







Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200

	Direction de l'énergie nucléaire Département de services nucléaires Service des transports des matières radioactives Laboratoire d'Exploitation du Parc d'Emballages	CEA/DEN/CAD/DSN/STMR DO 423 14/06/19  19PPFM000615 diffusé le : 14/06/19
---	---	---

Niveau de confidentialité		Direction d'objectifs	Domaine	Projet	EOTP	Partenaire/Client
DO	<input checked="" type="checkbox"/>	CD	<input type="checkbox"/>	DDCC	-	-
DR	<input type="checkbox"/>	SD	<input type="checkbox"/>			
CCEA	<input type="checkbox"/>					
			TRANSPORT EMBALLAGE	-	-	-

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200

	Nom(s)	Fonction(s) et unité(s)	Visa(s)
Rédacteur	Société URANUS	Commande n°4000786237/P5H42	
Vérificateur(s)	L. DROUARD	Chargé d'affaires LEPE	
	T. CUVILLIER	Chef du LEPE	
Approbateur Emetteur	S. CLAVERIE-FORGUES	Chef du STMR	 Date : 28/06/2019

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200

SUIVI DES VERSIONS

Indice	Date de l'indice	Rédacteur	Nature de la modification	Nb pages du document
01	18/06/2018	URANUS	Émission initiale	23
02	Cf. visa	URANUS	Mise à jour du dossier conformément à la réunion mi-parcours.	23

Clf : 7.4.6.3

DIFFUSION INITIALE

DSN/DIR

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200

SOMMAIRE

1. Objet	5
2. Documents de reference	5
3. Description de l'emballage	5
3.1. Description générale	5
3.1.1. Corps de l'emballage	6
3.1.2. Partie avant	6
3.1.3. Partie arrière	6
3.1.4. Capots amortisseurs.....	7
3.1.5. Joints de confinement	7
3.2. Manutention et arrimage de l'emballage	7
3.3. Eléments importants pour la sûreté (EIS)	8
4. Description des contenus	9
4.1. Forme physique.....	9
4.2. Forme chimique.....	9
4.3. Propriétés radiologiques	10
4.4. Propriétés thermiques	10
4.5. Conditionnement des contenus autorisés.....	10
5. Etudes mécaniques	10
5.1. Objectifs	10
5.2. Données d'entrée	10
5.3. Résultats	11
5.3.1. Conditions normales de manutention et de transport	11
5.3.2. Conditions accidentelles de transports	11
5.4. Conclusion	12
6. Etude thermique	13
6.1. Objectifs	13
6.2. Données d'entrée	13
6.3. Résultats	13
6.3.1. Conditions normales de transport.....	13
6.3.2. Conditions accidentelles de transport	14
7. Etude de confinement	14
7.1. Objectifs	14
7.2. Données d'entrée	15
7.3. Résultats	15
8. Etude de radioprotection	16

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200

8.1. Objectifs	16
8.2. Données d'entrée	16
8.3. Résultats	17
9. Etude de sûreté-criticité.....	17
9.1. Objectifs	17
9.2. Données d'entrée	17
9.3. Résultats	18
10. Etude des risques subsidiaires	18
10.1. Objectifs	18
10.2. Résultats	19
11. Instruction d'exploitation et de maintenance de l'emballage.....	19
11.1. Utilisation	19
11.2. Maintenance.....	20
12. Assurance qualité.....	21
12.1. Conception	21
12.2. Fabrication	21
12.3. Utilisation	22
12.4. Maintenance.....	22
13. Conclusion.....	22

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200**1. OBJET**

La présente note a pour but de présenter et de justifier les solutions techniques retenues pour le transport en emballage IR 200 de matières radioactives diverses (tronçons de crayons combustibles, matières fissiles diverses, sources gamma et neutron...), permettant d'assurer les fonctions de sûreté imposées par la réglementation applicable ([1], [2] et [3]).

Cette note justifie la conformité à la réglementation applicable au transport :

- de colis B(U)F,
- de colis B(M)F.

2. DOCUMENTS DE REFERENCE

- [1] Accord européen relatif au transport international de marchandises Dangereuses par Route (ADR) en vigueur le 1er janvier 2017
- [2] Réglementation de transport des matières radioactives – Prescriptions de sûreté particulières N° SSR-6 (édition de 2012)
- [3] Arrêté du 29 mai 2009 modifié relatif aux transports de marchandises dangereuses par voies terrestres (arrêté TMD)
- [4] Règles Générales de Transport Internes (RGTI), 2016

3. DESCRIPTION DE L'EMBALLAGE**3.1. DESCRIPTION GENERALE**

L'emballage, de forme générale cylindrique, est formé d'un corps, d'une partie avant et d'une partie arrière, soudées, et de deux capots amortisseurs.

Les principales dimensions sont les suivantes :

- cavité interne :
 - longueur utile : 2 400 mm,
 - diamètre utile : 203 mm,
- encombrement hors tout :
 - longueur totale : 3 824 mm,
 - longueur sans capots : 3 178 mm,
 - diamètre sans capots (au niveau des tourillons) : 958 mm,
 - diamètre extérieur du corps : 820 mm.

Les principales masses sont les suivantes :

- masse de l'emballage vide (et sans les capots) : 10 382 kg,
- masse de l'emballage vide (avec les capots) : 11 542 kg,
- masse totale du colis : 12 200 kg.

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200**3.1.1. Corps de l'emballage**

Le corps délimite une cavité cylindrique, il est constitué successivement :

- d'une enveloppe interne en tôle d'acier inoxydable, de 23,5 mm d'épaisseur minimum,
- d'une première protection biologique (blindage gamma) en plomb, d'épaisseur constante égale à 145 mm,
- d'une deuxième protection biologique (blindage neutron) en résine de type VYAL B, d'épaisseur constante égale à 120 mm,
- d'une enveloppe externe en tôle d'acier inoxydable, de 20 mm d'épaisseur minimum. Elle comporte des pastilles « Porol » et des bouchons fusibles qui évitent la surpression en cas d'incendie. Elle reçoit une semelle fermée à ses extrémités, deux paires de tourillons, deux oreilles de manutention et quatre oreilles d'arrimage pour la position verticale.

3.1.2. Partie avant

La partie avant est constituée d'une bride en acier inoxydable soudée à la virole qui reçoit :

- un barillet formé d'un tambour en acier inoxydable, rempli de plomb, qui permet l'accès à la cavité. Il comporte une section de passage de 203 mm de passage. Il assure un blindage axial lorsqu'il est fermé et un blindage radial lorsqu'il est ouvert,
- deux étriers vissés à l'aide de 2 vis M42 qui maintiennent le barillet,
- un orifice de commande du barillet (fermé par la tôle du barillet) surmonté d'un bouchon de protection. La tôle du barillet est vissée par 8 vis M8 et est munie d'un joint d'étanchéité,
- un couvercle de tête, vissé par 24 vis M16 et muni d'un joint d'étanchéité, permettant la maintenance du barillet,
- une tôle de tête permettant le chargement du contenu, muni d'un joint d'étanchéité (EPDM ou FKM),
- un orifice d'évent (orifice A) dont la tôle est vissée par 8 vis M8. Cette tôle est munie d'un joint d'étanchéité.

3.1.3. Partie arrière

La partie arrière est constituée d'une bride en acier inoxydable soudée à la virole qui reçoit :

- un ringard en acier inoxydable, muni d'un disque de blindage en tungstène de 40 mm d'épaisseur,
- un couvercle de fond permettant d'accéder au ringard,
- un orifice de remplissage et de vidange (orifice B) dont la tôle est munie d'un joint d'étanchéité.

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200**3.1.4. Capots amortisseurs**

Deux capots amovibles de géométrie identique, constitués de balsa et de contreplaqué, entourés d'une enveloppe en acier inoxydable, sont fixés par 6 vis CHC M20 aux extrémités de façon à amortir l'emballage en cas de chute. Le bois sert également d'isolant thermique. L'accès aux ouvertures est interdit en cours de transport grâce à la présence de ces capots.

Pour éviter les surpressions en cas d'incendie, les capots sont pourvus de soupape.

3.1.5. Joints de confinement

L'étanchéité de l'emballage est assurée par l'enceinte de confinement et par des joints de confinement en élastomère :

- soit de type EPDM ;
- soit de type FKM.

3.2. MANUTENTION ET ARRIMAGE DE L'EMBALLAGE

Les organes de manutention et d'arrimage de l'emballage sont les suivants :

- deux paires de tourillons soudés, l'une à l'avant, l'autre à l'arrière, utilisées pour le transport et le basculement sur le châssis, ainsi que pour la manutention,
- deux oreilles soudées sur la génératrice supérieure du corps, utilisées pour la manutention du colis à l'horizontal (avec ou sans son châssis), et éventuellement lors des opérations de basculement sur le châssis,
- quatre oreilles d'arrimage utilisées exclusivement lors du déplacement en position verticale à l'intérieur d'une installation ; elles sont rendues inopérantes lors des transports externes et des opérations de manutention,
- une semelle sur laquelle peut reposer le colis lorsqu'il n'est pas muni de ses capots ; cette semelle garantit une charge au sol inférieure à 12 t/m².

Pendant le transport, l'arrimage est assuré en position horizontale par les tourillons. La position verticale n'est utilisée que pour des déplacements au sein même des installations.

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200

3.3. ELEMENTS IMPORTANTS POUR LA SURETE (EIS)

Le tableau ci-après établit, pour chaque fonction de sûreté (FIS), la liste des éléments importants pour la sûreté (EIS) et les paramètres à garantir pour leur maintien :

Fonctions de sûreté (FIP)	Éléments importants pour la sûreté (EIS)		Paramètres
Confinement	Couvercle avant, tpe avant, tpe arrière, tapes d'orifices A, B et de commande de barillet		Caractéristiques mécaniques et thermiques
	Joint interne de couvercle et de tapes		Performance des joints
	Cavité interne		Dimensions : Ø203 mm x 2400 mm
Protection radiologique	Épaisseurs radiales	Viroles	Virole interne : 23,5 mm mini Virole de plomb : 145 mm mini Virole de résine : 120 mm mini Virole externe en acier : 20 mm mini
	Épaisseurs axiales	Barillet	Ø350 mm de plomb 5 mm d'acier
		Couvercle avant	68 mm d'acier
		Bride arrière Poussoir Tape	205 + 35 + 30 mm d'acier 40 mm de tungstène
		Capot avant Capot arrière	12 mm d'acier 16 mm d'acier
Système d'isolement pour assurer la sûreté-criticité	Contenus		Caractéristiques des contenus
	Aménagements internes		Ø internes : Ø160 mm, Ø120 mm et Ø60 mm
	Bouchon, tpe de barillet, axes		Caractéristiques mécaniques
	Couvercles de fond et de tête, tpe de tête		Épaisseurs décrites plus haut
	Viroles d'acier, de plomb et de résine		Épaisseurs décrites plus haut
Dissipation de la puissance interne	Viroles d'acier, de plomb et de résine		Dimensions (voir plus haut) et caractéristiques thermiques
Protection contre les chocs	Virole externe Capots avant et arrière		Dimensions (voir plus haut) et caractéristiques mécaniques Diamètre capot : 1 458 mm Hauteur capot : 727 mm
Protection contre l'incendie	Viroles externes et résine Capots avant et arrière		Dimensions (voir plus haut) et caractéristiques thermiques

Tableau 1 : Éléments importants pour la sûreté

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200**4. DESCRIPTION DES CONTENUS**

Les contenus autorisés à être transportés dans l'emballage IR 200 sont les suivants :

- Contenu n°1 : oxydes d'uranium, irradiés ou non, en REB ou REP ;
- Contenu n°2 : oxydes mixtes de plutonium et d'uranium, irradiés ou non, en REB ou en REP ;
- Contenu n°3 : composés d'oxydes mixtes d'uranium et de plutonium, ou de nitrures mixtes d'uranium et de plutonium, ou de carbures mixtes d'uranium et de plutonium, irradiés ou non, en RNR ;
- Contenu n°4 : matières radioactives solides non fissiles ;
- Contenu n°5 : matières uranifères solides, irradiées ou non en réacteur MTR, UNGG ou en réacteur à eau lourde ;
- Contenu n°6 : éléments combustibles PN (propulsion nucléaire) irradiés ou non, à base d'oxyde d'uranium ;
- Contenu n°7 : mélange d'uranium et/ou de plutonium ;
- Contenu n°8 : oxyde d'uranium et/ou oxyde de plutonium avec présence ou non d'oxyde d'uranium appauvri irradiés ou non et toutes autres matières inertes ;
- Contenu n°9 : éléments combustibles constitués d'oxyde d'uranium, ou d'oxyde d'uranium et de plutonium irradiés en REP ou REB ou MTR ou réacteur à Eau Lourde (EL) ou issus de la PN, seuls ou dans des matrices inertes (sans graphite et sans Béryllium).

4.1. FORME PHYSIQUE

Ces matières peuvent se présenter sous forme :

- solide quelconque ;
- de crayons, d'aiguilles, de capsules, d'assemblages ou de plaques, entiers ou en morceaux, contenant du combustible ;
- de pastilles combustibles, de tronçons de crayons ou d'aiguilles ;
- de poudre combustible ;
- de sources.

4.2. FORME CHIMIQUE

Ces matières se présentent sous forme d'oxyde ou de métal, éventuellement alliées avec d'autres éléments (N, C, Fe, Al, F...).

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200

4.3. PROPRIETES RADIOLOGIQUES

L'activité totale maximale autorisée dans l'emballage IR 200 est $1,80 \cdot 10^{17}$ Bq, excepté pour le contenu n°4, pour lequel l'activité totale ne doit pas dépasser $3,60 \cdot 10^{14}$ Bq.

4.4. PROPRIETES THERMIQUES

La puissance thermique maximale est limitée à 720 W à condition que la puissance linéique ne dépasse pas 300 W/m. Dans le cas contraire, la puissance thermique maximale est limitée à 100 W.

4.5. CONDITIONNEMENT DES CONTENUS AUTORISES

Les contenus (matières radioactives) peuvent être conditionnés :

- sans aménagement interne ;
- avec des aménagements internes assurant une fonction de sûreté-criticité et dont la géométrie est conservée à l'issue des épreuves des conditions normales et accidentelles de transport (CNT et CAT) (conteneurs ou étuis en acier inoxydable de section cylindrique, étanches ou non, de diamètre utile variable) ;
- avec des aménagements internes, en aluminium ou en acier inoxydable, étanches ou non, permettant de faciliter le chargement et le déchargement de la matière et/ou permettant d'éviter la contamination de la cavité (étui de conditionnement, râtelier de maintien, fourreau ou pelle de chargement / déchargement).

Le chargement du contenu dans un aménagement interne aux fins de criticité doit être réalisé à sec. La présence d'eau à l'intérieur de ces aménagements est interdite (sauf eau contenue dans des crayons, capsules ou aiguilles ruptés).

5. ETUDES MECANIQUES

5.1. OBJECTIFS

Ce paragraphe analyse la résistance mécanique de l'emballage IR 200 et justifie son respect des exigences réglementaires [2] concernant les colis de type B(U) et B(M) chargés de matières radioactives fissiles.

5.2. DONNEES D'ENTREE

Les études mécaniques sont organisées de la manière suivante :

- une analyse du comportement de l'emballage, des organes de manutention et des aménagements internes dans les conditions des épreuves réglementaires [2] concernant les conditions **normales** de manutention et de transport. Ces épreuves sont les suivantes :
 - aspersion d'eau ;
 - chute libre de 0,6 m sur une dalle indéformable ;
 - compression/gerbage de colis ;

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200

- pénétration ;
- une analyse du comportement de l'emballage et des aménagements internes dans les conditions des épreuves réglementaires [2] concernant les conditions **accidentelles** de transport. Ces épreuves sont les suivantes :
 - chute libre de 9 m sur une dalle indéformable ;
 - chute de 1 m sur poinçon ;
 - immersion à 15 m pendant 8 h ;
 - épreuve poussée d'immersion sous une hauteur d'eau de 200 m pendant 1 heure, qui s'applique ici pour certains contenus contenant plus de $10^5 A_2$.

5.3. RESULTATS

5.3.1. Conditions normales de manutention et de transport

L'emballage est conforme aux épreuves réglementaires en conditions normales de transport et de manutention.

5.3.2. Conditions accidentelles de transports

5.3.2.1. Epreuves de chutes

Les différentes campagnes d'essais de chute, réalisés à température ambiante sur une maquette représentative de l'emballage, montrent que l'emballage résiste aux épreuves mécaniques réglementaires (chute de 1 m sur poinçon de 150 mm de diamètre et chutes de 9 m).

N.B. : De manière pénalisante, les chutes sont effectuées sur une dalle indéformable afin que toute l'énergie soit absorbée par le colis.

Ces essais ont été confortés par des simulations numériques réalisées à -40°C et à la température maximale en conditions normales de transport (85°C pour le bois des capots et 110°C pour toutes les autres pièces de l'emballage) qui confirment le comportement satisfaisant du modèle de colis après les épreuves de chutes représentatives des conditions accidentelles de transport.

Les déformations du corps de l'emballage étant négligeables, la géométrie de l'emballage sera conservée pour la configuration du colis endommagé dans les analyses thermiques, de radioprotection et de sûreté-criticité.

5.3.2.2. Epreuves d'immersion

L'emballage immergé sous 15 m d'eau subit une pression relative externe de 1,5 bar, et de 20 bar sous 200 m. Cette dernière pression est retenue de façon enveloppe dans les calculs qui démontrent que l'enveloppe de confinement résiste à une pression de 20 bar relatifs sans que les matériaux de ses constituants ne soient sollicités au-delà de leur limite élastique.

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200

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

5.4. CONCLUSION

Ces études mécaniques montrent que le colis IR 200 satisfait aux exigences requises.

Les hypothèses de modélisation résultantes des épreuves mécaniques réglementaires et prises dans les études thermiques, de relâchement, de radioprotection et de criticité sont rappelées ci-dessous.

Thermique

En conditions normales de transport comme en conditions accidentelles de transport, un emballage intègre sans dommages particuliers est considéré.

Relâchement

Le maintien du taux de fuite à l'issue des conditions normales et accidentelles de transport est considéré. En effet, l'étanchéité de l'enceinte de confinement est préservée suites aux épreuves réglementaires précédemment présentées.

Radioprotection

En conditions normales de transport, il n'est considéré aucune diminution locale significative de l'épaisseur de blindage.

En conditions accidentelles de transport, les hypothèses suivantes sont retenues :

- la résine du corps de l'emballage a disparu sur une épaisseur de 10 mm (pour tenir compte de son enfoncement par le poinçon mais également pour tenir compte des résultats de l'épreuve thermique) ;
- les capots amortisseurs ne sont pas pris en compte.

Criticité

En conditions normales de transport, il n'est considéré aucune diminution locale significative de l'épaisseur de blindage.

En conditions accidentelles de transport, les hypothèses suivantes sont retenues :

- la résine du corps de l'emballage a disparue sur une épaisseur de 10 mm (pour tenir compte de son enfoncement par le poinçon mais également pour tenir compte des résultats de l'épreuve thermique) ;
- les capots amortisseurs ne sont pas pris en compte.

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200**6. ETUDE THERMIQUE****6.1. OBJECTIFS**

L'objectif de ce paragraphe est d'étudier le comportement thermique de l'emballage IR 200, ainsi que des contenus qu'il transporte, en conformité avec la réglementation pour les colis de type B. Cette étude consiste à :

- déterminer les températures maximales atteintes par les différents composants de l'emballage en conditions normales (avec ou sans caisson de transport) et accidentelles de transport ;
- déterminer la puissance maximale admissible pour que la température de surface du colis ne dépasse pas 85°C (colis sans caisson et sans ensoleillement).

6.2. DONNEES D'ENTREE

La puissance thermique linéique maximale du contenu vaut 300 W/m.

Un chargement localisé (position quelconque) de 100 W est également autorisé dans l'emballage.

Les conditions aux limites sont définies par :

- En conditions normales de transport sous caisson, ce dernier est soumis à un ensoleillement de 800 W/m² sur le dessus et 200 W/m² sur les côtés, la température ambiante est de 38°C. De façon conservative, le calcul est réalisé avec un ensoleillement permanent, bien que la réglementation impose un ensoleillement de 12h par période 24h.
- En conditions normales de transport à l'air libre, l'emballage est soumis à un ensoleillement de 400 W/m² sur les surfaces courbes, la température ambiante est de 38°C. De façon conservative, le calcul est réalisé avec un ensoleillement permanent, bien que la réglementation impose un ensoleillement de 12h par période de 24h.
- En conditions accidentelles, le colis est initialement à la température déterminée en conditions puis il est directement exposé (hors du caisson) au feu : température ambiante de 800°C pendant 30 minutes avec retour aux conditions normales (sans caisson) en régime permanent et avec ensoleillement de 400 W/m².

En conditions normales et accidentelles de transport, les hypothèses concernant l'ensoleillement, la température ambiante, les différents coefficients d'absorptivité solaire de surface (avant, pendant et après le feu), l'émissivité de l'air ou des surfaces sont conformes aux prescriptions réglementaires [1].

6.3. RESULTATS**6.3.1. Conditions normales de transport**

La puissance qui conduit à une température de la virole externe de 85 °C est supérieure à la puissance maximale admissible des contenus, la température de la virole externe ne dépassera donc jamais 85 °C lorsque l'emballage est à l'ombre.

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200

La température maximale atteinte par les joints de l'emballage est de 102 °C, elle reste donc inférieure à la température maximale admissible par les joints de 160 °C en conditions normales de transport (joints EPDM ou FKM).

Les températures atteintes par les divers constituants du colis sont toutes acceptables pour les matériaux qui les composent. Notamment, la résine neutrophage atteint la température de 103 °C, ce qui reste inférieure à la température limite d'utilisation de 160 °C.

6.3.2. Conditions accidentelles de transport

La température maximale atteinte par les joints de l'emballage est de 137 °C, elle reste donc inférieure à la température maximale admissible par les joints de 180 °C en conditions accidentelles de transport (joints EPDM ou FKM).

De même, la température maximale atteinte par les différents composants de l'emballage reste inférieure aux critères réglementaires.

L'étanchéité des joints toriques de l'enveloppe de confinement de l'emballage IR 200 est assurée en température, en conditions normales et accidentelles de transport.

7. ETUDE DE CONFINEMENT

7.1. OBJECTIFS

Ce paragraphe justifie le respect des critères réglementaires de relâchement d'activité en conditions normales et accidentelles de transport lorsque l'emballage IR 200 est chargé des différents contenus tels que définis au paragraphe 4.

Ces critères pour un colis de type B sont :

- 10^{-6} A₂/h en conditions normale de transport ;
- 1 A₂ en une semaine en conditions accidentelles de transport.

Les masses de métal lourd transportables dans l'emballage IR 200 au regard de ces critères y sont aussi déterminées.

Le relâchement d'activité est estimé pour chaque orifice (six en tout : deux tapes d'orifices A et B, une tape de barillet, une tape avant, un couvercle avant, un couvercle de fond).

L'étanchéité des joints toriques de l'enveloppe de confinement de l'emballage IR 200 est assurée aux différentes températures des conditions normales et des conditions accidentelles de transport (cf. paragraphe 6).

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200**7.2. DONNEES D'ENTREE**

À sa fermeture, l'emballage est mis en dépression à 0,2 bar. Aux températures représentatives des conditions normales de transport, la pression est de 0,37 bar.

La somme des taux de fuite des joints contrôlés avant transport de l'emballage IR 200 ne doit pas dépasser un taux de $6,65 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ SLR}$.

L'emballage IR 200 est équipé de joints élastomères, soit de type FKM, soit de type EPDM. Dans le cas des joints EPDM, le transport d'éléments ruptés n'est pas autorisé, sauf pour le contenu n°8. Dans le cas des joints FKM, le transport pour des températures inférieures à -20 °C n'est pas autorisé.

Sept cas de calculs sont considérés pour les contenus en fonction du type d'élément présent dans la cavité de l'emballage :

1. Sain non-pressurisé : le contenu est constitué d'un maximum de :
 - a. soit 20 ou 40 éléments étanches et non-pressurisés avant irradiation,
 - b. soit 20 ou 40 éléments sous forme de plaques saines ;
2. Sain pressurisé : le contenu est constitué d'un maximum de 40 éléments pressurisés avant irradiation et étanches ;
3. Rupté non-pressurisé : le contenu est constitué d'un maximum de 40 éléments non-pressurisés avant irradiation et ruptés (pouvant contenir de l'eau) ;
4. Rupté pressurisé : le contenu est constitué d'un maximum de 40 éléments pressurisés avant irradiation et ruptés (pouvant contenir de l'eau) ;
5. Boursoufflé : le contenu se trouve sous la forme d'un maximum de 40 plaques boursoufflées (absence d'eau) ;
6. Non-intègre : le contenu est non intègre. Il est éventuellement conditionné dans des aménagements internes étanches qui ne sont pas pressurisés (pastilles, éléments tronçonnés ou poudre se trouvant dans un étui par exemple). Le contenu est exempt d'eau ;
7. Mélange : le contenu est constitué d'un mélange d'éléments sains et/ou ruptés et/ou boursoufflés et/ou non-intègres.

7.3. RESULTATS

Les critères réglementaires de relâchement d'activité en conditions normales et accidentelles de transport sont respectés lorsque l'emballage IR 200 est chargé des contenus définis au paragraphe 4 en considérant

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200

les masses maximales de métal lourd autorisées dans l'emballage IR 200 pour chaque contenu et en tenant compte des marges prises pour couvrir les incertitudes de calculs.

La pression interne dans l'emballage n'excède jamais 6,80 bars (conditions accidentelles de transport), ce qui est sans influence sur l'enceinte de confinement. Cette pression reste inférieure à la pression maximale admissible en situation exceptionnelle de service égale à 84 bars.

8. ETUDE DE RADIOPROTECTION

8.1. OBJECTIFS

L'objectif de ce chapitre est :

- d'évaluer l'efficacité du blindage du colis constitué par l'emballage IR 200 muni de ses aménagements internes et chargé de ses différents contenus ;
- de montrer que ce type de colis respecte la réglementation en matière de débits de dose au contact et à 1 m de l'emballage [2].

En conditions normales de transport sous utilisation non exclusive, le débit d'équivalent de dose maximum ne doit pas dépasser :

- 2 mSv/h en tout point des surfaces externes du colis ;
- 0,1 mSv/h à 1 m des surfaces externes du colis.

En conditions normales de transport sous utilisation exclusive, le débit d'équivalent de dose maximum ne doit pas dépasser :

- 10 mSv/h en tout point des surfaces externes du colis ;
- 2 mSv/h en tout point des surfaces externes du véhicule y compris les surfaces supérieures et intérieures ;
- 0,1 mSv/h en tout point situé à 2 m des surfaces latérales externes du véhicule.

Dans les deux cas de transport exclusive ou non, le colis doit empêcher, suite aux épreuves des conditions normales de transport, une augmentation de plus de 20% de l'intensité de rayonnement maximale à la surface externe du colis.

En conditions accidentelles de transport, le débit d'équivalent de dose maximum ne doit pas dépasser 10 mSv/h en tout point situé à 1 m des surfaces externes du colis.

8.2. DONNEES D'ENTREE

En conditions normales ou accidentelles de transport, la géométrie de l'emballage IR 200 retenue pour le calcul est conforme à la description de l'emballage du paragraphe 3. Pour les conditions accidentelles de

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200

transport, ceci est validé par le fait que les chutes n'entraînent que des déformations négligeables sur l'emballage, et que l'épreuve de feu ne modifie pas la géométrie.

Par ailleurs l'emballage résiste à l'épreuve d'immersion sans déformation significative.

Cependant, de manière pénalisante, la résine est supposée avoir disparu sur 10 mm d'épaisseur et les capots amortisseurs ne sont pas pris en compte pour les calculs en conditions accidentelles de transport.

8.3. RESULTATS

Les débits d'équivalents de dose autour de l'emballage IR 200 respectent les critères limites, en conditions normales et accidentelles de transport lorsqu'il est chargé des contenus tels que définis au paragraphe 4.

9. ETUDE DE SURETE-CRITICITE

9.1. OBJECTIFS

Ce paragraphe justifie la sous-criticité du modèle de colis IR 200, chargé de matières « uranifères » et/ou « plutonifères » fissiles dans les conditions normales et accidentelles de transport.

L'analyse de la sûreté criticité est basée sur le calcul de coefficient de multiplication (k_{eff}) d'un colis isolé et d'un réseau de colis, dans les conditions réglementaires de modération et de réflexion.

Le critère de sous-criticité retenu pour un colis isolé est :

$$k_{eff} + 3\sigma \leq 0,95$$

avec $\sigma = 0,002$ ou $\sigma = 0,001$.

Le critère de sous-criticité retenu pour un réseau de 2N colis dans les conditions accidentelles et de 5N dans les conditions normales de transport est :

$$k_{eff} + 3\sigma \leq 0,98$$

avec $\sigma = 0,002$.

N.B. : N représente le nombre de colis maximal admissible sur le moyen de transport.

9.2. DONNEES D'ENTREE

Les études concernant les colis isolés retiennent les hypothèses communes suivantes :

- le colis est entouré d'une couche d'eau de 20 cm d'épaisseur ;
- le colis est endommagé :
 - la résine a disparu sur une épaisseur de 10 mm et est remplacée par de l'eau,
 - le bois a entièrement disparu,

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200

- l'eau occupe tous les espaces libres de l'emballage (dont la cavité et le système d'ouverture) et du contenu,
- la vidange différentielle est possible ;
- la matière fissile est considérée sous forme d'un cylindre de hauteur variable en fonction de sa concentration $C(U)$, $C(UO_2)$, $C(Pu)$, $C(U + Pu)$ ou $C[(U + Pu)O_2]$ et de sa masse ;
- la matière fissile peut prendre trois positions dans la cavité (côté fond (bas), centre, côté barillet (haut)).

Les études concernant les réseaux 2N et 5N de colis sont couvertes par une seule configuration d'étude à savoir le réseau infini de colis en conditions accidentelles de transport.

En conditions normales ou accidentelles de transport, la présence de matières hydrogénées à l'intérieur de l'emballage est autorisée, à l'exclusion de toutes celles dont la concentration en hydrogène est supérieure à celle de l'eau.

9.3. RESULTATS

Pour tous les contenus identifiés au paragraphe 4 les calculs montrent le respect des critères d'admissibilité précisés au paragraphe 9.1 et ont permis d'identifier les masses maximales autorisées de métal lourd pour chaque contenu qui garantissent la sous-criticité.

Pour l'ensemble des configurations envisagées, le nombre de colis N est quelconque.

La présence de matériaux réflecteur provenant des aménagements internes (aux fins de criticité ou facilitant le chargement et le déchargement des contenus) ou des matrices combustibles (gainés, boîtes, étuis...) est autorisée dans la cavité de l'emballage en quantité quelconque. Il en est de même pour le modérateur.

10. ETUDE DES RISQUES SUBSIDIAIRES

10.1. OBJECTIFS

Ce paragraphe étudie les dégagements gazeux dus à la radiolyse et la thermolyse en CNT et CAT.

Le but est de déterminer la quantité maximale de produits hydrogénés admissible dans la cavité de l'emballage pour tous les contenus, ainsi que le nombre maximal admissible de crayons ruptés pouvant contenir de l'eau (qui produit de l'hydrogène par radiolyse), afin de garantir que la quantité d'hydrogène relâchée sous forme gazeuse par radiolyse et thermolyse reste en dessous du seuil d'inflammabilité (LII).

A ces quantités maximales est liée une durée de transport maximale qui ne doit pas être dépassée pour garantir que le taux de dihydrogène reste en dessous de la limite d'explosivité.

Cette étude permet d'écarter le risque d'inflammation et d'explosion de dihydrogène dans la cavité.

Enfin, l'impact d'une réaction d'explosion de dihydrogène dans la cavité sur la sûreté du colis est étudié.

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200**10.2. RESULTATS**

Les modalités d'expédition spécifiques au transport des contenus comprenant des crayons inétanches et/ou des produits hydrogénés permettent de garantir que la teneur en hydrogène dans le ciel gazeux de la cavité est inférieure à la limite inférieure d'inflammabilité de l'hydrogène pendant toute la durée du transport. Ainsi, l'absence de risque d'inflammation et d'explosion du dihydrogène dans la cavité des modèles de colis IR 200 est assurée.

De plus, la surpression provoquée par la radiolyse de l'eau est négligeable et sans conséquences sur les études de relâchement effectuées.

Enfin, dans l'hypothèse d'une réaction d'explosion de l'hydrogène par déflagration, la pression maximale atteinte dans la cavité du modèle de colis IR 200 est inférieure à la pression maximale admissible en situation exceptionnelle de service pour l'emballage IR 200 (cf. paragraphe 7). Ainsi, l'explosion par déflagration de l'hydrogène ne remet pas en cause la tenue mécanique de l'enceinte de confinement.

La sûreté du modèle de colis IR 200 n'est pas remise en cause dans l'hypothèse d'une réaction d'explosion de l'hydrogène dans la cavité.

11. INSTRUCTION D'EXPLOITATION ET DE MAINTENANCE DE L'EMBALLAGE

Cette partie décrit les instructions d'utilisation et de maintenance prévues pour l'emballage IR 200.

11.1. UTILISATION

Les instructions d'utilisation font l'objet d'une notice d'utilisation. Les exploitants peuvent également établir des modes opératoires adaptés à leur installation et conformes à la notice d'utilisation.

Le colis IR 200 ne peut pas être gerbé.

L'emballage IR 200 peut être chargé indifféremment en piscine ou en cellule, à l'horizontale ou à la verticale. Quelle que soit l'orientation de l'emballage, il est interdit de poser le colis en appui sur ses capots : c'est la semelle ou les tourillons par le biais du châssis qui doivent reprendre les efforts.

Le transport s'effectuant à sec, les consignes de chargement en piscine comportent une opération de séchage de la cavité.

Le chargement du contenu dans un aménagement interne aux fins de criticité doit être réalisé à sec, la présence d'eau à l'intérieur de cet aménagement étant interdite. De même, le chargement doit se faire à sec en cas de présence potentielle de sodium.

Pour certains contenus, des précautions doivent être prises à l'ouverture de l'emballage pour pallier le risque de pyrophoricité.

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200

L'emballage IR 200 fait l'objet de contrôles à effectuer avant chaque transport :

- contrôle d'étanchéité selon la norme ISO 12807 ;
- mise en dépression de la cavité interne ;
- vérification du serrage des vis ;
- mise en place des scellées sur les tubes de fixation des capots ;
- mesure des températures des surfaces accessibles.

L'expéditeur doit également s'assurer que les étiquettes et les marquages réglementaires sont conformes à la réglementation et que les documents de transport ont été correctement renseignés.

11.2. MAINTENANCE

L'emballage doit faire l'objet d'un suivi et d'un entretien périodique tous les 3 ans ou 30 cycles de transport (petite maintenance) et tous les 6 ans ou 60 cycles de transport (grande maintenance). Des opérations de maintenance à chaque cycle sont également prévues.

N.B. : par cycle, on entend un aller-retour de l'emballage.

Les opérations de maintenance à chaque cycle consistent :

- à vérifier le bon état général de l'emballage ;
- à l'inspection visuelle de la visserie ;
- à vérifier le bon fonctionnement du barillet (pas de point dur lors de la manipulation du barillet à l'ouverture de l'emballage).

Les opérations de petite maintenance consistent :

- aux opérations de maintenance effectuées à chaque cycle ;
- à l'inspection visuelle des portées et des gorges de joints ;
- au remplacement des joints des quatre tapes et du couvercle de fond ;
- à la mise en œuvre d'essais d'étanchéité des joints de l'enceinte de confinement : critère $1,33 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ SLR}$;
- à l'inspection visuelle des organes de manutention ;
- à l'inspection du bon fonctionnement du barillet (absence d'effort à la mise en rotation du barillet et à la mise en translation de l'aménagement interne).

Les opérations de grande maintenance consistent :

- aux opérations de petite maintenance ;

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200

- à une inspection visuelle de l'enceinte interne de l'emballage ;
- à la mise en œuvre d'essais d'étanchéité de l'enceinte de confinement : critère $1,33 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR, dont $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR maximum pour les soudures ;
- à un contrôle dimensionnel des organes de manutention et à un ressuage blanc des portées et congés des tourillons ainsi que des surfaces extérieures et des soudures des oreilles de levage ;
- à un essai d'étanchéité des bouchons fusibles des capots : critère $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ SLR ;
- à vérifier le bon état général du système de fermeture de l'emballage (réparation et/ou remplacement si nécessaire).

12. ASSURANCE QUALITE

Afin de garantir que les pièces de l'emballage IR 200 présentent un niveau de qualité suffisant vis-à-vis des exigences de sûreté, un programme d'assurance qualité est établi pour :

- la conception ;
- la fabrication ;
- les épreuves et l'établissement des documents ;
- l'utilisation ;
- la maintenance ;
- les opérations de transport.

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 adaptés de management de la qualité, produire et conserver les documents justificatifs (enregistrements) de leur activité.

12.1. CONCEPTION

Les études de conception, ainsi que les études de sûreté, développées vis-à-vis du modèle de colis, ont été réalisées selon des organisations en accord avec la norme ISO 9001.

12.2. FABRICATION

La fabrication de l'emballage sans le cadre de la norme ISO 9001, donne lieu à la fourniture d'un dossier constructeur, où apparaissent notamment les certificats matière, les soudures et contrôles associés, les essais, les contrôles dimensionnels, les pesées, les non conformités et les certificats de conformité par équipement réalisé.

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200

12.3. UTILISATION

Les responsabilités des différentes unités impliquées dans l'utilisation de l'emballage sont définies par écrit avec leurs interfaces respectives.

Il est rappelé que l'expéditeur ou l'utilisateur doit être prêt à fournir à l'autorité compétente les moyens de faire des inspections pendant l'utilisation, et à lui prouver que tous les emballages sont inspectés périodiquement et, le cas échéant, réparés et maintenus en bon état de sorte qu'ils continuent à satisfaire à toutes les prescriptions et spécifications pertinentes, même après usage répété.

Une notice et un plan d'utilisation permettent une utilisation satisfaisante de l'emballage.

Cette notice d'utilisation décrit de manière précise, afin que toutes les opérations liées au transport s'effectuent conformément aux exigences de sûreté, les règles à observer lors des principales opérations, telles que :

- chargement et déchargement ;
- contrôles réglementaires ;
- arrimage ;
- manutention ;
- entreposage.

12.4. MAINTENANCE

Les modalités de maintenance et d'inspection du modèle d'emballage sont définies par une spécification technique de maintenance.

Cette spécification permet de s'assurer du bon déroulement des opérations de maintenance.

Ces opérations de maintenance sont caractérisées par :

- des contrôles durant l'utilisation ;
- un entretien réglementaire dit « petite maintenance » tous les 3 ans ou 30 cycles de transport ;
- un entretien réglementaire dit « de grande maintenance » tous les 6 ans ou 60 cycles de transport ;
- et, si nécessaire, des inspections additionnelles.

13. CONCLUSION

Le modèle de colis constitué par l'emballage IR 200 est conforme à la réglementation applicable aux colis de type B(U) transporté par voies routières, en particulier :

- les essais de chute et simulations numériques garantissent la tenue mécanique de l'emballage et du système de confinement ;

Démonstration de sûreté de l'emballage IR 200

- 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 conditions normales et accidentelles de transport,
- l'emballage IR 200 respecte les critères réglementaires de relâchement d'activités en conditions normales (10^{-6} A₂/h) et accidentelles de transport (1 A₂/semaine) ;
- les valeurs des débits équivalents de dose calculés au contact du colis, à 2 m en CNT et à 1 m en CAT sont inférieures aux limites réglementaires (2 mSv/h à la surface du colis, 0,1 mSv/h à 2 m du colis en CNT et 10 m Sv/h à un 1 m du colis en CAT) ;
- le modèle de colis constitué de l'emballage IR 200 respecte les critères de sûreté-criticité, l'indice de sûreté-criticité vaut : ISC = 0 ;
- les instructions d'utilisation sont détaillées dans une notice et l'emballage ;
- l'emballage IR 200 fait l'objet d'une petite et d'une grande maintenance.