


<b>Orano NPS</b> <b>DOSSIER DE SURETE</b>  <b>FCC4</b>	<b>Diffusion limitée Orano - Autorités</b>		 <b>orano</b>	
	<b>CHAPITRE 1.5</b> <b>CARACTERISTIQUES DE PERFORMANCES DU COLIS</b>			
	Préparation	Date [REDACTED]		Signature
	Vérification	Date [REDACTED]	Signature	
<b>Identification :</b>		<b>DOS-18-016472-002</b>	<b>Vers. 3.0</b>	<b>Page 1 / 19</b>

**Version publique :** les informations non publiques sont masquées par un rectangle noir [REDACTED]

---

#### Sommaire

État des révisions	2
1. Objet	3
2. Descriptions et définitions	3
3. Performances d'un point de vue mécanique	6
4. Performances d'un point de vue thermique	11
5. Performances d'un point de vue de la radioprotection	13
6. Performances d'un point de vue sûreté-criticité	14
7. Conditions d'utilisation	17
8. Programme d'entretien périodique	17
9. Programme d'assurance qualité	19
10. Références	19

---

## État des révisions

Version	Date	Objet et historique des révisions	Préparé par / Vérifié par
<b>Ancienne référence : DOS-12-00057682-050</b>			
0	04/2012	Création du document	████████
1	09/2012	Ajout de l'annexe 2.5-4 Justification de l'augmentation de la section de cavité de 219 x 219 mm <sup>2</sup> à 221,5 x 221,5 mm <sup>2</sup>	████████
2	10/2016	Refonte du document	████████
<b>Nouvelle référence : DOS-18-016472-002</b>			
1.0	02/2019	Ajout de la possibilité de définir le colis comme étant de type A	████████
2.0	04/2019	Ajout du gainage Zircaloy-4	████████
3.0	Cf 1 <sup>ère</sup> page	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise à jour de la réglementation applicable notamment AIEA 2018</li> <li>- Ajout de l'analyse des mécanismes de vieillissement (§2.7)</li> <li>- Mécanique en conditions accidentelles §3.3 : ajout de l'analyse des variations en température des propriétés mécaniques des demi-coques et des vis ; ajout de l'analyse justifiant l'absence de désolidarisation des demi-coques.</li> <li>- Thermique en conditions accidentelles §4.3:ajout d'analyses de sensibilité sur modèles 3D thermo-fluidiques</li> <li>- Sous-criticité §6.2 : suppression du cas d'étude criticité sans calage des crayons en boite à crayons (cas qui n'est plus autorisé).</li> <li>- Modifications formelles.</li> </ul>	████████

## 1. Objet

L'objet de ce chapitre est de décrire les caractéristiques des performances des colis FCC4, destinés au transport par voie routière, ferroviaire ou maritime, soit d'assemblages de crayons combustibles neufs, soit de crayons combustibles neufs non assemblés, en tant que colis de type IP-2 ou de type A contenant de la matière fissile, au regard de la réglementation [1].

Les règlements applicables se basent sur les règles de conception et d'épreuves de de l'édition 2018 du Règlement de l'AIEA et sont les suivants :

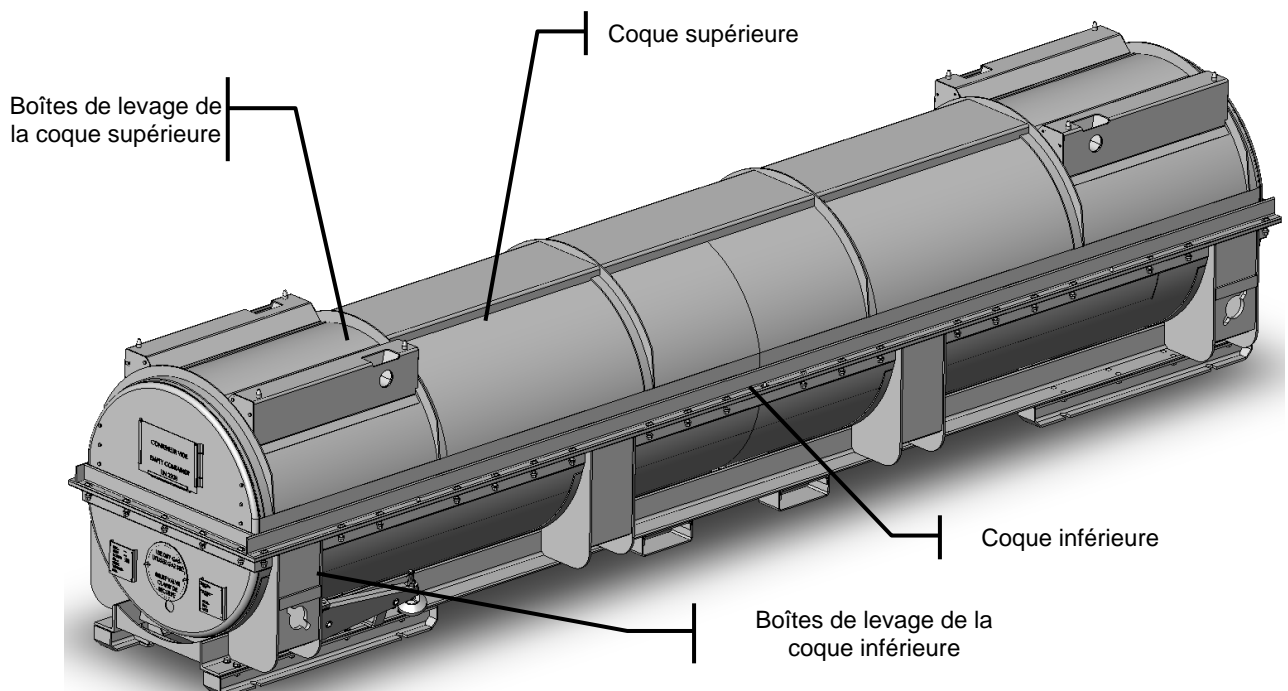
- Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (ADR),
- Règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses (RID),
- Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voies de navigations 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).

## 2. Descriptions et définitions

### 2.1. Description du colis

Le combustible nucléaire neuf destiné au fonctionnement des réacteurs civils de puissance à eau légère pressurisée est constitué à partir de crayons de combustible assemblés en réseau. La mise en œuvre de ces produits nécessite leur transport entre divers lieux d'élaboration (usines) et/ou d'utilisation (centrales nucléaires) soit sous la forme d'assemblages, soit sous la forme de crayons non assemblés. Le colis FCC4 permet de réaliser ces transports.

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



Les dimensions générales hors tout du colis sont :

- longueur = 5 748 mm ;
- largeur = 1 134 mm ;
- hauteur = 1 297 mm.

L'emballage FCC4 est destiné au transport des contenus suivants :

- assemblages de longueur active nominale 14 pieds munis ou non de grappes ;
- crayons non assemblés pour assemblages de longueur active nominale 8, 10, 12 et 14 pieds.

L'emballage FCC4 se décline en deux versions suivant le contenu envisagé :

- version 1 : pour les assemblages de combustible se composant d'un réseau de crayons au pas carré de 17x17 (XL, XLR, EPR et GAIA) ou pour les crayons non assemblés regroupés dans des boîtes à crayons (goulottes) ;
- version 2 : pour les assemblages de combustible se composant d'un réseau de crayons au pas carré de 16x16 ou de 18x18.

Les crayons de l'une ou l'autre des versions peuvent être réalisés à partir d'Uranium Naturel Enrichi (UNE) ou d'Uranium issu du Retraitement Enrichi (URE).

## 2.2. Description de l'emballage

D'une façon générale, l'emballage FCC4 est constitué :

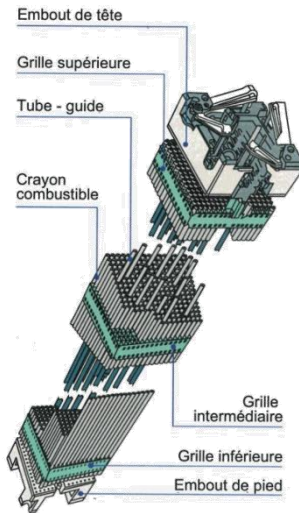
- d'une enveloppe cylindrique, à axe horizontal, composée de deux demi-coques liées par brides selon un plan diamétral :
  - la coque supérieure est munie de 4 supports de stockage présentant chacun un point pour la manutention de la coque supérieure et/ou du colis. Aux extrémités, les tôles sont munies d'absorbeur d'énergie axiale ;
  - la coque inférieure est composée de renforts par des fourrures et goussets associés à des plats verticaux présentant sur les renforts un point d'accrochage pour la manutention de l'emballage. La coque inférieure comporte également des longerons et des cornières qui permettent à l'enveloppe de reposer au sol par l'intermédiaire de patins métalliques ;
- d'un berceau métallique constitué de deux longerons et suspendu à la demi-coque inférieure par l'intermédiaire de plots élastiques. Ce berceau supporte le châssis de l'équipement interne lorsque celui est en position horizontale ;
- d'un équipement interne reposant sur le berceau et destiné à recevoir l'un des contenus définis dans ce dossier. Afin de faciliter son chargement, il peut pivoter par rapport au berceau et ainsi être mis en position verticale. Il se compose des éléments suivants :
  - d'un châssis-support dont la structure rigide en forme de "T" inversé est destinée à supporter à l'horizontal le contenu. La partie chaudronnée du châssis contient de la résine neutrophage ;
  - d'une plaque de pied vissée sur le châssis et supportant les assemblages de combustible au moment des chargements et déchargements lorsque le châssis est en position verticale. Cette plaque de pied peut être adaptée pour assurer le bridage axial de l'assemblage par son embout inférieur ;
  - d'une plaque de tête en 2 parties permettant de fermer les cavités et de caler les contenus à l'autre extrémité. Cette plaque de tête est adaptée pour assurer le bridage axial de l'assemblage ou de la grappe à l'aide d'un patin monté au centre de la plaque de tête et qui vient appuyer sur l'embout supérieur ou le pommeau de grappe au moyen d'une tige filetée. Dans le cas où les assemblages sont munis de grappes, des absorbeurs d'énergie sont montés sur chacune des 2 plaques de tête ;

- de deux portes en forme de "L" contenant de la résine neutrophage. Ces portes pivotent sur des axes de liaison avec le châssis et se referment sur le contenu.

## 2.3. Description du contenu

### 2.3.1. Description des assemblages

Les divers types d'assemblages à transporter sont différents notamment par le nombre, le diamètre et la longueur des crayons qu'ils comprennent.



Le schéma de principe ci-contre illustre la constitution d'un assemblage combustible pour réacteur à eau sous pression (REP).

Il comprend des crayons combustibles formant un réseau incomplet 16x16, 17x17 ou 18x18 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.

### 2.3.2. Description des crayons non assemblés

Les crayons de combustible sont constitués de gaines tubulaires en alliage de zirconium, remplies de pastilles d'oxyde d'uranium  $UO_2$  et/ou de pastilles combustibles composées d'un mélange d' $UO_2$  et d'un corps jouant le rôle de poison neutronique.

Les crayons non assemblés sont regroupés dans des boîtes à crayons, en lieu et place des assemblages à l'intérieur des emballages FCC4 version 1, qui permettent le transport des crayons de type 14 pieds, 12 pieds, 10 pieds, 8 pieds et EPR. La boîte est remplie par rangée complète de crayons. En cas de rangée incomplète de crayons combustible, celle-ci est complétée par des crayons inertes ou des barres pleines en acier ou en alliage de zirconium de même diamètre.

### 2.3.3. Contenu autorisé

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

- le vecteur isotopique de l'UNE (pour le colis type A ou IP-2) ;
- le vecteur isotopique de l'URE (pour le colis type IP-2) ;
- l'état physique (sous forme de pastille) et la forme chimique ( $UO_2$  et/ou d'un mélange d' $UO_2$  et d'un corps jouant le rôle de poison neutronique) ;
- le taux d'enrichissement maximum en  $^{235}U$  de 5% ;
- la densité maximale (100 % de la densité théorique de l' $UO_2$ ) ;
- Le matériau de gainage en alliage M5<sub>Framatome</sub> ou Zircaloy-4.

Lorsque le colis FCC4 version 1 ne présente qu'un seul assemblage combustible 17x17 EPR neuf en configuration grappée, il est possible de compléter la cavité vide par un lest, soit une maquette d'assemblage EPR soit un assemblage postiche à parois lisses (PPL).

Au maximum 5 g de glycérine peuvent être présents dans chacun des assemblages ou sur la maquette d'assemblage.

La présence de dessicant hors de la cavité est autorisée.

## 2.4. Enveloppe de confinement

Dans la conception du modèle de colis FCC4, le confinement de la matière fissile est assuré par la gaine des crayons de combustible et les bouchons soudés en alliage de zirconium.

## 2.5. Système d'isolement

Le système d'isolement est formé, pour la partie emballage, de la structure du conteneur constituée des éléments ci-dessous :

- l'équipement interne dont les composants forment deux cavités neutroniques qui contribuent à limiter l'interaction neutronique entre assemblages ou boîtes à crayons et entre colis ;
- la résine neutrophage contenu dans les portes et le châssis ;
- les coques inférieures et supérieures qui contribuent à limiter les interactions entre colis ;

Pour les matières fissiles, le système d'isolement est formé des éléments ci-dessous :

- la forme physique de la matière fissile : pastilles frittées d' $UO_2$  et / ou d'un mélange d' $UO_2$  et d'un corps jouant le rôle de poison neutronique ;
- les tubes de gainage qui garantissent le confinement de la matière fissile ;
- dans le cas du transport d'assemblages :
  - la structure de l'assemblage qui définit et limite le volume occupé par la matière fissile ;
  - le caractère complet des assemblages où les éventuels crayons fissiles manquants sont remplacés par des crayons inertes ;
- dans le cas du transport de crayons en boîte à crayon : la boîte à crayons ainsi que le système de calage longitudinal et axial.

## 2.6. Bilan de masses

La masse maximale autorisée du colis FCC4 en transport est de 5 550 kg.

## 2.7. Mécanismes de vieillissement

Il est vérifié que, de par la conception du modèle de colis, son entretien périodique et ses conditions d'utilisation, l'emballage et ses aménagements internes peuvent être utilisés pour une durée de 37 années depuis la mise en service. Le contenu n'est pas soumis de façon significative aux mécanismes de vieillissement sur la durée réglementaire de 1 an de transport.

## 3. Performances d'un point de vue mécanique

### 3.1. Conditions de transport de routine

Les arrimages autorisés sont évalués par calcul numérique pour valider les niveaux de contrainte atteints dans les coques externes pour chaque mode d'arrimage et dans chaque direction. Les niveaux de contraintes sont cumulés à des accélérations unitaires de transport longitudinales et transversales et montrent l'absence d'endommagement du modèle de colis. Ces contraintes servent de données d'entrée pour l'étude de fatigue qui considère le cumul des sollicitations liées au transport, à la manutention et au gerbage. Cette étude montre que la durée de vie minimale est cohérente avec la durée de vie des emballages FCC4.

La vérification de l'acceptabilité du levage des conteneurs pour assemblages 14 pieds est effectuée selon le code RCC MR. Les résultats montrent que la structure respecte les critères de déformation et d'instabilité plastique au niveau des cordons de soudure et au niveau des boulons. Une étude de fatigue est également menée et montre un dommage cumulé nettement inférieur à 1 pour la structure et les soudures. Pour les boulons, on obtient un nombre de

cycles serrage-levages-desserrages admissible très supérieur au critère de remplacement retenu en maintenance.

### 3.2. Conditions normales de transport

L'état du colis à l'issue des épreuves réglementaires relatives aux conditions normales de transport (aspersion, chute libre, gerbage et pénétration) est le suivant : l'enveloppe du colis ne subit que des déformations locales ne modifiant pas les conditions d'espacement entre colis, et l'état et la répartition des contenus à l'intérieur de l'enveloppe sont inchangés.

Il n'y a pas de dispersion du contenu radioactif à l'issue des épreuves réglementaires relatives aux conditions normales de transport.

### 3.3. Conditions accidentelles de transport

Les épreuves de chutes sont effectuées sur des prototypes d'emballage à l'échelle 1 représentatifs du modèle d'emballage. Les prototypes d'assemblages combustibles utilisés lors des chutes sont des assemblages factices dont le gainage est en Zircaloy-4 et dont les caractéristiques en termes de structure et de géométrie sont identiques aux assemblages de production. Ils sont remplis d'un matériau au comportement mécanique représentatif des pastilles combustibles.

#### **Ensemble des chutes étudiées :**

Les configurations possibles de chute libres de 9 m et de 1 m sur poinçon sont étudiées.

Les chutes retenues sont celles maximisant :

- les dommages possibles au système de fermeture de l'aménagement interne (portes, châssis, plaques de tête ou de pied, liaisons portes-châssis, liaisons plaques de tête ou de pied avec le châssis ou les portes) : chute à plat de 9 m, chute verticale de 9 m, chute de 1 m sur poinçon ;
- les dommages possibles aux liaisons boulonnées des coques supérieures et inférieures : chute de 9 m à plat et chute verticale de 9 m ;
- les dommages possibles à l'amortisseur de coque : chute verticale de 9 m.

#### **Séquence de chutes sur le prototype 1 (de type FCC3 pour assemblages 12 pieds)**

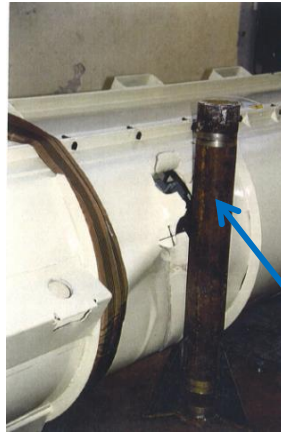
La 1<sup>ère</sup> chute est une chute libre de 1 m sur poinçon sur une arête de porte de l'aménagement interne. Cette chute sollicite les liaisons portes-châssis.

La 2<sup>ème</sup> chute est une chute libre de 1 m sur poinçon sur une face supérieure de porte de l'aménagement interne. Cette chute vise à solliciter au maximum la porte de l'aménagement interne.

La 3<sup>ème</sup> chute est une chute libre de 9 m verticale dans l'axe du colis côté tête de l'emballage visant à éprouver l'amortisseur de coque et les liaisons boulonnées des coques.

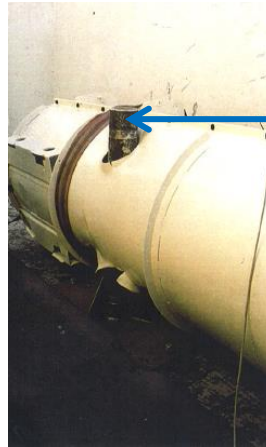
La 4<sup>ème</sup> chute est une chute libre de 9 m à plat avec « coup de fouet » avec impact initial côté tête pour frapper la cible côté pied avec le maximum de vitesse.

- Lors de la 1<sup>ère</sup> chute de 1 m sur poinçon, aucune rupture ou déformation des axes de liaison de portes au châssis de l'aménagement interne ne sont observées.



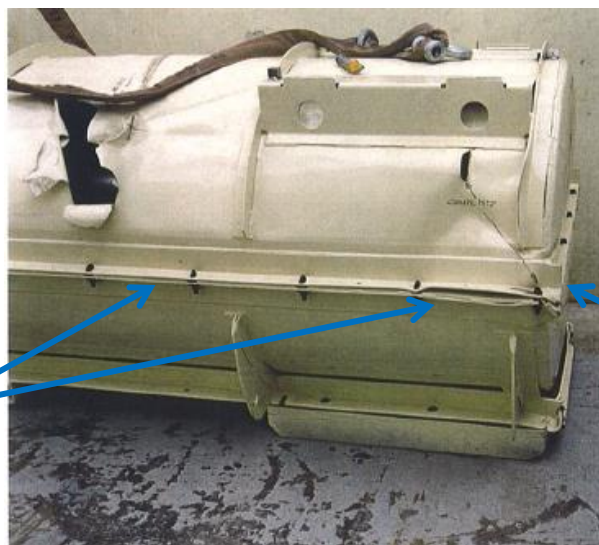
Poinçon

- Lors de la 2<sup>ème</sup> chute de 1 m sur poinçon, on observe un enfoncement de la tôle supérieure de la porte de l'aménagement interne sans déchirure.



Poinçon

- Lors de la 3<sup>ème</sup> chute de 9 m dans l'axe de l'emballage, la partie proéminente coté tête de l'emballage de la coque inférieure et la bride sont écrasées et toutes les liaisons boulonnées restent en place.



Plan de joint des deux coques

Partie proéminente et bride écrasées



- Lors de la 4<sup>ème</sup> chute de 9 m à plat, tous les boulons des coques supérieures, inférieures et les portes sont en place.



Vue de la tête d'emballage



Vue du fond d'emballage

- A la fin de la séquence de chute, il n'y a pas de dispersion de contenu radioactif et l'assemblage ne présente pas de flambement longitudinal généralisé ni ne porte aucune trace en vis-à-vis des zones d'impact du poinçon.

Les résultats de la chute verticale réalisée sur le prototype 1 de type FCC3 sont étendus à l'emballage FCC4 en analysant analytiquement l'impact des différences entre les deux modèles d'emballage sur le comportement des amortisseurs et la tenue de liaisons boulonnées des coques.

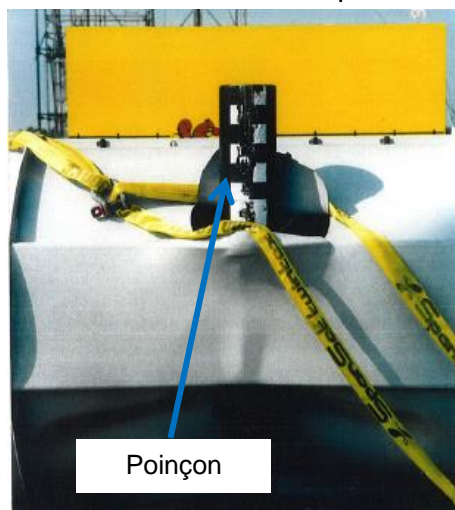
### **Séquence de chute sur le prototype 2 (de type FCC4 avec assemblages 14 pieds)**

La 1<sup>ère</sup> chute est une chute libre de 1 m sur poinçon près d'un verrou de porte de l'aménagement interne. Cette chute sollicite les portes et les axes de fermetures des portes.

La 2<sup>ème</sup> chute est une chute libre de 1 m sur poinçon au même point d'impact selon un autre angle de chute que lors de la 1<sup>ère</sup> chute. Cette chute a pour objectif de solliciter au maximum la porte de l'aménagement interne et de maximiser le risque de perforation.

La 3<sup>ème</sup> chute est une chute à plat avec « coup de fouet » avec impact initial côté pied pour frapper la cible côté tête avec le maximum de vitesse.

- Lors de la 1<sup>ère</sup> chute de 1 m sur poinçon, on observe un enfoncement de la tôle des portes sans déchirures et les axes de fermeture des portes sont intacts.



- Lors de la 2<sup>ème</sup> chute de 1 m sur poinçon, on observe un enfoncement de la tôle supérieure de la porte et une déchirure de la porte.



Poinçon

- Lors de la 3<sup>ème</sup> chute de 9 m à plat, tous les boulons joignant les 2 coques sont restés en place.



- A la fin de la séquence de chute, il n'y a pas de dispersion de contenu radioactif et l'assemblage ne présente pas de flambement longitudinal généralisé. L'assemblage est déformé en vis-à-vis des zones d'impact des différentes chutes subies, notamment au niveau de la zone d'impact des chutes sur poinçon.

Enfin, un calcul réalisé sur les boîtes à crayons valide le bon comportement pour un chargement radial enveloppe de la valeur maximale observée lors des essais de chute du prototype 2 et pour une chute axiale côté tête de 9,25 m avec impact différé de l'aménagement interne et sans prise en compte de l'amortisseur de choc.

L'état du colis à l'issue des épreuves réglementaires relatives aux conditions accidentelles de transports citées précédemment est le suivant : l'enveloppe du colis subit des déformations locales ne remettant pas en question la sûreté du colis.

Une analyse de l'impact des variations des propriétés mécaniques, de la coque et des vis de fermeture, sur la plage d'utilisation en température du colis, permet de valider le comportement en chute de l'emballage.

Par ailleurs, une analyse numérique comparative des contraintes dans les vis de fermeture des demi-coques de l'emballage FCC3 et du prototype 1 permet de justifier l'absence de désolidarisation des demi-coques de l'emballages FCC3 et par extension de l'emballage FCC4. Cette analyse prend en compte le cumul de chutes réglementaires CNT et CAT, les variations possibles des propriétés mécaniques des matériaux de l'emballage en fonction de la température et les variations possibles des couples de serrage.

Il n'y a pas de dispersion du contenu radioactif à l'issue des épreuves réglementaires relatives aux conditions accidentelles de transport.

## **Comportement du gainage des assemblages vis-à-vis des chutes réglementaires**

En chute, la déformation des crayons des assemblages est limitée par la résistance des structures de l'emballage qui les entourent. La chute longitudinale est plus sollicitante car elle conduit à des amplitudes de déformation plus importante.

Les résultats du bon comportement des crayons en Zircaloy 4 des prototypes d'assemblages combustibles lors des chutes (conservation de l'étanchéité des gaines) sont étendus aux crayons en alliage de zirconium M5<sub>Framatome</sub>.

L'étendue de ces justifications est effectuée en tenant compte :

- des propriétés minimales des gaines sur les plages de températures des conditions normales de transport,
- de la vitesse de déformation des gaines lors des chutes,
- des propriétés dynamiques des gaines M5<sub>Framatome</sub> pour la vitesse de déformation lors des chutes.

Les résultats de calculs montrent que les déformations plastiques maximales des gaines M5<sub>Framatome</sub> dans les assemblages combustibles lors des chutes réglementaires reste très en deçà de l'allongement plastique à rupture admissible. Cette analyse couvre les cas de chargement de crayons non assemblés dans les boîtes à crayons.

### **4. Performances d'un point de vue thermique**

#### **4.1. Conditions de transport de routine**

Les températures atteintes par le colis en conditions de transport de routine sont identiques à celles atteintes en conditions normales de transport.

#### **4.2. Conditions normales de transport**

Un calcul numérique transitoire d'une tranche du modèle de colis est réalisé dans les conditions ambiantes réglementaires, à savoir :

- la température ambiante maximale réglementaire de 38 °C,
- l'ensoleillement réglementaire appliqué 12h/24h.

La température maximale atteinte par le colis en conditions normales de transport est utilisée dans les différentes parties du dossier.

La température maximale atteinte par le colis reste inférieure à la température limite d'utilisation de la résine neutrophage présente dans les portes de l'aménagement interne.

#### **4.3. Conditions accidentelles de transport**

Des calculs numériques thermo-fluidiques sur un demi modèle tranche du colis chargé d'assemblage combustible sont réalisés afin de déterminer la cinétique des températures maximales atteintes par les crayons des assemblages combustibles durant et après l'épreuve réglementaire de feu. Des analyses de sensibilité des modèles 3D thermo-fluidiques sont également effectuées afin de déterminer la cinétique des températures maximales aux extrémités des assemblages.

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

- De manière pénalisante, la coque externe n'est pas considérée pendant la phase de feu ; elle est modélisée en phase de refroidissement afin de minimiser les pertes thermiques et ainsi minimiser le refroidissement du colis ;

- la taille des ouvertures au niveau des entrées et sorties d'air dans la cavité de l'aménagement interne sont prises de manière pénalisante au maximum des valeurs issues des épreuves de chute ;
- l'orientation de l'emballage.

### **Paramètres importants retenus des assemblages combustibles pour l'étude**

- La présence au plus proche des entrées d'air du réseau de crayons combustibles est considérée ;
- le réseau de crayons présentant l'inertie thermique la plus faible est considéré. Ainsi, il est modélisé un réseau de crayons REP 17x17 dans la tranche du plénum (sans la présence des pastilles d' $\text{UO}_2$ ).

### **Méthode d'analyse**

Le champ de température initiale du colis est la température maximale atteinte par le colis en conditions normales de transport.

Pendant la période réglementaire de feu durant 30 minutes, il est pris en compte :

- a. une température ambiante réglementaire de l'air de 800 °C ;
- b. un coefficient d'échange convectif entre les flammes et les parois externes exposées du modèle égal au coefficient recommandé par la réglementation de 10 W/m<sup>2</sup>/K représentatif d'une convection forcée dans un incendie englobant ;
- c. l'émissivité des flammes de 0,9 et l'absorptivité des surfaces externes de 0,8 conformément à la réglementation.

Après feu, il est considéré :

- d. une température ambiante de l'air égale à la température maximale atteinte par le colis en conditions normales de transport ;
- e. un ensoleillement réglementaire appliqué en permanence aux surfaces externes.

### **Résultats de l'étude**

L'étude permet de déterminer la cinétique du champ de température des crayons les plus chauds (évolution de la température moyenne et du gradient circonferentiel) durant et après l'épreuve de feu réglementaire.

#### **4.4. Comportement des gaines de crayons combustibles au fluage lors des épreuves de feu réglementaire**

A partir des champs de températures obtenus en conditions accidentelles de feu, une étude complémentaire du comportement thermomécanique des gaines les plus chaudes est réalisée.

A partir des lois de fluage des gainages en Zircaloy-4 et en  $\text{M5}_{\text{Framatome}}$ , qualifiées sur les plages de températures rencontrées en conditions réglementaires de feu, la tenue mécanique des gaines des crayons en alliage Zircaloy-4 et en  $\text{M5}_{\text{Framatome}}$  est vérifiée à l'issue de l'épreuve réglementaire de feu.

Une modélisation du comportement mécanique des crayons combustibles soumis à l'épreuve de feu est établie en tenant compte de :

- la géométrie de la gaine,
- la géométrie des pastilles de combustible et la présence du plénum,
- la pression interne initiale de la gaine,

- la cinétique du champ de température des crayons issues des calculs thermiques en conditions de feu réglementaire.

L'étude est menée sur les crayons les plus chauds et montre que le risque d'éclatement par fluage des gaines en alliages Zircaloy-4 et M5<sub>Framatome</sub> est exclu.

#### 4.5. Impact de la déformation des gaines suite au cumul des épreuves de chutes et de feu réglementaires

Les températures atteintes par les gaines durant l'épreuve de feu réglementaire et la durée de ces températures conduisent à un détensionnement des contraintes résiduelles dans les gaines dues aux déformations de celles-ci lors des épreuves de chutes réglementaires préalables à l'épreuve thermique de feu.

Ainsi, les conclusions de l'étude thermomécanique de la tenue au fluage des gaines en alliages Zircaloy 4 et M5<sub>Framatome</sub> ne sont pas modifiées par les déformations des gaines lors des épreuves de chutes réglementaires préalables.

### 5. Performances d'un point de vue de la radioprotection

Les critères retenus de débit d'équivalent de dose couvrant les conditions réglementaires de transport applicables aux colis de type industriel chargé de matières fissiles sont les suivants :

- Conditions de transport de routine : 2 mSv/h au contact du colis,
- Conditions normales de transport : moins de 20 % d'augmentation de l'intensité de rayonnement maximale au contact du colis.

#### 5.1. Conditions de transport de routine

##### Paramètre du contenu important pour l'étude

L'étude est menée en considérant le colis chargé d'assemblages combustibles de type URE avec un enrichissement de 4,95 % en <sup>235</sup>U et une proportion en <sup>232</sup>U de 50 ppb définissant le contenu radioactif maximal.

##### Paramètre de l'emballage et de l'aménagement interne important pour l'étude

La distance la plus courte entre l'assemblage et la surface externe de la coque est considérée.

##### Méthode de calcul

Les débits d'équivalent de dose ont été déterminés à l'aide d'un code de calcul mettant en œuvre une méthode déterministe d'atténuation en ligne droite.

##### Résultat de l'étude

Le respect du critère de débit d'équivalent de dose en condition de transport de routine est garanti pour le contenu radioactif maximal.

#### 5.2. Conditions normales de transport

Les endommagements en épreuve de chute réglementaire de 0,9 m qui peuvent avoir une conséquence sur l'intensité de rayonnement maximale sont les déformations de la coque externe et les déformations du berceau de l'aménagement interne.

Les déformations après l'épreuve de chute de 0,9 m sont calculées sur la base des déformations de la coque suite à la chute de 9 m du prototype 2 de type FCC4 (voir § 3.3).

Sur la base des déformations maximales en chute réglementaire de 0,9 m, il est justifié que le critère de l'augmentation maximale du débit d'équivalent de dose au contact du colis est respecté.

## 6. Performances d'un point de vue sûreté-criticité

La sûreté criticité doit être assurée suivant la réglementation pour :

- le colis isolé en conditions de routine (c'est-à-dire tel que présenté au transport) ;
- le colis isolé en conditions normales de transport (c'est-à-dire résultant des épreuves réglementaires des conditions normales de transport) ;
- le colis isolé en condition 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.

Le nombre N de colis, tel que défini par les articles 681 et 682 de [1], que l'on peut transporter du point de vue de la sûreté-criticité, permet de déterminer l'Indice de Sûreté-Criticité (CSI) par la formule :  $CSI = 50 / (\min(N_{CNT} ; N_{CAT}))$ .

Le critère de sous-criticité retenu en colis isolé et pour les colis en nombre est le suivant :  $K_{eff} \leq 0,95$ , toutes incertitudes comprises.

Le colis endommagé est défini comme celui résultant du cumul des épreuves représentatives des conditions normales de transport et des conditions accidentelles de transport.

Le colis non endommagé est défini comme celui résultant, soit des conditions de transport en routine, soit des chutes en conditions normales de transport au vu des faibles dommages possibles sur les coques de l'emballage.

### 6.1. Emballage FCC4 chargé d'assemblages

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

- La géométrie du réseau de crayons combustibles qui résulte notamment des épreuves réglementaires ;
- les assemblages sont modélisés complets avec tous les crayons identiques ; de manière pénalisante les tubes guides sont remplacés par de l'eau ;
- pour le calcul de la modération, les crayons sont supposés répartis de façon homogène sur l'ensemble de la section fissile ;
- la densité du combustible neuf  $UO_2$  est égale à 100% de la densité théorique ;
- l'uranium peut provenir du retraitement puisque  $I^{234}U$  et  $I^{236}U$  présents dans l'URE sont des poisons qui diminuent la réactivité des assemblages et qui ne sont pas pris en compte dans l'évaluation de sûreté-criticité ;
- la colonne fissile est modélisée sous la forme d'un cylindre du diamètre maximal des pastilles sur toute la hauteur fissile et la gaine est modélisée à son diamètre minimal sans jeu entre la pastille et la gaine ;
- les colis ne peuvent contenir qu'un ou deux assemblages du même type et d'enrichissement maximum :
  - 5 % en  $^{235}U$  pour les assemblages de réseau 17x17,
  - 4,5 % en  $^{235}U$  pour les assemblages de réseau 16x16 et 18x18.

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

- La géométrie de l'emballage ; l'emballage non endommagé est modélisé avec sa coque externe. L'emballage endommagé est modélisé sans sa coque externe ;
- la section de l'emballage et la cavité neutronique restent inchangées à l'issue des épreuves réglementaires ;
- la composition de la résine neutrophage résultant notamment des conditions réglementaires de feu pour le colis endommagé.

### **Hypothèses importantes pour l'étude**

#### **Colis isolé**

- Le colis isolé est modélisé dans un modèle tranche en section centrale du colis ;
- le colis non endommagé est rempli d'eau entouré d'un réflecteur de 20 cm d'eau ;
- le colis endommagé est entouré d'un réflecteur de 20 cm d'eau. L'espace entre la cavité et la coque externe est :
  - Soit en eau (le colis est également en eau),
  - Soit rempli avec du vide (la vidange différentielle du colis est considérée).

#### **Colis en nombre**

- L'agencement de 5 N colis en conditions normales de transport est pris en compte en considérant un réseau infini de colis non endommagés. Des conditions de réflexion totale sont appliquées sur toutes les faces externes d'un seul colis modélisé en trois dimensions. L'espace entre la cavité et la coque est :
  - Soit en eau,
  - Soit rempli avec du vide : colis en vidange différentielle ;
- l'agencement de 2 N colis en conditions accidentelles de transport est pris en compte en considérant un réseau d'un nombre fini de colis endommagés en contact modélisés en trois dimensions ; un réflecteur de 20 cm d'eau à la périphérie du réseau est pris en compte ; dans cette configuration deux variantes sont étudiées :
  - l'intérieur du colis est vide d'eau sauf le combustible modéré par de l'eau : c'est le cas de la vidange différentielle,
  - l'intérieur du colis est rempli d'eau, le combustible est modéré par de l'eau.

La modélisation retenue pour le colis endommagé tient compte d'une expansion du réseau de crayons combustibles sur une longueur enveloppe résultant des conclusions des épreuves réglementaires de cumul de chutes.

### **Méthode de calcul :**

Les calculs ont été effectués avec le schéma de calcul APOLLO2-MORET4 (standard du formulaire CRISTAL) pour le transport de combustibles UO<sub>2</sub> neufs.

### **Résultats de l'étude**

#### **Colis isolé**

- Le colis isolé respecte la marge de sous-criticité  $K_{eff} \leq 0,95$  toutes incertitudes comprises.

#### **Colis en nombre**

- L'agencement d'un nombre infini de colis en conditions normales de transport respecte le critère de  $K_{eff} \leq 0,95$  toutes incertitudes comprises, même dans le cas en vidange différentielle.

- L'agencement de 2 N de colis en conditions accidentelles de transports respecte le critère de  $K_{\text{eff}} \leq 0,95$  toutes incertitudes comprises (avec  $N = 6$  ou  $80$  suivant le type d'assemblage).

La sûreté-criticité est assurée pour les emballages FCC4 chargés d'assemblages 17x17 XL, 17x17 XLR, 17x17 de type EPR, 17x17 de type GAIA avec un CSI = 0,625.

La sûreté-criticité est assurée pour les emballages FCC4 chargés d'assemblages 16x16 et 18x18 avec un CSI = 8,33.

## 6.2. Emballage FCC4 chargé de crayons en boîte à crayon ou goulotte

Les crayons non assemblés sont transportés calés en nombre dans des boîtes, qui viennent en lieu et place des assemblages.

### Paramètres du contenu importants pour l'étude

- La géométrie des crayons combustibles qui restent intègres ;
- l'enrichissement maximum : 5 % en  $^{235}\text{U}$  ;
- la densité du combustible neuf  $\text{UO}_2$  est égale à 100% de la densité théorique ;
- le nombre quelconque de crayons.

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

- Identiques à ceux définis au § 6.1.

### Hypothèses importantes pour l'étude

- Identiques à celles définies au § 6.1 en colis isolé ou en colis en nombre ;
- la boîte à crayons n'est pas modélisée. La cale radiale est modélisée par de l'eau ou de l'air selon le cas le plus pénalisant.

### Résultats de l'étude

- Le colis isolé respecte la marge de sous-criticité  $K_{\text{eff}} \leq 0,95$  toutes incertitudes comprises ;
- l'agencement d'un nombre infini de colis en conditions normales de transport et en conditions accidentelles de transport respecte le critère de  $K_{\text{eff}} \leq 0,95$  toutes incertitudes comprises.

Le nombre N pour le transport des crayons est infini en CNT et en CAT, nous avons donc CSI = 0.

Les crayons gadoliniés présentant une teneur minimale en gadolinium sur un support d'enrichissement maximal 5 % en  $^{235}\text{U}$  peuvent être transportés, quels que soient leur nombre et le type d'emballage utilisé car, le  $K_{\infty}$  de ces crayons est inférieur à 1,0, quelle que soit la modération de ceux-ci.

L'augmentation maximale admissible, du point de vue de la sûreté-criticité, de la section de la cavité des emballages FCC4 en conditions accidentelles de transport est déterminée.



## 7. Conditions d'utilisation

L'emballage est conçu pour être chargé et déchargé à sec.

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 assemblages de combustibles ou les crayons combustibles non assemblés destinés à être expédiés doivent respecter l'ensemble des caractéristiques techniques définies par le contenu autorisé ;
- l'emballage doit être en conformité avec les contrôles périodiques à effectuer ;
- le contrôle des différents éléments de l'emballage afin de vérifier que les éventuels défauts sont en conformité avec les prescriptions du chapitre du dossier de sûreté concernant les spécifications relatives à l'emballage ;
- le contrôle de l'absence d'eau ou de corps étranger non autorisé dans le fond de la coque inférieure ;
- le contrôle de l'absence de décollement de peinture sur les parties courantes de l'emballage ;
- la vérification de la mise en place et du système de verrouillage interne ;
- la vérification du calage des crayons et du nombre maximum de rangées de crayons chargées dans la boîte à crayons ;
- la vérification de la bonne position et de la bonne fermeture du couvercle ;
- la vérification que l'intensité du rayonnement au contact et que la contamination de surface extérieure sont inférieurs aux critères d'intensité de rayonnement et de contaminations définis par la réglementation ;
- la mesure de l'intensité de rayonnement à 1 m pour la détermination de l'indice de transport ;
- la vérification de la conformité réglementaire de l'étiquetage et du marquage des emballages ;
- le calage et l'arrimage des colis doivent respecter les critères et les exigences du dossier de sûreté ;
- la vérification que le mode de transport est adapté à l'indice de transport, à l'indice de sûreté-criticité et à l'activité du contenu ;
- pour les chargements au-delà de 5 ans après le dernier entretien périodique, la vérification sans démontage du bon état général de la boulonnerie.

## 8. Programme d'entretien périodique

### 8.1. Emballage FCC4 version 1 série 400 ou FCC4 version 2

L'emballage est soumis au programme d'entretien périodique qui est défini en fonction de deux types de périodicité, suivant ce qui est le plus restrictif : le nombre de cycles de transport réalisés et la durée d'utilisation.

Le programme d'entretien comprend notamment :

- la vérification du bon état général de l'emballage et remplacement de tout composant non conforme ;
- le contrôle des soudures de sûreté sollicitées en transport ;
- le contrôle de l'état des composants des systèmes vissés ou boulonnés, de l'état des axes, des gonds, des arrêts d'axes, des liaisons, des systèmes de verrouillage en général et du système de blocage à la verticale de l'aménagement interne. Un remplacement de tous les boulons de liaison des 2 demi-coques est effectué suivant un nombre de cycles de transports spécifié dans le dossier de sûreté ;
- la recherche des défauts de peinture et réparation le cas échéant ;
- la vérification du bon aspect des amortisseurs ;

- le contrôle de l'absence de défauts des soudures des amortisseurs suivant un nombre de cycle de transports ou une durée d'utilisation spécifiée dans le dossier de sûreté afin de vérifier le maintien de leurs fonctions de sûreté.

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.

## 8.2. Emballage FCC4 version 1 série 600

L'emballage est soumis au programme d'entretien périodique suivant ce qui est le plus restrictif : le nombre de cycles de transport réalisés et la durée d'utilisation.

### 8.2.1. Entretien de base

Le programme d'entretien de base reprend l'ensemble de contrôles de l'emballage FCC4 version 1 série 400 ou FCC4 version 2 du § 8.1, hormis le contrôle de l'absence de défauts des soudures des amortisseurs qui doivent être effectués pour le FCC4 version 1 série 600 à chaque entretien périodique de base.

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.

### 8.2.2. Entretien intermédiaire

L'emballage est soumis à un entretien intermédiaire pour chaque rotation réalisée après la durée maximale entre deux entretiens de base des emballages FCC4 version 1 série 400 ou FCC4 version 2 du § 8.1, qui comprend notamment :

- la vérification du bon état général de l'emballage et remplacement de tout composant non conforme ;
- l'examen visuel sur peinture des soudures de sûreté des zones accessibles des deux demi-coques incluant la détection de défauts si il y a présence de boursouffure, de craquelure ou absence de peinture ;
- le contrôle sans démontage de l'état des arrêts d'axe, des liaisons, et du système de blocage à la verticale de l'aménagement interne ;
- recherche des défauts de peinture et réfection le cas échéant.

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.

## 9. Programme d'assurance qualité

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.

## 10. Références

- [1] Règlements de transport des matières radioactives, Agence Internationale de l'Energie Atomique – Prescriptions, SSR 6 (Rév. 1) - Edition de 2018.