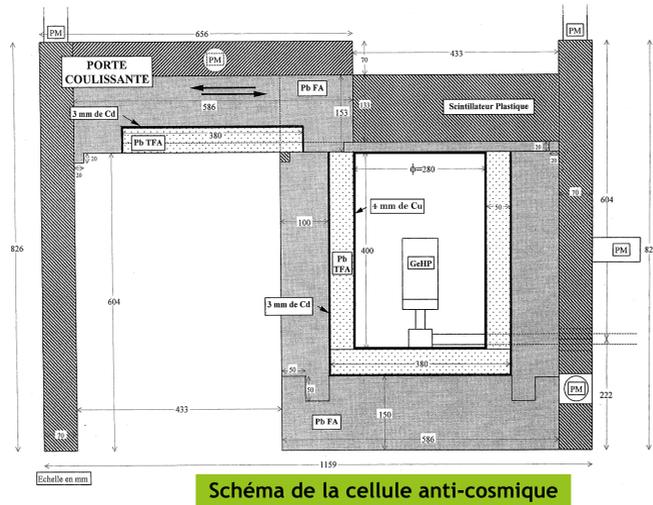


Le Laboratoire National Henri Becquerel (LNE-LNHB) dispose d'un spectromètre γ pour fournir aux laboratoires environnementaux des étalons radioactifs. Cette installation a été créée en 2001 et installée dans un sous-sol sous 65 cm de terre et 75 cm de béton baryté (densité de 2,3 g.cm⁻³). Le système de mesure est composé d'un germanium coaxial de type N de 198 cm³ avec un rendement relatif de 51,6 %, un ensemble de blindages passifs et actifs permet de réduire le mouvement propre de l'ensemble du système.

→ Caractéristiques du blindage pour la réduction du mouvement propre mesuré par le détecteur

Blindage passif de l'extérieur vers l'intérieur :

- 10 cm de plomb faible activité (FA) : atténuation des rayonnements gamma externes de 99,23 % à 3 MeV ;
- 3 mm d'alliage de cadmium : absorber de neutrons dont l'isotope stable le ¹¹³Cd présente une résonance géante de 10 000 barns pour les neutrons thermiques ;
- 5 cm de plomb très faible activité (TFA) : atténuation des rayonnements γ émis par le cadmium activé par les neutrons, la somme des deux couches de plomb permet d'atténuer de 99,93 % les γ de 3 MeV ;
- 4 mm de cuivre : atténuation des X du plomb de 93 % à 80 keV.



Blindage actif détecteurs plastiques :

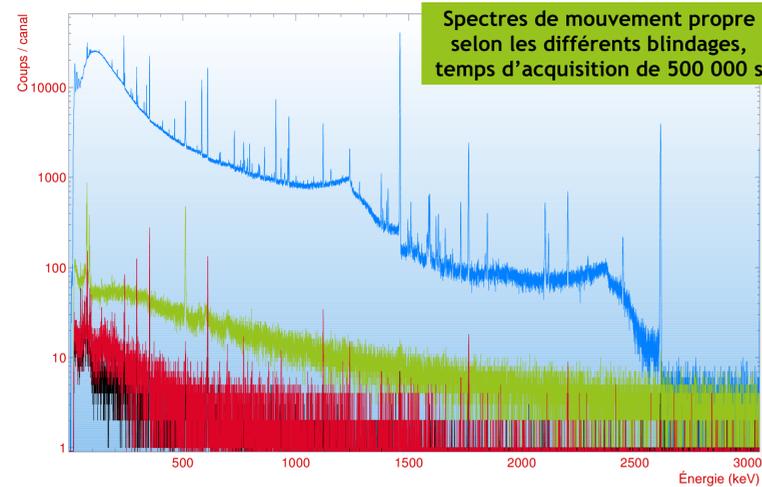
- Les faces de la cellule (sauf celle du dessous) sont recouvertes de détecteurs plastiques (Type BC-408) de 5 cm d'épaisseur dont les signaux lumineux sont collectés par des photomultiplicateurs (PMs) ;
- Les signaux des PMs sont sommés et amplifiés avant d'être traités par une nouvelle électronique développée au LNE-LNHB en 2015 et permettant d'appliquer un VETO utilisant un temps mort reconfigurable, Applied Radiation and Isotopes (2015) 109, 425-429 ;



Élimination du radon présent dans la cellule de mesure :

- Balayage de la cellule avec l'azote provenant du Dewar du détecteur (30 L.h⁻¹). L'injection d'azote à partir d'une bouteille permet d'éviter d'attendre le renouvellement total de l'intérieur de la cellule après son ouverture (1 h avec l'azote évaporé du Dewar).

→ Efficacité des blindages

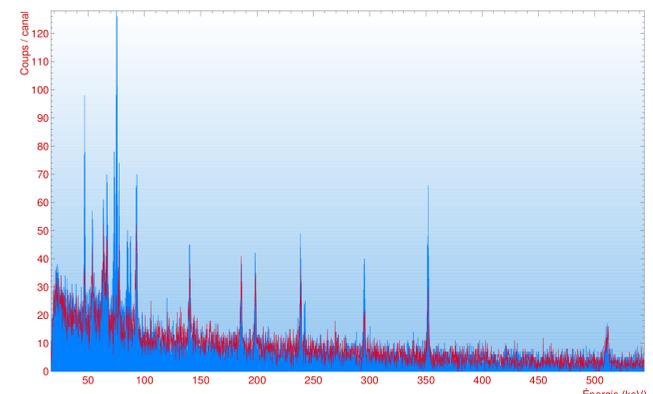
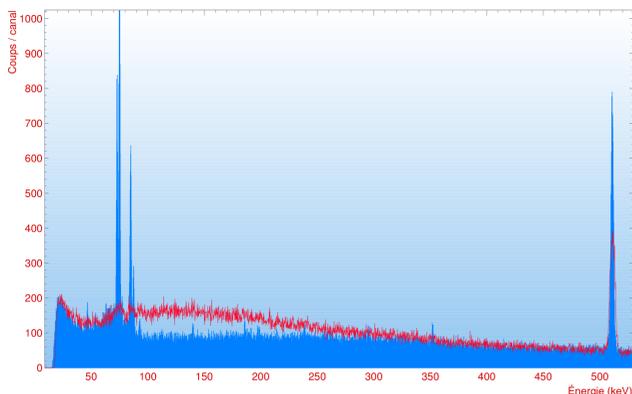


- Spectre bleu** : mouvement propre sans aucun blindage ; forte présence de tous les pics caractéristiques des chaînes radioactives naturelles (²³⁸U, ²³⁵U et ²³²Th) et de ⁴⁰K.
- Spectre vert** : ajout des blindages passifs (à l'exception du cuivre) ; diminution du mouvement propre d'un facteur 140. Sur le spectre, il reste les X du plomb et le fond continu avec le 511 keV caractéristique des interactions des rayonnements cosmiques avec le plomb du blindage.
- Spectre rouge** : élimination d'une grande partie des rayonnements cosmiques par le VETO ; diminution du mouvement propre d'un facteur 6.
- Spectre noir** : élimination du radon présent dans la cellule de mesure à l'aide de l'azote, diminution du mouvement propre d'un facteur 2. L'activité volumique moyenne mesurée en ²²²Rn dans le laboratoire sur 1 an est de 25 Bq.m⁻³, le plus haut pic enregistré étant à 80 Bq.m⁻³.

NOTE : L'électronique du LNE-LNHB a permis de diminuer d'un facteur 2 le mouvement propre total et d'un facteur 5 le pic de 511 keV par rapport à l'électronique fournie en 2001 lors de l'installation du détecteur. Les pics saturants ont eux aussi été éliminés du spectre.

Le blindage en cuivre à l'intérieur de la cellule permet d'éliminer tous les X du plomb si celui-ci est assez épais. Il ne peut être utilisé que si le système VETO élimine les émissions liées au 511 keV :

- À gauche, l'effet du cuivre (en rouge) sans le VETO : une traîne apparaît due à l'interaction du 511 keV dans le cuivre ;
- À droite, l'effet du cuivre (en rouge) avec l'anti-cosmique, la traîne n'est pas visible car l'émission à 511 keV est presque entièrement éliminée par le VETO.



→ Résultats de mouvement propre

Origine	Énergie (keV)	h ⁻¹ .kgGe ⁻¹	Origine	Énergie (keV)	h ⁻¹ .kgGe ⁻¹
⁷⁰ Ge(n, γ) ^{71m} Ge	23,4	-	²²⁸ Ac	338,3	0,15
²¹⁰ Pb	46,5	1,08	²¹⁴ Pb	351,9	1,36
²¹⁴ Pb, ⁷² Ge(n, γ) ^{73m} Ge	53,2 - 53,4	1,30	Annih.	511,0	1,69
²³⁴ Th	63,3	1,04	²⁰⁶ Pb(n,n') ²⁰⁶ Pb	537,4	-
^{73m} Ge (13,3 keV + 53,4 keV)	66,7	1,02	²⁰⁷ Pb(n,n') ²⁰⁷ Pb	569,7	0,14
⁷³ Ge(n,n') ⁷³ Ge	68,7	-	²⁰⁸ Tl	583,2	0,54
Pb-X _{KL}	72,1 - 72,8	-	⁷⁴ Ge(n,n') ⁷⁴ Ge	595 - 650	-
Pb-X _{KL} , ²¹² Pb, ²¹⁴ Pb	75,0	0,43	²¹⁴ Bi	609,3	1,53
²¹² Pb, ²¹⁴ Pb	77,1	0,79	¹³⁷ Cs	661,7	0,48
Pb-X _{KM}	84,1 à 85,5	0,18	⁷² Ge(n,n') ⁷² Ge	680 - 740	-
Pb-X _{KL} , Pb-X _{KM} , ²¹² Pb, ²¹⁴ Pb	87,1 à 87,9	0,14	⁷⁶ Ge(n,n') ⁷⁶ Ge	691,0	-
²³⁴ Th	92,6	1,43	²¹⁴ Bi	768,4	-
⁷⁴ Ge(n, γ) ^{75m} Ge	139,7	0,24	²⁰⁶ Pb(n,n') ²⁰⁶ Pb	803,3	0,05
²³⁵ U	143,8	0,14	²³⁴ Pa	880,5	-
⁷⁶ Ge(n, γ) ^{77m} Ge	159,7	-	²²⁸ Ac	911,1	0,21
^{71m} Ge	175,0	-	²¹⁴ Bi	934,1	-
²³⁵ U, ²²⁶ Ra	185,7 - 186,2	1,27	²²⁸ Ac	968,9	-
⁷⁰ Ge(n, γ) ^{71m} Ge	198,3	0,98	²¹⁴ Bi	1120,3	0,15
^{71m} Ge	215,5	-	⁶⁰ Co	1173,2	-
²¹² Pb	238,6	0,37	²¹⁴ Bi	1238,1	0,11
²¹⁴ Pb	241,9	0,23	⁶⁰ Co	1332,5	-
²⁰⁸ Tl	277,4	-	⁴⁰ K	1460,8	0,81
²¹⁴ Pb	295,2	0,85	²¹⁴ Bi	1764,5	0,08
			²⁰⁸ Tl	2614,5	0,38

Liste des pics présents sur le mouvement propre, t = 2 500 000 s

Les tableaux représentent les différents taux de comptage obtenus lors d'un mouvement propre. Le temps mort de 0,5 (3) % provient principalement du VETO, nous observons :

- Les radionucléides des chaînes naturelles de ²³⁸U, ²³⁵U et ²³²Th qui proviennent du plomb de la cellule, des descendants du radon et des matériaux composant le détecteur ;
- Une partie des X du plomb qui traversent le cuivre, leur élimination serait totale en augmentant l'épaisseur de cuivre à 12 mm ;
- Quelques interactions neutroniques : certains neutrons n'ont pas été absorbés par le cadmium (besoin d'ajout de plus de neutrophages type cadmium ou bore) ;
- La cellule ou le détecteur présentent une contamination en ¹³⁷Cs de quelques μ Bq apparue au cours des 16 années de fonctionnement ; ceci montre la sensibilité d'une telle installation, un nettoyage régulier et un confinement des sources permettent de limiter ces problèmes.

Les valeurs avec un « - » indiquent que ces émissions ne sont pas visibles sur le spectre : aucun pic de ⁶⁰Co visible après 2 mois de mouvements propres cumulés ;

Un réglage plus fin de l'électronique nous permettra d'améliorer les résultats. Il s'agit cependant d'un long processus de tests nécessitant des mesures de mouvement propre après chaque réglage. Ceci est réalisé en fonction des disponibilités de l'installation.

Énergie (keV)	h ⁻¹ .kgGe ⁻¹	min ⁻¹ .kgGe ⁻¹
15 - 3300	244,8 (6)	4,07 (1)
15 - 1600	222,5 (6)	3,70 (1)
20 - 2500	233,9 (6)	3,90 (1)
40 - 2500	220,5 (6)	3,68 (1)
15 - 100	58,6 (3)	0,977 (5)
100 - 400	86,4 (4)	1,441 (6)
400 - 1400	71,4 (4)	1,190 (6)
1400 - 2500	19,8 (2)	0,330 (3)
2500 - 3300	8,5 (1)	0,142 (2)

Mouvement propre par zone d'énergie