

# Utilisation du ratio d'activité isotopique Y-92/Sr-92 pour la datation d'une récente libération radioactive

---

Kassoum YAMBA<sup>1\*</sup>, Oumar SANOGO<sup>1</sup>

## Abstract

This study reports on an accurate assessment of zero time of certain nuclear events using Y-92/Sr-92 isotopic activity ratio. For a non-steady nuclear fission reaction, the dating is not possible. For the hypothesis of a nuclear explosion and for a release from a steady state nuclear fission reaction the zero-times will differ. This assessment is fast, because we propose some constants that can be used directly for the calculation of zero time and its upper and lower age limits. The assessment is accurate because of the calculation of zero time using a mathematical method, namely the weighted least-squares method, to evaluate an average value of the age of a nuclear event. This was done using two databases that exhibit differences between the values of some nuclear parameters, namely LARA and ENDF.

**Keywords:** Zero time, Isotopic Activity ratio, Y-92, Sr-92

## Résumé

Cette étude porte sur une évaluation précise du temps zéro de certains événements nucléaires en utilisant le rapport d'activité isotopique Y-92/Sr-92. Pour une réaction de fission nucléaire non stationnaire, la datation n'est pas possible. Pour l'hypothèse d'une explosion nucléaire et pour une libération d'une réaction de fission nucléaire en régime permanent, les temps zéro (date de la fin de la réaction de fission) seront différents. La différence entre les temps zéro calculés est également due à la variété des données nucléaires et radioactives dans des bases de données telles que LARA et ENDF. Ce travail propose quelques constantes utilisables directement pour le calcul du temps zéro et de ses limites d'âge supérieure et inférieure tout en tenant compte de la diversité des bases de données nucléaires. L'évaluation du temps zéro est plus précise à l'aide d'une méthode mathématique, à savoir la méthode des moindres carrés pondérés, pour estimer une valeur moyenne de l'âge d'un événement nucléaire. Cela a été fait en utilisant deux bases de données qui présentent des différences entre les valeurs de certains paramètres nucléaires, LARA et ENDF.

**Mots Clés :** Temps zero, rapport d'activité isotopique, Y-92, Sr-92

## 1. Introduction

Le Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (TICE) est un instrument juridique international qui interdit tout essai nucléaire dans tous les compartiments de l'environnement terrestre (souterrain, sur terre, dans l'eau et dans l'atmosphère). Ouvert à

---

<sup>1</sup>Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique / Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies (CNRST / IRSAT / LASERRE-GMI / DE).  
BP 7047 Ouagadougou – Burkina Faso

\***Auteur Correspondant :** Kassoum Yamba,  
E-mail: [fairlir@yahoo.fr](mailto:fairlir@yahoo.fr)

la signature en septembre 1996, le TICE est signé à la date de juillet 2022 par plus de 186 Etats. Chaque Etat partie au traité collabore avec l'Organisation du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (OTICE) dans le cadre du régime de vérification du traité, qui est un ensemble d'éléments scientifiques s'assurant du respect des termes du traité par les Etats parties. Le régime de vérification comprend le système de surveillance international (SSI), le centre international de données (CID) et l'inspection sur place (ISP). Le TICE n'est pas encore entré en vigueur, mais son régime de vérification est déjà mis en place et opérationnel. Lorsque des détections de radionucléides sont effectuées de façon anormale, l'on se questionne sur leur origine potentielle : débris d'une explosion nucléaire ? Rejet d'une centrale nucléaire en opération ?

Les représentations graphiques des rapports d'activité pour une paire d'isotopes par rapport à une autre paire à l'échelle logarithmique peuvent être utilisées pour caractériser la source de l'émission et, surtout, pour faire la distinction entre les réacteurs nucléaires et les explosions nucléaires (Kalinowski et Pistner, 2006). En considérant le rapport des noyaux ou le rapport d'activité isotopique des radionucléides mesurés, il est possible d'évaluer leur temps de libération ou âge de libération (Nir-El, 2004). Il a également été démontré que la détermination de l'âge à l'aide des rapports d'activité isotopique est très sensible à certains paramètres de décroissance comme les constantes de décroissance (Yamba *et al.*, 2016). Dans ce travail, les données de désintégration utilisées proviennent de bases de données nucléaires telles que le French NUCLEIDE du Laboratoire National Henry Becquerel (Library for gamma and alpha emissions, 2017), le US Evaluated Nuclear Data structure File (ENSDF) du National Nuclear Data Center (Evaluated Nuclear Structure Data File, 2017). Ces données sont consignées dans le tableau 1 et tableau 2. La base de données nucléaire NUCLEIDE a mis à jour certaines données de désintégration du radioxénon pertinentes pour le CTBT dans le cadre du projet DDEP (Galan *et al.*, 2018; Galan, 2017).

**Tableau 1: Rendement en produits de fission Y-92 et Sr-92 (cumulatif et indépendant) induit par les neutrons thermiques, pour les bases de données ENDF.B.VII.I (USA), JENDL.VI.0 (Japon), JEFF.III.I (Europe ), et TENDL (Europe).**

	<i>Rendement cumulé (%)</i>		<i>Rendement indépendant (%)</i>	
	$Sr_{92}$	$Y_{92}$	$Sr_{92}$	$Y_{92}$
<i>ENDF.B.VII.I</i> 2011	$5.9379E - 02$	$6.0093E - 02$	$1.0752E - 02$	$7.1483E - 04$
	$\pm 8.3130E - 04$	$\pm 6.0094E - 04$	$\pm 6.4511E - 04$	$\pm 3.2167E - 04$
<i>JENDL.VI.0</i> 2010	$5.9320E - 02$	$6.0033E - 02$	$1.0735E - 02$	$7.1374E - 04$
	$\pm 8.3339E - 04$	$\pm 6.0393E - 04$	$\pm 6.4413E - 04$	$\pm 3.2118E - 04$
<i>JEFF.III.I</i> 2005	$6.0340E - 02$	$6.0406E - 02$	$1.1548E - 02$	$6.6582E - 05$
	$\pm 6.5956E - 04$	$\pm 6.5956E - 04$	$\pm 3.2917E - 03$	$\pm 2.3276E - 05$
<i>TENDL</i> 2011	$5.9379E - 02$	$6.0093E - 02$	$1.0865E - 02$	$7.2235E - 04$
	$\pm 8.3130E - 04$	$\pm 6.0094E - 04$	$\pm 6.5189E - 04$	$\pm 3.2505E - 04$

**Tableau 2: Demi-vie des radionucléides Y-92 et Sr-92. Les valeurs et leurs incertitudes pour Y-92 et Sr-92 sont différentes. Cette situation influencera le calcul du temps zéro et les limites d'âge.**

		<i>Demi - vie (heures)</i>
<i>ENDF.B.VII.I</i>	<i>Sr - 92</i>	2.71 (1)
	<i>Y - 92</i>	3.60 (1)
<i>LARA - LNHB/CEA</i>	<i>Sr - 92</i>	2.65 (6)
	<i>Y - 92</i>	3.54 (2)

Le Strontium Sr-92 et l'Yttrium Y-92 sont deux radionucléides parents-fils qui peuvent être utilisés pour dater un récent rejet radioactif. Certains d'entre eux font l'objet de détection dans des échantillons prélevés par les stations de surveillance des radionucléides atmosphériques.

Ce travail évalue des constantes de calcul permettant une évaluation rapide et précise des dates de libération radioactive de Sr-92 et Y-92, et peuvent directement être utilisées pour la caractérisation des événements nucléaires

## 2. Approche méthodologique

Parmi les 321 stations de surveillance du SSI, 80 ont la capacité d'analyser les radionucléides, dont 40 sont équipées d'un système de détection des gaz nobles. Le SSI comprend 16 laboratoires radionucléides certifiés. Ils évaluent davantage les échantillons de filtre, si nécessaire (Schulze *et al.*, 2000). Cette étude, basée sur l'analyse des données nucléaires, prend en compte les différences numériques entre différentes constantes utilisées pour la datation des événements nucléaires. Ceci nous permet de proposer quelques paramètres pour une évaluation rapide et précise du temps zéro.

### 2.1. Caractérisation des événements nucléaires

Les explosions nucléaires peuvent être distinguées des sources civiles, par exemple, en termes de rejet de radionucléides ou d'impact physique. Par conséquent, les événements suspects nécessitent d'abord l'examen des caractéristiques physiques des échantillons. La température élevée d'une explosion nucléaire souterraine forme une roche vitrifiée au fond de la cavité, qui pourrait être trouvée par forage. Un dépôt de déchets de réacteurs nucléaires ne présenterait pas une telle caractéristique. Cela sert de critère unique pour déterminer l'occurrence d'une réaction nucléaire (Bin, 1998).

La deuxième étape est la mesure de l'émission de rayonnements gamma et bêta des échantillons. Un échantillon hautement radioactif suggérerait de manière significative la présence d'une source de fission nucléaire.

La troisième étape est l'estimation des abondances des isotopes dans les échantillons en mesurant les intensités du rayonnement. Sur la base des principes susmentionnés, Le temps de fission sera également déterminé, si les isotopes analysés sont uniformément mélangés. Comme décrit, certains gaz nobles, éléments volatils et leurs éléments filles auraient été épuisés dans la roche vitrifiée. Il faut éviter d'utiliser de tels éléments lors de l'estimation du temps de fission (Bin, 1998).

On peut également noter qu'une réaction de fission dure des mois à des années. Les isotopes dont la demi-vie est inférieure à quelques semaines seraient présents en quantité réduite dans les déchets. Par conséquent, si la quantité d'isotopes à courte demi-vie dans les échantillons est inférieure à celle attendue dans les explosions nucléaires, l'échantillon de forage pourrait provenir d'un dépôt de déchets de réacteur. En revanche, la réaction de fission se produit presque au même moment dans une explosion nucléaire, et le temps de la fission pourrait être calculé en mesurant les rapports d'abondance de diverses paires

d'isotopes. Chaque rapport pourrait être utilisé pour estimer un temps de fission. Si la valeur moyenne du temps de fission estimée à partir des isotopes et l'heure d'un événement suspect détecté par le SSI coïncident, l'événement pourrait être confirmé comme une explosion nucléaire.

En ce qui concerne la datation des événements nucléaires, la désintégration radioactive peut être utilisée de différentes manières. Les plus fiables sont les rapports isotopiques des radionucléides parents-fils ou ceux du même élément. En principe, deux radionucléides quelconques peuvent être utilisés pour dater une libération radioactive.

## 2.2. Le ratio Y-92/Sr-92 utilisé comme horloge dans le cas d'une libération soudaine (explosion nucléaire)

De nombreux radionucléides (résultant ou non de la même chaîne de désintégration) peuvent aider à dater l'âge d'un événement nucléaire. Sr-92 et Y-92 sont deux parmi ceux qui ont une filiation (c'est-à-dire une relation parent-fils). Le strontium 92 (Sr-92) se désintègre par émissions bêta moins au niveau excité d'Yttrium 92 (Y-92), puis Y-92 se désintègre par émissions bêta moins au niveau excité de Zn-92. Cette chaîne de désintégration peut être utilisée pour évaluer l'âge d'un événement nucléaire.

Une explosion nucléaire entraîne la création soudaine et la libération subséquente possible de radionucléides.

Les équations différentielles de décroissance sont données comme suit :

$$\frac{dN_{Sr}(t)}{dt} + \lambda_{Sr}N_{Sr}(t) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dN_Y(t)}{dt} + \lambda_Y N_Y(t) = \lambda_{Sr}N_{Sr}(t) \quad (2)$$

où  $\lambda_{Sr}$  est la constante de désintégration de Sr-92,  $\lambda_Y$  est la constante de désintégration de Y-92,  $N_{Sr}$  représente le nombre de particules de Sr-92 et  $N_Y$  représente le nombre de particules de Y-92. Pour résoudre ces équations, on suppose que, lors du relâchement des radionucléides, les nombres de particules  $N_{Sr}(t=0)$  et  $N_Y(t=0)$  sont non nuls. En cas d'explosion nucléaire, il s'agit du rendement initial. Ainsi, on obtient :

$$A_{Sr}(t) = A_{Sr}(0)e^{-\lambda_{Sr}t} \quad (3)$$

$$A_Y(t) = A_{Sr}(0) \frac{\lambda_Y}{\lambda_Y - \lambda_{Sr}} (e^{-\lambda_{Sr}t} - e^{-\lambda_Y t}) + A_Y(0)e^{-\lambda_Y t} \quad (4)$$

où  $A_{Sr}$  et  $A_Y$  sont les activités isotopiques de Sr-92 et Y-92, respectivement. Alors, le rapport d'activité isotopique  $r(t) = \frac{A_Y(t)}{A_{Sr}(t)}$  de ces radionucléides est donné par :

$$r(t) = \frac{\lambda_Y}{\lambda_Y - \lambda_{Sr}} + \left( \frac{A_Y(0)}{A_{Sr}(0)} - \frac{\lambda_Y}{\lambda_Y - \lambda_{Sr}} \right) e^{(\lambda_{Sr} - \lambda_Y)t} \quad (5)$$

où  $\frac{A_Y(0)}{A_{Sr}(0)}$  est le taux d'activité isotopique au moment du rejet, et l'approximation suivante peut être faite :  $\frac{A_Y(0)}{A_{Sr}(0)} = \frac{\lambda_Y \gamma_Y}{\lambda_{Sr} \gamma_{Sr}}$  où  $\gamma_{Sr}$  et  $\gamma_Y$  sont respectivement le rendement de fission cumulé de Sr-92 et le rendement de fission indépendant de Y-92. On peut s'attendre à ce que l'erreur d'estimation au temps zéro introduite par cette approximation soit inférieure à quelques minutes.

Le temps zéro (c'est-à-dire l'âge) d'une explosion nucléaire peut être évalué en résolvant l'équation. (5) par rapport à t comme suit :

$$t = \frac{1}{\lambda_{Sr} - \lambda_Y} \ln \left( \frac{r - \frac{\lambda_Y}{\lambda_Y - \lambda_{Sr}}}{\frac{\lambda_Y \gamma_Y}{\lambda_{Sr} \gamma_{Sr}} - \frac{\lambda_Y}{\lambda_Y - \lambda_{Sr}}} \right) \quad [6]$$

Éq. (6) peut être simplement réécrite comme :

$$t = U \cdot \ln \left( \frac{r - A}{F - A} \right) \quad (7)$$

Avec:

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \frac{\lambda_Y}{\lambda_Y - \lambda_{Sr}} \text{ with } \Delta A = \frac{\lambda_Y}{\lambda_Y - \lambda_{Sr}} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta \lambda_Y}{\lambda_Y}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{(\Delta \lambda_Y)^2 + (\Delta \lambda_{Sr})^2}}{\lambda_Y - \lambda_{Sr}}\right)^2} \\ U = \frac{1}{\lambda_{Sr} - \lambda_Y} \text{ with } \Delta U = \frac{\sqrt{(\Delta \lambda_{Sr})^2 + (\Delta \lambda_Y)^2}}{(\lambda_{Sr} - \lambda_Y)^2} \\ F = \frac{\lambda_Y \gamma_Y}{\lambda_{Sr} \gamma_{Sr}} \text{ with } \Delta F = F \sqrt{\left(\frac{\Delta \lambda_Y}{\lambda_Y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \lambda_{Sr}}{\lambda_{Sr}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Y_{Sr}}{Y_{Sr}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Y_Y}{Y_Y}\right)^2} \end{array} \right. \quad (8)$$

Cette équation peut être simplifiée davantage pour faciliter le calcul de l'incertitude :

$$J = \frac{r - A}{F - A} \text{ avec } \Delta J = J \cdot \sqrt{\left(\frac{\sqrt{(\Delta r)^2 + (\Delta A)^2}}{r - A}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{(\Delta F)^2 + (\Delta A)^2}}{F - A}\right)^2} \quad (9)$$

Les limites d'âge supérieure ( $t_{up}$ ) et inférieure ( $t_{low}$ ) sont évaluées comme suit :

$$\begin{cases} t = U \ln(J) \\ t_{up} = (U + \Delta U) \ln(J + \Delta J) \\ t_{low} = (U - \Delta U) \ln(J - \Delta J) \end{cases} \quad (10)$$

Le rapport d'activité mesuré (au temps de référence) par spectrométrie gamma (Nir-El, 2006, 2004) s'écrit :

$$r = \frac{A_{La}}{A_{Sr}} = \frac{N_Y c c f_Y \lambda_Y \varepsilon_{Sr} P_{Sr} (1 - e^{-\lambda_{Sr} t_c})}{N_{Sr} c c f_{Sr} \lambda_{Sr} \varepsilon_Y P_Y (1 - e^{-\lambda_Y t_c})} - \frac{\lambda_Y}{\lambda_Y - \lambda_{Sr}} \left( \frac{\lambda_Y (1 - e^{-\lambda_{Sr} t_c})}{\lambda_{Sr} (1 - e^{-\lambda_Y t_c})} - 1 \right) \quad (11)$$

où  $N_{Sr}$  et  $N_Y$  sont les aires nettes des pics de Sr-92 et Y-92, respectivement,  $\varepsilon_{Sr}$  et  $\varepsilon_{La}$  sont respectivement les efficacités du détecteur à un niveau d'énergie particulier,  $c c f_{Sr}$  et  $c c f_Y$  sont les facteurs de correction de coïncidence selon les conditions de mesure, les facteurs de correction de coïncidence,  $P_{Sr}$  et  $P_Y$  sont les probabilités d'émission au niveau d'énergie spécifié, et  $t_c$  est le temps de mesure.

Afin de faciliter les calculs d'incertitude, la simplification suivante est possible :

$$r = C L(B - A) + A, \quad (12)$$

Avec:

$$\begin{cases} C = \frac{(1 - e^{-\lambda_{Sr} t_c})}{(1 - e^{-\lambda_Y t_c})} \\ L = \frac{\lambda_Y}{\lambda_{Sr}} \\ B = \frac{N_Y c c f_Y \varepsilon_{Sr} P_{Sr}}{N_{Sr} c c f_{Sr} \varepsilon_Y P_Y} \\ A \text{ est défini précédemment} \end{cases} \quad (13)$$

La détermination des incertitudes associées aux différents paramètres peut être faite comme suit :

$$\Delta C = \sqrt{\left( \frac{t_c e^{-\lambda_{Sr} t_c}}{1 - e^{-\lambda_Y t_c}} \right)^2 (\Delta \lambda_{Sr})^2 + \left( C \frac{t_c e^{-\lambda_Y t_c}}{1 - e^{-\lambda_Y t_c}} \right)^2 (\Delta \lambda_Y)^2} \quad (14)$$

$$\Delta L = \frac{\lambda_Y}{\lambda_{Sr}} \cdot \sqrt{\left( \frac{\Delta \lambda_Y}{\lambda_Y} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \lambda_{Sr}}{\lambda_{Sr}} \right)^2} \quad (15)$$

$$\Delta B = B \sqrt{\left( \left( \frac{\Delta N_{Sr}}{N_{Sr}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \varepsilon_{Sr}}{\varepsilon_{Sr}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta P_{Sr}}{P_{Sr}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta c c f_{Sr}}{c c f_{Sr}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta N_Y}{N_Y} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \varepsilon_Y}{\varepsilon_Y} \right)^2 + \left( \frac{\Delta P_Y}{P_Y} \right)^2 + \left( \frac{\Delta c c f_Y}{c c f_Y} \right)^2 \right)} \quad (16)$$

Enfin, on obtient l'incertitude du rapport d'activité mesuré à l'instant de référence (début des mesures) par :

$$\Delta r = \sqrt{\left( C \cdot L \cdot (B - A) \cdot \sqrt{\left( \frac{\Delta C}{C} \right)^2 + \left( \frac{\Delta L}{L} \right)^2 + \left( \frac{\sqrt{\Delta B^2 + \Delta A^2}}{B - A} \right)^2} \right)^2 + (\Delta A)^2} \quad (17)$$

### 2.3. Le ratio Y-92/Sr-92 utilisé comme horloge dans le cas d'une libération continue (centrale nucléaire)

Dans le cas où la source n'est pas une explosion nucléaire, nous supposons une libération de radionucléides provenant d'une réaction de fission nucléaire en cours dans un réacteur nucléaire.

Les équations différentielles de décroissance sont données comme suit :

$$\frac{dN_{Sr}(t)}{dt} + \lambda_{Sr} N_{Sr}(t) = K_{Sr} \quad (18)$$

$$\frac{dN_Y(t)}{dt} + \lambda_Y N_Y(t) = \lambda_{Sr} N_{Sr}(t) + K_Y \quad (19)$$

où  $K_{Sr}$  et  $K_Y$  sont les taux de production de Sr-92 et Y-92, respectivement. En résolvant ces équations, on obtient :

$$A_{Sr} = K_{Sr} (1 - e^{-\lambda_{Sr} t}) \quad (20)$$

$$A_Y = K_{Sr} \frac{\lambda_Y}{\lambda_Y - \lambda_{Sr}} (1 - e^{-\lambda_{Sr} t}) + \left( K_Y - K_{Sr} \frac{\lambda_{Sr}}{\lambda_Y - \lambda_{Sr}} \right) (1 - e^{-\lambda_Y t}) \quad (21)$$

où  $A_{Sr}$  et  $A_Y$  sont les activités isotopiques de Sr-92 et Y-92, respectivement. Le rapport d'activité  $r = \frac{A_Y}{A_{Sr}}$  est exprimé par :

$$r(t) = \frac{\lambda_Y}{\lambda_Y - \lambda_{Sr}} + \left( \frac{K_Y}{K_{Sr}} - \frac{\lambda_{Sr}}{\lambda_Y - \lambda_{Sr}} \right) \frac{(1 - e^{-\lambda_Y t})}{(1 - e^{-\lambda_{Sr} t})} \quad (22)$$

### 3. Résultats et Discussion

Cette étude portant sur l'utilisation du ratio d'activité isotopique Y-92/Sr-92 des éléments Strontium et Yttrium prend en compte les deux modes majeurs de libération radioactives : une libération soudaine comme dans le cas d'une explosion nucléaire, et une libération continue des centrales nucléaires. Les équations différentielles résolues permettent de comprendre l'évolution dans le temps du ratio isotopique.

Notons que l'équation (Eq.22) n'est applicable que dans un intervalle de temps  $[t_c ; t_0]$ , où  $t_0$  est le moment de la libération et  $t_c$  est le moment du début de la fission. Pour  $t \in [t_c ; t_0]$ ,  $r(t)$  est noté  $r_0$ .

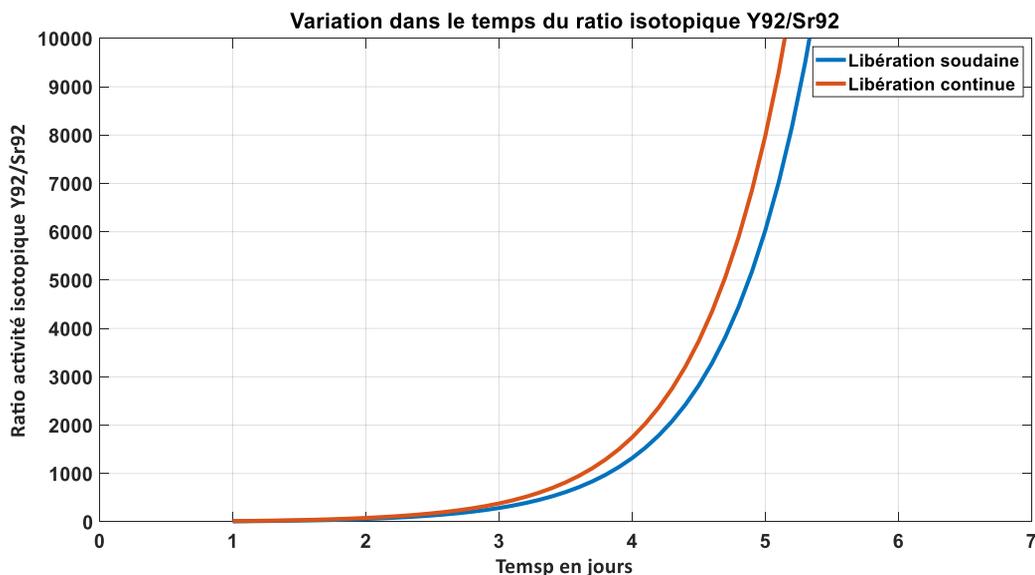
Les valeurs de temps zéro pour l'explosion nucléaire et la source non explosive peuvent être obtenues en utilisant les données issues des bases de données ENDF B.VII.I et LNHB/CEA indiquées dans les tableaux 1 et 2. La méthode des moindres carrés pondérés (Björck, 1990) permet d'obtenir la moyenne de différentes valeurs d'âge calculées à partir de différentes bases de données nucléaires, qui s'exprime comme

$$J_{average} = \frac{\sum_{i=1}^2 \left( \frac{1}{\Delta J_i^2} \right) J_i}{\sum_{i=1}^2 \frac{1}{\Delta J_i^2}}, \quad (23)$$

où  $J$  est un paramètre défini précédemment (Eq. 9).

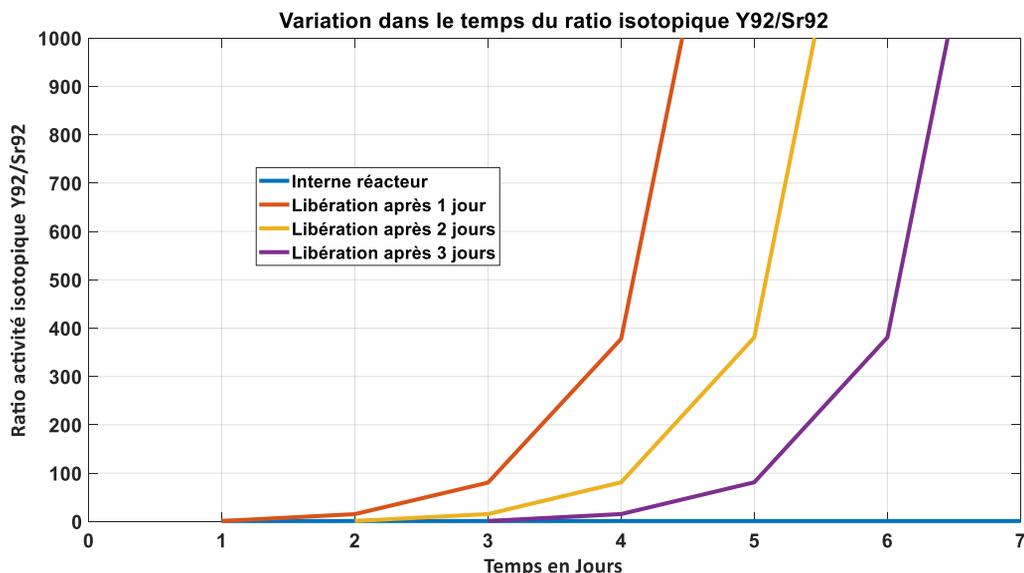
Il n'est pas possible d'utiliser le taux d'activité mesuré pour déterminer le temps de relâchement dans l'hypothèse d'un scénario sans explosion à l'équilibre, car sa valeur est presque identique au niveau d'équilibre. Cela serait cohérent avec l'hypothèse d'aucun délai entre la libération d'une source et le début de l'acquisition du spectre, alors qu'en réalité 24 heures d'échantillonnage et 24 heures de décroissance s'écoulent entre la libération et la mesure du rayonnement. En général, pour des rapports d'activité mesurés inférieurs à 1, le scénario de rejet d'une source non explosive à l'équilibre peut être exclu.

La datation d'une libération en utilisant le ratio Y-92/Sr-92 est possible pour une récente libération en raison de la demi-vie des éléments utilisés. De plus le Strontium ayant une période radioactive plus courte que le Yttrium, l'évolution dans le temps du ratio isotopique Y-92/Sr-92 diverge, comme on peut le voir sur la figure 1.



**Figure 1: Evolution dans le temps du rapport d'activité isotopique Y-92/Sr-92 selon le type de libération radioactive : libération soudaine et libération continue.**

La figure 2 présente un aperçu de l'évolution dans le temps du ratio Y-92/Sr-92 à l'intérieur d'un réacteur nucléaire. On peut remarquer que tant que le processus de fission continue, un équilibre règne entre ces deux éléments.



**Figure 2 : Evolution du rapport d'activité isotopique de Y-92/Sr-92 dans le temps à l'intérieur d'un réacteur nucléaire et selon le moment de libération : 1, 2 et 3 jours.**

Les données de désintégration peuvent être trouvées en ligne dans les bases de données nucléaires telles que le LARA du Laboratoire National Henry Becquerel (Library for gamma and alpha emissions, 2017) ou ENSDF du National Nuclear Data Center (Evaluated Nuclear Structure Data File, 2017). Les données sur le rendement de fission se trouvent dans les fiches de données nucléaires (Otuka *et al.*, 2014). Une version en ligne est accessible via <https://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>. Il est très important de prendre en considération les données de décroissance, car le calcul de l'âge est très sensible aux paramètres de mesure et de décroissance mentionnés (Yamba *et al.*, 2016).

## 4. Conclusion

Dans cette étude, nous avons étudié les différentes approches possibles pour évaluer le temps zéro d'un événement nucléaire et les limites d'âge correspondantes, en utilisant le rapport d'activité isotopique de la paire de radionucléides Sr-92 et Y-92. Nous avons également proposé un outil mathématique, appliquant la méthode des moindres carrés pondérés, pour calculer avec précision le temps zéro d'un événement nucléaire. Comme les bases de données nucléaires ne présentent pas toujours les mêmes valeurs de certaines constantes utilisées pour le processus de datation, il est très important de prendre en compte les valeurs fournies par les bases de données nucléaires telles que ENDF V.II.I ou LARA-LNHB/CEA. Nous avons finalement appliqué notre technique pour évaluer quelques constantes (Tableau 3) pouvant être directement utilisées pour l'évaluation du temps zéro d'une libération contenant les radionucléides Sr-92 et Y-92.

**Tableau 3: Paramètres calculés pour une évaluation rapide et précise du temps zéro en utilisant le rapport d'activité Y-92/Sr-92**

	$U$	$A$	$F$
<i>ENDF.B.VII.1</i>	0.63361	-2.9775	0.0090118
	$\pm 0.058048$	$\pm 0.2733$	$\pm 0.0040627$
<i>LARA - LNHB/CEA</i>	0.65894	-3.0449	0.0090623
	$\pm 0.011305$	$\pm 0.052919$	$\pm 0.0040802$

Il sera très intéressant d'appliquer notre méthode de calcul à d'autres couples de radionucléides, de proposer des constantes nucléaires permettant un calcul simple et efficace de l'âge d'un événement nucléaire au cas où ces couples des isotopes sont observés.

## Références

Bin, L.: Analysis of fission products— a method for verification of a CTBT during on-site inspections, *Sci. Glob. Secur.*, 7, 195–207, <https://doi.org/10.1080/08929889808426454>, 1998.

Björck, Å.: Least squares methods, in: *Handbook of Numerical Analysis*, vol. Volume 1, Elsevier, 465–652, 1990.

Galan, M.: RADIOXENONS NUCLEAR DATA EVALUATIONS PROJECT, 2017.

Galan, M., Kalinowski, M., Gheddou, A., and Yamba, K.: New evaluated radioxenon decay data and its implications in nuclear explosion monitoring, *J. Environ. Radioact.*, 192, 628–634, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.02.015>, 2018.

Kalinowski, M. B. and Pistner, C.: Isotopic signature of atmospheric xenon released from light water reactors, *J. Environ. Radioact.*, 88, 215–235, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.02.003>, 2006.

Library for gamma and alpha emissions: <http://www.nucleide.org/Laraweb/>, last access: 1 May 2017.

Nir-El, Y.: Dating the age of a nuclear event by gamma spectrometry, *Proc. 14th Int. Conf. Radionucl. Metrol. Its Appl. ICRM 2003*, 60, 197–201, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2003.11.016>, 2004.

Evaluated Nuclear Structure Data File: <http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>, last access: 1 May 2017.

Otuka, N., Dupont, E., Semkova, V., Pritychenko, B., Blokhin, A. I., Aikawa, M., Babykina, S., Bossant, M., Chen, G., Dunaeva, S., Forrest, R. A., Fukahori, T., Furutachi, N., Ganesan, S., Ge, Z., Gritzay, O. O., Herman, M., Hlavač, S., Katō, K., Lalremruata, B., Lee, Y. O., Makinaga, A., Matsumoto, K., Mikhaylyukova, M., Pikulina, G., Pronyaev, V. G., Saxena, A., Schwerer, O., Simakov, S. P., Soppera, N., Suzuki, R., Takács, S., Tao, X., Taova, S., Tárkányi, F., Varlamov, V. V., Wang, J., Yang, S. C., Zerkin, V., and Zhuang, Y.: Towards a More Complete and Accurate Experimental Nuclear Reaction Data Library (EXFOR): International Collaboration Between Nuclear Reaction Data Centres (NRDC), *Nucl. Data Sheets*, 120, 272–276, <https://doi.org/10.1016/j.nds.2014.07.065>, 2014.

Schulze, J., Auer, M., and Werzi, R.: Low level radioactivity measurement in support of the CTBTO, *Appl. Radiat. Isot.*, 53, 23–30, [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(00\)00182-2](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(00)00182-2), 2000.

Yamba, K., Sanogo, O., Kalinowski, M. B., Nikkinen, M., and Koulidiati, J.: Fast and accurate dating of nuclear events using La-140/Ba-140 isotopic activity ratio, *Appl. Radiat. Isot.*, 112, 141–146, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.03.013>, 2016.