
LABORATOIRE NATIONAL
HENRI BECQUEREL

Note Technique LNHB/01/09/F

**ETNA (Efficiency Transfer for Nuclide
Activity measurements)**

**Logiciel pour le calcul du transfert de rendement
et des corrections de coïncidences
en spectrométrie gamma**

Marie-Christine Lépy, Marie-Martine Bé, François Piton

**Avril 2001
Révision Février 2004**

ETNA (Efficiency Transfer for Nuclide Activity measurements)

Logiciel pour le calcul du transfert de rendement et des corrections de coïncidences en spectrométrie gamma

Marie-Christine Lépy, Marie-Martine Bé, François Piton

SOMMAIRE

1. Introduction.....	3
2. Transfert de rendement.....	4
2.1. Variation de rendement associé à un déplacement de source ponctuelle	4
2.2. Généralisation au cas d'une source volumique	6
2.3. Procédure de calcul.....	8
2.3.1. Intégration	8
2.3.2. Distances parcourues dans les différents matériaux.....	9
3. Corrections de coïncidences.....	12
3.1. Effet des coïncidences sur un spectre de photons.....	12
3.2. Exemple appliqué à un schéma de désintégration à 2 niveaux excités.....	14
3.3. Cas général d'un schéma à plusieurs niveaux	15
3.3.1. Correction relative à une raie γ_{ij}	15
3.3.2. Correction relative aux raies XK.....	17
3.4. Cas particuliers.....	18
3.4.1. Emission bêta +	18
3.4.2. Schéma de désintégration à deux voies.....	19
3.4.3. Schéma de désintégration avec un niveau métastable.....	19
3.5. Cas d'échantillons non ponctuels.....	19
4. Présentation du logiciel.....	21
4.1. Généralités	21
4.2. Calcul du transfert de rendement.....	24
4.3. Calcul des corrections de coïncidences.....	25
5. Conclusion.....	25
6. Bibliographie	27
ANNEXE 1 : Notice d'utilisation	29

A1_1 Généralités	29
A1_2 Transfert de rendement	30
A1_2.1 Description de la source	32
A1_2.2 Description de l'écran	33
A1_2.3 Description du détecteur.....	34
A1_2.4 Rendement.....	35
A1_2.5 Traitement	37
A1_3 Corrections de coïncidences	39
A1_3.1 Radionucléide	39
A1_3.2 Géométrie	39
A1_3.3 Traitement	40
A1_4 Divers.....	42
A1_4.1 Mise à jour des données de décroissance	42
A1_4.2 Gestion des matériaux	43
A1_4.3 Définition du seuil pour le calcul des corrections de coïncidences	44
ANNEXE 2 : Rappel de quelques définitions.....	45
A2_1 Données caractérisant le schéma de désintégration	45
A2_1.1 Transition gamma.....	45
A2_1.2 Emission gamma	45
A2_1.3 Conversion interne	45
A2_1.4 Emission X consécutive à la conversion interne	46
A2_1.5 Capture électronique	47
A2_2 Paramètres caractérisant l'appareillage	47
A2_2.1 Rendement d'absorption totale.....	47
A2_2.2 Rendement total.....	47

ETNA (Efficiency Transfer for Nuclide Activity measurements)

Logiciel pour le calcul du transfert de rendement et des corrections de coïncidences en spectrométrie gamma

Marie-Christine Lépy, Marie-Martine Bé, François Piton

1. Introduction

La qualité des mesures effectuées par spectrométrie gamma dépend généralement directement de la connaissance du rendement de détection pour les conditions géométriques de l'ensemble source-détecteur. Compte tenu de la grande diversité des échantillons couramment mesurés, des étalons ne sont pas disponibles pour l'ensemble des milieux et des conditionnements rencontrés. Les utilisateurs doivent alors mettre au point des méthodes expérimentales pour réaliser des références spécifiques. Ces techniques sont plus ou moins fiables et requièrent des durées d'expérimentation parfois incompatibles avec les exigences des mesures de routine. De plus, dans le cas de mesure en géométrie rapprochée, nécessaire en particulier pour la mesure d'échantillons de l'environnement, les phénomènes de coïncidences perturbent le spectre et faussent les surfaces des pics, conduisant en cela à des résultats quantitatifs erronés.

Le logiciel ETNA (Efficiency Transfer for Nuclide Activity measurements) a été conçu pour pallier ces deux difficultés. Il s'agit d'un outil de calcul qui offre une solution pratique et conviviale aux problèmes couramment rencontrés dans les laboratoires de mesure. Il permet de calculer d'une part le rendement d'un détecteur pour des conditions de mesure différentes des conditions d'étalonnage, et d'autre part les corrections de coïncidences. Il permet ainsi d'améliorer la précision des résultats d'analyse quantitative par spectrométrie gamma, tout en évitant de fastidieuses séquences de mesure.

Pour réaliser ce code, deux logiciels précédemment écrits en FORTRAN [1-2] ont été repris et améliorés, puis ils ont été intégrés sous un environnement Windows[®] afin de faciliter leur utilisation. Des bases de données ont été incluses ; elles permettent d'enregistrer les caractéristiques de différentes géométries et autorisent la mise à jour des données caractérisant les matériaux et les schémas de désintégration.

2. Transfert de rendement

Pour des conditions de mesure différentes des conditions d'étalonnage, la variation du rendement peut être déterminée à partir des variations des paramètres géométriques de l'ensemble source-détecteur.

Ce calcul permet alors de connaître le rendement correspondant à des échantillons non ponctuels et/ou des distances différentes et, par conséquent, d'en établir également les corrections de coïncidences.

2.1. Variation de rendement associé à un déplacement de source ponctuelle

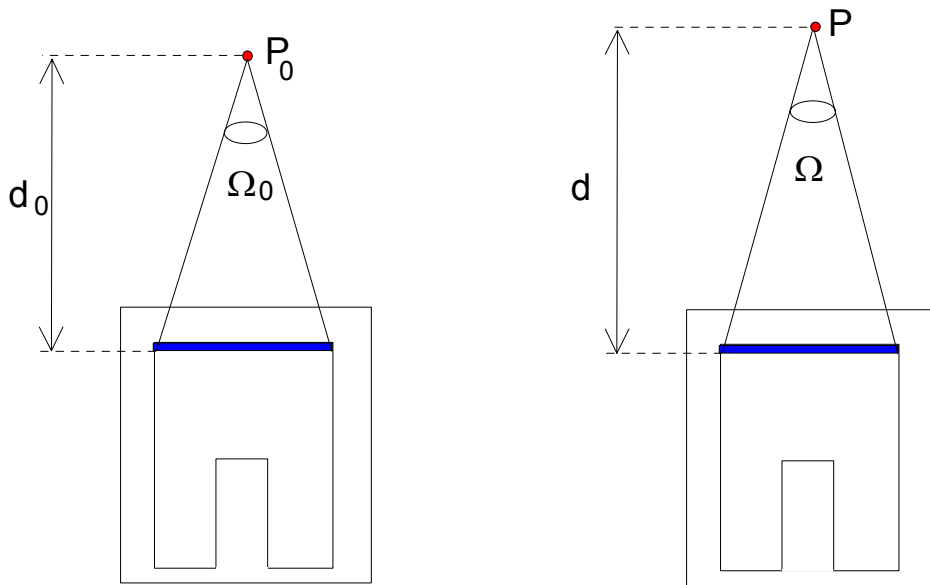


Figure 1 : Déplacement d'une source ponctuelle dans l'axe du détecteur

Le cas de base considère un étalonnage en rendement connu pour une source ponctuelle située à la position P_0 ; pour une énergie E , le rendement peut s'exprimer comme le produit de deux termes :

$$R(E, P_0) = RI(E) \cdot \Omega(P_0),$$

où $RI(E)$ représente le rendement intrinsèque du détecteur pour l'énergie E et $\Omega(P_0)$ l'angle solide sous-tendu par le point P_0 et la surface active du détecteur [3].

Pour un point situé à une distance P différente, le rendement s'écrit d'une façon similaire :

$$R(E, P) = RI(E) \cdot \Omega(P)$$

Ce qui permet d'établir la relation de base :

$$R(E, P) = R(E, P_0) \cdot \frac{\Omega(P)}{\Omega(P_0)}$$

et d'en déduire le coefficient de transfert comme le rapport des angles solides correspondant respectivement aux positions de mesure et d'étalonnage, P et P₀.

En coordonnées polaires, l'angle solide, $\Omega(P)$, sous-tendu par le point P (r, φ , z_S) s'écrit :

$$\Omega(P) = 2 \cdot z_S \int_0^\pi d\varphi \int_0^{R_D} \frac{R \cdot dR}{\left[R^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos \varphi + r^2 + z_S^2 \right]^{3/2}}$$

R_D étant le rayon de la zone active de détection.

Dans le cas général, le calcul est établi pour une géométrie source-détecteur cylindrique coaxiale et tient compte d'un détecteur présentant une partie évidée. L'angle solide est donc calculé sur deux parties distinctes : un cylindre plein représentant la partie supérieure du détecteur et un cylindre creux, dont la hauteur correspond à celle de la partie évidée, pour la partie inférieure.

Ce facteur purement géométrique doit être complété d'une part par les atténuations du rayonnement incident dans les différents matériaux constituant des écrans entre le point d'émission et le détecteur, F_{att}, et d'autre part, par la probabilité d'interaction dans le détecteur, F_{abs}, avec :

$$F_{att} = \exp\left(-\sum_{i=1}^m \mu_i \cdot \delta_i\right)$$

où μ_i est le coefficient d'atténuation linéique total, sans diffusion cohérente, de l'absorbant i, et δ_i la longueur du parcours dans ce même matériau.

$$F_{abs} = f_1 + f_2 \cdot f'$$

avec :

$$f_1 = 1 - \exp(-\mu_D \cdot \delta_{1D}) \quad f_2 = 1 - \exp(-\mu_D \cdot \delta_{2D}) \quad \text{et } f' = \exp(-\mu_D \cdot (\Delta + \delta_{1D}))$$

μ_D est le coefficient d'atténuation linéique total, sans diffusion cohérente, du matériau du détecteur, δ_{1D} et δ_{2D} la longueur du parcours dans la zone active de celui-ci, avant et après le creux central et Δ la distance parcourue dans le creux central.

Ici, le détecteur est considéré comme coaxial et les facteurs d'atténuation pris en compte sont dus à :

- l'air ou autre milieu ambiant ;
- un écran intercalé entre la source et le détecteur ;
- la fenêtre d'entrée du détecteur ;
- les zones « mortes » (externe et interne) du détecteur.

2.2. Généralisation au cas d'une source volumique

Pour une source volumique, de symétrie cylindrique, (rayon R_s et épaisseur H_s , située à la cote Z_s) l'expression de l'angle solide devient :

$$\Omega = \frac{4}{R_s^2 \cdot H_s} \int_{Z_s}^{Z_s+H_s} h \cdot dh \int_0^{R_s} r \cdot dr \int_0^\pi d\varphi \int_0^{R_D} \frac{R \cdot dR}{[R^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos \varphi + r^2 + h^2]^{3/2}}$$

Le calcul de l'angle solide « effectif » (combinaison de l'angle solide géométrique et des facteurs d'atténuation et d'absorption) est étendu aux sources ayant un diamètre supérieur à celui du détecteur, et aux géométries Marinelli, en considérant que les photons pénètrent par la face latérale du détecteur. Ceci est obtenu en découpant le volume de la source en plusieurs parties et en considérant tous les chemins possibles d'interaction avec le détecteur (face supérieure, côté ou fond du détecteur) [4]. Ainsi pour une source cylindrique de diamètre supérieur au diamètre du détecteur, le calcul de l'angle solide « effectif » comporte deux composantes :

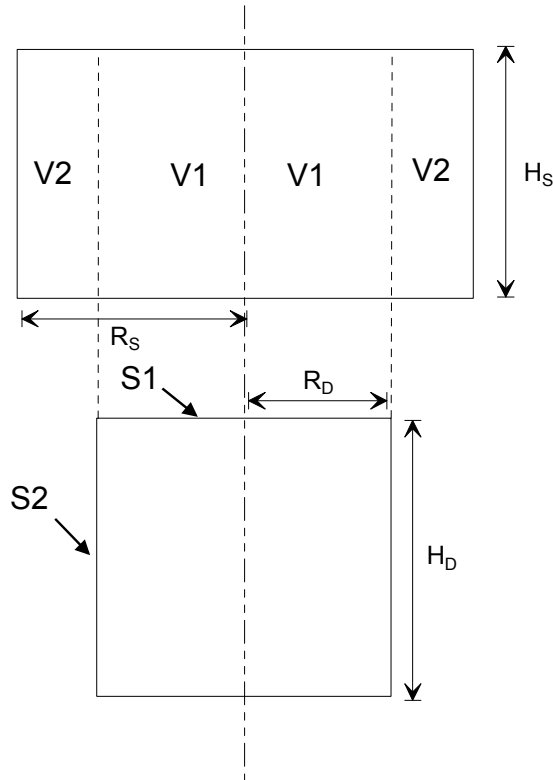


Figure 2 : Volumes et surfaces considérés dans le cas d'une source cylindrique

$$\bar{\Omega} = \int_{(V1+V2)S1} d\bar{\Omega} + \int_{(V2)S2} d\bar{\Omega} = \bar{\Omega}_1 + \bar{\Omega}_2$$

où V1 représente le volume de la source correspondant au rayon du détecteur, V2, le volume complémentaire, S1 la surface de la partie supérieure du détecteur et S2 la partie latérale de celui-ci, soit :

et

ϕ_0 est l'angle maximum de balayage d'un point de la source sur la face latérale du détecteur :

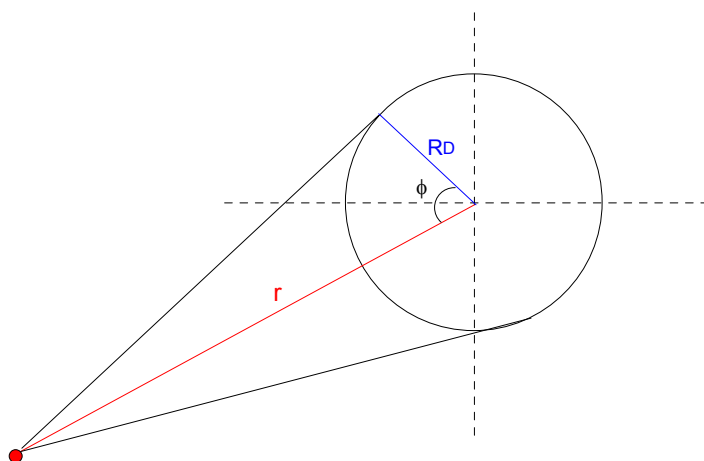


Figure 3 : Angle de balayage $\phi = \text{Arccos} (R_D / r)$

Dans le cas de la géométrie Marinelli, le volume de la source est découpé en cinq parties :

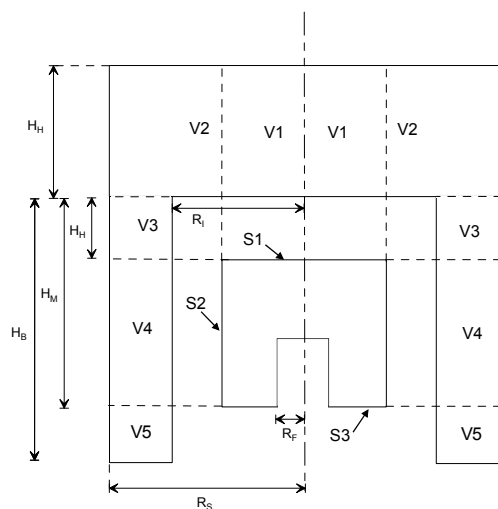


Figure 4 : Volumes et surfaces considérés dans le cas d'une source de type Marinelli

$$\bar{\Omega} = \int_{(V1+V2)S1} d\bar{\Omega} + \int_{(V2)S2} d\bar{\Omega} + \int_{(V3)S1} d\bar{\Omega} + \int_{(V3+V4+V5)S2} d\bar{\Omega} + \int_{(V5)S3} d\bar{\Omega} = \bar{\Omega}_1 + \bar{\Omega}_2 + \bar{\Omega}_3 + \bar{\Omega}_4 + \bar{\Omega}_5^1$$

avec

$$\bar{\Omega}_1 = \frac{4}{R_S^2 \cdot H_S} \int_{Z_S}^{Z_S+H_S} h \cdot dh \int_0^{R_S} r \cdot dr \int_0^\pi d\varphi \int_0^{R_D} \frac{F_{att} \cdot F_{abs} \cdot R \cdot dR}{[R^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos \varphi + r^2 + h^2]^{3/2}}$$

$$\bar{\Omega}_2 = \frac{4 \cdot R_D}{(R_S^2 - R_D^2) \cdot H_S} \int_{Z_S}^{Z_S+H_S} dh \int_{R_D}^{R_S} r \cdot dr \int_0^{\phi_0} d\varphi \int_{Z_D}^0 \frac{F_{att} \cdot F_{abs} \cdot (r \cdot \cos \varphi - R_D) \cdot dz}{[R^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos \varphi + r^2 + h^2]^{3/2}}$$

$$\bar{\Omega}_3 = \frac{4}{(R_S^2 - R_I^2) \cdot HH} \int_{Z_S+HH}^{Z_S+H_S} h \cdot dh \int_{R_I}^{R_S} r \cdot dr \int_0^\pi d\varphi \int_0^{R_D} \frac{F_{att} \cdot F_{abs} \cdot R \cdot dR}{[R^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos \varphi + r^2 + h^2]^{3/2}}$$

$$\bar{\Omega}_4 = \frac{4 \cdot R_D}{(R_S^2 - R_I^2) \cdot (HM - HH)} \int_{Z_S+HM}^{Z_S+HH} dh \int_{R_I}^{R_S} r \cdot dr \int_0^{\phi_0} d\varphi \int_{Z_D}^0 \frac{F_{att} \cdot F_{abs} \cdot (r \cdot \cos \varphi - R_D) \cdot dz}{[R^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos \varphi + r^2 + h^2]^{3/2}}$$

$$\bar{\Omega}_5 = \frac{4}{(R_S^2 - R_I^2) \cdot (HB - HH)} \int_{Z_S+HB}^{Z_S+HM} h \cdot dh \int_{R_I}^{R_S} r \cdot dr \int_0^\pi d\varphi \int_{R_F}^{R_D} \frac{F_{att} \cdot F_{abs} \cdot R \cdot dR}{[R^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos \varphi + r^2 + h^2]^{3/2}}$$

Pour ces deux cas de source volumique, il est nécessaire de tenir en compte des facteurs d'atténuation correspondant au milieu de la source et à son conteneur.

2.3. Procédure de calcul

2.3.1. Intégration

L'expression de l'angle solide effectif n'étant pas soluble numériquement, l'intégration est effectuée selon la méthode de Gauss-Legendre. Pour une intégrale sur la variable x, le calcul se traduit par une sommation :

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{(b-a)}{2} \sum_{i=1}^n w_i f(x_i)$$

avec :

¹ Cette décomposition ne tient donc pas compte des photons qui entreraient par la face inférieure de la partie creuse du détecteur.

$$f(x_i) = \frac{(b-a)}{2} x_i + \frac{(b+a)}{2}$$

x_i et w_i sont respectivement les racines des polynômes de Legendre et les pondérations, dépendant du pas d'intégration n dont les valeurs sont tabulées [5] ; dans le cas général, la sommation est réalisée avec 32 itérations. La procédure est étendue à une intégration sur plusieurs variables avec des sommations en boucles imbriquées.

2.3.2. Distances parcourues dans les différents matériaux

Toutes les distances nécessaires au calcul sont calculées grâce au sous-programme « INTERSEC » fourni par Octavian SIMA (Université de Bucarest) [6]. Ce module teste si une trajectoire définie par son point d'origine et ses cosinus directeurs intersecte un cylindre et calcule le parcours correspondant du point de départ au point d'intersection. Ainsi, 12 parcours sont calculés pour le cas d'une source ponctuelle ou discale, 14 pour le cas cylindrique et 19 pour la géométrie Marinelli, ce qui permet de calculer les distances parcourues dans les différents matériaux, 5 pour les deux premiers cas (air, fenêtre, zone morte, écran, zone active) et 7 (source et conteneur en plus) pour les deux derniers.

Le calcul prend en compte le détecteur coaxial, avec son creux central, les zones mortes frontale, latérale et centrale du cristal de détection, la fenêtre d'entrée, le capot du détecteur, le milieu ambiant (air ou autre) et un éventuel écran horizontal entre la source et le détecteur, le conteneur de la source et sa matrice. La figure 5 présente les différents paramètres géométriques utiles (cotes repérées par rapport au plan supérieur de la zone active du détecteur et rayons) tels qu'ils sont référencés dans le logiciel, pour un détecteur au germanium ; dans le cas de la présence d'un écran, il convient en outre d'ajouter les cotes Z12 et Z13 correspondant respectivement au bas et au haut de l'écran.

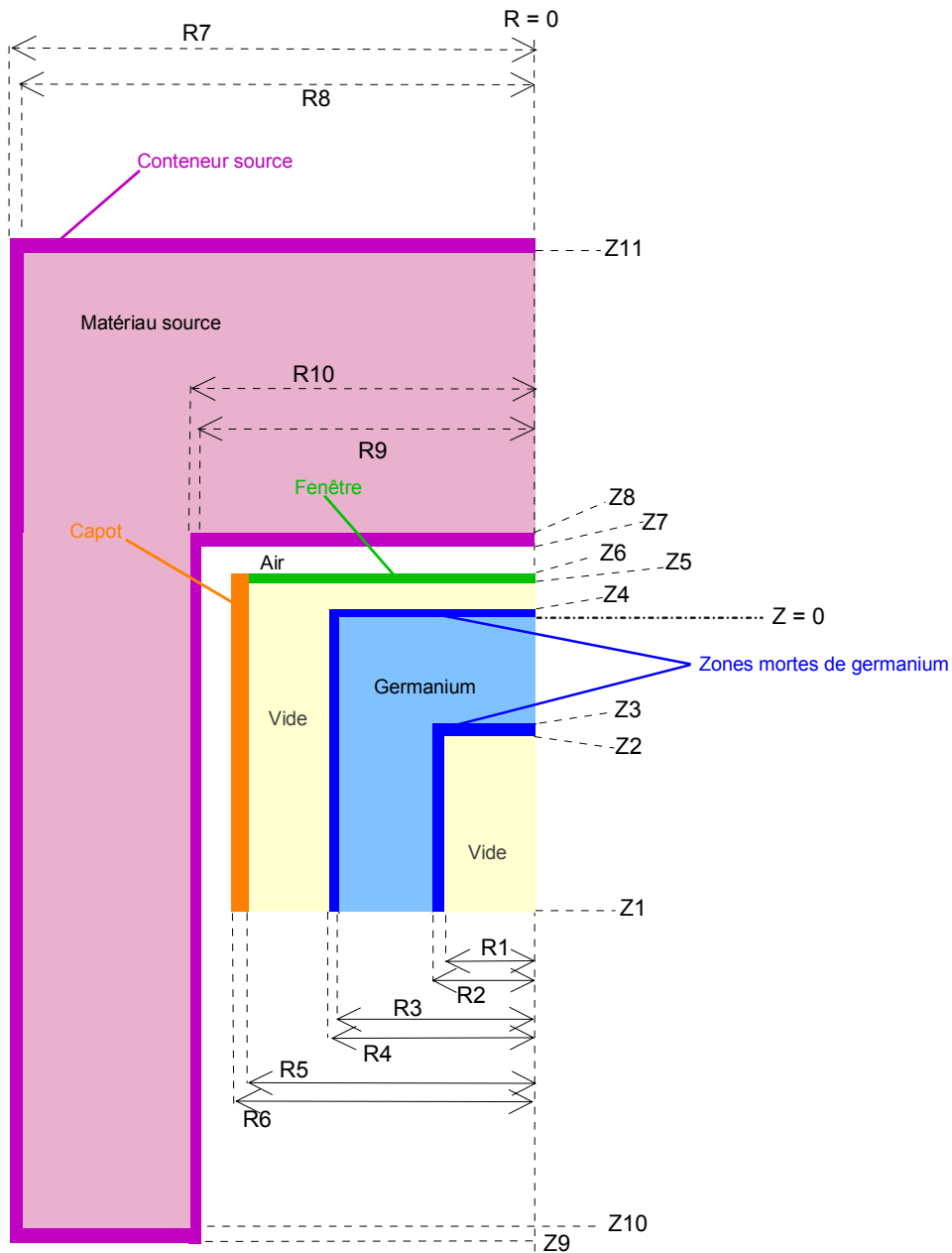
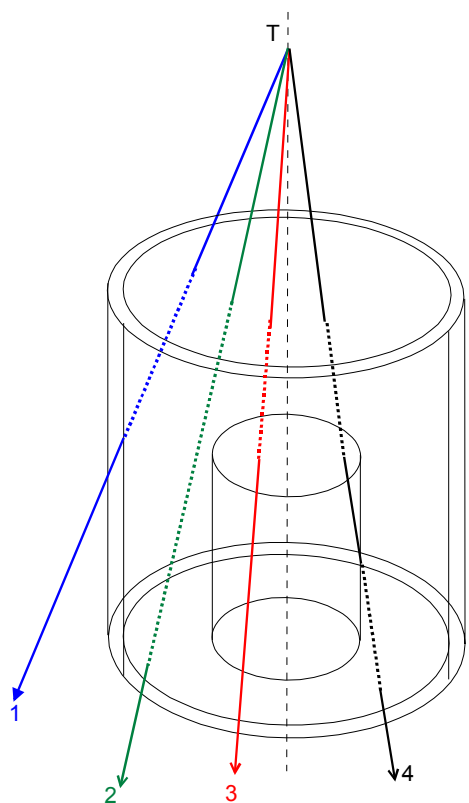


Figure 5 : Schéma en coupe de la géométrie pour un détecteur au germanium et un conteneur Marinelli

Source ponctuelle

Dans le cas d'une source ponctuelle, les différents trajets possibles des photons émis par celle-ci et contribuant au rendement pénètrent par la face supérieure du détecteur. Le calcul du trajet dans le détecteur distingue trois cas :



- pas d'interaction avec le trou central (cas 1 ou 2) : la distance parcourue est égale au parcours depuis le point d'impact jusqu'à la sortie ;
-
- interaction avec le trou central et sortie par le fond du trou (cas 3) : la distance parcourue dans le cristal se réduit au parcours jusqu'au cylindre central ;
-
- interaction avec le trou central et poursuite dans la zone active de détection (cas 4) : la distance parcourue dans le détecteur présente alors deux composantes ; il y a également une composante de zone morte (effet d'absorption).

Figure 6 : Exemples des parcours pris en compte pour le cas d'une source ponctuelle

Source discale

Le cas de la source discale nécessite une intégration sur la surface de la source. Si le rayon de la source est inférieur ou égal au rayon du détecteur, tous les trajets pénètrent par la face avant du détecteur. Dans le cas contraire, il convient d'ajouter l'angle solide sous-tendu par la couronne externe de la source et la face latérale du détecteur.

Les trajets dans la source sont semblables aux cas de la source ponctuelle, avec, en plus, la possibilité que l'interaction avec le creux central se produise sur la face latérale du cylindre.

Source cylindrique

Ce cas constitue une extension du cas précédent, avec une intégration sur l'épaisseur de la source pour le calcul de l'angle solide géométrique. En outre, pour les facteurs d'absorption, il faut prendre en compte les termes dus au matériau de la source et à celui de son conteneur. Là encore, deux cas se présentent selon que le diamètre de la source est inférieur ou supérieur à celui du détecteur.

Le conteneur Marinelli peut être séparé en deux parties : une partie cylindrique située au-dessus de la fenêtre d'entrée du détecteur et une partie cylindrique creuse entourant le corps du détecteur. La première partie correspond au cas traité ci-dessus ; le second cas peut à son tour être découpé en 3 sous-cylindres creux (figure 4). Le premier sous-cylindre est situé au-dessus de la face active du détecteur et les rayonnements issus de celui-ci pénètrent soit par la face avant, soit par la face latérale du détecteur. Le second élément est caractérisé par des cotes égales à celles de la zone active de détection et les rayonnements générés dans cette partie pénètrent essentiellement par la face latérale du cristal de détection. Le troisième sous-cylindre se trouve au-dessous de la zone active et les trajets des rayonnements seront détectés s'ils entrent par la face latérale ou par le fond du détecteur.

3. Corrections de coïncidences

Dans de nombreuses situations expérimentales, les probabilités d'émission gamma sont faibles et l'on doit faire un compromis pour choisir la distance source-détecteur afin d'obtenir des statistiques de comptage suffisantes. Or, il a été observé expérimentalement que les surfaces relatives des pics changent avec la distance source-détecteur, les unes en augmentant, les autres en diminuant. Cet effet est le résultat de la détection simultanée de raies X et gamma en coïncidence réelle.

Le problème n'est pas nouveau et les solutions apportées par le calcul non plus [1 ; 8-10]. Il est en effet possible de calculer les probabilités de coïncidence en connaissant le schéma de désintégration et le rendement du détecteur pour les différentes énergies mises en jeu. Le présent développement constitue la mise à jour du logiciel CORCO [1,2] avec l'intégration de la partie calcul de rendement tel qu'il est développé dans le chapitre précédent.

3.1. Effet des coïncidences sur un spectre de photons

Lorsqu'un radionucléide présente un schéma de désintégration complexe, les durées de vie des niveaux excités étant généralement très inférieures au temps de résolution de la chaîne électronique, il peut y avoir détection simultanée d'impulsions provenant de transitions en cascade. Ce phénomène se traduit alors par deux sortes d'effets : une perte de comptage dans les spectres et les pics d'absorption totale correspondants, et l'apparition d'impulsions supplémentaires dans le fond continu et de pics « somme » d'énergie égale à la somme des énergies cédées au détecteur qui se superposent aux autres comptages.

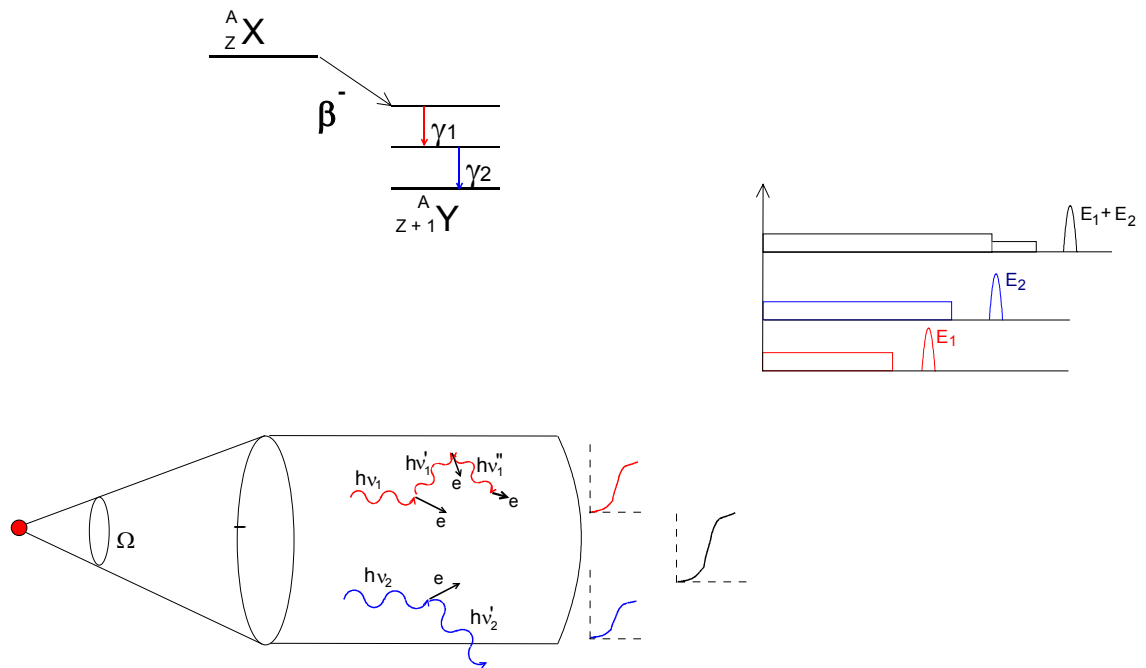


Figure 7 : Effet des coïncidences dans un spectre de photons

Notation : Pour une transition T_{ij} , on adoptera la notation suivante :

Pour le schéma de désintégration :

A : activité de la source (Bq) ;

i : niveau supérieur (initial) de la transition ;

j : niveau inférieur (final) de la transition ;

E_{ij} : énergie de la transition ;

$P(T_{ij})$: probabilité de la transition ;

T_i : somme des probabilités des transitions arrivant sur le (ou partant du) niveau i ;

α_{ij}^K : coefficient de conversion interne dans la couche K pour la transition $i-j$;

α_{ij}^T : coefficient de conversion interne total ;

P_K : probabilité de capture dans la couche K ;

ω_K : rendement de fluorescence de la couche K ;

N : numéro du niveau maximal (niveaux numérotés de 0 à N).

Pour le détecteur :

R_{ij}^P : rendement d'absorption totale pour l'énergie E_{ij} ;

R_{ij}^T : rendement total pour l'énergie E_{ij} .

Pour le spectre :

N_{ij}^T : nombre d'impulsions résultant de l'absorption totale de l'énergie E_{ij} ;

N'_{ij} : nombre d'impulsions réellement enregistrées dans le pic d'absorption totale d'énergie E_{ij} .

3.2. Exemple appliqué à un schéma de désintégration à 2 niveaux excités

Considérons le cas simple d'un radionucléide présentant deux niveaux excités :

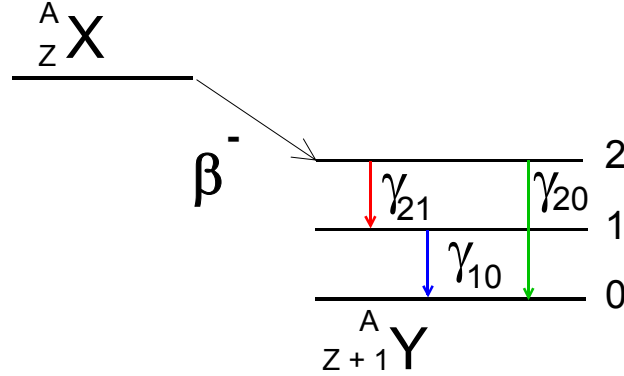


Figure 8 : Schéma de désintégration à deux niveaux

Le nombre d'impulsions résultant de l'absorption totale de l'énergie E_{10} correspondant à la transition γ_{10} dans le détecteur est le produit du nombre de photons émis par le rendement du détecteur pour l'énergie considérée, soit :

$$N_{10} = A \cdot \frac{P(T_{10})}{(1 + \alpha_{10}^T)} \cdot R_{10}^P$$

Dans la pratique, la possibilité de coïncidence entre la raie γ_{21} et la raie γ_{10} entraîne une perte d'impulsions dans le pic correspondant à l'énergie E_{10} . Les impulsions perdues sont proportionnelles au nombre de photons émis et ayant déposé toute leur énergie dans le détecteur (rendement d'absorption totale), à la probabilité de coïncidence entre un photon 2,1 et un photon 1,0 et à la probabilité de détection de tout ou partie de l'énergie de la seconde impulsion (rendement total). Cet effet conduit à l'enregistrement réel du nombre d'impulsions :

$$N'_{10} = N_{10} - \Delta N_{10} = N_{10} \cdot \left(1 - \frac{P(T_{21})}{T_1 \cdot (1 + \alpha_{21}^T)} \cdot R_{21}^T \right)$$

Le facteur de correction permettant de retrouver la surface vraie du pic correspondant à l'énergie E_{10} s'écrit donc :

$$C_{10} = \left(1 - \frac{P(T_{21})}{T_1 \cdot (1 + \alpha_{21}^T)} \cdot R_{21}^T \right)^{-1}$$

Le facteur correctif pour le pic correspondant à l'énergie E_{21} s'obtient en suivant le même raisonnement :

$$C_{21} = \left(1 - \frac{P(T_{10})}{T_1 \cdot (1 + \alpha_{10}^T)} \cdot R_{10}^T \right)^{-1}$$

En revanche, pour le pic correspondant à l'énergie E_{20} , la surface enregistrée est supérieure à la surface réelle du pic :

$$N'_{20} = N_{20} + \Delta N_{20}$$

ΔN_{20} correspond à un gain d'impulsions lié à l'absorption simultanée de l'énergie totale des deux raies γ_{21} et γ_{10} :

$$\Delta N_{20} = A \cdot \frac{P(T_{21})}{(1 + \alpha_{21}^T)} \cdot R_{21}^P \cdot \frac{P(T_{10})}{T_1 \cdot (1 + \alpha_{10}^T)} \cdot R_{10}^P$$

Et le facteur correctif pour la surface du pic correspondant à l'énergie E_{20} s'écrit donc :

$$C_{20} = \left(1 + \frac{P(T_{21}) \cdot P(T_{10})}{T_1 \cdot P(T_{20})} \cdot \frac{(1 + \alpha_{20}^T)}{(1 + \alpha_{21}^T) \cdot (1 + \alpha_{10}^T)} \cdot \frac{R_{21}^P \cdot R_{10}^P}{R_{20}^P} \right)^{-1}$$

Ces expressions correspondent uniquement à des coïncidences entre émissions gamma. Il convient également de considérer les possibilités de coïncidences avec les émissions X consécutives aux réarrangements qui suivent les processus de conversion interne et de capture électronique, ainsi que les coïncidences entre raies X. Cette généralisation conduit rapidement à des expressions complexes pour les radionucléides présentant un schéma avec de nombreuses transitions en cascade. Il est donc nécessaire d'établir des expressions générales permettant de reconstituer le schéma de désintégration et de calculer rapidement les différents facteurs correctifs.

3.3. Cas général d'un schéma à plusieurs niveaux

3.3.1. Correction relative à une raie γ_{ij}

Préalable

Pour une raie γ_{ij} , la correction totale est calculée en tenant compte des possibilités de coïncidence avec les autres raies gamma - correction partielle $C_{\gamma_{ij}/\gamma}$ - et avec les raies X - correction partielle $C_{\gamma_{ij}/X}$ -, ce qui donne :

$$C_{\gamma_{ij}} = C_{\gamma_{ij}/\gamma} \cdot C_{\gamma_{ij}/X}$$

Il convient de remarquer que les calculs développés ci-dessous ne sont que des approximations au premier ordre car seules les coïncidences doubles sont considérées. En effet, un calcul exhaustif nécessiterait de prendre en compte les coïncidences triples et au-delà ; cependant, les corrections correspondantes étant proportionnelles au produit des

rendements de détection et ceux-ci étant généralement inférieurs à 10 %, l'erreur résultant de cette approximation reste faible devant les incertitudes affectant les autres paramètres expérimentaux.

Coïncidences gamma-gamma

Pour une raie γ_{ij} , le facteur correctif doit prendre en compte toutes les possibilités de coïncidences avec d'autres émissions gamma. Le coefficient de correction peut s'exprimer sous la forme d'un produit de trois facteurs :

$$C \gamma_{ij} / \gamma = A \cdot B \cdot C$$

A représente les coïncidences avec des raies gamma précédant la raie γ_{ij} ;

B représente les coïncidences avec des raies gamma suivant la raie γ_{ij} ;

C prend en compte les coïncidences des raies gamma dont la somme des énergies est égale à E_{ij} .

Pour un schéma de désintégration comportant N+1 niveaux, repérés de 0 à N, ces facteurs s'expriment respectivement :

$$A = \prod_{l=i}^{N-1} \left[\prod_{k=l+1}^N A_{kl}^{-1} \right] \quad \text{avec : } A_{kl} = 1 - \frac{X_{kl}}{T_l} \cdot \frac{R_{kl}^T}{(1 + \alpha_{kl}^T)} \cdot M_{li}$$

$$\text{et } M_{li} = \frac{X_{li}}{T_i} + \sum_{b=i+1}^{l-1} \frac{X_{lb}}{T_b} \cdot M_{bi} \quad (M_{ii} = 1)$$

$$B = \prod_{p=1}^j \left[\prod_{m=0}^{p-1} B_{pm}^{-1} \right] \quad \text{avec : } B_{pm} = 1 - \frac{X_{pm}}{T_p} \cdot \frac{R_{pm}^T}{(1 + \alpha_{pm}^T)} \cdot N_{jp}$$

$$\text{et } N_{jp} = \frac{X_{jp}}{T_j} + \sum_{q=p+1}^{j-1} \frac{X_{jq}}{T_j} \cdot N_{qp} \quad (N_{jj} = 1)$$

$$C = \prod_{g=j+1}^{i-1} C_{gj}^{-1} \quad \text{où } C_{gj} = 1 + CF_{gj} + CG_{gj} + CH_{gj}$$

$$\text{avec } CF_{gj} = \frac{X_{gj} \cdot X_{ig}}{T_g \cdot X_{ij}} \quad CG_{gj} = \frac{R_{gj}^P \cdot R_{ig}^P}{R_{ij}^P} \quad \text{et} \quad CH_{gj} = \frac{(1 + \alpha_{ij}^T)}{(1 + \alpha_{ig}^T) \cdot (1 + \alpha_{gj}^T)}$$

Coïncidences gamma-X

Les processus de conversion interne et de capture électronique entraînent la perturbation du cortège électronique de l'atome. Le réarrangement de celui-ci résulte en l'émission de raies X (et d'électrons Auger) et celles-ci peuvent donc être détectées simultanément aux raies gamma de la même cascade. Ainsi, pour la raie γ_{ij} le facteur correctif de ces coïncidences doit prendre en compte

- les coïncidences avec les raies X suivant la conversion interne des transitions précédant γ_{ij} : facteur D
- les coïncidences avec les raies X suivant la conversion interne des transitions suivant γ_{ij} : facteur E
- les coïncidences avec les raies X suivant la capture électronique qui précède la transition γ_{ij} : facteur F.

La correction totale s'écrit donc :

$$C_{\gamma_{ij}/X} = D \cdot E \cdot F$$

Ces facteurs correctifs sont semblables à ceux définis pour les coïncidences gamma-gamma, en remplaçant les probabilités d'émission gamma et les rendements correspondants par les probabilités d'émission X et les rendements pour l'énergie moyenne des X.

Remarque : Les détecteurs utilisés en spectrométrie gamma ont un rendement pratiquement nul pour les énergies correspondant aux raies XL ; les corrections ne sont donc calculées que dans le cas des XK.

$$D = \prod_{l=i}^{N-1} \left[\prod_{k=l+1}^N D_{kl}^{-1} \right] \quad \text{avec : } D_{kl} = 1 - \frac{X_{kl}}{T_l} \cdot \alpha_{kl}^K \cdot \omega_K \cdot \frac{R_{XK}^T}{(1 + \alpha_{kl}^T)} \cdot M_{li}$$

$$E = \prod_{p=1}^j \left[\prod_{m=0}^{p-1} E_{pm}^{-1} \right] \quad \text{avec : } E_{pm} = 1 - \frac{X_{pm}}{T_p} \cdot \alpha_{pm}^K \cdot \omega_K \cdot \frac{R_{XK}^T}{(1 + \alpha_{pm}^T)} \cdot N_{jp}$$

$$F = \prod_{l=i}^N F_{Nl}^{-1} \quad \text{avec : } F_{Nl} = 1 - \frac{X_{N+1l}}{T_l} \cdot (P_K)_{N+1l} \cdot \omega_K \cdot R_{XK}^T \cdot M_{li}$$

Dans ces expressions, M_{li} et N_{jp} s'expriment de la même manière que dans le cas des coïncidences gamma-gamma.

3.3.2. Correction relative aux raies XK

Les raies X sont émises suite aux processus de capture électronique et de conversion interne. Bien qu'elles soient d'origines distinctes, les corrections correspondantes se calculent de la

même façon si l'on affecte l'indice $n+1$ au niveau de départ des captures électroniques. La correction totale pour l'ensemble des raies X, C_X , représente donc la combinaison des corrections élémentaires C_{Xij} associées à la conversion interne d'une transition γ_{ij} et des corrections élémentaires $C_{Xn+1,j}$ correspondant à une capture électronique conduisant au niveau nucléaire excité j .

$$C_X = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{i-1} C_{Xij} \cdot X_{ij} \cdot \frac{\alpha_{ij}^K}{(1 + \alpha_{ij}^T)}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{i-1} X_{ij} \cdot \frac{\alpha_{ij}^K}{(1 + \alpha_{ij}^T)}} + \frac{\sum_{j=1}^N C_{XN+1,j} \cdot X_{N+1,j} \cdot P_{KN+1,j}}{\sum_{j=1}^n X_{N+1,j} \cdot P_{KN+1,j}}$$

Coïncidences X-gamma

Qu'elles proviennent de la capture électronique ou du processus de conversion interne, les raies X peuvent être en coïncidence avec les raies gamma de la même manière que les raies gamma entre elles. Les corrections sont donc calculées de manière analogue à celles explicitées précédemment :

$$C_{Xij}/\gamma = A \cdot B \quad \text{pour la conversion interne}$$

$$C_{Xn+1,j}/\gamma = B \quad \text{pour la capture électronique}$$

Coïncidences X-X

Le calcul des corrections pour les raies X entre elles s'effectue de manière similaire à celui des coïncidences gamma-X, c'est-à-dire :

$$C_{Xij}/X = D \cdot E \cdot F \quad \text{pour la conversion interne}$$

$$C_{Xn+1,j}/X = E \quad \text{pour la capture électronique}$$

3.4. Cas particuliers

3.4.1. Emission bêta +

Après une émission bêta plus, la recombinaison du positron avec un électron entraîne l'émission de deux photons d'annihilation de 511 keV ; ceux-ci peuvent également être détectés en coïncidence avec les raies gamma et X de la même cascade. Ce cas est traité en adoptant un schéma modifié [9], comportant un niveau fictif supplémentaire et une transition $i-j$ présentant les caractéristiques suivantes :

$$E_{ij} = 511 \text{ keV}$$

$$\alpha_{ij}^T = -0,5 \text{ (afin de tenir compte de l'émission simultanée de deux photons)}$$

$$\text{et } P(X_{ij}) / T_i = 1$$

3.4.2. Schéma de désintégration à deux voies

Pour un radionucléide se désintégrant selon deux voies différentes (par exemple, ^{152}Eu se désintègre par émission bêta moins vers les niveaux excités de ^{152}Gd et par capture électronique vers ceux de ^{152}Sm), aucune difficulté n'est enregistrée : il suffit de traiter les deux voies séparément. Cependant, il y a lieu de vérifier que l'énergie d'un pic somme observé pour l'une des voies ne correspond pas à l'énergie d'une transition de l'autre voie.

Ainsi, par exemple, pour ^{152}Eu , la détection simultanée des raies gamma de 122 et 245 keV (voie ^{152}Sm) engendre un pic somme se superposant au pic correspondant à la raie gamma d'énergie 368 keV (voie ^{152}Gd). Dans ce cas, il faut appliquer le terme correctif uniquement à la partie concernée de ce pic (voie ^{152}Sm).

3.4.3. Schéma de désintégration avec un niveau métastable

L'existence d'un niveau métastable d'une durée de vie supérieure au temps de résolution électronique de la chaîne de mesure empêche le phénomène de coïncidence pour les transitions situées de part et d'autre de ce niveau. Afin de le prendre en compte, il convient d'ajouter un niveau supplémentaire sur lequel arrivent les transitions supérieures, avec une probabilité de transition nulle entre ce niveau fictif et le niveau métastable (dont partent les transitions inférieures) pour empêcher toute coïncidence entre les transitions de part et d'autre de ce niveau.

3.5. Cas d'échantillons non ponctuels

Le calcul des corrections de coïncidences développé ci-dessus suppose que l'échantillon soit ponctuel, qu'il soit situé à une distance du détecteur prise comme référence et pour laquelle le détecteur est étalonné en rendement. Cependant, pour des conditions de mesure différentes des conditions d'étalonnage, la variation du rendement peut être déterminée à partir des variations des paramètres géométriques de l'ensemble source-détecteur.

Ce raisonnement peut être appliqué pour déterminer le rendement en différents points d'une source volumique puis calculer les corrections de coïncidences en intégrant ces contributions sur l'ensemble du volume.

Ainsi, pour un élément de volume dV , situé à la position r , il est aisé de transposer les relations de base établies pour une source ponctuelle pour un schéma à deux niveaux excités :

$$N_{10}(r) dV = A(r) \cdot \frac{P(T_{10})}{(1 + \alpha_{10}^T)} \cdot R_{10}^P(r) dV$$

$$N'_{10}(r) dV = N_{10}(r) \cdot \left(1 - \frac{P(T_{21})}{T_1 \cdot (1 + \alpha_{21}^T)} \cdot R_{21}^T(r) \right) dV$$

Dans l'hypothèse d'une source dont l'activité est répartie de manière homogène, l'intégration sur le volume V de la source donne :

$$N_{10} = \frac{A}{V} \cdot \frac{P(T_{10})}{(1 + \alpha_{10}^T)} \cdot \int_V R_{10}^P(r) dV$$

et

$$N'_{10} = \frac{A}{V} \cdot \frac{P(T_{10})}{(1 + \alpha_{10}^T)} \cdot \left(\int_V R_{10}^P(r) dV - \frac{P(T_{21})}{T_1 (1 + \alpha_{21}^T)} \int_V R_{10}^P(r) R_{21}^T(r) dV \right)$$

Ce qui permet de déduire l'expression de la correction :

$$C_{10} = \left(1 - \frac{P(T_{21})}{T_1 (1 + \alpha_{21}^T)} \frac{\int_V R_{10}^P(r) R_{21}^T(r) dV}{\int_V R_{10}^P(r) dV} \right)^{-1}$$

Les facteurs correctifs C_{21} et C_{10} s'écrivent de la même façon :

$$C_{21} = \left(1 - \frac{P(T_{10})}{T_1 (1 + \alpha_{10}^T)} \frac{\int_V R_{21}^P(r) R_{10}^T(r) dV}{\int_V R_{21}^P(r) dV} \right)^{-1}$$

$$C_{20} = \left(1 + \frac{P(T_{21}) P(T_{10})}{T_1 P(T_{20})} \cdot \frac{(1 + \alpha_{20}^T)}{(1 + \alpha_{21}^T) \cdot (1 + \alpha_{10}^T)} \cdot \frac{\int_V R_{21}^P(r) R_{10}^P(r) dV}{\int_V R_{20}^P(r) dV} \right)^{-1}$$

Le même raisonnement s'applique dans le cas d'un radionucléide caractérisé par un schéma de désintégration complexe à n niveaux et permet d'obtenir des relations générales telles qu'elles ont été établies dans le cas d'une source ponctuelle. Ainsi, pour une raie ij en coïncidence avec une raie kl, le rendement total R_{kl}^T devra être remplacé par le rapport :

$$I = \frac{\int_V R_{ij}^P(r) R_{kl}^T(r) dV}{\int_V R_{ij}^P(r) dV}$$

Cet algorithme fait donc intervenir les rendements élémentaires qui sont calculés selon la méthode présentée pour le transfert de rendement (cf. §2).

4. Présentation du logiciel

4.1. Généralités

Le logiciel ETNA se présente sous un environnement Windows[®]. Il est constitué de deux parties : l'interface, conçue en Visual BASIC, permet à l'utilisateur d'entrer tous les paramètres nécessaires au calcul d'une manière conviviale grâce à une succession de fenêtres descriptives. Il inclut des bases de données contenant les coefficients d'atténuation linéique des matériaux tirés du logiciel XCOM [7] et les données de décroissance issues de la table "Nucléide"[11] renfermant toutes les informations du schéma de désintégration nécessaires au calcul des corrections de coïncidences. Il crée également au fur et à mesure, une base de données utilisateur qui enregistre les paramètres des configurations d'étalonnage et de transfert. Le déroulement du programme est présenté dans la notice d'utilisation qui détaille l'interface utilisateur [cf. Annexe 1].

Le moteur de calcul, en FORTRAN, effectue les différents traitements présentés ci-dessus : il se présente en 3 fichiers « DLL » appelés par le module Visual BASIC : ETNA_ET pour le transfert de rendement, ETNA_CSC_SP pour le calcul complet des corrections de coïncidences, et ETNA_CSC_SL pour le calcul simplifié des corrections de coïncidences.

Dans ce cas, le programme effectue tout d'abord le transfert du rendement pour les conditions de mesure et calcule ensuite les corrections de coïncidences comme s'il s'agissait d'une source ponctuelle.

La liaison entre les deux modules s'effectue *via* des fichiers ASCII générés en entrée par le VISUAL BASIC et qui comportent les paramètres nécessaires pour les moteurs FORTRAN. A l'inverse le résultat du calcul est renvoyé du moteur FORTRAN vers l'interface VISUAL BASIC pour l'affichage et l'enregistrement des résultats.

Le fichier FICGEO.DAT est utilisé pour les trois moteurs de calcul : il contient les données géométriques. En première ligne, il comporte un codage permettant d'identifier le type de transfert de géométrie, puis les caractéristiques du détecteur. La deuxième et la troisième ligne renferment respectivement les caractéristiques des géométries d'étalonnage et de mesure :

Code (ITYP)	Géométrie étalonnage	Géométrie de transfert
1	Source ponctuelle	Source ponctuelle
2	Source ponctuelle	Source discalé
3	Source ponctuelle	Source cylindrique
4	Source ponctuelle	Source Marinelli
5	Source discalé	Source ponctuelle
6	Source discalé	Source discalé
7	Source discalé	Source cylindrique
8	Source discalé	Source Marinelli
9	Source cylindrique	Source ponctuelle
10	Source cylindrique	Source discalé
11	Source cylindrique	Source cylindrique
12	Source cylindrique	Source Marinelli
13	Source Marinelli	Source ponctuelle
14	Source Marinelli	Source discalé
15	Source Marinelli	Source cylindrique
16	Source Marinelli	Source Marinelli

1^{ère} ligne : données caractéristiques du détecteur :

DIADE	Diamètre du cristal (en cm)	Réel (2 chiffres + 2 décimales)
EPAIDE	Épaisseur du cristal (en cm)	Réel (2 chiffres + 2 décimales)
EPAIZM	Épaisseur de la zone morte (en cm)	Réel (1 chiffre + 4 décimales)
DISCF	Distance cristal-fenêtre (en cm)	Réel (1 chiffre + 4 décimales)
EPAIFE	Épaisseur de la fenêtre (en cm)	Réel (1 chiffre + 4 décimales)
DAVI	Diamètre du trou (en cm)	Réel (2 chiffres + 2 décimales)
EPAIVI	Profondeur du trou (en cm)	Réel (2 chiffres + 2 décimales)
DIACAP	Diamètre du capot (en cm)	Réel (2 chiffres + 2 décimales)
EPAICAP	Épaisseur du capot (en cm)	Réel (2 chiffres + 2 décimales)

2^{ème} ligne : caractéristiques de la géométrie d'étalonnage :

DISREF	Distance d'étalonnage (en cm)	Réel (5 chiffres + 4 décimales)
DIASOR	Diamètre du conteneur (en cm)	Réel (3 chiffres + 2 décimales)
EPAISOR	Épaisseur du conteneur (en cm)	Réel (3 chiffres + 2 décimales)
DIAMINR	Diamètre du trou du conteneur (Marinelli) (en cm)	Réel (2 chiffres + 2 décimales)
PROFINR	Profondeur du trou du conteneur (Marinelli) (en cm)	Réel (2 chiffres + 2 décimales)
EPAIFOR	Épaisseur du fond du conteneur (en cm)	Réel (2 chiffres + 2 décimales)
EPAICOR	Épaisseur du côté intérieur du conteneur (Marinelli) (en cm)	Réel (2 chiffres + 2 décimales)
DISECR	Distance capot-bas de l'écran (en cm)	Réel (2 chiffres + 2 décimales)
EPAIECR	Épaisseur de l'écran (en cm)	Réel (1 chiffre + 4 décimales)

3^{ème} ligne : caractéristiques de la géométrie de mesure :

DISMES	Distance de mesure (en cm)	Réel (5 chiffres + 4 décimales)
DIASOM	Diamètre du conteneur (en cm)	Réel (3 chiffres + 2 décimales)
EPAISOM	Épaisseur du conteneur (en cm)	Réel (3 chiffres + 2 décimales)
DIAMINM	Diamètre du trou du conteneur (Marinelli) (en cm)	Réel (2 chiffres + 2 décimales)
PROFINM	Épaisseur du trou du conteneur (Marinelli) (en cm)	Réel (2 chiffres + 2 décimales)
EPAIFOM	Épaisseur du fond du conteneur (en cm)	Réel (2 chiffres + 2 décimales)
EPAICOM	Épaisseur du côté intérieur du conteneur (Marinelli) (en cm)	Réel (2 chiffres + 2 décimales)
DISECM	Distance capot-bas de l'écran (en cm)	Réel (2 chiffres + 2 décimales)
EPAIECM	Épaisseur de l'écran (en cm)	Réel (1 chiffre + 4 décimales)

Le fichier FICANG.DAT est utilisé pour le transfert de rendement : il comporte une ligne par énergie considérée incluant les informations suivantes :

K	Numéro de l'énergie	Entier (2 chiffres)
ENE	Énergie de la transition	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
RDT	Rendement du détecteur pour l'énergie de la transition dans les conditions d'étalonnage	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CAGE	Coefficient d'atténuation linéique du cristal pour l'énergie de la transition	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CAFE	Coefficient d'atténuation linéique de la fenêtre pour l'énergie de la transition	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CACE	Coefficient d'atténuation linéique du capot pour l'énergie de la transition	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CAAIR	Coefficient d'atténuation linéique de l'environnement de la géométrie de référence pour l'énergie de la transition	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CASOR	Coefficient d'atténuation linéique du matériau de la source de référence pour l'énergie de la transition	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CACOR	Coefficient d'atténuation linéique du matériau du conteneur de référence pour l'énergie de la transition	Réel (5 chiffres + 6 décimales)

CAECR	Coefficient d'atténuation linéique du matériau de l'écran de référence pour l'énergie de la transition	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CAAIM	Coefficient d'atténuation linéique de l'environnement de la géométrie de mesure pour l'énergie de la transition	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CASOM	Coefficient d'atténuation linéique du matériau de la source de mesure pour l'énergie de la transition	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CACOM	Coefficient d'atténuation linéique du matériau du conteneur de mesure pour l'énergie de la transition	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CAECM	Coefficient d'atténuation linéique du matériau de l'écran de mesure pour l'énergie de la transition	Réel (5 chiffres + 6 décimales)

Le fichier FICCOR.DAT est utilisé par les moteurs de corrections de coïncidences, il comporte les informations du schéma de désintégration avec deux lignes d'informations générales puis une ligne pour chaque transition gamma :

1^{ère} ligne d'informations générales :

NOMNIV	Numéro du niveau maximal	Entier (2 chiffres)
OMEGAK	Rendement de fluorescence K	Réel (1 chiffre + 4 décimales)
OMEGAL	Rendement de fluorescence L	Réel (1 chiffre + 4 décimales)
ENERGX	Énergie moyenne des XK	Réel (3 chiffres + 2 décimales)
ENERGL	Énergie moyenne des XL	Réel (3 chiffres + 2 décimales)
EFATOX	Rendement d'absorption totale pour les XK	Réel (1 chiffre + 6 décimales)
EFTOX	Rendement total pour les XK	Réel (1 chiffre + 6 décimales)
EFATOL	Rendement d'absorption totale pour les XL	Réel (1 chiffre + 6 décimales)
EFTOL	Rendement total pour les XL	Réel (1 chiffre + 6 décimales)

2^{ème} ligne d'informations générales :

COATGEX	Coefficient d'atténuation linéique du cristal pour les XK	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COATFEX	Coefficient d'atténuation linéique de la fenêtre pour les XK	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COATCAX	Coefficient d'atténuation linéique du capot pour les XK	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COATAIXR	Coefficient d'atténuation linéique de l'environnement pour les XK et la position d'étalonnage	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COATSOXR	Coefficient d'atténuation linéique du matériau de la source pour les XK et la position d'étalonnage	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COATCOXR	Coefficient d'atténuation linéique du matériau du conteneur pour les XK et la position d'étalonnage	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COATECXR	Coefficient d'atténuation linéique de l'écran du conteneur pour les XK et la position d'étalonnage	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COATAIXM	Coefficient d'atténuation linéique de l'environnement pour les XK et la position de mesure	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COATSOXM	Coefficient d'atténuation linéique du matériau de la source pour les XK et la position de mesure	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COATCOXM	Coefficient d'atténuation linéique du matériau du conteneur pour les XK et la position de mesure	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COATECXM	Coefficient d'atténuation linéique de l'écran du conteneur pour les XK et la position de mesure	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COATGEL	Coefficient d'atténuation linéique du cristal pour les XL	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COATFEL	Coefficient d'atténuation linéique de la fenêtre pour les XL	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COATCAL	Coefficient d'atténuation linéique du capot pour les XL	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COATAILR	Coefficient d'atténuation linéique de l'environnement pour les XL et la position d'étalonnage	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COATSOLR	Coefficient d'atténuation linéique du matériau de la source pour les XL et la position d'étalonnage	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COATCOLR	Coefficient d'atténuation linéique du matériau du conteneur pour les XL et la position d'étalonnage	Réel (5 chiffres + 6 décimales)

COATECLR	Coefficient d'atténuation linéique du matériau de l'écran pour les XL et la position d'étalonnage	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COATAILM	Coefficient d'atténuation linéique de l'environnement pour les XL et la position de mesure	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COATSOLM	Coefficient d'atténuation linéique du matériau de la source pour les XL et la position de mesure	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COATCOLM	Coefficient d'atténuation linéique du matériau du conteneur pour les XL et la position de mesure	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COATECLM	Coefficient d'atténuation linéique du matériau de l'écran pour les XL et la position de mesure	Réel (5 chiffres + 6 décimales)

Données relatives à une raie gamma (sur une ligne) :

K	Numéro du niveau de départ	Entier (2 chiffres)
L	Numéro du niveau d'arrivée	Entier (2 chiffres)
ENE	Énergie de la transition	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
TRAN	Intensité de la transition	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
SOM	Somme des intensités des transitions partant du niveau supérieur	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COINK	Coefficient de conversion interne dans la couche K	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COINL	Coefficient de conversion interne dans la couche L	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
COTO	Coefficient de conversion totale	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
EAT	Rendement d'absorption totale	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
EFT	Rendement total	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CAG	Coefficient d'atténuation linéique du cristal pour l'énergie de la transition	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CAF	Coefficient d'atténuation linéique de la fenêtre pour l'énergie de la transition	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CAC	Coefficient d'atténuation linéique du capot pour l'énergie de la transition	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CAIR	Coefficient d'atténuation linéique de l'air pour l'énergie de la transition pour l'étalonnage	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CASR	Coefficient d'atténuation linéique du matériau de la source pour l'énergie de la transition pour l'étalonnage	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CACR	Coefficient d'atténuation linéique du matériau du conteneur pour l'énergie de la transition pour l'étalonnage	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CAER	Coefficient d'atténuation linéique du matériau de l'écran pour l'énergie de la transition pour l'étalonnage	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CAIM	Coefficient d'atténuation linéique de l'air pour l'énergie de la transition pour la mesure	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CASM	Coefficient d'atténuation linéique du matériau de la source pour l'énergie de la transition pour la mesure	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CACM	Coefficient d'atténuation linéique du matériau du conteneur pour l'énergie de la transition pour la mesure	Réel (5 chiffres + 6 décimales)
CAEM	Coefficient d'atténuation linéique du matériau de l'écran pour l'énergie de la transition pour la mesure	Réel (5 chiffres + 6 décimales)

Les trois modules de calcul fournissent chacun en sortie un fichier nommé FICSOR.DAT. Pour le transfert de rendement, celui-ci comporte une ligne par énergie avec le rendement initial (étalonnage), le coefficient de transfert et le rendement calculé pour la géométrie de mesure. Dans le cas des corrections de coïncidences, il comporte une première ligne avec la correction globale pour les émissions X, puis une ligne pour chaque transition du schéma de désintégration incluant l'énergie, la correction gamma-gamma, la correction gamma-X et la correction totale (produit des deux contributions individuelles).

4.2. Calcul du transfert de rendement

Connaissant l'ensemble des paramètres géométriques de l'ensemble source-détecteur pour les conditions d'étalonnage et de mesure, le programme effectue le calcul du facteur correctif à appliquer au rendement, c'est-à-dire le rapport des angles solides effectifs (cf. § 2.1). Il est donc possible de passer d'une géométrie à une autre pour un même détecteur et les cas de sources ponctuelles, discales, cylindriques ou Marinelli, soit 12 combinaisons. Pour chaque énergie, le logiciel calcule successivement les deux angles solides et fournit en sortie le rapport des deux et le nouveau rendement (produit du rendement d'étalonnage par le facteur correctif). Différents matériaux détecteurs peuvent être pris en compte (GeHP, Si(Li), NaI(Tl),

etc.) pourvu qu'ils soient à géométrie coaxiale cylindrique.

La durée de calcul dépend des géométries considérées : selon la puissance de l'ordinateur, elle va de quelques secondes pour le cas le plus simple (ponctuelle vers ponctuelle) qui comporte, pour chaque géométrie, deux boucles d'intégration et le calcul de 5 distances, à quelques minutes pour le cas le plus complexe (Marinelli vers Marinelli) qui nécessite 5 intégrations et le calcul de 7 distances à chaque itération.

4.3. Calcul des corrections de coïncidences

Le calcul des coïncidences s'effectue pour une géométrie et un radionucléide donnés. Il convient de connaître l'étalonnage en rendement total et en rendement d'absorption totale pour une géométrie de référence et pour la gamme d'énergie concernée. Le schéma de désintégration est reconstitué via les informations élémentaires incluant le nombre total de niveaux, les rendements de fluorescence, les énergies des émissions X et des différentes transitions et pour chacune, les niveaux initial et final, la probabilité d'émission photonique et les coefficients de conversion dans les différentes couches atomiques. Les rendements correspondant aux énergies de ces différentes transitions sont interpolés à partir des valeurs discrètes connues. Dans le cas des géométries non ponctuelles, les calculs font intervenir des intégrations sur les rendements élémentaires dont la détermination nécessite la connaissance des coefficients d'atténuation linéique des différents matériaux situés sur le trajet des photons. Là encore, les coefficients utiles, pour les énergies mises en jeu dans le schéma de désintégration, sont interpolés à partir de valeurs discrètes tabulées.

Comme pour le calcul de rendement, la durée globale de traitement est très variable et dépend des géométries considérées et surtout de la complexité du schéma de désintégration, puisque le programme traite l'ensemble des raies du schéma dans la même procédure.

5. Conclusion

Le logiciel ETNA permet de répondre aux besoins des utilisateurs soucieux de la précision des analyses par spectrométrie gamma. D'un abord convivial, il calcule le rendement de détection d'un ensemble source-détecteur dans le cas de géométries cylindriques coaxiales, à partir d'un étalonnage établi pour des conditions de référence. De plus, il permet de calculer les corrections de coïncidences à appliquer aux comptages qui sont particulièrement perturbés dans le cas de radionucléides à schéma de désintégration complexe et pour des géométries rapprochées (cas des mesures d'environnement à bas niveau d'activité).

La qualité des résultats fournis par ETNA réside avant tout dans la qualité des étalonnages de référence et, dans le cas où des transferts de géométrie sont nécessaires, dans la connaissance précise des paramètres géométriques de l'ensemble source-détecteur.

La validité des calculs de rendement a pu être testée lors d'une action EUROMET [12,13] pour des transferts à partir d'une géométrie avec une source ponctuelle à une distance de référence, vers d'autres distances et vers des géométries cylindriques avec différentes matrices. Les résultats montrent que, pour ces cas tests, les écarts des valeurs calculées par rapport aux valeurs expérimentales sont de 2 à 3 % dans les cas les moins favorables (basses énergies) ce qui s'avère très suffisant pour la majeure partie des mesures de routine.

6. Bibliographie

- [1] J. MOREL, B. CHAUVENET et A. KADACHI
Coincidence summing corrections in gamma-ray spectrometry for normalized geometries
Int. J. Appl. Radiat. Isot. 34/8 (1983) 1115-1122.
- [2] M.C. LEPY, J. MOREL et B. CHAUVENET
Corrections des pertes de comptage dues aux coïncidences gamma-gamma, gamma-X et X-X dans un spectre de photons. Rapport CEA-R-5356 (1986)
- [3] L. MOENS, J. DE DONDER, LIN Xi-lei, F. DE CORTE, A. DE WISPELAERE, A.SIMONITS et J. HOSTE
Calculation of the absolute peak efficiency of gamma-ray detectors for different counting geometries. Nucl. Instrum. Meth. 187 (1981) 451-472.
- [4] S. JOVANOVIĆ, A. DLABAC, N. MIHALJEVIĆ et P. VUKOTIĆ
ANGLE : A PC-code for semiconductor detector efficiency calculations. J. of Radioanal. and Nucl. Chem, Vol 218, N°1, (1997) 13-20.
- [5] L. ABRAMOWITZ et I.A. STEGUN
Handbook of mathematical functions with formulas, graphs and mathematical tables.
Ed. Wiley (1972)
- [6] O. SIMA
Application of Monte Carlo calculations to gamma-spectrometric measurements of environmental samples. Appl. Radiat. Isot 47 N°9/10 (1997) 919
- [7] M.J. BERGER et J.H. HUBBELL
XCOM : Photon cross sections on personal computers. NBSIR 87-3597
- [8] D.S. ANDREEV, K.I. EROKHINA, V.S. ZVONOV et I. KH. LEMBERG
Consideration of cascade transitions in determining the absolute yield of gamma rays.
Izv. Akad. Nauk. SSSR Ser. Fiz. 37 N°8 (1973) 1609
- [9] G.H. MCCALLUM et G.E. COOTE
Influence of source-detector distance on relative intensity and angular correlation measurements with Ge(Li) spectrometers. Nucl. Instrum. Meth. 130 (1975) 189-197.
- [10] K. DEBERTIN et U. SCHÖTZIG
Coincidence summing corrections in Ge(Li) spectrometry at low source-to-detector distances
Nucl. Instrum. Meth 158 (1979) 471-477.
- [11] M.M. BÉ, E. BROWNE, V. CHECHEV, N. COURSOL, B. DUCHEMIN, R. HELMER, J. LAMÉ, C. MORILLON, F. PITON ET E. SCHÖNFELD
Table de Radionucléides, Volume 5, CEA/DAMRI, 91191 Gif-sur-Yvette, France. 1999, ISBN 2 7272 0200 8

NUCLEIDE, Table de Radionucléides sur CD-Rom, Version 1-98, CEA/DAMRI, 91191 Gif-sur-Yvette, France.

[12] F. PITON, M.C. LEPY, M.M. BE et J. PLAGNARD

Efficiency transfer and coincidence summing corrections for gamma-ray spectrometry
Appl. Radiat. Isot., 52 (2000) 791-795.

[13] Rapport EUROMET

M.C. LEPY AND ALL THE PARTICIPANTS OF THE EUROMET ACTION 428

Transfer of Ge detectors efficiency calibration from point source geometry to other geometries EUROMET ACTION 428. Rapport CEA-R-5894 (2000)

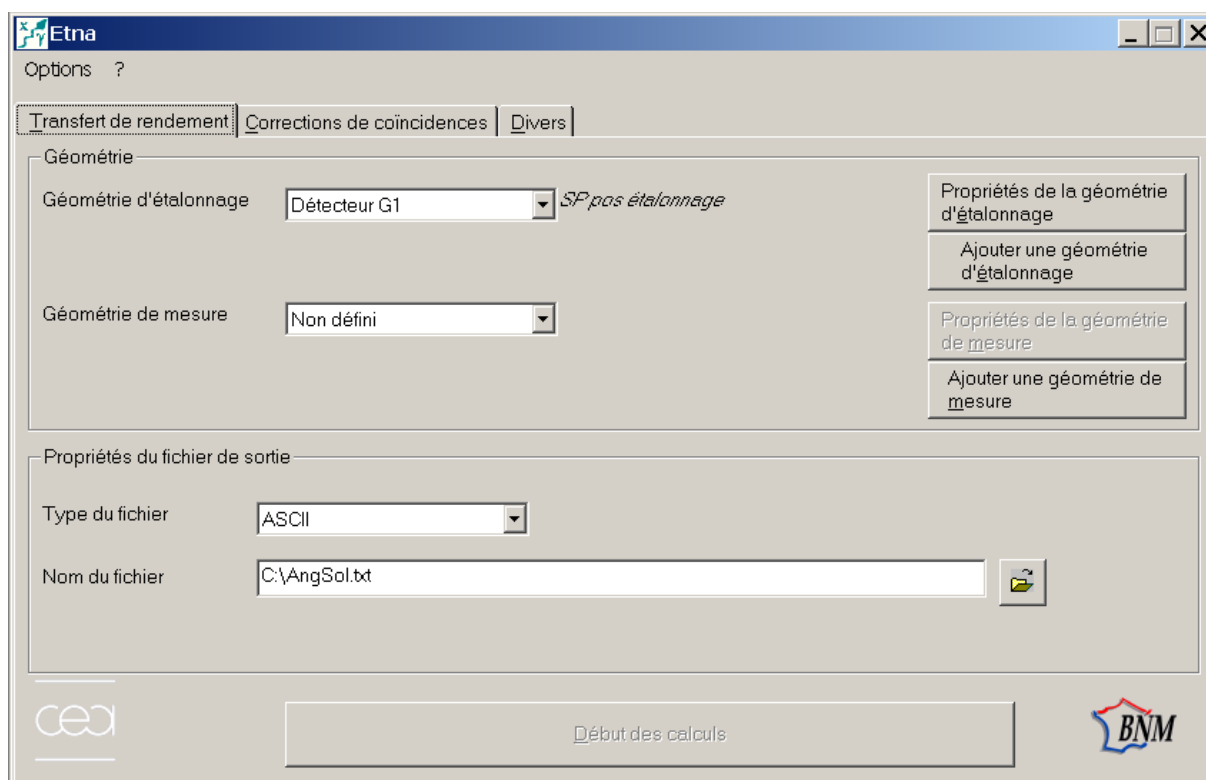
ANNEXE 1 : Notice d'utilisation

A1_1 Généralités

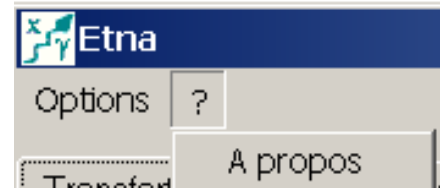
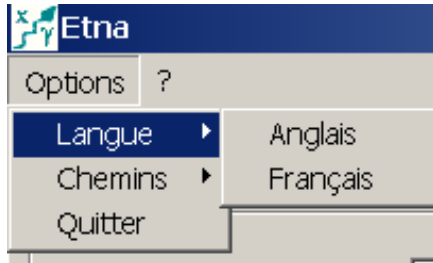
ETNA est un logiciel pratique pour la spectrométrie gamma qui permet de calculer les transferts de rendement dans le cas d'un changement de géométrie source-détecteur, et les corrections de coïncidences pour des radionucléides à schéma de désintégration complexe.

L'installation du logiciel se déroule après avoir lancé le programme « setup.exe » situé dans le sous-répertoire « SETUP ». Le programme demande alors le répertoire d'installation (par défaut : « C :_Program Files\ETNA ») et crée 2 sous répertoires (« MOTOR » et « DATABASE ») ; le premier contient les programmes de calcul (ETNA_ET.DLL, ETNA_CSC_SP.DLL et ETNA_CSC_SL.DLL) et le second renferme les bases de données nécessaires à l'exécution des différents traitements (ETNA_SYS.MDB, ETNA_USR.MDB, ETNA_MAC.MDB et ETNA_NUC.MDB).

Le logiciel, qui fonctionne sous environnement Windows, est lancé en cliquant sur « etna.exe » dans la racine du répertoire « ETNA », ou sur son icône, ce qui entraîne l'affichage de la première fenêtre :



La barre d'outils supérieure propose deux boutons : « Options » et « ? ». Le premier permet de définir les choix de l'utilisateur. La langue d'affichage de l'ensemble du programme (français ou anglais) est sélectionnée en cliquant sur le bouton « Langue ». Les chemins d'accès aux bases de données et aux fichiers de sorties sont précisés en cliquant sur le bouton "Chemins".



Le bouton « ? » (A propos) permet de visualiser les informations sur les versions des modules de calcul et d'interface du programme.

La fenêtre d'entrée propose 3 onglets principaux donnant accès aux deux programmes de calcul et à un utilitaire :

- Transfert de rendements
- Corrections de coïncidences
- Divers

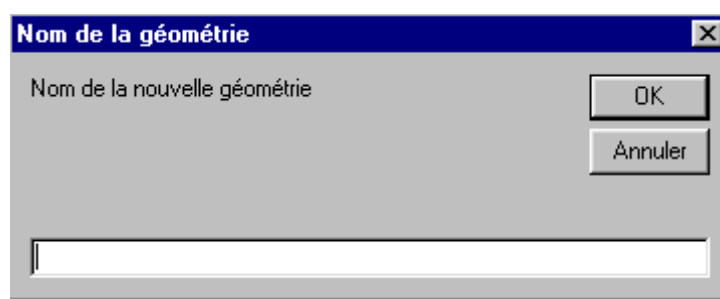
Par défaut, le programme est positionné sur l'onglet « transfert de rendements ».

A1_2 Transfert de rendement

Le module de calcul de rendement permet de calculer le coefficient de transfert de rendement d'une géométrie à une autre, pour un détecteur à structure cylindrique et un ensemble source-détecteur à géométrie coaxiale. Ce calcul nécessite la connaissance des paramètres géométriques de l'ensemble source-détecteur, pour les conditions de référence (géométrie d'étalonnage) et pour les conditions de transfert (géométrie de mesure).

Pour chacune des géométries (étalonnage et mesure) une liste déroulante permet de sélectionner une géométrie préalablement enregistrée et de visualiser ses propriétés en cliquant sur le bouton « Propriétés de la géométrie ».

En cliquant sur le bouton « Nouvelle géométrie », il est possible d'entrer les paramètres d'une nouvelle géométrie, après en avoir précisé l'identification (il n'est pas autorisé de donner le même nom à deux géométries différentes) :



Les deux boutons (« Propriétés de la géométrie » ou « Nouvelle géométrie ») donnent accès à une fenêtre « propriétés de la géométrie » : dans le premier cas, les différents paramètres sont consultés et peuvent être modifiés ; dans le second, ils sont introduits par l'utilisateur.

Il convient donc de :

- décrire la source
- définir la distance source-détecteur
- préciser l'environnement de mesure (par défaut, l'air)
- définir ou non la présence d'un écran : si oui, le décrire et préciser sa distance par rapport à la fenêtre du détecteur.
- décrire le détecteur

Les différents paramètres sont entrés soit par choix dans une liste déroulante (pour des objets préexistants), soit par écriture directe dans un champ, ou encore en définissant un nouvel objet en cliquant sur le bouton « Nouvelle source » ou « Nouvel écran » ou « Nouveau détecteur ».

A1_2.1 Description de la source

La fenêtre suivante permet de sélectionner la géométrie de la source (point, disque, cylindre ou Marinelli) ; ensuite, si la source n'est pas ponctuelle, une nouvelle fenêtre permet de préciser les paramètres ci-dessous :

Source discale	Source cylindrique	Source Marinelli
Diamètre	<i>Matériau de la source</i>	<i>Matériau de la source</i>
	Hauteur de remplissage	Hauteur de remplissage
	<i>Matériau du conteneur</i>	<i>Matériau du conteneur</i>
	Diamètre du conteneur	Diamètre externe du conteneur
	Epaisseur de la paroi latérale	Diamètre interne du conteneur
	Epaisseur de la paroi du fond	Epaisseur de la paroi latérale
		Epaisseur de la paroi du fond
		Profondeur du trou

Source: Source cylindrique

Commentaire: Nouvelle source

Type: Cylindre

Propriétés:

Hauteur de remplissage du contenant: 45 ± 2 mm

Matériau: Eau

Contenant: Conteneur cylindrique

Nouveau conteneur

Date de création: 07/02/01

Date de la dernière modification: 07/02/01

Valider Annuler

Source: Source Marinelli

Commentaire: Nouvelle source

Type: Marinelli

Propriétés:

Hauteur de remplissage du contenant: 55 ± 2 mm

Matériau: Eau

Contenant: Conteneur Marinelli

Nouveau conteneur

Date de création: 07/02/01

Date de la dernière modification: 07/02/01

Valider Annuler

Dans le cas d'une source volumique, il faut également décrire le conteneur (cylindre ou Marinelli) :

Contenant: Conteneur cylindrique

Commentaire: Nouveau conteneur

Type: Cylindre

Propriétés:

Matériau: Polyéthylène

Diamètre externe: 48 ± 1 mm

Epaisseur latérale: 1 ± 0.2 mm

Epaisseur fond: 1 ± 0.2 mm

Date de création: 07/02/01

Date de la dernière modification: 07/02/01

Valider Annuler

Contenant: Conteneur Marinelli

Commentaire: Nouveau conteneur

Type: Marinelli

Propriétés:

Matériau: Polyéthylène

Diamètre externe: 120 ± 2 mm

Diamètre interne: 60 ± 2 mm

Epaisseur latérale: 1 ± 0.2 mm

Epaisseur fond: 1 ± 0.2 mm

Profondeur du trou: 20 ± 0.5 mm

Date de création: 07/02/01

Date de la dernière modification: 07/02/01

Valider Annuler

A1_2.2 Description de l'écran

De la même manière, il est possible de visualiser les propriétés d'un écran ou d'en définir un nouveau avec ses caractéristiques :

Ecran
Matériau de l'écran
Epaisseur de l'écran

Ecran: Ecran test

Commentaire: Nouvel écran

Propriétés:

Matériau: Cadmium (Cd)

Epaisseur: 0.1 ± 0.01 mm

Date de création: 06/02/01

Date de la dernière modification: 07/02/01

Valider Annuler

A1_2.3 Description du détecteur

Le détecteur constitue le dernier (et le plus important) élément de la géométrie ; comme pour les précédents, ses caractéristiques sont introduites, soit *via* des listes déroulantes (pour les matériaux), soit en précisant les dimensions géométriques directement dans les champs requis :

Détecteur
<i>Matériau du cristal</i>
Diamètre du cristal
Epaisseur du cristal
Epaisseur de la zone morte
Diamètre du trou
Profondeur du trou
<i>Matériau de la fenêtre</i>
Epaisseur fenêtre
Distance fenêtre-cristal
<i>Matériau du capot</i>
Epaisseur du capot
Diamètre du capot

Propriétés du détecteur

Détecteur:

Commentaires:

Epaisseur du capot latéral

Matériau de la fenêtre:

Epaisseur de la fenêtre: ± mm

Distance cristal - fenêtre: ± mm

Epaisseur de la zone morte haute: ± µm

Matériau du cristal:

Epaisseur du cristal: ± mm

Profondeur du trou du cristal: ± mm

Diamètre du trou du cristal: ± mm

Diamètre du cristal: ± mm

Epaisseur du capot latéral: ± mm

Diamètre du capot latéral: ± mm

Matériau du capot latéral:

Date de création:

Date de la dernière modification:

Ces paramètres sont généralement fournis sur la fiche de description du détecteur fournie par son fabricant.

Un certain nombre de matériaux les plus couramment utilisés sont inclus dans la base de données (voir §4) qui regroupe les coefficients d'atténuation massique et la densité, et sont proposés dans la liste de choix des matériaux pour la source et son conteneur, l'écran, et le cristal, la fenêtre et le capot du détecteur. De nouveaux matériaux peuvent être inclus à ces listes dans le module « gestion des matériaux ».

A1_2.4 Rendement

Si l'on décrit une géométrie d'étalonnage, il convient de préciser les valeurs du rendement connu pour ce cas de référence. Pour cela, il faut appeler une nouvelle fenêtre en cliquant sur le bouton « Coefficients de rendement » dans l'écran de propriétés de la géométrie. Ces valeurs sont entrées soit pas par pas, selon une grille d'énergie prédéfinie, soit *via* une fonction représentant la variation du rendement en fonction de l'énergie, soit par importation d'un fichier externe :

Coefficients de rendement

Origine des rendements d'absorption totale

☐ Saisie manuelle

☐ Appliquer une fonction

☒ Données importées

Propriétés de la fonction

Importation d'un fichier

Energie	Rendement
36.0000	1.00E-02
50.0000	1.00E-02
53.4000	1.00E-02
60.0000	1.00E-02
80.0000	1.00E-02
81.0000	1.00E-02
86.5000	1.00E-02
100.0000	1.00E-02
105.3000	1.00E-02
120.0000	1.00E-02
133.5000	1.00E-02
141.0000	1.00E-02
162.0000	1.00E-02

Valider Quitter

Pour l'entrée d'une fonction, deux modèles couramment utilisés en spectrométrie gamma sont proposés :

$$\text{APOCOPE : } \ln R^P(E) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot E^{-i}$$

$$\text{APOLOG : } \ln R^P(E) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot (\ln E)^i$$

Il convient alors de choisir la fonction et d'entrer ses coefficients a_i pour des énergies exprimées en keV ; dans ce cas, il est possible de considérer un point de rupture de part et d'autre duquel les coefficients sont différents.

Pour l'importation des rendements à partir d'un fichier externe (ASCII), il convient de disposer de données organisées en colonnes incluant les informations énergie et rendement :

Après élimination des lignes d'information inutiles (en les surlignant à l'aide du curseur, puis en tapant sur la touche « suppr » du clavier), les colonnes utiles du fichier externe sont sélectionnées en indiquant leur position (début et fin), ainsi que les facteurs de conversion nécessaires pour que les énergies soient exprimées en keV et les rendements en valeur absolue.

Par défaut, le rendement est initialisé à 10^{-2} , et le code peut effectuer le calcul du coefficient de transfert d'une géométrie à une autre avec ces valeurs.

Si l'on entre les valeurs réelles du rendement pour la géométrie d'étalonnage, le code calcule le coefficient de transfert et les nouvelles valeurs de rendement pour la géométrie de mesure.

A1_2.5 Traitement

Le module de calcul est lancé en cliquant sur le bouton « Lancer le traitement » après avoir sélectionné une géométrie d'étalonnage et une géométrie de transfert. Les résultats sont visualisés à l'écran et peuvent être directement imprimés. Ils sont également enregistrés dans un fichier qui pourra être relu par la suite ; le fichier est de type ASCII ou EXCEL et son chemin d'accès est précisé dans la fenêtre.

The screenshot shows a window titled 'Résultats' with a file path 'Fichier [C:\Program Files\ETNA\resultat.txt]'. The main content area is divided into two sections: 'Identification du traitement' and 'Résultats'.

Identification du traitement :

- Géométrie d'étalonnage : Source ponctuelle à 10 cm (Test pour transfert)
- Source d'étalonnage : source ponctuelle (source pour tests le 14/02/2)
- Distance source - détecteur d'étalonnage : 100 mm
- Ecran d'étalonnage : Aucun
- Distance écran - détecteur d'étalonnage : 0 mm
- Géométrie de mesure : Source cylindrique (Transfert à 10 cm)
- Source de mesure : source cylindrique (Détecteur 1 - SP1)
- Distance source - détecteur de mesure : 100 mm
- Ecran de mesure : Aucun
- Distance écran - détecteur de mesure : 0 mm
- Détecteur : D1 (Détecteur 50 50 sans creux)

Résultats :

Energie (keV)	Rendement d étalonnage	Rendement de mesure	Ratio
------------------	---------------------------	------------------------	-------

Commentaires : Essai de transfert d'une source ponctuelle à une source cylindrique

At the bottom, there is a folder icon, a 'Sortie d'ETNA' button, and a 'Retour à l'écran principal' button.

La durée du traitement dépend des géométries considérées, en particulier de la complexité de la source, puisque le calcul comporte des intégrations sur l'ensemble de ses dimensions.

Le fichier de résultats se présente comme suit, avec le rappel des conditions du calcul, les rendements pour les conditions d'étalonnage et les résultats, c'est-à-dire les coefficients de transfert et les nouveaux rendements pour la grille d'énergie sélectionnée :

ETNA _____ v5.0 - 09/02/2001

Fichier :C:\Program Files\ETNA\resultat.txt

Identification du traitement :

Géométrie d'étalonnage :Source ponctuelle à 10 cm (Test pour transfert de géométrie)

Source d'étalonnage :source ponctuelle (source pour tests le 14/02/2001)

Distance source - détecteur d'étalonnage :100 mm

Ecran d'étalonnage :Aucun

Distance écran - détecteur d'étalonnage :0 mm

Géométrie de mesure :Source cylindrique (Transfert à 10 cm)

Source de mesure :source cylindrique (Détecteur 1 - SP1)

Distance source - détecteur de mesure :100 mm

Ecran de mesure :Aucun

Distance écran - détecteur de mesure :0 mm

Détecteur :D1 (Détecteur 50 50 sans creux)

Résultats :

Energie (keV)	Rendement d étalonnage	Rendement de mesure	Ratio
00050,000	00,01000000	00,00758867	00,75886700
00080,000	00,01000000	00,00768970	00,76897000
00100,000	00,01000000	00,00769588	00,76958800
00120,000	00,01000000	00,00774423	00,77442300
00150,000	00,01000000	00,00780130	00,78013000
00200,000	00,01000000	00,00786079	00,78607900
00300,000	00,01000000	00,00791911	00,79191100
00400,000	00,01000000	00,00794907	00,79490700
00500,000	00,01000000	00,00797010	00,79701000
00600,000	00,01000000	00,00798541	00,79854100
00800,000	00,01000000	00,00800814	00,80081400
01000,000	00,01000000	00,00802463	00,80246300
01200,000	00,01000000	00,00803751	00,80375100
01500,000	00,01000000	00,00805182	00,80518200
02000,000	00,01000000	00,00806782	00,80678200

Commentaires :

Essai de transfert d'une source ponctuelle à une source cylindrique
CEA\LNHB _____ BNM

A1_3 Corrections de coïncidences

Le module de calcul des corrections de coïncidences permet de calculer les coefficients de correction pour un radionucléide donné et une géométrie source-détecteur. Il est activé en sélectionnant l'onglet « Corrections de coïncidences » qui ouvre la fenêtre ci-dessous :

The screenshot shows the 'Etna' software interface. The 'Corrections de coïncidences' tab is active. The 'Nucléide' is set to 'Ag110' and 'Nucléide fils' is 'Cd110'. Under 'Géométrie', 'Géométrie d'étalonnage' is 'Non défini' and 'Géométrie de mesure' is empty. To the right are buttons for 'Propriétés de la géométrie d'étalonnage', 'Ajouter une géométrie d'étalonnage', 'Propriétés de la géométrie de mesure', and 'Ajouter une géométrie de mesure'. A checkbox 'La géométrie de mesure est différente de la géométrie d'étalonnage' is unchecked. At the bottom, 'Type du fichier' is 'ASCII' and 'Nom du fichier' is 'C:\Corco.txt'. At the very bottom, 'Calculs simplifiés' is selected, and there is a 'Début des calculs' button. Logos for 'cea' and 'BNM' are also visible.

Le calcul nécessite la connaissance du schéma de désintégration du radionucléide et les deux rendements, d'absorption totale et total, pour l'ensemble source-détecteur.

A1_3.1 Radionucléide

Le radionucléide est choisi dans une liste déroulante ; dans le cas où il y a deux voies de désintégration, il est nécessaire de sélectionner également le nucléide fils.

A1_3.2 Géométrie

Pour cela, deux cas se présentent :

Soit ces rendements sont connus pour la géométrie de travail,

Soit ils sont connus pour une géométrie de référence : dans ce cas, le programme doit effectuer le transfert de rendement correspondant au changement de géométrie. Il faut donc lui préciser les paramètres géométriques de l'ensemble source-détecteur, pour les conditions de référence et pour les conditions du calcul. Les entrées des paramètres se font de la même manière que pour le transfert de rendement (cf. §2) ; cependant, dans ce cas, il faut entrer les

valeurs (ou les fonctions) des deux rendements (total et d'absorption totale) pour que le programme puisse se dérouler.

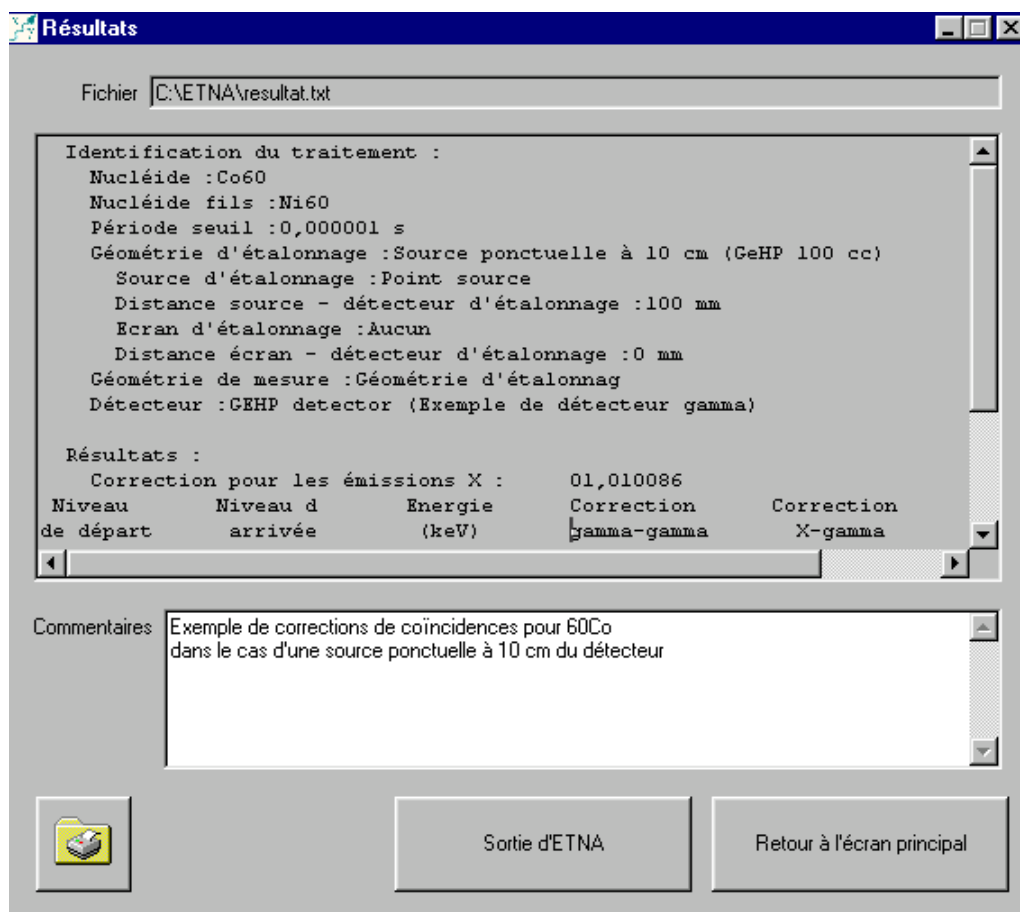
Energie	Rendement	Rendement total
5.0000	1.00E-02	1.00E-02
5.4000	1.00E-02	1.00E-02
6.4000	1.00E-02	1.00E-02
11.1030	1.00E-02	1.00E-02
11.1040	1.00E-02	1.00E-02
20.0000	1.00E-02	1.00E-02
50.0000	1.00E-02	1.00E-02
80.0000	1.00E-02	1.00E-02
100.0000	1.00E-02	1.00E-02
120.0000	1.00E-02	1.00E-02
200.0000	1.00E-02	1.00E-02
500.0000	1.00E-02	1.00E-02
1000.0000	1.00E-02	1.00E-02

Par défaut, les valeurs des rendements sont initialisées à 10^{-2} , mais contrairement au cas du transfert de rendement, il est impératif d'entrer les valeurs réelles des rendements pour obtenir des résultats significatifs.

A1_3.3 Traitement

Le module de calcul est lancé en cliquant sur le bouton « Lancer le traitement » après avoir sélectionné un radionucléide, une géométrie d'étalonnage et une géométrie de mesure si celle-ci est différente de la géométrie d'étalonnage. Deux options sont proposées : calcul complet ou calcul rapide : pour ce dernier, le traitement inclut des approximations pour accélérer les calculs ; attention : ceci peut se faire au détriment de l'exactitude des résultats dans le cas de géométries volumiques importantes.

Les résultats sont visualisés à l'écran et peuvent être directement imprimés. Ils sont également enregistrés dans un fichier qui pourra être relu par la suite ; le fichier est de type ASCII ou EXCEL et son chemin d'accès est précisé dans la fenêtre.



Fichier ASCII global de résultats :

ETNA _____ v5.0 - 09/02/2001

Fichier :C:\ETNA\resultat.txt

Identification du traitement :

Nucléide :Co60
 Nucléide fils :Ni60
 Période seuil :0,000001 s
 Géométrie d'étalonnage :Source ponctuelle à 10 cm (GeHP 100 cc)
 Source d'étalonnage : Source ponctuelle
 Distance source - détecteur d'étalonnage :100 mm
 Ecran d'étalonnage :Aucun
 Distance écran - détecteur d'étalonnage :0 mm
 Géométrie de mesure :Géométrie d'étalonnage
 Détecteur : GEHP detector (Example of detecteur gamma)

Résultats :

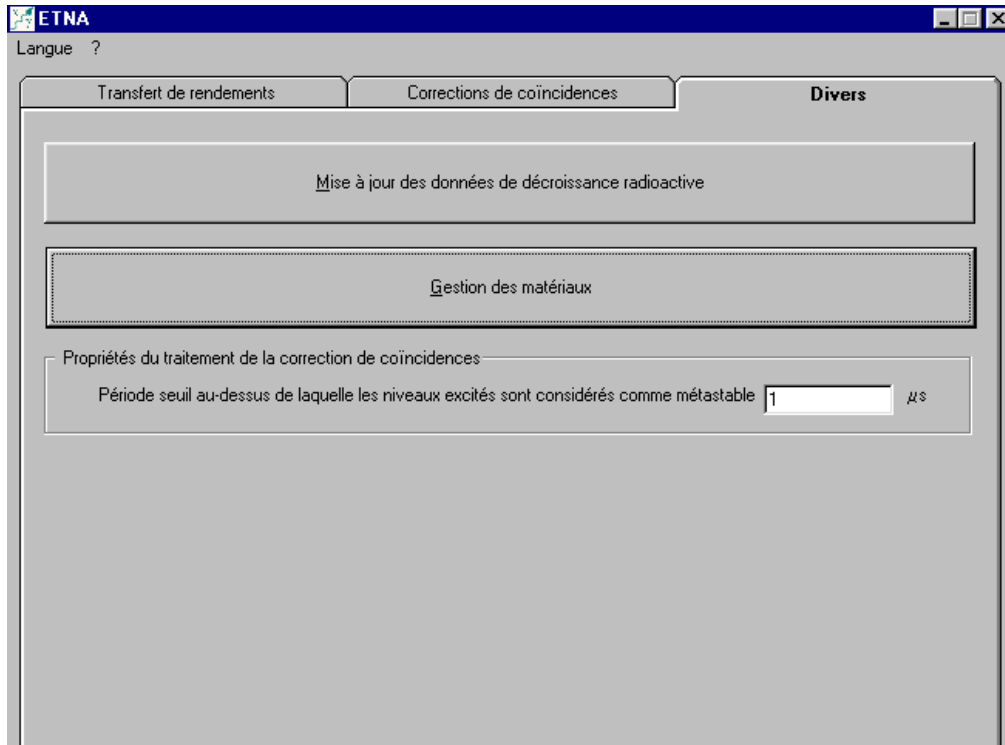
Niveau de départ	Niveau d'arrivée	Energie (keV)	Correction gamma-gamma	Correction X-gamma	Correction totale
			01,010086		
001	000	01332,508	01,010086	01,000001	01,010086
002	000	02158,610	00,948501	01,000018	00,948518
002	001	00826,100	01,018734	01,000018	01,018753
003	000	02505,748	00,000000	01,000000	00,000000
003	001	01173,240	01,010099	01,000000	01,010100
003	002	00347,140	01,018884	01,000002	01,018886

Commentaires :

Exemple de corrections de coïncidences pour 60CO
 dans le cas d'une source ponctuelle à 10 cm du détecteur
 CEA\LNHB _____ BNM

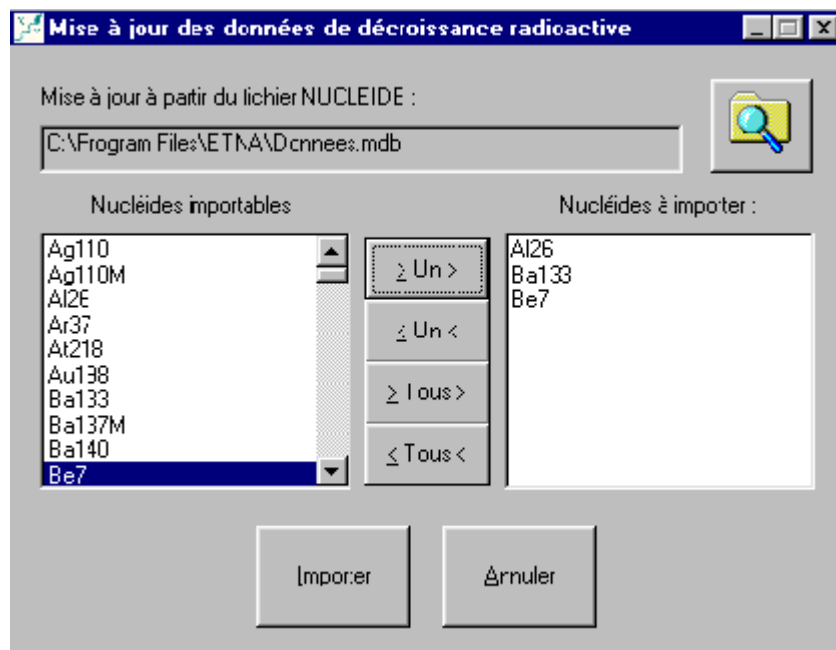
A1_4 Divers

L'onglet divers donne accès à deux modules permettant la mise à jour des données utiles au calcul (données du schéma de désintégration et coefficients d'atténuation linéique) et à la définition d'un seuil pour le calcul des corrections de coïncidences :



A1_4.1 Mise à jour des données de décroissance

La connaissance des données de décroissance évolue et la table des radionucléides [11] est mise à jour régulièrement. Pour tenir compte de ces actualisations, il est possible d'aller lire données (fichier « donnees.mdb ») et de les importer dans la base d'ETNA :



A1_4.2 Gestion des matériaux

Cette fenêtre donne accès à la liste de matériaux pris en considération dans le logiciel ; pour chacun, les informations suivantes sont disponibles : masse volumique, liste des coefficients d'atténuation linéique pour une grille préétablie d'énergies, et les différents constituants de la géométrie source-détecteur pour lequel ce matériau peut intervenir.

Base de données des matériaux - enregistrement : 7/116

Nouveau

Propriétés du matériau

Identifiant du matériau: Argon (Ar)

Masse volumique: 0,00166 g/cm³

Supprimer

Matériau de

☐ Cristal du détecteur ☐ Source ☐ Ecran

☐ Fenêtre du détecteur ☐ Contenant ☒ Environnement de mesure

☐ Capot latéral

Energie (keV)	Coefficients d'atténuation massique (cm ² /g)
1,000E+00	3,180E+03
1,500E+00	1,100E+03
2,000E+00	5,090E+02
3,000E+00	1,680E+02
3,203E+00	1,400E+02
3,204E+00	1,270E+03
4,000E+00	7,550E+02
5,000E+00	4,210E+02
6,000E+00	2,580E+02
8,000E+00	1,170E+02
1,000E+01	6,240E+01
1,500E+01	1,940E+01

Lecture des coefficients d'atténuation massique dans un fichier ASCII

Mise à jour

Annuler

Date de création: 06/09/99

Date de dernière modification: 06/09/99

Retour

Ces listes sont en consultation et peuvent être modifiées et complétées ; pour les coefficients d'atténuation linéique, il est possible d'importer des données contenues dans un fichier externe, en ASCII qui comporte 2 colonnes incluant les informations énergie et coefficient :

Importation des coefficients d'atténuation massique à partir d'un fi...

Fichier

Position des colonnes:

Position de la colonne d'énergie - caractère à

Position de la colonne d'atténuation massique - caractère à

(MeV)	(cm ² /g)	(cm ² /g)	(cm ² /g)	(cm ² /g)	(cm ² /g)	(cm ² /g)	(cm ² /g)
1.187E-02	1.15E+00	9.26E-02	1.32E+02	0.00E-01	0.00E-01	1.33E+02	1.32E+02
1.393E-02	9.42E-01	1.01E-01	8.56E+01	0.00E-01	0.00E-01	8.66E+01	8.57E+01
1.754E-02	7.06E-01	1.11E-01	4.54E+01	0.00E-01	0.00E-01	4.62E+01	4.55E+01
2.104E-02	5.55E-01	1.18E-01	2.73E+01	0.00E-01	0.00E-01	2.80E+01	2.74E+01
2.635E-02	4.02E-01	1.26E-01	1.44E+01	0.00E-01	0.00E-01	1.49E+01	1.45E+01

Facteur multiplicateur des données:

Facteur pour convertir l'énergie en keV

Facteur pour convertir l'atténuation massique en cm²/g

Après élimination des lignes d'information inutiles (en les surlignant à l'aide du curseur, puis en tapant sur la touche « suppr » du clavier), les colonnes utiles du fichier externe sont sélectionnées en indiquant leur position (début et fin), ainsi que les facteurs de conversion nécessaires pour que les énergies soient exprimées en keV et les coefficients d'atténuation linéique en cm².g⁻¹. Dans la version de base d'ETNA, les coefficients fournis sont issus du logiciel XCOM.

A1_4.3 Définition du seuil pour le calcul des corrections de coïncidences

Les phénomènes de coïncidences se produisent lorsque la durée de vie des niveaux nucléaires est très inférieure au temps de résolution électronique de la chaîne d'acquisition. Par défaut, les niveaux d'une durée de vie supérieure à 1 microseconde sont considérés comme métastables, c'est-à-dire qu'ils n'engendrent pas de phénomènes de coïncidences. Si les caractéristiques de la chaîne d'acquisition le nécessitent, la valeur de ce seuil peut être modifiée grâce au champ proposé.

ANNEXE 2 : Rappel de quelques définitions

A2_1 Données caractérisant le schéma de désintégration

A2_1.1 Transition gamma

La transition gamma correspond au processus de désexcitation d'un noyau placé dans un état énergétique donné (E_i) vers un état moins énergétique ou vers l'état fondamental (E_j). Cette transition se manifeste par l'émission soit d'un photon gamma (γ) soit d'un électron de conversion (EC), soit encore, plus rarement et si cela est possible du point de vue énergétique, par l'émission d'une paire électron-positron ($e^\pm$).

La probabilité de la transition, $P(T_{ij})$, est la probabilité qu'une désexcitation du noyau passe par cette transition ; on a donc :

$$P(T_{ij}) = P(\gamma_{ij}) + P(EC_{ij}) + P(e^\pm_{ij})$$

$P(\gamma_{ij})$, $P(EC_{ij})$ et $P(e^\pm_{ij})$ sont respectivement les intensités d'émission de photon gamma, d'électron de conversion et de paire électron-positron.

A2_1.2 Emission gamma

Dans ce processus, l'énergie d'une transition gamma est convertie en rayonnement électromagnétique, sous forme d'un photon d'énergie E_{ij} :

$$E_{ij} = (E_i - E_j) - E_r$$

$(E_i - E_j)$ représente la différence d'énergie entre les états initial et final, c'est-à-dire l'énergie de la transition gamma et E_r , l'énergie de recul du noyau final :

$$E_r = \frac{(E_i - E_j)^2}{2Mc^2}$$

M étant la masse du noyau

L'intensité d'émission gamma $P(\gamma_{ij})$ est le rapport du nombre de photons gamma émis par la transition T_{ij} au nombre de transition nucléaires spontanées (ou désintégrations).

A2_1.3 Conversion interne

L'énergie de la transition est communiquée à un électron du cortège atomique : celui-ci est alors éjecté avec une énergie cinétique :

$$E_c = E_{ij} - W$$

W représente l'énergie de liaison de l'électron pour la couche considérée.

L'intensité d'émission d'électron de conversion interne, $P(EC_{ij})$ est le nombre d'électrons de conversion émis par la transition T_{ij} rapporté au nombre de transitions nucléaires spontanées.

Le coefficient de conversion interne total, α_{ij}^T , est le rapport de l'intensité d'émission d'électron de conversion à l'intensité d'émission gamma :

$$\alpha_{ij}^T = \frac{P(EC_{ij})}{P(\gamma_{ij})}$$

Le coefficient de conversion interne dans la couche K, α_{ij}^K , est le rapport de l'intensité d'émission d'électron de conversion de la couche K, $P(EC_{Kij})$ à l'intensité d'émission gamma :

$$\alpha_{ij}^K = \frac{P(EC_{Kij})}{P(\gamma_{ij})}$$

On définit de manière analogue les coefficients de conversion interne partiels α_{ij}^L , α_{ij}^M , ... correspondant aux couches L, M, ... et l'on a la relation :

$$\alpha_{ij}^T = \alpha_{ij}^K + \alpha_{ij}^L + \alpha_{ij}^M$$

A2_1.4 Emission X consécutive à la conversion interne

Le processus de conversion interne engendre des vacances dans le cortège électronique. Une vacance est comblée par le transfert d'un électron d'une couche moins liée vers la couche où s'est produite cette vacance. Lors de ce réarrangement, le transfert d'énergie supplémentaire se traduit par l'émission d'un photon X ou l'éjection d'un électron Auger.

Le rendement de fluorescence de la couche K, ω_K , est la probabilité pour que le remplissage d'une vacance dans la couche K soit accompagné de l'émission d'un photon X_K :

$$\omega_K = \frac{P(X_K)}{N_K}$$

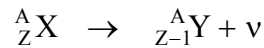
$P(X_K)$ représente le nombre de photons X_K émis et N_K , le nombre de vacances dans la couche K.

Pour une transition T_{ij} , l'intensité d'émission d'un photon X_K , $P(X_{Kij})$, s'écrit donc :

$$P(X_{Kij}) = \frac{\alpha_{ij}^K}{1 + \alpha_{ij}^T} \cdot \omega_K \cdot T(\gamma_{ij}) = \alpha_{ij}^K \cdot P(\gamma_{ij}) \cdot \omega_K$$

A2_1.5 Capture électronique

Ce processus de désintégration se caractérise par la capture d'un électron orbital par le noyau :



La capture d'un électron est beaucoup plus probable dans la couche K que dans les couches externes.

On appelle probabilité de capture électronique, $P(CE)$, la probabilité pour que la désintégration du noyau actif se fasse par capture électronique. On associe également les probabilités de capture, $P_K, P_L, P_M, \dots$, relatives aux différentes couches électroniques K, L, M, ... telles que :

$$P_K + P_L + P_M + \dots = 1$$

Tout comme la conversion interne, la capture électronique entraîne des perturbations du cortège électronique, le réarrangement de celui-ci se traduisant par l'émission de photons K ou d'électrons Auger. Ainsi, l'intensité d'émission d'un photon X_K à la suite d'une capture électronique s'écrit :

$$P(X_K) = P_K \cdot \omega_K$$

A2_2 Paramètres caractérisant l'appareillage

L'analyse quantitative d'un spectre de photons est conditionnée à la connaissance de la réponse en rendement du détecteur pour la géométrie utilisée.

A2_2.1 Rendement d'absorption totale

R_{ij}^P est le rapport du nombre d'événements enregistrés sous le pic d'absorption totale correspondant à l'énergie E_{ij} , au nombre de photons γ_{ij} émis par la source.

A2_2.2 Rendement total

R_{ij}^P est le rapport du nombre d'événements enregistrés sous l'ensemble du spectre, au nombre de photons γ_{ij} émis par la source.