

<b>Orano NPS</b> <b>DOSSIER DE SURETE</b>  <b>TN® 24 SH</b>	<b>Diffusion limitée Orano - Autorités - Utilisateurs</b>			 <b>orano</b>
	<b>CHAPITRE 00-3</b>			
	Préparation	Date	Signature	
	Vérification	Date	Signature	
<b>Identification :</b>		<b>DOS-21-002898-004</b>	<b>Vers. 3.0</b>	<b>Page 1 / 31</b>

## CARACTERISTIQUES DE PERFORMANCES DU COLIS

### Sommaire

État des révisions	2
1. OBJET	3
2. DESCRIPTIONS ET DEFINITIONS	3
3. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE MECANIQUE	7
4. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE THERMIQUE	20
5. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE CONFINEMENT	23
6. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE RADIOPROTECTION	24
7. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE SÛRETE-CRITICITE	27
8. CONDITIONS D'UTILISATION DE L'EMBALLAGE TN® 24 SH	30
9. PROGRAMME D'ENTRETIEN PERIODIQUE	30
10. PROGRAMME D'ASSURANCE QUALITE	31
11. REFERENCES	31

**État des révisions**

Version	Date	Objet et historique des révisions	Préparé par / Vérifié par
Ancienne référence : DOS-10-00011017-004-02			
00	03/2017	Création du document	
01	04/2017	Corrections mineures	
02	05/2017	Mise à jour du document suite à la révision des analyses de radioprotection	
Nouvelle référence : DOS-21-002898-004			
1.0	09/2021	Mise à jour du document suite à la révision des chapitres Mise à jour de la réglementation applicable	
2.0	11/2021	Modification de la description des contenus Suppression figure §.3.3	
3.0	Voir 1 <sup>ère</sup> page	Intégration du critère de transport sous utilisation exclusive au contact du colis dans les analyses de radioprotection en conditions de transport de routine	

## 1. OBJET

L'objet de ce chapitre est de décrire les caractéristiques de performances du modèle de colis TN<sup>®</sup> 24 SH (concept standard et concept option 1), destiné au transport par voie routière, ferroviaire ou maritime d'assemblages combustibles irradiés de type 14 × 14, ou de crayons inétanches issus de combustibles irradiés de type 14 × 14 encapsulés, en tant que colis de type B(U) contenant des matières fissiles au regard de la réglementation <1>.

## 2. DESCRIPTIONS ET DEFINITIONS

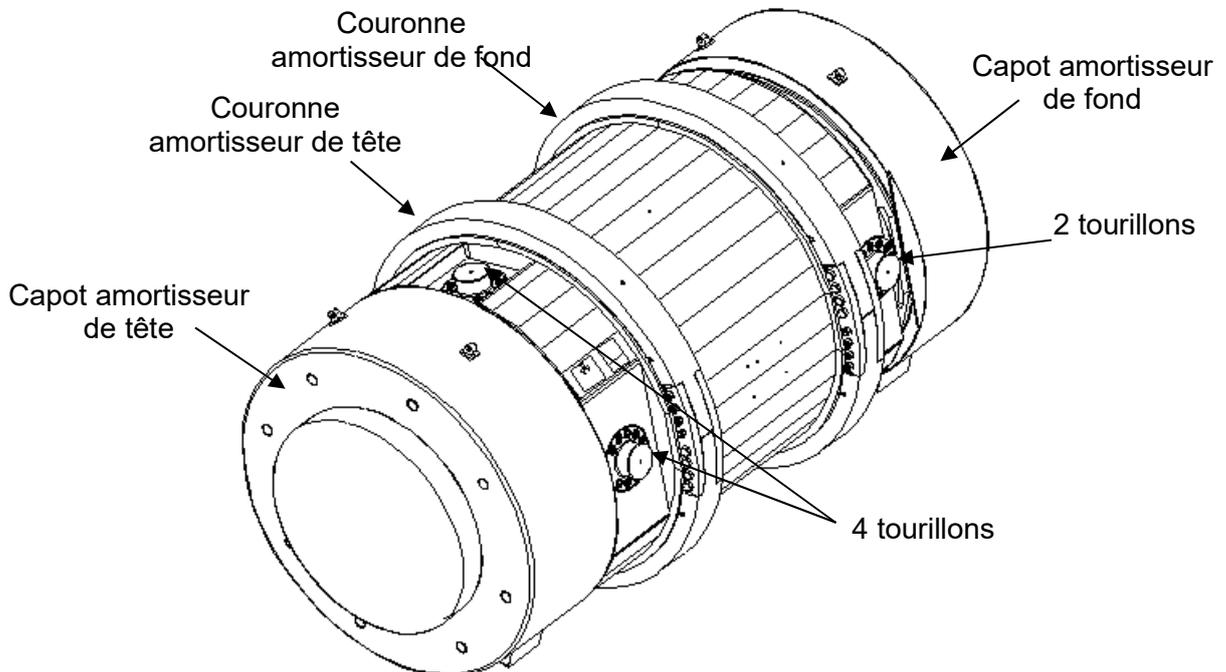
### 2.1. Description du colis

Le combustible nucléaire irradié issu du fonctionnement des réacteurs civils de puissance à eau légère pressurisée est constitué à partir de crayons de combustible assemblés en réseau. Le colis TN<sup>®</sup> 24 SH permet de réaliser le transport et le stockage intermédiaire de ces assemblages combustibles irradiés de type 14 × 14.

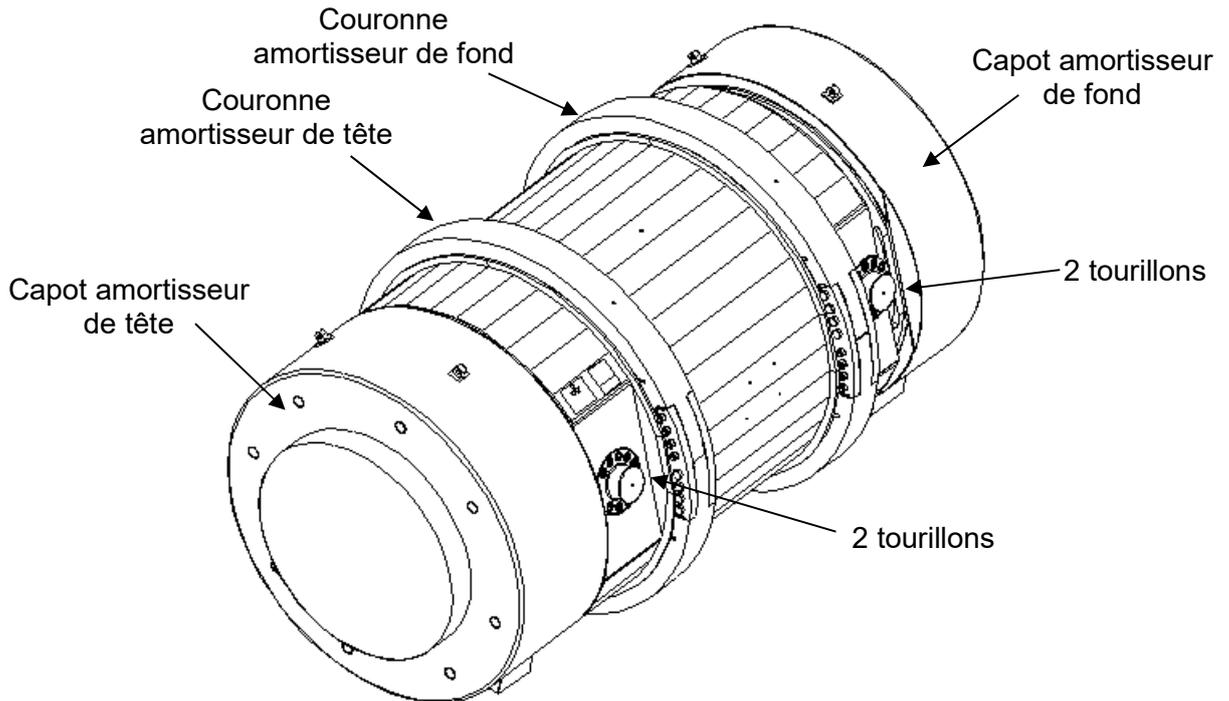
Le concept d'emballage TN<sup>®</sup> 24 SH autorise deux versions se distinguant par leur nombre de tourillons : le concept standard et le concept option 1. Dans le cas de l'option 1, en comparaison avec la version standard, les deux tourillons redondants côté tête de l'emballage et les plaques de plomb adjacentes sont supprimés et remplacés par une continuité dans ces zones de l'habillage externe (résine, acier et conducteurs en cuivre).

De forme générale cylindrique, le colis est illustré sur les figures ci-après tel que présenté au transport en position horizontale.

#### Concept d'emballage TN<sup>®</sup> 24 SH standard



### Concept d'emballage TN<sup>®</sup> 24 SH option 1



Les dimensions générales hors-tout du colis sont :

- Longueur : 5 288 mm (y compris les capots de transport).
- Diamètre : 2 990 mm (y compris les amortisseurs de chocs en aluminium).

Le colis TN<sup>®</sup> 24 SH est transportable par voie terrestre (routier ou ferroviaire), maritime ou fluviale.

## 2.2. Description de l'emballage

Les principaux composants de l'emballage sont :

- Un corps constitué par :
  - Une virole en acier forgé et un fond en acier forgé soudé à la virole.
  - Des tourillons fixés sur la virole et utilisés pour la manutention, le basculement et l'arrimage. Le concept standard comporte six tourillons (quatre en partie haute et deux en partie basse) alors que l'option 1 en comporte quatre (deux en partie haute et deux en partie basse).
  - Une protection neutronique (résine) entourant radialement l'emballage en partie courante recouverte par une enveloppe externe en acier et intégrant des conducteurs thermiques en cuivre. Au niveau de chaque tourillon, la protection neutronique et gamma est complétée par une plaque de plomb.
- 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. Cet orifice est fermé par un tampon muni d'un joint d'étanchéité métallique et maintenu sur le couvercle par un anneau de serrage, doublé par une tape d'orifice maintenue par des vis et munie de joints d'étanchéité métalliques. Le couvercle primaire est équipé d'une protection neutronique (résine) en partie supérieure, confinée 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. Cet orifice est obturé par une tôle munie de deux joints d'étanchéité en élastomère.
- Des protections anti-chocs constituées par :
  - Pour la protection radiale : Deux couronnes en aluminium constituées chacune de deux demi-couronnes assemblées et montées sur des supports en acier. Les couronnes se logent entre deux butées en acier situées sur toute la circonférence, encastrées et soudées dans l'enveloppe externe et empêchant le déplacement longitudinal de celles-ci.
  - Pour la protection axiale : Deux capots amortisseurs (en tête et en fond) assurant la protection mécanique et thermique du colis en conditions normales et accidentelles de transport.

### 2.3. Description du contenu

Le contenu est constitué de l'aménagement interne (panier) et des assemblages combustibles, ou des crayons inétanches encapsulés et placés dans un canister, à transporter.

Les différents types de panier sont formés par un empilement de profilés en aluminium enrichi au bore, de quatre lunules en acier inoxydable fermant les logements périphériques du panier et de quatre plaques de coins en aluminium, le tout étant assemblé de manière à former 37 logements.

#### Description des paniers de type 1, 2 et 3

Pour les paniers de type 1, 2 et 3, les profilés sont constitués d'aluminium boré et sont renforcés par deux plaques en acier inoxydable fixées de chaque côté de l'âme du profilé.

Les paniers de type 1, 2 et 3 se distinguent par la teneur en bore dans les profilés ainsi que par l'épaisseur des plaques de renfort en acier inoxydable. Ils sont constitués de l'empilement de 34 ou 35 niveaux de profilés (suivant la direction).

#### Description des paniers de type 4 et 5

Pour les paniers de type 4 et 5, les profilés sont constitués de deux plats en Boron MMC séparés par des entretoises et de deux plats de renforcement en acier inoxydable placés de part et d'autre des entretoises.

Les paniers de type 4 et 5 se distinguent par la teneur en bore dans les profilés. Ils sont constitués de l'empilement de 19 ou 20 niveaux de profilés (suivant la direction).

#### Contenu radioactif autorisé

Le contenu radioactif autorisé est constitué :

- Soit de 28 à 37 assemblages combustibles REP de type 14 × 14, où seuls les logements centraux peuvent être vides (contenus n°1, 2, 3 et 4).
- Soit de 36 assemblages combustibles REP de type 14 × 14 et d'une capsule canister pouvant contenir jusqu'à 35 crayons combustibles défectueux encapsulés (contenu n°5).
- Soit de 28 assemblages combustibles REP de type 14 × 14 (contenu n°6).

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

- La géométrie de l'assemblage.

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

	Contenu n°1	Contenu n°2	Contenu n°3	Contenu n°4	Contenu n°5	Contenu n°6
<b>Enrichissement initial maximal en uranium 235</b>	3,95 %		4,30 %		4,55 %	
<b>Combustible</b>	UO <sub>2</sub>					
<b>Taux de combustion moyen maximal</b>	55 000 MWj/tU					
<b>Taux de combustion maximal</b>	63 250 MWj/tU					
<b>Durée de refroidissement minimale</b>	1 an					

- La masse maximale d'uranium dans l'assemblage.
- 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<sup>®</sup> 24 SH est constitué d'un corps épais dont chaque ouverture est fermée par deux barrières d'étanchéité indépendantes décrites ci-après.

##### Première barrière

La première barrière d'étanchéité est constituée par :

- La virole épaisse et son fond 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 tôle d'orifice et son joint d'étanchéité métallique interne.

##### Deuxième barrière

La deuxième barrière d'étanchéité est constituée par :

- La virole épaisse et son fond soudé.
- Le couvercle secondaire en acier et son joint d'étanchéité interne en élastomère.
- La tôle d'orifice et son joint d'étanchéité interne en élastomère.

#### 2.5. Enceinte de confinement

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

#### 2.6. Système d'isolement

Le système d'isolement est constitué par :

- Le contenu radioactif (assemblages combustibles ou capsule canister) et l'aménagement interne.
- Les deux barrières d'étanchéité décrits au § 2.4.

## 2.7. Bilan des masses

La masse maximale autorisée du colis TN<sup>®</sup> 24 SH est de 105 970 kg. La masse autorisée au transport est celle utilisée de façon générique dans les études de sûreté.

## 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 et la pression dans l'espace inter-couvercles.

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

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

#### Résistance des structures annexes

La tenue mécanique des structures annexes de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 SH composées des éléments suivants est vérifiée, à savoir :

- L'enveloppe externe soumise à une pression interne (correspondant au dégazage de la résine).
- Les tôles des capots amortisseurs soumises à une pression interne (due à un dégagement gazeux) et une accélération longitudinale (correspondant aux accélérations en transport).
- Les vis de fixation des capots amortisseurs.

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

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

#### Résistance de l'aménagement interne

La résistance des différents aménagements internes aux sollicitations mécaniques et contraintes thermiques rencontrées en conditions de transport de routine ainsi que sa libre dilatation dans la cavité sont vérifiées.

#### Arrimage et manutention

L'arrimage et la manutention du colis sont réalisés par six (concept standard) ou quatre (concept option 1) 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 NF 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

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

#### Ensemble de chutes étudiées

Toutes les configurations possibles de chute libre de 9 mètres et de 1 mètre sur poinçon sont analysées, 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 des barrières 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 deux maquettes à l'échelle 1/3 de modèles de colis similaires au TN<sup>®</sup> 24 SH.

#### Séquences de chute pour la première maquette

Les séquences de chutes réglementaires effectuées pour la première 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. L'impact a lieu au niveau d'une génératrice passant par les tourillons.

##### – Séquence n°2

- Chute n°3 : Chute d'une hauteur de 1,55 mètre sur poinçon au niveau de la tige 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 tige 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 tige 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.

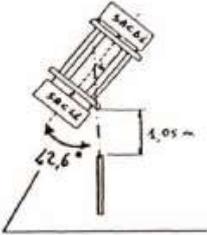
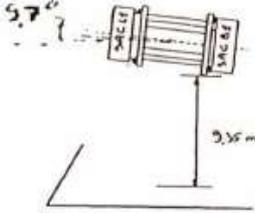
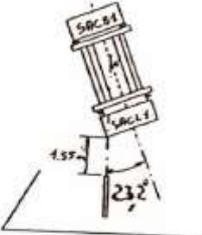
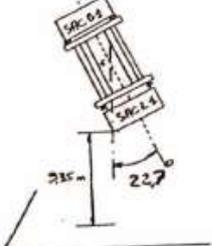
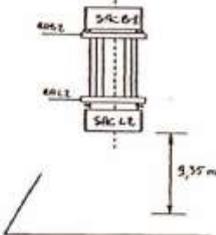
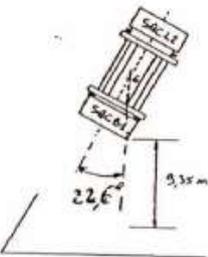
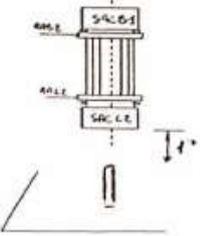
##### – Séquence n°3

- 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.

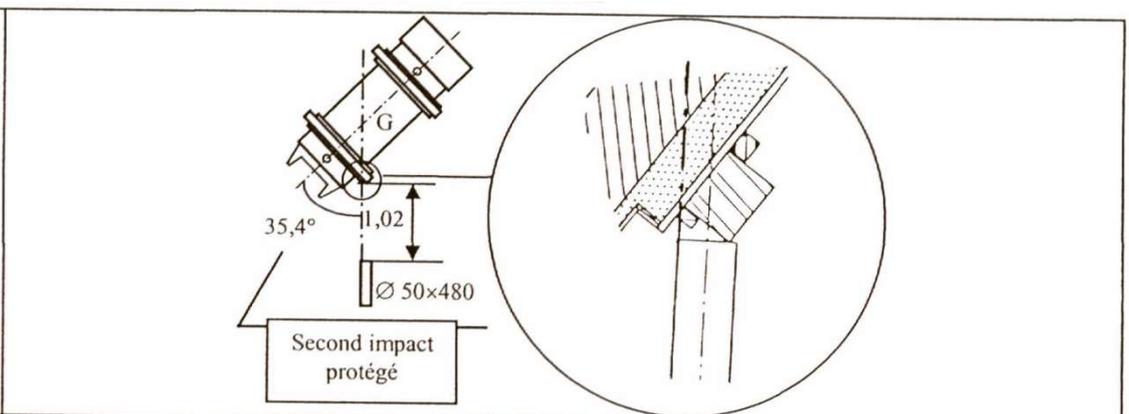
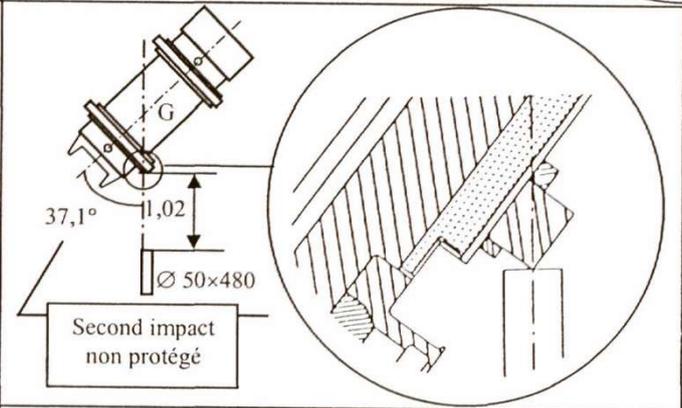
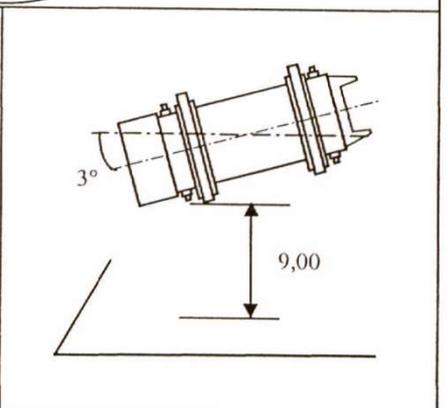
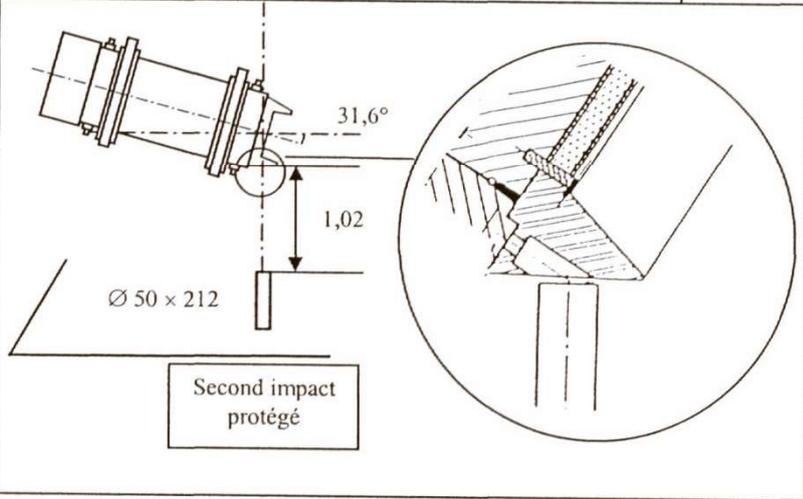
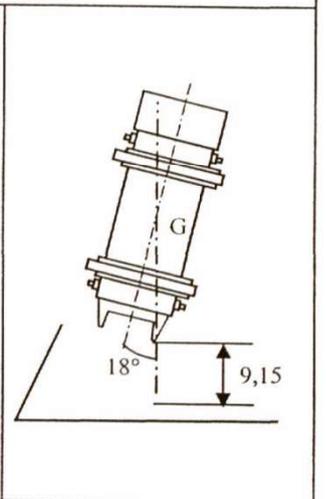
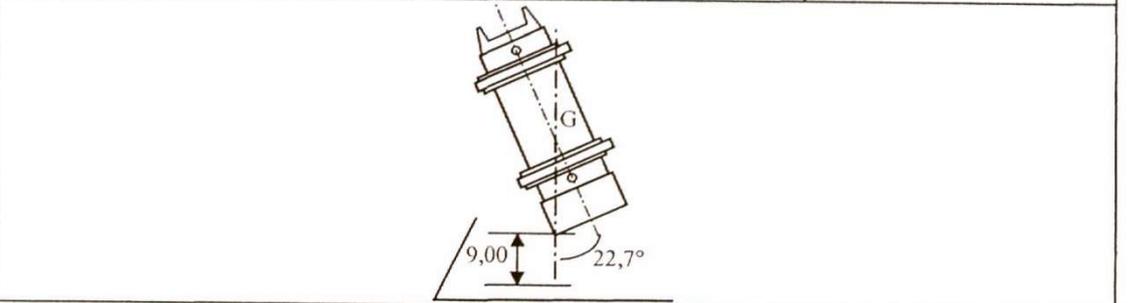
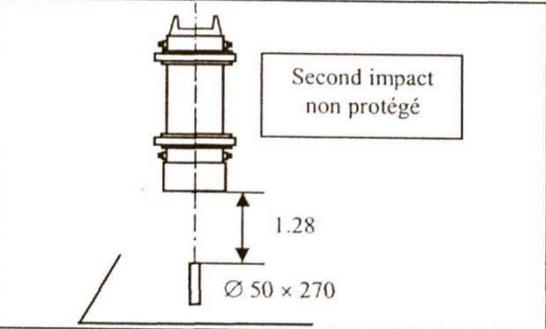
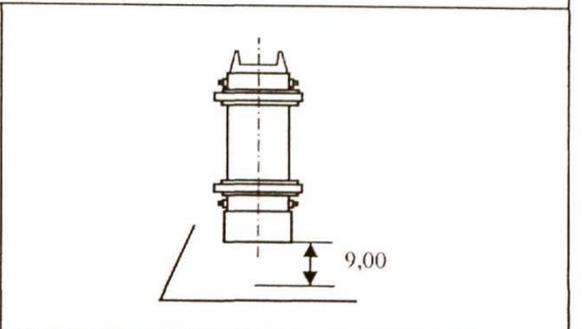
Numéro de chute		
1 et 2		
3 et 4		
5		
6		
7		

### Séquences de chute pour la deuxième maquette

Les séquences de chutes réglementaires effectuées pour la deuxième 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 1,02 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.
- 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.

<p><b>Séquence 1</b></p>	 <p>35,4° 1,02 Ø 50×480 Second impact protégé</p>	
<p><b>Séquence 2</b></p>	 <p>37,1° 1,02 Ø 50×480 Second impact non protégé</p>	 <p>3° 9,00</p>
<p><b>Séquence 3</b></p>	 <p>31,6° 1,02 Ø 50 × 212 Second impact protégé</p>	 <p>18° 9,15</p>
<p><b>Séquence 4</b></p>	 <p>9,00 22,7°</p>	
<p><b>Séquence 5</b></p>	 <p>1,28 Ø 50 × 270 Second impact non protégé</p>	 <p>9,00</p>

### Principe de définition des maquettes de chute

La similitude entre l'emballage TN<sup>®</sup> 24 SH et les maquettes est étudiée : il est démontré que les deux 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<sup>®</sup> 24 SH 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...).

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

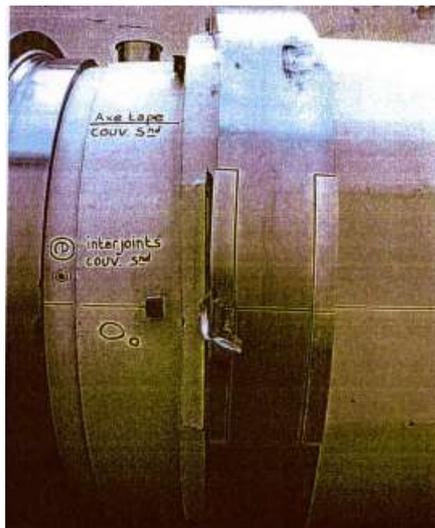
### Résultats des chutes pour la première maquette

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

- Les accélérations sont 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 pour toute la plage de température possible des conditions normales de transport.
- Les taux de fuites sont mesurés pour les enceintes d'étanchéité après chaque séquence de chutes.

### Séquence n°1

- Lors de la 1<sup>ère</sup> chute, la couronne ne s'est pas déplacée sur sa portée aménagée sur l'enveloppe externe de la maquette. La photo ci-après montre un matage de l'aluminium ainsi qu'un léger vrillage de la couronne.



- Lors de la 2<sup>ème</sup> 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°1 conservent un bon niveau d'étanchéité.

### Séquence n°2

- Lors de la 1<sup>ère</sup> 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.



- Lors de la 2<sup>ème</sup> 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. La photo ci-après montre une déchirure locale de l'enveloppe de confinement du bois et un écrasement du capot amortisseur de tête.



- 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°1 conservent un bon niveau d'étanchéité.

### Séquence n°3

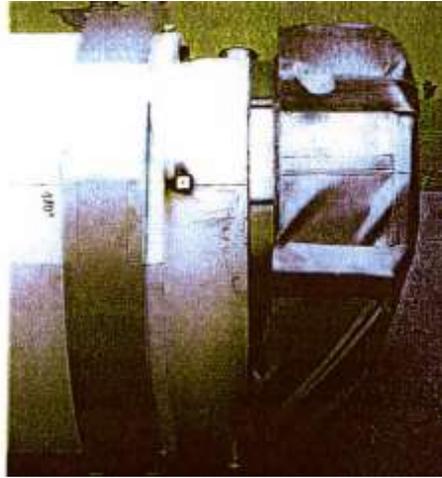
- Lors de la chute, les capots amortisseurs ont parfaitement assuré leur fonction en s'écrasant. Les plaques de blindage en extrémité supérieure du panier ont flambé. La photo ci-après montre les déformations au niveau du capot amortisseur de tête.



- 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°1 conservent un bon niveau d'étanchéité.

#### 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. La photo ci-après montre une déchirure locale de l'enveloppe de confinement du bois et un écrasement du capot amortisseur de fond.



- 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°1 conservent un bon niveau d'étanchéité.

#### 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. La photo ci-après montre l'empreinte laissée par le poinçon au niveau du couvercle secondaire.



- 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°1 conservent un bon niveau d'étanchéité.

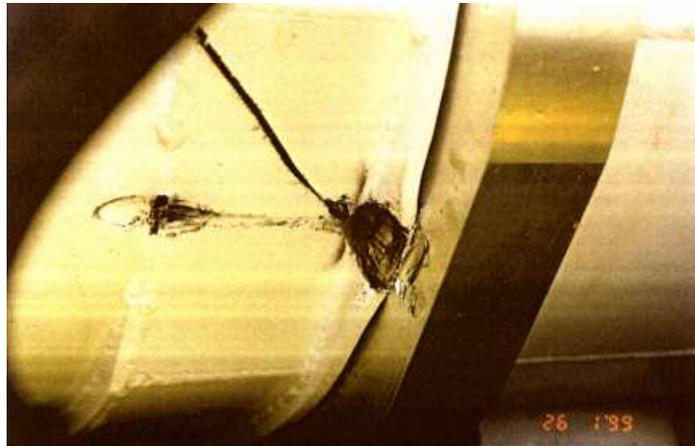
## Résultats des chutes pour la deuxième maquette

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.
- Les taux de fuites mesurés pour les enceintes d'étanchéité après chaque séquence de chutes.

### Séquence n°1

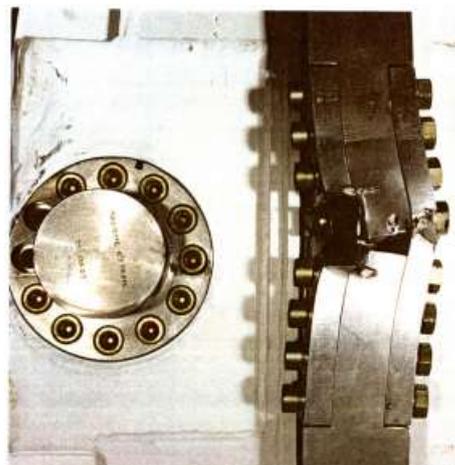
- Lors de la chute, la couronne ne s'est pas déplacée sur sa portée aménagée sur l'enveloppe externe de la maquette. La photo ci-après montre un léger matage de l'aluminium de la couronne ainsi qu'un matage et une flexion locale de la butée.



- Les contrôles d'étanchéité n'ont pas été réalisés à la suite de cette séquence car les résultats des contrôles d'étanchéité réalisés à la suite de la séquence n°2 sont conservativement applicables à la séquence n°1.

### Séquence n°2

- Lors de la 1<sup>ère</sup> 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. La photo ci-après montre le matage de l'aluminium de la couronne de fond et la flexion des demi-couronnes de fond.



- Lors de la 2<sup>ème</sup> chute, le premier impact a eu lieu simultanément sur la couronne aluminium de tête qui s'est ouverte et sur le tourillon qui a été écrasé. Le deuxième impact a été amorti par la couronne aluminium de fond. Les déformations au niveau des couronnes aluminium ont provoqué un affaissement local de la résine. Le panier a été déformé au niveau des tôles d'orientation de deux logements. 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°2 conservent un bon niveau d'étanchéité.

### Séquence n°3

- Lors de la 1<sup>ère</sup> 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. La photo ci-après montre la pénétration du poinçon dans le capot amortisseur de fond.



- Lors de la 2<sup>ème</sup> 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. La photo ci-après montre un écrasement du capot amortisseur de fond.



- 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°2 conservent un bon niveau d'étanchéité.

#### 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. La photo ci-après montre un écrasement du capot amortisseur de tête.



- 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°2 conservent un bon niveau d'étanchéité.

#### Séquence n°5

- Lors de la 1<sup>ère</sup> chute, le poinçon a pénétré le capot amortisseur de tête au travers de l'enveloppe externe sans impacter le couvercle secondaire. La photo ci-après montre la pénétration du poinçon dans le capot amortisseur de tête.



- Lors de la 2<sup>ème</sup> chute, les capots amortisseurs ont parfaitement assuré leur fonction en s'écrasant (il n'y a pas de déformation notables au niveau de la virole assurant l'emboîtement des capots amortisseurs sur le corps). La partie supérieure des lests a flambé entraînant une déformation des tôles supérieures du panier. La photo ci-après montre les déformations au niveau du capot amortisseur de tête.



- 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°2 conservent un bon niveau d'étanchéité.

#### Comportement de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 SH lors des épreuves de chutes à la température minimale réglementaire et maximale en conditions normales de transport

Suivant les cas de chutes, la détermination des accélérations à l'échelle 1 est réalisée soit par des comparaisons analytiques avec les résultats d'essais de chutes, soit par la réalisation de calculs numériques basés sur un recalage de la première maquette à l'échelle 1/3.

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 réglementaire de -40 °C, soit de la température maximale en conditions normales de transport.

La prise en compte de ces coefficients permet de calculer de nouvelles accélérations pénalisantes pour la vérification de la tenue des éléments constituant les enceintes primaires et secondaires, ainsi que l'aménagement interne et le contenu de l'emballage, qui sont sollicités en chute. La tenue de ces éléments est vérifiée.

La résistance de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 SH lors des conditions accidentelles de chute, avec la prise en compte du comportement des capots amortisseurs entre la température minimale réglementaire de -40 °C <1> et la température maximale en conditions normales de transport est donc vérifiée.

#### Conclusion

Suite aux épreuves réglementaires des chutes en conditions accidentelles de transport, les deux barrières de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 SH conservent leur étanchéité, et ce pour toutes les configurations de chute.

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

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

Les analyses montrent que 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<sup>®</sup> 24 SH dans les diverses configurations de transport sont déterminées afin de vérifier la sûreté du colis et le respect des exigences réglementaires <1>.

Dans cette analyse, deux types de paniers sont considérés :

- Panier type 1, 2 ou 3 : Les paniers type 2 et type 3 ont la même géométrie, sont équivalents en termes de caractéristiques mécaniques et thermiques et sont enveloppes du panier type 1 du point de vue thermique.
- Panier type 4 ou 5 : Le panier type 5 est enveloppe du panier type 4 du point de vue thermique.

### 4.1. Analyse thermique de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 SH en conditions de transport de routine

L'objet de cette étude est l'analyse thermique du modèle de colis TN<sup>®</sup> 24 SH en conditions de transport de routine, muni de son aménagement interne chargé des contenus décrits au paragraphe 2.3.

#### Paramètres du contenu importants pour l'étude

Les différents plans de chargement étudiés sont fonction :

- Du nombre d'assemblages combustibles.
- De la puissance thermique résiduelle maximum totale de l'emballage et des assemblages.

#### 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.
- Le type de panier (type 1, 2 ou 3 et type 4 ou 5).
- La cavité est remplie d'hélium.

#### Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- La température ambiante maximale réglementaire.
- L'ensoleillement réglementaire.
- Le colis est transporté horizontalement.
- Les échanges thermiques se font par conduction, convection et rayonnement.
- Le capot amortisseur de fond n'étant pas modélisé, les surfaces directement en contact avec celui-ci sont considérées comme adiabatiques.
- La couronne du capot amortisseur de tête est modélisée en considérant un jeu avec la virole externe et le couvercle secondaire.

#### Méthode d'analyse

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

La puissance des assemblages combustibles est directement appliquée sur les parois des logements du panier. Le profil de puissance thermique des assemblages combustibles est pris en compte. Le calcul de la température des crayons des assemblages est réalisé par un

modèle spécifique tenant compte des températures dans la section la plus chaude du colis (à mi-longueur) et des propriétés d'émissivité des gaines et des parois de panier.

L'étude pour les paniers type 4 ou 5 est réalisée en deux parties :

- La première partie consiste à évaluer le comportement thermique de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 SH suivant deux configurations :
  - Panier centré radialement et axialement au sein de la cavité afin de maximiser les températures en partie courante.
  - Panier centré radialement au sein de la cavité et en contact avec le couvercle primaire (au niveau axial) afin de maximiser les températures en tête de l'emballage.
- La deuxième partie consiste à évaluer le gradient circonférentiel de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 SH chargé avec le plan maximisant le nombre d'assemblages combustibles et la puissance thermique totale résiduelle suivant deux configurations :
  - Panier centré radialement et axialement.
  - Panier décentré radialement et centré axialement.

L'étude pour les paniers type 1, 2 ou 3 est réalisée par comparaison avec l'étude pour les paniers type 4 ou 5 en considérant le cas pénalisant où le panier est centré dans la cavité.

### Résultats de l'étude

Les températures maximales atteintes en conditions de transport de routine sont inférieures aux limites admissibles pour les joints métalliques et en élastomère des couvercles et des orifices ainsi que pour les assemblages combustibles.

Les températures maximales atteintes en conditions de transport de routine sont supérieures aux limites admissibles pour la résine du couvercle primaire et du corps. De façon pénalisante, la résine du couvercle primaire n'est pas prise en compte dans les calculs des débits d'équivalent de dose (voir paragraphe 6). Pour la résine du corps, la zone de dépassement de la température admissible est limitée et une réduction d'épaisseur est prise en compte dans les calculs des débits d'équivalent de dose (voir paragraphe 6).

## **4.2. Analyse thermique de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 SH 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<sup>®</sup> 24 SH en conditions accidentelles de transport**

### Paramètres du contenu importants pour l'étude

Les différents plans de chargement étudiés sont fonction :

- Du nombre d'assemblages combustibles.
- De la puissance thermique résiduelle maximum totale de l'emballage et des assemblages.

### Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les principales caractéristiques utilisées sont les suivantes :

- Les matériaux et la géométrie de l'emballage et de ses aménagements internes.
- Le type de panier (type 1, 2 ou 3 et type 4 ou 5).
- La cavité est remplie d'hélium.

### Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- Les conditions de feu réglementaires (800 °C pendant 30 minutes).
- La température ambiante maximale réglementaire avant et après le feu.
- L'ensoleillement réglementaire.
- Le colis est transporté horizontalement.
- Les échanges thermiques se font par conduction, convection et rayonnement.
- Le capot amortisseur de fond n'étant pas modélisé, les surfaces directement en contact avec celui-ci sont considérées comme adiabatiques.
- La couronne du capot amortisseur de tête est modélisée en considérant un jeu avec la virole externe et le couvercle secondaire.
- Les températures initiales sont celles issues de l'analyse thermique en conditions de transport de routine.

### 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.

L'étude pour les paniers type 4 ou 5 consiste à évaluer le comportement thermique de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 SH en conditions accidentelles de transport dans plusieurs configurations différentes :

- Le panier est centré axialement et radialement dans la cavité.
- Le panier est centré radialement mais décentré axialement (en contact avec le couvercle primaire) dans la cavité.
- Le panier est centré radialement et décentré axialement dans la cavité et l'impact d'un poinçon sur la tôle anti-poinçonnement est considéré.
- Le panier est centré radialement et décentré axialement dans la cavité et l'impact d'un poinçon au droit de la tôle d'orifice est considéré.

L'effet d'une dispersion de la matière fissile est pris en compte.

Cette étude est réalisée par le biais d'un modèle 3D représentant un demi-emballage.

L'étude pour les paniers type 1, 2 ou 3 est réalisée par comparaison avec l'étude pour les paniers type 4 ou 5 en considérant le cas pénalisant où le panier est centré dans la cavité.

### Résultats de l'étude

Les températures maximales atteintes en conditions accidentelles de transport sont inférieures aux limites admissibles pour les joints métalliques et en élastomère des couvercles et des orifices ainsi que pour les assemblages combustibles.

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 de l'incendie ou son intensité. Cependant, 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.

Il est vérifié dans le chapitre 3A qu'il n'existe pas de risque d'inflammabilité des gaz liés à la radiolyse de l'eau contenue dans la cavité.

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

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

### 5.1. En conditions normales de transport

#### Paramètres du contenu importants pour l'étude

L'analyse de confinement du modèle de colis TN<sup>®</sup> 24 SH est réalisée pour les contenus suivants :

- Contenu n°2 : Ce contenu présente le volume de particules aérosols radioactives par crayon le plus élevé.
- Contenu n°4 : Ce contenu présente l'activité par crayon combustible la plus élevée.

Ces deux contenus couvrent les contenus n°1, 3, 5 et 6.

#### 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.
- 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 bar abs.
- La durée de transport de 1 an.
- Le taux maximum de crayons combustibles présentant une rupture de leur gaine est de 100 %.
- Le taux de relâchement des gaz de fission (dit RGF) est conforme aux recommandations de l'ASN.

#### Méthode de calcul

Le relâchement d'activité est calculé analytiquement en prenant en compte les gaz et aérosols. Le taux de fuite de radionucléides est calculé en termes de valeurs de  $A_2$  en considérant que les taux de fuite des barrières d'étanchéité en conditions de transport de routine et en conditions accidentelles de transport sont garantis.

#### 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 température atmosphérique maximale de 1,05 bar abs.

Les résultats montrent une marge significative par rapport au critère réglementaire de 1 A<sub>2</sub> cumulé sur une semaine.

## 6. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE RADIOPROTECTION

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

- Conditions de transport de routine :
  - en tout point des surfaces externes du colis : 2 mSv/h hors transport sous utilisation exclusive ou 10 mSv/h en transport sous utilisation exclusive ;
  - 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 % par rapport à celles en conditions de transport de routine en tout point du colis.
- Conditions accidentelles de transport : 10 mSv/h en tout point situé à 1 mètre des surfaces externes de l'emballage.

### 6.1. En conditions de transport de routine

#### 6.1.1. Au contact

##### Paramètres du contenu importants pour l'étude

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

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

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

##### Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

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

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

- une virole interne en acier,
- une couche de résine (avec les ailettes de cuivre),
- une virole externe en acier.

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

- une virole d'acier,
- un capot amortisseur de fond constitué d'acier et de bois.

Le blindage axial côté couvercle est constitué par :

- un couvercle (couvercle primaire) d'acier au carbone,
- une couche de résine,
- une tôle d'acier,
- un couvercle (couvercle secondaire) d'acier inoxydable,
- un capot amortisseur de tête constitué d'acier et de bois.

Le blindage radial au niveau des tourillons est constitué par :

- une virole en acier au niveau du méplat,
- de plaques de plomb,
- une couche de résine,
- une tôle en acier.

#### Méthode de calcul

Les calculs de débits d'équivalent de dose 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 de sections efficaces utilisée est la bibliothèque ENDF/B-VI, les particules peuvent être de type neutron ou gamma.

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

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

Pour le transport sous autorisation exclusive, un critère de 5 mSv/h est retenu en conception afin de conserver des marges.

#### Résultats de l'étude

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

Les inéquations ont été déterminées sur un quart d'emballage en 2 points dimensionnants en conditions de transport de routine au contact de l'emballage :

- tourillon haut,
- tourillon bas.

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

### **6.1.2. À 2 mètres de l'emballage**

L'évaluation des débits d'équivalent de dose en conditions de transport de routine à 2 mètres de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 SH est réalisée avec un chargement typique.

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

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

réalisée avec le code TRIPOLI 4.7. Il permet de résoudre l'équation du transport des particules dans une géométrie à trois dimensions par la méthode de Monte Carlo.

La bibliothèque de sections efficaces utilisée est la bibliothèque CEA V5, les particules peuvent être de type neutron ou gamma.

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

#### Hypothèses importantes pour l'étude

Les températures maximales atteintes en conditions de transport de routine issues de l'analyse thermique sont supérieures aux limites admissibles pour la résine à certains endroits du couvercle primaire et du corps. De façon pénalisante, les hypothèses suivantes sont considérées :

- La résine du couvercle primaire n'est pas prise en compte dans les calculs des débits d'équivalent de dose.
- L'épaisseur de la résine est diminuée en partie radiale afin de prendre en compte le léger dépassement du critère en thermique (voir paragraphe 4).

#### Résultats de l'étude

Le critère réglementaire de débits d'équivalent de dose en conditions de transport de routine à 2 mètres est respecté.

### **6.2. En conditions normales de transport**

Le seul dommage attendu en conditions normales de transport par rapport au modèle de calcul utilisé en conditions de transport de routine est un léger écrasement des capots amortisseurs. On évalue la distance minimale entre la source et la partie écrasée du capot, et l'augmentation de débit d'équivalent de dose induite par la diminution de cette distance.

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

### **6.3. En conditions accidentelles de transport**

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

- Disparition totale de la résine du couvercle primaire.
- Disparition partielle de la résine située en périphérie du corps autour des ailettes de cuivre.

Le critère réglementaire de débits d'équivalent de dose en conditions accidentelles de transport à 1 mètre est respecté en considérant le contenu radioactif maximal autorisé ainsi qu'une dispersion de matière fissile pénalisante dans la cavité.

## 7. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE SÛRETE-CRITICITE

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

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

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

- première configuration de calcul : assemblages intacts et cavité remplie d'eau,
- deuxième configuration de calcul : tous les assemblages ruinés et pénétration d'eau limitée à 1 litre dans la cavité.

L'objectif de cette étude est de vérifier la sous-criticité dans les conditions réglementaires de transport pour le colis équipé de son panier à 37 logements et chargé de l'un des contenus décrits au paragraphe 2.3.

Les cas de chargement considérés dans cette analyse sont les suivants :

- Contenu 1 dans un panier de type 1.
- Contenu 2 dans un panier de type 2.
- Contenu 3 dans un panier de type 3.
- Contenu 3 dans un panier de type 4.
- Contenu 4 dans un panier de type 5.
- Contenu 5 dans un panier de type 5.
- Contenu 6 dans un panier de type 5.

Les critères de sous-criticité retenus sont les suivants :

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

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

### Paramètres du contenu importants pour l'étude

Dans cette étude, les assemblages combustibles sont considérés intègres.

L'étude prend en compte les caractéristiques des assemblages combustibles REP 14 × 14 suivantes pour les différents contenus :

- Le nombre de crayons.
- La section fissile.
- Les caractéristiques des pastilles.
- Les caractéristiques de la gaine.
- Les caractéristiques de la capsule canister pour le contenu n°5.

### Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

L'emballage TN<sup>®</sup> 24 SH est modélisé par des viroles concentriques à l'intérieur desquelles est chargé un panier comportant des logements où sont placés les assemblages combustibles.

L'étude prend en compte les caractéristiques des paniers (teneur en bore et épaisseur des renforts en acier des profilés).

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

### Hypothèses importantes pour l'étude

De manière pénalisante, le calcul du coefficient de multiplication ( $K_{\text{eff}}$ ) 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 et la virole externe en acier n'est pas modélisée. La couche d'eau de 200 mm servant à la réflexion des neutrons est directement appliquée sur la virole interne en acier.

### Méthode de calcul

L'étude a été réalisée avec le schéma de calcul APOLLO2-MORET4 (voie standard du formulaire CRISTAL) qui est basé sur l'utilisation de la bibliothèque CEA93 pour les milieux fissiles et les milieux de structure.

Le calcul se déroule en deux parties :

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

### Résultats

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

## 7.2. Colis isolé avec un contenu ruiné et pénétration d'eau 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<sup>®</sup> 24 SH est modélisé par une succession de sphères concentriques comprenant :

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

### Hypothèses importantes pour l'étude

Le modèle d'emballage est constitué d'une double barrière d'étanchéité étanche à l'issue des épreuves réglementaires (voir les paragraphes 3 et 4), dont les contrôles avant transport pour vérifier la bonne fermeture, le séchage et l'étanchéité sont renforcés pour se prémunir de l'erreur humaine, et qui permet ainsi de considérer une introduction partielle d'eau dans la cavité conformément au paragraphe 680 du règlement de l'AIEA <1>.

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

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

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

### Méthode de calcul

L'étude a été réalisée avec le schéma de calcul APOLLO2-MORET4 (voie standard du formulaire CRISTAL) qui est basé sur l'utilisation de la bibliothèque CEA93 pour les milieux fissiles et les milieux de structure.

### Résultats

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

### 7.3. Réseau de colis

Le cas d'un réseau de colis est couvert par le cas du colis isolé du fait de l'épaisseur importante de la virole en acier qui isole neutroniquement son contenu (épaisseur supérieure à 200 mm). Ainsi, le respect du critère de  $k_{\text{eff}} \leq 0,98$  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 DE L'EMBALLAGE TN<sup>®</sup> 24 SH

Ce paragraphe a pour objet de présenter les instructions minimales de chargement, de déchargement et de transport de l'emballage TN<sup>®</sup> 24 SH.

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

- Avant chaque transport, la cavité doit être remplie avec un gaz neutre (hélium).
- Vérifier le type du panier (1, 2, 3, 4 ou 5) avant de le charger dans l'emballage.
- Vérifier les couples de serrage des vis des couvercles primaire et secondaire (incluant les tampons et les vis de tape) et les faire contrôler par une personne différente de celle qui a réalisé la vérification.
- Effectuer un test d'étanchéité des joints d'étanchéité du couvercle primaire et de son orifice.
- Effectuer un test d'étanchéité des joints d'étanchéité du couvercle secondaire et de son orifice. Ce test est réalisé indépendamment du test précédent.
- Vérifier la non-contamination des surfaces externes de l'emballage et du véhicule de transport en conformité avec les limites réglementaires.
- Vérifier les débits d'équivalent de dose autour du colis et du véhicule de transport en conformité avec les limites réglementaires (incluant les points singuliers comme les tourillons).
- Mesurer les températures des surfaces accessibles. Si la température des surfaces accessibles dépasse le critère réglementaire, le transport se fait avec mise en place de barrières thermiques.
- Vérifier la mise en place de l'étiquetage réglementaire.

Le colis doit être transporté en position horizontale.

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

## 9. PROGRAMME D'ENTRETIEN 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 remplacement des joints des barrières d'étanchéité.
- Le contrôle de l'état des surfaces externes de l'emballage.
- Le contrôle de l'état des composants des systèmes vissés (barrières d'étanchéités, capots 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, le démontage des composants, et un test en charge après remontage.

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

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

## 10. PROGRAMME D'ASSURANCE QUALITE

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

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

des colis de matières radioactives.

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

## 11. REFERENCES

<1> Règlements applicables :

- Règlement de transport des matières radioactives de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA), norme de sûreté n°SSR-6, édition 2012.
- Accord européen relatif au transport des marchandises dangereuses par route (ADR), édition applicable au 1<sup>er</sup> janvier 2021.
- Règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses (RID), édition applicable au 1<sup>er</sup> janvier 2021.
- Accord européen relatif au transport des marchandises dangereuses par voies de navigation intérieure (ADN), édition applicable au 1<sup>er</sup> janvier 2021.
- 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 de l'OMI), édition 2018 applicable au 1<sup>er</sup> janvier 2019.