

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

**A. Bonin et A. Tsilanizara**

**CEA/DEN/DANS/DM<sub>2</sub>S/SERMA, CEA-Saclay**

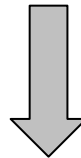


**Objectif : Répondre à un besoin exprimé dans certaines études dédiées au calcul du DED**

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

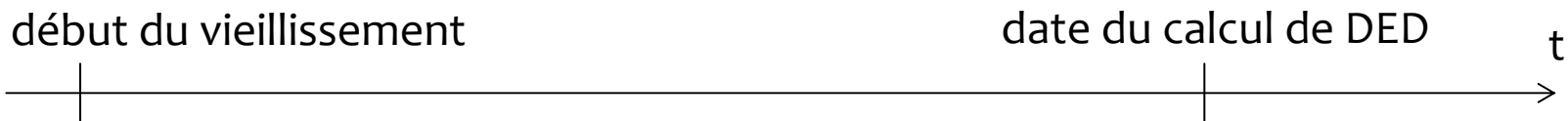
**Une bonne connaissance de l'inventaire des radionucléides dans le système physique étudié et des sources de rayonnements associées ...**

**... Une bonne estimation du DED**

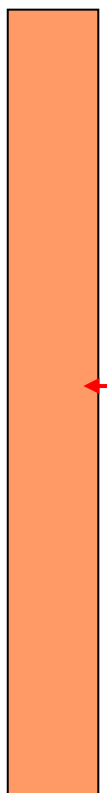


**Démarche de reconstitution de la composition initiale (phase inverse) à partir d'un vecteur isotopique connu à la date  $t$ , suivie d'un calcul de vieillissement de la composition initiale (phase directe) pour compléter le bilan isotopique.**

# Méthode de calcul du DED dû aux isotopes inconnus



composition  
initiale  
inconnue



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



**Calcul direct  
(DARWIN/PEPIN<sub>2</sub>)**

- 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/PEPIN<sub>2</sub> (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  $t$  ;

$\lambda_i$  : est la constante de décroissance totale de l'isotope d'espèce  $i$  ;

$\lambda_{ki}$  : 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  $t_{ref}$**



- Vecteur isotopique constitué de  $n$  isotopes principaux (observable)
- Ordonnement des isotopes de l'observable suivant l'ordre de leur apparition dans la chaîne ordonnée des décroissances radioactives

**n calculs directs (solveur analytique)**

$$\begin{aligned} \int_0^{t_{ref}} \frac{dN(t)}{dt} = A(\lambda)N(t) \\ \left\{ \begin{array}{l} N_i(0) = 1. \\ N_{j \neq i}(0) = 0. \end{array} \right. \end{aligned}$$

*Calcul de rang i*

$$\begin{bmatrix} \alpha_{11} & & & & \\ & \mathbf{0} & & & \\ & & \alpha_{ik} & & \\ & & & & \\ \alpha_{n1} & & & & \alpha_{nn} \end{bmatrix}$$

**Inversion de (2)**

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{ii} \neq 0. \\ N_i(0) = \frac{1}{\alpha_{ii}} \left[ N_i(t_{ref}) - \sum_{k=1}^{i-1} \alpha_{ik}(t_{ref}) N_k(0) \right] \end{array} \right.$$

**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* :

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

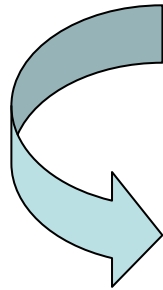
**Situation majorante  
pour les descendants  
de l'isotope i**

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





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



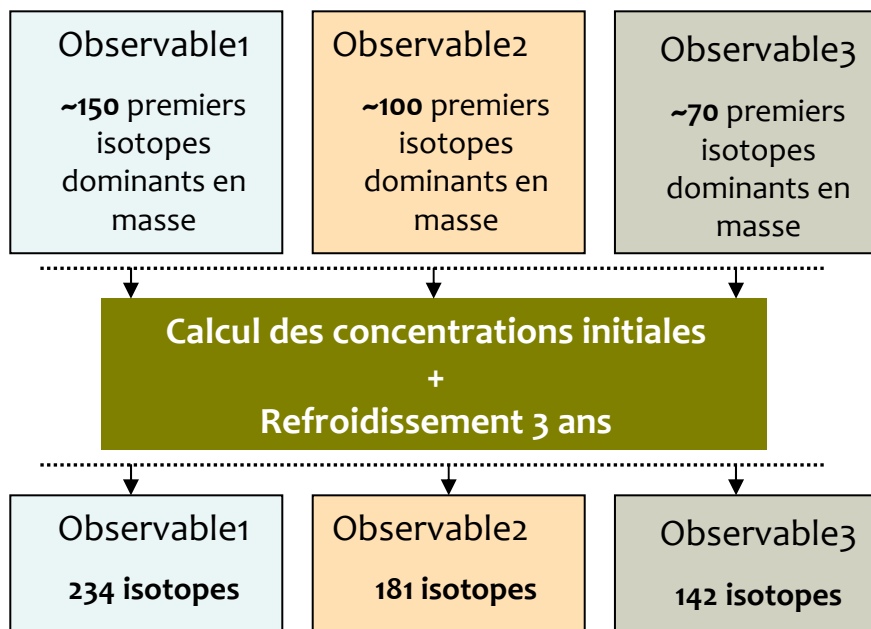
**Concentrations calculées négatives !!!**



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)**

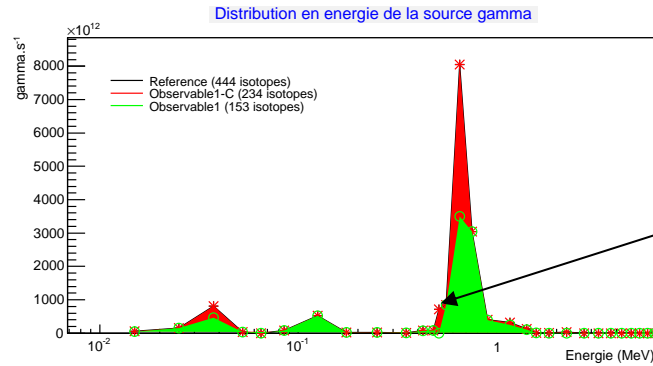
Sources de rayonnements  
 $\gamma$

Sources de rayonnements  
 $\gamma$

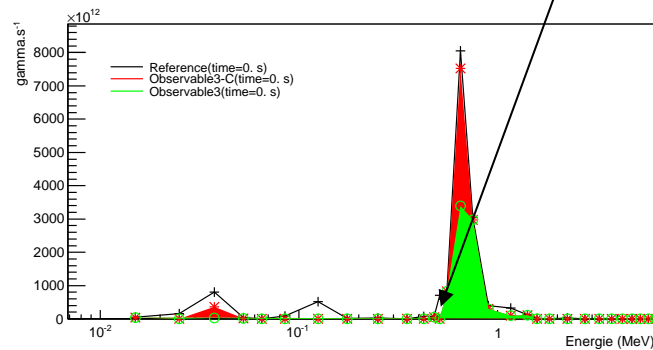
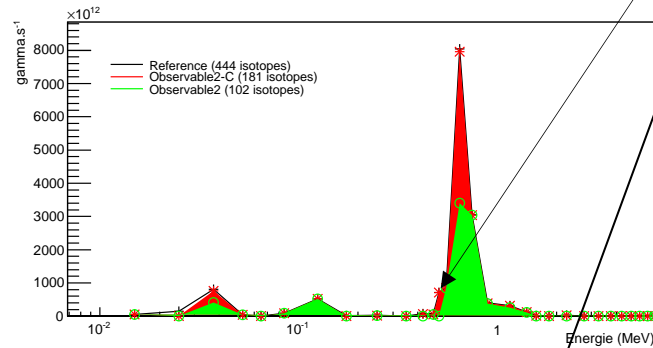
Sources de rayonnements  
 $\gamma$

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

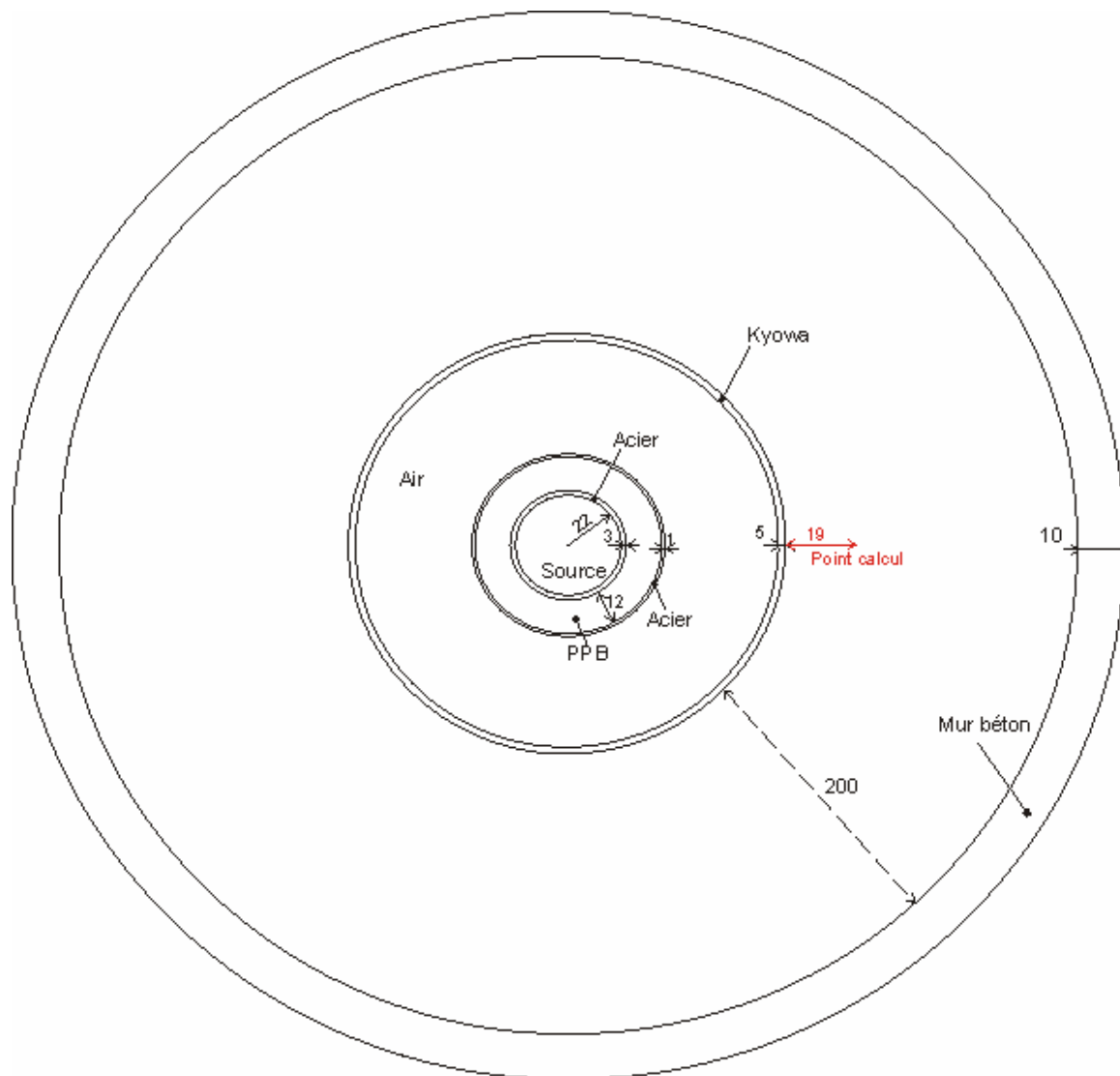
date du calcul de DED

t

Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	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
Th231	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, $\gamma$ )	3,37E-01	3,38E-01	1,89E+00	1,89E+00
$\gamma$	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  $\gamma$   
dû à 90 % à  
TI208

$\gamma$



## 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 !**