



Démonstration de sûreté de l'emballage CTB

Référence du document :
DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006

DSS

Indice : A

Plan de classement : DTEL-Unités-O4

Page 1/23

DEMONSTRATION DE SURETE DE L'EMBALLAGE CTB

FORMULAIRES ASSOCIES AU DOCUMENT	REFERENCE

Résumé

Ce document présente les solutions techniques retenues pour le transport de matières radioactives, fissiles ou non, avec l'emballage CTB afin d'assurer les diverses fonctions de sûreté.

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

FONCTION				
NOM				
DATE VISA				
	REDACTEUR	VERIFICATEUR	APPROBATEUR	ÉMETTEUR



Démonstration de sûreté de l'emballage CTB

Référence du document :
DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006

DSS

Indice : A

Plan de classement : DTEL-Unités-O4

Page 2/23

Liste des vérificateurs

NOM	FONCTION	VISA

Liste de diffusion

ENTITES	FONCTIONS	NOM

	Démonstration de sûreté de l'emballage CTB	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 3/23

HISTORIQUE DES VERSIONS PRECEDENTES

INDICE	DATE D'APPLICATION	OBJET DE LA VERSION
Ref.: DSN / STMR / LEPE / CTB / DSS 0010		
01	20/07/2017	Émission initiale
REF. : CEA-DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS-006		
A	cf. visa émetteur	Mise à jour dans la cadre de la demande de prorogation d'agrément



Démonstration de sûreté de l'emballage CTB

Référence du document :
DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006

DSS

Indice : A

Plan de classement : DTEL-Unités-O4

Page 4/23

SOMMAIRE

1. OBJET	6
2. REGLEMENTATION APPLICABLE	6
3. DEFINITION DE L'EMBALLAGE	6
3.1 Description générale	6
3.2 Manutention et arrimage de l'emballage	7
4. DEFINITION DU CONTENU	8
4.1 Description des sources	8
4.2 Caractéristiques des sources	8
4.3 Description des aménagements internes	9
5. FONCTIONS DE SURETE DU MODELE DE COLIS	9
6. ANALYSE DE LA RESISTANCE STRUCTURELLE	10
6.1 Objectifs	10
6.2 Conditions de transport de routine	10
6.2.1 Dispositifs de manutention et d'arrimage	10
6.2.2 Vibrations	11
6.2.3 Compatibilité chimique	11
6.2.4 Comportement à - 40°C	11
6.3 Conditions normales de transport	12
6.3.1 Aspersion d'eau	12
6.3.2 Chute libre	12
6.3.3 Gerbage	12
6.3.4 Pénétration	12
6.4 Conditions accidentelles de transport	12
6.4.1 Tenue à la chute	13
6.4.2 Immersion	13
6.5 Conclusion	14
7. ANALYSE THERMIQUE	14
7.1 Objectifs	14
7.2 Données d'entrées	14
7.3 Résultats	15
8. ANALYSE DU CONFINEMENT	15
8.1 Objectifs	15



Démonstration de sûreté de l'emballage CTB

Référence du document :
DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006

DSS

Indice : A

Plan de classement : DTEL-Unités-O4

Page 5/23

8.2	Analyse du risque d'extrusion et du taux de compression des joints de confinement.....	15
8.3	Relâchement d'activité	16
9.	ANALYSE DE LA RADIOPROTECTION	17
9.1	Objectifs.....	17
9.2	Donnés d'entrée	18
9.3	Résultats.....	19
10.	ANALYSE DE LA SURETE-CRITICITE	20
10.1	Objectifs.....	20
10.2	Données d'entrées	20
10.3	Définition du système d'isolement.....	21
10.4	Résultats.....	21
11.	INSTRUCTION D'EXPLOITATION ET DE MAINTENANCE DE L'EMBALLAGE	22
11.1	Utilisation	22
11.2	Maintenance	22
12.	SYSTEME DE MANAGEMENT DE LA QUALITE	23
13.	CONCLUSION.....	23

	Démonstration de sûreté de l'emballage CTB	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	<u>Indice</u> : A Page 6/23

1. OBJET

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

L'analyse de sûreté étudie la conformité du modèle de colis à la réglementation applicable aux colis de types B(U) et B(U)F, transportés par voie routière, et aux colis de type B(U) [1-3], transportés par voie aérienne [4,5].

2. REGLEMENTATION APPLICABLE

- [1] Règlement de transport des matières radioactives AIEA, SSR-6
- [2] Accord relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route (ADR)
- [3] Arrêté du 29 mai 2009 modifié relatif au transport des marchandises dangereuses par voies routières (arrêté TMD)
- [4] Instructions techniques pour la sécurité du transport aérien des marchandises dangereuses (dites « IT de l'OACI »)
- [5] Instruction du 26 juin 2008 relative aux règles techniques et procédures administratives applicables au transport commercial par aéronef et le règlement CE N° 859/2008 du 20 août 2008 (EU OPS1)

3. DEFINITION DE L'EMBALLAGE

3.1 DESCRIPTION GENERALE

L'emballage CTB est de forme générale cylindrique et ses principales caractéristiques sont les suivantes :

- longueur hors tout : 1 250 mm ;
- hauteur externe hors tout : 720 mm ;
- diamètre externe : 572 mm ;
- masse maximale en charge : 820 kg.

Le corps de l'emballage est cylindrique et repose sur quatre pieds solidaires de l'emballage. Il est constitué d'une enveloppe extérieure en acier au carbone peint et d'une enveloppe intérieure en acier inoxydable, entre lesquelles est coulée une protection radiologique neutrophage en compound. L'enveloppe intérieure est conçue pour recevoir une nacelle porte sources.

L'enveloppe intérieure, qui fait partie de l'enveloppe de confinement, est fermée côté chargement par un bouchon blindé et par une tôle. La tôle et l'enveloppe du bouchon sont en acier inoxydable austénitique. Ces organes sont équipés de joints en élastomère.



Démonstration de sûreté de l'emballage CTB

Référence du document :
DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006

DSS

Indice : A

Plan de classement : DTEL-Unités-O4

Page 7/23

Les faces avant et arrière du corps sont protégées pendant le transport par deux capots amortisseurs de chocs et protégeant l'emballage de l'incendie. Les têtes de vis comportent des trous permettant la pose de scellés qui garantissent la non-ouverture du colis pendant le transport.

Une illustration de l'emballage CTB est présentée sur la Figure 1. Elle permet de visualiser les différents composants précédemment décrits.

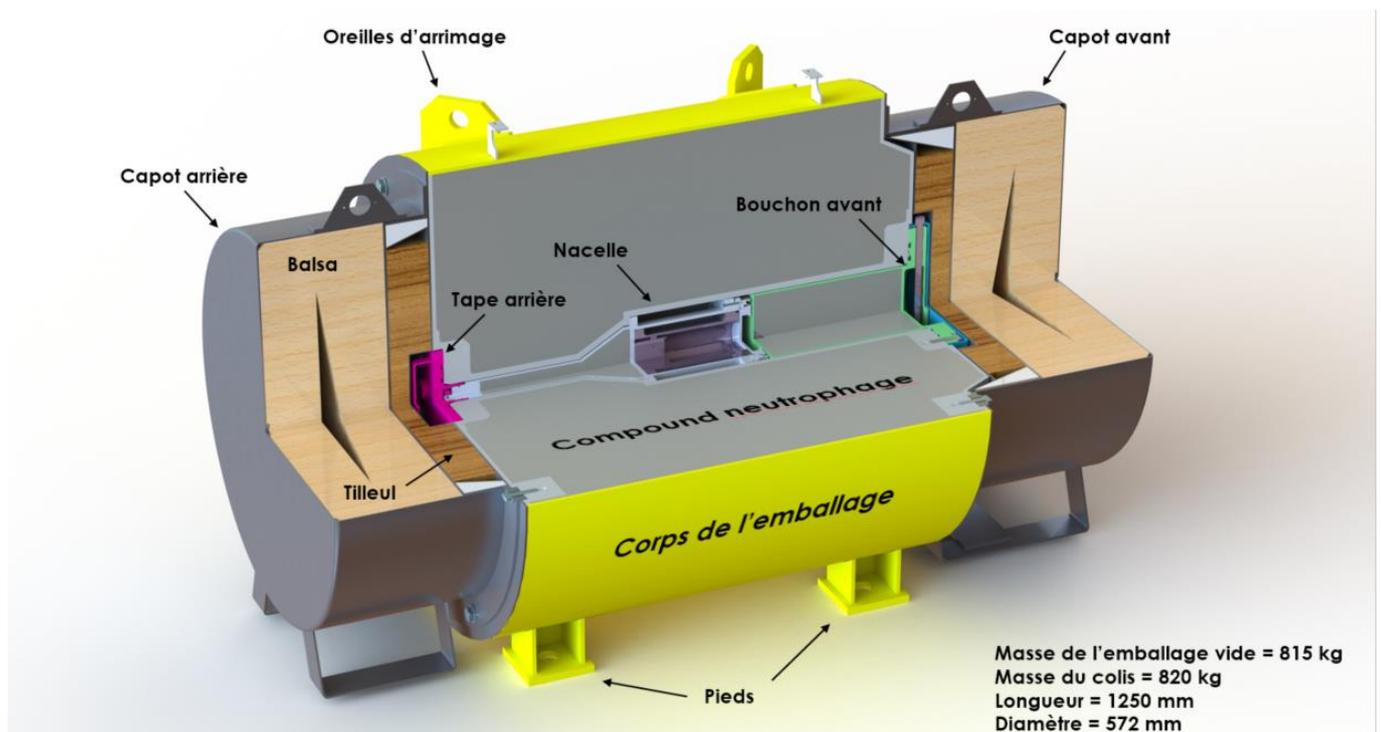


Figure 1 : Illustration de l'emballage CTB

3.2 MANUTENTION ET ARRIMAGE DE L'EMBALLAGE

Le corps de l'emballage est équipé de quatre oreilles pour la manutention et l'arrimage du colis.

Les capots sont chacun équipés d'une oreille de manutention qui peut être verrouillée après mise en place des capots.

Le bouchon et la tape possèdent des poignées de manutention.

	Démonstration de sûreté de l'emballage CTB	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A Page 8/23

4. DEFINITION DU CONTENU

L'emballage CTB est conçu pour le transport de deux types de sources :

- Sources sans élément léger ;
- Sources constituées d'un mélange de radionucléides émetteurs alpha et d'éléments légers Be, B, F, C ou Li.

4.1 DESCRIPTION DES SOURCES

Les sources se présentent sous les formes suivantes :

- État physique : métal massif, matières radioactives solides massives ou pulvérulentes non métalliques,
- Forme chimique : alliages métalliques, oxydes ou nitrates.

Les sources transportées ne présentent pas de risque de pyrophoricité.

Les sources pulvérulentes sont conditionnées de façon à éviter la contamination interne, par exemple dans des capsules en verre ou en acier inoxydable, ou sources scellées.

Le conditionnement des sources de ^{252}Cf et ^{242}Cm dans des capsules en verre n'est pas autorisé.

4.2 CARACTERISTIQUES DES SOURCES

- Les sources sans élément léger sont composées des radionucléides suivants :
 ^{99}Tc , ^{226}Ra , ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{242}Cm , ^{244}Cm , ^{248}Cm , ^{252}Cf , ^{228}Th et ^{229}Th ;
- Les sources constituées d'un mélange de radionucléides émetteurs alpha et d'éléments légers sont les suivantes :
 $^{226}\text{Ra-Be}$, $^{241}\text{Am-Be,B,F,C,Li}$, $^{244}\text{Cm-Be,B,F,C,Li}$, $^{238}\text{Pu-Be,B,F,C,Li}$, et $^{239}\text{Pu-Be,B,F,C,Li}$ ou alliage $^{239}\text{PuBe}_{13}$.

Chaque source est limitée par une masse ou activité maximale admissible par radionucléide.

Dans le cas d'une source constituée d'un mélange de ^{239}Pu et d'éléments légers, le critère suivant est en outre respecté :

$$\frac{\text{Masse d'éléments légers}}{\text{Masse de } ^{239}\text{Pu}} \leq 0,5$$

Pour le transport aérien, l'activité ne doit pas dépasser 3000 A₂ et la masse de matière fissile est limitée à 45 g.

Dans le cas d'un mélange de sources, si au moins une source contient un radionucléide fissile, la masse d'éléments légers dans la cavité est limitée à 125 g.

	Démonstration de sûreté de l’emballage CTB	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A Page 9/23

En cas de chargement de N sources de radionucléides différents, l’une des deux conditions doit être respectée :

- Les activités des sources sont telles que :

$$\sum_{i=1}^N \frac{\text{activité source } i}{\text{activité maximale de la source } i} < 1$$

- Les masses des sources sont telles que :

$$\sum_{i=1}^N \frac{\text{masse source } i}{\text{masse maximale de la source } i} < 1$$

Dans le cas d’un alliage intermétallique à base de ^{239}Pu et ^9Be de stœchiométrie PuBe_{13} contenant une masse de $^{239}\text{Pu} > 250 \text{ g}$:

- la masse maximale de ^{239}Pu est de 326 g et l’activité maximale est limitée à 754 GBq ;
- la source doit être transportée seule.

4.3 DESCRIPTION DES AMÉNAGEMENTS INTERNES

Selon leurs dimensions, les sources peuvent être placées directement dans la nacelle porte sources présentée au § 3.1. Toutefois, la nacelle peut aussi accueillir différents types d’aménagements internes de géométrie quelconque.

La présence de matériaux radiolysables et thermolysables à l’intérieur de la nacelle n’est pas autorisée.

La masse du contenu (sources + aménagements internes) ne doit pas excéder 5 kg.

5. FONCTIONS DE SURETE DU MODELE DE COLIS

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

Dissipation de la puissance thermique interne

Sans objet du fait de la faible puissance transportée.

Confinement des matières radioactives

Le confinement est assuré par l’enveloppe de confinement constituée de la cavité interne, de la tôle et du bouchon, des joints et gorges de joints ainsi que de la visserie.

Maîtrise de l’intensité de rayonnement externe

La protection radiologique est essentiellement assurée :

	Démonstration de sûreté de l'emballage CTB	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	<u>Indice</u> : A Page 10/23

- radialement, par les épaisseurs d'acier des viroles interne et externe ainsi que par l'épaisseur et la composition du compound,
- axialement, en face avant, par les épaisseurs d'acier du bouchon et du capot avant ainsi que par l'épaisseur et la composition du compound,
- axialement, en face arrière, par les épaisseurs d'acier de la tôle arrière, de la nacelle et du capot arrière ainsi que par l'épaisseur et la composition du compound.

Maîtrise de la sûreté-criticité

La maîtrise de la sous-criticité est assurée par le système d'isolement composé des enceintes interne et externe, du compound et du contenu.

La protection contre les chocs

La protection contre les chocs est assurée par les dimensions et caractéristiques mécaniques de la virole externe, des capots amortisseurs et de la visserie.

La protection contre l'incendie

La protection contre l'incendie est assurée par les dimensions et caractéristiques thermiques de la virole externe, du compound et des capots amortisseurs.

6. ANALYSE DE LA RESISTANCE STRUCTURELLE

6.1 OBJECTIFS

Cette partie analyse le comportement mécanique du modèle de colis dans le cadre des épreuves représentatives des conditions de transport de routine (CTR), des conditions normales de transport (CNT) et des conditions accidentelles de transport (CAT).

6.2 CONDITIONS DE TRANSPORT DE ROUTINE

6.2.1 Dispositifs de manutention et d'arrimage

Ces dispositifs sont formés de quatre oreilles de manutention et d'arrimage sur la partie supérieure du corps de l'emballage. Le levage est assuré par une élingue quatre brins crochétés sur les 4 oreilles. L'arrimage est assuré par les oreilles.

L'étude justifie la résistance des oreilles, fatigue comprise, et met en évidence qu'elles sont convenablement dimensionnées vis-à-vis des accélérations réglementaires.

	Démonstration de sûreté de l'emballage CTB	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	<u>Indice</u> : A Page 11/23

Les oreilles sont dimensionnées de manière satisfaisante car les contraintes maximales observées sont toujours inférieures aux contraintes admissibles, avec des facteurs de sécurité supérieurs à 3,5 pour le transport routier et 3,9 pour le transport aérien.

L'analyse en fatigue des soudures est réalisée selon l'EUROCODE 3, l'approche en « infinite life » a également été appliquée en tenant compte de facteurs de correction de contrainte justifiés.

Les facteurs de sécurité sont supérieurs à 2,7 pour le transport par route et 2,5 pour le transport par voie aérienne. Les soudures de l'oreille respectent alors le critère en fatigue pour 10^7 cycles.

6.2.2 Vibrations

Les vibrations induites sur le colis durant le transport peuvent amplifier les sollicitations dans la mesure où l'emballage entre en résonance. Les accélérations résultantes de ces vibrations en cours de transport sont inférieures aux accélérations prises en compte dans les calculs relatifs à l'arrimage et les contraintes calculées sont encore inférieures à la contrainte minimale admissible de fatigue donnée par la F.E.M. pour 16000 cycles de contraintes, soit 116 N/mm².

6.2.3 Compatibilité chimique

L'enveloppe intérieure et les faces avant et arrière sont en acier inoxydable austénitique, choisi pour sa bonne résistance à la corrosion. L'assemblage avec la virole extérieure en acier au carbone est réalisé avec un métal d'apport spécialement étudié pour ce type d'application. Les contacts entre le compound humide et les parois en acier inoxydable et en acier au carbone sont dans une enceinte étanche dont l'oxygène libre est très rapidement épuisé. Il n'y a pas non plus de différence de potentiel galvanique significatif pouvant provoquer une corrosion localisée.

6.2.4 Comportement à - 40°C

L'emballage est constitué d'aciers inoxydables austénitiques et d'acier au carbone.

Les aciers inoxydables austénitiques ne présentent pas de point de transformation et conservent une bonne résilience jusqu'à de très basses températures excluant tout risque de rupture fragile et brutale à -40°C.

Dans le cas de l'acier au carbone constitutif de la virole externe, les valeurs de résilience permettent d'exclure tout risque de rupture fragile mais le risque de rupture brutale est à considérer. L'analyse démontre que les conséquences d'une rupture brutale éventuelle ne remettraient pas en cause la sûreté du modèle de colis.

Le bois des capots et le compound ont des caractéristiques qui évoluent avec la diminution de la température, ce qui est susceptible d'altérer le bon comportement mécanique du colis. Une étude par simulation numérique analyse le comportement du modèle de colis à -40°C et démontre son bon comportement.

	Démonstration de sûreté de l'emballage CTB	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	<u>Indice</u> : A Page 12/23

6.3 CONDITIONS NORMALES DE TRANSPORT

L'analyse du comportement de l'emballage en CNT est menée en le soumettant aux épreuves réglementaires suivantes :

- aspersion d'eau,
- chute libre de 1,2 m (masse du colis inférieure à 5000 kg),
- compression/gerbage de colis,
- pénétration.

6.3.1 Aspersion d'eau

L'emballage est constitué d'enveloppes métalliques étanches protégeant le compound et le bois de l'humidité extérieure. Aucun des matériaux susceptibles d'être mouillés n'étant dégradé par l'eau, l'aspersion n'apporte aucun dommage au modèle de colis.

6.3.2 Chute libre

La masse du modèle de colis étant inférieure à 5000 kg, la hauteur de chute libre doit être de 1,2 m. Cette hauteur de chute est couverte par les essais de chute représentatifs des CAT. La chute libre en CNT n'entraîne pas de perte du confinement ni de dégradation de la protection biologique.

6.3.3 Gerbage

La forme cylindrique de l'emballage ne se prête pas au gerbage. Néanmoins, la résistance du compound étant de 18 MPa, si on considère comme surface la moitié de la projection verticale du corps de l'emballage, la résistance globale du modèle de colis est de $4,7 \cdot 10^6$ N. Cette valeur est bien supérieure à cinq fois le poids du modèle de colis (39 730 N).

6.3.4 Pénétration

L'épreuve de pénétration (chute de 1 m d'une masse de 6 kg sur diamètre de 32 mm) peut être comparée à l'épreuve de chute sur poinçon qui correspond à une chute de 1 m d'une masse de 820 kg sur diamètre de 150 mm. Les pressions statiques correspondantes sont de 0,073 N/mm² et 0,450 N/mm² pour la pénétration et le poinçonnement, respectivement. L'épreuve de pénétration est couverte par l'épreuve de poinçonnement.

6.4 CONDITIONS ACCIDENTELLES DE TRANSPORT

Une analyse du comportement de l'emballage dans les conditions des épreuves réglementaires des CAT est menée. Ces épreuves sont les suivantes :

- chute libre de 9 m,

	Démonstration de sûreté de l'emballage CTB	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	<u>Indice</u> : A Page 13/23

- chute de 1 m sur poinçon,
- immersion à 15 m pendant 8 h.

La démonstration de la tenue mécanique du colis aux épreuves mécaniques caractéristiques des CNT et des CAT et aux contraintes de son environnement s'appuie sur des essais de chutes ainsi que sur des simulations numériques. Elle est basée sur une masse de colis de 850 kg.

6.4.1 Tenue à la chute

Plusieurs essais de chute ont été réalisés sur un emballage du parc. Ces essais cumulent la chute CNT de 1,2 m, la chute CAT de 9 m et la chute de 1 m sur poinçon. Des chutes à plat et avec fouettement ont été réalisées. L'analyse du comportement mécanique du modèle de colis CTB lors de ces essais démontre que le modèle de colis est conforme aux prescriptions réglementaires en termes de tenue mécanique.

Aucune déchirure des enveloppes des capots et du corps n'est observée. L'enveloppe de confinement reste étanche. Les enfoncements du colis sont tous faibles et très en deçà des limites acceptables. Les valeurs d'enfoncement servent de base pour la définition des hypothèses pénalisantes utilisées pour l'analyse de sûreté après épreuves.

Des simulations numériques ont été réalisées pour confirmer la tenue de l'emballage dans des configurations de chutes défavorables.

Les études menées ont permis de développer un modèle éléments finis sous LS-DYNA du colis CTB pour évaluer sa tenue aux épreuves réglementaires de chute.

Ce modèle a été corrélé sur les essais de chute réalisés, notamment sur les séquences CNT et CAT de chute à plat et inclinée sur le capot avant. La précision obtenue sur les critères de déplacements dynamiques, les temps d'annulation de la vitesse et d'accélération moyenne est inférieure à 10%.

Le modèle a ensuite été utilisé pour extrapoler le comportement du colis CTB à des chutes à plat sur le capot avant à -40°C (afin de maximiser les accélérations), des chutes inclinées sur le capot avant à 90°C (afin de maximiser les écrasements jusqu'à un éventuel talonnement), et des chutes avec fouettement sur une génératrice du corps ou directement sur les pieds. Des variations de l'angle d'incidence entre 2,5° et 15° et de la température ont été testées.

6.4.2 Immersion

Pendant l'épreuve d'immersion, le colis est soumis à une pression hydraulique extérieure relative égale à 150 kPa pendant 8 heures.

La contrainte maximale correspondante dans le tube d'épaisseur 10 mm est de 1,2 MPa. Compte tenu également de l'épaisseur des brides, cette pression ne peut provoquer des dommages à l'emballage et, en particulier, provoquer une perte d'étanchéité.

	Démonstration de sûreté de l’emballage CTB	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	<u>Indice</u> : A Page 14/23

6.5 CONCLUSION

Les résultats de calculs pour l’ensemble des chutes simulées ont permis de montrer :

- que les capots ne sont pas déchirés et restent fixés sur le corps, ce qui supprime tout risque de combustion du bois lors des épreuves thermiques ;
- que les tôles d’habillage du corps maintiennent le confinement du blindage radiologique ;
- que l’enceinte de confinement reste intègre et que l’étanchéité est conservée.

Le décollement maximal de la portée de joints du bouchon à l’issue des chutes est repris dans les études de confinement.

7. ANALYSE THERMIQUE

7.1 OBJECTIFS

Cette analyse a pour objet de vérifier que les températures atteintes en CNT et CAT restent inférieures aux limites admissibles des matériaux et des conditions de transport (température de surface du colis inférieure à 50°C sans ensoleillement à température ambiante de 38°C).

7.2 DONNEES D’ENTREES

Le contenu dissipe une puissance thermique de 17 W.

Le calcul en CNT considère l’emballage est en position horizontale, exposé au soleil 12h/24h au sein d’un air ambiant à 38°C.

En CAT, l’emballage ayant subi les épreuves de mécaniques en CAT, détaillées au § 5, est porté à la température de 800°C pendant 30 minutes puis subit un refroidissement dans un environnement à 38°C avec ensoleillement 12h/24h.

Le coefficient d’absorptivité de l’emballage retenu est 0,4 et l’émissivité de la paroi de la structure est de 0,8 en CAT et 0,2 pour l’inox et 0,3 pour l’acier (peint en jaune) en CNT.

En CNT, les surfaces externes de l’emballage sont exposées à un air ambiant fixé à 38°C avec un ensoleillement :

- de 400 W/m² sur les surfaces horizontales courbes;
- de 200 W/m² sur les surfaces verticales planes.

Les déformations, provenant des essais de chute, sont les suivantes :

- enfoncement de la forme d’un cylindre de 350 mm de diamètre et de 13 mm de profondeur sur le corps de l’emballage. Les dégâts sont modélisés par une déformation et une perforation de la virole,

	Démonstration de sûreté de l'emballage CTB	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	<u>Indice</u> : A Page 15/23

- fouettement de 25 mm de large à l'angle de chaque extrémité du corps de l'emballage,
- écrasement de 177 mm à l'angle des capots. Les dégâts seront modélisés par un arrachement complet de la matière et un remplacement des cavités d'air par du bois,

Les endommagements ont été positionnés de façon à être les plus pénalisants vis-à-vis de la température des joints d'étanchéité.

7.3 RESULTATS

En l'absence d'ensoleillement dans une ambiance à 38°C, la température de surface externe est inférieure à 41°C. La température des surfaces accessibles en conditions de transport de routine (CTR) ne dépasse donc pas 50°C, ce qui est conforme à la réglementation.

En CAT, la température maximale des joints est de 146°C pour la tôle et 148°C pour le bouchon. Elle est inférieure à la température maximale d'utilisation des joints d'étanchéité utilisés qui est de 175°C.

8. ANALYSE DU CONFINEMENT

8.1 OBJECTIFS

Cette partie analyse le taux de remplissage des gorges de joints aux températures atteintes par les joints en CNT et CAT et le taux de compression des joints à basse température afin de garantir que les joints conservent leur propriétés d'étanchéité de -40°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 de liquides en CNT et CAT. Pour un emballage de type B, ces critères sont :

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

Le relâchement d'activité est estimé et l'activité totale relâchée est comparée aux critères réglementaires énoncés ci-dessus.

Par ailleurs, pour les transports par voie aérienne, l'intégrité du système de confinement du CTB ne doit pas être affecté lorsqu'il est exposé à une température ambiante comprise entre -40°C et +55°C.

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

L'étanchéité de l'emballage est assurée par deux joints toriques en EPDM pour la tôle arrière et pour le bouchon avant.

Les paramètres pris en compte dans les calculs sont les suivants :

	Démonstration de sûreté de l'emballage CTB	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	<u>Indice</u> : A Page 16/23

- la dilatation linéique du joint et de la gorge de joint,
- le volume minimal de la gorge de joint à la température CAT pour l'analyse du risque d'extrusion,
- la profondeur maximale de la gorge de joint pour l'analyse du taux de compression.

Risque d'extrusion :

Le risque d'extrusion est maîtrisé si le volume du joint torique demeure inférieur à celui de la gorge trapézoïdale qui l'accueille, quelle que soit la température. Le joint peut alors se dilater sans contrainte à l'intérieur de sa gorge. Pour s'assurer de l'absence de risque d'extrusion, la méthode consiste à calculer la température à laquelle le volume du joint devient égal à celui de sa gorge. Cette température est nommée température d'extrusion.

Les températures d'extrusion des joints de la tôle et du bouchon sont supérieures à la température CAT atteinte suite à l'épreuve d'incendie. Le risque d'extrusion est donc maîtrisé.

Taux de compression :

L'objectif est de démontrer que, quelle que soit la température d'utilisation, le taux de compression des joints internes est suffisant pour assurer le maintien du confinement.

Le taux de compression diminuant avec la température, la température retenue pour le calcul est -40°C. Le décollement maximal du plan de joint est pris en compte de manière pénalisante. Enfin, une déformation rémanente à la compression (DRC) de 20% est retenue.

Les calculs démontrent que les taux de compression pour le joint interne de la tôle et du bouchon sont supérieurs à 15% quelle que soit la température. Le risque de perte de confinement à basse température est maîtrisé.

8.3 RELACHEMENT D'ACTIVITE

Le contenu ne présentant pas de gaz, le taux de relâchement d'activité est uniquement dû aux aérosols.

La pression extérieure considérée est de 0,6 bar pour un transport par voie terrestre et de 0,05 bar pour un transport par voie aérienne.

La température des gaz dans la cavité et les pressions correspondantes sont issues de façon pénalisante du calcul thermique considérant un ensoleillement 24 h / 24 h en CNT.

Dans le cas du transport par voie aérienne, les températures atteintes par les joints et par la cavité, dans une ambiance à 55°C sans ensoleillement, sont couvertes par celles définies précédemment pour le transport routier.

La méthodologie est basée sur la résolution de l'équation de Knudsen.

Les valeurs maximales de concentration d'aérosols dans la cavité du colis considérées dans l'étude, valeurs obtenues sur la base d'une compilation de résultats expérimentaux, sont de :

	Démonstration de sûreté de l’emballage CTB	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	<u>Indice</u> : A Page 17/23

- 10^{-3} g/m³ en CNT,
- 9 g/m³ durant 30 minutes puis 10^{-1} g/m³ le reste de la semaine, en CAT.

L’analyse démontre que, moyennant le respect des taux de fuite garantis, le relâchement d’activité satisfait aux critères imposés par la réglementation :

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

9. ANALYSE DE LA RADIOPROTECTION

9.1 OBJECTIFS

L’objet de cette analyse est :

- d’évaluer l’efficacité de la protection radiologique du modèle de colis constitué par l’emballage chargé de son contenu,
- de justifier que les critères réglementaires de débit de dose sont respectés.

Les critères réglementaires de DED sont les suivants :

CTR utilisation non exclusive :

- 2 mSv/h au contact du colis ;
- 0,1 mSv/h à 1 m du colis (indice de transport).

CTR utilisation exclusive :

- 10 mSv/h au contact du colis ;
- 2 mSv/h au contact du moyen de transport ;
- 0,1 mSv/h à 2 m du moyen de transport.

Le dimensionnement est réalisé pour un transport en utilisation exclusive. L’emballage CTB ne disposant pas forcément d’une protection physique, le DED au contact de l’emballage sera limité à 2 mSv/h de manière conservative. Ainsi, les critères appliqués en CTR sont :

- 2 mSv/h au contact du colis ;
- 0,1 mSv/h à 2 m du colis.

CNT : augmentation du DED au contact du colis inférieure à 20% par rapport aux CTR.

CAT : 10 mSv/h à 1 m du colis.

	Démonstration de sûreté de l'emballage CTB	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A Page 18/23

9.2 DONNES D'ENTREE

La protection biologique principale du colis est constituée de compound, dont la composition et la densité nominales sont prises en compte pour les calculs en CTR et en CNT. En CAT, la composition est modifiée par l'épreuve thermique qui provoque une perte d'eau contenue dans le matériau.

A la suite des épreuves des CNT et des CAT, les dégradations suivantes sont considérées de manière pénalisante :

- Les capots sont écrasés et sont supposés complètement disparus.
- Une suppression de 25 mm d'épaisseur de matière est considérée de manière pénalisante entre la virole externe et le compound.

En CAT, les hypothèses suivantes sont prises en compte :

- les capots ne sont plus modélisés et remplacés intégralement par de l'air.
- La suppression de 25 mm de compound est prise en compte et la virole est considérée au contact du compound;
- une composition du compound déshydraté.

Les aménagements internes à la nacelle ne sont pas modélisés. Les sources sont modélisées par des sources ponctuelles, décentrées radialement et axialement, placées au plus près des points de mesures dans la cavité.

La définition des sources gamma et neutron est réalisée en analysant leurs caractéristiques radiologiques. A partir d'une analyse de la bibliographie et des émissions neutroniques, des caractéristiques enveloppes des sources neutroniques sont définies et déclinées en familles de sources. Pour chaque radionucléide, les produits de filiation liés à la décroissance radioactive des sources sont pris en compte.

A partir de ces caractéristiques enveloppes, il est possible de définir des limitations en flux de neutrons et de photons pour chacune des familles et, in fine, d'en déduire des limites d'activité et/ou de masse pour chaque radionucléide à transporter.

Les familles suivantes sont définies :

- Famille A : les sources métalliques émettrices de neutrons et photons des noyaux lourds (ex. ^{252}Cf métal)
- Famille B : les sources neutrons comportant un mélange noyau émetteur α associé avec des noyaux légers, type Am-Be ;
- Famille C : les sources oxydes émettrices de neutrons et photons des noyaux lourds (ex. $^{239}\text{PuO}_2$)
- Famille D : la définition d'une source enveloppe théorique constituée d'un flux de neutrons de 10 MeV et de flux gamma de 6,13 et 1 MeV.

L'analyse menée dans l'étude permet :

	Démonstration de sûreté de l’emballage CTB	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	<u>Indice</u> : A Page 19/23

- Pour la famille A : de déterminer que la source de Cf-252 avec un flux maximal de 10^9 neutrons/s est enveloppe pour atteindre le critère réglementaire puis, d’en déduire les activités maximales de chacune des autres sources ;
- Pour la famille B : de distinguer trois sous-familles puis de déterminer les flux limites enveloppes et en déduire les limites d’activités ;
- Pour la famille C et pour les sources de photons primaires des radionucléides : de définir les limites en terme de flux de neutrons et d’activité pour atteindre le critère réglementaire le plus restrictif au contact de l’emballage ;
- Pour la famille D : de définir les caractéristiques d’une source enveloppe notamment vis-à-vis de la nature des endommagements des protections radiologiques en CAT dont l’activité doit être inférieure à $2,7 \cdot 10^8$ Bq.

9.3 RESULTATS

Que ce soit pour les sources de neutrons ou de photons, l’étude montre que le DED dimensionnant pour le transport est au contact radial du colis. Même en déplaçant les sources axialement dans la cavité, les DED axiaux restent significativement plus faibles.

L’emballage CTB chargé de diverses familles de sources respecte les critères réglementaires en CTR en définissant des limites de transportabilité.

A l’issue des épreuves des CNT, la protection radiologique du modèle de colis n’est pas dégradée. Seul un écrasement des capots peut être constaté, ce qui n’impacte pas le DED en radial qui est le DED maximal. L’augmentation du DED reste inférieure à 20%.

En CAT, les calculs sont réalisés en considérant des émissions enveloppes pour plusieurs flux de neutrons et de photons. Le compound étant considéré comme déshydraté en CAT, l’atténuation des neutrons est presque nulle compte-tenu de l’absence d’hydrogène. De manière pénalisante et simplifiée, étant donné que les photons contribuent peu au DED, une atténuation nulle peut également être considérée.

Pour la famille D, et compte-tenu de la faible atténuation des photons et des neutrons, il est considéré une absence d’emballage. Le DED est calculé à 1 m de la source de manière pénalisante.

Les résultats montrent que :

- Le critère réglementaire en CAT est respecté pour une source neutronique avec un flux maximal de $7,9 \cdot 10^8$ neutrons/s. Cette valeur est supérieure à celle des sources neutrons qui nécessite le flux le plus élevé pour atteindre le critère.
- Le critère réglementaire en CAT est respecté pour une source photons de 1 MeV et 6,13 MeV avec un flux maximal de $8,7 \cdot 10^{10}$ et $1,7 \cdot 10^{10}$ neutrons/s. Cette valeur est supérieure à celle de la source photons la plus pénalisante.

	Démonstration de sûreté de l'emballage CTB	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	<u>Indice</u> : A Page 20/23

On constate que le critère réglementaire en CAT n'est pas dimensionnant pour les sources transportées dans l'emballage CTB. Les limitations sont induites par le critère CTR au contact du colis.

A partir des flux enveloppes déterminés pour chaque famille, il est possible de déterminer les limites d'activité initiale des sources transportables pour les sources neutroniques de fissions spontanées, les sources neutroniques émetteurs alpha avec éléments légers et les sources neutroniques oxydes.

10. ANALYSE DE LA SURETE-CRITICITE

10.1 OBJECTIFS

Cette partie justifie la sûreté-criticité du modèle de colis, chargé de matières fissiles pour des CNT et des CAT.

Conformément à la réglementation, pour un nombre N de colis, les configurations à étudier sont les suivantes :

- En CNT, un réseau de 5N colis :
 - Il n'y a rien entre les colis et l'agencement de colis est entouré de tous côtés par une couche d'eau d'au moins 20 cm,
 - l'état du colis est celui des CNT.
- En CAT un réseau de 2N colis :
 - il y a modération entre les colis par un matériau hydrogéné et l'agencement de colis est entouré de tous côtés par une couche d'eau d'au moins 20 cm,
 - l'état du colis est celui des CAT.

Les études sont réalisées pour un réseau infini de colis ce qui couvre ces deux configurations.

Les critères d'admissibilité retenus sont les critères usuels :

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

10.2 DONNEES D'ENTREES

Deux milieux fissiles de références (MFR), enveloppes en terme de sûreté-criticité des contenus définis au § 4, sont considérés :

- MFR 1 : 250g de ^{241}Pu métal (enveloppe des isotopes ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu) modéré par une quantité quelconque d'eau.
- MFR 2 : Alliage intermétallique de ^{239}Pu - ^9Be dont la teneur massique en ^{239}Pu est telle que $^{239}\text{Pu}/(^9\text{Be}+^{239}\text{Pu}) = 66\%$ modéré par une quantité quelconque d'eau. On considère 300g, 600g et 800g de ^{239}Pu .

	Démonstration de sûreté de l'emballage CTB	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	<u>Indice</u> : A Page 21/23

Les études concernant les colis considérés isolément retiennent les hypothèses communes suivantes :

- il y a pénétration d'eau dans tous les espaces vides du colis, y compris dans les aménagements internes qui sont dans la cavité de l'emballage,
- le colis est isolé par une couronne d'eau de 20 cm d'épaisseur,
- le colis est endommagé :
 - Pour l'étude du MFR 1, les matériaux de structure sont négligés.
 - Pour l'étude du MFR 2, l'état du colis est celui consécutif aux épreuves mécanique et incendie : diminution d'épaisseur du compound de 20 mm et composition modifiée.

10.3 DEFINITION DU SYSTEME D'ISOLEMENT

Le système d'isolement permettant de garantir le maintien de la sous criticité du modèle de colis est constitué des éléments suivants :

- la matière fissile,
- le diamètre interne de la cavité de l'emballage ($\varnothing = 140$ mm maximal),
- la virole interne de l'emballage en acier inoxydable (10 mm),
- la protection neutronique radiale en compound (264 mm en CNT et 244 mm minimal à l'issue des CAT),
- la virole externe de l'emballage en acier au carbone.

10.4 RESULTATS

Les facteurs de multiplication effectifs des neutrons maximaux pour les deux MFR étudiés sont présentés dans le Tableau 1.

Milieu fissile de référence	Colis isolé	Réseau de colis
MFR 1	0,88	0,813
MFR 2	0,76	0,802

Tableau 1 : keff maximaux ($k_{\text{eff}} + 3 \sigma$)

Le modèle de colis constitué de l'emballage CTB respecte les critères de sûreté-criticité.

	Démonstration de sûreté de l'emballage CTB	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A Page 22/23

Le contenu fissile admissible du modèle de colis CTB doit respecter les conditions suivantes :

- Pour les radionucléides ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu pris, soit individuellement, soit en mélange :
Masse de radioéléments ≤ 250 g
- Pour un mélange de ^{239}Pu et d'éléments légers : *Masse de* $^{239}\text{Pu} \leq 250$ g **et** $\frac{\text{Masse d'éléments légers}}{\text{Masse de } ^{239}\text{Pu}} \leq 0,5$
- Dans le cas d'un mélange de sources, si au moins une source contient un radionucléide fissile, la masse d'éléments légers dans la cavité est limitée à 125 g.
- Pour un alliage intermétallique à base de ^{239}Pu et ^9Be de stœchiométrie PuBe_{13} dont la masse respecte l'inéquation : $250 \text{ g} < \text{Masse de } ^{239}\text{Pu} \leq 800$ g, la source doit être transportée seule.

Dans ces conditions, l'indice de sûreté-criticité (ISC) vaut : 0.

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

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

11.1 UTILISATION

Le chargement et le déchargement de l'emballage s'effectuent en position horizontale. Le chargement (ou déchargement) ainsi que le transport, s'effectuent à sec.

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 gerbage de l'emballage n'est pas autorisé.

Il est impératif de manutentionner l'emballage en petite vitesse (pas de levage à l'arraché). Le bouchon avant et la tôle arrière sont manutentionnés à la main.

L'arrimage est réalisé par 4 sangles tendues entre les oreilles d'arrimage de l'emballage CTB, et les points d'arrimage sur le moyen de transport utilisé. Les 4 sangles sont orientées dans le plan des oreilles. Le colis CTB est placé sur le moyen de transport en position horizontale. L'axe de l'emballage est parallèle à la direction de roulage. Un tapis antiglisse standard dont le coefficient de frottement minimal est de 0,6 doit être utilisé.

11.2 MAINTENANCE

L'emballage doit faire l'objet d'un suivi et d'un entretien périodique :

- petite maintenance tous les 3 ans ou les 15 transports ;
- grande maintenance tous les 6 ans ou les 30 transports ;

	Démonstration de sûreté de l’emballage CTB	
	Référence du document : DES-DDSD-DTEL-SGPE-DSS006	DSS
	Plan de classement : DTEL-Unités-O4	Indice : A
		Page 23/23

Tous les composants présentant des défauts importants susceptibles d’abaisser le niveau de sûreté du colis doivent être remplacés.

Tout emballage qui ne satisfait pas aux critères spécifiés dans le programme d’entretien doit être mis hors service jusqu’à ce que l’action corrective appropriée ait été effectuée.

12. 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 un système de management de la qualité (SMQ) adapté, répondant aux exigences du présent dossier, produire et conserver les documents justificatifs (enregistrements) de leur activité.

13. CONCLUSION

Le modèle de colis constitué par l’emballage CTB 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 50°C en CTR ;
- 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 instructions d’utilisation et de maintenance sont définies de manière à conserver les performances du modèle de colis.