



Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144

Référence du document :
DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004

DSS

Indice : A

Plan de classement : DTEL-unités-O4

Page 1/23

DEMONSTRATION DE SURETE DE L'EMBALLAGE LR144

Résumé

Ce document présente les solutions techniques retenues pour le transport de l'emballage LR144 chargé de matières radioactives, fissiles ou non.

L'analyse de sûreté étudie la conformité du modèle de colis à la réglementation applicable aux colis de type B, transportés par voie routière, maritime et aérienne.

Les éléments présentés dans cette analyse démontrent que le modèle de colis constitué par l'emballage LR144 chargé de son contenu est conforme à la réglementation applicable aux colis de type B contenant des matières fissiles.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
		Indice : A
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Page 2/23

SOMMAIRE

1. OBJET	4
2. REGLEMENTATION APPLICABLE	4
3. DESCRIPTION DE L'EMBALLAGE	4
4. DESCRIPTION DU CONTENU	6
4.1 Nature du contenu	6
4.2 Caractéristiques radiologiques	6
4.3 Conditionnement de chargement	6
5. FONCTIONS DE SURETE DU MODELE DE COLIS	7
6. EXPLOITATION DE L'EMBALLAGE	8
6.1 Instructions d'utilisation	8
6.2 Instructions de maintenance	9
7. SYSTEME DE MANAGEMENT DE LA QUALITE	10
8. ILLUSTRATION DU MODELE DE COLIS	11
9. ANALYSE DE LA RESISTANCE STRUCTURELLE	12
9.1 Objectifs	12
9.2 Conditions de transport de routine	12
9.3 Conditions normales de transport	13
9.4 Conditions accidentelles de transport	14
9.5 Conclusion	14
10. ANALYSE THERMIQUE	14
10.1 Objectifs	14
10.2 Hypothèses de calcul	15
10.3 Résultats	16
10.4 Conclusion	16
11. ANALYSE DU CONFINEMENT	17
11.1 Objectifs	17
11.2 Analyse du risque d'extrusion et du taux de compression des joints de confinement	17
11.3 Relâchement d'activité	17
11.3.1 Hypothèses de calcul	17

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Indice : A Page 3/23

11.3.2 Résultats.....	18
11.4 Conclusion.....	18
12. ANALYSE DE LA RADIOPROTECTION	18
12.1 Objectifs.....	18
12.2 Hypothèses de calcul	18
12.3 Résultats.....	19
12.4 Conclusion.....	19
13. ANALYSE DE LA SURETE-CRITICITE	19
13.1 Objectifs.....	19
13.2 Hypothèses de calcul	20
13.3 Résultats.....	20
13.4 Conclusion.....	20
14. ANALYSE DES RISQUES SUBSIDIAIRES	21
14.1 Objectifs.....	21
14.2 Risque lié au dégagement gazeux	21
14.3 Risque de corrosion.....	22
14.4 Conclusion.....	22
15. CONCLUSION.....	22

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Indice : A Page 4/23

1. OBJET

Ce document présente les solutions techniques retenues pour le transport de l'emballage LR144 chargé de matières radioactives, fissiles ou non.

L'analyse de sûreté étudie la conformité du modèle de colis à la réglementation applicable aux colis de type B(M)F transportés par voie routière.

2. REGLEMENTATION APPLICABLE

- [1] Règlement de transport des matières radioactives, AIEA – SSR-6, édition de 2018
- [2] Accord relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route (ADR), en vigueur
- [3] Arrêté du 29 mai 2009 modifié relatif au transport des marchandises dangereuses par voies terrestre
Arrêté TMD, en vigueur

3. DESCRIPTION DE L'EMBALLAGE

L'emballage LR144 est de forme générale cylindrique et ses caractéristiques générales sont présentées dans le tableau suivant.

Diamètre hors tout	2 240 mm
Hauteur hors tout	2 592 mm
Masse maximale en charge	23 800 kg

Tableau 1 : Caractéristiques générales de l'emballage

L'emballage est composé :

- d'un corps ;
- d'un capot supérieur de protection ;
- d'une instrumentation disposée dans le puits et dans la cuve.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
		Indice : A
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Page 5/23

Le corps

Le corps de l'emballage est constitué des éléments suivants, en partant de l'intérieur :

- une enveloppe de confinement, composée d'une cuve en acier inoxydable, de son puits d'accès, d'une bride d'étanchéité destinée à recevoir le couvercle de fermeture muni de son système de doubles joints toriques et de son bouchon de couvercle, ainsi qu'une tape d'inertage munie de son système de doubles joints toriques et de son bouchon de tape d'inertage ;
- une protection radiologique en plomb coulée entre la cuve et la coque interne ;
- une coque interne en acier inoxydable entourant la cuve et le puits ;
- une protection thermique en résine neutrophage disposée entre la coque interne et la coque externe ;
- une coque externe en acier inoxydable pour la protection mécanique (anti-poinçonnement) ;
- une couche en mousse phénolique pour la protection thermique et mécanique (amortissement) ;
- une tôle externe en acier inoxydable pour l'habillage.

Le corps de l'emballage est équipé en permanence :

- d'un tube de remplissage et de vidange ;
- d'un système de mise à l'air libre / mise sous vide ;
- de deux moyens de mesure de niveau ;
- d'un capteur de pression.

Le capot

Le capot supérieur de protection est constitué des éléments suivants, en partant de l'intérieur :

- une galette en plomb pour la protection radiologique chemisée par des tôles en acier inoxydable ;
- une protection thermique en résine neutrophage intercalée entre deux parois en acier inoxydable au-delà de la protection radiologique ;
- une tôle anti-poinçonnement en acier inoxydable pour la protection mécanique ;
- une couche de mousse phénolique pour la protection thermique et mécanique (amortissement), placée sur le haut et la périphérie du capot ;
- une tôle externe en acier inoxydable pour l'habillage.

Manutention et arrimage

La manutention de l'emballage avec son capot et son arrimage est assurée via 4 blocs-inserts taraudés M48 eux-mêmes soudés sur les 4 goussets obliques disposés au niveau du corps de l'emballage entre la coque externe et la tôle d'habillage supérieure renforcée localement.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Indice : A Page 6/23

4. DESCRIPTION DU CONTENU

L'emballage LR144 est conçu pour transporter des effluents aqueux radioactifs de très haute activité.

4.1 NATURE DU CONTENU

Le contenu est constitué d'effluents aqueux radioactifs. Les effluents peuvent contenir de l'acide nitrique, de l'acide sulfurique, des chlorures et des fluorures dont les concentrations sont limitées vis-à-vis du risque de corrosion.

Le contenu ne contient pas de matières plus hydrogénées que l'eau. La présence de béryllium est autorisée en quantité limitée.

4.2 CARACTERISTIQUES RADIOLOGIQUES

Les caractéristiques radiologiques du contenu sont présentées dans le tableau ci-après

Activité maximale	L'activité β , γ du contenu n°1 doit respecter l'inégalité suivante : $\frac{Act1}{1,33.10^4} + \frac{Act2}{48,4} \leq 1$ <i>Act1 : Activité des émetteurs β, γ hors ^{60}Co en TBq/m³</i> <i>Act2 : Activité du ^{60}Co en TBq/m³</i>
	L'américium et le curium (émetteurs neutroniques) sont autorisés en quantité limitée.
Activité volumique maximale	100 000 A ₂ / m ³
Puissance thermique	23 W
Masse de matière fissile	$\frac{M(^{235}\text{U})}{520} + \frac{M(\text{Pu})}{310} \leq 1$ (M en grammes) Les isotopes Np-237, Am-242m, Cf-249 et Cf-251 ne doivent être présents qu'à l'état de traces.
	L' ^{233}U et le ^{241}Pu , dans le cas où ils sont présents dans le contenu, ne résultent pas d'un traitement de séparation isotopique. En outre, la masse d' ^{233}U n'excède pas 1g.

Tableau 2 : Caractéristiques radiologiques du contenu

4.3 CONDITIONNEMENT DE CHARGEMENT

Le volume maximal du contenu (effluents + liquide de rinçage) est limité à 1 m³.

La masse maximale du contenu (effluents + liquide de rinçage) est limitée à 1000 kg.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
		Indice : A
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Page 7/23

La durée maximale du transport d'un emballage chargé est limitée. Cette durée dépend de la nature du transport, de la puissance thermique du contenu, du volume du contenu et de la température extérieure prévue sur l'itinéraire. Dans le cas d'un emballage vidangé, le temps de transport n'est pas limité.

5. FONCTIONS DE SURETE DU MODELE DE COLIS

L'emballage LR144 est conçu de manière à garantir les fonctions de sûreté décrites ci-après.

Dissipation de la puissance thermique interne

Compte tenu de la faible puissance thermique du contenu, la dissipation de cette puissance est assurée.

Confinement des matières radioactives

Le confinement est assuré par l'enveloppe de confinement constituée de la cuve, de la partie supérieure de la cuve (platine support du puits + virole plombée + platine supérieure du puits), de la virole intérieure du puits, de la bride d'étanchéité et du système de fermeture (couvercle et son joint intérieur, bouchon de l'espace inter-joint du couvercle et son joint d'étanchéité, tape d'inertage et son joint, bouchon de l'espace inter-joint de la tape d'inertage).

L'enveloppe de confinement est dimensionnée pour résister à une pression interne maximale admissible de 7.10^5 Pa au-dessus de la pression atmosphérique.

De plus, le confinement des liquides dans la cuve est assuré par le bouchon de plomb et son joint torique, la tape connecteur et son joint torique, les raccords auto-obturants et leurs joints et les vannes manuelles et leurs joints.

Maîtrise du débit de dose

La protection radiologique est essentiellement assurée par l'épaisseur de plomb située : autour de la cuve ; au niveau de la platine de support du puits ; dans le bouchon du puits ; au niveau du capot.

Maîtrise de la sûreté-criticité

La maîtrise de la sous-criticité est assurée par le système d'isolement composé de la cuve, du plomb autour et en partie supérieure de la cuve, de la coque interne, de la coque externe et du contenu.

Protection contre les chocs

La protection contre les chocs est principalement garantie par la mousse phénolique et la tôle anti-poinçonnement.

Protection contre les dommages causés par la chaleur

La protection thermique du modèle de colis est principalement assurée par une couche de résine disposée autour de la cuve et du puits d'accès (entre les coques interne et externe), ainsi qu'au niveau du capot et par la mousse phénolique, présente en périphérie de l'emballage.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
		Indice : A
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Page 8/23

Des bouchons fusibles sont présents sur la tôle anti-poinçonnement et sur la tôle d'habillage de l'emballage afin de limiter la montée en pression dans les compartiments renfermant la résine et la mousse phénolique.

6. EXPLOITATION DE L'EMBALLAGE

Les paragraphes suivants décrivent les instructions d'utilisation et de maintenance prévues pour l'emballage LR144.

6.1 INSTRUCTIONS D'UTILISATION

L'emballage est conçu pour être chargé et déchargé verticalement.

La manutention de l'emballage est assurée par un palonnier accroché au niveau des 4 anneaux de manutention fixés sur quatre inserts taraudés. L'emballage LR144 est arrimé à demeure sur sa remorque spécifique.

Le ciel de cuve peut être inerté avec un gaz neutre.

Lors de chaque transport :

- les effluents doivent être brassés avant chargement dans l'emballage ;
- les vis doivent être serrées et desserrées en appliquant une procédure du type « serrage/desserrage en étoile » ;
- les éléments mécaniques de l'emballage (vis, anneaux de levage, raccords...) doivent être en bon état et fonctionnels.

Lors du chargement et du déchargement, un contrôle du niveau d'effluents présents dans l'emballage est effectué. La bonne fermeture des vannes manuelles du système de remplissage et de mise à l'air est également vérifiée.

Après une vidange, un double rinçage de la cuve est réalisé.

L'emballage fait l'objet d'un contrôle de l'étanchéité de l'enveloppe de confinement et de l'étanchéité cuve-puits avant transport. En cas de transport d'un emballage vidé, la réalisation du test d'étanchéité n'est pas requise si l'enceinte de confinement n'a pas été ouverte depuis le précédent test d'étanchéité.

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

- Conformité du contenu à son autorisation en vigueur ;
- Vérification de l'entretien de l'emballage conformément à son autorisation en vigueur ;
- Contrôle des vis et de leur serrage ;
- Contrôle de l'étanchéité du colis ;
- Contrôle radiologique du colis et sur le moyen de transport (contamination et débit de dose) ;
- Vérification de la mise en place des scellés condamnant l'accès aux orifices de l'emballage.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
		Indice : A
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Page 9/23

6.2 INSTRUCTIONS DE MAINTENANCE

Chaque emballage fait l'objet :

- d'une petite maintenance, tous les 40 transports ou tous les 3 ans (selon ce qui est le plus limitatif) ;
- d'une grande maintenance, tous les 80 transports ou tous les 6 ans (selon ce qui est le plus limitatif).

Les principales opérations réalisées en petite maintenance sont :

- le contrôle des dispositifs de suivi de la corrosion (uniquement lors de la première petite maintenance de l'emballage) ;
- le contrôle du bon état général de l'emballage (corps, capot, bouchons fusibles ...) ;
- le contrôle des dispositifs de fixation et de centrage du capot, du couvercle, de la tape d'inertage, de la tape connecteurs et du bouchon de plomb ;
- le contrôle des dispositifs de manutention et des organes d'arrimage : zone d'inserts taraudés, anneaux de manutention, visserie ...
- le contrôle du bon état et de la facilité de pose/dépose ou d'ouverture/fermeture des différentes parties amovibles ou mobiles de l'emballage : capot, couvercle, tape d'inertage, tape connecteurs, bouchon de plomb, raccords Staubli, vannes manuelles ;
- le contrôle des systèmes de mesure de niveau continu et discontinu et de mesure de pression ;
- le changement des joint de l'enveloppe de confinement et d'étanchéité cuve-puits et réalisations des tests d'étanchéité.

Les opérations de grande maintenance consistent à réaliser les contrôles de petite maintenance auxquels sont ajoutés :

- le contrôle des dispositifs de suivi de la corrosion ;
- le contrôle d'étanchéité des soudures de l'enveloppe de confinement ;
- le contrôle de l'étanchéité des bouchons fusibles (corps, capot) ;
- le contrôle du bon état général de la cavité interne et de toutes les surfaces et composants internes accessibles ;
- le remplacement de tous les joints ;
- le remplacement de la visserie du couvercle et de la tape d'inertage.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
		<u>Indice</u> : A
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Page 10/23

7. SYSTEME DE MANAGEMENT DE LA QUALITE

Les réglementations en vigueur pour le transport de matières radioactives 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) qui doivent tous mettre en place des systèmes de management de la qualité adaptés, répondant aux exigences du présent dossier, et produire et conserver les documents justificatifs (enregistrements) de leur activité.



Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144

Référence du document :
DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004

DSS

Indice : A

Plan de classement : DTEL-unités-O4

Page 11/23

8. ILLUSTRATION DU MODELE DE COLIS

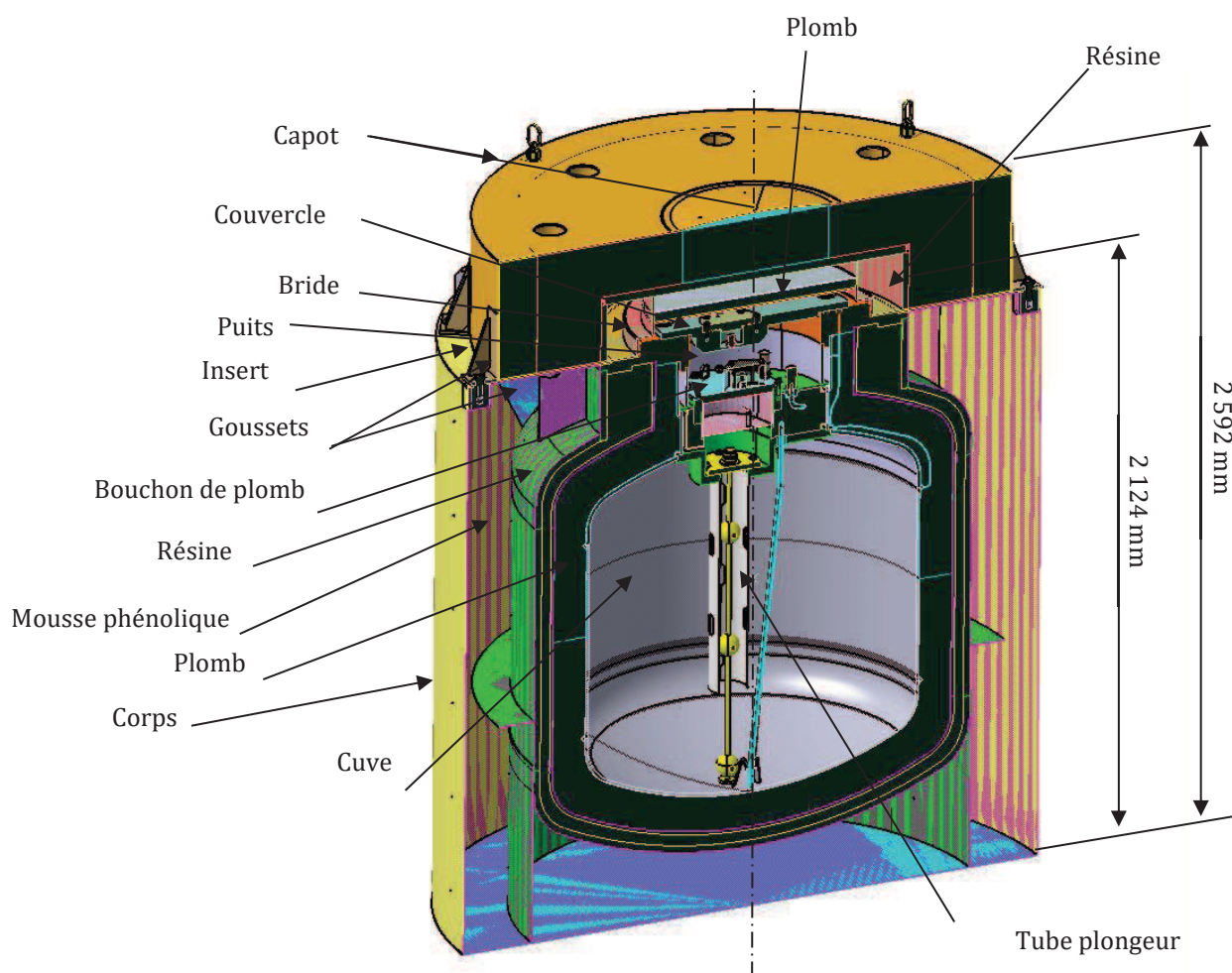


Figure 1 : Schéma de l'emballage LR144

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
		Indice : A
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Page 12/23

9. ANALYSE DE LA RESISTANCE STRUCTURELLE

9.1 OBJECTIFS

Cette partie présente la tenue mécanique du modèle de colis aux contraintes de son environnement (Conditions de Transport de Routine) et aux épreuves mécaniques représentatives des Conditions Normales et Accidentelles de Transport (respectivement dénommées CTR, CNT et CAT ci-après).

La conformité du modèle de colis est examinée vis-à-vis des épreuves spécifiées par la réglementation [1], qui sont les suivantes :

- en conditions de transport de routine et usuelles de manutention :
 - la résistance à une pression interne dans l'enceinte de confinement ;
 - la résistance des organes d'arrimage et de manutention ;
- en conditions normales de transport :
 - l'épreuve d'aspersion d'eau ;
 - l'épreuve de chute libre d'une hauteur de 0,3 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 ;
 - l'épreuve de chute libre d'une hauteur de 1 m sur poinçon ;
 - l'épreuve d'immersion réalisée en appliquant une surpression externe de 1,5 bars.

9.2 CONDITIONS DE TRANSPORT DE ROUTINE

Résistance à une pression interne

La tenue de l'enveloppe de confinement de l'emballage est étudiée pour une surpression interne de $7 \cdot 10^5$ Pa (pression relative interne maximale admissible). Celle-ci est supérieure à la surpression externe en cas d'immersion ($1,5 \cdot 10^5$ Pa) et à la surpression atteinte en CAT ($1,07 \cdot 10^5$ Pa). Les résultats montrent que l'enveloppe de confinement de l'emballage subit des contraintes largement inférieures aux limites admissibles des matériaux avec un coefficient de sécurité $\geq 3,2$.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Indice : A Page 13/23

Arrimage et manutention

Pour l'arrimage, les calculs sont effectués en considérant les accélérations suivantes :

- +1 g selon l'axe longitudinal (X) ;
- -1 g +/- 0,3 g selon l'axe vertical (Z) ;
- concomitance des accélérations.

Les coefficients de sécurité dégagés par les éléments participant à l'arrimage de l'emballage sont supérieurs à 1,7. La résistance à la fatigue des organes d'arrimage et des soudures est également démontrée.

Les calculs de tenue des organes de manutention de l'emballage mettent en évidence des coefficients de sécurité d'au minimum 1,5.

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

9.3 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 0,3 m

Les calculs mécaniques par éléments finis et les essais de chute montrent que le modèle de colis résiste à cette épreuve sans altération de ses fonctions de sûreté.

Compression – gerbage

La forme géométrique de l'emballage ne se prête pas au gerbage.

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.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
		Indice : A
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Page 14/23

9.4 CONDITIONS ACCIDENTELLES DE TRANSPORT

Epreuve d'immersion

Comme précisé au § 9.2, l'enveloppe de confinement de l'emballage résiste à une surpression interne de 7 105 Pa ce qui est enveloppe de la surpression externe de 1,5 bar correspondant à l'épreuve d'immersion. Ainsi, le modèle de colis reste étanche à la suite de l'épreuve d'immersion.

Epreuves de chute

La tenue aux épreuves de chute s'appuie sur des calculs numériques et des essais de chute d'une maquette représentative du modèle de colis à l'échelle 1/3.

Les différentes campagnes d'essais de chute, réalisées à température ambiante montrent que le modèle de colis résiste aux épreuves mécaniques réglementaires (chute de 0,3 mètres, 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 est conservée.

Ces essais ont été complétés par des simulations numériques réalisées à -20°C et à la température maximale atteinte en CNT (85°C) qui confirment le comportement satisfaisant du modèle de colis après les épreuves de chutes représentatives des conditions accidentelles de transport.

9.5 CONCLUSION

La résistance structurelle de l'emballage satisfait aux prescriptions réglementaires pour un modèle de colis de type B contenant des matières fissiles dans toutes les conditions de transport.

En conditions accidentelles de transport, les hypothèses de modélisation considérées dans les analyses thermique, de radioprotection et de sûreté-criticité prennent en compte une réduction de l'épaisseur de mousse, de la résine et du plomb pour tenir compte des enfoncements constatés à la suite des épreuves de chute.

10. ANALYSE THERMIQUE

10.1 OBJECTIFS

Cette partie présente l'analyse du comportement thermique du modèle de colis.

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.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Indice : A Page 15/23

Les prescriptions réglementaires et leurs critères d'acceptation sont résumés ci-dessous :

- en CTR, sans ensoleillement et à la température ambiante de 38°C, la température des surfaces accessibles du colis doit rester inférieure à 50°C (85°C en transport sous-utilisation exclusive) ;
- en CNT, avec l'ensoleillement réglementaire défini dans réglementation [1] et à la température ambiante de 38°C, les températures maximales atteintes par les constituants du colis doivent rester dans les domaines d'utilisation de leur matériau constitutif et permettre le maintien des performances d'étanchéité du modèle de colis ;
- 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 colis à température ambiante de 38°C et sous ensoleillement règlementaire [1], les performances de sûreté doivent être maintenues.

Par ailleurs, une étude déterminant le temps de prise en glace des effluents en cas de température extérieure négative est également présentée dans cette analyse thermique.

10.2 HYPOTHESES DE CALCUL

Les études ont été menées avec deux types de chargement thermique interne :

- un remplissage maximum (1 000 L) :
Les calculs considèrent un flux surfacique homogène pour l'ensemble de la surface interne de la cavité et du puits. Ceci équivaut à un contenu d'une puissance égale à 23 W, réparti en 20W dans la cavité et 3W dans le puits.
- un remplissage partiel (100 L) :
Les calculs sont réalisés en considérant un volume inférieur des effluents, de 100 litres, caractérisés par une puissance résiduelle de 23 W.

Les échanges thermiques se font :

- Par convection naturelle et rayonnement entre les surfaces externes de l'emballage 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 et sans déformation. Il est modélisé en position verticale en CTR et en position verticale ou horizontale en CNT.

En CAT, la géométrie de l'emballage est modifiée pour tenir compte des conséquences des épreuves mécaniques représentatives des CAT. Le colis est considéré en position verticale ou horizontale. La présence ou non d'un caisson autour de l'emballage est également étudiée.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
		Indice : A
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Page 16/23

10.3 RESULTATS

En CTR, les températures calculées des composants du colis sont inférieures à 43°C et la température de la tôle externe est de l'ordre de 39°C. Les limites réglementaires de température des surfaces accessibles du colis de 50°C en utilisation non exclusive et de 85°C en utilisation exclusive ne sont donc pas atteintes.

En CNT, la température maximale atteinte dans l'emballage est de 83,3°C (température obtenue sur les surfaces extérieures du capot) ce qui est compatible avec les plages d'utilisation des matériaux. La température moyenne maximale dans la cuve est de 74,4°C et la température maximale obtenue au niveau des joints d'étanchéité est de 74,1°C.

En CAT, la température maximale atteinte par les joints d'étanchéité vaut 83,8°C ce qui est inférieur à leur limite d'utilisation de 140°C et la température maximale atteinte par le plomb vaut 117,7°C, ce qui est inférieur à sa température maximale d'utilisation de 246°C. La température maximale des gaz de l'enveloppe de confinement est de 82°C.

Les performances de l'emballage (intégrité des barrières de confinement et des protections radiologiques) ne sont ainsi pas diminuées.

Il est à noter que les résultats des études en CNT et CAT sont obtenus pour un ensoleillement pénalisant 24h/24h (au lieu de 12h/24h, d'après la réglementation [1]).

Les calculs de prise en glace du contenu imposent un temps de transport maximal (DT) et un volume minimal d'effluents lorsque la température ambiante prévue risque d'être inférieure à 0°C pendant le trajet ou lors de l'entreposage du colis chargé.

10.4 CONCLUSION

L'intégrité de l'enceinte de confinement (y compris les joints de confinement), du blindage et du système d'isolement est vérifiée en CNT et en CAT.

Dans les calculs mécaniques, on considère l'emballage à une température CNT de 85°C.

Dans l'étude de relâchement, la température des gaz est prise égale à 75°C en CNT et 85°C en CAT.

Dans les calculs d'extrusion, la température des joints de confinement est prise égale à 75°C en CNT et 100°C en CAT.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
		Indice : A
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Page 17/23

11. ANALYSE DU CONFINEMENT

11.1 OBJECTIFS

Cette partie analyse le taux de remplissage des gorges de joints aux températures atteintes par les joints en CNT et en CAT et le taux de compression des joints afin de garantir que les joints conservent leurs propriétés d'étanchéité de -20°C jusqu'à la température maximale déterminée en CAT.

Elle justifie aussi le respect des critères réglementaires de relâchement d'activité par fuite d'aérosols, de gaz et/ou de liquides. Pour un colis de type B, ces critères sont les suivants (cf. [1]) :

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

Le relâchement d'activité est estimé et l'activité totale relâchée est comparée aux critères réglementaires énoncés ci-dessus. Le flux de fuite maximal normalisé permettant de respecter ces critères réglementaires est recherché.

11.2 ANALYSE DU RISQUE D'EXTRUSION ET DU TAUX DE COMPRESSION DES JOINTS DE CONFINEMENT

Les taux de compression des joints de confinement calculés à une température de -20°C sont au minimum de 14,9%. Les taux de compression minimaux des joints d'étanchéité cuve-puits sont de 10,3% ce qui reste satisfaisant vis-à-vis d'une étanchéité au liquide.

Les taux d'extrusion de l'ensemble des joints de confinement et d'étanchéité cuve-puits sont tous inférieurs à 100% à 75°C (température CNT) et à 100°C (température enveloppe des CAT) ce qui exclut le risque d'extrusion.

11.3 RELACHEMENT D'ACTIVITE

11.3.1 Hypothèses de calcul

Les contenus sont caractérisés par une concentration volumique maximale d'activité de 10^5 A2/m³. Les effluents étant brassés avant le transport, il n'y a pas de gaz radioactifs produits en cours de transport. Les calculs de relâchement sont réalisés pour une fuite liquide.

Le volume libre minimal de la cavité est de 0,44 m³. Cette hypothèse est pénalisante puisqu'elle considère un volume maximal d'effluent transporté (1000 L) et ne tient pas compte du volume libre du puits d'accès.

L'augmentation de pression dans l'emballage retenue dans l'analyse prend en compte la pression hydrostatique de l'eau, la pression de vapeur saturante, la production de gaz par radiolyse et les températures atteintes en CNT et CAT issues de l'analyse thermique. La pression totale dans la cavité de l'emballage atteint $1,84 \cdot 10^5$ Pa à 75°C (CNT) et de $2,07 \cdot 10^5$ Pa à 85°C (CAT).

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Indice : A Page 18/23

11.3.2 Résultats

Pour un test à l'hélium, le flux de fuite normalisé admissible permettant de respecter les critères réglementaires de relâchement d'activité en conditions normales et accidentelles de transport est limité à $4,08.10^{-7}$ Pa.m³.s⁻¹ SHeLR.

11.4 CONCLUSION

Le modèle de colis considéré dans les conditions de températures déterminées par l'analyse thermique et chargé du contenu décrit au paragraphe 4 respecte les exigences réglementaires en matière de relâchement d'activité.

12. ANALYSE DE LA RADIOPROTECTION

12.1 OBJECTIFS

Cette partie évalue l'efficacité de la protection radiologique de l'emballage dans les conditions de transport réglementaires, chargé du contenu décrit au paragraphe 4.

Les limites réglementaires en termes de débits 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 (10 mSv.h⁻¹ sous-utilisation exclusive) ;
 - 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 au débit de dose maximal déterminé en CTR ;
- En conditions accidentelles de transport (CAT) :
 - 10 mSv.h⁻¹ à 1 mètre des parois du colis.

12.2 HYPOTHESES DE CALCUL

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

En CNT et en CAT, la géométrie de l'emballage est modifiée pour tenir compte des conséquences des épreuves de mécaniques représentatives des CNT et des CAT.

La source radioactive est modélisée de plusieurs manières :

- en distribution homogène dans le volume d'effluents ;
- en ségrégation sur les parois du réservoir, formant un dépôt de 50 mm d'épaisseur ;
- en précipitation dans un volume liquide de 60 litres.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
		Indice : A
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Page 19/23

Lorsque le colis est retourné (en CNT et CAT), les effluents peuvent pénétrer dans le jeu de montage du bouchon en plomb et dans la tape connecteur (l'étanchéité cuve-puits étant préservée en CAT, les effluents ne pénètrent pas dans le puits d'accès).

Les calculs de DED menés à l'aide du code TRIPOLI 4.8 visent à déterminer les activités gamma maximales transportables dans l'emballage.

12.3 RESULTATS

Les exigences réglementaires en termes de débit de dose en CTR et en CAT sont respectées pour un contenu caractérisé par :

- un terme source gamma défini par l'une ou l'autre des composantes indiquées ci-dessous :
 - une émission gamma mono-énergétique (100 %) à 0,8 MeV de $1,33 \cdot 10^4$ TBq/m³ ;
 - une émission gamma à 100 % à 1,17 MeV et à 100 % à 1,33 MeV de 48,4 TBq/m³ ;
- un terme source neutron défini sur la base d'un mélange de 310 g de Pu, 180 g d'Am et 2,7 g de Cm.

Par ailleurs, en CNT, l'augmentation du débit de dose à la surface externe du colis reste inférieure à 20 %.

12.4 CONCLUSION

Le modèle de colis LR144 chargé du contenu décrit au paragraphe 4 respecte les exigences réglementaires en matière de radioprotection.

13. ANALYSE DE LA SURETE-CRITICITE

13.1 OBJECTIFS

Cette partie justifie la sous criticité du modèle de colis LR144, chargé de matières fissiles.

La réglementation précise que les configurations suivantes doivent être étudiées :

- 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 et rien entre les colis ;
- 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.

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

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Indice : A
		Page 20/23

13.2 HYPOTHESES DE CALCUL

Les configurations 5N colis en CNT et 2N colis en CAT sont couvertes par un réseau infini de colis dans l'état résultant des CAT (une réflexion totale des neutrons est considérée sur les surfaces externes de l'emballage).

Les critères de sous criticité retenus dans le cadre de cette étude sont :

- $k_{eff}+3\sigma < 0,94$ pour la configuration de colis isolé,
- $k_{eff}+3\sigma < 0,97$ pour la configuration de réseau de colis.

En CAT, on considère de manière pénalisante que les capots amortisseurs, la mousse phénolique et l'acier d'habillage externe ont disparu intégralement, ainsi que la résine neutrophage (le volume occupé par la résine est remplacé par un brouillard d'eau de densité variable).

Dans la configuration « réseau infini de colis », l'épaisseur de plomb est prise de manière pénalisante à 100 mm uniformément, afin de maximiser les échanges neutroniques entre colis.

Trois milieux fissiles de référence sont étudiés :

- Le plutonium métallique composé à 100% ^{239}Pu ;
- L'uranium métallique enrichi à 100% ^{235}U ;
- Le mélange (U+Pu) métallique de teneur en Pu égale à 25%, 50%, 75%, le vecteur isotopique Pu contient 100% ^{239}Pu et un enrichissement de l'uranium en ^{235}U de 100%.

La matière fissile est modérée par une quantité quelconque d'eau dans le volume offert par la cuve.

La matière fissile est réfléchiée par une épaisseur saturante d' ^{238}U (30 cm), réflexion enveloppe de la masse d'acier inoxydable correspondant à l'instrumentation présente dans la cuve, et par un brouillard d'eau de densité variable. Le cas d'une réflexion par 1 kg de béryllium est également étudié.

13.3 RESULTATS

Les résultats des calculs démontrent que les critères d'admissibilités sont respectés lorsque les masses d' ^{235}U et de ^{239}Pu respectent l'inégalité ci-dessous,

$$\frac{M(^{235}\text{U})}{520} + \frac{M(\text{Pu})}{310} \leq 1 \quad \text{masses } M(^{235}\text{U}) \text{ et } M(\text{Pu}) \text{ exprimées en g}$$

13.4 CONCLUSION

Le modèle de colis LR144 respecte les critères de sûreté-criticité retenus.

La masse maximale de béryllium ne doit pas excéder 1 kg.

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Indice : A Page 21/23

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

14. ANALYSE DES RISQUES SUBSIDIAIRES

14.1 OBJECTIFS

Cette partie démontre que le modèle de colis constitué de l'emballage LR144 chargé de son contenu admissible permet de prévenir les risques suivants :

- le risque lié aux dégagements de gaz inflammables et leur accumulation dans le ciel de l'enceinte de confinement ;
- le risque de corrosivité du contenu.

14.2 RISQUE LIE AU DEGAGEMENT GAZEUX

Le phénomène responsable de la production des gaz est la radiolyse du contenu aqueux.

De manière pénalisante, le volume libre du puits d'accès dans lequel l'expansion des gaz est possible, n'est pas pris en compte. Il est supposé que tous les gaz produits par radiolyse migrent directement vers le volume libre de l'emballage (absence de re-dissolution dans l'eau). La pression de vapeur saturante qui conduit à mettre en suspension de l'eau sous forme de gaz est négligée car elle a pour effet de diminuer la concentration en dihydrogène dans le volume libre.

Une surpression significative est constatée lorsque la concentration en dihydrogène dépasse la limite de sévérité d'explosion inférieure (LSEI). Pour un mélange H₂/air à une température de 100°C et une pression de 2 bars (conditions enveloppe de la température et de la pression atteintes dans la cavité en CAT) cette limite est de l'ordre de 9%. De manière pénalisante, une LSEI égale à 8% est retenue dans les calculs.

En prenant en compte 7 jours d'aléas CAT et AL jours d'aléas CAT, le risque d'explosion dû au phénomène de radiolyse est maîtrisé (concentration en dihydrogène ≤ 8%), si la durée maximale de transport autorisée DT (en jours), comptée à partir de la fermeture de l'enceinte de confinement vérifie l'inéquation suivante :

$$DT \leq \frac{372-259.V_{\text{Contenu}}}{\left(P_{\alpha} + \frac{1}{3,5} \cdot P_{\beta,\gamma}\right)} - 7 - AL.$$

Avec

- $t(j)$: le temps de transport à la LSEI en jours
- P_{α} : puissance thermique des émetteurs alpha exprimée en W
- $P_{\beta,\gamma}$: puissance thermique des émetteurs bêta et gamma exprimée en W
- V_{contenu} : volume d'effluents exprimé en m³

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Indice : A
		Page 22/23

14.3 RISQUE DE CORROSION

Le risque de corrosion lié au caractère corrosif du contenu est maîtrisé par l'utilisation de l'acier URANUS 76N qui présente une haute résistance à la corrosion. Plusieurs programmes de qualification avec des milieux acides et halogénés ont permis de valider ce comportement.

Le caractère corrosif des sous-contenus n'est pas de nature à remettre en cause les caractéristiques physiques, chimiques ou dimensionnelles des composants de l'emballage.

Pour le sous-contenu C, afin de garantir l'absence de corrosion localisée significative, la durée du transport (DT) du colis est limitée à 30 jours. De plus, une concentration minimale en acide nitrique de 0,3 mol/L est imposée aux sous-contenus B et C afin de garantir la passivité du matériau de la cuve.

Par ailleurs, une surépaisseur de 2 mm a été prise en compte de manière conservatrice dans la conception de l'enveloppe de confinement, en plus de l'épaisseur d'acier ayant une fonction de résistance mécanique.

Enfin, un suivi de la corrosion est assuré par l'examen périodique de coupons représentatifs placés en fond de cuve (cf. §6.2).

14.4 CONCLUSION

Les risques liés à la corrosivité du contenu et à la production d'hydrogène par radiolyse sont maîtrisés du fait de la conception de l'emballage et de la limitation de la durée de transport.

15. CONCLUSION

Les éléments présentés dans cette analyse démontrent que le modèle de colis constitué par l'emballage LR144 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 ;
- Les températures maximales atteintes par les différents composants de l'emballage en CNT et CAT sont compatibles avec les plages d'utilisation des matériaux ;
- Le confinement de la matière radioactive est maintenu pour les 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 respectent les critères réglementaires ;
- Le modèle de colis respecte les critères de sûreté-criticité ;

	Démonstration de sûreté du modèle de colis LR144	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-004	DSS
		<u>Indice</u> : A
	Plan de classement : DTEL-unités-O4	Page 23/23

- Les risques liés à la radiolyse des matières transportées et à la corrosion sont maîtrisés ;
- Les instructions d'utilisation et de maintenance relatives à toutes les opérations importantes pour la sûreté sont définies de manière à conserver les performances du modèle de colis.