

Orano NPS DOSSIER DE SURETE COG-OP-30B	Diffusion limitée Orano - Autorités CARACTERISTIQUES DE PERFORMANCES DU COLIS			 orano
	Préparation	Date	Signature	
	Vérification	Date	Signature	
Identification :		DOS-20-034609-015	Vers. 1.0	Page 1 / 23

Sommaire

État des révisions	2
1. Objet	3
2. Description 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 confinement	14
6. Performances d'un point de vue radioprotection	18
7. Performances d'un point de vue sûreté-criticité	20
8. Conditions d'utilisation	22
9. Programme d'entretien périodique	22
10. Programme d'assurance qualité	23
11. Références	23

État des révisions

Rév.	Date	Objet et historique des révisions	Préparé par / Vérifié par
Référence SAP : DOS-08-00117711-002			
0	29/11/2016	Création du document.	[REDACTED]
1	04/2017	Précision sur l'utilisation des manilles sur la génératrice supérieure de la demi-coque supérieure. Ajout lors du programme d'entretien périodique : <ul style="list-style-type: none"> - d'un contrôle par ressuage des ceintures extérieures ; - d'un examen plus poussé de la conformité du système de fermeture ; - d'un test d'étanchéité des bouchons fusibles. 	[REDACTED]
Nouvelle référence : DOS-20-034609-015			
Version	Date	Objet et historique des révisions	Préparé par / Vérifié par
1.0	Voir 1 ^{ère} page	Suppression de la référence au TS-R-1 de l'AIEA. Mise à jour des versions applicables des normes : <ul style="list-style-type: none"> - ANSI N14.1 (2012 → 2019) - ISO 7195 (2005 → 2020) Mise à jour des contenus de référence Ajout de précision sur l'arrimage Mise à jour de l'évaluation des performances d'un point de vue mécanique : <ul style="list-style-type: none"> - Ajout d'une analyse par calcul numérique de l'intégrité de la vanne et du bouchon à la température maximale des CNT - Complément sur le comportement des matériaux amortisseurs sur la plage des températures CNT de l'emballage Mise à jour de l'évaluation des performances d'un point de vue thermique : <ul style="list-style-type: none"> - Prise en compte de décentrement radial et axial - Mise à jour de l'étude CNT en configuration pied de cuve 	[REDACTED]

1. OBJET

L'objet de ce chapitre est de décrire les caractéristiques de performances du modèle de colis constitué d'une coque COG-OP-30B contenant un cylindre 30B destiné au transport par voie routière, ferroviaire ou maritime d'hexafluorure d'uranium (UF_6) enrichi au maximum jusqu'à 5% en ^{235}U .

2. DESCRIPTION ET DEFINITIONS

2.1. Description du colis

Le colis est constitué d'une surprotection appelée coque COG-OP-30B, contenant un cylindre 30B chargé d'hexafluorure d'uranium (UF_6). La coque COG-OP-30B et le cylindre 30B forment l'emballage, et l' UF_6 le contenu.

Ce colis est destiné principalement au transport de l'hexafluorure d'uranium (UF_6), enrichi au maximum jusqu'à 5% en ^{235}U et provenant d'uranium naturel ou d'uranium de retraitement, entre les usines d'enrichissement de l'uranium et les usines de fabrication de combustible nucléaire.

Les dimensions générales hors tout du colis sont :

- Longueur : 2,42 m,
- Largeur : 1,34 m,
- Hauteur : 1,356 m.

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

En fonction de la nature de l'hexafluorure d'uranium, le type de colis requis est défini dans le tableau ci-dessous :

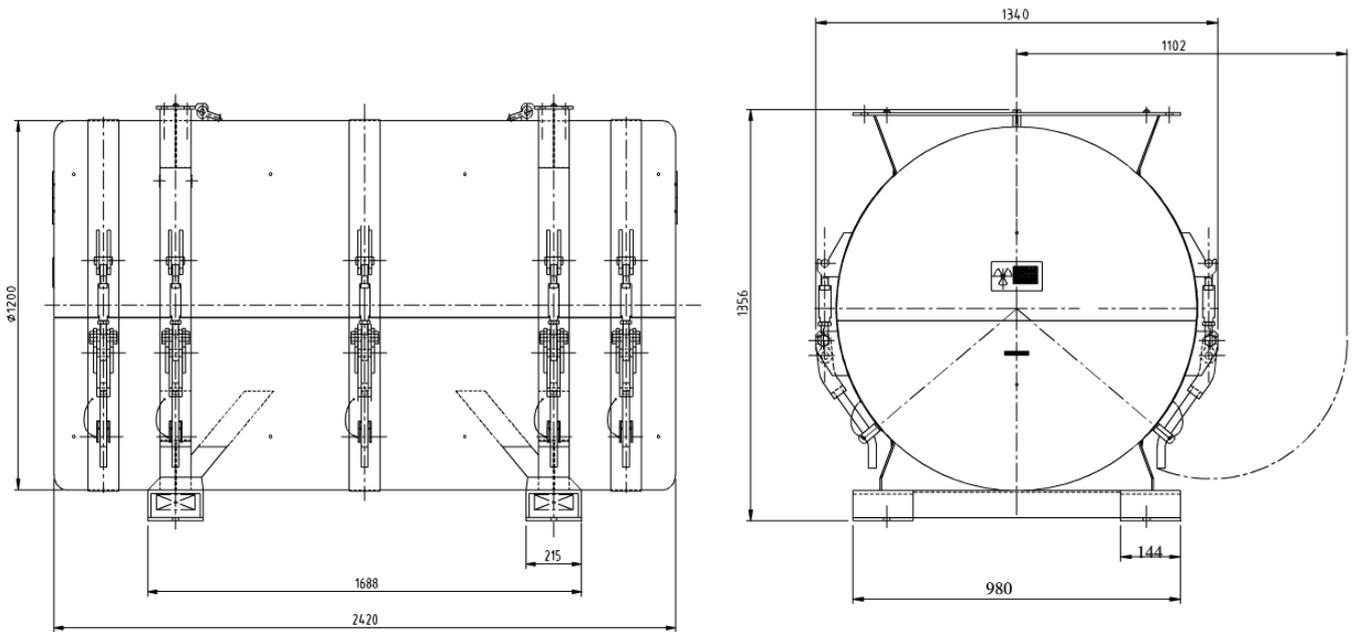
Nature de l' UF_6 (1)	<i>Enriched Commercial</i> Grade UF_6 d'après <1>	UF_6 provenant d'uranium issu du retraitement ($A_2 < 1 A_2$)	UF_6 provenant d'uranium issu du retraitement ($A_2 > 1 A_2$)
Fissile excepté	IP-2, A ou B(U)	A (pied de cuve uniquement)	B(U)
Fissile	IP-2, A ou B(U) + colis pour matières fissiles	A (pied de cuve uniquement) + colis pour matières fissiles	A ou B(U) + colis pour matières fissiles

2.2. Description de l'emballage

Les principaux composants de l'emballage sont la coque COG-OP-30B et le cylindre 30B.

Coque COG-OP-30B

La coque COG-OP-30B, de forme cylindrique, est présentée sur la figure ci-dessous :



La coque COG-OP-30B est composée de deux demi-coques enfermant le cylindre 30B et fixées l'une à l'autre par dix grenouillères. Chaque demi-coque est composée de deux demi-virolles en acier inoxydable à l'intérieur desquelles est placée une protection thermique non corrosive. Cette protection thermique aux extrémités de chaque demi-coque est remplacée par des matériaux amortisseurs de chocs garantissant l'amortissement aux chutes en conditions normales et accidentelles de transport. En partie axiale, la coque est fermée aux extrémités de l'intérieur vers l'extérieur par une tôle en acier inoxydable, puis par une protection thermique identique à celle dans la partie radiale, et enfin par une tôle externe en acier inoxydable.

Les pieds de pose de la coque sont de deux types :

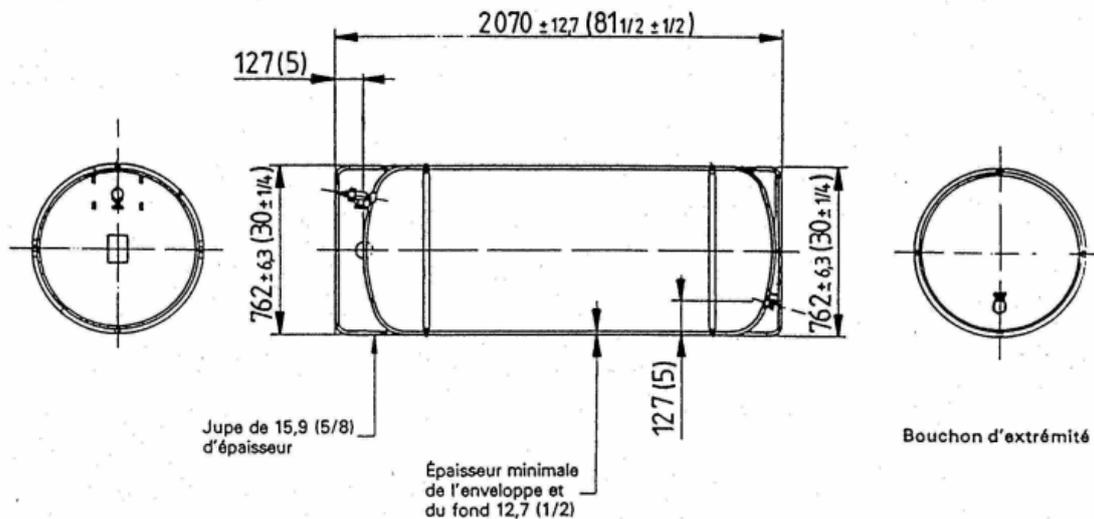
- Soit deux passages de fourches reliés à la coque par des tôles soudées sur la partie inférieure de la coque permettant la manutention du colis au moyen d'un chariot muni de fourches.
- Soit deux plans de pose constitués par une tôle en acier inoxydable remplaçant les passages de fourches.

La demi-coque supérieure est munie d'un support qui permet le gerbage d'une ou deux coques contenant ou non un cylindre vide ou chargé en condition de stockage.

Cylindre 30B

Le cylindre 30B est présenté sur la figure ci-dessous :

Dimensions en millimètres
(Dimensions en inches entre parenthèses)



La conception, la fabrication, l'utilisation et la maintenance des cylindres 30B répond aux normes suivantes :

- Norme internationale ISO 7195:2020 "Emballage pour le transport de l'hexafluorure d'uranium (UF₆)"
- Norme américaine ANSI N14.1-2019 "Uranium Hexafluoride - Packagings for Transport".

Le cylindre 30B est un réservoir spécialement conçu pour contenir de l'UF₆ et dont les principaux composants sont :

- une enveloppe constituée par une virole en acier et deux fonds soudés à la virole,
- deux jupes soudées aux extrémités de l'enveloppe,
- un bouchon vissé dans la partie inférieure d'un des deux fonds de l'enveloppe,
- une vanne vissée dans la partie supérieure du fond opposé à celui contenant le bouchon.

2.3. Description du contenu

Le contenu radioactif du cylindre 30B est composé d'hexafluorure d'uranium (UF₆) provenant d'uranium naturel ou issu du retraitement.

L'UF₆, rempli dans le cylindre 30B sous forme liquide ou gazeuse, est à l'état solide pendant le transport et est vidé du cylindre 30B à l'état liquide ou gazeux.

Les paramètres essentiels du contenu pour la sûreté et qui sont utilisés dans le dossier de sûreté sont les suivants :

- Le contenu radioactif maximal du cylindre 30B défini par le cumul d'une masse de 2277 kg d'UF₆ d'origine naturelle vieilli 5 ans et d'un pied de cuve non vieilli de 11,34 kg issu de la vidange d'un cylindre 30B chargé préalablement d'UF₆ d'origine naturelle vieilli 5 ans.
- Le taux d'enrichissement maximal en ²³⁵U de 5%.
- La pureté minimale de l'UF₆ transporté de 99,5%.
- L'activité spécifique maximale du contenu (cylindre plein) : 4,158.10⁵ Bq/g d'UF₆.
- L'activité totale maximale du contenu (pied de cuve) : 106,47 GBq.
- A₂ maximal du contenu (cylindre plein) : 25,635 A₂.

Les concentrations maximales de référence de chaque radio-isotope au remplissage du cylindre sont présentées dans le tableau suivant :

Radioéléments	Teneurs maximales pour l'UF ₆ provenant de l'uranium naturel (UNE) ⁽¹⁾	Teneurs maximales pour l'UF ₆ provenant d'uranium issu du retraitement (URE) ⁽²⁾
²³² U	1.10 ⁻⁴ µg/gU	3.10 ⁻² µg/gU
²³⁴ U	11.10 ³ µg/g ²³⁵ U	1,8.10 ³ µg/gU
²³⁵ U	5.10 ⁴ µg/gU (5%)	5.10 ⁴ µg/gU
²³⁶ U	500 µg/gU	2,768.10 ⁴ µg/gU
⁹⁹ Tc	1.10 ⁻² µg/gU	5 µg/gU

⁽¹⁾ : Ces valeurs sont en accord avec les teneurs de la norme ASTM C 996-04 dans le cas de l'UF₆ de type « Enriched Commercial Grade UF₆ ».

⁽²⁾ : Ces valeurs sont inférieures aux teneurs précisées dans la norme ASTM C 996-04 dans le cas de l'UF₆ de type « Enriched Reprocessed UF₆ ».

2.4. Enceinte de confinement

Le cylindre 30B constitue l'enveloppe de confinement de l'emballage. Cette enveloppe est constituée d'une épaisseur d'acier avec implantation d'une vanne sur un des fonds bombés et d'un bouchon sur l'autre fond bombé.

2.5. Système d'isolement

Le système d'isolement, pour le cas d'un cylindre plein d'UF₆, est défini par :

- la matière fissile (masse, pureté, enrichissement en ²³⁵U de l'uranium, forme chimique),
- le cylindre 30B (dimension interne du cylindre et épaisseur d'acier inférieure à la somme totale de l'épaisseur minimale du cylindre 30B et de l'épaisseur nominale de la tôle interne de la coque en acier).

Le système d'isolement, pour le cas d'un pied de cuve, est défini par :

- la matière fissile (masse, pureté, enrichissement en ²³⁵U de l'uranium, forme chimique),
- le cylindre 30B (dimension interne du cylindre et épaisseur minimale d'acier du cylindre 30B).

2.6. Bilan des masses

La masse maximale autorisée du colis en transport est de 4232 kg.

3. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE MECANIQUE

3.1. Conditions de transport de routine

Arrimage

La coque COG-OP-30B est fixée sur le moyen de transport à l'aide d'un berceau de transport non solidaire de la coque. La coque est posée sur le berceau et deux sangles en partie supérieure permettent de maintenir la coque sur le berceau. L'intégrité du colis vis-à-vis de son arrimage est vérifié en prenant en compte la Tension Maximale d'Utilisation (TMU) des sangles ainsi que leur position.

L'accélération longitudinale sollicite les pieds de la coque et ses ceintures de fermeture alors que les accélérations verticales et latérales sollicitent les goussets entre les viroles externe et interne de la coque. Leur combinaison est sans incidence sur les niveaux de contraintes obtenus.

La tenue des éléments de la coque reprenant les efforts (les pieds de la coque et les ceintures de fermeture dans le cas d'accélération longitudinales et les goussets entre la virole externe et interne dans le cas d'accélération verticales et latérale) est justifiée pour des chargements statiques représentatifs des accélérations vues en transport, ainsi qu'à la fatigue suite au cumul des cycles de sollicitation en transport.

Manutention

Le colis peut être manutentionné au moyen d'un chariot élévateur par l'intermédiaire d'un passage de fourches.

La tenue mécanique du colis au levage par le passage de fourches est justifiée pour des chargements statiques représentatifs des accélérations de manutention.

Les études réalisées en conditions de transport de routine permettent de justifier la tenue des liaisons soudées de la coque pour une utilisation de 40 ans.

Tenue à la pression

L'enveloppe de confinement retient le contenu radioactif même en cas de baisse de la pression ambiante puisque le cylindre 30B est éprouvé à une pression d'épreuve de 27,6 bars (conformément à la réglementation) et que la pression interne maximale du cylindre 30B est inférieure à cette pression en conditions normales et accidentelles de transport.

3.2. Conditions normales de transport

Les analyses de sûreté étudient l'épreuve réglementaire de chute libre de 1,2 mètre de hauteur cumulée à une chute libre de 0,3 mètre de hauteur. Le cumul des chutes de 0,3 mètre et de 1,2 mètre n'est plus requis par la réglementation et est donc considéré de manière pénalisante.

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

Principe de définition des prototypes de chute

Les différences entre les prototypes et le modèle de colis sont les suivantes :

- Le contenu est modélisé par un lest permettant de simuler en masse et en volume le chargement maximal d'UF₆ du colis. Cette différence est considérée sans conséquence sur le comportement en chute du colis et a été prise en compte dans l'analyse thermique du colis.
- Les prototypes de coque COG-OP-30B présentent des différences par rapport aux coques COG-OP-30B. La plupart de ces différences n'ont pas d'impact sur la sûreté du colis, les autres différences sont prises en compte dans l'analyse de sûreté du colis.

Séquences de chutes

Les épreuves de chute ont été réalisées sur deux prototypes à l'échelle 1 :

- Le premier prototype a subi une chute sur le coin côté vanne, avec le centre de gravité du colis à la verticale du point d'impact (effort maximal sur le coin côté vanne).
- Le deuxième prototype a subi deux chutes sur le coin côté bouchon, avec un angle d'inclinaison qui maximise l'effet de fouettement sur la vanne lors du deuxième impact.

La chute libre de 0,3 mètre a été testée cumulativement sur chaque prototype après la chute libre de 1,2 mètre :

- Le premier prototype a subi une chute sur le coin côté vanne, avec le centre de gravité du colis à la verticale du point d'impact (effort maximal sur le coin côté vanne).
- Le deuxième prototype a subi une chute sur le coin côté bouchon, avec un angle d'inclinaison (45°) qui maximise l'effet de fouettement sur la vanne lors du deuxième impact.

Endommagements

Aucune déformation n'a été observée sur le cylindre 30B suite à ces chutes.

Les flux de fuite mesurés à l'issue des chutes montrent le maintien de l'étanchéité du cylindre après les épreuves réglementaires.

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 dans les conditions normales et accidentelles de transport.

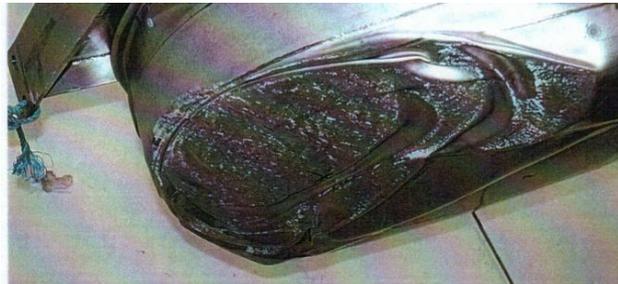
Ensemble des chutes étudiées

Des épreuves de chutes libres représentatives des conditions accidentelles de transport ont été effectuées sur chacun des deux prototypes ayant auparavant subi les épreuves des conditions normales de transport.

Ces chutes couvrent les cas de chute les plus sévères et sont cumulées de façon à causer le maximum de dommages sur l'emballage.

Séquence de chutes pour le prototype n°1

La 1^{ère} chute est une chute libre sur coin de 9 mètres de hauteur cumulée au même endroit que celui des chutes représentatives des conditions normales de transport. Pour ce cas de chute (voir photo ci-dessous), la zone du colis testée correspond au côté vanne.



La 2^{ème} chute est une chute libre sur coin de 1 mètre de hauteur sur poinçon cumulée au même endroit que celui de la 1^{ère} chute. Pour ce cas de chute (voir photo ci-dessous), la zone du colis testée correspond au côté vanne.



Les flux de fuite mesurés à l'issue de ces deux premières chutes montrent le maintien de l'étanchéité du cylindre.

La 3^{ème} chute est une chute libre axiale de 9 mètres de hauteur côté vanne.



La 4^{ème} chute est une chute libre de 1 mètre de hauteur sur poinçon cumulée au même endroit que celui de la 3^{ème} chute. Pour ce cas de chute avec angle (voir photo ci-dessous), la zone du colis testée correspond à la vanne du cylindre.



Les flux de fuite mesurés à l'issue de ces deux dernières chutes montrent le maintien de l'étanchéité du cylindre.

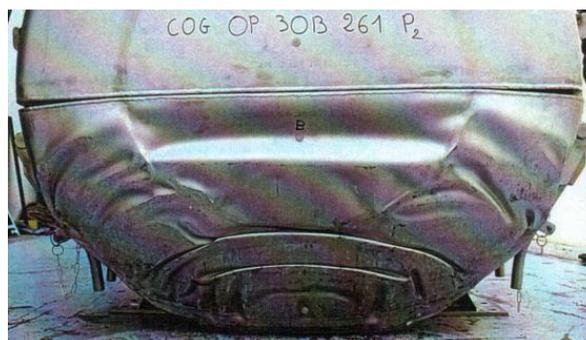
Les chutes effectuées sur le premier prototype couvrent tous les cas de chutes possibles côté vanne.

La vanne du cylindre n'a pas été impactée au cours des essais de chute. Les flux de fuite mesurés à l'issue des chutes montrent le maintien de l'étanchéité du cylindre après les épreuves réglementaires.

Les déformations relevées sur le cylindre 30B suite à ces chutes correspondent à un léger écrasement de la jupe du cylindre 30B.

Séquence de chutes pour le prototype n°2

La 1^{ère} chute est une chute libre sur coin de 9 mètres de hauteur cumulée au même endroit que celui des chutes représentatives des conditions normales de transport. Pour ce cas de chute (voir photos ci-dessous), la zone du colis testée correspond au côté bouchon.



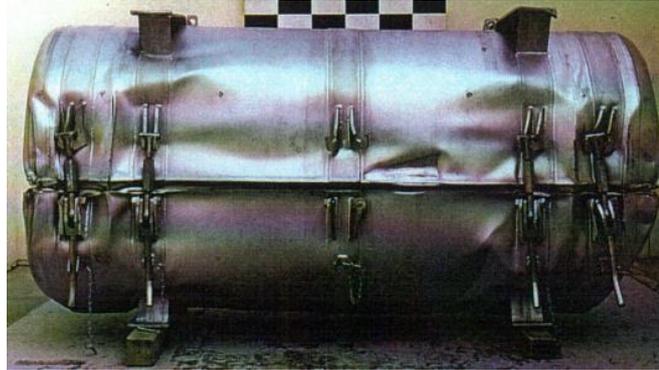
La 2^{ème} chute est une chute libre sur coin de 1 mètre de hauteur sur poinçon cumulée au même endroit que celui de la 1^{ère} chute. Pour ce cas de chute (voir photos ci-dessous), la zone du colis testée correspond au côté bouchon.



Les flux de fuite mesurés à l'issue de ces deux premières chutes montrent le maintien de l'étanchéité du cylindre.

La 3^{ème} chute est une chute libre sur coin de 1 mètre de hauteur sur poinçon sur la fermeture centrale. Cette chute a permis d'endommager le système de fermeture avant la réalisation de la chute de 9 mètres.

La 4^{ème} chute est une chute libre de 9 mètres de hauteur sur fermetures avec effet de fouettement sur le côté de la vanne.



Les flux de fuite mesurés à l'issue de ces deux dernières chutes montrent le maintien de l'étanchéité du cylindre.

Les chutes n°1 et n°2 réalisées sur le deuxième prototype couvrent tous les cas de chutes possibles côté bouchon (la jupe côté bouchon est moins longue et a donc un risque de flambement plus faible que côté vanne). Enfin, les chutes n°3 et n°4 testées sur le deuxième prototype valident tous les cas de chutes sur les fermetures, ainsi que les chutes latérales.

Le bouchon du cylindre a été impacté au cours des essais de chute. Néanmoins, les flux de fuite mesurés à l'issue des essais montrent le maintien de l'étanchéité du cylindre.

Tenue des colis en température

La coque COG-OP-30B contient 2 types de matériaux amortisseurs remplissant des caissons constitués de tôles en acier. Les essais de chute, destinés à vérifier la tenue mécanique du modèle de colis, se sont déroulés à température ambiante. Sur la base de ces essais de chute, le comportement de la coque au maximum et minimum de températures réglementaires est étudié.

Les calculs d'écrasement et l'analyse numérique effectués à la température maximale représentative des conditions normales de transport montrent qu'en prenant en compte les séquences de chutes pénalisantes représentatives des conditions normales et accidentelles de transport, les déformations de la coque sont limitées, l'absence de contact de la vanne est vérifiée et l'effort d'impact du bouchon est inférieur à l'effort maximal entraînant la perte d'étanchéité du colis. La fonction de protection du cylindre, apportée par la coque, est assurée. La tenue mécanique de l'enceinte de confinement est alors également garantie.

Les calculs d'accélération subies par la coque et le cylindre 30B à basse température montrent que les accélérations ne remettent pas en cause la tenue mécanique du cylindre 30B. Dans le cas d'une chute latérale, il est démontré que la prise en considération des basses températures n'influe que très peu sur les niveaux d'accélération rencontrés par la coque par rapport aux accélérations subies en chute latérale à température ambiante. Pour les chutes axiale et oblique, les accélérations subies par la coque restent inférieures aux accélérations maximales admissibles par le cylindre 30B. Pour les chutes sur poinçon, les conclusions sur l'intégrité de la vanne et du bouchon sont couvertes par les cas aux températures maximales des conditions normales de transport dans la mesure où les caractéristiques des matériaux sont plus élevées à basse température qu'à la température maximale des CNT.

Conclusions

Suites aux épreuves réglementaires de chute, les conclusions sont les suivantes :

- Le modèle de coque permet d'assurer une tenue mécanique satisfaisante du colis.

- La vanne n'est pas impactée au cours des essais de chutes réglementaires.
- Le bouchon hexagonal est impacté au cours des essais de chutes réglementaires. Toutefois, les efforts sont limités et le bouchon conserve son étanchéité. Le bouchon six pans creux est couvert par l'analyse du bouchon hexagonal.
- Le cylindre conserve son étanchéité à l'issue des épreuves réglementaires de chutes.

Par ailleurs, le cylindre 30B ne présente pas de risque de rupture brutale à la température minimale d'utilisation du colis.

4. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE THERMIQUE

L'analyse thermique du colis (avec cylindre rempli ou pied de cuve) en conditions normales et accidentelles de transport, vis-à-vis des prescriptions réglementaires applicables aux colis de type B pour matières fissiles, comprend :

- la détermination de la température maximale de la paroi externe du colis en conditions de routine de transport sous les effets de l'ensoleillement et de la température ambiante réglementaires ;
- la détermination de la température maximale du cylindre 30B et de l'UF₆ en conditions de routine de transport ;
- la détermination de la température minimale de l'UF₆ lorsqu'elle atteint son maximum en conditions de routine de transport ;
- la détermination de la température maximale du cylindre 30B et de l'UF₆ en conditions accidentelles de transport sous les effets du feu réglementaire ;
- la détermination de la pression maximale à l'intérieur du cylindre 30B en conditions accidentelles de transport.

4.1. Colis avec cylindre 30B rempli en conditions de transport de routine

L'étude consiste en l'analyse thermique par calculs numériques en conditions de transport de routine de la coque COG-OP-30B et de son cylindre 30B avec un chargement d'UF₆ de masse réduite (de manière pénalisante).

Les températures maximales de la paroi extérieure du colis, du cylindre 30B et de l'UF₆ sont obtenues à l'équilibre en régime établi. La puissance thermique apportée provient de l'ensoleillement réglementaire appliqué sur le colis.

Paramètres du contenu importants pour l'étude

La puissance dégagée par le contenu du cylindre 30B est très faible. Elle est donc négligée face à l'ensoleillement.

De manière pénalisante, le contenu n'est pas modélisé : son inertie n'est donc pas prise en compte dans l'étude, ce qui est pénalisant.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

L'emballage est en position horizontale.

La géométrie de la coque est construite d'après le plan de concept. Pour des raisons de symétrie, la modélisation ne prend en compte qu'un demi-modèle.

Toutes les parois et plaques transverses en acier sont modélisées car elles constituent les principaux conducteurs et ponts thermiques dans le modèle.

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- La température ambiante maximale réglementaire de 38 °C.
- L'ensoleillement réglementaire appliqué sur les surfaces extérieures de la coque avec une variation périodique réglementaire de 12 h par jour.
- Le cylindre 30B centré radialement et axialement dans la coque.

Méthode de calcul

Les géométries, les maillages, les calculs et les post traitements sont entièrement réalisés à l'aide du logiciel I-DEAS interfacé avec le solveur thermique TMG.

Résultats de l'étude

La température maximale de la paroi externe de la coque en conditions de transport de routine sous utilisation exclusive est inférieure à la limite réglementaire de 85°C.

La température maximale de l'UF₆ en conditions de transport de routine est en dessous de son point de fusion et est inférieure à la température maximale d'utilisation du cylindre 30B.

4.2. Colis avec cylindre 30B rempli en conditions normales de transport

Les épreuves réglementaires relatives aux conditions normales de transport n'affectent pas le comportement thermique du colis. L'étude thermique du colis en conditions normales de transport est couverte par l'étude thermique en conditions accidentelles de transport.

4.3. Colis avec cylindre 30B rempli en conditions accidentelles de transport

Un essai d'incendie a été réalisé sur un prototype à l'échelle 1 à 800°C pendant 30 minutes minimum conformément à la réglementation.

Une étude analytique a ensuite été réalisée afin de tenir compte des conditions réglementaires qui n'ont pas pu être atteintes lors de l'essai d'incendie (température ambiante de 38°C et prise en compte de l'ensoleillement réglementaire et du contenu d'UF₆). Cette étude a permis de calculer la température maximale du contenu, de la vanne et du bouchon ainsi que la pression interne à partir de la quantité de chaleur apportée au cylindre 30B et à son contenu lors de l'essai.

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Le prototype utilisé pour l'essai d'incendie était chargé d'un lest permettant de simuler en masse et en volume le chargement maximal d'UF₆ du colis.

L'étude analytique prend en compte un cylindre rempli d'UF₆.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Le prototype utilisé pour l'essai d'incendie a auparavant subi les essais de chutes réglementaires.

Hypothèses importantes pour l'étude

Les hypothèses concernant l'essai d'incendie sont les suivantes :

- L'essai a été réalisé à une température ambiante de 14,3°C.
- L'essai a été réalisé avec une température moyenne de flamme de 873,2°C.

Les hypothèses prises en compte dans l'étude analytique sont les suivantes :

- La température ambiante est de 38°C avec l'ensoleillement réglementaire conformément à la réglementation.
- En prenant en compte les conditions initiales réglementaires, l'UF₆ est considéré être à la température maximale des conditions normales de transport calculée dans l'analyse thermique.
- De façon à maximiser la température à l'intérieur du cylindre, le chargement d'UF₆ pris en compte correspond au chargement minimal soit 455 kg.
- La transmission de la chaleur est supposée s'effectuer essentiellement par conduction à l'intérieur du colis.

Méthode de calcul

L'étude analytique permettant le recalage entre l'essai d'incendie réalisé et l'épreuve réglementaire demandée est effectuée par la méthode suivante :

- Détermination de la quantité de chaleur transmise au cylindre 30B et à son lest à partir des résultats de l'essai d'incendie.
- Calcul de la température maximale de l'UF₆ en transposant la quantité de chaleur précédemment obtenue au cas du chargement minimal d'UF₆ initialement placé dans les conditions de routine de transport et subissant l'épreuve de feu réglementaire.
- Calcul de la pression maximale à l'intérieur du cylindre 30B à partir de la température maximale de l'UF₆ calculée.
- Calcul de la température maximale de la vanne et du bouchon par recalage avec les valeurs maximales mesurées lors de l'essai d'incendie.

Résultats de l'étude

La température moyenne maximale atteinte par l'UF₆ en conditions accidentelles de transport est inférieure à la température maximale de conception du cylindre 30B.

Les températures maximales de la vanne et du bouchon en conditions accidentelles de transport sont inférieures à leur température limite d'utilisation (température limite de l'étamage des filetages de la vanne et du bouchon).

La pression maximale à l'intérieur du cylindre 30B est inférieure à la pression d'épreuve du cylindre.

4.4. Colis avec pied de cuve en conditions de transport de routine, en conditions normales et accidentelles de transport

L'étude consiste en l'analyse thermique par calculs numériques en conditions de routine, normales et accidentelles de transport de la coque COG-OP-30B et de son cylindre 30B avec un chargement d'UF₆ de masse réduite. Ce chargement correspond au pied de cuve qui est le résidu d'UF₆ après vidange du cylindre.

L'objectif principal est de démontrer la tenue en température des étamages des filetages de la vanne et du bouchon d'un cylindre 30B vide en conditions de feu. Une étude de sensibilité est également menée sur la valeur de la conductivité du matériau isolant de la coque afin de tenir compte des dommages résultant des épreuves de chutes.

Les épreuves réglementaires relatives aux conditions normales de transport n'affectent pas le comportement thermique du colis. L'étude thermique du colis en conditions normales de transport est couverte par l'étude thermique en conditions accidentelles de transport.

Paramètres du contenu importants pour l'étude

La puissance dégagée par le contenu du cylindre 30B est très faible. Elle est donc négligée face à l'ensoleillement et au feu.

Le contenu n'est pas modélisé : son inertie n'est donc pas prise en compte dans l'étude.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

La géométrie de la coque est construite d'après le plan de concept. Pour des raisons de symétrie, la modélisation ne prend en compte qu'un demi-modèle.

Toutes les parois et plaques transverses en acier sont modélisées car elles constituent les principaux conducteurs et ponts thermiques dans le modèle.

Hypothèses importantes pour l'étude

Les hypothèses liées à la configuration en conditions de routine de transport sont les suivantes :

- Emballage en position horizontale.
- Le cylindre 30B centré radialement et axialement dans la coque.
- La température ambiante maximale réglementaire de 38 °C.
- L'ensoleillement réglementaire appliqué sur les surfaces extérieures de la coque avec une variation périodique réglementaire de 12 h par jour, pour les calculs des conditions de routines de transport seules.

Celles liées aux configurations en conditions accidentelles de transport sont les suivantes :

- ensoleillement réglementaire appliqué continu avant et après feu, dans le cas des calculs en conditions de feu (initialisation de la phase de feu et épreuve de feu) ;
- Emballage en position horizontale ou en position verticale ;
- température ambiante maximale réglementaire de 800 °C pendant 30 minutes ;
- cylindre 30B décentré radialement simulant un contact direct en partie basse entre le cylindre 30B et la coque ;
- cylindre 30B décentré axialement avec un jeu plus faible côté vanne que celui issu des chutes réglementaires ;
- poinçonnement traversant la tôle externe et tout le matériau amortisseur d'extrémité au droit de la vanne du cylindre 30B.

Deux configurations sont étudiées : une première en conditions de routine de transport avec l'emballage en position horizontale et une seconde en conditions accidentelles de transport dont les échanges externes couvrent les trois positions possibles de l'emballage (position horizontale, position verticale vanne en haut et position verticale vanne en bas).

Une étude de sensibilité sur la conductivité du matériau isolant de la coque est réalisée.

La température ambiante maximale réglementaire et l'ensoleillement réglementaire sont pris en compte.

Méthode de calcul

Les géométries, les maillages, les calculs et les post traitements sont entièrement réalisés à l'aide du logiciel de CAO et de maillage NX-I5 interfacé avec le code de calcul thermique TMG pour les conditions normales de transport et avec le logiciel I-DEAS interfacé avec le solveur thermique TMG pour les conditions accidentelles de transport.

Résultats de l'étude

L'analyse thermique du colis avec son pied de cuve soumis aux conditions de routine de transport suivies des conditions accidentelles de transport montre que :

- La température maximale de la vanne en conditions accidentelles de transport obtenue est inférieure à la température de fusion de l'étamage de la vanne et est donc sans conséquence sur le confinement et sur la tenue de la vanne.
- La pression maximale atteinte à l'intérieur du cylindre 30B en conditions accidentelles de transport est inférieure à la pression d'épreuve du cylindre 30B.

5. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE CONFINEMENT

Les critères réglementaires retenus sont les suivants :

- Pour les colis de type IP-2 et de type A, ceux-ci ne doivent pas entraîner la perte ou la dispersion du contenu radioactif suite aux épreuves réglementaires.
- Pour les colis de type B, le relâchement d'activité radioactive ne doit pas être supérieur à :
 - o 10^{-6} A₂/h suite aux épreuves représentatives des conditions normales de transport.
 - o A₂ en une semaine suite aux épreuves représentatives des conditions accidentelles de transport.
- Pour les colis pour matières fissiles, l'éventuelle infiltration d'eau à l'intérieur du cylindre 30B, à la suite du cumul des épreuves représentatives des conditions normales et accidentelles de transport, doit être compatible avec la sous-criticité du colis.

Les mesures du taux de fuite réalisées après les épreuves mécaniques et thermiques ont montré le maintien de l'étanchéité du colis, ce qui permet de justifier le respect des critères pour les colis de type IP-2 et de type A.

Les critères réglementaires de relâchement d'activité pour les colis de type B sont vérifiés par calcul analytique du flux de fuite maximal (en conditions normales et accidentelles de transport) en suivant la méthodologie décrite dans la norme ISO 12807.

L'épreuve d'immersion est étudiée par calcul analytique des quantités d'eau pénétrant dans le cylindre 30B lors des épreuves d'immersion (15 mètres pendant 8 heures et 0,9 mètre pendant une semaine) et comparaison avec la quantité d'eau maximale admissible garantissant la sous-criticité du colis.

5.1. Pression maximale à l'intérieur du cylindre plein

La détermination des pressions maximales à l'intérieur du cylindre 30B en conditions de routine et accidentelles de transport pour un cylindre plein est réalisée. Ces pressions sont inférieures aux pressions maximales d'utilisation du cylindre, définies dans les normes ISO 7195 et ANSI 14.1.

5.2. En conditions normales de transport (hors cas du cylindre avec pied de cuve)

L'étude consiste à calculer, à partir des conditions de température et de pression de l'emballage, le flux de fuite minimum à respecter pour vérifier le critère réglementaire de 10^{-6} A₂/h. Ce flux de fuite est ensuite comparé au flux de fuite garanti en transport et aux flux de fuite mesurés après les essais réglementaires.

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Le confinement du cylindre 30B chargé d'hexafluorure d'uranium enrichi (UF₆) est étudié pour un colis de type B constitué du contenu le plus pénalisant en termes d'activité totale.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les principales caractéristiques utilisées sont les suivantes :

- la température maximale du contenu radioactif et de l'enceinte de confinement et la température minimale lorsqu'elle atteint son maximum en conditions normales de transport (issue de l'analyse thermique) ;
- la pression maximale à l'intérieur de l'enceinte de confinement en conditions normales de transport.

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- La pureté de l'UF₆ est de 100%.
- La pression à l'intérieur du cylindre 30B issue des conditions normales de transport.
- La pression externe minimale du colis est de 0,6 bar correspondant à la pression minimale réglementaire.

Méthode de calcul

Le taux de fuite maximum est déterminé analytiquement selon la méthodologie décrite dans la norme ISO 12807.

Résultats de l'étude

Le critère réglementaire de relâchement d'activité en conditions normales de transport est respecté.

5.3. En conditions accidentelles de transport (hors cas du cylindre avec pied de cuve)

L'étude consiste à calculer, à partir des conditions de température et de pression de l'emballage, le flux de fuite minimum à respecter pour vérifier le critère réglementaire de 10^{-6} A₂ en une semaine. Ce flux de fuite est ensuite comparé au flux de fuite garanti en transport et aux flux de fuite mesurés après les essais réglementaires.

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Le confinement du cylindre 30B chargé d'hexafluorure d'uranium enrichi (UF₆) est étudié pour un colis de type B constitué du contenu le plus pénalisant en termes d'activité totale.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les principales caractéristiques utilisées sont les suivantes :

- La température maximale du contenu radioactif et de l'enceinte de confinement en conditions accidentelles de transport (issue de l'analyse thermique).
- La pression maximale à l'intérieur de l'enceinte de confinement en conditions accidentelles de transport (issue de l'analyse thermique).
- La température maximale atteinte par la vanne (issue de l'analyse thermique).
- La température maximale atteinte par le bouchon (issue de l'analyse thermique).

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- La pureté de l' UF_6 est de 100%.
- La pression à l'intérieur du cylindre 30B issue des conditions accidentelles de transport.
- La pression externe minimale du colis est de 0,6 bar correspondant à la pression minimale réglementaire.

Méthode de calcul

Le taux de fuite maximum est déterminé analytiquement selon la méthodologie décrite dans la norme ISO 12807.

Résultats de l'étude

Le critère réglementaire de relâchement d'activité en conditions accidentelles de transport est respecté.

5.4. Cas du pied de cuve

L'étude en conditions normales de transport consiste à calculer, à partir des conditions de température et de pression de l'emballage, le temps à partir duquel la pression à l'intérieur du cylindre 30B devient supérieure à la pression atmosphérique. Ce temps est ensuite comparé au temps de transport : si le temps de montée en pression est supérieur au temps de transport, il n'y a pas de relâchement d'activité.

L'étude en conditions accidentelles de transport consiste à calculer, à partir des conditions de température et de pression de l'emballage, la pression à l'intérieur du cylindre 30B lors des conditions accidentelles de transport. Si cette pression ne dépasse pas la pression atmosphérique, il n'y a pas de relâchement d'activité.

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Le confinement du cylindre 30B contenant un pied de cuve issu d' UF_6 est étudié pour un colis de type B constitué du contenu le plus pénalisant en termes d'activité totale.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Les principales caractéristiques utilisées sont les suivantes :

- La température maximale du cylindre (issue de l'analyse thermique).
- La température maximale atteinte par la vanne (issue de l'analyse thermique).
- La pression maximale à l'intérieur de l'enceinte de confinement (issue du chapitre 6A).
- Le volume libre de la cavité.

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- La pression interne du cylindre après vidange est de 0,25 bar (pression réduite maximale admissible après vidange du cylindre 30B).
- La pression externe minimale du colis est de 0,6 bar (pression atmosphérique minimale réglementaire).

- La durée de transport est de 1 an pour les conditions normales de transport.

Méthode de calcul

En conditions normales de transport, le temps de remontée de pression de la cavité de l'emballage pour atteindre la pression atmosphérique minimale est calculé analytiquement.

- Si ce temps est supérieur à la durée de transport, la cavité reste en dépression sur une durée supérieure à la durée de transport et, dans ce cas, tout relâchement d'activité est exclu.
- Si ce temps est inférieur à la durée de transport, la cavité est susceptible d'être en surpression durant le transport et, dans ce cas, un calcul de relâchement d'activité est réalisé.

En conditions accidentelles de transport, il est vérifié analytiquement que la pression à l'intérieur du cylindre ne peut pas dépasser la pression atmosphérique lors des conditions accidentelles de transport.

Résultats de l'étude

En conditions normales de transport, le temps de remontée de pression dans la cavité est supérieur à 1 an ce qui garantit qu'il n'y a pas de relâchement d'activité.

En conditions accidentelles de transport, la pression à l'intérieur du cylindre ne dépasse pas la pression atmosphérique ce qui garantit qu'il n'y a pas de relâchement d'activité.

5.5. Cas des épreuves d'immersion hors pied de cuve

L'étude consiste à calculer les masses d'eau entrant dans le cylindre 30B en conditions d'immersion (15 mètres pendant 8 heures et 0,9 mètre pendant une semaine) et à les comparer à la masse maximale admissible d'eau dans le cylindre 30B garantissant la sous-criticité du colis déterminée à partir du rapport de modération maximal H/U issu de l'analyse de sûreté-criticité.

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Le chargement d'UF₆ considéré est le contenu minimal (455 kg) afin de minimiser la quantité d'eau admissible dans le cylindre 30B.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

Le rapport de modération maximal H/U issu de l'analyse de sûreté-criticité est utilisé.

Hypothèses importantes pour l'étude

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- Le cylindre 30B est immergé en position verticale, vanne en bas.
- La pureté de l'UF₆ est d'au minimum 99,5%.
- La phase d'impuretés (0,5%) est uniquement de l'acide fluorhydrique (HF).

Méthode de calcul

La masse maximale admissible d'eau garantissant la sous-criticité du colis est calculée analytiquement en considérant le rapport de modération maximal H/U issu de l'analyse de sûreté-criticité. Les masses d'eau entrant dans le cylindre 30B lors de l'immersion sont calculés analytiquement à partir des flux de fuite déterminés lors de l'étude de relâchement d'activité.

Les cas de calcul considérés sont les suivants :

- Immersion de 8 heures du colis à une profondeur de 15 mètres.
- Immersion d'une semaine (168 heures) du colis à une profondeur de 0,9 mètre.

Résultats de l'étude

Les masses d'eau entrant dans le cylindre 30B lors de l'immersion sont inférieures à la masse d'eau maximale admissible garantissant la sous-criticité du colis.

5.6. Cas des épreuves d'immersion avec pied de cuve

L'étude consiste à calculer les masses d'eau entrant dans le cylindre 30B en conditions d'immersion (15 mètres pendant 8 heures et 0,9 mètre pendant une semaine) et à les comparer à la masse maximale admissible d'eau dans le cylindre 30B garantissant la sous-criticité du colis déterminée à partir de la masse maximale admissible de l'ensemble $\{UO_2F_2 + H_2O\}$ issue de l'analyse de sûreté-criticité (l'hydratation de l' UO_2F_2 aboutit au produit $UO_2F_2 \cdot 3H_2O$ pour lequel le rapport de modération H/U reste inchangé).

Paramètres du contenu importants pour l'étude

L'étude prend en compte un pied de cuve de 11,34 kg d' UO_2F_2 contenu dans un cylindre 30B.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

La masse maximale admissible de l'ensemble $\{UO_2F_2 + H_2O\}$ issue de l'analyse de sûreté-criticité est utilisée.

Hypothèses importantes pour l'étude

Le cylindre 30B est considéré immergé en position verticale, vanne en bas.

Méthode de calcul

Le calcul des masses maximales d'eau entrant dans le cylindre est réalisé pour les cas suivants :

- Immersion de 8 heures du colis à une profondeur de 15 mètres.
- Immersion d'une semaine (168 heures) du colis à une profondeur de 0,9 mètres.

Résultats de l'étude

Les masses d'eau entrant dans le cylindre 30B lors de l'immersion sont inférieures à la masse d'eau maximale admissible garantissant la sous-criticité du colis.

6. PERFORMANCES D'UN POINT DE VUE RADIOPROTECTION

Les critères retenus de débit d'équivalent de dose couvrant les conditions réglementaires de transport sont les suivants :

- Conditions de transport de routine (CTR) :
 - o Dans le cas d'une utilisation non exclusive : 2 mSv/h au contact du colis et 0,1 mSv/h à 1 mètre de la surface du colis.
 - o Dans le cas d'une utilisation exclusive : 10 mSv/h au contact du colis et 0,1 mSv/h à 2 mètres de la surface du colis.
- Conditions normales de transport (CNT) : moins de 20% d'augmentation du débit d'équivalent de dose maximal sur la surface externe du colis.
- Conditions accidentelles de transport (CAT) : 10 mSv/h à 1 mètre de la surface du colis pour le colis de type B uniquement.

6.1. En conditions de transport de routine

Deux configurations se distinguent :

- Le transport d'UNE qui voit des cycles successifs de remplissages et vidanges jusqu'au lavage de la cavité à la prochaine maintenance : dans ce cas, le cylindre plein comporte deux zones dont l'une est composée d'UNE issu du remplissage avant transport, et l'autre de résidus en pieds de cuve issus des précédents remplissages et restant après vidange du cylindre.
- Le transport d'URE dont le cylindre 30B est vidé et lavé avant chaque remplissage : dans ce cas le cylindre plein comporte une seule zone composée d'URE.

Paramètres du contenu importants pour l'étude

Le cylindre plein est modélisé avec une masse de 2277 kg d'UF₆ enrichi au plus à 5% en uranium 235 et provenant soit d'uranium naturel (cas de l'UNE) soit d'uranium issu du retraitement (cas de l'URE).

Le pied de cuve est modélisé avec une masse de 11,34 kg de matières uranifères.

Afin de prendre en compte les cycles de remplissage / vidange du cylindre 30B, les calculs de débits d'équivalents de dose sont effectués en considérant le vieillissement de l'UF₆.

Les concentrations maximales de référence de chaque radio-isotope sont prises en compte afin de déterminer la composition des résidus concentrés en pieds de cuve après vidange du cylindre plein.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

La protection radiologique de l'emballage est principalement apportée par l'épaisseur d'acier du cylindre 30B et de la coque COG-OP-30B.

De façon pénalisante, le matériau isolant contribuant à l'atténuation des rayonnements neutron n'est pas pris en compte.

Méthode de calcul

Les calculs des sources gamma et neutrons sont effectués à l'aide des codes ORIGEN 2.1 ou ORIGEN-ARP. Les sources applicables au contenu sont prises en compte pour le calcul des débits d'équivalent de dose.

Les calculs de débits d'équivalent de dose sont menés à l'aide du code TRIPOLI 4.3 et 4.4 pour les contenus UNE (hors cyclages successifs) et le code TRIPOLI 4.7 pour les contenus suivants : cycles successifs de remplissage / vidange d'UNE, cylindre plein URE et pied de cuve URE.

Les codes TRIPOLI 4.3 et 4.4, basés sur la méthode de Monte Carlo, permettent de simuler le transport des particules neutrons et gamma ainsi que le couplage neutron-gamma dans une géométrie à trois dimensions. Ils permettent de simuler la vie d'une particule dans la matière depuis son émission jusqu'à sa disparition.

Résultats de l'étude

- Cas de l'UF₆ issu d'uranium naturel (UNE) : En configuration cuve pleine, en considérant le contenu radioactif maximal, les débits d'équivalent de dose totaux calculés sont en dessous des critères retenus et fixés par la réglementation pour un colis dans les conditions de routine, en utilisation exclusive ou non exclusive. Il en est de même en configuration pied de cuve et dans le cas de cycles successifs de remplissage / vidange d'UNE.
- Cas de l'UF₆ contenant de l'uranium issu du retraitement (URE) : En configuration cuve pleine, en considérant le contenu radioactif maximal, les débits d'équivalent de dose totaux calculés sont en dessous des critères retenus et fixés par les règlements pour un colis dans les conditions de routine, en utilisation exclusive ou non exclusive.
- Dans le cas du transport d'un pied de cuve d'UF₆, l'opération consiste à vider un cylindre préalablement chargé ; il convient donc à l'expéditeur de vérifier avant transport que les débits d'équivalent de dose réglementaires autour du colis soient respectés

6.2. En conditions normales de transport

Les éventuels mouvements du contenu en configuration cylindre plein, en configuration cylindre avec pied de cuve et dans le cas des cycles successifs de remplissage / vidange d'UNE n'ont pas d'impact sur le débit d'équivalent de dose autour de l'emballage.

L'augmentation du débit d'équivalent de dose maximal au contact du colis après une chute de 1,2 mètre représentative des conditions normales de transport reste inférieure à 20 %.

Il est donc justifié que le critère réglementaire en conditions normales de transport est respecté, à savoir que le débit d'équivalent de dose maximal au contact du colis n'augmente pas de plus de 20 % à l'issue des épreuves réglementaires des CNT.

6.3. En conditions accidentelles de transport

En conditions accidentelles de transport, les débits d'équivalent de dose calculés sont inférieurs au critère réglementaire de débit d'équivalent de dose à 1 mètre du colis.

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

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

- Le colis isolé en conditions de transport 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 conditions 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 en conditions normales de transport,
- L'agencement de 2 N colis en conditions accidentelles de transport.

Les critères de sous-criticité retenus sont les suivants :

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

7.1. Cas d'un cylindre plein d'UF₆ avec un pied de cuve sous forme d'UO₂F₂

L'étude est réalisée pour un réseau infini de colis endommagés et le critère de sûreté criticité est fixé à $k_{\text{eff}} + 3 \sigma \leq 0,95$. Ainsi l'étude en colis isolé est couverte par l'étude en réseau de colis.

Paramètres du contenu importants pour l'étude

L'étude prend en compte un cylindre 30B plein contenant une masse d'UF₆ comprise entre 455 kg et 2277 kg. L'UF₆ est composé au minimum de 99,5% en masse d'hexafluorure d'uranium (UF₆) et de 0,5% au maximum d'impuretés incluant des matières hydrogénées. L'enrichissement de l'uranium en ²³⁵U est pris en compte à son maximum autorisé pour le contenu du cylindre 30B, soit 5% en masse.

L'étude prend également en compte la présence d'un fond solide de résidus (pied de cuve).

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

De manière pénalisante, l'emballage est représenté par un cylindre, dont l'épaisseur d'acier est inférieure au cumul des épaisseurs d'acier du cylindre 30B et de la tôle interne en acier de la coque. La modélisation couvre les conditions de routine, normales et accidentelles de transport.

Hypothèses importantes pour l'étude

Le contenu du cylindre 30B est caractérisé par la présence d'uranium sous deux formes qui définissent chacune un milieu fissile :

- L'UF₆ sous forme d'UF₆-xHF. La quantité de HF prend en compte la présence des impuretés dans l'UF₆, l'hydratation de l'UF₆ par la présence d'humidité dans l'air au moment du remplissage et la pénétration d'eau due aux épreuves réglementaires d'immersion.
- Le fond solide modélisé sous forme d'UO₂F₂, yH₂O. La quantité « y » d'H₂O considérée prend en compte la forme stable des hydrates d'UO₂F₂ dans les conditions ambiantes rencontrées. La masse tient compte de la pénétration d'eau due aux épreuves réglementaires d'immersion qui peut conduire à la formation d'une quantité supplémentaire d'UO₂F₂.

L'étude est réalisée pour un réseau infini de colis et le critère de sûreté criticité est fixé à $k_{\text{eff}} + 3 \sigma \leq 0,95$. Ainsi l'étude en colis isolé est couverte par l'étude en réseau de colis.

La configuration menant au maximum de réactivité est recherchée en faisant varier les paramètres suivants :

- la géométrie de la matière fissile,

- la densité de la matière fissile à volume constant,
- la masse de matière fissile,
- la distance axiale et radiale entre les colis (réseau de colis),
- la densité du brouillard d'eau entre les colis.

Méthode de calcul

L'étude est réalisée avec le schéma de calcul APOLLO2-MORET4 (voie standard du formulaire CRISTAL V1.2) qui est basé sur l'utilisation de la bibliothèque CEA93 V6 pour les milieux fissiles et les milieux de structure. La qualification du schéma de calcul utilisé est également détaillée.

La bibliothèque CEA93 V6 est une bibliothèque de sections efficaces et effectives à 99 et 172 groupes d'énergie des neutrons qui a été élaborée à partir de l'évaluation européenne de données nucléaires JEF2.2.

Le calcul se déroule en deux parties :

- L'étude du milieu fissile et des milieux de structure avec le code APOLLO2 Version 2.5 patch 5,
- Le calcul du k_{eff} de l'emballage par le code Monte-Carlo MORET4.B.4.

Résultats de l'étude

La réactivité $k_{\text{eff}} + 3 \sigma$ est inférieure à 0,95 et l'indice de sûreté-criticité CSI est de 0.

7.2. Cas d'un pied de cuve seul sous forme d'UF₆ ou d'UO₂F₂

L'étude en réseau de colis donne des coefficients de multiplication effectifs plus élevés que l'étude en colis isolé. L'étude est alors réalisée pour un réseau infini de colis endommagés et le critère de sûreté criticité est fixé à $k_{\text{eff}} + 3 \sigma \leq 0,98$. Ainsi l'étude en colis isolé est couverte par l'étude en réseau de colis.

Paramètres du contenu importants pour l'étude

L'étude prend en compte un pied de cuve de 11,34 kg contenu dans un cylindre 30B.

Paramètres de l'emballage importants pour l'étude

La coque COG-OP-30B n'est pas modélisée dans les calculs de criticité. Seul le cylindre 30B est modélisé. La modélisation couvre les conditions de routine, normales et accidentelles de transport.

L'étude prend en compte les variations d'épaisseur d'acier du cylindre 30B.

Hypothèses importantes pour l'étude

Le pied de cuve est modélisé sous forme d'hexafluorure d'uranium (UF₆) ou d'UO₂F₂ enrichi au maximum à 5 % en ²³⁵U contenu dans un cylindre 30B.

En présence d'eau, l'UF₆ réagit immédiatement avec celle-ci pour donner de l'UO₂F₂ et l'étude prend ainsi en compte deux configurations physiques possibles du milieu fissile : un milieu UF₆ - xHF faiblement modéré (la quantité « x » est identique à l'étude du cylindre plein) et un milieu UO₂F₂ avec une modération quelconque.

Les calculs en réseau de colis sont réalisés en considérant une réflexion totale sur la paroi extérieure du cylindre 30B. La matière fissile se regroupe sous forme de sphère, de cylindre ou de demi-sphère et peut être centrée ou décentrée dans la cavité du cylindre.

Méthode de calcul

L'étude est réalisée avec le schéma de calcul APOLLO2-MORET4 (voie standard du formulaire CRISTAL V0.1 et V0.2).

Le calcul se déroule en deux étapes :

- La détermination des sections efficaces du milieu fissile et des milieux de structure à partir du code APOLLO2 Version 2.4 patch 3,
- Le calcul du k_{eff} avec le MORET4.A.6.

Résultats de l'étude

Les critères de sûreté-criticité retenus de $k_{\text{eff}} + 3 \sigma \leq 0,950$ en colis isolé et de $k_{\text{eff}} + 3 \sigma \leq 0,980$ en réseau de colis sont respectés pour un nombre « N » infini ce qui correspond à un indice de sûreté-criticité CSI de 0.

8. CONDITIONS D'UTILISATION

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

- Le contenu du cylindre 30B doit être conforme aux exigences du certificat d'agrément applicable.
- L'ensemble des opérations effectuées pour vérifier le bon état de la coque, le bon état du cylindre 30B, la propreté de la cavité, le bon état du joint de propreté, le bon état des dix fermetures, la bonne pose de la demi-coque supérieure sur la demi-coque inférieure et le bon état des bouchons fusibles.
- La vérification de l'efficacité du système de fermeture et la fermeture de l'emballage ainsi que le contrôle de la fermeture par un deuxième opérateur.
- La mise en place des scellés.
- La vérification de la non contamination de l'emballage en conformité avec les limites réglementaires.
- Le contrôle des débits d'équivalent de dose autour du colis. Si le débit de dose mesuré à 1 mètre de la surface du colis est supérieur à 0,1 mSv/h, ou si le débit de dose au contact de la surface du colis est supérieur à 2 mSv/h, le colis doit être transporté sous utilisation exclusive. Des mesures alternatives de débits d'équivalent de dose peuvent être effectuées en remplacement des mesures de débits d'équivalent de dose au contact et à 1 mètre de la surface de colis suivant des règles d'équivalence définies dans le certificat d'agrément applicable.
- La mise en place de l'étiquetage réglementaire.
- Le contrôle du positionnement des tôles de séparation du colis au droit des plans de pose des berceaux de transport.

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 : le nombre de cycles de transport et la durée d'utilisation.

Le programme d'entretien des coques comprend notamment :

- L'inspection détaillée des oreilles de levage, de leur soudure et de l'état des manilles,
- Le contrôle par ressuage des dix ceintures externes de la coque,
- L'inspection détaillée des passages de fourches, et des soudures associées,
- L'inspection des soudures de la cavité interne,
- L'inspection de l'état général des demi-coques inférieure et supérieure,
- L'inspection visuelle de chaque élément du système de fermeture,
- L'essai fonctionnel du bon fonctionnement du système de fermeture
- L'essai de bon fonctionnement des axes à bille du système de fermeture,
- Le remplacement du joint plat,
- La vérification de l'absence de prise d'eau du matériau isolant ou dans le matériau absorbant,
- La vérification de l'état des bouchons fusibles,
- Le contrôle d'étanchéité des bouchons fusibles,
- L'inspection du marquage.

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 celle-ci, et produire et conserver les documents justificatifs (enregistrements) de leur activité.

11. REFERENCES

Règlements applicables :

- IAEA Safety Standards Series – Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material – 2012 Edition – N°SSR-6
- Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (ADR)
- Règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses (RID)
- 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)
- Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voies de navigation intérieure (ADN)
- Règlement relatif à la Sécurité des Navires (RSN), division 411, annexé à l'arrêté du 23 novembre 1987 modifié