



Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100

Référence du document :
DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007

DSS

Indice : A

Plan de classement : DTEL-Unités-O4

Page 1/24

DEMONSTRATION DE SURETE DU MODELE DE COLIS IR100

FORMULAIRES ASSOCIES AU DOCUMENT	REFERENCE

Résumé

Ce document présente l'analyse de sûreté du modèle de colis IR100, utilisé pour le transport par voies routière et maritime, de combustibles irradiés ou non et de matériaux radioactifs.

Les éléments présentés démontrent que le modèle de colis respecte la réglementation en vigueur.

FONCTION				
NOM				
DATE				
VISA				
	REDACTEUR	VERIFICATEUR	APPROBATEUR	ÉMETTEUR

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	<u>Indice</u> : A
		Page 2/24

HISTORIQUE DES VERSIONS PRECEDENTES

REF. : CEA-DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007		
A	19/04/2024	Version originale

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 3/24

SOMMAIRE

1. OBJET	5
2. REGLEMENTATION APPLICABLE.....	5
3. DEFINITION DE L'EMBALLAGE	6
4. DEFINITION DES CONTENUS	7
5. DEFINITION DES FONCTIONS DE SURETE DU MODELE DE COLIS.....	10
6. ANALYSE DE LA RESISTANCE STRUCTURELLE	11
6.1 Objectifs.....	11
6.2 Conditions de transport de routine	12
6.3 Conditions normales de transport	13
6.4 Conditions accidentelles de transport	13
6.5 Conclusion.....	14
7. ANALYSE THERMIQUE.....	14
7.1 Objectifs.....	14
7.2 Hypothèses de calcul	14
7.3 Résultats.....	15
7.4 Conclusion.....	15
8. ANALYSE DU CONFINEMENT.....	16
8.1 Objectifs.....	16
8.2 Hypothèses de calcul	16
8.3 Conclusion.....	17
9. ANALYSE DE LA RADIOPROTECTION	17
9.1 Objectifs.....	17
9.2 Hypothèses de calcul	18
9.3 Conclusion.....	18
10. ANALYSE DE LA SURETE-CRITICITE	19
10.1 Objectifs.....	19
10.2 Hypothèses de calcul	19
10.3 Conclusion.....	20
11. ANALYSE DES RISQUES SUBSIDIAIRES.....	20

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 4/24

11.1 Objectifs.....	20
11.2 Hypothèses de calcul	21
11.3 Conclusion.....	21
12. EXPLOITATION DE L'EMBALLAGE	21
12.1 Instructions d'utilisation	21
12.1.1 Manutention.....	22
12.1.2 Arrimage.....	22
12.1.3 Inertage	22
12.1.4 Contrôles avant expédition.....	22
12.2 Instructions de maintenance	22
13. SYSTEME DE MANAGEMENT DE LA QUALITE	23
14. CONCLUSION	24

INDEX DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Image de l'emballage IR 100.....	7
---	---

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 5/24

1. OBJET

Cette note présente l'analyse de sûreté du modèle de colis IR100, utilisé pour le transport par voies routière et maritime, de combustibles irradiés ou non et de matériaux radioactifs.

Elle démontre la conformité à la réglementation applicable par voies routière et maritime :

- de colis de type B(U)F, pour les matières uranifères et/ou plutonifères fissiles ;
- de colis de type B(U), pour les matières uranifères et/ou plutonifères non-fissiles ou fissiles exceptées ;
- de colis de type B(M)F, pour les matières uranifères et/ou plutonifères fissiles ;
- de colis de type B(M), pour les matières radioactives non-fissiles ou fissiles exceptées.

2. REGLEMENTATION APPLICABLE

- [1] Accord Européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route
Référence : ADR en vigueur le 1er janvier 2023
- [2] Arrêté du 29 mai 2009 modifié relatif au transport des marchandises dangereuses par voies terrestre (arrêté TMD) en vigueur le 1er janvier 2023
- [3] AIEA, Règlement de transport des matières radioactives, édition de 2018 – SSR-6.
- [4] Guide de l'ASN n°7 Rév. 2 du 15 février 2016 : Transport à usage civil de substances radioactives sur la voie publique – Tome 1 : demandes d'agrément et d'approbations d'expéditions
- [5] Code maritime international des marchandises dangereuses (code IMDG de l'OMI),
- [6] Arrêté du 23 novembre 1987 modifié relatif à la sécurité des navires et notamment sa division 411 du règlement annexé (dit « arrêté RSN »)

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 6/24

3. DEFINITION DE L'EMBALLAGE

L'emballage IR100 est présenté sur la Figure 1. Les principaux composants de l'emballage sont :

Le corps

La cavité est formée d'une virole interne en acier inoxydable (assurant l'essentiel du blindage gamma radial) et d'un fond également en acier inoxydable.

Une deuxième virole en acier inoxydable délimite avec la première virole un espace rempli de résine chargée qui joue le rôle d'absorbant neutronique et d'isolant thermique actif.

En partie supérieure une enveloppe externe en tôle d'acier inoxydable rapporté par soudage à chaque extrémité des faces avant et arrière des viroles forme le système de fermeture décrit ci-après.

Le système de fermeture

La fermeture de la cavité intérieure est assurée par un système essentiellement constitué de tapes.

L'étanchéité du bouchon sur le corps et du capuchon de raccord rapide est assurée par des joints internes toriques. Ces joints internes sont toujours doublés par des joints externes. Les espaces compris entre les joints communiquent tous deux avec un orifice de test permettant de vérifier l'étanchéité du système de fermeture.

Les capots amortisseurs

L'emballage est équipé à chacune de ses extrémités de capots amortisseurs amovibles. Chaque capot amortisseur est constitué de tôles en acier inoxydable formant un caisson cylindrique, rempli de matériaux amortisseurs (balsa et tilleul), muni de bouchons fusibles vissés sur les capots, de goussets internes et de tôles anti-poinçonnement.

Manutention et arrimage

Les deux tourillons soudés sur le corps de l'emballage ainsi qu'un le socle assurent le calage et l'arrimage de ce dernier sur son bâti lors des phases de transport. Les tourillons assurent également la manutention de l'emballage.

Deux oreilles soudées sur la partie supérieure du corps de l'emballage permettent la manutention de l'emballage.

Chaque capot dispose de deux oreilles pour leur manutention.



Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100

Référence du document :
DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007

DSS

Indice : A

Plan de classement : DTEL-Unités-O4

Page 7/24

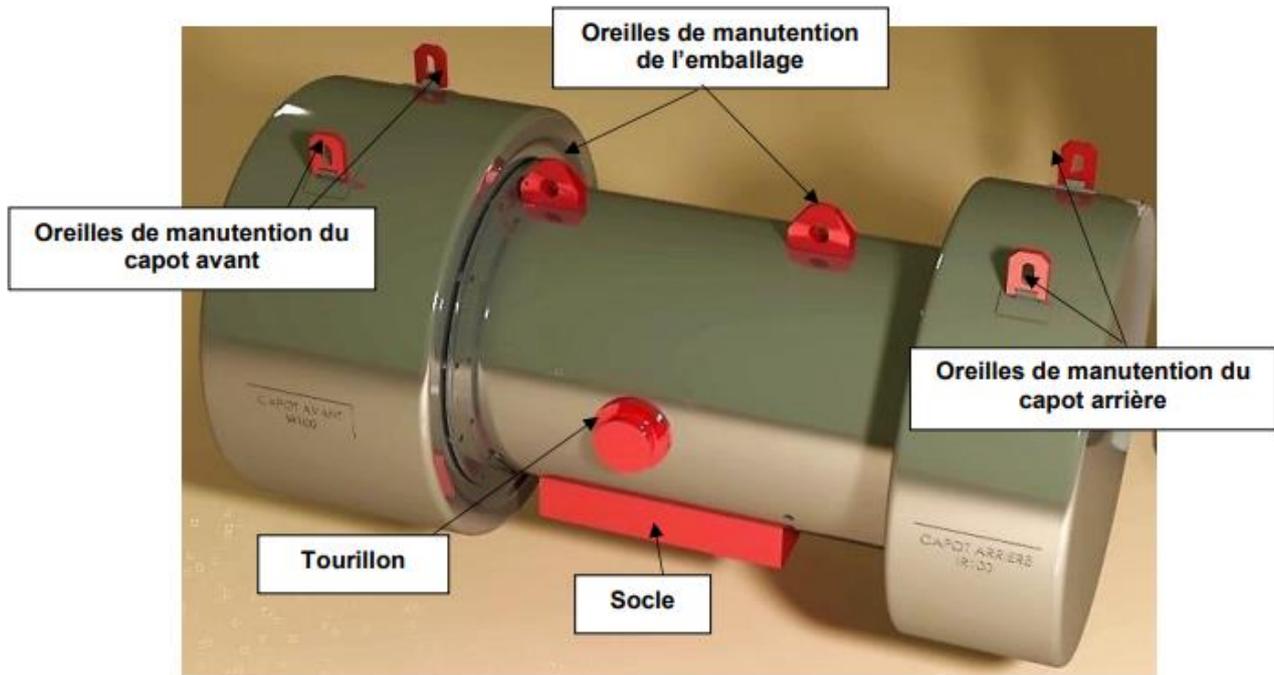


Figure 1 : Image de l'emballage IR 100

Les dimensions principales nominales de l'emballage sont les suivantes :

- longueur hors tout de l'emballage : 2 300 mm ;
- diamètre externe hors tout du corps : 1 100 mm ;
- diamètre externe des capots : 1 200 mm ;

La masse maximale du colis chargé est de 6875 kg.

4. DEFINITION DES CONTENUS

L'emballage IR100 répond aux prescriptions réglementaires [1] et [2] applicables, pour le transport par route :

- aux colis de type B(U), lorsqu'il est chargé des contenus suivants :
 - matières radioactives non fissiles ou fissiles exceptées (contenu A5) ;
 - oxydes mixtes d'uranium et d'américium fissiles exceptées (contenu A13) ;
 - combustible REP UO₂ standard fissiles exceptées (contenu A15) ;
 - combustible REP MOX fissiles exceptées (contenu A16) ;
 - mélange des contenus (contenu A17) ;
 - combustible Phénix fissiles exceptées (contenu A18) ;

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 8/24

- combustible REP UO₂ ou MOX faiblement refroidi, fissiles exceptées (contenu A20) ;
- plaquettes de combustible UO₂ fissiles exceptées (contenu A23) ;
- combustible REB UO₂ fissiles exceptées (contenu A24) ;
- combustible REB MOX fissiles exceptées (contenu A26) ;
- aux colis de type B(U)F, lorsqu'il est chargé des contenus suivants :
 - combustible REP UO₂ standard (contenu A1) ;
 - combustible REP MOX standard (contenu A2) ;
 - combustible Phénix (contenu A4) ;
 - combustible REP UO₂ ou MOX faiblement refroidi (contenu A7) ;
 - plaquettes de combustible UO₂ (contenu A22) ;
 - plaquettes de combustible MOX REB (contenu A25) ;
- aux colis de type B(M), lorsqu'il est chargé de matières radioactives non fissiles ou fissiles exceptées (contenu A11) ;
- aux colis de type B(M)F, lorsqu'il est chargé des contenus suivants :
 - combustible REP UO₂ standard (contenu A8) ;
 - combustible REP MOX standard (contenu A9) ;
 - combustible Phénix (contenu A10) ;
 - combustible REL UO₂ ou MOX ré-irradiés (contenu A21).

La matière radioactive peut se présenter sous les formes suivantes :

Contenus combustibles

Ils sont constitués d'éléments ou de morceaux d'éléments combustibles sous forme de tronçons de crayon, de plaquettes, de disques, de pastilles, de morceaux de pastilles, éventuellement brisées, et/ou de poudres combustibles.

La matière combustible avant irradiation est constituée d'oxyde d'uranium UO₂ ou d'oxyde mixte (U,Pu)O₂ ou d'un mélange des deux ou d'oxyde mixte d'Américium (U,Am)O_{2-x} qui peut se trouver seule ou mélangée avec des matrices inertes non radiolysables. Les éléments combustibles peuvent être gainés ou non gainés.

Pour les contenus composés d'oxyde d'uranium, la teneur massique en ²³⁵U respecte le rapport massique suivant : $2 \% \leq \frac{^{235}\text{U}}{\text{U}_{\text{total}}} \leq 10\%$.

Pour les contenus composés d'oxyde mixte (U,Pu)O₂, les teneurs massiques initiales en ²³⁵U et en plutonium respectent les valeurs suivantes :

- $\frac{^{235}\text{U}}{\text{U}_{\text{total}}} \leq 0,72 \%$;
- $\frac{\text{Pu}}{\text{U}+\text{Pu}} \leq 45 \%$.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 9/24

La teneur massique en américium 241 de l'oxyde d'américium n'excède pas 15,6 %.

La matière combustible est non irradiée ou irradiée en réacteur de type REP, REB, RNR ou en réacteur de recherche.

Les paramètres limitant ses contenus sont :

- la masse admissible (aménagement interne inclus),
- l'enrichissement et les teneurs isotopiques,
- le taux de combustion et le refroidissement minimal,
- la masse d'oxyde admissible,
- la puissance thermique maximale du contenu.

En présence potentielle d'eau, la puissance thermique maximale est de 0,1 W.

La puissance thermique de l'oxyde mixte (U,Am)O_{2-x} est limitée à 10 W.

Pour les autres contenus, elle est de 200 W.

Matières radioactives non fissiles ou fissiles exceptés (contenus A5 et A11)

Les contenus composés de matières radioactives non fissiles ou fissiles exceptées sont constitués de matériaux métalliques, de verres sans matières organiques, de bore, de matériaux carbonés, de composites, de carbures, de nitrures, d'oxydes ou mélanges d'oxydes ou de sources.

L'activité spécifique maximale des matériaux radioactifs non fissiles ou fissiles exceptés est limitée à 127 A₂/g et est limitée à 3,82 TBq en équivalent ⁶⁰Co.

En présence potentielle d'eau (contenu A11), la puissance thermique maximale est de 0,1 W.

Sans eau (contenu A5), elle est de 200 W.

Contenu mélange (A17)

Ce contenu est constitué d'un mélange de matière radioactives et de contenus combustible. La matière est non fissile ou fissile exceptée.

L'activité spécifique maximale du contenu mélange (A17) est limitée à 28,5 A₂/g.

La puissance thermique est limitée à 200 W.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 10/24

Aménagements internes

Le contenu peut être conditionné dans différents types d'aménagements internes :

- une pelle de chargement/déchargement ;
- un aménagement spécifique de confinement dit « alpha » fixé sur le poussoir de ringard de l'emballage ;
- des aménagements internes quelconques de type conteneurs, cages, étuis de conditionnement, râteliers de maintien ou fourreaux, permettant de faciliter le chargement et le déchargement de la matière et/ou permettant de limiter la contamination de la cavité. Ces aménagements doivent être en acier inoxydable ou en alliage d'aluminium.

5. FONCTIONS DE SURETE DU MODELE DE COLIS

Le modèle de colis IR100, de type B fissile, est destiné au transport de combustibles irradiés ou non et des matières radioactives solides sous diverses formes.

L'emballage IR100 est conçu de manière à garantir les fonctions principales de sûreté suivantes :

- le confinement des matières radioactives,
- la maîtrise de l'intensité de rayonnement externe,
- la dissipation de la puissance thermique interne,
- la maîtrise de la sûreté-criticité.

Ainsi que les fonctions indirectes :

- la protection contre les chocs,
- la protection contre l'incendie.

Confinement des matières radioactives

Le confinement est assuré par l'enveloppe de confinement constituée de la cavité interne, des bouchons et des tapes équipées de systèmes de double joints ou de triple joints ainsi que la visserie associée.

Maîtrise de l'intensité de rayonnement externe

La protection radiologique est essentiellement assurée :

- Radialement, par les épaisseurs d'acier des viroles interne et externe et l'épaisseur de résine neutrophage (protection biologique) ;
- Axialement, en face avant, par les épaisseurs d'acier et de plomb du barillet et l'épaisseur d'acier de la tape avant ;

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 11/24

- Axialement, en face arrière, par les épaisseurs d'acier et de tungstène du ringard et l'épaisseur d'acier de la tape arrière.

Maîtrise de la sûreté-criticité

La maîtrise de la sous-criticité est assurée par le système d'isolement composé de la cavité interne, de la virole en acier, du barillet, de la tape avant, du ringard, du contre ringard et des contenus.

Dissipation de la puissance thermique et protection contre l'incendie

La dissipation de la puissance thermique et la protection contre l'incendie sont assurées les épaisseurs d'acier des viroles interne et externe ainsi que les épaisseurs de résine, du corps et du bois des capots.

La protection contre les chocs

La protection contre les chocs est assurée par les capots amortisseurs constitués de bois et d'une enveloppe en acier inoxydable.

6. ANALYSE DE LA RESISTANCE STRUCTURELLE

6.1 OBJECTIFS

Cette partie analyse le comportement mécanique du colis IR100 dans le cadre des épreuves réglementaires représentatives des CTR, des CNT et des CAT.

La conformité du modèle de colis est notamment examinée vis-à-vis des épreuves spécifiées par la réglementation [3], qui sont les suivantes :

- en conditions de transport de routine et habituelles de manutention :
 - la résistance des organes d'arrimage et de manutention ;
 - la résistance à une pression interne dans l'enceinte de confinement ;
- en conditions normales de transport :
 - l'épreuve d'aspersion d'eau ;
 - l'épreuve de chute libre d'une hauteur de 1,2 m ;
 - l'épreuve de gerbage ;
 - l'épreuve de pénétration ;
- en conditions accidentelles de transport :
 - l'épreuve de chute libre, d'une hauteur de 9 m sur cible indéformable, applicable pour tous les contenus contenant moins de 1000 A2 ;

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 12/24

- l'épreuve d'écrasement dynamique, par une masse de 500 kg chutant de 9 m, applicable pour tous les contenus contenant plus de 1000 A2 ;
- l'épreuve de chute libre, d'une hauteur de 1 m sur poinçon ;
- l'épreuve poussée d'immersion sous une hauteur de 200 m pendant 1 heure, qui s'applique pour certains contenus contenant une activité de plus de 10⁵ A2.

6.2 CONDITIONS DE TRANSPORT DE ROUTINE

Arrimage et manutention

L'analyse structurelle de l'emballage est basée sur une masse de colis de 7 000 kg, pour une masse réelle de l'emballage avec capots, chargement et élingues, de 6 875 kg.

Pour l'arrimage, les calculs sont effectués en combinant les accélérations verticales, longitudinales et transversales les plus pénalisantes de chaque type de transport (routière, ferroviaire et maritime). Deux combinaisons sont retenues :

- Combinaison 1 : + 5 g longitudinal, +2 g transversal et – 3 g vertical,
- Combinaison 2 : + 5 g longitudinal, +2 g transversal et + 2 g vertical.

La résistance à la fatigue de l'emballage en conditions de manutention et de transport est évaluée avec les hypothèses pénalisantes suivantes :

- 2 mois passés en mer par an soit 1800 jours durant les 30 ans de vie de l'emballage,
- 30 000 kilomètres par an parcourus par route soit 1 million de kilomètres durant les 30 ans de vie de l'emballage,
- 30 000 kilomètres par an parcourus par voie ferrée soit 1 million de kilomètres durant les 30 ans de vie de l'emballage.

Les résultats montrent que les organes d'arrimage et de manutention de l'emballage sont correctement dimensionnés pour les transports routier et maritime lors des conditions habituelles de manutention et de transport de routine.

Résistance à une pression interne

Les études justifient que les composants de l'emballage sont correctement dimensionnés pour une pression interne de 4 bars.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 13/24

6.3 CONDITIONS NORMALES DE TRANSPORT

Aspersion d'eau

La présence d'enveloppes métalliques étanches permet d'assurer l'herméticité de l'emballage à la pénétration de l'eau. Aucun des matériaux susceptibles d'être mouillés (acier, joints) ne peut être dégradé par l'eau. Aucune dégradation de l'emballage ne peut résulter d'une telle épreuve.

Chutes libres d'une hauteur de 1,2 m

Les campagnes d'essais de chute montrent que l'emballage résiste à cette épreuve sans altération de ses fonctions de sûreté.

Compression – gerbage

La forme cylindrique du colis ne se prête pas au gerbage car le colis est transporté horizontalement.

Pénétration

La chute de l'emballage d'une hauteur de 1 m sur poinçon est enveloppe de l'épreuve de pénétration d'une barre de 6 kg chutant de 1 mètre sur l'emballage.

6.4 CONDITIONS ACCIDENTELLES DE TRANSPORT

Epreuves de chute

Les différentes campagnes d'essais de chute, réalisées à température ambiante, et confortées par des simulations numériques réalisées à -40°C et à $+80^{\circ}\text{C}$, montrent que le modèle de colis résiste aux épreuves mécaniques réglementaires (chute de 9 mètres et chute de 1 mètre sur poinçon). En particulier, le taux de fuite est maintenu et la géométrie de l'enceinte de confinement et des aménagements internes est conservée.

Epreuve d'immersion

L'emballage immergé sous 200 m d'eau subit une pression relative externe de 68 bar. Cette pression est retenue de façon enveloppe dans les calculs qui démontrent que l'enveloppe de confinement résiste à une pression de 68 bar relatifs sans que les matériaux de ses constituants ne soient sollicités au-delà de leur limite élastique.

Par conséquent, le modèle de colis reste étanche à la suite des épreuves d'immersion.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 14/24

6.5 CONCLUSION

La résistance structurelle de l'emballage IR100 et de ses aménagements internes satisfont aux prescriptions réglementaires pour un modèle de colis de type B contenant des matières fissiles dans toutes les conditions de transport.

7. ANALYSE THERMIQUE

7.1 OBJECTIFS

Ce paragraphe présente l'analyse du comportement thermique de l'emballage IR100, ainsi que des contenus qu'il transporte, en conformité avec la réglementation [3] pour les colis de type B. Afin de couvrir l'ensemble des contenus et des configurations existantes, les calculs thermiques sont réalisés sur des configurations enveloppes qui couvrent tous les cas envisageables.

Dans les études, il est tenu compte :

- de la puissance maximale susceptible d'être dégagée par le contenu ;
- des conditions normales et accidentelles de transport définies par la réglementation.

Les prescriptions réglementaires et leurs critères d'acceptation associés, pour les CNT et les CAT sont résumés ci-dessous :

- en CTR, sans ensoleillement et à la température ambiante de 38°C, la température des surfaces accessibles du modèle de colis doit rester inférieure à 50°C (85°C en transport sous-utilisation exclusive) ;
en CNT : avec l'ensoleillement réglementaire défini dans [3] et à la température ambiante de 38°C, les températures maximales atteintes par les constituants du modèle de colis doivent rester dans les domaines d'utilisation de leur matériau constitutif et permettre le maintien des performances d'étanchéité ;
- en CAT, suite à l'épreuve de l'incendie (période d'exposition de 30 minutes à un feu de température moyenne de flamme d'au moins 800°C), suivie d'une phase de refroidissement, définie par l'exposition du modèle de colis à température ambiante de 38°C et sous ensoleillement réglementaire [3], les performances de sûreté doivent être maintenues.

7.2 HYPOTHESES DE CALCUL

Les études ont été menées pour les trois configurations de chargement suivantes :

- une puissance thermique de 200 W répartie de façon homogène sur la paroi interne de la cavité,

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 15/24

- une source de chaleur de 100 W concentrées à chaque extrémité la cavité (une sur le ringard et une sur le barillet),
- une source de chaleur de 10 W concentrées à chaque extrémité la cavité (une sur le ringard et une sur le barillet), soit un total de 20 W.

Les échanges thermiques se font :

- par convection naturelle et rayonnement entre les surfaces externes de l'emballage et/ou du caisson et l'air ambiant,
- par convection entre les parois internes du caisson et l'air ambiant,
- par conduction et rayonnement dans les lames d'air du colis,
- par échanges radiatifs dans la cavité du colis,
- par conduction dans les matériaux.

En CTR et en CNT, le colis est considéré isolé ou en caisson. Il est toujours modélisé à l'horizontale et sans déformations.

En CAT, la géométrie de l'emballage est modifiée pour tenir compte des conséquences des épreuves de mécaniques représentatives des CAT. De manière pénalisante, le colis est étudié isolé, sans le caisson de protection physique, qui est supposé avoir disparu. Durant la phase de refroidissement, le colis est considéré à l'horizontale.

7.3 RESULTATS

Conditions de transport de routine

En condition de transport de routine, les températures calculées sur les surfaces accessibles du modèle de colis sont inférieures à 50°C pour un chargement de 2×10 W concentrés.

Elles sont très légèrement supérieures à 50°C et inférieures à 85°C pour une puissance thermique de 2×100 W, ce qui impose un transport sous utilisation exclusive.

Conditions normales et accidentelles de transport

Les températures des différents constituants de l'emballage atteintes en conditions normales de transport sont compatibles avec les plages d'utilisation des matériaux.

7.4 CONCLUSION

Les performances de l'emballage (intégrité des barrières de confinement et des protections radiologiques) ne sont pas altérées en CNT.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 16/24

En Conditions Accidentelles de Transport, les performances de l'emballage (intégrité des barrières de confinement et des protections radiologiques) ne sont pas diminuées par une montée des températures due à la situation d'incendie pendant 30 minutes et un refroidissement après l'incendie.

8. ANALYSE DU CONFINEMENT

8.1 OBJECTIFS

L'objet de ce paragraphe est de démontrer que le modèle de colis satisfait aux exigences et critères réglementaires relatifs aux taux admissibles de relâchement de radioactivité.

Selon les exigences issues de la réglementation applicable [3], les valeurs maximales admissibles de taux de relâchement d'activité d'un colis de type B sont :

- en CNT : 10^{-6} A2/h ;
- en CAT : 1 A2/semaine.

8.2 HYPOTHESES DE CALCUL

Le relâchement d'activité est estimé pour chaque orifice (bouchons et tapes) et l'activité totale relâchée est comparée aux critères réglementaires énoncés ci-dessus.

L'emballage est dimensionné pour une charge thermique de 200 Watt.

La pression interne dans la cavité à l'expédition est de $1,04 \cdot 10^5$ Pa.

Le volume de matière du contenu (combustible + aménagement interne) est limité à :

- 4 litres pour les contenus A7 et A20,
- 18 litres pour les contenus A5 et A11 (volume utile),
- 8 litres pour les autres contenus.

Le taux maximal de remplissage des gorges de joint du bouchon et des tapes est déterminé en considérant les tolérances maximales pour les joints et minimales pour les gorges et la température maximale obtenue sur chacun des joints (configuration 100 W sur le ringard et 100 W sur le barillet).

Les taux de compression calculés à une température de -40 °C (sur la base des dimensions maximales des gorges et minimales des joints). Une déformation rémanente à la compression (DRC) de 20% est prise en compte pour le calcul du taux de compression des joints à basse température.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 17/24

8.3 CONCLUSION

Le taux maximal de remplissage des gorges de joint du bouchon et des tapes est inférieur à 100% en conditions normales et en conditions accidentelles de transport.

Les taux de compression calculés à une température de -40 °C de tous les joints sont supérieurs à 15%.

L'étanchéité de l'enveloppe de confinement de l'emballage IR100 est assurée par les joints toriques sur toute la plage de température, en conditions normales comme en conditions accidentelles de transport.

Les taux de relâchement d'activité, en conditions normales comme en conditions accidentelles de transport sont respectés.

Ainsi, le modèle de colis IR100, considéré dans les conditions de températures déterminées par l'analyse thermique et chargé des contenus décrits au paragraphe 4 du présent dossier de sûreté, respecte les critères réglementaires de relâchement d'activité en conditions normales et accidentelles de transport.

9. ANALYSE DE LA RADIOPROTECTION

9.1 OBJECTIFS

L'objet de ce paragraphe est d'évaluer l'efficacité de la protection radiologique de l'emballage IR100 dans les conditions de transport réglementaires, chargé des contenus décrits dans le paragraphe 4 du présent document.

Les limites réglementaires concernant le débit de dose dans le cadre d'un transport de matières radioactives sont :

- en conditions de transport de routine (CTR) :
 - 2 mSv.h⁻¹ au contact des parois du colis ;
 - 0,1 mSv.h⁻¹ à 1 mètre des parois du colis ;
- en conditions de transport de routine (CTR), pour un transport réalisé sous-utilisation exclusive :
 - 10 mSv.h⁻¹ au contact des parois du colis ;
 - 2 mSv.h⁻¹ au contact du moyen de transport ;
 - 0,1 mSv.h⁻¹ à 2 mètres du moyen de transport ;
- en conditions normales de transport (CNT), une augmentation du débit de dose au contact du colis inférieure à 20 % sur toute surface externe du colis par rapport aux CTR ;
- en conditions accidentelles de transport (CAT) : 10 mSv.h⁻¹ à 1 mètre des parois du colis.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 18/24

9.2 HYPOTHESES DE CALCUL

L'ensemble des contenus autorisés dans le modèle de colis est étudié.

En conditions de transport de routine et en conditions normales de transport, le modèle de colis est considéré intègre.

En conditions accidentelles de transport, de manière très pénalisante, l'emballage est considéré sans capots et la résine est supposée brûlée et remplacée par de l'air.

Quelques simplifications sont prises en compte pour les deux modèles géométriques en CTR et en CAT :

- les visseries ne sont pas modélisées,
- les orifices d'évent et de drainage ne sont pas modélisés sauf le raccord auto obturant en face avant de l'emballage,
- les oreilles, tourillons et joints ne sont pas modélisés.

Les espaces libres des modèles géométriques sont remplis par de l'air.

Les calculs de DED sont effectués sur la base des spectres gamma et neutron de chaque contenu à l'aide des codes MERCURE 6.3, TRIPOLI 3.5 et MCNP 6.1.

Pour chaque contenu, pour un taux de combustion et une durée de refroidissement donnés, la masse maximale admissible et/ou l'activité maximale admissible sont déterminées de façon à respecter les critères réglementaires en CTR.

Les résultats sont déterminés à la position pénalisante du détecteur, c'est-à-dire au point de calcul pour lequel la limite réglementaire est la plus rapidement atteinte lorsque la masse transportée augmente.

9.3 CONCLUSION

La configuration de calcul en radial est dimensionnante.

Dans le cas des calculs en CAT, il a été démontré que ces conditions ne sont pas dimensionnantes, et que, pour les masses et/ou les activités maximales déterminées lors des calculs en CTR éventuellement majorées de manière pénalisante, les critères réglementaires sont respectés.

Dans les cas des contenus A13 et A24 à A25, l'analyse de radioprotection est réalisée par comparaison de spectre.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 19/24

Les débits d'équivalent de dose autour de l'emballage IR100 respectent les prescriptions réglementaires en vigueur, en conditions de transport de routine, ainsi qu'en conditions normales et accidentelles de transport, lorsqu'il est chargé des contenus tels que définis au chapitre 4 du dossier de sûreté, dans les limites de masse et/ou de refroidissement prédéfinis.

10. ANALYSE DE LA SURETE-CRITICITE

10.1 OBJECTIFS

Ce paragraphe justifie la sous criticité du modèle de colis IR100, chargé de matières fissiles dans les conditions normales et accidentelles de transport.

Trois configurations sont étudiées conformément à la réglementation :

- colis isolé résultant des épreuves simulant les conditions normales et les conditions accidentelles de transport. Dans ce cas le colis est réfléchi de toutes parts par 20 cm d'eau ;
- un réseau de 5N colis en CNT réfléchi par 20 cm d'eau ;
- un réseau de 2N colis en CAT réfléchi par 20 cm d'eau ; la modération par un matériau hydrogéné entre les colis et dans l'agencement doit entraîner une multiplication maximale des neutrons ;

N représentant le nombre maximal de colis admissible sur le moyen de transport.

Les configurations 5N colis en CNT et 2N colis en CAT sont couvertes par un réseau infini de colis dans l'état résultant des CNT et CAT.

Les critères de sous criticité retenus dans le cadre de cette étude sont $k_{\text{eff}} + 3\sigma < 0,925$ pour les configurations de colis isolé et de réseau de colis et dépendent précisément du milieu fissile de référence.

Ce critère inclut une marge plus importante par rapport aux critères usuels afin de tenir compte du nombre limité de benchmarks pour les milieux poudres faiblement ou moyennement modérés.

10.2 HYPOTHESES DE CALCUL

En CNT, le colis est modélisé intègre.

Dans la configuration « colis isolé CAT », les capots sont négligés et la résine neutrophage est brûlée et remplacée par de l'eau. Tous les interstices (trou dans le barillet, etc.) sont remplis d'eau. Des calculs ont montré que les résultats sont statistiquement équivalents à ceux obtenus avec les interstices remplis d'air.

Dans la configuration « réseau infini de colis en CAT », les capots sont négligés et la résine neutrophage est brûlée et remplacée par de l'air. Tous les interstices (trou dans le barillet, etc.) sont remplis par de l'air.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 20/24

Trois milieux fissiles de référence sont considérés :

- un milieu fissile de référence UO₂,
- un milieu fissile de référence MOX (U-PuO₂),
- un milieu fissile de référence Phénix.

Les milieux fissiles sont modélisés sous forme homogène et/ou hétérogène, modérés par une quantité quelconque d'eau.

La cavité est remplie par la matière fissile pour les milieux de référence UO₂ et MOX.

Pour le milieu de référence Phénix, la masse d'oxyde est limitée à 3 kg.

Les éléments suivants constituent le système d'isolement à garantir :

- Pour l'emballage : diamètre maximal de la cavité (150 mm), épaisseurs d'acier de la virole, des tapes (avant et arrière) et du contre-ringard, épaisseurs d'acier et de plomb du barillet, épaisseurs d'acier et de tungstène ringard et du contre-ringard ;
- Pour les contenus : la limitation de la masse (certains contenus seulement), la forme physico chimique du milieu fissile, la teneur isotopique (pour certains contenus seulement).

10.3 CONCLUSION

Le modèle de colis IR100 respecte les critères de sûreté-criticité retenus.

L'indice de sûreté-criticité vaut : $ISC = 0$.

Pour tous les contenus identifiés au paragraphe 4, les calculs mettent en évidence le respect des critères d'admissibilité précisés au paragraphe 10.1.

11. ANALYSE DES RISQUES SUBSIDIAIRES

11.1 OBJECTIFS

L'objet de ce paragraphe est de démontrer que le modèle de colis constitué de l'emballage IR100, chargé de ses différents contenus admissibles, permet de prévenir les risques subsidiaires et en particulier le risque d'explosion. Ce risque est lié à la production et l'accumulation dans le volume libre de l'enveloppe de confinement de gaz inflammables par :

- radiolyse de l'eau résiduelle en CNT et CAT ;
- thermolyse de l'eau résiduelle : ce phénomène n'étant observé qu'à très haute température, il n'est pas retenu dans cette analyse.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 21/24

Par ailleurs, les contenus A5 et A11 peuvent contenir des éléments potentiellement pyrophoriques comme des copeaux ou des poudres métalliques finement divisés.

Lorsque le risque de pyrophoricité ne peut être écarté la cavité est inertée à l'azote.

11.2 HYPOTHESES DE CALCUL

Les contenus concernés par le risque de radiolyse sont les contenus A8, A9, A10, A11 et A21 susceptibles de contenir une certaine quantité d'eau résiduelle.

L'étude de radiolyse définit à la fois la puissance thermique maximale de chaque contenu et le temps de transport maximal aléas compris avant atteinte d'une atmosphère explosive, en fonction de la température, pour un chargement de 10 W à chaque extrémité de la cavité interne.

La durée maximale séparant la fermeture de l'enveloppe de confinement de son ouverture, et les aléas compris, est fixée à :

- 19 jours pour les transports nationaux (A8 à A11),
- 29 jours pour les transports intra-continentaux (contenu A21).

11.3 CONCLUSION

La limite inférieure d'inflammabilité (LII) de l'hydrogène, teneur en dessous de laquelle aucune flamme ne peut avoir lieu et se propager, en fonction de la température est de 3,63% en CNT et 3,44% en CAT.

Néanmoins, ces valeurs peuvent être dépassées sans pour autant que l'inflammation ne soit sévère. En effet, si la limite de sévérité d'explosion inférieure (LSEI) n'est pas dépassée, une inflammation est possible mais elle ne génère qu'une faible surpression et le risque est maîtrisé. La valeur de la LSEI dépend de la pression et de la température mais est, dans tous les cas, supérieure à 7,5%.

Le risque hydrogène est maîtrisé pour une puissance thermique des contenus A8, A9, A10, A11 et A21 de 100 mW et un volume de 8 litres (contenu +aménagement interne).

Pour le contenu A11, la puissance peut atteindre 100 mW pour un volume de 15 litres et 80 mW pour un volume de 18 litres.

12. EXPLOITATION DE L'EMBALLAGE

12.1 INSTRUCTIONS D'UTILISATION

L'emballage est étudié pour être chargé et déchargé à sec en cellule, verticalement ou horizontalement.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 22/24

12.1.1 Manutention

L'emballage est manutentionné par les oreilles de manutention situées sur le corps de l'emballage.

12.1.2 Arrimage

L'arrimage de l'emballage est assuré par deux tourillons et un socle de pose.

Le colis doit être arrimé en position horizontale sur son moyen de transport.

12.1.3 Inertage

En cas de chargement des contenus A5 et A11, si le risque de pyrophoricité ne peut être écarté, la cavité est inertée à l'azote.

12.1.4 Contrôles avant expédition

Avant expédition, il est notamment procédé aux contrôles réglementaires suivants :

- contrôles réglementaires de débit de dose sur le colis et sur le moyen de transport ;
- vérification de l'entretien conformément à son autorisation en vigueur ;
- conformité du contenu à son autorisation en vigueur ;
- contrôle d'étanchéité ;
- contrôle des vis et de leur serrage ;
- contrôle radiologique du colis (contamination et intensité du rayonnement) ;
- contrôle de la température des surfaces accessibles de l'emballage ;
- vérification de la mise en place des scellés condamnant l'accès aux orifices.

12.2 INSTRUCTIONS DE MAINTENANCE

Chaque emballage fait l'objet :

- d'une petite maintenance, tous les 30 transports à plein ou tous les 3 ans, selon ce qui est le plus limitatif ;
- d'une grande maintenance, tous les 60 transports à plein ou tous les 6 ans, selon ce qui est le plus limitatif.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 23/24

Les opérations de petite maintenance consistent :

- au contrôle du bon état général de l'emballage (aspect extérieur, plaques réglementaires, bouchons fusibles thermiques, capots, etc.) ;
- au contrôle de l'état et de l'étanchéité de l'enveloppe de confinement (joints, portées de joints, test d'étanchéité) ;
- au remplacement des joints des tapes et bouchons à l'exception de la tape 211 ;
- au contrôle du bon état mécanique général, en particulier des organes d'arrimage et de manutention ;
- au contrôle de bon fonctionnement.

Les opérations de grande maintenance consistent :

- au contrôle de chaque pièce par démontage puis remontage ;
- au contrôle visuel de la cavité interne et de toutes les surfaces internes accessibles ;
- au contrôle dimensionnel des composants internes et des tourillons ;
- au contrôle par ressuage des soudures des organes d'arrimage et de manutention ;
- au contrôle d'étanchéité des fusibles des capots et du corps ;
- au remplacement de tous les joints.

13. SYSTEME DE MANAGEMENT DE LA QUALITE

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

- la conception ;
- la fabrication et la qualification ;
- l'exploitation (chargement, transport, déchargement, entreposage en transit) ;
- la maintenance et la réparation.

Ces activités sont réalisées par différents acteurs (concepteur, maître d'ouvrage, maître d'œuvre, constructeurs, utilisateurs, expéditeurs, transporteurs, sociétés de maintenance, etc.) qui doivent tous mettre en place des systèmes de management de la qualité adaptés, répondant aux exigences de l'un ou l'autre des documents en référence, et produire et conserver les documents justificatifs (enregistrements) de leur activité.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis IR100	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-007	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	<u>Indice</u> : A
		Page 24/24

14. CONCLUSION

Le modèle de colis constitué par l'emballage IR100 chargé de son contenu est conforme à la réglementation applicable aux colis de type B contenant des matières fissiles :

- les essais de chute et simulations numériques garantissent la tenue mécanique de l'emballage et du système de confinement ;
- la température de surface externe est inférieure à 85°C en CNT ;
- le confinement de la matière radioactive est maintenu aux pressions et températures atteintes en CNT et en CAT ;
- le modèle de colis respecte les critères réglementaires de relâchement d'activité en CNT et en CAT ;
- les débits équivalents de dose calculés en CTR, en CNT et en CAT sont inférieurs aux limites réglementaires ;
- le modèle de colis respecte les critères de sûreté-criticité ;
- les risques liés à la radiolyse/thermolyse et à la pyrophoricité des matières transportées sont maîtrisés ;
- les instructions d'utilisation et de maintenance relatives à toutes les opérations importantes pour la sûreté sont définies.