

Résolution du problème inverse de la décroissance radioactive pour le calcul de la dose en radioprotection

A. Bonin et A. Tsilanizara

CEA/DEN/DANS/DM₂S/SERMA, CEA-Saclay



Objectif : Répondre à un besoin exprimé dans certaines études dédiées au calcul du DED

Composition émettrice des sources de rayonnement n'est connue que partiellement à une date t d'intérêt

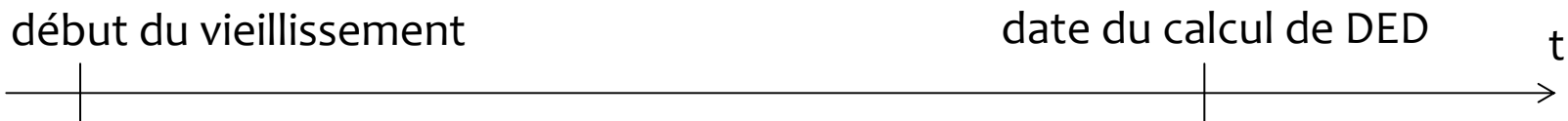
Une bonne connaissance de l'inventaire des radionucléides dans le système physique étudié et des sources de rayonnements associées ...

... Une bonne estimation du DED

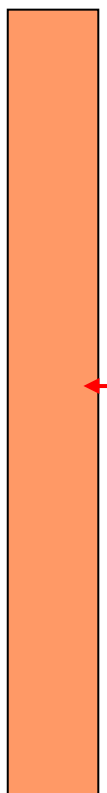


Démarche de reconstitution de la composition initiale (phase inverse) à partir d'un vecteur isotopique connu à la date t , suivie d'un calcul de vieillissement de la composition initiale (phase directe) pour compléter le bilan isotopique.

Méthode de calcul du DED dû aux isotopes inconnus



composition
initiale
inconnue

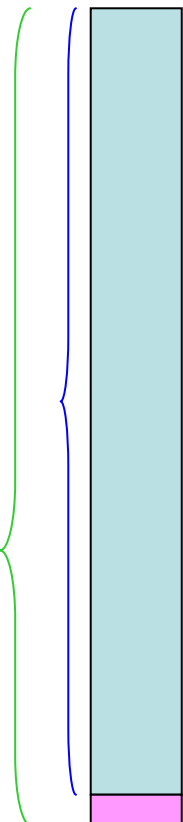


**Phase inverse du problème
(application dédiée)**



**Calcul direct
(DARWIN/PEPIN₂)**

- inventaire isotopique
- sources de rayonnements associées



composition
incomplète :
isotopes
principaux
connus

isotopes
minoritaires



- **L'application dédiée à l'étape de calcul inverse**

Fait partie d'un ensemble plus vaste de nouveaux développements en cours avec une nouvelle architecture logicielle (P.O.O. -> C++) :

- Ensemble de classes C++ (solveurs d'équation de Bateman, fonctionnalités répondant aux besoins du cycle du combustible,...)
- Bibliothèques de données nucléaires cohérentes et récentes
- ...

- **DARWIN/PEPIN₂ (Code de calculs d'évolution en exploitation)**

- Caractérisation des sources radioactives relatives à l'évolution des combustibles nucléaires ou à l'activation sous flux de neutrons d'un dispositif nucléaire ou à une simple décroissance isotopique

Soutien des partenaires industriels EDF et AREVA

Rappel du problème direct



$$N_i(0) \longrightarrow N_i(t_{ref})$$

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = -\lambda_i N_i(t) + \sum_{k=1}^{i-1} \lambda_{ki} N_k(t) \quad (1)$$

$N_i(t)$: est la concentration de l'isotope d'espèce i à l'instant t ;

λ_i : est la constante de décroissance totale de l'isotope d'espèce i ;

λ_{ki} : est le taux de désintégration de l'isotope d'espèce k vers l'isotope i .

Résolution

Solveur analytique (classe C++)

- Chaîne des décroissances (~2849 isotopes ; JEFF-3.1.1)
- durée t_{ref} de refroidissement
- approche analytique (ordonnancement de la chaîne père avant fils)



$$N_i(t_{ref}) \longrightarrow N_i(0)$$

$$N_i(t_{ref}) = \alpha_{ii}(t_{ref}) N_i(0) + \sum_k^{i-1} \alpha_{ik}(t_{ref}) N_k(0) \quad (2)$$

Hypothèse :

Les précurseurs initiaux des isotopes dits « principaux » constituant l'observable à t_{ref} de refroidissement sont les isotopes de cet observable

Déterminer les coefficients $\alpha_{ik}(t_{ref})$ traduisant le poids (ou l'importance élémentaire) de chaque isotope de l'observable aux bilans isotopiques observés à t_{ref}

Limitations : $\alpha_{ii} = 0$. \longrightarrow Période(isotope i) $\ll t_{ref}$

Problème mal posé

$$N_i(t_{ref}) = \sum_{k=1}^{i-1} \alpha_{ik}(t_{ref}) N_k(0)$$

En absence d'informations complémentaires *a priori* :

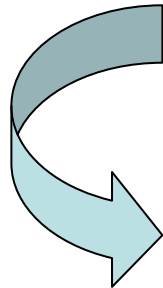
$$\left\{ \begin{array}{l} \blacksquare N_i(0) = 0. \\ \blacksquare N_j(0) = \frac{1}{\alpha_{jj}} \left[N_j(t_{ref}) - \sum_{\substack{k=1 \\ j \neq i}}^{j-1} \alpha_{jk}(t_{ref}) N_k(0) - \alpha_{ji} N_i(0) \right] \end{array} \right.$$

**Situation majorante
pour les descendants
de l'isotope i**

- Identifier les isotopes j (j>i) descendants de i



Si incohérence physique des données de l'observable
(erreurs diverses)



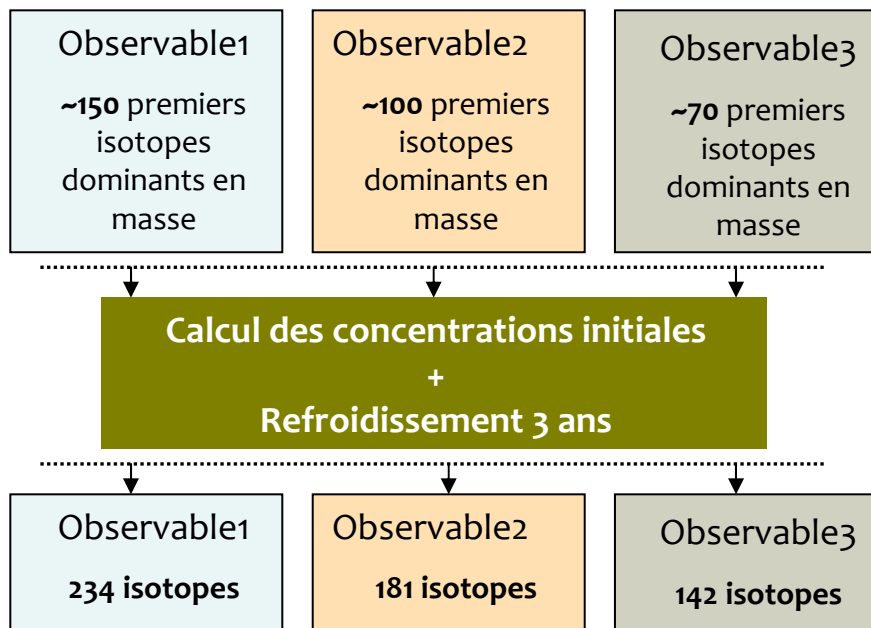
Concentrations calculées négatives !!!



Crayon combustible
Uox 3.7% - 45GWj/t
Tref 3.ans

(résultats DARWIN/PEPIN2)

3 compositions extraites de la référence
à la date d'intérêt Tref = 3 ans



Calcul DARWIN/PEPIN2 <- (JEFF-3.1.1/RDD)

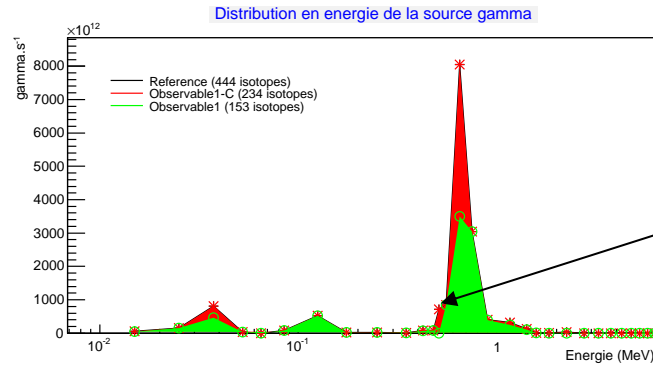
Sources de rayonnements
 γ

Sources de rayonnements
 γ

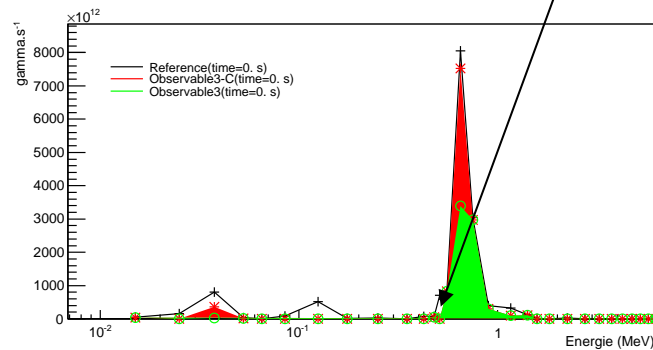
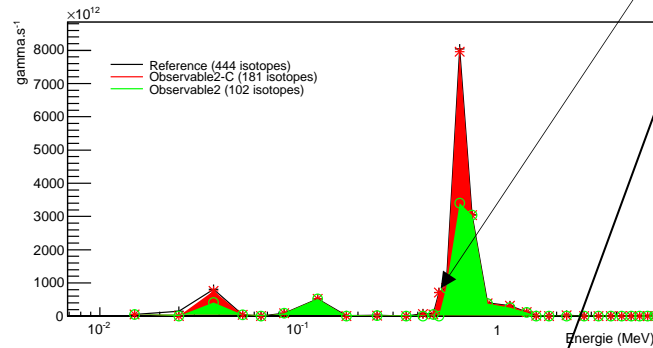
Sources de rayonnements
 γ

30 groupes d'énergie sur [0.01MeV,6.5 MeV]

Cas d'un crayon combustible UoX3.7% - 45GWj/t et $t_{ref}=3.ans$



Rh106 (T~30s)



Exemple d'application : calcul de DED

début du vieillissement

date du calcul de DED

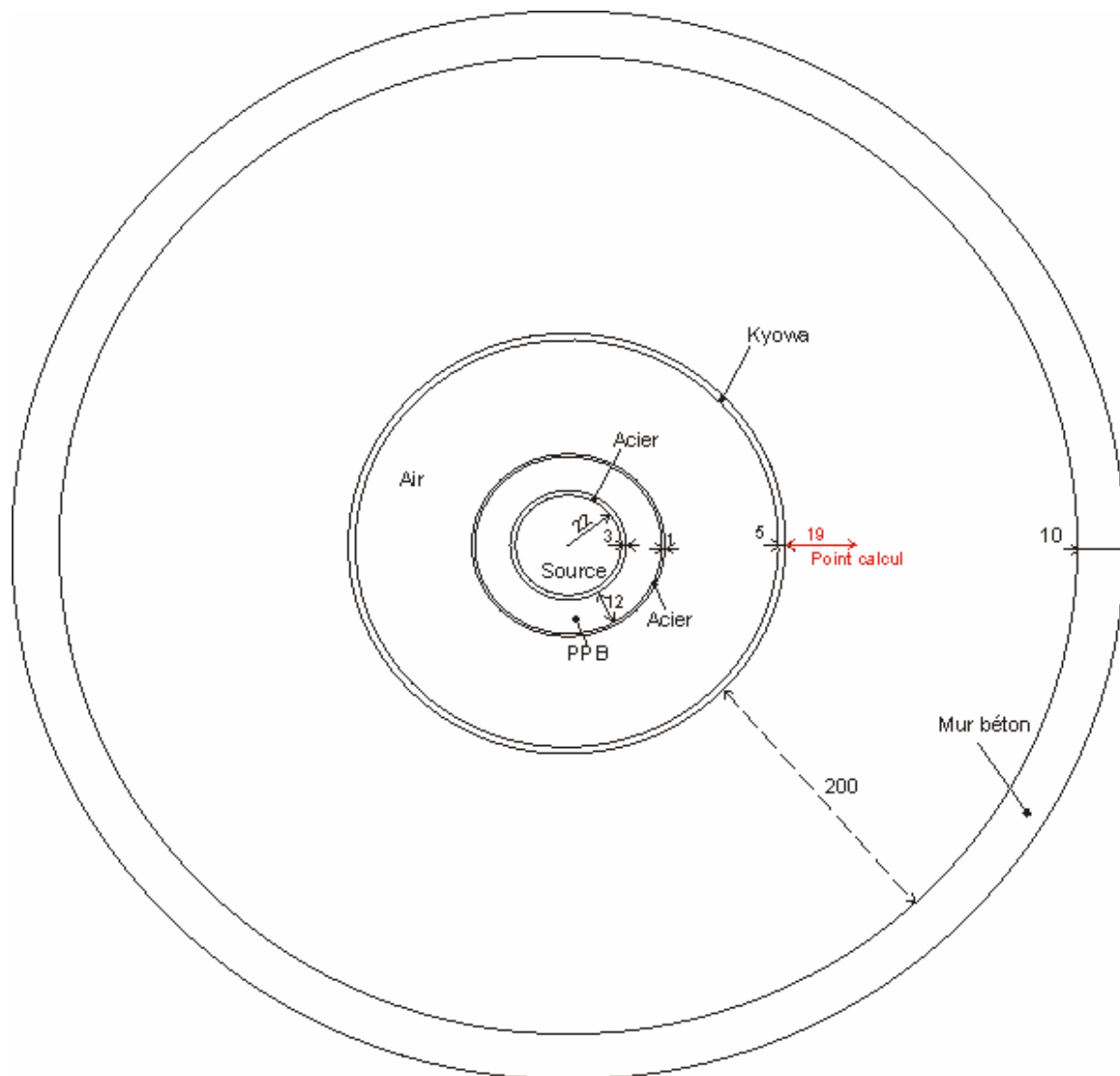
t



Masse volumique (g/cm ³)	2,5
isotope	%massiques
U232	1,83E-07
U234	2,84E-02
U235	0,68
U236	0,31
U238	73,90
Pu236	1,31E-05
Pu238	0,23
Pu239	7,59
Pu240	3,04
Pu241	1,68
Pu242	0,69
Am241	2,58E-06

isotope	%massiques	
U232	6,74E-06	2,5
U234	3,37E-02	2,5
U235	0,68	%massiques
U236	0,31	6,74E-06
U238	73,90	0,03
Pu236	6,35E-06	0,68
Pu238	0,22	0,31
Pu239	7,59	73,90
Pu240	3,04	6,35E-06
Pu241	1,45	0,22
Pu242	0,69	0,23
Am241	0,23	7,59
Np237	5,54E-04	3,04
Pu241	1,27E-04	1,45
Pu242	...	0,69
Am241	2,78E-12	0,23
TL208	7,54E-14	

Exemple d'application - Géométrie



Exemple d'application - Résultats



	Avec acier autour de la source		Avec acier, protection rapprochée et kyowaglass	
DED ($\mu\text{Sv/h}$)	composition incomplète	composition complète	composition incomplète	composition complète
n	1,60E+02	1,60E+02	9,69E+00	9,69E+00
(n, γ)	3,37E-01	3,38E-01	1,89E+00	1,89E+00
γ	1,15E+00	5,45E+01	1,60E-01	2,04E+01
total :	1,61E+02	2,15E+02	1,17E+01	3,19E+01

DED γ
dû à 90 % à
TI208

γ



Conclusion :

- Méthode adaptée pour certaines applications de calcul de DED en radioprotection (connaissance partielle de la composition du milieu source issue du vieillissement d'un mélange connu)
- Permet d'évaluer de combien on se trompe au minimum sur le DED calculé si on ne considère que le vecteur isotopique disponible
- En cours d'amélioration dans un contexte de développements évolutifs, modulaires

Merci de votre attention !