

Entité Propriétaire [REDACTED]

Type doc NTD NOTES TECHNIQUES DIVERSES

VERSION CONSULTABLE DE LA NOTE TECHNIQUE
[REDACTED] DU 13 DECEMBRE 2016
"ATELIERS DE VITRIFICATION R7/T7 ET ATELIER DE
DESENTREPOSAGE DES RESIDUS VITRIFIES -
DETERMINATION DES PARAMETRES GARANTIS ET
INCERTITUDES ASSOCIEES DES COLIS DE DECHETS
VITRIFIES PRODUITS SELON LA SPECIFICATION [REDACTED]
[REDACTED]"

Signataires :

	Nom	Entité	Visa
Rédacteur	[REDACTED]	[REDACTED]	21/10/2020
Vérificateur	[REDACTED]	[REDACTED]	21/10/2020
Vérificateur	[REDACTED]	[REDACTED]	21/10/2020
Vérificateur	[REDACTED]	[REDACTED]	21/10/2020
Approbateur	[REDACTED]	[REDACTED]	21/10/2020

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

Entité Propriétaire

Type doc NT NOTE TECHNIQUE-DESCRIPTIF-NOTE DE CALCUL

NI PG

(Dossier communicable au public)**Avertissement**

Conformément au V de l'article R. 593-16 du code de l'environnement, « les informations susceptibles de porter atteinte aux intérêts mentionnés au I de l'article L. 124-4 et au II de l'article L. 124-5 figurant dans les documents mentionnés au présent article peuvent être occultées ou faire l'objet d'un dossier séparé ».

Sur le présent document ont été retirés les éléments de nature à porter atteinte aux intérêts protégés par la loi.

Signataires :			
	Nom	Entité	Visa
Rédacteur			05/12/2016
Vérificateur			05/12/2016
Vérificateur			09/12/2016
Vérificateur			13/12/2016
Vérificateur			13/12/2016
Approbateur			13/12/2016

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

AREVA

Etablissement de La Hague

Diffusion limitée AREVA

[Voir Table des Matières](#)

1. INTRODUCTION

Cette procédure décrit les méthodes de détermination des paramètres garantis des colis de déchets vitrifiés CSD-V produits en pot de fusion selon la spécification [] et leurs incertitudes. Ceux-ci concernent :

- la composition du verre,
- masse des actinides, U et Pu,
- dose alpha cumulée à 10 000 ans,
- contamination surfacique non fixée,
- puissance thermique du conteneur,
- débit de coulée,
- refroidissement du conteneur.

2. DOMAINE D'APPLICATION

Les calculs développés dans cette note sont applicables pour un verre de composition donnée où il est tenu compte de la teneur réelle des éléments constitutifs du verre.

Les applications numériques ont été effectuées, à titre indicatif, sur la composition du verre en considérant la borne alpha augmentée définie à partir :

- De la composition du verre et de la solution à vitrifier correspondant à la configuration nominale décrite dans le document [2].
- Des activités et masses des radioéléments issues de la spécification des déchets vitrifiés [1] ou à défaut issues du code de calcul CESAR version 5.31 (AREVA NC).
- Des données nucléaires utilisées pour l'analyse des solutions de produits de fission et de suspension de fines à vitrifier (voir la note technique [3]).

A l'issue d'une coulée, la teneur en % d'un élément dans le verre produit est calculée selon la formule suivante :

$$X_i = \frac{m_i}{m_p} = \frac{m_{it}}{m_t}$$

avec :

- m_i = masse de l'élément i dans le verre pesé
- m_p = masse de verre pesé
- m_{it} = masse théorique de l'élément i calculée à partir du volume des solutions et de la masse de fritte de verre
- m_t = masse théorique de verre élaboré calculée à partir du volume des solutions et de la masse de fritte de verre

On a : $m_{it} = m_i/C_{PF} + m_i/C_F + m_i/F$ avec :

m_i/C_{PF}	=	$n_{PF} \times V_{PF} \times C_{iPF}$	=	masse théorique de l'élément i apportée par le calcinat PF
m_i/C_F	=	$n_F \times V_F \times C_{iF}$	=	masse théorique de l'élément i apportée par le calcinat de fines
m_i/F	=	$n_{FR} \times V_{FR} \times \mu_i$	=	masse théorique de l'élément i apportée par la fritte de verre

avec :

n_{PF} = []



n_F	=	
n_{FR}	=	nombre d'envois de godets de fritte de verre
V_{PF}	=	
V_F	=	
V_{FR}	=	contenance unitaire du godet en fritte de verre
C_{iPF}	=	concentration de l'élément i dans la solution ajustée de PF
C_{iF}	=	concentration de l'élément i dans la suspension de fines
μ_i	=	% de masse de l'élément i dans la fritte de verre
C_{PF}	=	concentration totale de solution ajustée de PF = $\sum_i C_{iPF}$
C_F	=	concentration totale de la suspension de fines = $\sum_i C_{iF}$
μ	=	% de la masse totale de la fritte de verre = $\sum_i \mu_i$ (100 % en théorie)

3. COMPOSITION CENTESIMALE DU VERRE ELABORE

3.1. DETERMINATION GENERALE

Ces paramètres sont déterminés par calcul à partir des concentrations estimées par les méthodes d'analyses physico-chimiques.

Les analyses sont effectuées avant vitrification sur :

- Les solutions de Produits de Fission (PF) constituées de phase aqueuse concentrée du 1^{er} cycle d'extraction dans laquelle sont ajoutés les effluents de rinçage primaire, les concentrats d'effluents basiques et les solutions inactives d'ajustage.
- Les suspensions de fines constituées de suspensions aqueuses d'insolubles de dissolution et de fines d'extraction.
- La fritte de verre.

Les solutions de PF et les suspensions de fines sont, au repos, constituées d'un précipité et d'un surnageant.

Pour les analyses, les deux phases sont systématiquement séparées. Le procédé de séparation est décrit en Annexe 2 pour les solutions de PF et en Annexe 3 pour les suspensions de fines.



La détermination des Paramètres Garantis est fonction des éléments suivants :

- Le prélèvement et la réalisation d'un échantillon moyen, le transfert des solutions de PF et des suspensions de fines (annexe 4).
- L'homogénéité des solutions de PF et des suspensions de fines (annexe 4).
- Le prélèvement et la réalisation d'un échantillon moyen, le transfert de la fritte de verre (annexe 6).
- Le pesage du verre produit.

3.2. DETERMINATIONS SPECIFIQUES

3.2.1. Détermination du pourcentage (FP + Zr + Actinides) oxydes + particules métalliques

- Les oxydes de Produits de Fission pris en compte sont les suivants : Sr, Y, Mo, Tc, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Zr.
- Les oxydes de Zr présents dans le verre ont 3 origines :
Ils résultent des PF, des gaines de combustible (Zircalloy) et de la fritte de verre. Le Zr issu des PF est comptabilisé avec les **oxydes de PF** et l'autre partie (le Zr des fines et le Zr de la fritte de verre) est comptabilisée avec les **oxydes de Zr**.
- Les actinides sont U, Pu, Np, Am et Cm.
- Les autres PF dénommés "particules métalliques" ou "Platinoïdes" sont : Ru (présent sous forme d'oxyde : RuO₂), Rh et Pd.

3.2.1.1. Méthodes d'analyses

3.2.1.1.1. Méthodes d'analyses de la solution ajustée de PF

- Les éléments de PF et les platinoïdes sont analysés [REDACTED]. Pour chaque élément, l'analyse est réalisée sur le surnageant et le précipité dissous.

Remarques :

- [REDACTED] Le calcul de l'incertitude liée à cette détermination est décrit dans le document [4].
- La proportion de Zr dans la fritte est obtenue par des analyses spécifiques (voir § 3-2-1-1-3), par ailleurs le Zr est analysé avec les autres PF (comme décrit plus haut).



Oxydes d'actinides

- U et Am sont analysés [redacted] sur la solution ajustée de PF (surnageant et précipité) [redacted]

- L'analyse du Pu est effectuée par [redacted]

Les masses d'U et Pu font parties des paramètres garantis (voir § 5-2).

- Le Np est analysé [redacted] à partir du surnageant et du précipité dissous [redacted]

La proportion de Cm est obtenue à partir du rapport $Cm/^{244}Cm$, où ^{244}Cm est connu [redacted]. La formule est la suivante :

$$Cm(g) = [redacted] * Cm^{244}(g) \text{ (voir note [5])}$$

Les résultats sont intégrés à la somme des oxydes.

3.2.1.1.2. Méthodes d'analyses des fines

- Les suspensions de fines sont séparées en un surnageant et un précipité, ce dernier étant dissous [redacted] pour les besoins des analyses.
- Mo, Tc, Zr, Ru, Rh, Pd sont analysés [redacted]
- Le Pu dans le surnageant est analysé [redacted]
- U, Fe, Ni, Cr sont analysés [redacted] dans le surnageant et le précipité dissous.

Le Pu dans le précipité dissous est analysé [redacted]

[redacted] Pour plus de détails, voir § 5-2-2-1.

- Ru dans le surnageant est déterminé ainsi :



3.2.1.1.3. Méthode d'analyse de la fritte de verre

Le seul élément concerné ici est le Zr. Le fournisseur de la fritte de verre fournit la méthode et l'incertitude liées à la détermination de cet élément



3.2.1.2. Calcul du pourcentage

Afin de déterminer le paramètre spécifié, les résultats d'analyses donnent :

$C_{PF/PF}$ = concentration en Σ oxydes PF dans la solution ajustée de PF.

$C_{PF/F}$ = concentration en Σ oxydes PF dans les fines.

$C_{Act/PF}$ = concentration en Σ oxydes d'actinides dans la solution ajustée de PF.

$C_{Act/F}$ = concentration en Σ oxydes d'actinides dans les fines.

$C_{Pl/PF}$ = concentration en Σ platinoïdes dans la solution ajustée de PF.

$C_{Pl/F}$ = concentration en Σ platinoïdes dans les fines.

$C_{ZrO_2/F}$ = concentration en ZrO_2 (gaine combustible) dans les fines.

μ_{ZrO_2} = pourcentage (en masse) de ZrO_2 dans la fritte de verre.

$$\begin{aligned} & [(PF + Zr + Act) \text{ oxydes} + \text{particules métalliques}] \text{ dans le verre produit} = \\ & [(C_{PF/PF} + C_{Act/PF} + C_{Pl/PF}) \times V_{PF} \times n_{PF} + (C_{PF/F} + C_{Act/F} + C_{Pl/F} + C_{ZrO_2/F}) \times V_F \times n_F + \\ & \mu_{ZrO_2} \times V_{FR} \times n_{FR}] \times \frac{1}{mt} \end{aligned}$$

Ce paramètre est donné coulée par coulée.

3.2.2. Détermination du pourcentage SiO_2

La seule origine du SiO_2 est la fritte de verre

3.2.2.1. Méthode d'analyse

L'analyse du Si est effectuée par le fournisseur de la fritte de verre qui indique la méthode et l'incertitude liées à la détermination de cet élément



3.2.2.2. Calcul du pourcentage

L'analyse donne le pourcentage de SiO_2 dans la fritte de verre en masse :

μ_{SiO_2} = % (en masse) de SiO_2 dans la fritte de verre.

$$X_{\text{SiO}_2} \text{ dans le verre produit} = \mu_{\text{SiO}_2} \times V_{\text{FR}} \times n_{\text{FR}} \times \frac{1}{\text{mt}}$$

Ce paramètre est donné coulée par coulée.

3.2.3. Détermination du pourcentage de B_2O_3

B_2O_3 dans le verre produit a deux origines :

- La solution ajustée de PF.
- La fritte de verre.

3.2.3.1. Méthode d'analyse

- Dans la solution ajustée de PF, le B est analysé [] à partir du surnageant et du précipité dissous.
- Dans la fritte de verre, l'analyse du B est effectuée par le fournisseur qui indique la méthode et l'incertitude liées à la détermination de cet élément.

3.2.3.2. Calcul général

L'analyse donne :

- $C_{\text{B}_2\text{O}_3 / \text{PF}}$ = concentration (en masse) de B_2O_3 dans la solution ajustée de PF.
- $\mu_{\text{B}_2\text{O}_3}$ = pourcentage (en masse) de B_2O_3 dans la fritte de verre.

$$X_{\text{B}_2\text{O}_3} \text{ dans le verre produit} = \left[\left(C_{\text{B}_2\text{O}_3 / \text{PF}} \times V_{\text{PF}} \times n_{\text{PF}} \right) + \left(\mu_{\text{B}_2\text{O}_3} \times V_{\text{FR}} \times n_{\text{FR}} \right) \right] \times \frac{1}{\text{mt}}$$

Ce paramètre est donné coulée par coulée.



3.2.4. Détermination du pourcentage de Al_2O_3

Al_2O_3 dans le verre produit a deux origines :

- La solution ajustée de PF [REDACTED]

- La fritte de verre.

3.2.4.1. Méthode d'analyse

- Dans la solution ajustée de PF, Al est analysé [REDACTED] à partir du surnageant et du précipité dissous.
- Dans la fritte de verre, l'analyse de l'Al est effectuée par le fournisseur qui indique la méthode et l'incertitude liées à la détermination de cet élément.

3.2.4.2. Calcul du pourcentage

L'analyse donne :

- $C_{\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{PF}}$ = concentration (en masse) d' Al_2O_3 dans la solution ajustée de PF.
- $\mu_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ = pourcentage (en masse) d' Al_2O_3 dans la fritte de verre.

$$X_{\text{Al}_2\text{O}_3} \text{ dans le verre produit} = \left[\left(C_{\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{PF}} \times V_{\text{PF}} \times n_{\text{PF}} \right) + \left(\mu_{\text{Al}_2\text{O}_3} \times V_{\text{FR}} \times n_{\text{FR}} \right) \right] \times \frac{1}{m_t}$$

Ce paramètre est donné coulée par coulée.

3.2.5. Détermination du pourcentage de $(\text{SiO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3)$

Les trois valeurs précédentes sont additionnées.

3.2.6. Détermination du pourcentage de Na_2O

Na_2O dans le verre produit a deux origines :

- La solution ajustée de PF [REDACTED].
- La fritte de verre.



3.2.6.1. Méthode d'analyse

- A partir de la solution ajustée de PF, Na est analysé [REDACTED]
- Dans la fritte de verre, l'analyse du Na est effectuée par le fournisseur qui indique la méthode et l'incertitude liées à la détermination de cet élément.

3.2.6.2. Calcul du pourcentage

L'analyse donne :

- $C_{\text{Na}_2\text{O}/\text{PF}}$ = concentration (en masse) de Na_2O dans la solution ajustée de PF.
- $\mu_{\text{Na}_2\text{O}}$ = pourcentage (en masse) de Na_2O dans la fritte de verre.

Ainsi la proportion de Na_2O est :

$$X_{\text{Na}_2\text{O}} \text{ dans le verre produit} = \frac{\left[\left(C_{\text{Na}_2\text{O}/\text{PF}} \times V_{\text{PF}} \times n_{\text{PF}} \right) + \left(\mu_{\text{Na}_2\text{O}} \times V_{\text{FR}} \times n_{\text{FR}} \right) \right]}{\text{mt}} \times \frac{1}{\text{mt}}$$

Ce paramètre est donné coulée par coulée.

3.2.7. Détermination du pourcentage de Fe_2O_3

Fe_2O_3 dans le verre produit a trois origines :

- La solution ajustée de PF [REDACTED]
- Les fines [REDACTED]
- La fritte de verre.

3.2.7.1. Méthode d'analyse

- Le Fe est analysé [REDACTED] à partir du surnageant et du précipité dissous de la solution ajustée de PF et des fines en suspension.
- Dans la fritte de verre, l'analyse du Fe est effectuée par le fournisseur qui indique la méthode et l'incertitude liées à la détermination de cet élément. Cette part de Fe_2O_3 dans le verre produit est négligeable.

3.2.7.2. Calcul du pourcentage

L'analyse donne :

- $C_{\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{PF}}$ = concentration (en masse) de Fe_2O_3 dans la solution ajustée de PF.
- $C_{\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{F}}$ = concentration (en masse) de Fe_2O_3 dans les fines.



$$X_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \text{ dans le verre produit} = \left[\left(C_{\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{PF}} \times V_{\text{PF}} \times n_{\text{PF}} \right) + \left(C_{\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{F}} \times V_{\text{F}} \times n_{\text{F}} \right) \right] \times \frac{1}{\text{mt}}$$

Ce paramètre est donné coulée par coulée.

3.2.8. Détermination du pourcentage de NiO

NiO dans le verre produit a trois origines :

- La solution ajustée de PF [REDACTED]
- Les fines [REDACTED]
- La fritte de verre.

3.2.8.1. Méthode d'analyse

- Ni est analysé [REDACTED] à partir du surnageant et du précipité dissout de la solution ajustée de PF, et des fines en suspension.
- Dans la fritte de verre, l'impureté Ni est analysée par le fournisseur qui indique la méthode et l'incertitude liées à la détermination de cet élément. Cette part de NiO dans le verre produit est négligeable.

3.2.8.2. Calcul du pourcentage

L'analyse donne :

- $C_{\text{NiO}/\text{PF}}$ = concentration (en masse) de NiO dans la solution ajustée de PF.
- $C_{\text{NiO}/\text{fines}}$ = concentration (en masse) de NiO dans les fines.

$$X_{\text{NiO}} \text{ dans le verre produit} = \left[\left(C_{\text{NiO}/\text{PF}} \times V_{\text{PF}} \times n_{\text{PF}} \right) + \left(C_{\text{NiO}/\text{fines}} \times V_{\text{fines}} \times n_{\text{F}} \right) \right] \times \frac{1}{\text{mt}}$$

Ce paramètre est déterminé coulée par coulée.

3.2.9. Détermination du pourcentage de Cr_2O_3

Cr_2O_3 dans le verre produit a trois origines :

- La solution ajustée de PF [REDACTED]
- Les fines [REDACTED]
- La fritte de verre.

3.2.9.1. Méthode d'analyse

- Cr est analysé [] à partir du surnageant et du précipité dissout de la solution ajustée de PF, et des fines en suspension.
- Dans la fritte de verre, l'impureté Cr est analysée par le fournisseur qui indique la méthode et l'incertitude liées à la détermination de cet élément. Cette part de Cr_2O_3 dans le verre produit est négligeable.

3.2.9.2. Calcul du pourcentage

L'analyse donne :

- $C_{\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{PF}}$ = concentration (en masse) de Cr_2O_3 dans la solution ajustée de PF.
- $C_{\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{fines}}$ = concentration (en masse) de Cr_2O_3 dans les fines.

$$X_{\text{Cr}_2\text{O}_3} \text{ dans le verre produit} = \left[\left(C_{\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{PF}} \times V_{\text{PF}} \times n_{\text{PF}} \right) + \left(C_{\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{fines}} \times V_{\text{F}} \times n_{\text{F}} \right) \right] \times \frac{1}{m_t}$$

Ce paramètre est déterminé coulée par coulée.

3.2.10. Détermination du pourcentage de P_2O_5

P_2O_5 dans le verre produit a deux origines :

- La solution ajustée de PF []
- La fritte de verre.

3.2.10.1. Méthode d'analyse

- Le P est analysé, à partir du surnageant et du précipité dissous de la solution ajustée de PF, []
- Dans la fritte de verre, l'impureté de P est analysée par le fournisseur qui indique la méthode et l'incertitude liées à la détermination de cet élément. Cette part de P_2O_5 dans le verre produit est négligeable.

3.2.10.2. Calcul général

L'analyse donne :

$$C_{\text{P}_2\text{O}_5/\text{PF}} = \text{concentration (en masse) de } \text{P}_2\text{O}_5 \text{ dans la solution ajustée de PF.}$$



$$X_{P_2O_5} \text{ dans le verre produit} = \left(C_{P_2O_5/PF} \times V_{PF} \times n_{PF} \right) \times \frac{1}{mt}$$

Ce paramètre est déterminé coulée par coulée.

3.2.11. Détermination du pourcentage de Li_2O

La seule origine du Li_2O dans le verre produit est la fritte de verre.

3.2.11.1. Méthode d'analyse

L'élément Li est analysé par le fournisseur de fritte de verre qui indique la méthode et l'incertitude liées à la détermination de cet élément.

3.2.11.2. Calcul du pourcentage

L'analyse donne :

μ_{Li_2O} = % (en masse) de Li_2O dans la fritte de verre.

$$X_{Li_2O} \text{ dans le verre produit} = \mu_{Li_2O} \times V_{FR} \times n_{FR} \times \frac{1}{mt}$$

Ce paramètre est déterminé coulée par coulée.

3.2.12. Détermination du pourcentage de ZnO

L'origine du ZnO dans le verre produit est la fritte de verre.

3.2.12.1. Méthode d'analyse

L'élément Zn est analysé par le fournisseur de fritte de verre qui indique la méthode et l'incertitude liées à la détermination de cet élément.

3.2.12.2. Calcul du pourcentage

L'analyse donne :

μ_{ZnO} = % (en masse) de ZnO dans la fritte de verre.

$$X_{ZnO} \text{ dans le verre produit} = \mu_{ZnO} \times V_{FR} \times n_{FR} \times \frac{1}{mt}$$

Ce paramètre est déterminé coulée par coulée.

3.2.13. Détermination du pourcentage de CaO

L'origine du CaO dans le verre produit est la fritte de verre.

3.2.13.1. Méthode d'analyse

L'élément Ca est analysé par le fournisseur de fritte de verre qui indique la méthode et l'incertitude liées à la détermination de cet élément.

3.2.13.2. Calcul du pourcentage

L'analyse donne :

μ_{CaO} = % (en masse) de CaO dans la fritte de verre.

$$X_{\text{CaO}} \text{ dans la fritte de verre} = \mu_{\text{CaO}} \times V_{\text{FR}} \times n_{\text{FR}} \times \frac{1}{\text{mt}}$$

Ce paramètre est déterminé coulée par coulée.

3.3. INCERTITUDES

Pour les paramètres précédents, leurs incertitudes sont décrites ci-dessous.

Les variables v_j affectées par une erreur de mesure étant indépendantes, la variance $\sigma_{X_i}^2$ de l'incertitude commise sur la teneur X_i d'un élément dans le verre peut être estimée par :

$$\sigma_{X_i}^2 = \sum_j \left(\frac{\partial X_i}{\partial v_j} \sigma_{v_j} \right)^2 \text{ avec:}$$

$$X_i = \frac{m_i}{m_p} = \underbrace{\frac{n_{\text{PF}} V_{\text{PF}} C_{i\text{PF}}}{n_{\text{PF}} V_{\text{PF}} \sum_i C_{i\text{PF}}}}_{\frac{m_i / C_{\text{PF}}}{m_t / C_{\text{PF}}}} + \underbrace{\frac{n_{\text{F}} V_{\text{F}} C_{i\text{F}}}{n_{\text{F}} V_{\text{F}} \sum_i C_{i\text{F}}}}_{\frac{m_i / C_{\text{F}}}{m_t / C_{\text{F}}}} + \underbrace{\frac{n_{\text{FR}} V_{\text{FR}} \mu_i}{n_{\text{FR}} V_{\text{FR}} \sum_i \mu_i}}_{\frac{m_i / \mu}{m_t / \mu}}$$

$$v_j = C_{i\text{PF}} ; C_{i\text{F}} ; V_{\text{PF}} ; V_{\text{F}} ; V_{\text{FR}} ; \mu_i$$

**Nota :**

Le nombre entier n_{PF} , n_F ou d'envois de godets de fritte de verre (n_{FR}) est connu exactement.

$$\text{soit } \sigma_{X_i}^2 = \left(\frac{\partial X_i}{\partial Ci_{PF}} \right)^2 \sigma_{Ci_{PF}}^2 + \left(\frac{\partial X_i}{\partial Ci_F} \right)^2 \sigma_{Ci_F}^2 + \left(\frac{\partial X_i}{\partial V_{PF}} \right)^2 \sigma_{V_{PF}}^2 + \left(\frac{\partial X_i}{\partial V_F} \right)^2 \sigma_{V_F}^2 + \left(\frac{\partial X_i}{\partial V_{FR}} \right)^2 \sigma_{V_{FR}}^2 + \left(\frac{\partial X_i}{\partial \mu_i} \right)^2 \sigma_{\mu_i}^2$$

avec :

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial X_i}{\partial Ci_{PF}} \right) &= \frac{1}{mt^2} [mt n_{PF} V_{PF} - mi_t n_{PF} V_{PF}]; \\ \left(\frac{\partial X_i}{\partial Ci_F} \right) &= \frac{1}{mt^2} [mt n_F V_F - mi_t n_F V_F]; \\ \left(\frac{\partial X_i}{\partial V_{PF}} \right) &= \frac{1}{mt^2} \left[mt n_{PF} Ci_{PF} - mi_t n_{PF} \sum_i Ci_{PF} \right]; \\ \left(\frac{\partial X_i}{\partial V_F} \right) &= \frac{1}{mt^2} \left[mt n_F Ci_F - mi_t n_F \sum_i Ci_F \right]; \\ \left(\frac{\partial X_i}{\partial V_{FR}} \right) &= \frac{1}{mt^2} \left[mt n_{FR} \mu_i - mi_t n_{FR} \sum_i \mu_i \right]; \\ \left(\frac{\partial X_i}{\partial \mu_i} \right) &= \frac{1}{mt^2} [mt n_{FR} V_{FR} - mi_t n_{FR} V_{FR}] \end{aligned}$$

En divisant les termes par $X_i = \frac{m_{i_t}}{m_t}$, on obtient :

$$\begin{aligned}\frac{1}{X_i} \frac{\partial X_i}{\partial C_{i_{PF}}} &= \left(\frac{1}{m_{i_t}} - \frac{1}{m_t} \right) n_{PF} V_{PF} = \left(\frac{1}{m_{i_t}} - \frac{1}{m_t} \right) \frac{m_{i_t} / C_{PF}}{C_{i_{PF}}} \\ \frac{1}{X_i} \frac{\partial X_i}{\partial C_{i_F}} &= \left(\frac{1}{m_{i_t}} - \frac{1}{m_t} \right) n_F V_F = \left(\frac{1}{m_{i_t}} - \frac{1}{m_t} \right) \frac{m_{i_t} / C_F}{C_{i_F}} \\ \frac{1}{X_i} \frac{\partial X_i}{\partial V_{PF}} &= \left(\frac{n_{PF} C_{i_{PF}}}{m_{i_t}} - \frac{n_{PF} \sum C_{i_{PF}}}{m_t} \right) = \left(\frac{m_{i_t} / C_{PF}}{m_{i_t}} - \frac{m_t / C_{PF}}{m_t} \right) \frac{1}{V_{PF}} \\ \frac{1}{X_i} \frac{\partial X_i}{\partial V_F} &= \left(\frac{n_F C_{i_F}}{m_{i_t}} - \frac{n_F \sum C_{i_F}}{m_t} \right) = \left(\frac{m_{i_t} / C_F}{m_{i_t}} - \frac{m_t / C_F}{m_t} \right) \frac{1}{V_F} \\ \frac{1}{X_i} \frac{\partial X_i}{\partial V_{FR}} &= \left(\frac{n_{FR} \mu_i}{m_{i_t}} - \frac{n_{FR} \sum \mu_i}{m_t} \right) = \left(\frac{m_{i_t} / F}{m_{i_t}} - \frac{m_t / F}{m_t} \right) \frac{1}{V_{FR}} \\ \frac{1}{X_i} \frac{\partial X_i}{\partial \mu_i} &= \left(\frac{1}{m_{i_t}} - \frac{1}{m_t} \right) n_{FR} V_{FR} = \left(\frac{1}{m_{i_t}} - \frac{1}{m_t} \right) \frac{m_{i_t} / F}{\mu_i}\end{aligned}$$

Soit :

$$\begin{aligned}\left(\frac{\sigma X_i}{X_i} \right)^2 &= \left[m_{i_t} / C_{PF} \left(\frac{1}{m_{i_t}} - \frac{1}{m_t} \right) \right]^2 \left(\frac{\sigma C_{i_{PF}}}{C_{i_{PF}}} \right)^2 + \left[m_{i_t} / C_F \left(\frac{1}{m_{i_t}} - \frac{1}{m_t} \right) \right]^2 \left(\frac{\sigma C_{i_F}}{C_{i_F}} \right)^2 \\ &+ \left(\frac{m_{i_t} / C_{PF}}{m_{i_t}} - \frac{m_t / C_{PF}}{m_t} \right)^2 \left(\frac{\sigma V_{PF}}{V_{PF}} \right)^2 + \left(\frac{m_{i_t} / C_F}{m_{i_t}} - \frac{m_t / C_F}{m_t} \right)^2 \left(\frac{\sigma V_F}{V_F} \right)^2 \\ &+ \left(\frac{m_{i_t} / F}{m_{i_t}} - \frac{m_t / F}{m_t} \right)^2 \left(\frac{\sigma V_{FR}}{V_{FR}} \right)^2 + \left[m_{i_t} / F \left(\frac{1}{m_{i_t}} - \frac{1}{m_t} \right) \right]^2 \left(\frac{\sigma \mu_i}{\mu_i} \right)^2\end{aligned}$$

L'incertitude ΔX_i étant prise égale à deux écarts types, soit $\Delta X_i = 2\sigma_{X_i}$ et en multipliant numérateur et dénominateur par mp/mp , on obtient :

$$\begin{aligned}\left(\frac{\Delta X_i}{X_i} \right)^2 &= \left[m_i / C_{PF} \left(\frac{1}{m_i} - \frac{1}{mp} \right) \right]^2 \left(\frac{\Delta C_{i_{PF}}}{C_{i_{PF}}} \right)^2 + \left[m_i / C_F \left(\frac{1}{m_i} - \frac{1}{mp} \right) \right]^2 \left(\frac{\Delta C_{i_F}}{C_{i_F}} \right)^2 \\ &+ \left(\frac{m_i / C_{PF}}{m_i} - \frac{mp / C_{PF}}{mp} \right)^2 \left(\frac{\Delta V_{PF}}{V_{PF}} \right)^2 + \left(\frac{m_i / C_F}{m_i} - \frac{mp / C_F}{mp} \right)^2 \left(\frac{\Delta V_F}{V_F} \right)^2 \\ &+ \left(\frac{m_i / F}{m_i} - \frac{mp / F}{mp} \right)^2 \left(\frac{\Delta V_{FR}}{V_{FR}} \right)^2 + \left[m_i / F \left(\frac{1}{m_i} - \frac{1}{mp} \right) \right]^2 \left(\frac{\Delta \mu_i}{\mu_i} \right)^2\end{aligned}$$

Pour une teneur donnée X_i (en %) d'un élément i , on pourra directement appliquer :

$$\begin{aligned}
 (\Delta X_i)^2 = & \left(\frac{m_i}{m_p} \right)^2 \left\{ \left[m_i / C_{PF} \left(\frac{1}{m_i} - \frac{1}{m_p} \right) \right]^2 \left(\frac{\Delta C_{i_{PF}}}{C_{i_{PF}}} \right)^2 + \left[m_i / C_F \left(\frac{1}{m_i} - \frac{1}{m_p} \right) \right]^2 \left(\frac{\Delta C_{i_F}}{C_{i_F}} \right)^2 \right. \\
 & + \left(\frac{m_i / C_{PF}}{m_i} - \frac{m_p / C_{PF}}{m_p} \right)^2 \left(\frac{\Delta V_{PF}}{V_{PF}} \right)^2 + \left(\frac{m_i / C_F}{m_i} - \frac{m_p / C_F}{m_p} \right)^2 \left(\frac{\Delta V_F}{V_F} \right)^2 \\
 & \left. + \left(\frac{m_i / F}{m_i} - \frac{m_p / F}{m_p} \right)^2 \left(\frac{\Delta V_{FR}}{V_{FR}} \right)^2 + \left[m_i / F \left(\frac{1}{m_i} - \frac{1}{m_p} \right) \right]^2 \left(\frac{\Delta \mu_i}{\mu_i} \right)^2 \right\}
 \end{aligned}$$

Les incertitudes relatives retenues sont les suivantes :

$$1) \frac{\Delta C_{i_{PF}}}{C_{i_{PF}}} = \text{Voir tableau 1}$$

$$2) \frac{\Delta C_{i_F}}{C_{i_F}} = \text{Voir tableau 2}$$

$$3) \frac{\Delta \mu_i}{\mu_i} = \text{Voir tableau 3}$$

$$\begin{aligned}
 4) \frac{\Delta V_{PF}}{V_{PF}} &= \\
 5) \frac{\Delta V_F}{V_F} &= \\
 6) \frac{\Delta V_{FR}}{V_{FR}} &=
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} 4) \frac{\Delta V_{PF}}{V_{PF}} \\ 5) \frac{\Delta V_F}{V_F} \\ 6) \frac{\Delta V_{FR}}{V_{FR}} \end{aligned}} \right\} \text{Voir annexe 5}$$



TABLEAU 1

INCERTITUDES ANALYTIQUES SUR LA SOLUTION AJUSTEE *

PRODUITS DE FISSION	Ci _{PF} de référence en g/l (cf. annexe 1A)		$\frac{\Delta Ci_{PF}}{Ci_{PF}}$ (%)
	Ci _{oxPF}	Ci _{PF}	
Sr			
Y			
Zr			
Mo			
Tc			
Ag			
Cd			
Sn			
Sb			
Te			
Cs			
Ba			
La			
Ce			
Pr			
Nd			
Sm			
Eu			
Gd			
CPF/PF			
(cf. nota 1) pour solution de référence			

ACTINIDES	Ci _{PF} de référence en g/l (cf. annexe 1A)		$\frac{\Delta Ci_{PF}}{Ci_{PF}}$ (%)
	Ci _{Oxact}	Ci _{act}	
U			
Pu			
Np			
Am			
Cm			
C _{act} /PF			pour solution de référence

PARTICULES METALLIQUES	Ci _{PF} de référence en g/l (cf. annexe 1A)		$\frac{\Delta Ci_{PF}}{Ci_{PF}}$ (%)
	Ci _{Oxpm}	Ci _{pm}	
RuO ₂			
Rh	-		
Pd	-		
C _{PI} /PF			pour solution de référence

ELEMENTS D'ADDITION ET DE CORROSION	$\frac{\Delta Ci_{PF}}{Ci_{PF}}$ (%)
Al	
Cr	
Fe	
Na	
Ni	
P	
Mg (nota 2)	
Mn (nota 2)	
B (nota 2)	

* Les valeurs d'incertitudes indiquées ci-dessus sont données à titre indicatif pour la réalisation de l'application numérique. Les incertitudes liées à l'analyse d'une solution de PF ajustée sont déterminées charge par charge.

**Nota 1 :**

L'incertitude sur la concentration de la somme des oxydes de PF mesurés ($C_{PF/PF}$) est calculée comme suit :

$$\left[\frac{\Delta(C_{PF} / PF)}{C_{PF} / PF} \right]^2 = \frac{1}{\left(\sum_i C_{i_{OxPF}} \right)^2} \sum_i (\Delta C_{i_{OxPF}})^2 \text{ avec } C_{i_{OxPF}} = k C_{i_{PF}}$$

$$= \frac{1}{\left(\sum_i C_{i_{OxPF}} \right)^2} \sum_i \left(C_{i_{OxPF}} \frac{\Delta C_{i_{PF}}}{C_{i_{PF}}} \right)^2$$

=

soit

i.e

Nota 2 :



TABLEAU 2

INCERTITUDES ANALYTIQUES SUR LA SUSPENSION DE FINES **

PRODUITS DE FISSION	Ci _F de référence (en g/l)		$\frac{\Delta Ci_F}{Ci_F} (\%)$
	Ci _{(OxPF)F}	Ci _{(PF)F}	
Mo	■	■	■
Tc	■	■	■
C _{PF/F} (cf. nota)		-	■

ACTINIDES	Ci _F de référence (en g/l)		$\frac{\Delta Ci_F}{Ci_F} (\%)$
	Ci _{(OxAct)F}	Ci _{(Act)F}	
U	■	■	■
Pu	■	■	■
C _{Act/F}	■		■
			pour solution de référence

PARTICULES METALLIQUES	Ci _F de référence (en g/l)		$\frac{\Delta Ci_F}{Ci_F} (\%)$
	Ci _{(Oxpm)F}	Ci _{(pm)F}	
RuO ₂	■	■	■
Rh	-	■	■
Pd	-	■	■
C _{P/F}		■	pour solution de référence

ELEMENTS D'ADDITION ET DE CORROSION		$\frac{\Delta Ci_F}{Ci_F} (\%)$
Ni		■
Fe		■
Zr		■
Cr		■

** Les valeurs d'incertitudes indiquées ci-dessus sont données à titre indicatif pour la réalisation de l'application numérique. Les incertitudes liées à l'analyse des fines sont déterminées charge par charge.

Nota :

$$\left[\frac{\Delta(C_{PF/F})}{C_{PF/F}} \right]^2 = \left(\frac{1}{\sum Ci_{OxPF/F}} \right)^2 \times \sum_i \left(Ci_{OxPF/F} \times \frac{\Delta Ci_F}{Ci_F} \right)^2$$

Remarque :



TABLEAU 3

**INCERTITUDES ANALYTIQUES SUR LA DETERMINATION
DE LA FRITTE DE VERRE *****

ELEMENTS	$\Delta\mu_i$ ABSOLUE	$\frac{\Delta\mu_i}{\mu_i}$ (%) (Fritte de référence)
SiO ₂	■	■
Al ₂ O ₃	■	■
B ₂ O ₃	■	■
Na ₂ O	■	■
Li ₂ O	■	■
CaO	■	■
ZnO	■	■
ZrO ₂	■	■

*** : Valeurs données à titre indicatif. Les incertitudes sont déterminées pour chaque lot de fritte et sont fonction de la méthode utilisée.



3.4. APPLICATION NUMERIQUE SUR LE VERRE DE REFERENCE

- Le premier tableau résume, pour chaque élément, la part prise par chaque incertitude due :
 - . à l'analyse de la solution ajustée,
 - . à l'analyse de la suspension de fines,
 - . à l'analyse de la fritte de verre,
 - . au bilan volumique de la solution ajustée,
 - . au bilan volumique de la suspension de fines,
 - . au bilan massique de la fritte de verre.
- Le second tableau positionne, pour chaque élément, les valeurs extrêmes par rapport au domaine spécifié.

1^{er} tableau :

ELEMENT i	ANALYSE SOL. AJUSTEE PF (%) (A) $\frac{m}{C_{PF}} \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{mp} \right) \left(\frac{\Delta C_{PF}}{C_{PF}} \right)$	ANALYSE SUSPENSION FINES (%) (B) $\frac{m}{C_F} \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{mp} \right) \left(\frac{\Delta C_F}{C_F} \right)$	ANALYSE FRITTE DE VERRE (%) (C) $\frac{m}{f} \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{mp} \right) \left(\frac{\Delta f}{f} \right)$	BILAN SOL. AJUSTEE PF (%) (D) $\left(\frac{m}{C_{PF}} - \frac{mp}{C_{PF}} \right) \left(\frac{\Delta V_{PF}}{V_{PF}} \right)$	BILAN SUSPENSION FINES (%) (E) $\left(\frac{m}{C_F} - \frac{mp}{C_F} \right) \left(\frac{\Delta V_F}{V_F} \right)$	BILAN FRITTE DE VERRE (%) (F) $\left(\frac{m}{f} - \frac{mp}{f} \right) \left(\frac{\Delta V_{FR}}{V_{FR}} \right)$	INCERTITUDE GLOBALE ELEMENT i (%) $\frac{\Delta X_i}{X_i} = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2 + D^2 + E^2 + F^2}$
SiO ₂							
Al ₂ O ₃							
B ₂ O ₃							
Na ₂ O							
Li ₂ O							
CaO							
ZnO							
Fe ₂ O ₃							

1^{er} tableau (suite) :

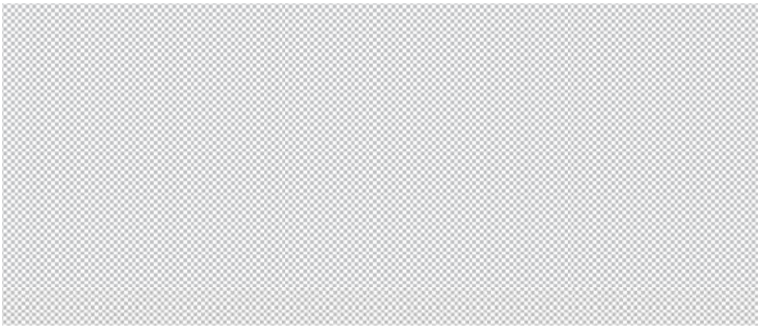
ELEMENT i	ANALYSE SOL. AJUSTEE PF (%) (A) $\frac{m}{C_{PF}} \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{mp} \right) \left(\frac{\Delta C_{PF}}{C_{PF}} \right)$	ANALYSE SUSPENSION FINES (%) (B) $\frac{m}{C_F} \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{mp} \right) \left(\frac{\Delta C_F}{C_F} \right)$	ANALYSE FRITTE DE VERRE (%) (C) $\frac{m}{f} \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{mp} \right) \left(\frac{\Delta f}{f} \right)$	BILAN SOL. AJUSTEE PF (%) (D) $\left(\frac{m}{C_{PF}} - \frac{mp}{C_{PF}} \right) \left(\frac{\Delta V_{PF}}{V_{PF}} \right)$	BILAN SUSPENSION FINES (%) (E) $\left(\frac{m}{C_F} - \frac{mp}{C_F} \right) \left(\frac{\Delta V_F}{V_F} \right)$	BILAN FRITTE DE VERRE (%) (F) $\left(\frac{m}{f} - \frac{mp}{f} \right) \left(\frac{\Delta V_{FR}}{V_{FR}} \right)$	INCERTITUDE GLOBALE ELEMENT i (%) $\frac{\Delta X_i}{X_i} = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2 + D^2 + E^2 + F^2}$
NiO							
Cr ₂ O ₃							
P ₂ O ₅							
ZrO ₂ (hors (ZrO ₂) PF)							
ΣO x PF (avec (ZrO ₂) PF)							
ΣO x Act							
P.M.							



2^{ème} tableau :

ELEMENT	Xi (% NOMI- NAL)	$\frac{\Delta X_i}{X_i}$ (%)	ΔX_i	VERRE DE REFERENCE		SPECIFICATION	
				MAXI %	MINI %	MAXI %	MINI %
SiO ₂							
Al ₂ O ₃							
B ₂ O ₃							
Na ₂ O							
Li ₂ O							
CaO							
ZnO							
Fe ₂ O ₃							
NiO							
Cr ₂ O ₃							
P ₂ O ₅							
ZrO ₂							
hors (ZrO ₂)PF							
OxPF							
avec (ZrO ₂)PF							
OxAct							
Particules métalliques							
ΣOx (PF + act + Zr) + particules métalliques							

Nota :



4. MASSES D'ACTINIDES PAR CONTENEUR

4.1. DETERMINATION GENERALE

Ces paramètres sont déterminés par calculs à partir des concentrations estimées par analyses physico-chimiques.

Pour les masses d'actinides, les analyses sont réalisées avant vitrification sur :

- Les solutions de Produits de Fission (PF).
- Les suspensions de fines.

La masse M_j (par coulée), d'un actinide j , dans le verre produit est calculée selon la formule suivante :

$$M_{j \text{ (par coulée)}} = M_{j/PF} + M_{j/F} = (C_{j/PF} \times V_{PF} \times n_{PF} + C_{j/F} \times V_F \times n_F) \times \frac{mp}{mt}$$

avec :

$M_{j/PF}$ = masse de l'émetteur j présent dans la solution ajustée de PF

$M_{j/F}$ = masse de l'émetteur j présent dans la suspension de fines

$C_{j/PF}$ = concentration de l'émetteur j dans la solution ajustée de PF

$C_{j/F}$ = concentration de l'émetteur j dans la suspension de fines

V_{PF} =

V_F =

mp = masse du verre pesé

mt = masse théorique du verre élaboré calculée à partir du volume des solutions et de la masse de fritte de verre

n_{PF} =

n_F =



4.2. DETERMINATIONS SPECIFIQUES

4.2.1. Détermination de la masse d'uranium

4.2.1.1. Méthode d'analyse

L'Uranium dans le verre produit a deux origines :

- La solution ajustée de PF.
- Les fines.

L'Uranium est analysé [] dans la solution ajustée de PF sur le surnageant et le précipité dissous et dans la suspension de fines sur le surnageant et le précipité dissous.

4.2.1.2. Calcul de la masse

Afin de déterminer le paramètre spécifié, les analyses donnent :

$C_{U/PF}$ = concentration en U dans la solution ajustée de PF

$C_{U/F}$ = concentration en U dans les fines

$$M_{U \text{ par coulée}} = [(C_{U/PF} \times V_{PF} \times n_{PF}) + (C_{U/F} \times V_F \times n_F)] \times \frac{mp}{mt}$$

--	--

4.2.2. Détermination de la masse de plutonium

4.2.2.1. Méthode d'analyse

Le Pu dans le verre produit a deux origines :

- La solution ajustée de PF.
- Les fines.

Dans la solution ajustée de PF, le Pu est déterminé [] sur le surnageant et sur précipité.

Pour les fines, le Pu est déterminé [] sur le surnageant, et [] sur le précipité dissous.

4.2.2.2. Calcul de la masse

Afin de déterminer le paramètre spécifié, les analyses donnent :

$C_{Pu/PF}$ = concentration en Pu dans la solution ajustée de PF

$C_{Pu/F}$ = concentration en Pu dans les fines

$$M_{Pu \text{ par coulée}} = [(C_{Pu/PF} \times V_{PF} \times n_{PF}) + (C_{Pu/F} \times V_F \times n_F)] \times \frac{mp}{mt}$$

4.3. INCERTITUDE

L'incertitude ΔM_j commise sur la masse d'un actinide dans le verre produit est similaire à celle développée au § 4.3.

L'incertitude relative sur la masse d'un actinide est donc :

$$\left(\frac{\Delta M_j}{M_j} \right)^2 = \left(\frac{M_{j/PF}}{M_j} \right)^2 \left[\left(\frac{\Delta C_{j/PF}}{C_{j/PF}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta V_{PF}}{V_{PF}} \right)^2 \right] + \left(\frac{M_{j/F}}{M_j} \right)^2 \left[\left(\frac{\Delta C_{j/F}}{C_{j/F}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta V_F}{V_F} \right)^2 \right] + \frac{1}{(mp)^2} \times (\Delta mp)^2$$

Pour un actinide de masse M_j donnée, on pourra directement appliquer :

$$(\Delta M_j)^2 = (M_{j/PF})^2 \left[\left(\frac{\Delta C_{j/PF}}{C_{j/PF}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta V_{PF}}{V_{PF}} \right)^2 \right] + (M_{j/F})^2 \left[\left(\frac{\Delta C_{j/F}}{C_{j/F}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta V_F}{V_F} \right)^2 \right] + \left(\frac{M_j}{mp} \right)^2 \times (\Delta mp)^2$$

Les incertitudes relatives retenues sont les suivantes :

1) $\frac{\Delta C_{j/PF}}{C_{j/PF}}$ = (Voir tableau 1 pour U et Pu paragraphe 3.3)

3) $\frac{\Delta C_{j/F}}{C_{j/F}}$ = (Voir tableau 2 paragraphe 3.3)

4) $\frac{\Delta V_{PF}}{V_{PF}} = \frac{\Delta V_F}{V_F} =$  = (Voir annexe 5)

5) $\Delta mp =$ 



4.4. APPLICATION NUMERIQUE SUR LE VERRE DE REFERENCE

1^{er} tableau :

ACTI- NIDES	ANALYSE SOL. AJUSTEE PF (%) $\frac{M_{j/PF}}{M_j} \times \left(\frac{\Delta C_{j/PF}}{C_{j/PF}} \right)$ (A)	ANALYSE SUS. FINES (%) $\frac{M_{j/F}}{M_j} \times \left(\frac{\Delta C_{j/F}}{C_{j/F}} \right)$ (B)	BILAN SOL. PF (%) $\frac{M_{j/PF}}{M_j} \times \left(\frac{\Delta V_{PF}}{V_{PF}} \right)$ (C)	BILAN SUS. FINES (%) $\frac{M_{j/F}}{M_j} \times \left(\frac{\Delta V_F}{V_F} \right)$ (D)	PESEE CONTENEUR $\frac{\Delta mp}{mp}$ (E)	$\frac{\Delta M_j}{M_j} (\%)$ $\sqrt{A^2 + B^2 + C^2 + D^2 + E^2}$
U*						
Pu*						

2^{ème} tableau :

ACTINIDES	MASSE DE REFERENCE (g/conteneur)	$\frac{\Delta M_j}{M_j}$ (%)	ΔM_j (g)	MASSE MAXIMALE DE REFERENCE (g/conteneur)	MASSE SPECIFIEE (g/conteneur) (300 AQ 60)
U					
Pu					

* Note :

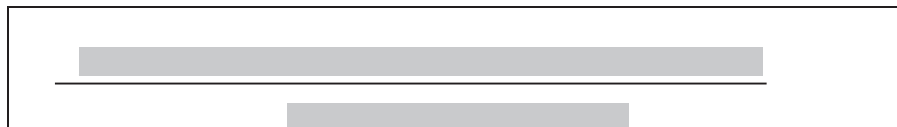
Masse élément dans les PF = concentration élément x
 (g.l⁻¹ Cf annexe 1B) (litres de PF/conteneur)

Masse élément dans les fines = concentration élément x
 (g.l⁻¹ Cf annexe 1B) (litres de fines/conteneur)

5. DETERMINATION DE LA DOSE ALPHA CUMULEE A 10 000 ANS

5.1. METHODE D'ANALYSE

La dose alpha cumulée par gramme de verre à 10 000 ans ($D^{10000\text{ans}}$) peut être reliée à la masse d' ^{241}Am , d' ^{243}Am et de ^{244}Cm contenues dans le verre produit en utilisant la formule suivante :



Cette formule a été établie par le CEA dans la note [6]. Les calculs ont été réalisés en déterminant pour chaque isotope d'actinide une série de coefficients (k_i) qui correspond au nombre de désintégrations alpha émises par un gramme de cet isotope et de ses descendants sur une période de temps donnée.

L'analyse de la contribution des différents isotopes dans le cumul alpha à 10000 ans de verres issus des différents flux considérés dans cette note, montre que quels que soient les mélanges de flux pris en compte, la dose de désintégrations alpha à 10000 ans provient des isotopes ^{241}Am , ^{243}Am et ^{244}Cm présents initialement dans le verre.

La seule origine de l' ^{241}Am , de l' ^{243}Am et du ^{244}Cm dans le verre produit est la solution ajustée de PF.

L' ^{241}Am , l' ^{243}Am et le ^{244}Cm sont déterminés à partir du surnageant et du précipité (voir annexe 8).

5.2. CALCUL DE LA DOSE ALPHA CUMULÉE À 10 000 ANS

Afin de déterminer le paramètre spécifié, l'analyse donne :

$C_{^{241}\text{Am}/\text{PF}}$ = concentration en ^{241}Am dans la solution ajustée de PF

$C_{^{243}\text{Am}/\text{PF}}$ = concentration en ^{243}Am dans la solution ajustée de PF

$C_{^{244}\text{Cm}/\text{PF}}$ = concentration en ^{244}Cm dans la solution ajustée de PF

5.3. INCERTITUDE

L'incertitude $\Delta D^{10000\text{ans}}$ commise sur la masse d'un actinide dans le verre produit est similaire à celle développée au § 3.3.

L'incertitude relative sur le débit de dose à 10 000 ans est donc :

$$\begin{aligned}
 (\Delta X_i)^2 = & \left(\frac{m_i}{m_p} \right)^2 \left[\left[m_i / C_{PF} \left(\frac{1}{m_i} - \frac{1}{m_p} \right) \right]^2 \left(\frac{\Delta C_{iPF}}{C_{iPF}} \right)^2 \right. \\
 & + \left(\frac{m_i / C_{PF}}{m_i} - \frac{m_p / C_{PF}}{m_p} \right)^2 \left(\frac{\Delta V_{PF}}{V_{PF}} \right)^2 + \left(- \frac{m_p / C_F}{m_p} \right)^2 \left(\frac{\Delta V_F}{V_F} \right)^2 \\
 & \left. + \left(- \frac{m_p / V_F}{m_p} \right)^2 \left(\frac{\Delta V_{FR}}{V_{FR}} \right)^2 \right]
 \end{aligned}$$

les incertitudes relatives retenues sont les suivantes :

$$1) \frac{\Delta {}^{241}\text{Am}}{{}^{241}\text{Am}} = \square$$

$$2) \frac{\Delta {}^{243}\text{Am}}{{}^{243}\text{Am}} = \square$$

$$3) \frac{\Delta {}^{244}\text{Cm}}{{}^{244}\text{Cm}} = \square$$

$$4) \frac{\Delta V_{PF}}{V_{PF}} = \frac{\Delta V_F}{V_F} = \square \quad (\text{Voir annexe 5})$$

$$5) \frac{\Delta V_{FR}}{V_{FR}} = \square \quad (\text{Voir annexe 5})$$

$$\begin{aligned}
 \left[\frac{\Delta(D^{\circ}_{10000\text{ans}})}{D^{\circ}_{10000\text{ans}}} \right]^2 &= \frac{1}{\left(\sum_i k_i X_i \right)^2} \sum_i (k_i \Delta X_i)^2 \\
 &= \frac{1}{\left(\sum_i k_i X_i \right)^2} \sum_i \left(k_i X_i \frac{\Delta X_i}{X_i} \right)^2
 \end{aligned}$$



5.4. APPLICATION NUMERIQUE SUR LE VERRE DE REFERENCE

1^{er} tableau :

ELEMENT i	ANALYSE SOL. AJUSTEE PF (%) (A) $m_i / C_{PF} \left(\frac{1}{m_i} - \frac{1}{m_p} \right) \left(\frac{\Delta C_{iPF}}{C_{iPF}} \right)$	BILAN SOL. AJUSTEE PF (%) (B) $\left(\frac{m_i}{m_i} / C_{PF} - \frac{m_p}{m_p} / C_{PF} \right) \left(\frac{\Delta V_{PF}}{V_{PF}} \right)$	BILAN SUSPENSION FINES (%) (C) $\left(- \frac{m_p}{m_p} / C_F \right) \left(\frac{\Delta V_F}{V_F} \right)$	BILAN FRITTE DE VERRE (%) (D) $\left(- \frac{m_p}{m_p} / F \right) \left(\frac{\Delta V_{FR}}{V_{FR}} \right)$	INCERTITUDE GLOBALE ELEMENT i $\frac{\Delta X_i}{X_i} = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2 + D^2}$
²⁴¹ Am					
²⁴³ Am					
²⁴⁴ Cm					

EMETTEUR i Sol _{PF}	X _i (%)	k _i X _i (des α à 10000ans)	k _i X _i $\frac{\Delta X_i}{X_i}$
²⁴¹ Am			
²⁴³ Am			
²⁴⁴ Cm			

$$(\sum k_i X_i)^2$$

$$\sum_i (k_i X_i \frac{\Delta X_i}{X_i})^2$$

$$\text{i.e. } \frac{\Delta(D^\circ_{10000\text{ans}})}{D^\circ_{10000\text{ans}}} =$$

2^{ème} tableau :

	DOSE ALPHA CUMULEE A 10000 ANS DE REFERENCE (des α à 10000ans/g)	$\frac{\Delta(D^\circ_{10000\text{ans}})}{D^\circ_{10000\text{ans}}}$ (%)	$\Delta(D^\circ_{10000\text{ans}})$ (des α à 10000ans/g)	DOSE ALPHA CUMULEE A 10000 ANS MAXIMALE DE REFERENCE (des α à 10000ans/g)	DOSE ALPHA CUMULEE A 10000 ANS SPECIFIEE (des α à 10000ans/g)
D°10000ans					$\leq 2,5 \cdot 10^{19}$

6. PARAMETRES RELATIFS AUX CONTENEURS

6.1. CONTAMINATION SURFACIQUE NON FIXEE

6.1.1. Détermination

Le conteneur est décontaminé [REDACTED]. Puis la contamination surfacique non fixée est mesurée avant l'entreposage.

Une autre mesure est effectuée au moment du transport.

La contamination est contrôlée sur l'ensemble de la surface du conteneur par un système automatisé de frottis (voir annexe 11). A partir de l'activité mesurée du tampon, la contamination surfacique non fixée est calculée.

La contamination surfacique $\beta\gamma$ non fixée maximum est de :

$$3,7 \cdot 10^4 \text{ Bq/m}^2.$$

La contamination surfacique non fixée est donnée par la formule :

$$A = \frac{N}{S \times \phi \times \eta \times F}$$

Où A : contamination surfacique non fixée (Bq/m²)

N : activité du frottis (coups par seconde)

S : surface balayée par le frottis (m²)

ϕ : rendement du scintillateur

η : rendement de spectre

F : facteur de prélèvement

6.1.2. Incertitude

L'écart type du taux de comptage est donné par :

$$\sigma_N = \sqrt{N}$$

L'incertitude ΔN sur le taux de comptage est prise égale à 3σ , soit : $3\sqrt{N}$, pour un intervalle de confiance de 99 %.

6.2. PUISSANCE THERMIQUE DU CONTENEUR

6.2.1. Détermination

Méthode de calcul

- La méthode retenue est le calcul de la puissance thermique du conteneur à partir du spectre des solutions de produits de fission et noyaux lourds (PF+NL), des produits d'activation (^{60}Co) et des suspensions de fines.
- La puissance thermique totale du conteneur s'exprime par la relation suivante :

$$PT = P_{PF} + P_{\text{fines}} = [(k \times P_{\text{sol NL+PF}} + P_{\text{sol } ^{60}\text{Co PF}}) \times V_{PF} \times n_{PF} + P_{\text{sol fines}} \times V_F \times n_F] \times \frac{mp}{mt}$$

$P_{\text{sol NL+PF}}$: puissance thermique des solutions PF hors ^{60}Co ou suspensions de fines (en W.l^{-1}).

$P_{\text{sol fines}}$: puissance thermique des suspensions de fines (en W.l^{-1}).

$P_{\text{sol } ^{60}\text{Co PF}}$: puissance thermique du ^{60}Co dans les solutions de PF (en W.l^{-1}).

V_{PF} , V_F , n_{PF} , mp , mt : définis dans le chapitre 4.1.

k : coefficient prenant en compte la puissance des éléments non déterminés dans la solution ajustée de PF soit $k =$ [] .

Cette valeur a été établie pour des combustibles d'origine, d'enrichissement, de taux de combustion et de temps de refroidissement variables (Voir note [7]). Il est possible, dans le cas d'étude particularisée, de préciser la valeur de ce coefficient.

- Les puissances thermiques peuvent être reliées à l'activité des émetteurs par des coefficients en fonction de l'intensité et de l'énergie des émissions.

$$P_{\text{sol NL+PF}} \text{ et } P_{\text{sol } ^{60}\text{Co PF}} = \sum_i P_i = \sum_i (a_i \times K_i)$$

$$P_{\text{sol fines}} = \sum_i P'_i = \sum_i (a'_i \times K_i)$$

avec a_i et a'_i : activité de l'émetteur i dans les solutions de PF et suspensions de fines.

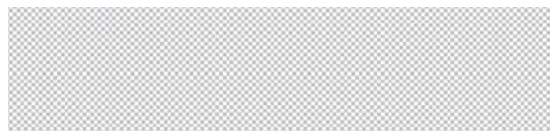
K_i : coefficient prenant en compte l'ensemble des émissions α , β et γ de l'émetteur i .



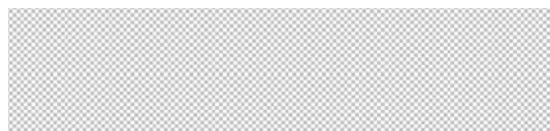
Paramètres de calcul

- Les principaux émetteurs, mesurés par spectrométrie α ou γ ou calculés, pris en compte pour le calcul de la puissance thermique, sont :

- . pour la solution PF :



- . pour la suspension de fines :



- Coefficients K des émetteurs :

- . En fonction des émissions de chaque émetteur, des coefficients K_β , K_γ , K_α ont été déterminés :

K_β : coefficient lié à l'émission β .

K_γ : coefficient lié à l'émission γ .

K_α : coefficient lié à l'émission α .

- . Le coefficient global K, prenant en compte l'ensemble des émissions β , γ et α de l'émetteur, est :

$$K = K_\beta + K_\gamma + K_\alpha.$$

- . Par ailleurs, pour les émetteurs à l'équilibre, il n'est calculé qu'un seul coefficient K prenant en compte les deux émetteurs.

Ceci concerne :

^{144}Pr à l'équilibre avec ^{144}Ce .

^{106}Rh à l'équilibre avec ^{106}Ru .

^{90}Y à l'équilibre avec ^{90}Sr .

$^{137\text{m}}\text{Ba}$ à l'équilibre avec ^{137}Cs .

$^{125\text{m}}\text{Te}$ à l'équilibre avec ^{125}Sb .

6.2.2. Incertitude

L'incertitude ΔP_T commise sur la puissance thermique totale d'un conteneur de verre est égale à :

$$\Delta P_T^2 = k^2 (P_{PF+NL})^2 \times \left[\left(\frac{\Delta P_{sol_{PF+NL}}}{P_{sol_{PF+NL}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta V_{PF}}{V_{PF}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta k}{k} \right)^2 \right] + (P_{60CoPF})^2 \times \left[\left(\frac{\Delta P_{sol_{60CoPF}}}{P_{sol_{60CoPF}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta V_{PF}}{V_{PF}} \right)^2 \right] + (P_{fines})^2 \times \left[\left(\frac{\Delta P_{sol_{fines}}}{P_{sol_{fines}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta V_F}{V_F} \right)^2 \right] + P_T^2 \left(\frac{\Delta mp}{mp} \right)^2$$

Avec :

$$P_{PF+NL} = P_{sol_{NL+PF}} \times V_{PF} \times n_{PF} \times \frac{mp}{mt}$$

$$P_{fines} = P_{sol_{fines}} \times V_F \times n_F \times \frac{mp}{mt}$$

$$P_{60Co} = P_{sol_{60Co}} \times V_{PF} \times n_{PF} \times \frac{mp}{mt}$$

Les incertitudes relatives retenues sont :

$$1) \frac{\Delta V_{PF}}{V_{PF}} = \frac{\Delta V_F}{V_F} = \text{ } \quad (\text{voir annexe 5})$$

$$2) \Delta mp = \text{ } \quad \text{kg}$$

$$3) \frac{\Delta k}{k} = \text{ } \quad (\text{voir note [7]})$$

$$4) \frac{\Delta P_{sol_{PF+NL}}}{P_{sol_{PF+NL}}}; \frac{\Delta P_{sol_{60Co}}}{P_{sol_{60Co}}} \text{ et } \frac{\Delta P_{sol_{Fines}}}{P_{sol_{Fines}}} \quad (\text{voir ci-après})$$



On rappelle $\Sigma P_i = \Sigma a_i K_i$

et $\Sigma P'_i = \Sigma a'_i K_i$

On admet qu'il n'y a pas d'incertitude sur les coefficients K_i .

L'incertitude commise sur la puissance thermique des solutions de PF ou suspensions de fines est donc liée à l'incertitude analytique sur les activités des émetteurs considérés.

Soit :

$$(\Delta P_{\text{sol}_{\text{PF+NL}}})^2 = \Sigma (\Delta P_i)^2 = \Sigma (K_i \Delta a_i)^2$$

$$(\Delta P_{\text{sol}_{\text{Fines}}})^2 = \Sigma (\Delta P'_i)^2 = \Sigma (K_i \Delta a'_i)^2$$

$$((\Delta P_{\text{sol}_{^{60}\text{CoPF}}})^2 = (\Delta P_{^{60}\text{CoPF}})^2 = (K \Delta a_{^{60}\text{Co}})^2$$

Soit :

$$\left(\frac{\Delta P_{\text{sol}_{\text{PF+NL}}}}{P_{\text{sol}_{\text{PF+NL}}}} \right)^2 = \frac{\sum_i \left(a_i K_i \frac{\Delta a_i}{a_i} \right)^2}{\left(\sum_i a_i K_i \right)^2},$$

$$\left(\frac{\Delta P_{\text{sol}_{\text{fines}}}}{P_{\text{sol}_{\text{fines}}}} \right)^2 = \frac{\sum_i \left(a'_i K_i \frac{\Delta a'_i}{a'_i} \right)^2}{\left(\sum_i a'_i K_i \right)^2};$$

$$\left(\frac{\Delta P_{\text{sol}_{^{60}\text{CoPF}}}}{P_{\text{sol}_{^{60}\text{CoPF}}}} \right)^2 = \frac{\left(a_{^{60}\text{CoPF}} K_{^{60}\text{CoPF}} \frac{\Delta a_{^{60}\text{CoPF}}}{a_{^{60}\text{CoPF}}} \right)^2}{\left(a_{^{60}\text{CoPF}} K_{^{60}\text{CoPF}} \right)^2}$$

Les tableaux ci-dessous présentent les valeurs des coefficients K_i et des incertitudes analytiques $\Delta a_i/a_i$ et $\Delta a'_i/a'_i$ pour chaque élément. Ces valeurs sont issues du document [3]



Les tableaux ci-dessous présentent les valeurs des coefficients K_i et des incertitudes analytiques $\Delta a_i/a_i$ and $\Delta a'_i/a'_i$ pour chaque élément.

(Cf. document [8] pour certains éléments).

EMETTEUR i (Sol _{PF})	K _i (W/TBq)	$\frac{\Delta a_i}{a_i}$ (%)

EMETTEUR i (Sol _F)	K _i (W/Ci)	$\frac{\Delta a'_i}{a'_i}$ (%)

(*) : Le coefficient K_i inclut la contribution thermique du .

6.2.3. Application numérique sur le verre de référence

Les activités a_i en (TBq/l) définies ci-dessous sont issues de la note [2].

[illegible]

$$(\sum a_i K_i)^2$$

$$\sum_i (a_i - K_i \frac{\Delta a_i}{a_i})^2$$

$$\text{Soit } \left(\frac{\Delta P_{\text{sol}}}{P_{\text{sol}}} \right)^2 =$$

Soit $\frac{\Delta P_{sol_{PF+NL}}}{P_{sol_{PF+NL}}} = \square$ avec $P_{sol_{PF}} = \square \text{ w.l}^{-1}$

EMETTEUR i Sol _F	a' _i (TBq/l)	a' _i . K _i (w/l)	(a' _i K _i) $\frac{\Delta a'_i}{a'_i}$ (w/l)

$$\sum_i (a'_i K_i)^2$$

$$\sum_i (a'_i K_i \frac{\Delta a'_i}{a'_i})^2$$

$$\text{Soit } \left(\frac{\Delta P_{sol_{fines}}}{P_{sol_{fines}}} \right)^2 = \frac{\quad}{\quad}$$

$$\text{Soit } \frac{\Delta P_{sol_{fines}}}{P_{sol_{fines}}} = \quad \text{ avec } P_{sol_{fines}} = \quad \text{ w/l}$$

$$P_T^2 = \quad$$

$$\Delta P_T^2 = k^2 (P_{PF+NL})^2 \times \left[\left(\frac{\Delta P_{sol_{PF+NL}}}{P_{sol_{PF+NL}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta V_{PF}}{V_{PF}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta k}{k} \right)^2 \right] + (P_{^{60}\text{CoPF}})^2 \times \left[\left(\frac{\Delta P_{sol_{^{60}\text{CoPF}}}}{P_{sol_{^{60}\text{CoPF}}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta V_{PF}}{V_{PF}} \right)^2 \right] + (P_{fines})^2 \times \left[\left(\frac{\Delta P_{sol_{fines}}}{P_{sol_{fines}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta V_F}{V_F} \right)^2 \right] + P_T^2 \left(\frac{\Delta mp}{mp} \right)^2$$

$$\Delta P_T^2 = \quad$$

$$\rightarrow \Delta P_T = \quad$$

soit $\frac{\Delta P_T}{P_T} = \text{[redacted]}$ pour le verre de référence.

	PUISSANCE THERMIQUE A LA PRODUCTION (W/conteneur)	$\frac{\Delta P_T}{P_T}$ (%)	ΔP_T (w)	PUISSANCE THERMIQUE A LA PRODUCTION MAXIMALE DE REFERENCE (W/conteneur)	PUISSANCE THERMIQUE A LA PRODUCTION SPECIFIEE (W/conteneur)
PT	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	≤ 3000

6.2.4. Evolution de la puissance thermique entre les dates de vitrification et de désentreposage

Méthode de calcul

- La méthode de calcul consiste, à partir de la détermination de la puissance thermique à la date de vitrification, à recalculer la puissance thermique à une nouvelle date donnée t (par exemple la date de désentreposage) en utilisant la décroissance radioactive de chaque émetteur au cours de la période considérée.

$$\text{soit } P_{\text{solPF}}(t) = \sum_i (a_i(t) \times K_i)$$

$$P_{\text{solF}}(t) = \sum_i (a'_i(t) \times K_i)$$

- . Les coefficients k_i sont définis au paragraphe 7.2.2.
- . Les activités sont calculées par les relations suivantes :

* pour une désintégration seule (émetteur i) :

$$a_i(t) = a_i(t_0) e^{-\lambda_i t} \quad \left[\begin{array}{ll} \text{avec } a_i(t_0) : & \text{activité de l'émetteur } i \text{ à la date de vitrification } t_0 \\ \lambda_i & : \text{constante radioactive de l'émetteur } i \end{array} \right.$$

* pour deux désintégrations successives (émetteurs i et i') :

$$a_i(t) = a_i(t_0) e^{-\lambda_i t}$$

$$a_{i'}(t) = \left(\frac{\lambda_{i'}}{\lambda_{i'} - \lambda_i} \right) a_i(t_0) \times (e^{-\lambda_i t} - e^{-\lambda_{i'} t}) + a_{i'}(t_0) e^{-\lambda_{i'} t}$$

avec $a_i(t_0)$ et $a_{i'}(t_0)$: activités des émetteurs i et i' à la date de vitrification t_0

λ_i et $\lambda_{i'}$: constantes radioactives des émetteurs i et i'

La constante radioactive λ est liée à la période T par la relation suivante :

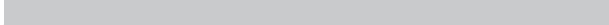
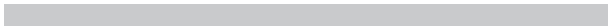
$$a(T) = \frac{a(t_0)}{2} = a(t_0) e^{-\lambda T} \quad \text{soit} \quad \boxed{\lambda = \frac{\ln 2}{T}}$$

. les périodes et constantes radioactives des principaux émetteurs considérés sont :

[illegible]

Référence : Note [3]

Les désintégrations des principaux émetteurs considérés sont les suivants :

- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 

- * Pour les éléments [REDACTED], on aura :

$$a_i(t) = a_i(t_0) e^{-\lambda_i t}$$

Nota :

[REDACTED]

- * Pour les éléments [REDACTED], on aura :

$$a_i(t) = a_i(t_0) e^{-\lambda_i t} \quad \text{et} \quad a_i'(t) = a_i(t).$$

En effet, nous sommes dans le cas particulier où $T_i > T_i'$.

En conséquence, nous pouvons faire les approximations suivantes :

$$\frac{\lambda_{i'}}{\lambda_{i'} - \lambda_i} \approx 1 \quad \text{et} \quad e^{-\lambda_{i'} t} \approx 0$$

$$\text{d'où } a_i'(t) = a_i(t_0) e^{-\lambda_i t} = a_i(t).$$

Incertitude

L'incertitude sur la puissance thermique d'un conteneur à une date donnée « t » est calculée conformément au paragraphe 7.2.2 en prenant en compte :

- Les éléments variants de t_0 à t , à savoir les activités a_i déterminées à la date « t ».
- Les éléments invariants de t_0 à t , à savoir les volumes des solutions, les incertitudes analytiques ainsi que les incertitudes sur les [REDACTED] et sur la pesée du conteneur déterminés à la date de vitrification t_0 .

6.3. DEBIT DE COULEE

6.3.1. Détermination

- Quand la préparation du verre est achevée, le verre fondu est coulé dans le conteneur par l'intermédiaire d'une buse. [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]

Le débit de coulée minimal est donné pour une géométrie de buse précise.

Le débit de coulée (Q_m) est donné par la formule suivante :

$$Q_m = \frac{mc}{T}$$

avec :

mc = masse de verre coulé

T = durée correspondante à la masse de verre mc .

6.3.2. Incertitude

L'incertitude ΔQ_m commise sur le débit de coulée Q_m est définie à partir de la variance de Q_m :

$$\text{soit } \sigma_{Q_m}^2 = \left(\frac{\partial Q_m}{\partial mc} \right)^2 \sigma_{mc}^2 + \left(\frac{\partial Q_m}{\partial T} \right)^2 \sigma_T^2$$

$$\text{avec } \frac{\partial Q_m}{\partial mc} = \frac{1}{T} \text{ et } \frac{\partial Q_m}{\partial T} = \frac{1}{T} \frac{\partial mc}{\partial T} + mc \frac{\partial}{\partial T} \frac{1}{T} = \frac{-mc}{T^2}$$

$$\text{soit } \sigma_{Q_m}^2 = \frac{1}{T^2} \sigma_{mc}^2 + \left(\frac{mc}{T^2} \right)^2 \sigma_T^2$$

L'incertitude ΔQ_m étant prise égale à deux écarts type, soit $\Delta Q_m = 2 \sigma_{Q_m}$, on obtient :

$$(\Delta Q_m)^2 = \frac{1}{T^2} (\Delta mc)^2 + \left(\frac{mc}{T^2} \right)^2 (\Delta T)^2$$



- Détermination de l'incertitude sur la pesée des conteneurs Δmc :
 - . la précision est de [] pour une masse totale de [] pour chacune des deux tables de pesée redondantes, soit :

$$\Delta mc = [] \text{ kg}$$

- . les essais sur les ateliers de vitrification R7 et T7 ont confirmé cette incertitude par comparaison avec des masses étalon.
- Détermination de l'incertitude sur la durée de la coulée de verre :
 - . le temps de restitution de l'information au niveau du poste de conduite centralisé, traduit par un relevé légèrement décalé de l'opérateur, [], [], on prendra par mesure conservatoire :

$$\Delta T = []$$

Exemple :

Pour $mc = []$ kg correspondant à $T = []$ h :

$$\Delta mc = [] \text{ kg}$$

$$\Delta T = [] \text{ h}$$

Soit

Soit

$$\Delta Qm = [] \text{ kg/h et } []$$

6.4. REFROIDISSEMENT

La durée entre la fin de deuxième coulée et le soudage du couvercle doit dépasser [].

Le respect de ce paramètre garanti est vérifié par une mesure précise du temps entre le début et la fin des opérations de production. Cette information est reportée sur la fiche de suivi conteneur.

7. DOCUMENTS CITES

	N° GEIDE	N° BART	TITRE
[1]			SPECIFICATION DU COLIS STANDARD DE DECHETS VITRIFIES (CSD-V) PRODUIT A LA HAGUE
[2]			DESCRIPTIF DU COLIS MOYEN DE LA SPECIFICATION EVOLUEE
[3]			DONNEES NUCLEAIRES CONCERNANT LES SOLUTIONS DE PF ET FINES - CESAR 5.31
[4]			NT DETERMINATION DES INCERTITUDES LIEES AUX CALCULS DU Cs ET DU ⁹⁰ Sr
[5]			CORRELATIONS POUR LES ISOTOPES ⁷⁹ Se, ⁹³ Zr, ¹⁰⁷ Pd, ¹²⁶ Sn, ⁹⁹ Tc, ¹³⁵ Cs, ⁹⁰ Sr, ²⁴³ Am, ²⁴⁵ Cm AINSI QUE LES ELEMENTS Cm, Np, Cs DANS LES COLIS DE DECHETS VITRIFIES. ESTIMATION DES ISOTOPES A VIE LONGUE ; TRAITEMENT POSTERIEUR A 2012 – EVOLUTIONS CESAR V5
[6]			ARGUMENTAIRE SCIENTIFIQUE RELATIF A L'AUGMENTATION DE LA TENEUR EN ACTINIDES DANS LES VERRES DE TYPE R7/T7
[7]			CONTRIBUTION DES RADIONUCLEIDES NON MESURES DANS LA SOLUTION DES DECHETS VITRIFIES POUR L'ACTIVITE ALPHA, BETA ET LA PUISSANCE THERMIQUE. TRAITEMENT POSTERIEUR A 2005 – EVOLUTIONS CESAR V5
[8]			ATELIERS DE VITRIFICATION R7 ET ATELIER DE DESENTREPOSAGE DES RESIDUS VITRIFIES DETERMINATION DES PARAMETRES COMPLEMENTAIRES ET INCERTITUDES ASSOCIEES DES COLIS DE DECHETS VITRIFIES PRODUITS SELON LA SPECIFICATION

:

8. ANNEXES

8.1. ANNEXE 1A ET 1B

8.1.1. ANNEXE 1 A – SOLUTIONS A VITRIFIER (FP ET FINES)

	ELEMENTS EN g.l-1		OXYDES EN g.l-1	
<u>PF et fines</u>	Se		SeO ₂	
	Rb		Rb ₂ O	
	Sr		SrO	
	Y		Y ₂ O ₃	
	Zr { PF		ZrO ₂ PF	}
	Nb { Fines		Nb ₂ O ₃ Fines	}
	Mo { PF		MoO ₃ PF	}
	Tc { Fines		TcO ₂ Fines	}
	Ag		Ag ₂ O	
	Cd		CdO	
	In		In ₂ O ₃	
	Sn { PF		SnO ₂ PF	}
	Sb { Fines		Sb ₂ O ₃ Fines	}
	Te		TeO ₂	
	Cs		Cs ₂ O	
	Ba		BaO	
	La		La ₂ O ₃	
	Ce		Ce ₂ O ₃	
	Pr		Pr ₂ O ₃	
	Nd		Nd ₂ O ₃	
	Pm		Pm ₂ O ₃	
	Sm		Sm ₂ O ₃	
	Eu		Eu ₂ O ₃	
	Gd		Gd ₂ O ₃	
	Tb		Tb ₂ O ₃	
	Dy		Dy ₂ O ₃	
<u>Actinides</u>	U { PF		UO ₂ PF	}
	Np { Fines			}
	Pu { PF		PuO ₂ PF	}
	Am { Fines		AmO ₂ Fines	}
	Cm		CmO ₂	
<u>Produits de corrosion et d'addition</u>	Na		Na ₂ O	
	Fe		Fe ₂ O ₃	
	Ni		NiO	
	Cr		Cr ₂ O ₃	
	P		P ₂ O ₅	
<u>Ajout de procédé</u>	Al		Al ₂ O ₃	
<u>Platinoïdes</u>			RuO ₂ PF	}
	Rh { Fines			}
	Pd { PF			}

	Page 47 sur 69	A AREVA
--	----------------	------------------------

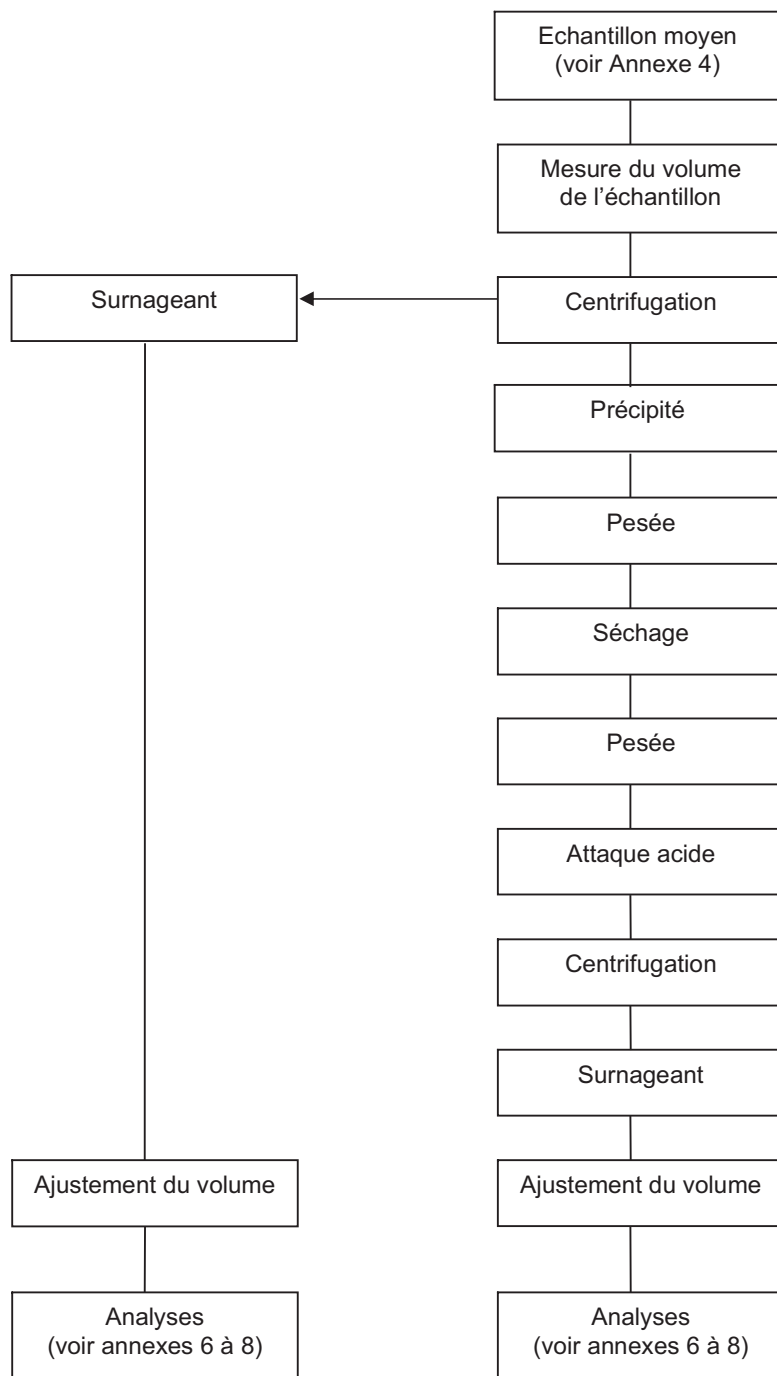
8.1.2. ANNEXE 1B – COMPOSITION DU VERRE DE REFERENCE R7/T7

COMPOSITION DU VERRE DE REFERENCE (Répartition selon l'origine des constituants)

Solution PF	
Suspension fines	
Ajustage des solutions + flux annexes	
Solution ajustée	
Fritte	
Verre	

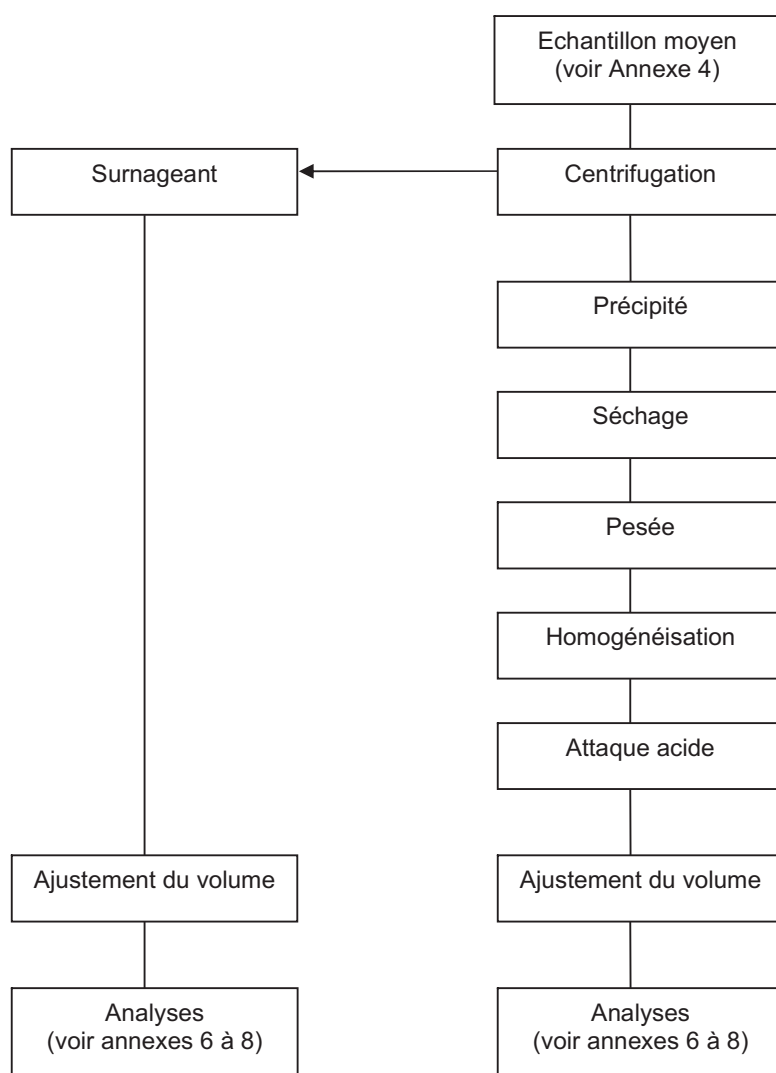
9. ANNEXE 2 : MESURE SUR L'ECHANTILLON DE SOLUTION AJUSTEE DE PF

(Séparation du surnageant phase/précipité et dissolution du précipité)



10. ANNEXE 3 – MESURE SUR L'ECHANTILLON DE SUSPENSION DE FINES

(Séparation du surnageant phase/fines et dissolution des matières insolubles)





11. ANNEXE 4 – PRELEVEMENT ET ECHANTILLON MOYEN D'UNE SOLUTION AJUSTEE DE PF ET D'UNE SUSPENSION DE FINES

1. SCHEMA

(Voir page suivante).

2. PRELEVEMENT D'ECHANTILLON

- Fonctionne avant la prise d'échantillon afin d'obtenir une solution homogène et représentative dans le cruchon.
- Transfert au cruchon par aiguille.
- P.F. : cuve avant le calcinateur - niveaux de prise d'échantillon.
- Fines : cuve avant le calcinateur - niveaux de prise d'échantillon
- Le cruchon est transféré au laboratoire par un système de transfert pneumatique.
- L'échantillon moyen est fait par mélange de volumes équivalents à partir des :
 - . niveaux (pour la solution ajustée de PF),
 - . niveaux (pour les fines).

3. HOMOGENEITE DES SOLUTIONS AJUSTEES DE PF ET DE FINES TRANSFERT

L'homogénéité dans chaque cuve est obtenue par la rotation de pales avec une conception anti-vortex spécifique.

Le système de transfert consiste, pour chaque cuve, en :

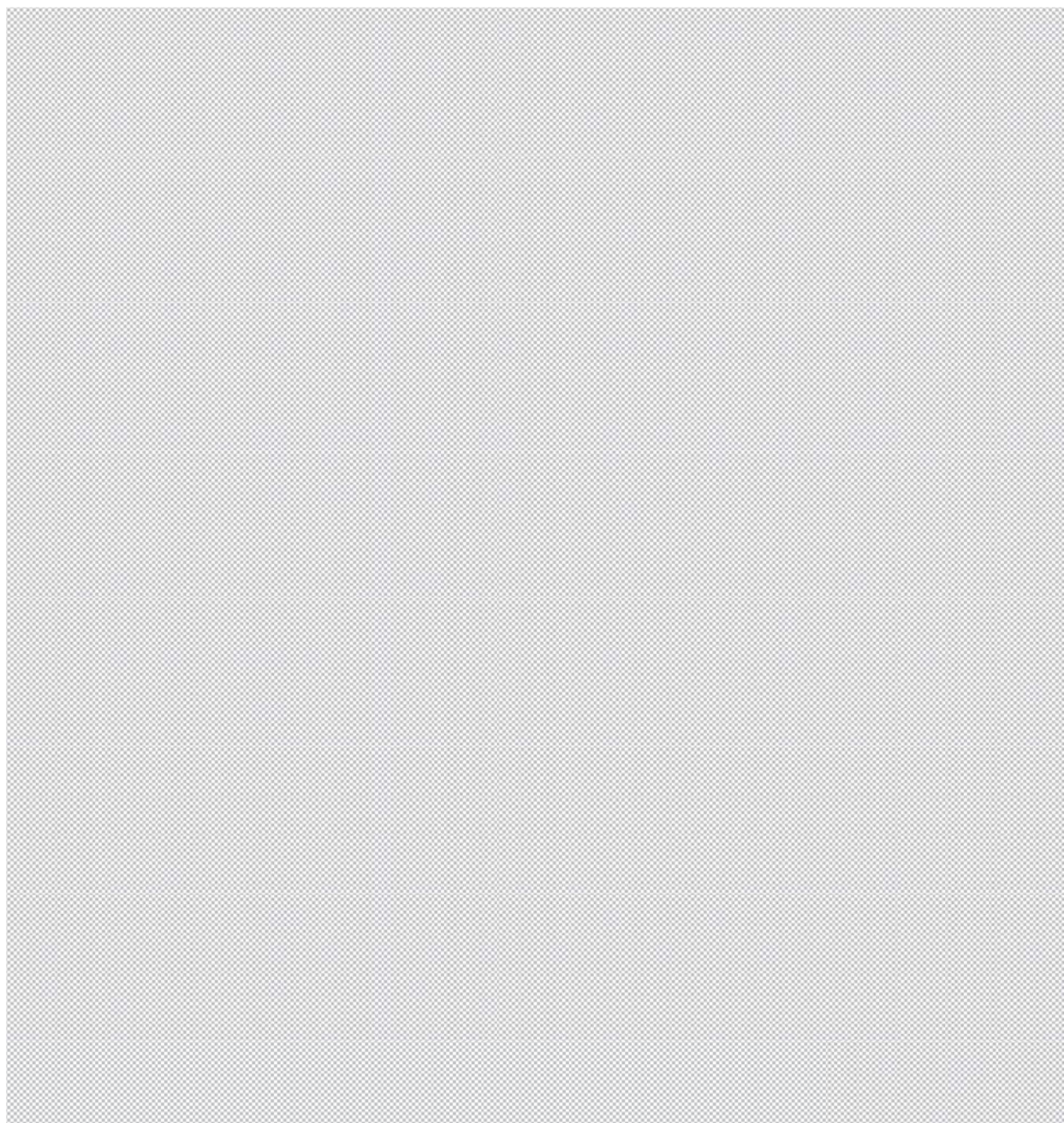
- Un système d'air lift associés (pot de garde).
- Une .

L'homogénéité des solutions dans les cuves et pendant les transferts a été prévue lors des études du CEA. De plus, des essais en inactif ont démontré la représentativité de l'échantillon moyen.



CUVE DE PRODUITS DE FISSION

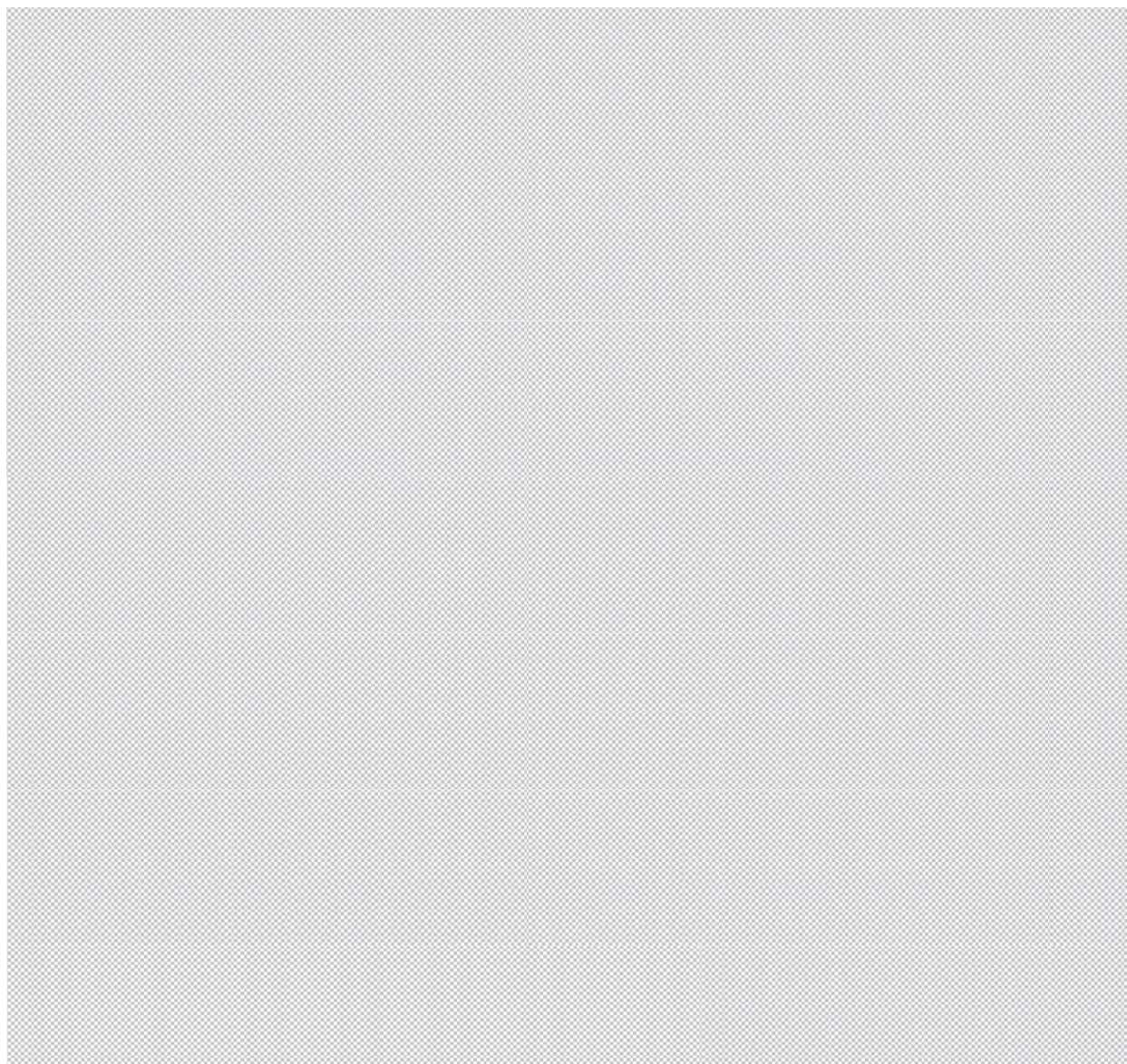
Edition GEIDE du 05/11/2020 - Etat Validé - Le 23/10/2020





TRANSFERT DE PRODUITS DE FISSION :

Edition GEIDE du 05/11/2020 - Etat Validé - Le 23/10/2020



12. ANNEXE 5 : INCERTITUDES LIEES AU PROCEDE

Alimentation solution ajustée	
Alimentation suspension de fines	
Alimentation de fritte de verre	

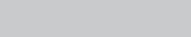
Les incertitudes ci-dessus résultent d'une analyse des résultats obtenus pendant les essais des Ateliers de Vitrification R7 et T7.

- Incertitude sur l'alimentation en solutions ajustées et en fines

Elle résulte de deux incertitudes :

· 

L'incertitude prise en compte est égale à l'écart maximum relevé (soit  max.).

· Celle liée à la chaîne de mesure : l'essai consiste à comparer la valeur du volume affiché au poste de conduite et la valeur du volume réel  après un temps de fonctionnement significatif 



- Incertitude sur l'alimentation en fritte de verre

L'incertitude prise en compte résulte de la comparaison, sur une durée significative, entre le cumul du poids affiché au poste de conduite et la pesée effective de la fritte de verre avec une balance certifiée 

13. ANNEXE 6 - PRELEVEMENT ET ECHANTILLON MOYEN DE LA FRITTE DE VERRE

Pendant la production, le fabricant effectue automatiquement un prélèvement (■ g) pour chaque ■ kg produit.

Un échantillon global constitué de ■ échantillons élémentaires est réalisé. Il représente un lot de fritte ■.

Les analyses chimiques sont réalisées sur un échantillon moyen constitué de ■ échantillons globaux (représentatifs de ■ tonnes de fritte de verre).

La masse de cet échantillon moyen est de l'ordre de ■ g.



La détermination des impuretés est réalisée sur un échantillon moyen représentant ■ tonnes de fritte de verre.

TRANSFERT DE LA FRITTE DE VERRE





14. ANNEXE 7 – SPECTROMETRIE D'EMISSION ICP

(INDUCTIVE COUPLED PLASMA)

1. PRINCIPE

Un atome, après avoir été excité par une énergie externe, revient à son état stable en émettant un rayonnement électromagnétique.

Les niveaux d'énergie correspondants aux états excités et stables sont connus pour chaque élément.

Une longueur d'onde (hors interférence) spécifique à chaque élément est utilisée afin d'effectuer la détermination quantitative.

2. EQUIPEMENT

Le plasma est produit par un générateur HF.

Une mesure de l'émission est réalisée par un détecteur (voir figure page suivante) :

{spectromètre - photomultiplicateur - calculateur}

3. MESURE

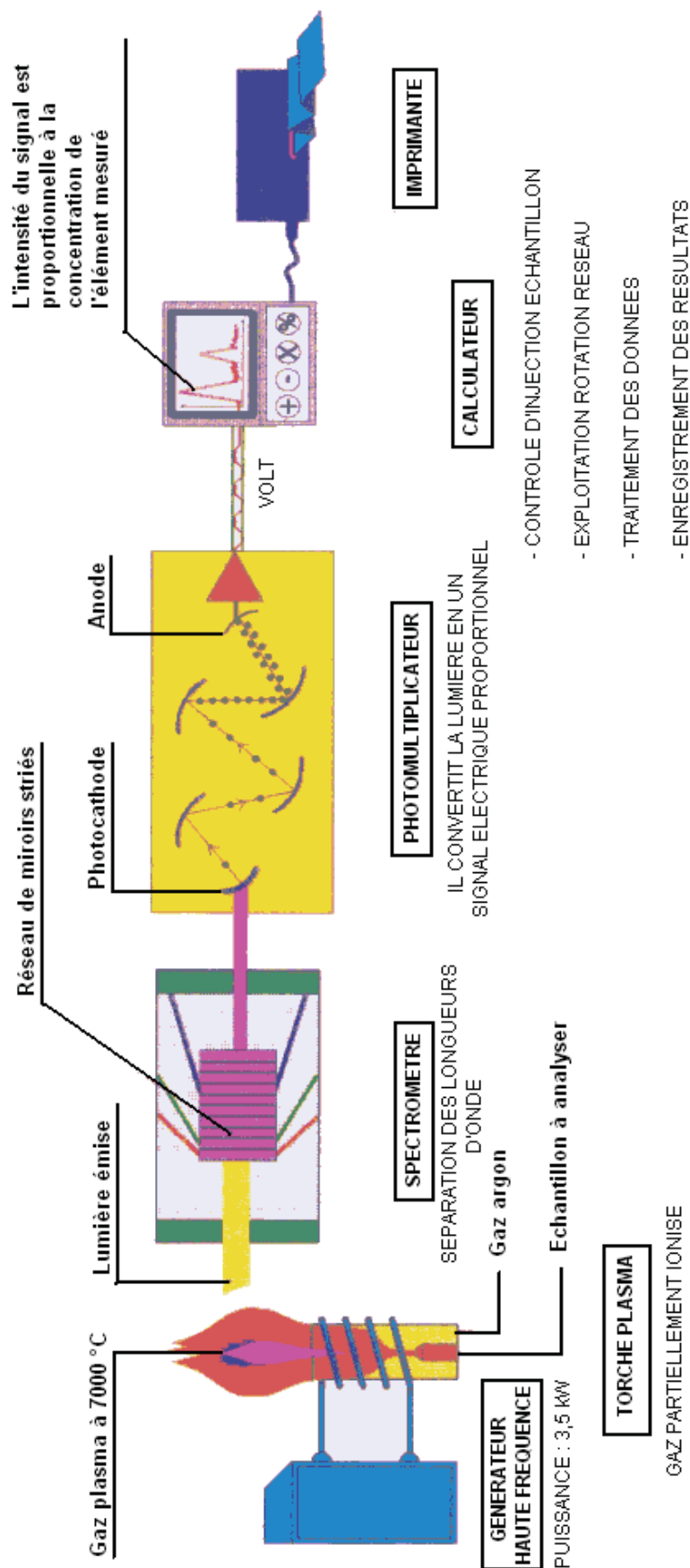
Etant donné les problèmes d'interférence, un choix des longueurs d'ondes exploitables est effectué.

Les mesures sont réalisées par comparaisons à des standards soumis aux mêmes conditions que l'échantillon analysé.

Les standards sont utilisés pour construire, par régression linéaire, la droite du nombre d'impulsions en fonction de la concentration. La détermination de la concentration est réalisée par interpolation linéaire à partir de cette droite.

	Page 57 sur 69	A AREVA
--	----------------	--------------------------

SPECTROMETRIE D'EMISSION ICP



15. ANNEXE 8 – SPECTROMETRIE ALPHA ET GAMMA

1. PRINCIPE

La spectrométrie est utilisée pour analyser les radionucléides émetteurs alpha et gamma.

La technique de détection est basée sur l'interaction entre les rayonnements alpha ou gamma et la matière :

- En spectrométrie gamma, les rayonnements ionisants interagissent avec un détecteur germanium alors qu'en spectrométrie alpha, il s'agit d'une semi-conducteur silicium.
- L'énergie est transformée en un signal représentatif qui est utilisée pour quantifier l'activité et déterminer l'émetteur.

2. EQUIPEMENT

- Spectrométrie alpha :

Le détecteur est constitué d'une diode silicium.

Une faible quantité d'échantillon dilué (0,2 ml) est déposée dans une coupelle à proximité du détecteur. Cette technique est utilisée du fait de la faible capacité de pénétration des émissions alpha.

- Spectrométrie gamma :

Le détecteur est constitué d'un semi-conducteur au germanium.

Ce type de détecteur doit être refroidi par azote liquide afin de diminuer le bruit de fond dû à l'excitation thermique des électrons (cette précaution est nécessaire avec les détecteurs germanium du fait de la faible énergie nécessaire pour créer une charge électrique dans le détecteur).

3. MESURE

Sont pris en compte :

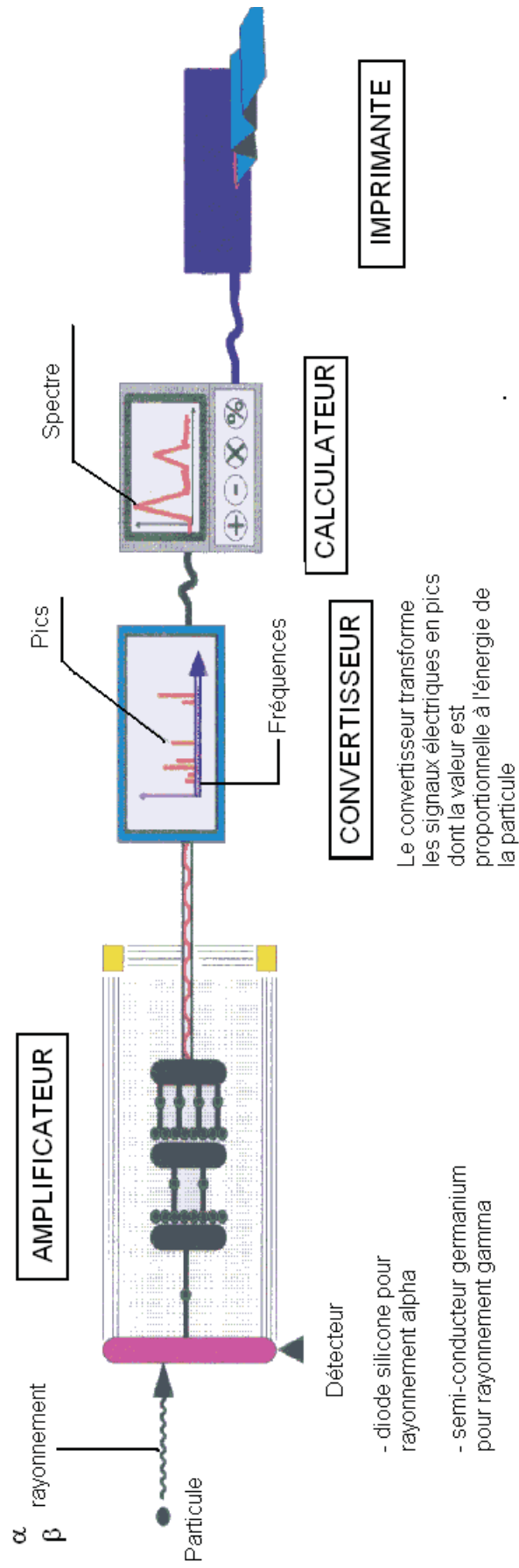
- L'efficacité, le ratio gamma détecté / gamma émis.
- Le bruit de fond (rayonnements cosmiques, interférences, parasites électroniques).
- Le temps d'arrêt (du fait de la saturation du détecteur et de sa chambre d'analyse ; c'est pourquoi il est nécessaire de diluer suffisamment les solutions).
- La résolution.

Un radionucléide émet avec une énergie parfaitement connue ce qui permet de l'identifier par analyse de cette caractéristique.

	Page 59 sur 69	A AREVA
--	----------------	-------------------

SPECTROMETRIE :

- Alpha
- Gamma



1. PRINCIPE

Response	Percentage
U.S. should take action	15%
U.S. should take action	25%
U.S. should take action	35%
U.S. should take action	45%
U.S. should take action	55%
U.S. should take action	65%
U.S. should take action	75%
U.S. should take action	85%
U.S. should not take action	15%
U.S. should not take action	25%
U.S. should not take action	35%
U.S. should not take action	45%
U.S. should not take action	55%
U.S. should not take action	65%
U.S. should not take action	75%
U.S. should not take action	85%

Une mesure de l'absorption est réalisée par un appareillage spécifique (voir figure page suivante) :

{spectrophotomètre - photomultiplicateur - calculateur}

- Phase 1 : mesure de la solution de référence (figure p 4/5).
- Phase 2 : mesure de l'échantillon ou de la solution standard (figure p 5/5).

Les phases 1 et 2 sont répétées plusieurs fois par seconde.



4. EXEMPLE DE CALCUL : [redacted]

4.1 [redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted]

4.2. [redacted]

4.2.1. [redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted]



4.2.2. [redacted]

[redacted]

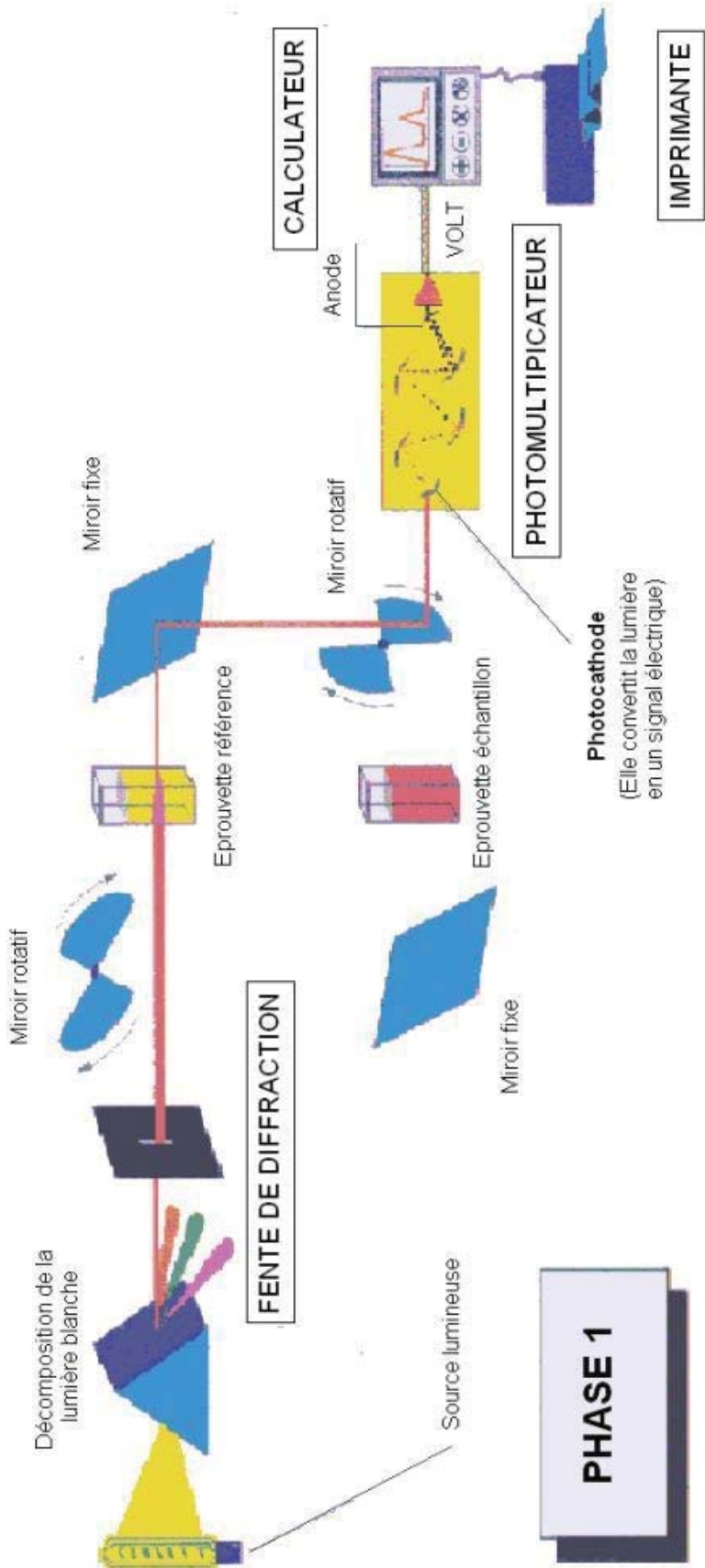
[redacted]

[redacted]

[redacted]

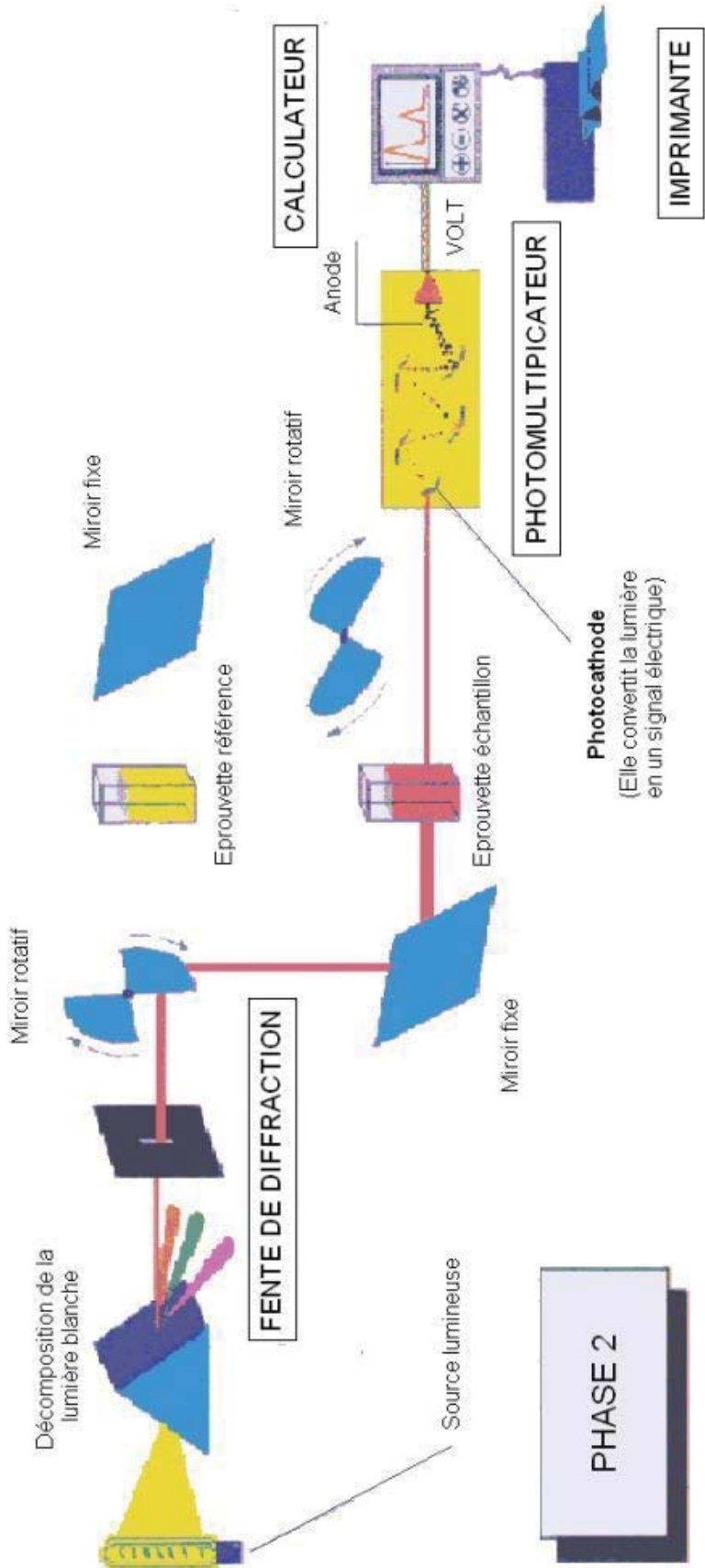
[redacted]

SPECTROMETRIE D’ABSORPTION Pu et Np



	Page 63 sur 69	AREVA
--	----------------	------------------

SPECTROMETRIE D’ABSORPTION Pu et Np



17. ANNEXE 10 – CHROMATOGRAPHIE IONIQUE

1. PRINCIPE

Cette méthode de chromatographie ionique est une méthode de séparation à l'aide d'une résine échangeuse d'ions. Un échangeur d'ion est une substance solide et insoluble capable d'échanger des ions avec ceux du milieu réactionnel d'une solution. Les résines échangeuses d'ions sont en général des polymères modifiés chimiquement par greffes de groupes ionisés acide ou basique afin de leur donner des propriétés échangeuses-

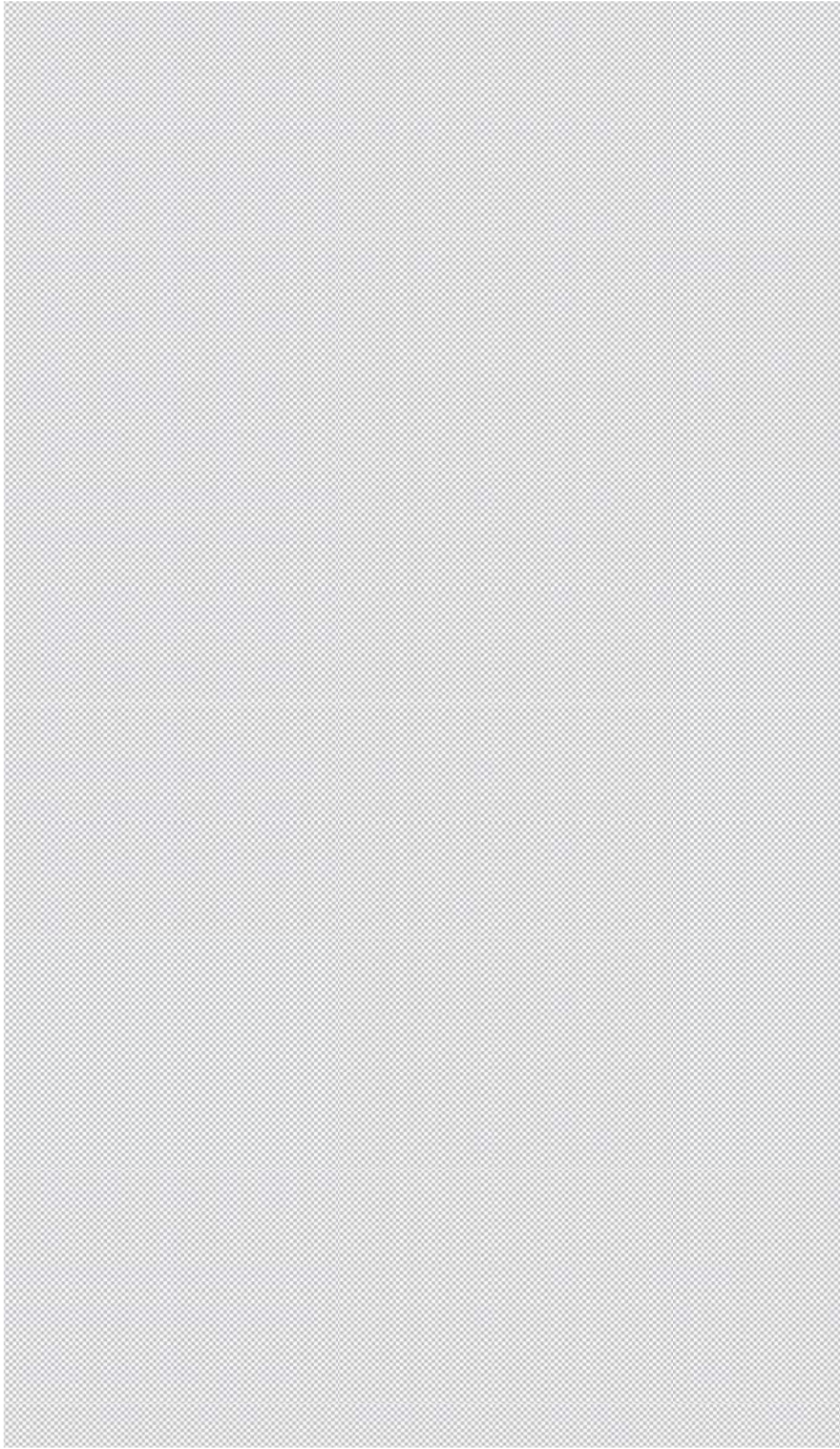
- de cations (pour le sodium) par exemple),
- d'anions (pour les sulfates par exemple)..

2. EQUIPEMENT

Une mesure de chromatographie ionique est réalisée par un appareillage spécifique (voir figure page suivante) :

	Page 65 sur 69	A AREVA
--	----------------	------------------------

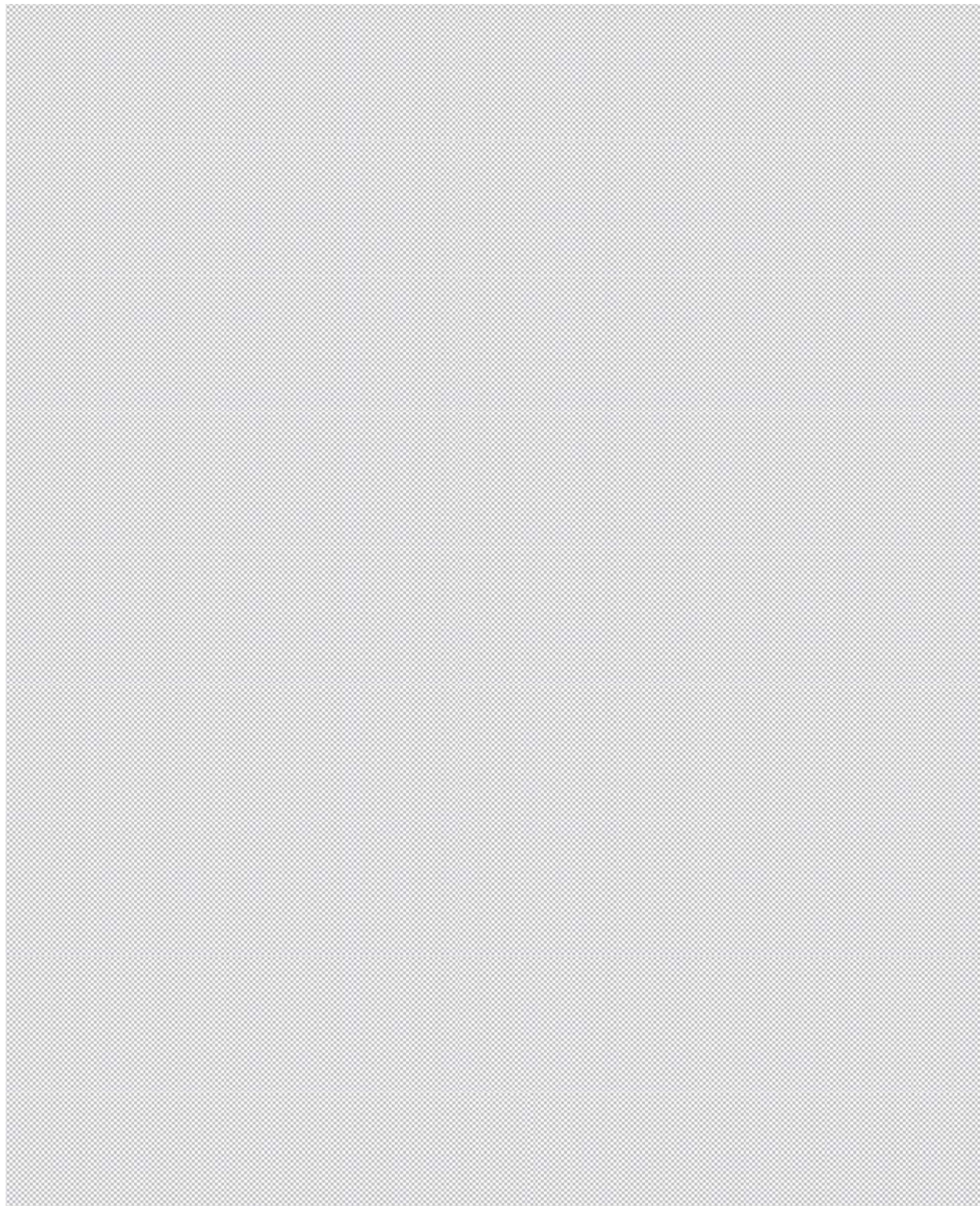
CHROMATOGRAPHIE IONIQUE





18. ANNEXE 11 – MESURE DE LA CONTAMINATION SURFACIQUE

Edition GEIDE du 05/11/2020 - Etat Validé - Le 23/10/2020



[Retour page 1](#)

19. TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	1
2. DOMAINE D'APPLICATION	1
3. COMPOSITION CENTESIMALE DU VERRE ELABORE	2
3.1. DETERMINATION GENERALE	2
3.2. DETERMINATIONS SPECIFIQUES	3
3.2.1. Détermination du pourcentage (FP + Zr + Actinides) oxydes + particules métalliques	3
3.2.1.1. Méthodes d'analyses	3
3.2.1.1.1. Méthodes d'analyses de la solution ajustée de PF	3
3.2.1.1.2. Méthodes d'analyses des fines	4
3.2.1.1.3. Méthode d'analyse de la fritte de verre	4
3.2.1.2. Calcul du pourcentage	5
3.2.2. Détermination du pourcentage SiO_2	5
3.2.2.1. Méthode d'analyse	5
3.2.2.2. Calcul du pourcentage	6
3.2.3. Détermination du pourcentage de B_2O_3	6
3.2.3.1. Méthode d'analyse	6
3.2.3.2. Calcul général	6
3.2.4. Détermination du pourcentage de Al_2O_3	7
3.2.4.1. Méthode d'analyse	7
3.2.4.2. Calcul du pourcentage	7
3.2.5. Détermination du pourcentage de $(\text{SiO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3)$	7
3.2.6. Détermination du pourcentage de Na_2O	7
3.2.6.1. Méthode d'analyse	8
3.2.6.2. Calcul du pourcentage	8
3.2.7. Détermination du pourcentage de Fe_2O_3	8
3.2.7.1. Méthode d'analyse	8
3.2.7.2. Calcul du pourcentage	8
3.2.8. Détermination du pourcentage de NiO	9
3.2.8.1. Méthode d'analyse	9
3.2.8.2. Calcul du pourcentage	9
3.2.9. Détermination du pourcentage de Cr_2O_3	9
3.2.9.1. Méthode d'analyse	10
3.2.9.2. Calcul du pourcentage	10
3.2.10. Détermination du pourcentage de P_2O_5	10
3.2.10.1. Méthode d'analyse	10

3.2.10.2. Calcul général	10
3.2.11. Détermination du pourcentage de Li_2O	11
3.2.11.1. Méthode d'analyse	11
3.2.11.2. Calcul du pourcentage	11
3.2.12. Détermination du pourcentage de ZnO	11
3.2.12.1. Méthode d'analyse	11
3.2.12.2. Calcul du pourcentage	11
3.2.13. Détermination du pourcentage de CaO	11
3.2.13.1. Méthode d'analyse	12
3.2.13.2. Calcul du pourcentage	12
3.3. INCERTITUDES	12
3.4. APPLICATION NUMERIQUE SUR LE VERRE DE REFERENCE	20
4. MASSES D'ACTINIDES PAR CONTENEUR	24
4.1. DETERMINATION GENERALE	24
4.2. DETERMINATIONS SPECIFIQUES	25
4.2.1. Détermination de la masse d'uranium	25
4.2.1.1. Méthode d'analyse	25
4.2.1.2. Calcul de la masse	25
4.2.2. Détermination de la masse de plutonium	25
4.2.2.1. Méthode d'analyse	25
4.2.2.2. Calcul de la masse	26
4.3. INCERTITUDE	26
4.4. APPLICATION NUMERIQUE SUR LE VERRE DE REFERENCE	27
5. DETERMINATION DE LA DOSE ALPHA CUMULEE A 10 000 ANS	28
5.1. METHODE D'ANALYSE	28
5.2. CALCUL DE LA DOSE ALPHA CUMULÉE À 10 000 ANS	28
5.3. INCERTITUDE	28
5.4. APPLICATION NUMERIQUE SUR LE VERRE DE REFERENCE	30
6. PARAMETRES RELATIFS AUX CONTENEURS	31
6.1. CONTAMINATION SURFACIQUE NON FIXEE	31
6.1.1. Détermination	31
6.1.2. Incertitude	31
6.2. PUISSANCE THERMIQUE DU CONTENEUR	32
6.2.1. Détermination	32
6.2.2. Incertitude	34
6.2.3. Application numérique sur le verre de référence	37

6.2.4. Evolution de la puissance thermique entre les dates de vitrification et de désentreposage	40
6.3. DEBIT DE COULEE.....	42
6.3.1. Détermination.....	42
6.3.2. Incertitude	43
6.4. REFROIDISSEMENT	44
7. DOCUMENTS CITES	45
8. ANNEXES	46
8.1. ANNEXE 1A ET 1B.....	46
8.1.1. ANNEXE 1 A – SOLUTIONS A VITRIFIER (FP ET FINES)	46
8.1.2. ANNEXE 1B – COMPOSITION DU VERRE DE REFERENCE R7/T7	47
9. ANNEXE 2 : MESURE SUR L'ECHANTILLON DE SOLUTION AJUSTEE DE PF.....	48
10. ANNEXE 3 – MESURE SUR L'ECHANTILLON DE SUSPENSION DE FINES.....	49
11. ANNEXE 4 – PRELEVEMENT ET ECHANTILLON MOYEN D'UNE SOLUTION AJUSTEE DE PF ET D'UNE SUSPENSION DE FINES.....	50
12. ANNEXE 5 : INCERTITUDES LIEES AU PROCEDE	53
13. ANNEXE 6 - PRELEVEMENT ET ECHANTILLON MOYEN DE LA FRITTE DE VERRE	54
14. ANNEXE 7 – SPECTROMETRIE D'EMISSION ICP	56
15. ANNEXE 8 – SPECTROMETRIE ALPHA ET GAMMA ..	58
16. ANNEXE 9 – SPECTROMETRIE D'ABSORPTION MOLECULAIRE	60
17. ANNEXE 10 – CHROMATOGRAPHIE IONIQUE.....	64
18. ANNEXE 11 – MESURE DE LA CONTAMINATION SURFACIQUE	66
19. TABLE DES MATIERES.....	67