dans la zone ailetée est celui de la convection naturelle du colis en position verticale (position plus pénalisante pour la convection). Ce coefficient est issu d'un recalage sur un essai thermique.
- b. L'émissivité des surfaces externes reste à 0,8.

La position des assemblages combustibles et du panier dans la cavité conduisant à majorer la température des composants sensibles de l'emballage (joints de confinement et résine) est étudiée.

Résultats de l'étude

L'exposition des joints à :

- 1 an en continu à la température maximale obtenue en conditions de transport de routine et conditions normales de transport,
- puis 7 jours au profil de température le plus pénalisant obtenu en conditions accidentelles de transport (supposée constante sur 7 jours de manière pénalisante),

conduit à des endommagements cumulés très inférieurs à 1.

Enfin, les taux de remplissage des joints aux températures maximales en conditions accidentelles de transport sont inférieurs à 100 %.

5. Performances d'un point de vue confinement

L'analyse de confinement du modèle de colis TN[®] 17 MAX inclut le cas du colis contenant des assemblages combustibles mais aussi le cas du colis vide d'assemblage. 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 de :

- la perméation des gaz tritium et krypton à travers les joints élastomère,
- les fuites de gaz radioactif,
- les fuites de particules aérosols radioactives.

5.1. Conditions de transport de routine

En Conditions de Transport de Routine, la pression d'utilisation normale maximale est négative ce qui prévient toute fuite vers l'extérieur.

5.2. En conditions normales de transport

Paramètres du contenu importants pour l'étude

La quantité et l'activité des radioéléments sont déterminées sur la base des caractéristiques du combustible suivantes :

	Contenu n°1.1	Contenu n°1.2	
Combustible	UO ₂	UO ₂	MOX
Taux de combustion moyen	9 ⁽²⁾ × 60 GWj/t _U	6 ⁽²⁾ × 60 GWj/t _U	3 ⁽²⁾ × 60 GWj/t _{ML}
Durée de refroidissement	360 jours	360 jours	730 jours

⁽²⁾ Nombre d'assemblages

	Contenu n°2				
	Cas n°1	Cas n°2	Cas n°3	Cas n°4	Cas n°5
Combustible	UOX type 1	MOX type 1	UOX type 2	MOX type 2	MOX type 3
Taux de combustion moyen maximal (GWj/t _{ML})	32 ⁽²⁾ × 20	32 ⁽²⁾ × 20	32 ⁽²⁾ × 30	32 ⁽²⁾ × 35	32 ⁽²⁾ × 35
Temps de refroidissement minimal (année)	18,25	18,25	18,25	26	26

⁽²⁾ Nombre d'assemblages

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les principales caractéristiques utilisées sont les suivantes :

- les taux de fuite maximaux de chacune des barrières d'étanchéité vérifiés avant expédition,
- la pression maximale de remplissage du colis définie dans les conditions d'utilisation,
- les températures maximales des gaz et des joints issues de l'analyse thermique,
- le volume libre dans la cavité,
- la nature et la géométrie des joints des barrières d'étanchéité qui impactent les fuites par perméation.

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- le taux de crayons ruptés en conditions normales de transport est de 5 %,
- le taux de relâchement des gaz de fission (dit « RGF ») est spécifique aux contenus autorisés,
- la pression externe est de 0,85 bar pour l'emballage TN[®] 17 MAX ; cette pression limite le transport à une altitude de 1 000 m par rapport au niveau de la mer,

- la pression externe est la pression réglementaire (soit 0,60 bar) pour l'emballage TN[®] JA,
- la durée de transport considérée est de :
 - 9 mois (275 jours) pour les contenus 1.1 et 1.2,
 - 1 an pour le contenu 2.

Méthode de calcul

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

- A. La phase de rentrée d'air : pendant la durée de transport, la pression atmosphérique est supposée majorante (1,04 bar absolu). Le colis étant en dépression, le flux de fuite se fait de l'extérieur vers l'intérieur, et augmente la pression dans la cavité. Il n'y a pas de relâchement d'activité pendant cette phase.
- B. La phase de relâchement d'activité : à la fin de la période de transport, la pression atmosphérique chute brutalement à 0,85 bar pour l'emballage TN[®] 17 MAX et à 0,60 bar pour l'emballage TN[®] JA. Cette fois, le flux de fuite se fait de l'intérieur vers l'extérieur. Le relâchement d'activité reste inférieur au critère réglementaire de 10^{-6} A₂/h.

Résultats de l'étude

Le critère réglementaire est respecté.

5.3. En conditions accidentelles de transport

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

- le taux de crayons ruptés en conditions accidentelles de transport est de 100 %,
- les températures maximales des gaz et des joints sont issues des calculs thermiques en conditions accidentelles de feu (paragraphe 0).

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 des débits d'équivalent de dose

Les critères retenus de débit d'équivalent de dose couvrant les conditions réglementaires de transport du modèle de colis TN[®] 17 MAX sont les suivants :

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

6.1. En conditions de transport de routine

Paramètres du contenu importants pour l'étude du contenu n°1

Les sources de rayonnement du contenu radioactif maximal sont limitées par la définition d'un système d'inéquations présenté dans la définition du contenu.

Pour les critères réglementaires à 2 mètres du colis, l'étude d'un chargement typique est réalisée avec les principales caractéristiques combustibles suivantes :

Historique d'irradiation	Contenu n°1.1	Contenu n°1.2
Combustible	UO ₂	UO ₂ et MOX
Taux de combustion moyen	9 ⁽²⁾ × 60 GWj/t _U	4 ⁽²⁾ × 55 GWj/t _U (UO ₂) 2 ⁽²⁾ × 60 GWj/t _U (UO ₂) 3 ⁽²⁾ × 60 GWj/t _{ML} (MOX)
Durée de refroidissement	1460 jours	1460 jours

⁽²⁾ Nombre d'assemblages

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

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

Paramètres du contenu importants pour l'étude du contenu n°2

Le contenu n°2 est composé :

- d'un mélange d'au maximum 2 assemblages irradiés constitué d'assemblages à oxyde mixte d'uranium et de plutonium MOX type 1 ou MOX type 2 ou MOX type 3 ou d'assemblage à oxyde d'uranium UOX type 1 ou UOX type 2 dans les logements centraux,
- et d'un mélange d'au maximum 30 assemblages irradiés constitué d'assemblages à oxyde mixte d'uranium et de plutonium MOX type 1 ou d'assemblage à oxyde d'uranium UOX type 1 ou UOX type 2 dans les autres logements.

Les caractéristiques maximales des assemblages sont les suivantes :

	Contenu n°2				
	UOX		MOX		
	Type 1	Type 2	Type 1	Type 2	Type 3 ⁽¹⁾
Combustible	UO ₂	UO ₂	(U-PU)O ₂	(U-PU)O ₂	UO ₂ (U-PU)O ₂
Taux de combustion moyen maximal (GWj/t _{ML})	20	30	20	35	35
Temps de refroidissement minimal (année)	18,25	18,25	18,25	26	26

⁽¹⁾ Les assemblages MOX type 3 contiennent quelques crayons à oxyde d'uranium (UOX).

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

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

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

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

Le blindage radial est principalement formé par :

- les lunules en acier du panier,
- la virole épaisse en acier,
- une couche de résine de blindage neutronique, traversée par des conducteurs en cuivre,
- une enveloppe externe constituée de plaques de cuivre.

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

- la virole épaisse en acier dont l'épaisseur est localement réduite au niveau du système de fermeture et sous les tourillons,
- des caissons de résine protégés par les tôles de fermeture en acier,
- des tourillons contenant un bloc de résine et leur couronne de résine protégée par une tôle d'acier recouvrant les têtes de vis,
- des bouchons de blindage constitués de compartiments cylindriques de résine fermés par des tôles en acier.

Le blindage axial en tête est principalement constitué par :

- les parties massives en acier du système de fermeture (bouchon, bride de serrage, couvercle) et la plaque anti-poinçonnement contenue dans le capot de tête,
- la couche de blindage supplémentaire contenue dans le bouchon,
- la couche de résine contenue dans le bouchon et sa tôle de fermeture en acier.
- Le blindage axial en fond est principalement constitué par :
 - le fond forgé de la virole,
 - une couche de résine et sa tôle de fermeture en acier.

Hypothèses importantes pour l'étude

Dans cette étude, l'effet du vieillissement de la résine a été pris en compte sur une durée d'utilisation de l'emballage de 10 ans en continu (chargement de la puissance maximale dans l'emballage pendant 10 ans).

Méthode de calcul

Les calculs de débits d'équivalent de dose pour le contenu n°1 ont été menés à l'aide du code TRIPOLI 4.4. Il permet de résoudre l'équation du transport des particules dans une géométrie à trois dimensions par la méthode de Monte Carlo. La bibliothèque des sections efficaces utilisée est ENDF/B-VI.

Les calculs de débits d'équivalent de dose pour le contenu n°2 ont été menés à l'aide du code TRIPOLI 4.7. Il permet de résoudre l'équation du transport des particules dans une géométrie à trois dimensions par la méthode de Monte Carlo. La bibliothèque des sections efficaces utilisée est CEA V5.

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

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

Résultats de l'étude

Pour le contenu n°1, le respect des critères de débit d'équivalent de dose en conditions de transport de routine est garanti au contact, pour le contenu radioactif maximal prévu pour le colis qui est défini par des inéquations de transport caractérisant les termes sources neutrons et gamma acceptables.

Pour le contenu n°2, le respect des critères de débit d'équivalent de dose en conditions de transport de routine est garanti au contact et à 2m, pour le contenu radioactif maximal prévu pour le colis.

6.2. En conditions normales de transport

En conditions de transport de routine, les débits d'équivalents de doses au contact du colis en axial tête et fond sont très faibles au regard du critère réglementaire. Suite aux épreuves des conditions normales de transport, les débits d'équivalents de dose au contact des capots restent toujours faibles.

Suite aux épreuves des conditions normales de transport, l'extrémité du support de jupe est légèrement endommagée. Il est vérifié que l'augmentation du débit d'équivalent de dose au contact de l'extrémité du support de jupe, affecté par les dommages des chutes en CNT, n'augmente pas significativement ; en l'occurrence il est vérifié que cette augmentation reste inférieure à 20 %.

Il n'y a donc pas d'augmentation notable des débits d'équivalent de dose à la surface du colis à l'issue des conditions normales de transport.

Le critère réglementaire de débit de dose en conditions normales de transport est donc respecté.

6.3. En conditions accidentelles de transport

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les calculs tiennent compte des endommagements suivants :

- disparition de la moitié de l'épaisseur de résine (hors tourillon et bouchon),
- disparition de 100 % de la résine des tourillons et du bouchon,
- disparition de la totalité de la mousse des capots.

Résultats de l'étude

Pour le contenu n°1, il est justifié que le contenu radioactif maximal prévu pour le colis défini par les inéquations respecte le critère réglementaire de débit d'équivalent de dose à 1 m en conditions accidentelles de transport.

Pour le contenu n°2, le respect du critère réglementaire de débit de dose en conditions accidentelles de transport est garanti à 1m pour le contenu radioactif maximal prévu pour le colis (les caractéristiques maximales des assemblages sont données au §0).

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

La sûreté-criticité du modèle de colis TN[®] 17 MAX doit être assurée, suivant la réglementation pour :

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

Les transports étant réalisés à sec, les conditions de transport de routine et conditions normales de transport sont couvertes par une seule configuration du colis en conditions accidentelles de transport en considérant le contenu ruiné.

Les critères de sous-criticité retenus sont les suivants :

- $k_{\text{eff}} \leq 0,95$ pour le colis isolé ; toutes incertitudes comprises,
- $k_{\text{eff}} \leq 0,98$ pour le colis en réseau ; toutes incertitudes comprises.

7.1. Colis isolé

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Dans cette étude, les assemblages combustibles sont considérés comme ruinés, c'est-à-dire que seul le combustible est modélisé dans la configuration géométrique la plus pénalisante (sous forme d'une sphère).

La matière est considérée hétérogène et non irradiée pour majorer la réactivité du colis.

L'enrichissement et la masse de métal lourd sont les principales caractéristiques du combustible importantes pour cette étude.

L'enrichissement maximal initial avant irradiation en ²³⁵U et la teneur maximale en plutonium fissile sont prises en compte.

L'étude est réalisée à partir :

- du contenu 1.1 constitué de 9 assemblages combustibles UO₂,
- du contenu 1.2 constitué de 6 assemblages combustibles UO₂ et de 3 assemblages combustibles MOX,
- du contenu n°2 composé :
 - d'un mélange d'au maximum 2 assemblages constitué d'assemblages à oxyde mixte d'uranium et de plutonium MOX type 1 ou MOX type 2 ou MOX type 3 ou d'assemblage à oxyde d'uranium UOX type 1 ou UOX type 2,
 - d'un mélange d'au maximum 30 assemblages constitué d'assemblages à oxyde mixte d'uranium et de plutonium MOX type 1 ou d'assemblage à oxyde d'uranium UOX type 1 ou UOX type 2.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les matériaux de structure de l'emballage et de l'aménagement interne ne sont pas pris en compte. La matière est entourée de 200 mm d'eau.

Hypothèses importantes pour l'étude

Les modèles d'emballage TN[®] 17 MAX et TN[®] JA sont constitués d'une double barrière d'étanchéité réputée étanche à l'issue des épreuves réglementaires, dont les contrôles avant transport pour vérifier la bonne fermeture, le séchage et l'étanchéité sont renforcés pour se prémunir de l'erreur humaine, et qui permet ainsi de considérer une introduction partielle d'eau dans la cavité conformément au paragraphe 680 du règlement de l'AIEA <1>.

La quantité maximale d'eau présente dans le colis prend en compte les origines suivantes :

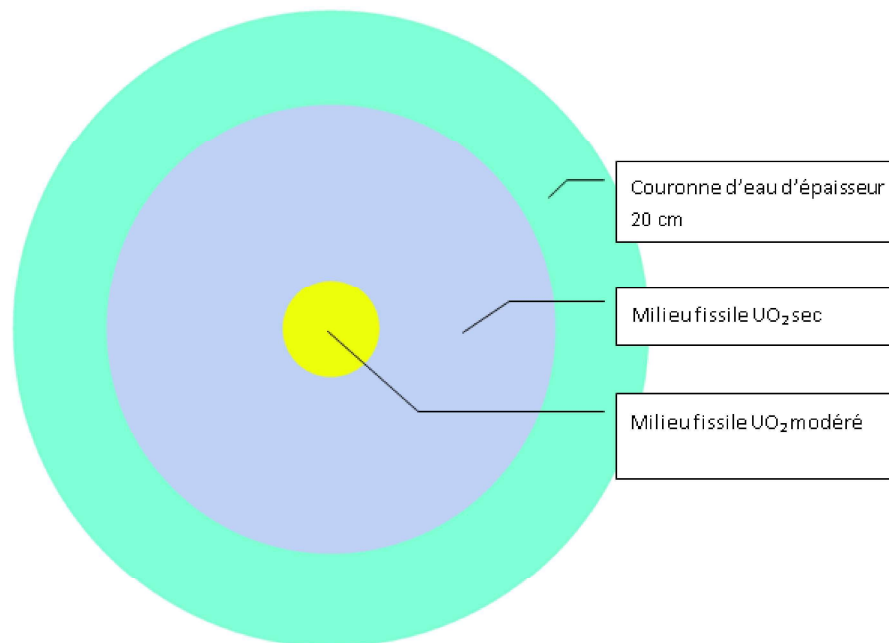
- la quantité d'eau susceptible de pénétrer lors d'une immersion sous une hauteur d'eau de 15 m pendant 8 heures à l'issue des épreuves réglementaires des conditions normales de transport,
- la quantité d'eau susceptible de pénétrer lors d'une immersion sous une hauteur d'eau de 0,9 m pendant une période de 8h étendue à 1 semaine dans le cas de l'emballage TN[®] 17 MAX à l'issue des épreuves réglementaires des conditions accidentelles de transport,
- la quantité d'eau potentiellement présente après le séchage de la cavité à une pression maximale de 10 mbar,
- la quantité d'eau contenue dans l'hydrate de bore issue de l'eau de piscine au moment du chargement.

Méthode de calcul pour le contenu n°1

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

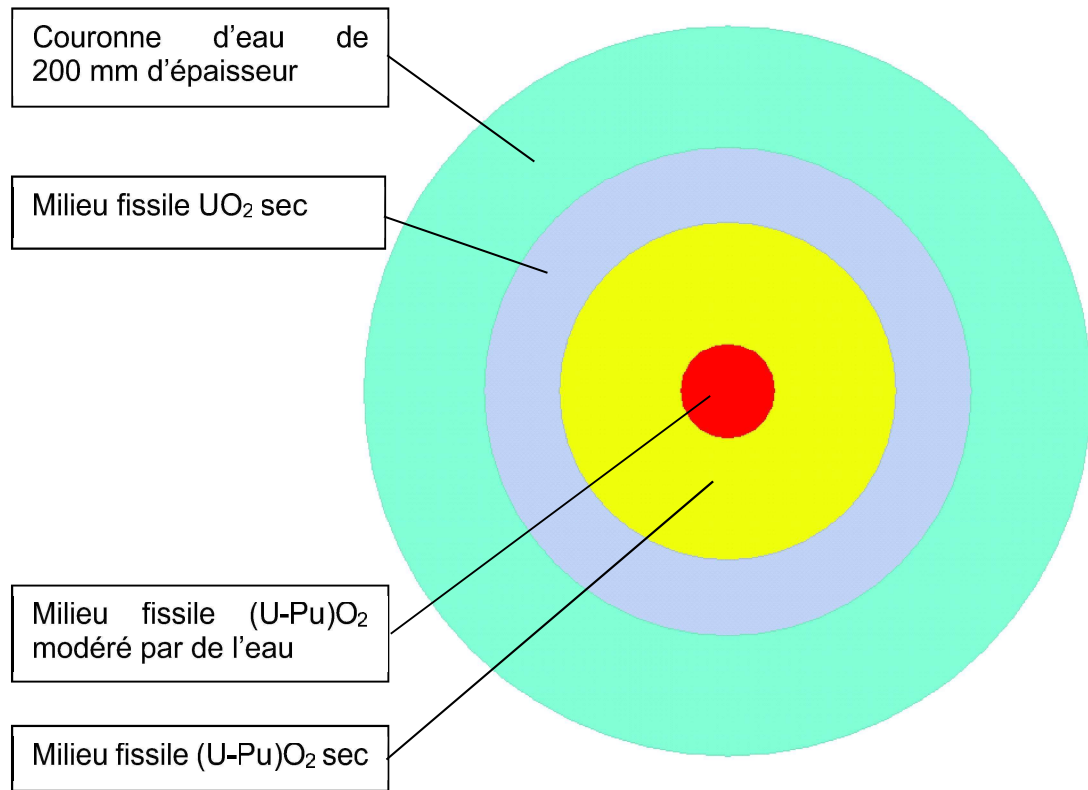
Le modèle du contenu n°1.1 illustré sur la figure ci-après se traduit de la manière suivante (de l'intérieur vers l'extérieur) :

- mélange hétérogène UO_2 + eau (réseau de fragments de sphérules de rayons variables),
- milieu fissile UO_2 sec sous forme de sphère,
- eau de 200 mm d'épaisseur.



Le modèle du contenu n°1.2 illustré sur la figure ci-après se traduit de la manière suivante (de l'intérieur vers l'extérieur) :

- mélange hétérogène $(\text{U-Pu})\text{O}_2$ + eau (réseau de fragments de sphérules de rayons variables),
- milieu fissile $(\text{U-Pu})\text{O}_2$ sec sous forme de sphère,
- milieu fissile UO_2 sec sous forme de sphère,
- eau de 200 mm d'épaisseur.

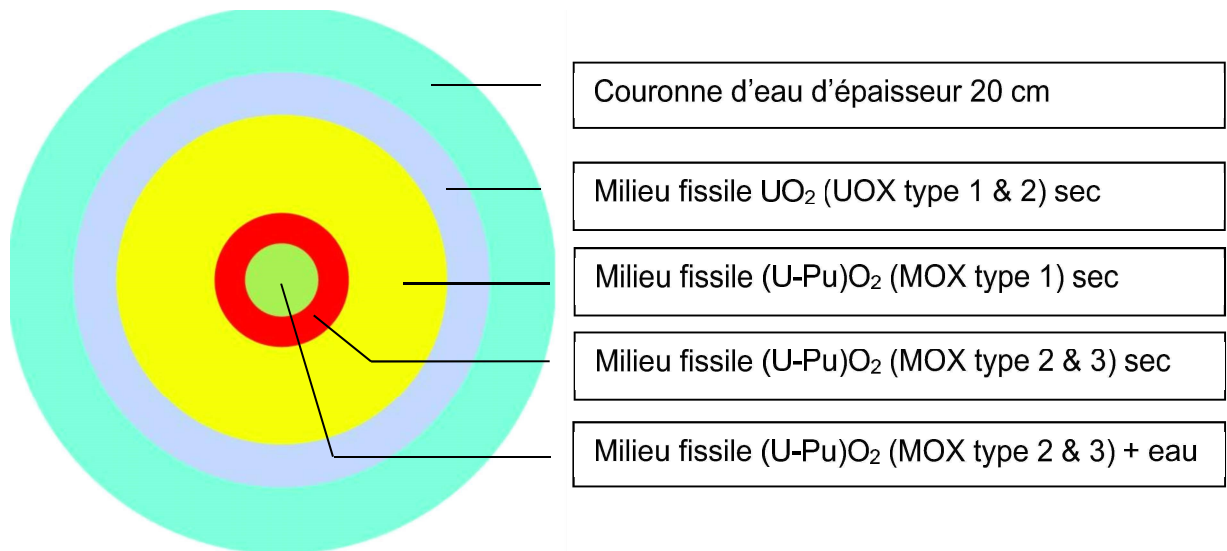


Méthode de calcul pour le contenu n°2

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

Le modèle du contenu n°2 illustré sur la figure ci-après se traduit de la manière suivante (de l'intérieur vers l'extérieur) :

- mélange hétérogène $(\text{U-Pu})\text{O}_2$ représentatif des assemblages MOX type 2 & 3 + eau (réseau de fragments de sphérules de rayons variables),
- milieu fissile $(\text{U-Pu})\text{O}_2$ représentatif des assemblages MOX type 2 & 3 sec sous forme de sphère,
- milieu fissile $(\text{U-Pu})\text{O}_2$ représentatif des assemblages MOX type 1 sec sous forme de sphère,
- milieu fissile UO_2 représentatif des assemblages UOX type 1 & 2 sec sous forme de sphère,
- eau de 200 mm d'épaisseur.



Résultats de l'étude

La réactivité maximale du colis est obtenue pour une quantité d'eau supérieure à la quantité d'eau susceptible d'être présente dans le colis.

Ainsi, la sous-criticité du colis isolé en transport est assurée.

7.2. Réseau de colis

Les emballages TN[®] 17 MAX et TN[®] JA sont constitués d'une virole épaisse en acier (épaisseur supérieure à 200 mm) qui isole neutroniquement son contenu. Ainsi, le respect du critère de $k_{\text{eff}} \leq 0,95$ pour le colis isolé (toutes incertitudes comprises) permet d'assurer le respect du critère réglementaire pour un réseau infini de colis.

Ainsi, l'indice de sûreté criticité vaut $\text{CSI} = 0$.

8. Conditions d'utilisation

Les emballages TN[®] 17 MAX et TN[®] JA sont conçus pour être chargés et déchargés verticalement sous eau (cas de l'immersion en piscine) ou à sec (cas de l'accostage sous cellule).

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

- Les combustibles chargés doivent respecter l'ensemble des caractéristiques techniques définies par le contenu autorisé,
- Le drainage et séchage de la cavité,
- Le remplissage en hélium de la cavité à une pression maximale définie,
- La bonne fermeture (couple de serrage des vis) et le niveau d'étanchéité (taux de fuite) de tous les composants constituant les deux barrières d'étanchéité,
- L'ensemble des opérations effectuées pour vérifier le séchage de la cavité, la fermeture de la cavité et le niveau d'étanchéité du colis doit être contrôlé par une personne différente de celle qui les a réalisés afin de vérifier la conformité au respect des exigences,

- La mise en place des scellés,
- La vérification de la non-contamination de l'emballage en conformité avec les limites réglementaires,
- Le contrôle des débits d'équivalent de dose autour du colis en conformité avec les limites réglementaires,
- Si, à la fois, l'emballage contient au moins un assemblage de combustible usé et le transport est effectué sans barrière thermique, le contrôle des surfaces accessibles en conformité avec la limite réglementaire de 85 °C,
- La mise en place de l'étiquetage réglementaire,
- La vérification de la présence d'un système de neutralisation des oreilles de levage des capots.

9. Programme d'entretien périodique

Les emballages TN[®] 17 MAX et TN[®] JA sont conçus pour une durée de vie d'au moins 40 ans. Le programme d'entretien prévu au cours de l'utilisation de l'emballage est défini en fonction de deux types de périodicités suivant les composants importants pour la sûreté : le nombre de cycles de transport réalisés et la durée d'utilisation.

Le programme d'entretien comprend notamment :

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

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

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

10. Programme d'assurance qualité

Les réglementations de transport en vigueur font obligation d'appliquer des programmes d'assurance de la qualité pour :

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

des colis de matières radioactives.

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

11. Référence

<1> Règlement de transport des matières radioactives, Agence Internationale de l'Énergie Atomique – Prescriptions, SSR-6, Édition 2018.

Les règles de conception et d'épreuves de l'édition 2018 du Règlement de l'AIEA englobent celles des règlements applicables suivants :

- Accord relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (ADR),
- Règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses (RID),
- Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voies de navigations intérieures (ADN),
- Code maritime international des marchandises dangereuses (code IMDG de l'OMI),
- Arrêté du 29 mai 2009 modifié, relatif aux transports de marchandises dangereuses par voies terrestres (arrêté TMD),
- Arrêté du 23 novembre 1987 modifié, relatif à la sécurité des navires, division 411 du règlement annexé (arrêté RSN).