

Produits nouveaux

γ GONIO : détecteur d'orientation et mesureur de débit de kerma dans l'air de rayonnement γ dans l'environnement

M. CHEMTOB, R. CHUITON, J.C. CHAPUIS, L. WALES, R. PRIGENT†*

(Manuscrit reçu le 17 mars 1992)

RÉSUMÉ L'objectif de l'instrument γ GONIO est de guider un véhicule pour trouver une source γ perdue ou, après un accident nucléaire, de repérer à distance la zone contaminée par des débris éventuels émetteurs γ . Cet instrument est essentiellement constitué d'une sphère en aluminium, de 10 cm de diamètre, dans laquelle sont implantés 6 détecteurs à 1 cm de profondeur par rapport à la surface de cette sphère. Ces détecteurs sont installés sur trois diamètres orthogonaux. Les taux de comptage détectés par les détecteurs sont traités par un logiciel, implanté dans un microprocesseur, qui affiche par cycles : l'orientation de la source γ en termes d'angles azimut et site, le débit de kerma auquel est exposé le centre de la sphère et l'énergie efficace du faisceau γ incident à la sphère. Ce document décrit les concepts physiques et mathématiques utilisés pour concevoir et construire l'instrument.

ABSTRACT The aim of the γ -gonio is to guide a vehicle in order to find out a lost gamma source or to determine a remote area contaminated by γ -emitting pieces following a nuclear accident. It is essentially made of an aluminium sphere (diameter : 10 cm) with 6 detectors located inside, 1 cm deep from the sphere surface. The detectors are placed on 3 orthogonal diameters. The detector counting rates are processed by a software set on a microprocessor giving by cycles the orientation of the γ -source in terms of azimuth and elevation angles, the kerma rate at the sphere centre and the effective energy of the γ -beam incident on the sphere. The physical and mathematical concepts used to develop the instrument are described.

1. Introduction

L'instrument de mesure γ GONIO a été conçu au département de protection de l'environnement et des installations (DPEI/STESR) pour la partie théorique et au département de protection de la santé de l'homme et de dosimétrie (DPHD/SDOS) pour l'électronique et la réalisation ; γ GONIO a pour objectif de guider un véhicule d'intervention lors de la recherche de sources γ . En cas d'accident ou de perte, il permet, par ses indications, d'orienter le véhicule et de le rapprocher des débris

* Commissariat à l'énergie atomique, Institut de protection et de sûreté nucléaire (CEA-IPSN), BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex.

† A la mémoire de R. Prigent, chef de service au Département de protection de l'environnement et des installations, décédé le 20 avril 1992.

éventuels. Ses indications sont de trois types : l'orientation des sources γ , l'estimation de l'énergie efficace du rayonnement de la source ainsi que le débit de kerma dans l'air.

Le principe du γ GONIO est basé sur l'utilisation de 6 détecteurs à réponse isotrope installés dans une sphère en aluminium de 10 cm de diamètre. Ces détecteurs délivrent des taux de comptage. Les signaux sont amplifiés puis traités à l'aide d'une carte à microprocesseur, ce qui permet d'obtenir les valeurs d'orientation, d'énergie efficace et de débit de kerma dans l'air. L'appareil étant équipé d'une interface type RS 232, toutes ces informations peuvent être transmises à un périphérique de type PC et donc utilisées pour orienter le véhicule.

Les premiers exemplaires ont été fabriqués au CEA et l'industrialisation est confiée à Intertechnique.

2. Principes de l'appareil [4, 5]

Les figures 1 et 2 donnent une vue schématique de la mécanique, de la disposition et de la constitution des détecteurs, des angles azimut θ et site φ .

2.1 Concepts physiques

La conception de cet instrument est basée sur les notions suivantes :

- les détecteurs sont constitués chacun de 3 semi-conducteurs au silicium ; la disposition en cube des 3 semi-conducteurs (fig. 2) assure à ces détecteurs (hors de la sphère) une isotropie aux γ du ^{60}Co dans les 3 plans (1 plan horizontal et 2 plans verticaux) meilleure que 20 % ; le pré-amplificateur associé à chaque détecteur est réalisé en technologie CMS et fait partie intégrante de celui-ci ; de ce fait, l'ensemble (détecteur + pré-amplification) occupe un volume faible de $1,7 \text{ cm}^3$ qui sera considéré dans la suite comme ponctuel ;

- six de ces ensembles sont placés à l'intérieur d'une sphère en aluminium d'un diamètre de 10 cm, selon trois diamètres orthogonaux (fig. 1). La profondeur du centre géométrique de chaque détecteur par rapport à la surface de la sphère est égale à 1 cm. Ces caractéristiques (nature du matériau et dimensions) ont été choisies afin de réaliser un compromis entre la masse de l'appareil et la différence d'atténuation entre deux détecteurs diamétralement opposés, dans la gamme d'énergie des γ comprises entre 50 et 1500 keV ;

- chaque ensemble est relié à une chaîne amplificateur et discriminateur formant une voie de comptage ;

- les couples "gain de l'amplificateur" et "seuil du discriminateur" sont réglés, sur chaque voie, de manière à obtenir une sensibilité égale à 1 % près des 6 voies au rayonnement γ du ^{60}Co ;

– les 6 voies, ainsi obtenues, sont reliées à l'entrée d'un microprocesseur muni d'un logiciel de traitement des taux de comptage délivrés par irradiation de la sphère par le rayonnement γ .

- a) Position des détecteurs :
- plan polaire (vertical) : 2, 1, 4, 3
 - plan équatorial (horizontal) : 2, 6, 4, 5
 - les centres des détecteurs sont à une profondeur, d , par rapport à la surface de la sphère
- b) Définition des angles :
- angle azimuth : θ
 - angle site : ϕ
- c) Définition des directions :
- Δ : direction du faisceau
 - Δ' : direction de la projection du faisceau sur le plan équatorial (horizontal)
- d) Définition des distances d_i :
- d_i = distance parcourue dans l'aluminium par les rayonnements photoniques pour atteindre le détecteur i

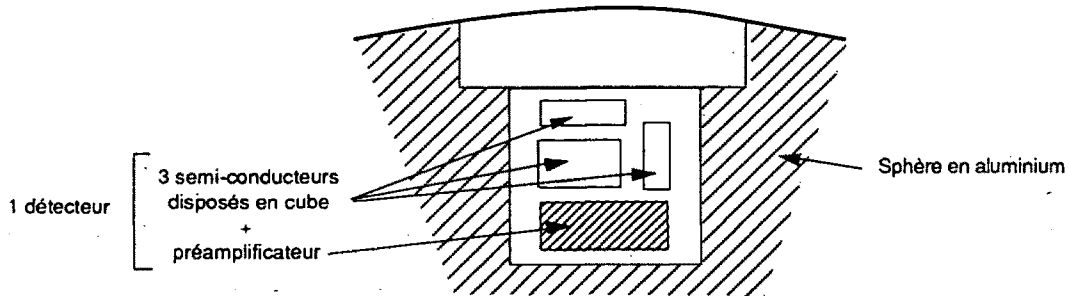


Fig. 1. – Schéma de l'appareil irradié par un faisceau de photons parallèle et unidirectionnel.

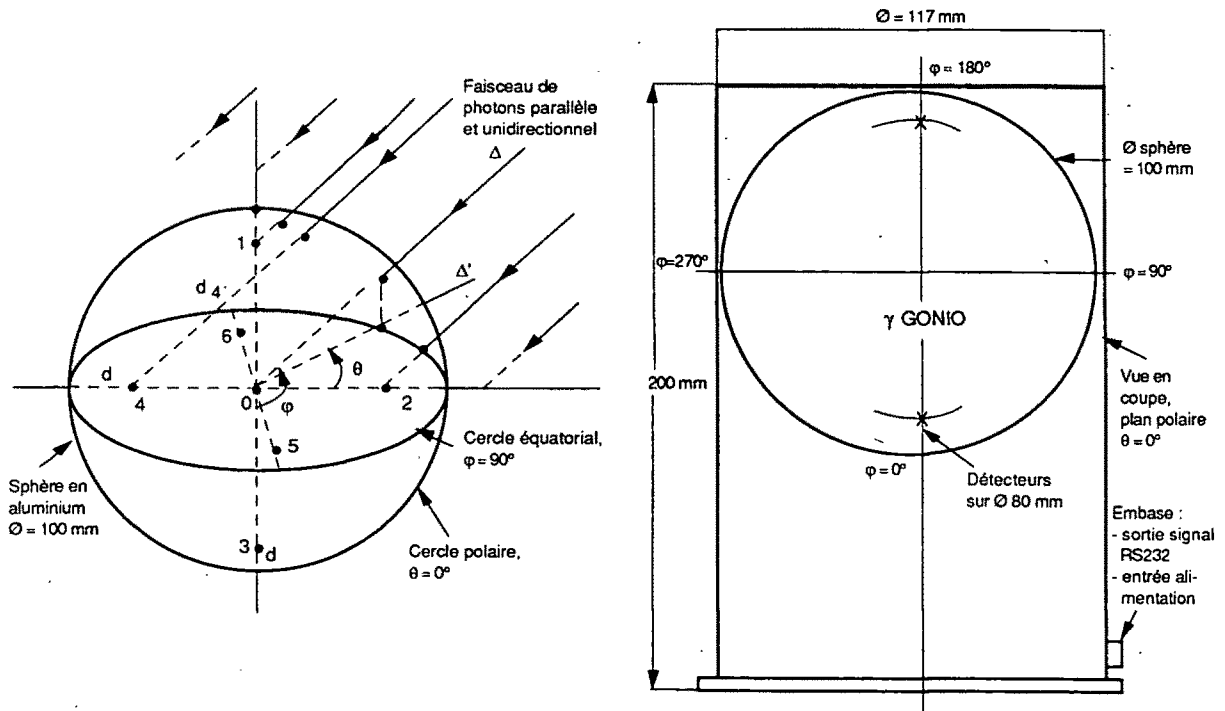


Fig. 2. – Schéma d'implantation des détecteurs dans la sphère en aluminium (vue en coupe).

2.2 Concepts mathématiques

Le logiciel de traitement réalise les calculs des variables représentant les indications mentionnées au § 1. Il est basé sur des concepts mathématiques dont le développement est donné en annexe.

Note au lecteur : Pour la validation des concepts, le lecteur est prié de consulter les documents [2] à [4].

ANNEXE : CONCEPTS MATHÉMATIQUES

Le logiciel de traitement est basé sur les hypothèses et les raisonnements suivants :

La source est supposée émettre les γ selon un faisceau de rayonnements parallèles et unidirectionnels (fig. 1) ; cette hypothèse est vérifiée si la source est de petites dimensions et située à une distance égale à 10 fois le diamètre de la sphère (soit 1 m au minimum).

Soit D_0 le débit de dose dans l'air à l'équilibre, à 1 m de la source γ . Les débits de dose, D_i , auxquels sont soumis les 6 détecteurs implantés dans la sphère sont donnés avec une bonne approximation par l'expression :

$$D_i = \frac{D_0}{(l+R)^2} e^{-\mu d_i} \quad (1)$$

où l est la distance source – surface de la sphère ;

R est le rayon de la sphère

μ est le coefficient d'atténuation de l'aluminium relatif aux énergies des γ incidents sur la sphère ;

d_i est la longueur du trajet parcouru, dans l'aluminium de la sphère, par le faisceau γ pour atteindre le détecteur i .

Les taux de comptage, n_i , délivrés par les détecteurs sont supposés proportionnels aux débits de dose auxquels ils sont soumis, c'est-à-dire :

$$n_i = k D_i \quad (2)$$

Cette hypothèse est vérifiée en effectuant un essai de linéarité sur un détecteur individuel. A partir d'un débit de dose dans l'air à l'équilibre de $50 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$, la linéarité sur 4 décades de débit est meilleure que 1 %.

De plus, il faut noter que k dépend de l'énergie des photons incidents. Comme les détecteurs sont isotropes et équisensibles entre eux par construction et réglage, k est le même quel que soit le détecteur i .

Du fait de la forme sphérique du matériau solide constituant le milieu atténuateur, les longueurs de trajets, d_p , s'écrivent selon les expressions suivantes :

– plan polaire passant par les détecteurs numérotés 1 et 3 (fig. 1) :

$$d_1 = R \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d}{R}\right)^2 \sin^2 \varphi} - (R - d) \cos \varphi \quad (3)$$

$$d_3 = R \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d}{R}\right)^2 \sin^2 \varphi} + (R - d) \cos \varphi \quad (4)$$

où d est la profondeur à laquelle sont implantés les détecteurs par rapport à la surface de la sphère ;

– plan équatorial passant par les détecteurs 2, 4, 5 et 6 (fig. 1) :

$$d_2 = R \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d}{R}\right)^2 (1 - \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \varphi)} - (R - d) \cos \theta \cdot \sin \varphi \quad (5)$$

$$d_4 = R \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d}{R}\right)^2 (1 - \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \varphi)} + (R - d) \cos \theta \cdot \sin \varphi \quad (6)$$

$$d_5 = R \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d}{R}\right)^2 (1 - \sin^2 \theta \cdot \sin^2 \varphi)} + (R - d) \sin \theta \cdot \sin \varphi \quad (7)$$

$$d_6 = R \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d}{R}\right)^2 (1 - \sin^2 \theta \cdot \sin^2 \varphi)} - (R - d) \sin \theta \cdot \sin \varphi \quad (8)$$

Trois soustractions effectuées sur les distances de parcours correspondant aux détecteurs diamétralement opposés aboutissent aux expressions :

$$d_1 - d_3 = -2 (R - d) \cos \varphi \quad (9)$$

$$d_2 - d_4 = -2 (R - d) \cos \theta \cdot \sin \varphi \quad (10)$$

$$d_6 - d_5 = -2 (R - d) \sin \theta \cdot \sin \varphi \quad (11)$$

L'association des formules (1, 2, 9-11) aboutit aux expressions :

$$\mu = \frac{1}{2(R-d) \cos \varphi} \operatorname{Ln} \frac{n_1}{n_3} \quad (12)$$

$$\mu = \frac{1}{2(R-d) \cos \theta \cdot \sin \varphi} \operatorname{Ln} \frac{n_2}{n_4} \quad (13)$$

$$\mu = \frac{1}{2(R-d) \sin \theta \cdot \sin \varphi} \operatorname{Ln} \frac{n_6}{n_5} \quad (14)$$

de sorte que les angles azimut θ et φ s'écrivent alors par les relations :

$$\theta = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{Ln} \frac{n_6}{n_5}}{\operatorname{Ln} \frac{n_2}{n_4}} \right) \quad (15)$$

et

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{\cos \theta} \cdot \frac{\operatorname{Ln} \frac{n_2}{n_4}}{\operatorname{Ln} \frac{n_1}{n_3}} \right) \quad (16)$$

La connaissance de θ et φ permet la détermination du coefficient d'atténuation, μ , par l'une des expressions (12, 13 ou 14).

La détermination de l'indication, \bar{L}_a , en débit de kerma dans l'air est réalisée à partir de la moyenne des taux de comptage enregistrés par les six détecteurs :

$$\bar{L}_a = \frac{\lambda}{6} \sum_{i=1}^{i=6} n_i = \lambda \bar{n} \quad (17)$$

où λ est un coefficient de proportionnalité exprimé en $\text{mGy} \cdot \text{h}^{-1} / \text{i} \cdot \text{s}^{-1}$.

L'application des règles de calcul des écarts types d'origine A des variables θ , φ et μ , selon la norme NF X 06-044 [1], aboutit aux expressions suivantes :

$$\sigma_{\theta} = \sin \theta \cdot \cos \theta \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{x \operatorname{Ln} x} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y \operatorname{Ln} y} \right)^2} \quad (18)$$

avec $x = \frac{n_6}{n_5}, y = \frac{n_2}{n_4}$

$$\sigma_\varphi = \sin \varphi \cdot \cos \varphi \sqrt{(\sigma_\theta \cdot \operatorname{tg} \theta)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y \operatorname{Ln} y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_z}{z \operatorname{Ln} z}\right)^2} \quad (19)$$

avec $z = \frac{n_1}{n_3}$

$$\frac{\sigma_\mu}{\mu} = \sqrt{(\sigma_\varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi)^2 + \left(\frac{\sigma_z}{z \operatorname{Ln} z}\right)^2} \quad (20)$$

avec $\frac{\sigma_x}{x}$ ou $\frac{\sigma_y}{y}$ ou $\frac{\sigma_z}{z} = \sqrt{\frac{1}{n_i T} + \frac{1}{n_j T}}$ (21)

où T est le temps de comptage fixé dans le logiciel,
 i et j sont les numéros des détecteurs correspondants aux variables x ,
 y et z .

Les formules (15) à (21) sont implantées dans le logiciel de traitement qui effectue les acquisitions et les calculs en cycles, T , de 10 s. La transmission des valeurs des variables s'effectue sur une sortie du type RS 232, à la fin de chaque cycle. Le véhicule porteur de l'appareil est ainsi orienté de manière permanente (rafraîchissement des données toutes les 10 s) vers les sources de rayonnements γ , les incertitudes sur les indications θ , φ , μ et L_a diminuant au fur et à mesure du rapprochement du véhicule. ■

RÉFÉRENCES

- [1] AFNOR. – Traitement des résultats de mesure, détermination de l'incertitude associée au résultat final, Norme NF X-06-044. Paris La Défense : AFNOR, 1984.
- [2] CENTRE TECHNIQUE D'HOMOLOGATION DE L'INSTRUMENTATION DE RADIOPROTECTION. – Rapport d'essais STESR/CTHIR n° 086. Fontenay-aux-Roses : CEA/IPSN/DPEI, 1992.
- [3] CHEMTOB M., CHUITON R., CHAPUIS J.C., WALES L., PRIGENT R. – γ GONIO : détecteur d'orientation et mesureur de débit de kerma dans l'air de rayonnements γ dans l'environnement. Rapport IPSN/DPEI 92-03. Fontenay-aux-Roses : CEA/IPSN.
- [4] CHEMTOB M., CHUITON R., CHAPUIS J.C., WALES L., PRIGENT R. – γ GONIO : An orientation detector and environmental γ air kerma ratemeter. Radiat. Prot. Dos. (à paraître).
- [5] CHEMTOB M., CHUITON R., KISSEL P. – Détecteur d'orientation de sources émettrices de rayonnements radioactifs. Brevet Français n° 8909627, 1989.