

*Entité Propriétaire* DT\_EP\_P

*Type doc* NT NOTE TECHNIQUE-DESCRIPTIF-NOTE DE CALCUL

**METHODE DE CALCUL ATELIER DE VITRIFICATION R7 ET  
ATELIER DE DESENTREPOSAGE DES RESIDUS VITRIFIES –  
COLIS STANDARD DE DECHET DE RELIQUATS DE VERRE UMO  
CSD-RU – DETERMINATION DES PARAMETRES  
COMPLEMENTAIRES ET DES INCERTITUDES ASSOCIEES**

Edition GEIDE du 27/01/2017 - Etat Projet

<b>Signataires :</b>			
	<i>Nom</i>	<i>Entité</i>	<i>Visa</i>
Rédacteur	██████████	DT_EP_P	02/07/2015
Vérificateur	██████████████████	DQSSE_CQ	02/07/2015
Vérificateur	██████████	DT_PRO_PM	02/07/2015
Approbateur	██████████	DT_EP_P	06/07/2015

*Les signatures électroniques portées ci-dessus sont garanties par la GEIDE*

[Voir Table des Matières](#)

## 1. OBJET DU DOCUMENT ET CHAMP D'APPLICATION

Ce document décrit les méthodes de détermination des paramètres complémentaires des colis de reliquats de verre UMo, CSD-RU, produit selon la spécification [1], et leurs incertitudes. Ceux-ci concernent :

- 1. la composition chimique du reliquat de verre UMo,
- 2. la masse de chaque reliquat,
- 3. la masse totale de reliquats par conteneur,
- 4. la masse totale [REDACTED]
- 5. la masse totale du conteneur,
- 6. l'activité  $\beta$  totale,
- 7. l'activité de radionucléides  $\beta\gamma$ ,
- 8. l'activité  $\alpha$  totale,
- 9. la masse d'uranium,
- 10. la masse de plutonium,
- 11. la masse d'américium,
- 12. la masse de curium,
- 13. la masse de neptunium,
- 14. la masse des actinides  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{245}\text{Cm}$ ,
- 15. la composition isotopiques U et Pu,
- 16. le débit de dose  $\beta\gamma$  à 1 m de distance,
- 17. le débit de dose  $\beta\gamma$  au contact,
- 18. la puissance thermique.

Nota : Les paramètres 1 à 15 sont établis à la date de production du colis.

Les paramètres 16 à 18 sont établis à une date de calcul proche de la date d'expédition.

## 2. DOMAINE D'APPLICATION

Les calculs développés dans cette note sont applicables pour un reliquat de verre UMo de composition donnée où il sera tenu compte de l'activité réelle ou de la masse réelle des éléments constitutifs du reliquat.

Les applications numériques ont été effectuées, à titre indicatif, sur la composition du reliquat de verre UMo en considérant :

- la composition de la strate 2 du reliquat de verre UMo donnée par le CEA [2],
- la composition du verre moyen UMo correspondant au traitement des [REDACTED] cuves de solution mère UMo. Les valeurs, déterminées à usage interne, sont présentées en annexe 2,
- les activités spécifiques et les masses de radioéléments, de la cuve de solution mère [REDACTED] calculées au 01/01/2011 à partir du code de calcul [REDACTED] [3].

## 3. VITRIFICATION EN CREUSET FROID

Le glossaire utilisé et les opérations de vitrification en creuset froid sont expliqués dans la référence [4].

## 4. METHODOLOGIE

La méthodologie est expliquée dans la référence [4].

Les incertitudes sont calculées selon la « loi de propagation des incertitudes » [4] lorsque les différents paramètres de calcul sont considérés comme des variables statistiques non corrélées. Dans le cas contraire, les incertitudes sont évaluées selon la « loi de propagation des erreurs » [4].

## 5. FRACTION MASSIQUE D'UN ELEMENT CHIMIQUE DANS LE VERRE

### 5.1. DETERMINATION GENERALE

La composition d'un reliquat de verre UMo est déterminée à partir :

- des compositions élémentaires :
  - du verre moyen UMo élaboré (calcul),
  - du dernier verre UMo élaboré avant retrait du reliquat (calcul),
  - du verre de la strate 2 (données du CEA [2]),
- de la masse de reliquat

Pour le calcul de la composition d'un reliquat UMo, il est considéré de façon majorante, quelle que soit la durée de la campagne :

- que les [ ] kg de reliquats peuvent être assimilés à de la strate 2 enrichie en radionucléides ( $M_{ac\_max}$ ),
- qu'au-delà des [ ] le reste du reliquat est assimilé au dernier verre UMo élaboré.

La fraction massique de l'oxyde d'un élément  $i$  est calculée de la manière suivante :

- si  $M_R \leq M_{ac\_max}$  :  $X_i = X_{Ci}$
- si  $M_R > M_{ac\_max}$  :  $X_i = \frac{M_{ac\_max} \times X_{Ci} + (M_R - M_{ac\_max}) \times X_{vt_i}}{M_R}$

avec :

$M_R$  : masse d'un reliquat de verre UMo (kg),

$M_{ac\_max}$  : masse maximale d'autocreuset considérée dans le reliquat (kg),

$X_i$  : fraction massique de l'oxyde de l'élément  $i$  dans un reliquat de verre UMo (%),

$X_{Ci}$  : fraction massique de l'oxyde de l'élément  $i$  dans la strate 2 (%) (donnée CEA [2]),

$X_{vt_i}$  : fraction massique de l'oxyde de l'élément  $i$  dans le dernier verre UMo élaboré (%).

## 5.2. DETERMINATIONS SPECIFIQUES

### 5.2.1. Détermination des fractions massiques d'éléments à partir de leur traceur dans le reliquat de verre UMo

Cette partie concerne les éléments : Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AmO<sub>2</sub>, NpO<sub>2</sub>, CmO<sub>2</sub>, UO<sub>2</sub>, CeO<sub>2</sub>, PuO<sub>2</sub>, Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ag<sub>2</sub>O, Rh, RuO<sub>2</sub>, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO, CdO.

La composition massique de la strate 2 découle des résultats d'essais en inactif effectués par le CEA. Les différents éléments listés ci-dessus n'y sont pas présents, il est donc nécessaire d'utiliser des « traceurs » faisant le lien entre les espèces présentes dans les essais inactifs du CEA [2] et les espèces actives présentes dans les futurs reliquats en exploitation afin de compléter cette composition. Ces espèces inactives sont alors appelées « traceurs ».

Le recours à ces traceurs n'est utilisé que pour le calcul des éléments absents de la composition de la strate 2 donnée par le CEA [2].

La composition de la dernière coulée Xvt<sub>i</sub> utilisée dans l'équation du paragraphe 5.1 pour le calcul du reliquat sera déterminée en exploitation.<sup>(1)</sup>

#### Remarques :

- les coefficients de ventilation<sup>(2)</sup> présentés ci-après ne seront pas utiles en exploitation puisque des analyses en actifs des solutions traitées seront disponibles.
- l'application de ces coefficients suppose que les espèces tracées ont le même comportement chimique que le traceur et enrichissent de la même manière le reliquat.

#### 5.2.1.1. Calcul de la fraction massique

La fraction massique de l'oxyde de l'élément i dans la strate 2 est calculée à partir de l'équation suivante :

$$Xc_i = T_i \times Xc_t$$

Avec :

Xc <sub>i</sub>	:	fraction massique de l'oxyde de l'élément i dans la strate 2 du reliquat de verre UMo (%),
Xc <sub>t</sub>	:	fraction massique de l'élément traceur t dans la strate 2 du reliquat de verre UMo (%) donnée CEA [2]),
T <sub>i</sub>	:	coefficient de ventilation de l'élément tracé i.

Les valeurs des coefficients de ventilation à partir des traceurs sont données dans le tableau 1<sup>(3)</sup>. Ces coefficients sont déterminés à partir de la composition du verre UMo donnée en annexe 2.

<sup>(1)</sup> Pour les applications numériques des calculs d'incertitudes de cette note, la composition du verre de la dernière coulée est prise égale à celle de l'annexe 1 où l'ensemble des éléments est représenté.

<sup>(2)</sup> La ventilation est la répartition des espèces actives par rapport à leur traceur.

<sup>(3)</sup> La fraction massique dans le reliquat de l'élément RuO<sub>2</sub> est calculée dans le paragraphe 5.2.2.

Traceur (t)	Elément tracé (i)	Coefficient de ventilation, (T <sub>i</sub> )
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,377
	AmO <sub>2</sub>	0,008
	NpO <sub>2</sub>	0,002
	CmO <sub>2</sub>	1,586.10 <sup>-5</sup>
	UO <sub>2</sub>	0,613
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,946
	PuO <sub>2</sub>	0,017
	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,037
RuO <sub>2</sub>	RuO <sub>2</sub>	0,886
	Ag <sub>2</sub> O	0,004
	Rh	0,111
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,460
	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,035
	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,294
	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,210
ZnO	ZnO	0,9998
	CdO	0,0002

Tableau 1 : Coefficients de ventilation des oxydes des éléments i à partir des traceurs t (cf. annexe 2)

Ce qui conduit aux relations suivantes :

- si  $M_R \leq M_{ac\_max}$  :  $X_i = T_i \times Xc_t$
- si  $M_R > M_{ac\_max}$  :  $X_i = \frac{M_{ac\_max} \times T_i \times Xc_t + (M_R - M_{ac\_max}) \times Xvt_i}{M_R}$

avec :

$M_R$  : masse d'un reliquat de verre UMo (kg),

$M_{ac\_max}$  : masse maximale d'autocreuset considérée dans le reliquat (kg),

$X_i$  : fraction massique de l'oxyde de l'élément i dans un reliquat de verre UMo (%),

$T_i$  : coefficient de ventilation de l'élément tracé i ,

$Xc_t$  : fraction massique de l'élément traceur t dans la strate 2 du reliquat de verre UMo (%),

$Xvt_i$  : fraction massique de l'oxyde de l'élément i dans le dernier verre UMo élaboré (%).

▪

### 5.2.2. Détermination de la fraction massique de RuO<sub>2</sub>

D'après les essais du CEA [2], la teneur en RuO<sub>2</sub> calculée à l'aide de l'équation du paragraphe 5.1 est sous estimée. Pour cette raison, la composition en RuO<sub>2</sub> du reliquat est calculée différemment des autres compositions.

La fraction massique de RuO<sub>2</sub> est donnée par l'équation suivante :

$$X_{\text{RuO}_2} = 0,02 \times t \times X_{\text{vmRuO}_2}$$

Avec :

$X_{\text{RuO}_2}$  : fraction massique de l'élément RuO<sub>2</sub> dans un reliquat de verre UMo (%),

t : durée de la campagne d'élaboration du verre UMo (h),

$X_{\text{vmRuO}_2}$  : fraction massique moyenne de l'élément RuO<sub>2</sub> dans le verre UMo élaboré au cours de la campagne (%).

### 5.3. INCERTITUDES

Les méthodes de calcul appliquées pour la détermination des incertitudes des paramètres présentés dans les paragraphes 5.1 et 5.2 sont exposées dans ce paragraphe.

#### 5.3.1. Incertitude sur la détermination générale de la fraction massique

Les mesures permettant le calcul de la fraction massique de l'oxyde d'un élément dans le reliquat de verre UMo sont supposées indépendantes.

La masse maximale admissible d'autocreuset  $M_{\text{ac\_max}}$  est prise de façon forfaitaire. Aucune incertitude n'est considérée pour cette valeur.

La variance d'après la « loi de propagation des incertitudes » et de l'hypothèse d'indépendance des sources d'incertitudes, associée à la détermination de la composition, s'écrit de la façon suivante :

- pour  $M_R \leq M_{\text{ac\_max}}$  :  $X_i = X_{\text{C}_i}$  soit :  $\frac{\Delta X_i}{X_i} = \frac{\Delta X_{\text{C}_i}}{X_{\text{C}_i}}$

Par hypothèse, comme aucune incertitude n'est considérée sur les teneurs en oxydes de la strate 2 communiquées par le CEA du fait que les résultats disponibles sont issus d'analyses effectuées sur des échantillons ne provenant que d'un seul et même essai (essai de longue durée), il en découle que pour cette configuration de calcul :

$$\frac{\Delta X_i}{X_i} = \frac{\Delta X_{\text{C}_i}}{X_{\text{C}_i}} = 0$$

• pour  $M_R > M_{ac\_max}$  : 
$$X_i = \frac{M_{ac\_max} \times X_{c_i} + (M_R - M_{ac\_max}) \times X_{vt_i}}{M_R}$$

$$\sigma^2(X_i) = \left( \frac{\partial X_i}{\partial M_R} \right)^2 \sigma^2(M_R) + \left( \frac{\partial X_i}{\partial X_{c_i}} \right)^2 \sigma^2(X_{c_i}) + \left( \frac{\partial X_i}{\partial X_{vt_i}} \right)^2 \sigma^2(X_{vt_i})$$

avec :

$$\left( \frac{\partial X_i}{\partial M_R} \right) = \frac{X_{vt_i} \times M_R - [M_{ac\_max} \times X_{c_i} + (M_R - M_{ac\_max}) \times X_{vt_i}]}{M_R^2}$$

$$\left( \frac{\partial X_i}{\partial M_R} \right) = \frac{(X_{vt_i} \times M_R) - (M_{ac\_max} \times X_{c_i}) - (X_{vt_i} \times M_R) + (M_{ac\_max} \times X_{vt_i})}{M_R^2}$$

$$\left( \frac{\partial X_i}{\partial M_R} \right) = \frac{M_{ac\_max} \times (X_{vt_i} - X_{c_i})}{M_R^2}$$

$$\left( \frac{\partial X_i}{\partial X_{vt_i}} \right) = \frac{M_R - M_{ac\_max}}{M_R}$$

$$\left( \frac{\partial X_i}{\partial X_{c_i}} \right) = \frac{M_{ac\_max}}{M_R}$$

En reportant les coefficients de sensibilité dans la formule du calcul de la composition, la variance suivante est obtenue :

$$\sigma^2(X_i) = \left( \frac{M_{ac\_max} \times (X_{vt_i} - X_{c_i})}{M_R^2} \right)^2 \times \sigma^2(M_R) + \left( \frac{M_{ac\_max}}{M_R} \right)^2 \times \sigma^2(X_{c_i}) + \left( \frac{M_R - M_{ac\_max}}{M_R} \right)^2 \times \sigma^2(X_{vt_i})$$

En multipliant le terme de variance de la « loi de propagation des incertitudes » par le carré d'un même facteur d'élargissement, on obtient :

$$\Delta X_i^2 = \left( \frac{M_{ac\_max} \times (X_{vt_i} - X_{c_i})}{M_R^2} \right)^2 \times \Delta M_R^2 + \left( \frac{M_{ac\_max}}{M_R} \right)^2 \times \Delta X_{c_i}^2 + \left( \frac{M_R - M_{ac\_max}}{M_R} \right)^2 \times \Delta X_{vt_i}^2$$

Comme aucune incertitude n'est considérée sur la composition de la strate 2,  $\Delta X_{c_i}$ , la relation devient :

$$\Delta X_i^2 = \left( \frac{M_{ac\_max} \times (X_{vt_i} - X_{c_i})}{M_R^2} \right)^2 \times \Delta M_R^2 + \left( \frac{M_R - M_{ac\_max}}{M_R} \right)^2 \times \Delta X_{vt_i}^2$$

Dans les 2 cas, les incertitudes relative  $\frac{\Delta X_i}{X_i}$  et absolue  $\Delta X_i$  peuvent alors être calculées :

$$\Delta X_i = \sqrt{\Delta X_i^2}$$

$$\text{et } \frac{\Delta X_i}{X_i} = \frac{1}{X_i} \times \sqrt{\Delta X_i^2}$$

*Nota* : aucune incertitude n'étant considérée sur la composition de la strate N°2,  $\Delta X_i^2$  ne dépend que de  $\Delta M_R^2$  et de  $\Delta Xvt_i^2$ .

### 5.3.2. Incertitude sur la fraction massique d'éléments à partir de leur traceur

Ce paragraphe concerne les éléments tracés par le Nd, le Ce, le Ru, le La et le Zn.

Aucune incertitude sur les coefficients de ventilation définis à partir de la composition du verre UMo présenté en annexe 2, n'est considérée du fait que ces coefficients sont déterminés en exploitation. L'incertitude relative sur la fraction massique des éléments tracés est calculée de la façon suivante :

- pour  $M_R \leq M_{ac\_max}$ , l'équation générale est :

$$\frac{\Delta X_i}{X_i} = \frac{\Delta X_{C_i}}{X_{C_i}} = \frac{\Delta X_{C_t}}{X_{C_t}} = 0$$

- pour  $M_R > M_{ac\_max}$ , en remplaçant dans l'équation générale  $X_i$  par  $T_i \times X_{C_t}$  on obtient :

$$\Delta X_i^2 = \left( \frac{M_{ac\_max} \times (Xvt_i - T_i \times X_{C_t})}{M_R^2} \right)^2 \times \Delta M_R^2 + \left( \frac{M_R - M_{ac\_max}}{M_R} \right)^2 \times \Delta Xvt_i^2$$

### 5.3.3. Incertitude sur la fraction massique de RuO<sub>2</sub>

En ne considérant aucune incertitude sur le temps, l'incertitude relative sur la fraction massique de RuO<sub>2</sub> est calculée de la façon suivante :

$$\frac{\Delta X_{RuO_2}}{X_{RuO_2}} = \frac{\Delta Xvm_{RuO_2}}{Xvm_{RuO_2}}$$

avec :

$X_{RuO_2}$  : fraction massique de l'élément RuO<sub>2</sub> dans le reliquat de verre UMo (%),

$Xvm_{RuO_2}$  : fraction massique moyenne de l'élément RuO<sub>2</sub> dans le verre UMo élaboré au cours de la campagne (%).

### 5.3.4. Incertitude sur la fraction massique du verre moyen UMo élaboré

La fraction massique du verre moyen UMo élaboré de l'élément i,  $X_{vm_i}$ , est :

$$X_{vm_i} = \frac{\sum_{\text{Coulées}} (X_{v_i} \times M_c)}{\sum_{\text{Coulées}} M_c}$$

avec :

- $M_c$  : masse de verre coulée (kg),  
 $X_{v_i}$  : fraction massique de l'élément i dans le verre UMo élaboré lors d'une coulée (%).

Les fractions  $X_{v_i}$  du verre UMo élaboré lors d'une coulée sont corrélées.

L'incertitude sur la fraction massique de l'élément i du verre moyen UMo élaboré lors d'une campagne,  $X_{vm_i}$ , peut être calculée selon la « loi de propagation des erreurs ».

Les coefficients de sensibilité sont calculés pour les différentes coulées selon :

$$\left( \frac{\partial X_{vm_i}}{\partial M_c} \right)_{\text{Coulée}} = \frac{1}{\left( \sum_{\text{Coulées}} M_c \right)^2} \left( X_{v_i} \sum_{\text{Coulées}} M_c - \sum_{\text{Coulées}} (X_{v_i} \times M_c) \right)_{\text{Coulée}}$$

$$\left( \frac{\partial X_{vm_i}}{\partial X_{v_i}} \right)_{\text{Coulée}} = \left( \frac{M_c}{\sum_{\text{Coulées}} M_c} \right)_{\text{Coulée}}$$

L'incertitude  $\Delta X_{vm_i}$  peut être évaluée par :

$$\Delta X_{vm_i} = \sum_{\text{Coulées}} \left\{ \left[ \frac{1}{\left( \sum_{\text{Coulées}} M_c \right)^2} \left( X_{v_i} \times \sum_{\text{Coulées}} M_c - \sum_{\text{Coulées}} (X_{v_i} \times M_c) \right) \right]_{\text{Coulée}} \times \Delta M_c + \left[ \frac{M_c}{\sum_{\text{Coulées}} M_c} \right] \times \Delta X_{v_i} \right\}$$

## 5.4. APPLICATION NUMERIQUE

Les données de base pour le calcul des incertitudes sur la fraction massique sont données en annexe 1 et annexe 2.

Les résultats des applications numériques des incertitudes de la fraction massique sont donnés en annexe 3.

## 6. MASSE D'UN RELIQUAT DE VERRE UMO

### 6.1. DETERMINATION DE LA MASSE DU RELIQUAT DE VERRE UMO

La masse de reliquat de verre UMO,  $M_R$  (exprimée en kg), résulte d'une pesée.

### 6.2. INCERTITUDE ET APPLICATION NUMERIQUE

La précision relative est de 0,2 % pour une masse totale de 750 kg pour la table de pesée utilisée soit  $\Delta M_R = \blacksquare$  kg. Les essais sur les ateliers de vitrification R7 et T7 ont confirmé cette incertitude par comparaison avec des masses étalon)

L'incertitude relative sur la masse de reliquat est :  $\frac{\Delta M_R}{M_R} = \blacksquare\%$  (pour  $M_R = \blacksquare$  kg [1]).

## 7. MASSE TOTALE DE RELIQUAT DE VERRE UMO PAR CONTENEUR

### 7.1. DETERMINATION DE LA MASSE TOTALE DE RELIQUAT DE VERRE UMO PAR CONTENEUR

La masse totale de reliquat de verre UMO par conteneur est donnée par l'équation suivante :

$$M_{R/CONT} = \sum_R M_R$$

avec :

$M_{R/CONT}$  : masse de reliquat de verre UMO par conteneur (kg),

$M_R$  : masse d'un reliquat de verre UMO (kg).

### 7.2. INCERTITUDE

Les masses de reliquats étant corrélées entre elles, l'incertitude sur la masse totale de reliquats par conteneur,  $M_{R/CONT}$ , est évaluée selon la « loi de propagation des erreurs » :

$$\Delta M_{R/CONT} = \Delta \left( \sum_{\text{Reliquats}} M_R \right) = \sum_{\text{Reliquats}} \Delta M_R$$

### 7.3. APPLICATION NUMERIQUE

En prenant l'hypothèse que chaque conteneur peut accueillir 3 reliquats de campagnes d'élaboration du verre UMO distinctes [1], la relation suivante est appliquée :

$$\Delta M_{R/CONT} = \text{■} \times \Delta M_R$$

Avec  $M_R = \text{■}$  kg,  $\Delta M_R = \text{■}$  kg (d'après § 6.2),

$$\Delta M_{R/CONT} = \text{■} \text{ kg.}$$

et  $\frac{\Delta M_{R/CONT}}{M_{R/CONT}} = \text{■} \%$  (avec  $M_{R/CONT} = \text{■} \times \text{■} = \text{■}$  kg).

## 8. MASSE TOTALE DU CONTENEUR

### 8.1. DETERMINATION DE LA MASSE TOTALE DU CONTENEUR

Les masses des conteneurs vides et des couvercles sont reportées, après fabrication, sur les certificats de conformité du constructeur.

Les masses des reliquats UMo sont mesurées.

La masse d'un conteneur plein,  $M_{CONT}$ , résulte de la somme des masses suivantes :

- masse de reliquat par conteneur,  $M_{reliquat/CONT}$ , (kg),
- masse  $\text{■}$  kg,
- masse du conteneur vide,  $M_v$ , (kg)
- masse du couvercle,  $M_c$ , (kg)

$$\text{soit } M_{CONT} = M_{R/CONT} + M_{\text{■}} + M_v + M_c$$

### 8.2. INCERTITUDE

Les masses étant pesées de façon indépendante, l'incertitude  $\Delta M_{CONT}$  sur la masse du conteneur est évaluée selon la « loi de propagation des incertitudes » de la façon suivante :

$$(\Delta M_{CONT})^2 = (\Delta M_{R/CONT})^2 + (\Delta M_{\text{■}})^2 + (\Delta M_v)^2 + (\Delta M_c)^2$$

### 8.3. APPLICATION NUMERIQUE

Les incertitudes absolues retenues sont les suivantes :

- 1)  $\Delta M_{R/CONT} = \text{■}$  kg,  $M_{R/CONT} = \text{■}$  kg (cf. § 7.3),
- 2)  $\Delta M_{\text{■}} = \text{■}$  kg,  $M_{\text{■}} = \text{■}$  kg [1],
- 3)  $\Delta M_v = \text{■}$  kg (résulte d'une pesée systématique),
- 4)  $\Delta M_c = \text{■}$  kg (résulte d'une analyse statistique),

$$\text{Soit } \Delta M_{CONT} = \text{■} \text{ kg,}$$

$$\text{et } \frac{\Delta M_{CONT}}{M_{CONT}} = \text{■} \%$$

(pour  $M_{R/CONT} = \text{■} \text{ kg}$ ,  $M_{\text{■}} = \text{■} \text{ kg}$  et  $(M_v + M_c) = \text{■} \text{ kg}$ ) d'après [6].

## 9. ACTIVITE $\beta$ TOTALE PAR CONTENEUR

### 9.1. DETERMINATION DE L'ACTIVITE $\beta$ TOTALE PAR CONTENEUR

L'activité  $\beta$  totale par reliquat est donnée par l'équation suivante :

$$A_{\beta/R} = k_{A_{\beta}} \times (A_{90(Sr+Y)/R} + A_{137Cs/R})$$

- $A_{\beta/R}$  : activité  $\beta$  du reliquat de verre UMo par reliquat (TBq),  
 $k_{A_{\beta}}$  : coefficient permettant de relier l'activité  $\beta$  totale à celles de  $^{90}\text{Sr}$  de l'  $^{90}\text{Y}$  et du  $^{137}\text{Cs}$ ,  
 $A_{e/R}$  : activité de l'émetteur e par reliquat (TBq).

L'activité  $\beta$  totale par conteneur est :

$$A_{\beta/CONT} = \sum_{\text{reliquats}} A_{\beta/R}$$

### 9.2. INCERTITUDE

Le coefficient  $k_{A_{\beta}}$  est déterminé à partir du code de calcul [■] [3], cuve [■] au 01/01/2011). Aucune incertitude n'est appliquée sur ce coefficient.

Les activités du  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Y}$  et du  $^{137}\text{Cs}$  dans le reliquat sont corrélées. En effet, elles sont calculées en fonction de la masse de reliquat. L'activité  $\beta$  est donc calculée à partir de la « loi de propagation des erreurs » :

$$\Delta A_{\beta/R} = k_{A_{\beta}} \times (\Delta A_{90(Sr+Y)/R} + \Delta A_{137Cs/R})$$

et comme l'  $^{90}\text{Y}$  est en équilibre avec le  $^{90}\text{Sr}$ ,

$$\Delta A_{\beta/R} = k_{A_{\beta}} \times (2 \times \Delta A_{90Sr/R} + \Delta A_{137Cs/R})$$

L'activité  $\beta$  appliquée au conteneur s'exprime de la façon suivante :

$$\Delta A_{\beta/CONT} = \Delta \sum_{\text{reliquats}} A_{\beta/R} = \sum_{\text{reliquats}} \Delta A_{\beta/R}$$

### 9.3. APPLICATION NUMERIQUE

En prenant l'hypothèse que chaque conteneur peut accueillir  $\bullet$  reliquats de campagnes d'élaboration du verre UMo distinctes [1], la relation suivante est appliquée :

$$\Delta A_{\beta / \text{CONT}} = \bullet \times \Delta A_{\beta / R}$$

L'incertitude sur l'activité totale  $\beta$  est calculée à partir des valeurs suivantes :

1) les activités du  $^{90}\text{Sr}$  et du  $^{137}\text{Cs}$  étant des paramètres garantis, leurs incertitudes relatives par reliquat sont calculées dans la référence [4],

$$\frac{\Delta A_{^{90}\text{Sr}/R}}{A_{^{90}\text{Sr}/R}} = \bullet \%, \quad \Delta A_{^{90}\text{Sr}/\text{CONT}} = \bullet \text{TBq (pour } A_{^{90}\text{Sr}/\text{CONT}} = \bullet \text{TBq [1]).}$$

$$\text{donc } \Delta A_{^{90}\text{Sr}/R} = \bullet \text{TBq.}$$

$$\frac{\Delta A_{^{137}\text{Cs}/R}}{A_{^{137}\text{Cs}/R}} = \bullet \%, \quad \Delta A_{^{137}\text{Cs}/\text{CONT}} = \bullet \text{TBq (pour } A_{^{137}\text{Cs}/\text{CONT}} = \bullet \text{TBq [1]).}$$

$$\frac{\Delta A_{^{137}\text{Cs}/\text{reliquat}}}{A_{^{137}\text{Cs}/\text{reliquat}}} = \bullet = \bullet \text{TBq.}$$

$$2) k_{A_{\beta}} = \bullet [3],$$

$$\text{Donc } \Delta A_{\beta} = \bullet \times \bullet \times \bullet \text{TBq,}$$

$$\text{et } \frac{\Delta A_{\beta}}{A_{\beta}} = \bullet \% \text{ (avec } A_{\beta} = \bullet \text{TBq [1]).}$$

## 10. ACTIVITE DE RADIONUCLEIDES $\beta\gamma$ PAR CONTENEUR

### 10.1. DETERMINATION DE L'ACTIVITE $\beta\gamma$ PAR CONTENEUR

#### 10.1.1. Détermination générale

D'une manière générale, l'activité des émetteurs dont l'activité est proportionnelle à la masse de l'émetteur e correspondant est calculée selon la relation suivante :

$$A_e = a_{s_e} \times M_e$$

Dans le cas d'un reliquat de verre UMo cette relation devient :

$$A_{e/R} = as_e \times M_{e/R}$$

Avec :  $A_{e/R}$  : activité de l'émetteur e dans un reliquat de verre UMo (TBq),  
 $as_e$  : activité spécifique de l'émetteur e (TBq/kg),  
 $M_{e/R}$  : masse de l'émetteur e dans un reliquat de verre UMo (kg)

La masse d'un émetteur e dans un reliquat,  $M_{e/R}$  est calculée selon la relation suivante :

$$M_{e/R} = X_e \times M_R$$

avec :

$M_R$  : masse de reliquat de verre UMo pesée (kg),

$X_e$  : fraction massique de l'émetteur e dans un reliquat de verre UMo (%) déterminée à partir de la relation suivante :  $X_e = k_{e-i} \times X_i = k_{e-i} \times X_{i\_ox} \times \frac{m_i}{m_{i\_ox}}$  avec :

$k_{e-i}$  : rapport massique entre l'émetteur e et l'élément i dans le reliquat de verre UMo,

$X_{i\_ox}$  : fraction massique de l'oxyde de l'élément i dans un reliquat de verre UMo (%),

$m_i$  : masse molaire de l'élément i (g/mol),

$m_{i\_ox}$  : masse molaire de l'oxyde de l'élément i (g/mol).

L'activité par conteneur est donnée par la relation suivante :

$$A_{e/CONT} = \sum_{\text{Requats}} A_{e/R} = as_e \times \sum_{\text{Requats}} M_{e/R}$$

### 10.1.2. Détermination pour les activités calculées par rapport au Nd

Cette détermination s'applique au calcul des incertitudes sur les activités du <sup>79</sup>Se, du <sup>93</sup>Zr, du <sup>107</sup>Pd, du <sup>126</sup>Sn et du <sup>135</sup>Cs.

L'activité de ces radionucléides corrélée à la masse de Nd est calculée selon la relation suivante :

$$A_{e/R} = as_e \times k_{e-Nd} \times M_{Nd/R}$$

$$M_{Nd/R} = X_{Nd} \times M_R$$

Avec :  $A_{e/R}$  : activité de l'émetteur e dans un reliquat de verre UMo (TBq),

- $k_{e-Nd}$  : coefficient de l'émetteur e se rapportant au Nd pour le calcul de l'activité,  
 $as_e$  : activité spécifique de l'émetteur e (TBq/kg),  
 $M_{Nd/R}$  : masse de l'émetteur Nd dans un reliquat de verre UMo (kg),  
 $X_{Nd}$  : fraction massique de l'élément Nd dans un reliquat UMo (%).

Emetteur	$K_{e-Nd}$	$\Delta K_{e-Nd}/K_{e-Nd}$
<sup>79</sup> Se	1,22E-03	0,9%
<sup>93</sup> Zr	1,87E-01	1,1%
<sup>107</sup> Pd	3,20E-02	20,8%
<sup>126</sup> Sn	4,13E-03	11,1%
<sup>135</sup> Cs	1,49E-01	2,5%

Tableau 2 : Valeurs des coefficients  $k_{e-Nd}$  et des incertitudes associées [6].

## 10.2. INCERTITUDE

L'activité spécifique de l'émetteur e,  $as_e$  est donnée par le code de calcul [3], cuve [3] au 01/01/2011). Aucune incertitude n'est appliquée sur cette valeur.

L'incertitude appliquée sur le coefficient  $k_{e-Nd}$  est donnée dans le tableau 2.

L'incertitude sur le coefficient  $k_{e-i}$  est calculée à partir du  $k_{e-i}$  moyen des cuves [3] au 01/01/2011 [3]. Cette incertitude correspond à la dispersion des  $k_{e-i}$  associées aux calculs des différentes cuves autour de cette moyenne.

Comme dans la référence [4], on obtient :

$$\frac{\Delta A_{e/R}}{A_{e/R}} = \frac{\Delta X_e}{X_e} + \frac{\Delta M_R}{M_R} \text{ soit en remplaçant } X_e \text{ par } k_{e-i} \times X_i \text{ on obtient :}$$

$$\frac{\Delta A_{e/R}}{A_{e/R}} = \sqrt{\frac{\Delta(k_{e-i})^2}{(k_{e-i})^2} + \frac{\Delta(X_i)^2}{(X_i)^2} + \frac{\Delta M_R}{M_R}}$$

De la même manière, pour le <sup>79</sup>Se, <sup>93</sup>Zr, <sup>107</sup>Pd, <sup>126</sup>Sn et <sup>135</sup>Cs, la fraction massique de l'émetteur e dans le reliquat de verre UMo et la masse de reliquat de verre UMo sont liés, d'après la « loi de propagation des erreurs » soit :

$$\frac{\Delta A_{e/R}}{A_{e/R}} = \sqrt{\frac{\Delta(k_{e-Nd})^2}{(k_{e-Nd})^2} + \frac{\Delta(X_{Nd})^2}{(X_{Nd})^2} + \frac{\Delta M_R}{M_R}}$$

L'incertitude sur l'activité par conteneur est calculée de la manière suivante :

$$\Delta A_{e/CONT} = \Delta \sum_{\text{reliquats}} A_{e/R} = \sum_{\text{reliquats}} \Delta A_{e/R}$$

### 10.3. APPLICATION NUMERIQUE

En prenant l'hypothèse que chaque conteneur peut accueillir 3 reliquats de campagnes d'élaboration du verre UMo distinctes [1], la relation suivante est obtenue :

$$\Delta A_{e/CONT} = 3 \times \Delta A_{e/R}$$

1) le calcul de l'incertitude relative sur la fraction massique d'un élément  $i$ ,  $\frac{\Delta X_i}{X_i}$ , est détaillée en annexe 3

2)  $\frac{\Delta M_R}{M_R} = 2,14 \%$  (cf. § 7.3),

3) les incertitudes sur les radionucléides sont présentées dans le tableau 3 :

Emetteur	$\frac{\Delta X_i}{X_i}$	$\frac{\Delta k_{e-i}}{k_{e-i}}$	$\frac{\Delta X_e}{X_e}$	$\frac{\Delta A_{e/R}}{A_{e/R}}$	Activité nominale par reliquat (TBq)	$\Delta A_{e/R}$ (TBq)	$\Delta A_{e/CONT}$ (TBq)
<sup>60</sup> Co							
<sup>125</sup> Sb							
<sup>154</sup> Eu							
<sup>241</sup> Pu							
<sup>99</sup> Tc							
Emetteur	$\frac{\Delta X_{Nd}}{X_{Nd}}$	$\frac{\Delta k_{e-Nd}}{k_{e-Nd}}$	$\frac{\Delta X_e}{X_e}$	$\frac{\Delta A_{e/R}}{A_{e/R}}$	Activité nominale par reliquat (TBq)	$\Delta A_{e/R}$ (TBq)	$\Delta A_{e/CONT}$ (TBq)
<sup>79</sup> Se							
<sup>93</sup> Zr							
<sup>107</sup> Pd							
<sup>126</sup> Sn							
<sup>135</sup> Cs							

Tableau 3 : Incertitudes sur les activités des radionucléides  $\beta\gamma$ .

## 11. ACTIVITE $\alpha$ TOTALE PAR CONTENEUR

### 11.1. DETERMINATION DE L'ACTIVITE $\alpha$ TOTALE PAR CONTENEUR

L'activité  $\alpha$  totale par reliquat est donnée par l'équation suivante :

$$A_{\alpha/R} = k_{A_{\alpha}} \times \left( A_{241\text{Am}/R} + A_{243\text{Am}/R} + A_{244\text{Cm}/R} + A_{245\text{Cm}/R} + A_{237\text{Np}/R} + \sum_j A_{j\text{Pu}/R} + \sum_k A_{k\text{U}/R} \right)$$

$A_{\alpha/R}$  : activité  $\alpha$  totale par reliquat (TBq),

$k_{A_{\alpha}}$  : coefficient permettant de relier l'activité alpha totale à celles des émetteurs <sup>241</sup>Am, <sup>243</sup>Am, <sup>244</sup>Cm, <sup>245</sup>Cm, <sup>237</sup>Np et les isotopes du Pu et de l'U précisés ci-dessous,

$A_{e/R}$  : activité de l'émetteur e par reliquat (TBq).

$$A_{e/R} = as_e \times M_{e/R}$$

$as_e$  : activité spécifique de l'émetteur e (TBq/kg),

$M_{e/R}$  : masse de l'émetteur e dans un reliquat de verre UMo (kg),

La masse d'un émetteur e dans un reliquat  $M_{e/R}$ , est calculée selon la relation suivante :

$$M_{e/R} = X_e \times M_R$$

$X_e$  : fraction massique de l'émetteur e dans un reliquat de verre UMo (%) déterminée à partir de la relation suivante :  $X_e = k_{e-i} \times X_i = k_{e-i} \times X_{i\_ox} \times \frac{m_i}{m_{i\_ox}}$  avec :

$k_{e-i}$  : rapport massique entre l'émetteur e et l'élément i dans le reliquat,

$X_{i\_ox}$  : fraction massique de l'oxyde de l'élément i dans un reliquat de verre UMo (%),

$m_i$  : masse molaire de l'élément i (g/mol),

$m_{i\_ox}$  : masse molaire de l'oxyde de l'élément i (g/mol),

$M_R$  : masse de reliquat de verre UMo (kg),

<sup>j</sup>Pu : isotopes du Pu pris en compte : <sup>238</sup>Pu, <sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu, <sup>241</sup>Pu, <sup>242</sup>Pu,

<sup>k</sup>U : isotopes d'U pris en compte : <sup>234</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>236</sup>U, <sup>238</sup>U.

L'activité  $\alpha$  totale par conteneur est :

$$A_{\alpha/CONT} = \sum_{\text{reliquats}} A_{\alpha/R}$$

## 11.2. INCERTITUDE

Le coefficient  $k_{A\alpha}$  est déterminé grâce au code de calcul [3], cuve au 01/01/2011). Aucune incertitude n'est appliquée à cette valeur.

L'activité spécifique de l'émetteur e,  $a_{e_i}$  dépend du code de calcul [3], cuve au 01/01/2011). Aucune incertitude n'est appliquée à cette valeur.

D'après la référence [4], l'incertitude sur l'activité d'un émetteur e par reliquat est :

$$\frac{\Delta A_{e/R}}{A_{e/R}} = \frac{\Delta X_e}{X_e} + \frac{\Delta M_R}{M_R} \text{ soit en remplaçant } X_e \text{ par } k_{e-i} \times X_i \text{ on}$$

$$\text{obtient : } \frac{\Delta A_{e/R}}{A_{e/R}} = \sqrt{\frac{\Delta(k_{e-i})^2}{(k_{e-i})^2} + \frac{\Delta(X_i)^2}{(X_i)^2} + \frac{\Delta M_R}{M_R}}$$

Les fractions massiques des isotopes de l'Am, du Cm, du Np, du Pu et de l'U dans le reliquat et la masse de reliquat,  $M_r$ , sont corrélées. En effet, la fraction massique de ces isotopes est calculée en fonction de la masse de reliquat. Donc l'activité  $\alpha$  totale est calculée à partir de la « loi de propagation des erreurs » :

$$\Delta A_{\alpha/R} = k_{A_\alpha} \times \left( \Delta A_{241 \text{ Am}/R} + \Delta A_{243 \text{ Am}/R} + \Delta A_{244 \text{ Cm}/R} + \Delta A_{245 \text{ Cm}/R} + \Delta A_{237 \text{ Np}/R} + \sum_j \Delta A_{j \text{ Pu}/R} + \sum_k \Delta A_{k \text{ U}/R} \right)$$

Ce qui donne par conteneur :

$$\Delta A_{\alpha / CONT} = \Delta \sum_{\text{reliques}} A_{\alpha / R} = \sum_{\text{reliques}} \Delta A_{\alpha / R}$$

### 11.3. APPLICATION NUMERIQUE

En prenant l'hypothèse que chaque conteneur peut accueillir des reliquats de campagnes d'élaboration du verre UMo distinctes [1], la relation suivante est obtenue :

$$\Delta A_{\alpha / CONT} = \dots \times \Delta A_{\alpha / R}$$

L'incertitude sur l'activité totale  $\alpha$  par conteneur est calculée à partir des valeurs suivantes :

1) l'activité du  $^{241}\text{Am}$  étant un paramètre garanti, son incertitude relative par reliquat est calculée dans la référence [4],

$$\frac{\Delta A_{^{241}\text{Am}/R}}{A_{^{241}\text{Am}/R}} = \dots \%, \quad \Delta A_{^{241}\text{Am}/CONT} = \dots \text{TBq} \quad (\text{pour } A_{^{241}\text{Am}/CONT} = \dots \text{TBq} \text{ [1]})$$

$$\text{donc } \Delta A_{^{241}\text{Am}/R} = \dots = \dots \text{TBq} \quad (A_{^{241}\text{Am}/R} = \dots \text{TBq} \text{ [1]})$$

2) les  $k_{e-i}$  et  $\Delta k_{e-i}$  des isotopes suivants :  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$  et  $^{238}\text{U}$ , sont déterminés à partir d'analyses sur les cuves [6].

Les  $k_{e-i}$  des isotopes suivants :  $^{234}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{245}\text{Cm}$ ,  $^{237}\text{Np}$  et  $^{243}\text{Am}$ , sont obtenus par moyenne des  $k_{e-i}$  des cuves [01/01/2011] par le code de calcul [3]. Les incertitudes  $\Delta k_{e-i}$  correspondent à la dispersion des  $k_{e-i}$  associées autour de ces moyennes.

3) les rapports  $\frac{\Delta X_i}{X_i}$ , pour le calcul des rapports  $\frac{\Delta X_e}{X_e}$ , sont détaillés dans l'annexe 3,

4)  $\Delta M_R = \dots$  kg (cf. § 7.3) et  $M_r = \dots$  kg [1] soit  $\frac{\Delta M_R}{M_R} = \dots \%$ ,

Emetteur	$\frac{\Delta X_i}{X_i}$	$\frac{\Delta k_{e-i}}{k_{e-i}}$	$\frac{\Delta X_e}{X_e}$	$\frac{\Delta A_{e/R}}{A_{e/R}}$	Activité nominale par reliquat (TBq)	$\Delta A_{e/R}$ (TBq)	$\Delta A_{e/CONT}$ (TBq)
<sup>243</sup> Am							
<sup>244</sup> Cm							
<sup>245</sup> Cm							
<sup>247</sup> Np							
<sup>238</sup> Pu							
<sup>239</sup> Pu							
<sup>240</sup> Pu							
<sup>241</sup> Pu							
<sup>242</sup> Pu							
<sup>234</sup> U							
<sup>235</sup> U							
<sup>238</sup> U							
<sup>238</sup> U							

Tableau 4 : Incertitude sur les activités des isotopes nécessaires pour le calcul de l'activité alpha.

$$5) k_{A_\alpha} = \text{[redacted]} [3],$$

$$\text{Donc } \Delta A_{\alpha/CONT} = \text{[redacted]} \text{ TBq},$$

$$\text{et } \frac{\Delta A_\alpha}{A_\alpha} = \text{[redacted]} \% \text{ (avec } A_{\alpha/CONT} = \text{[redacted]} \text{ TBq [1]).}$$

## 12. MASSE D'URANIUM, PLUTONIUM, AMÉRICIUM, CURIUM, NEPTUNIUM PAR CONTENEUR

### 12.1. DETERMINATION DE LA MASSE D'UN ELEMENT PAR CONTENEUR

La masse d'un élément par conteneur est donnée par l'équation suivante :

$$M_i = X_i \times M_R$$

- $M_i$  : masse de l'élément (g),  
 $X_i$  : fraction massique de l'élément dans un reliquat (%),  
 $M_R$  : masse d'un reliquat de verre UMo (g).

En sommant la relation ci-dessus pour chaque reliquat, la relation suivante est obtenue :

$$M_{i/CONT} = \sum_{\text{reliquats}} (X_i \times M_R)$$

$M_{i/CONT}$  : masse de l'élément i par conteneur (g).

## 12.2. INCERTITUDE

Le fraction massique d'un élément i dans le reliquat,  $X_i$ , et la masse totale de reliquat,  $M_r$ , sont corrélées. En effet, la fraction massique d'un élément dans le reliquat est calculée en fonction de la masse de reliquat. Donc la masse d'un élément est calculée à partir de la « loi de propagation des erreurs » :

$$\sigma_{(M_i)} = \left( \frac{\partial M_i}{\partial M_R} \right) \cdot \sigma_{(M_R)} + \left( \frac{\partial M_i}{\partial X_i} \right) \cdot \sigma_{(X_i)},$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial M_R} = X_i,$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial X_i} = M_R,$$

$$\sigma_{(M_R)} = (X_i) \sigma_{(M_R)} + (M_R) \sigma_{(X_i)}$$

$$\text{donc } \frac{\Delta M_i}{M_i} = \frac{\Delta X_i}{X_i} + \frac{\Delta M_R}{M_R}$$

$$\text{et } \Delta M_{i/CONT} = \sum_{\text{reliquats}} (M_R \times \Delta X_i + X_i \times \Delta M_R)$$

$$\frac{\Delta M_{i/CONT}}{M_{i/CONT}} = \sum_{\text{reliquats}} \left( \frac{\Delta X_i}{X_i} + \frac{\Delta M_R}{M_R} \right)$$

## 12.3. APPLICATION NUMERIQUE

En prenant l'hypothèse que chaque conteneur peut accueillir  $\bullet$  reliquats de campagnes d'élaboration du verre UMo distinctes [1] et la relation suivante est obtenue :

$$\Delta M_{e/CONT} = \bullet \times \Delta M_{e/R}$$

L'incertitude sur la masse d'uranium, plutonium, américium, curium et neptunium est calculée à partir des valeurs suivantes :

- 1)  $X_i$  donnée dans l'annexe 1,
- 2)  $\Delta X_i$  donnée dans l'annexe 2,
- 3)  $\frac{\Delta M_{R/CONT}}{M_{R/CONT}} = \bullet$  % (cf. § 7.3).

Eléments	X <sub>i</sub>	ΔX <sub>i</sub>	M <sub>i/CONT</sub> (g)	$\frac{\Delta M_{i/CONT}}{M_{i/CONT}}$	ΔM <sub>i/CONT</sub> (g)
U					
Pu					
Am					
Cm					
Np					

Tableau 5 : Incertitudes sur la masse des éléments U, Pu, Am, Cm et Np.

### 13. MASSE DES ACTINIDES <sup>237</sup>Np, <sup>241</sup>Am, <sup>243</sup>Am, <sup>244</sup>Cm, <sup>245</sup>Cm

#### 13.1. DETERMINATION DE LA MASSE DES ACTINIDES <sup>237</sup>Np, <sup>241</sup>Am, <sup>243</sup>Am, <sup>244</sup>Cm, <sup>245</sup>Cm

La masse des actinides <sup>237</sup>Np, <sup>241</sup>Am, <sup>243</sup>Am, <sup>244</sup>Cm, <sup>245</sup>Cm est donnée par l'équation suivante :

$$M_{e/reliquat} = X_e \times M_R$$

- Avec :
- $M_{e/R}$  : masse de l'émetteur e dans un reliquat de verre UMo (kg)
  - $M_R$  : masse d'un reliquat de verre UMo (g),
  - $X_e$  : fraction massique de l'émetteur e dans le reliquat de verre UMo (%) avec  $X_e = k_{e-i} \times X_i$
  - $k_{e-i}$  : rapport massique entre l'émetteur e et l'élément i,
  - $X_i$  : fraction massique de l'élément i dans le reliquat (%).

La masse d'un émetteur par conteneur (g) est donnée par la relation suivante :

$$M_{e/CONT} = \sum_{reliquats} M_{e/R}$$

### 13.2. INCERTITUDE

L'incertitude sur le coefficient  $k_{e-i}$  est calculée à partir du  $k_{e-i}$  moyen des cuves [REDACTED] au 01/01/2011 [3]. Cette incertitude correspond à la dispersion des  $k_{e-i}$  associées aux calculs [REDACTED] des différentes cuves autour de cette moyenne.

Avec l'hypothèse d'indépendance des sources d'incertitudes, l'incertitude relative sur  $X_e$  est calculée d'après la « loi de propagation des incertitudes » et d'après la référence [4] soit :

$$\frac{\Delta X_e}{X_e} = \sqrt{\frac{\Delta(k_{e-i})^2}{(k_{e-i})^2} + \frac{\Delta(X_i)^2}{(X_i)^2}}$$

La fraction massique des actinides  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{245}\text{Cm}$  et la masse de reliquat sont corrélées, donc la masse de ces émetteurs est calculée à partir de la « loi de propagation des erreurs » et d'après la référence [4] :

$$\frac{\Delta M_{e/R}}{M_{e/R}} = \frac{\Delta X_e}{X_e} + \frac{\Delta M_R}{M_R} = \sqrt{\frac{\Delta(k_{e-i})^2}{(k_{e-i})^2} + \frac{\Delta(X_i)^2}{(X_i)^2} + \frac{\Delta M_R}{M_R}}$$

$$\text{et } \Delta M_{e/CONT} = \Delta \sum_{\text{reliquats}} M_{e/R} = \sum_{\text{reliquats}} \Delta M_{e/R}$$

### 13.3. APPLICATION NUMERIQUE

En prenant l'hypothèse que chaque conteneur contient [REDACTED] reliquats provenant de campagnes d'élaboration du verre UMo distinctes [1], la relation suivante est obtenue :

$$M_{e/CONT} = [REDACTED] \times M_{e/R}$$

1) les rapports  $\frac{\Delta X_i}{X_i}$ , pour le calcul des rapports  $\frac{\Delta X_e}{X_e}$ , sont détaillés dans l'annexe 3,

2)  $\Delta M_{CONT/R} = [REDACTED]$  kg (cf. § 7.3), avec  $M_{CONT/reliquat} = [REDACTED]$  kg,

L'incertitude sur la masse des actinides  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$  et  $^{245}\text{Cm}$  est donnée dans le tableau suivant :

Emetteur	$\frac{\Delta X_i}{X_i}$	$\frac{\Delta k_{e-i}}{k_{e-i}}$	$\frac{\Delta X_e}{X_e}$	$\frac{\Delta M_{e/CONT}}{M_{e/CONT}}$	Masse nominale par conteneur (g)	$\Delta M_{e/R}$ (g)
$^{237}\text{Np}$						
$^{241}\text{Am}$						
$^{243}\text{Am}$						
$^{244}\text{Cm}$						
$^{245}\text{Cm}$						

Tableau 6 : Incertitudes sur la masse des actinides  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{245}\text{Cm}$ .

## 14. COMPOSITION ISOTOPIQUE U ET PU

### 14.1. DETERMINATION DE LA COMPOSITION ISOTOPIQUE U ET PU

Les compositions isotopiques de l'uranium et du plutonium sont déterminées par spectrométrie de masse, pour l'ensemble des campagnes, dans les cuves amont de SPF.

Les isotopes déterminés sont les suivants :

- Uranium :  $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$
- Plutonium :  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$

Les déterminations sont effectuées sur les solutions en amont de l'atelier de vitrification. Le procédé de vitrification n'a pas d'influence sur la composition isotopique de ces deux éléments puisqu'ils sont amenés par la seule solution de PF. Ainsi la seule incertitude de détermination de ces compositions isotopiques dans le conteneur correspond à la dispersion et les intervalles de confiance associés aux mesures des différentes cuves.

## 14.2. INCERTITUDE

L'incertitude sur les compositions isotopiques U et Pu est donnée dans le tableau 7 :

Emetteurs	$\frac{\Delta k_{e-i}}{k_{e-i}}$ (%)	Composition isotopique $k_{e-i}$ (% nominal)	$\Delta k_{e-i}$
<sup>235</sup> U	████	████	████
<sup>236</sup> U	████	████	████
<sup>238</sup> U	████	████	████
<sup>238</sup> Pu	████	████	████
<sup>239</sup> Pu	████	████	████
<sup>240</sup> Pu	████	████	████
<sup>241</sup> Pu	████	████	████
<sup>242</sup> Pu	████	████	████

Tableau 7 : Incertitudes sur les compositions isotopiques U et Pu [6].

## 15. DEBIT DE DOSE AU CONTACT ET DEBIT DE DOSE A 1 m

### 15.1. DETERMINATION DE LA DOSE AU CONTACT

Le débit de dose  $\gamma$  est mesuré grâce à une chambre d'ionisation.

Les débits de dose sont obtenus à partir des résultats des mesures en chambre d'ionisation ainsi qu'en intégrant les coefficients de calibration.

Ces coefficients sont fonction de la distance séparant du conteneur mesuré.

La chambre d'ionisation donne la mesure :  $M_i$ .

Débit de dose  $\gamma$  à la surface =  $A_{\gamma/s} \times M_i + B_{\gamma/s}$

Débit de dose  $\gamma$  à 1 mètre =  $A_{\gamma/1m} \times M_i + B_{\gamma/1m}$

Avec :  $A_{\gamma/s}$ ,  $B_{\gamma/s}$  : coefficients de calibration de la chambre d'ionisation.

Ces coefficients sont obtenus par code de calcul et courbes de calibration (méthode des moindres carrés) réalisées à partir de conteneurs représentatifs.

### 15.2. INCERTITUDE

L'incertitude totale sur la détermination du débit de dose combine les incertitudes liées aux conteneurs représentatifs et au conteneur à mesurer, à savoir :

- Pour les conteneurs représentatifs :
  - o L'étalonnage du capteur,
  - o L'étalonnage de l'électronique de comptage,
  - o La chaîne de mesure au contact et à 1 m,
  - o La chaîne de mesure au poste NPH/DRV,
  - o L'étalonnage du poste NPH/DRV,
- Pour le conteneur à mesurer :

- La chaîne de mesure au poste NPH/DRV,
- Les corrections entre conteneur à mesurer et conteneurs représentatifs.

L'incertitude totale retenue pour les débits de dose  $\gamma$  au contact et à 1 m est égale à 2% à 2 sigma.

## 16. PUISSANCE THERMIQUE

### 16.1. DETERMINATION DE LA PUISSANCE THERMIQUE A LA DATE DE PRODUCTION

La puissance thermique d'un colis CSD-RU,  $P_{th}$ , est donnée par l'équation suivante :

$$P_{th} = k_{PT} \times (A_{137Cs} \times K_{137Cs} + A_{90Sr} \times K_{90Sr} + A_{241Am} \times K_{241Am})$$

- Avec :
- $A_e$  : l'activité de l'émetteur dans le reliquat (TBq),
  - $K_e$  : le coefficient reliant activité de l'émetteur e à la puissance thermique (W/TBq),
  - $k_{PT}$  : le coefficient prenant en compte la puissance thermique due à l'activité des émetteurs non déterminés.

Les valeurs des coefficients utilisés sont présentées dans le tableau 8 [3] :

$K_{137Cs}$	$1,28.10^{-1}$ W/TBq <sup>(4)</sup>
$K_{90Sr}$	$1,77.10^{-1}$ W/TBq <sup>(5)</sup>
$K_{241Am}$	$8,98.10^{-1}$ W/TBq
$k_{PT}$	1,0024

Tableau 8 : Valeurs des coefficients reliant les activités des émetteurs à la puissance thermique et du coefficient prenant en compte la puissance thermique due à l'activité des émetteurs non déterminés [3].

### 16.2. INCERTITUDE

L'activité du  $^{137}Cs$ , du  $^{90}Sr$  et du  $^{241}Am$  sont corrélées. En effet, l'activité du  $^{137}Cs$ , du  $^{90}Sr$  et de  $^{241}Am$ , qui dépend des fractions massiques des éléments et donc de la masse de reliquat, est calculée en fonction de la masse de reliquat. Donc l'incertitude sur la puissance thermique est calculée à partir de la « loi de propagation des erreurs » :

$$\Delta P_{th} = k_{PT} \times (\Delta A_{137Cs} \times K_{137Cs} + \Delta A_{90Sr} \times K_{90Sr} + \Delta A_{241Am} \times K_{241Am})$$

<sup>(4)</sup> Ce coefficient inclut la contribution thermique du  $^{137m}Ba$ .

<sup>(5)</sup> Ce coefficient inclut la contribution thermique du  $^{90}Y$ .

### 16.3. APPLICATION NUMERIQUE

D'après la référence [4] :

$$\Delta A_{137Cs/CONT} = \text{[REDACTED]} \text{ TBq/conteneur}$$

$$\Delta A_{90Sr/CONT} = \text{[REDACTED]} \text{ TBq/conteneur}$$

$$\Delta A_{241Am/CONT} = \text{[REDACTED]} \text{ TBq/conteneur}$$

$$\text{Donc } \Delta Pth = \text{[REDACTED]} \times \text{[REDACTED]}$$

$$\text{Soit } \Delta Pth = \text{[REDACTED]} \text{ W}$$

### 16.4. EVOLUTION DE LA PUISSANCE THERMIQUE ENTRE LES DATES DE PRODUCTION ET DE DESENTREPOSAGE

La méthode de calcul consiste [6], à partir de la détermination de la puissance thermique du colis à la date de production, à recalculer la puissance thermique à la date de désentreposage en prenant en compte la décroissance radioactive de chaque émetteur entre ces deux dates soit :

$$\Delta Pth_{(t)} = k_{PT(t)} \times (\Delta A_{137Cs(t)} \times K_{137Cs} + \Delta A_{90Sr(t)} \times K_{90Sr} + \Delta A_{241Am(t)} \times K_{241Am})$$

avec :

$t$  : le 1<sup>er</sup> janvier de l'année de désentreposage,

$\Delta Pth_{(t)}$  : la puissance thermique calculée à l'instant  $t$  (W),

$k_{PT(t)}$  : le coefficient prenant en compte la puissance thermique due à l'activité des émetteurs non déterminés recalculé à l'instant  $t$ ,

$\Delta A_{e(t)}$  : l'activité de l'émetteur  $e$  dans le reliquat de verre UMo calculée à l'instant  $t$  (TBq),

$K_e$  : le coefficient reliant activité de l'émetteur  $e$  à la puissance thermique (cf. tableau 8).

Les activités à l'instant  $t$  sont calculées à partir des relations suivantes :

- pour une désintégration simple :  $A_{e(t)} = A_{e(t_0)} \times e^{-\lambda_e t}$

avec :

$A_{e(t_0)}$  : l'activité de l'émetteur  $e$  à la date de production du colis de reliquat UMo (TBq),

$\lambda_e$  : constante de décroissance radioactive de l'émetteur  $e$  avec  $\lambda_e = \frac{\ln 2}{T_e}$  (jour<sup>-1</sup>),

$T_e$  : période radioactive de l'émetteur  $e$  (jour),

- pour une filiation de deux émetteurs radioactifs  $e_1$  et  $e_2$  ( $e_2$  étant le descendant de

$$e_1) : A_{e_2(t)} = \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) \times A_{e_1(t_0)} \times \left( e^{-\lambda_{e_1}t} - e^{-\lambda_{e_2}t} \right) + A_{e_2(t_0)} \times e^{-\lambda_{e_2}t}$$

avec :  $A_{e_1(t_0)}$  et  $A_{e_2(t_0)}$  : les activités respectives des émetteurs  $e_1$  et  $e_2$  à la date de production du colis de reliquat UMo (TBq)

$\lambda_{e_1}, \lambda_{e_2}$  : les constantes de décroissance radioactive des émetteurs  $e_1$  et  $e_2$  ( $\text{jour}^{-1}$ ).

Les périodes et constantes radioactives des principaux émetteurs considérés sont rappelés dans le tableau 1.

Emetteurs	Période $T_e$ (jours)	Constante radioactive $\lambda_e$ ( $\text{jour}^{-1}$ )
$^{137}\text{Cs}$	$1,1016 \cdot 10^4$	$6,2922 \cdot 10^{-5}$
$^{90}\text{Sr}$	$1,0636 \cdot 10^4$	$6,5169 \cdot 10^{-5}$
$^{90}\text{Y}$	2,6667	$2,5993 \cdot 10^{-1}$
$^{241}\text{Am}$	$1,5815 \cdot 10^5$	$4,3828 \cdot 10^{-6}$

Tableau 1 : Périodes et constantes radioactives des principaux émetteurs

L'incertitude sur la puissance thermique d'un colis à une date donnée « t » est calculée en prenant en compte :

- les termes variants de  $t_0$  à t, à savoir les activités  $A_{e(t_0)}$  recalculées à la date t,
- les termes invariants de  $t_0$  à t, à savoir les masses de reliquats UMo, les incertitudes sur les masses pesées.



### 17. DOCUMENTS CITES

● [REDACTED]	[REDACTED]

Édition GUIDE du 27/01/2017 - Etat Projet

## 18. ANNEXES











[Retour page 1](#)

## 19. TABLE DES MATIERES

1.	OBJET DU DOCUMENT ET CHAMP D'APPLICATION .....	1
2.	DOMAINE D'APPLICATION.....	1
3.	VITRIFICATION EN CREUSET FROID.....	1
4.	METHODOLOGIE .....	2
5.	FRACTION MASSIQUE D'UN ELEMENT CHIMIQUE DANS LE VERRE.....	2
5.1.	DETERMINATION GENERALE.....	2
5.2.	DETERMINATIONS SPECIFIQUES.....	3
5.2.1.	Détermination des fractions massiques d'éléments à partir de leur traceur dans le reliquat de verre UMo.....	3
5.2.1.1.	Calcul de la fraction massique.....	3
5.2.2.	Détermination de la fraction massique de RuO <sub>2</sub> .....	5
5.3.	INCERTITUDES.....	5
5.3.1.	Incertitude sur la détermination générale de la fraction massique .....	5
5.3.2.	Incertitude sur la fraction massique d'éléments à partir de leur traceur .....	7
5.3.3.	Incertitude sur la fraction massique de RuO <sub>2</sub> .....	7
5.3.4.	Incertitude sur la fraction massique du verre moyen UMo élaboré .....	8
5.4.	APPLICATION NUMERIQUE .....	8
6.	MASSE D'UN RELIQUAT DE VERRE UMO .....	9
6.1.	DETERMINATION DE LA MASSE DU RELIQUAT DE VERRE UMO .....	9
6.2.	INCERTITUDE ET APPLICATION NUMERIQUE .....	9
7.	MASSE TOTALE DE RELIQUAT DE VERRE UMO PAR CONTENEUR.....	9
7.1.	DETERMINATION DE LA MASSE TOTALE DE RELIQUAT DE VERRE UMO PAR CONTENEUR.....	9
7.2.	INCERTITUDE .....	9
7.3.	APPLICATION NUMERIQUE .....	9
8.	MASSE TOTALE DU CONTENEUR .....	10
8.1.	DETERMINATION DE LA MASSE TOTALE DU CONTENEUR.....	10
8.2.	INCERTITUDE .....	10
8.3.	APPLICATION NUMERIQUE .....	10

9. ACTIVITE $\beta$ TOTALE PAR CONTENEUR.....	11
9.1. DETERMINATION DE L'ACTIVITE $\beta$ TOTALE PAR CONTENEUR.....	11
9.2. INCERTITUDE .....	11
9.3. APPLICATION NUMERIQUE .....	12
10. ACTIVITE DE RADIONUCLEIDES $\beta\gamma$ PAR CONTENEUR .....	12
10.1. DETERMINATION DE L'ACTIVITE $\beta\gamma$ PAR CONTENEUR.....	12
10.1.1. Détermination générale.....	12
10.1.2. Détermination pour les activités calculées par rapport au Nd .....	13
10.2. INCERTITUDE .....	14
10.3. APPLICATION NUMERIQUE .....	15
11. ACTIVITE $\alpha$ TOTALE PAR CONTENEUR.....	16
11.1. DETERMINATION DE L'ACTIVITE $\alpha$ TOTALE PAR CONTENEUR.....	16
11.2. INCERTITUDE .....	17
11.3. APPLICATION NUMERIQUE .....	18
12. MASSE D'URANIUM, PLUTONIUM, AMÉRICIUM, CURIUM, NEPTUNIUM PAR CONTENEUR .....	19
12.1. DETERMINATION DE LA MASSE D'UN ELEMENT PAR CONTENEUR .....	19
12.2. INCERTITUDE .....	20
12.3. APPLICATION NUMERIQUE .....	20
13. MASSE DES ACTINIDES $^{237}\text{Np}$ , $^{241}\text{Am}$ , $^{243}\text{Am}$ , $^{244}\text{Cm}$ , $^{245}\text{Cm}$ ..	21
13.1. DETERMINATION DE LA MASSE DES ACTINIDES $^{237}\text{Np}$ , $^{241}\text{Am}$ , $^{243}\text{Am}$ , $^{244}\text{Cm}$ , $^{245}\text{Cm}$ ..	21
13.2. INCERTITUDE .....	22
13.3. APPLICATION NUMERIQUE .....	22
14. COMPOSITION ISOTOPIQUE U ET PU .....	23
14.1. DETERMINATION DE LA COMPOSITION ISOTOPIQUE U ET PU .....	23
14.2. INCERTITUDE .....	24
15. DEBIT DE DOSE AU CONTACT ET DEBIT DE DOSE A 1 m..	24
15.1. DETERMINATION DE LA DOSE AU CONTACT .....	24
15.2. INCERTITUDE .....	24
16. PUISSANCE THERMIQUE .....	25
16.1. DETERMINATION DE LA PUISSANCE THERMIQUE A LA DATE DE PRODUCTION	25
16.2. INCERTITUDE .....	25
16.3. APPLICATION NUMERIQUE .....	26
16.4. EVOLUTION DE LA PUISSANCE THERMIQUE ENTRE LES DATES DE PRODUCTION ET DE DESENTREPOSAGE.....	26

17. DOCUMENTS CITES.....	28
18. ANNEXES .....	29
ANNEXE 1 : COMPOSITIONS CHIMIQUES DES VERRES UTILISEES POUR LES APPLICATIONS NUMERIQUES.....	30
ANNEXE 2 : COMPOSITION DU VERRE UMO ET INCERTITUDES	32
ANNEXE 3 INCERTITUDES SUR LE RELIQUAT DE VERRE UMO	33
19. TABLE DES MATIERES.....	35