

**Caractérisation de l'électronique de
traitement de la chaîne de
spectrométrie gamma G5 pour la
mesure des fortes activités**

Johann PLAGNARD

Novembre 2004

- Table des matières -

1	INTRODUCTION	3
2	DESCRIPTION DU SYSTEME DE MESURE.....	3
2.1	Détecteur et système électronique de traitement	3
2.2	Détails concernant le fonctionnement de l'amplificateur rapide 2024.....	4
2.3	Détails concernant le fonctionnement du codeur 8715.....	5
3	ETUDE DE LA REPONSE QUALITATIVE ET QUANTITATIVE -	6
3.1	Evolution de la résolution en fonction du taux de comptage.....	6
3.2	Evolution du comptage en fonction du taux de comptage.....	7
3.2.1	Protocole	7
3.2.2	Source de référence : ^{60}Co – Source parasite : ^{133}Ba	7
3.2.3	Source de référence : ^{137}Cs – Source parasite : ^{57}Co	8
3.2.4	Source de référence : ^{60}Co – Source parasite : ^{54}Mn	9
3.2.5	Variation du temps mort	10
4	CONCLUSION.....	11

1 INTRODUCTION

L'objet de ce rapport est de présenter une synthèse des résultats des essais réalisés sur la chaîne de spectrométrie gamma référencée G5 et utilisée pour les mesures des radionucléides de fortes activités (jusqu'à une centaine de GBq). Ces travaux avaient pour but de caractériser la réponse de l'électronique de traitement en fonction du taux de comptage en entrée de chaîne d'un point de vue qualitatif (résolution des spectres) et quantitatif.

Des essais réalisés en 2001 sur cette chaîne équipée de différents systèmes de traitement numérique des signaux (DSP) ont montré qu'ils ne permettaient pas de résoudre tous les problèmes liés aux hauts taux de comptage et que leurs réponses quantitatives restaient fortement perturbées en fonction du niveau d'activité mesurée (Note technique DIMRI/LNHB/01-17).

En conséquence, il fut décidé de se rabattre sur une électronique de traitement analogique rapide permettant de traiter plusieurs dizaine de milliers d'impulsions par seconde sans introduire de pertes de comptage. Cette note technique décrit les différents résultats obtenus avec ce type d'instrumentation.

2 DESCRIPTION DU SYSTEME DE MESURE

2.1 Détecteur et système électronique de traitement

Le détecteur utilisé actuellement correspond à un détecteur de type N de marque : Eurisys Mesure et équipé d'un pré-amplificateur à remise à zéro transistorisée parfaitement adapté aux hauts taux de comptage. Les caractéristiques principales de ce détecteur sont les suivantes :

Détecteur GeHP coaxial type N - référence : EGNC 13 - numéro de série : 7831

Caractéristiques géométriques :

Diamètre du cristal : 45,5 mm Longueur du cristal : 26,7 mm Volume utile : 44,5 cm³
Zone morte de germanium : < 0,5 µm Distance cristal/capot : 5 mm
Fenêtre : Béryllium épaisseur : 300 µm

Performances :

Energie	6 keV	122 keV	1332,5 keV
Résolution (FWHM) en keV	0,560	0,750	1,70

Spécifications à 1332 keV :

Rendement relatif : 9% Rapport pic sur Compton : 41
Rapports : FWHM/FWHM : 1,86 FWHM/FWHM : 2,45

Le signal créé dans le détecteur est traité par un ensemble de deux tiroirs analogiques de marque Canberra. Le premier correspond à un amplificateur, modèle : 2024, doté d'un système de rejet d'empilement et d'une possibilité de mise en forme du type : intégrateur à porte. Le deuxième est un codeur (ADC) à approximations successives (ou à poids rapide), modèle : 8715, doté d'un temps de conversion fixe de 900 ns par impulsion. La carte d'interfaçage ADC/ordinateur est du type Accuspec B standard utilisant le logiciel de traitement développé par la société A&M.

Ce type de système permet d'obtenir, d'après les performances annoncées par le constructeur, une réponse optimisée en résolution et en capacité de traitement pour des taux de comptage élevés. Il autorise une grande plage de réglages de mise en forme du signal (constante de mise en forme) qui associée à l'intégrateur à porte permet d'optimiser à la fois la résolution (largeur à mi-hauteur des pics) et la capacité de traitement (taux de comptage maximal admissible).

La figure 1 présente une vue d'ensemble de l'installation : détecteur + chaîne d'acquisition.

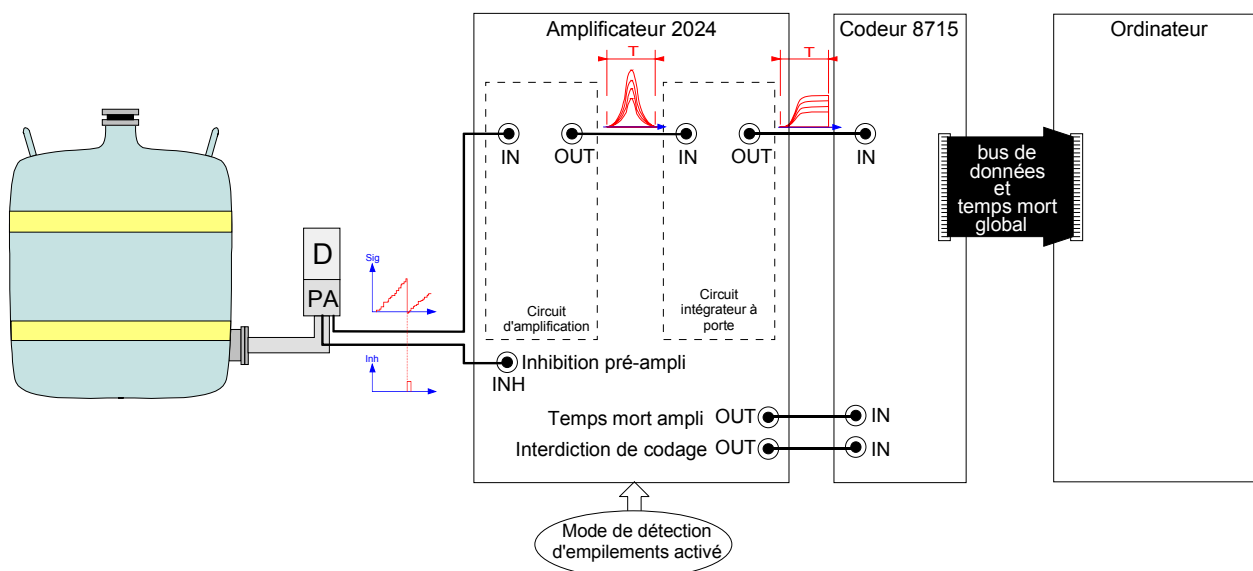


Figure 1 : Schéma de l'installation G5

2.2 Détails concernant le fonctionnement de l'amplificateur rapide 2024

L'amplificateur 2024 mis en place sur cette chaîne permet un fonctionnement optimisé pour les forts taux de comptage. Il est doté de deux circuits électroniques complémentaires permettant de traiter les différents problèmes inhérents aux forts taux de comptage : la gestion des empilements électroniques, la gestion du temps mort. Ces deux circuits correspondent d'une part au circuit de rejet d'empilement (PUR : Pile Up Rejector) et d'autre part au circuit de mise en forme du type intégrateur à porte (GI : Gate Integrator).

Le rôle du circuit de rejet d'empilement est double. En premier lieu, il permet via un circuit d'amplification rapide de détecter toutes les impulsions qui se présentent à l'entrée de l'amplificateur. Lors de la mise en forme d'une impulsion par la voie lente (utilisée pour la fabrication du spectre), si l'amplificateur rapide détecte une nouvelle impulsion en entrée, le système est alors informé qu'un

empilement va se produire entre les deux impulsions. Il y aura alors émission un signal d'inhibition de codage vers l'ADC qui se verra dans l'impossibilité de traiter l'impulsion empilée. Ce blocage génère alors un temps mort qui sera calculé par l'amplificateur (deuxième fonctionnalité) et transmis au codeur afin qu'il puisse être pris en compte lors du calcul du temps réel de mesure. En effet, l'utilisateur travaillant la plupart du temps en temps actif de mesure, le système prend en compte le temps mort et rajoute du temps de comptage pour compenser les durées de blocage issues du rejet des empilements électroniques.

La probabilité d'empilement de deux signaux successifs va dépendre fortement de leur durée. Plus un signal est long en temps et plus la probabilité qu'il s'empile sur le signal suivant est importante. Pour réduire cette probabilité, la solution simple et rapide est de diminuer cette durée. Pour ce faire, les amplificateurs de spectrométrie sont tous dotés d'un réglage de temps de mise en forme. Il est classiquement imposé entre 4 et 6 μs ce qui crée des signaux de 20 à 25 μs de durée totale (temps de montée + temps de descente). Ce réglage ne permet pas un fonctionnement optimisé pour les forts taux de comptage. Il convient donc de réduire fortement cette durée de mise en forme qui peut être ramenée sur certain système à 0,25 μs . Dans un tel cas de figure, la durée totale de chaque impulsion est réduite à 1,25 μs ce qui permet de gagner un facteur 20 sur la durée totale de chaque signal.

La conséquence de ce type de réglage est une dégradation très importante de la résolution du spectre due à la diminution du rapport signal sur bruit. En règle générale, un changement de constante de mise en forme de 6 μs à 0,25 μs sur une chaîne électronique provoque une dégradation de résolution de près d'un facteur 4. Cela revient à dire que la résolution passe de 1,8 keV (à 1,3 MeV) à 7 keV ! C'est dans ce cas bien précis que le circuit d'intégration à porte (GI) est utilisé. Il permet de restituer une résolution "normale" au spectre tout en gardant une constante de mise en forme faible. L'originalité de ce type d'électronique est qu'elle permet d'améliorer le rapport signal sur bruit en utilisant l'intégralité du signal (sa surface) et non son amplitude. La résolution alors obtenue dans une telle configuration est le l'ordre de 2,4 à 2,6 keV.

2.3 Détails concernant le fonctionnement du codeur 8715

Le gain en temps réalisé par l'adoption d'une constante de mise en forme faible ne doit pas être annulé par l'utilisation d'un codeur lent. De ce fait, il est important de choisir un système permettant de traiter chaque impulsion le plus vite possible afin de ne pas rajouter un temps mort inutile. A ce stade, l'utilisateur a le choix entre deux systèmes : le premier à temps de conversion fixe (codeur à poids ou à approximation successive), le second à temps de conversion variable en fonction de l'amplitude du signal (codeur Wilkinston). Chacun présente ses avantages et ses inconvénients et le choix de tel ou tel autre système va dépendre du cahier des charges initiales. Le premier présente un fonctionnement quantitatif (gestion du temps mort) très reproductible quelque soit le taux de comptage et l'énergie mise en jeu. Le second offre une linéarité excellente en fonction de l'énergie mais il possède une gestion de temps mort qui dépend de l'énergie du rayonnement détecté. Dans notre cas, nous souhaitons privilégier la précision sur la métrologie du temps mort. De ce fait, nous avons choisi un système à temps de conversion fixe qui présente un temps mort fixe quelle que soit l'amplitude du signal à traiter. Ce temps de conversion est défini en usine et est imposé à 900 ns (pour 8192 canaux) pour le codeur 8715.

Ainsi, l'évolution de la réponse de ce système ne dépend pas de l'énergie incidente sur le détecteur ce qui n'était pas le cas avec les systèmes de traitement digital des impulsions précédemment testés (Note technique DIMRI/LNHB/01-17).

3 ETUDE DE LA REPOSE QUALITATIVE ET QUANTITATIVE -

3.1 Evolution de la résolution en fonction du taux de comptage

La réponse qualitative d'une chaîne de spectrométrie gamma est caractérisée par la largeur à mi-hauteur (résolution) des raies présentes dans le spectre. Elle dépend fortement des paramètres de mise en forme du signal (constante de mise en forme) ainsi que du taux de comptage à l'entrée du système. La résolution sera d'autant meilleure que les constantes de mise en forme seront longues ce qui malheureusement aura pour conséquence une diminution de la capacité de traitement à fort taux de comptage. Un compromis est donc à établir entre la résolution et la capacité de traitement.

L'objectif initial étant de pouvoir mesurer de très fortes activités, l'amplificateur a été réglé avec la constante de mise en forme la plus courte possible correspondant à 0,25 μ s. La résolution alors obtenue à bas taux de comptage est de 2,6 keV sur le pic à 1332 keV du ^{60}Co ce qui génère une dégradation de la résolution de 50% par rapport à celle obtenue avec une constante de 6 μ s.

Afin d'observer l'évolution de la résolution à mesure que l'activité augmente, des tests ont été réalisés en relevant la largeur à mi-hauteur de deux raies de référence (la raie à 1332 keV du ^{60}Co et celle à 662 keV du ^{137}Cs) en fonction de différents taux de comptage. L'évolution du taux de comptage est obtenue en rapprochant progressivement une source de perturbation (source parasite) du détecteur. Différentes sources parasites ont été utilisées et correspondent aux radionucléides suivants : ^{133}Ba , ^{57}Co et ^{54}Mn .

Les résultats obtenus sur les variations de résolution en fonction du taux de comptage sont représentés sur la figure 2.

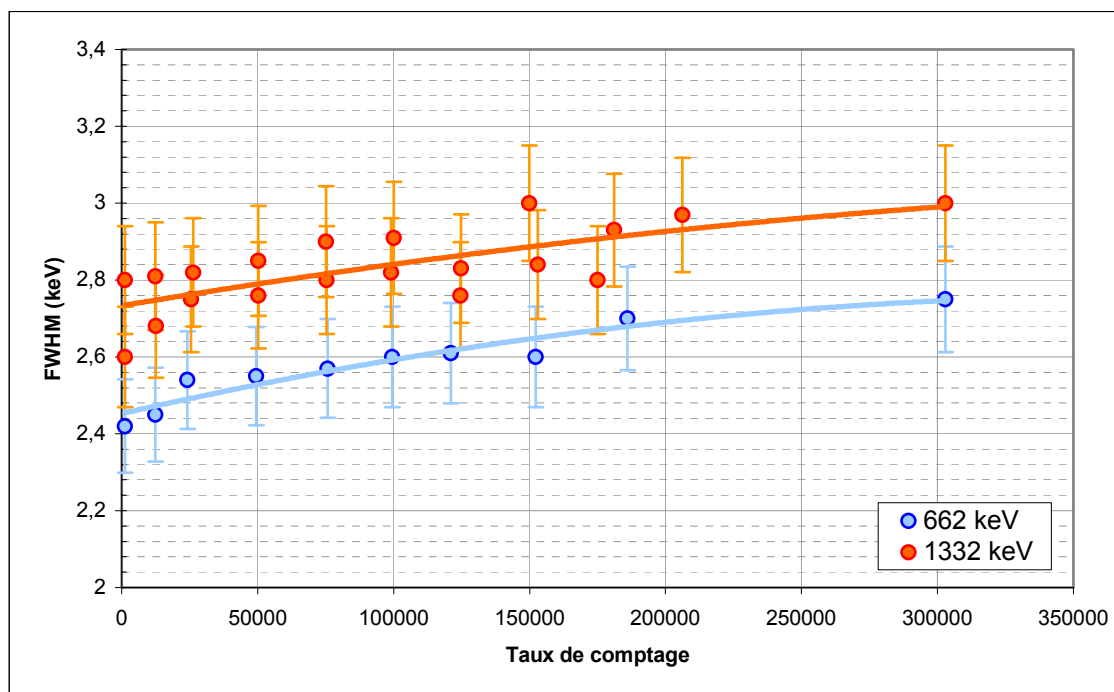


Figure 2 : Courbe d'évolution de la résolution en fonction du taux de comptage

Ces résultats montrent que la résolution se dégrade très progressivement à mesure que le taux de comptage augmente. Elle peut atteindre 10 % de dégradation à 300 000 impulsions par seconde ce qui reste malgré tout très raisonnable compte tenu du taux de comptage.

3.2 Evolution du comptage en fonction du taux de comptage

3.2.1 Protocole

De la même manière que pour l'étude sur la résolution, plusieurs essais ont été réalisés à différents taux de comptage et avec différentes configurations concernant les radionucléides utilisées. Le principe reste le même et consiste à simuler l'augmentation de l'activité en rapprochant une source de forte activité vers le détecteur. L'évolution de la réponse du système est obtenue à partir de la mesure d'une source de référence placée sur le détecteur. Il est à noter que l'énergie émise par cette source de référence doit être supérieure à celle émise par la source parasite afin que la mesure des pics de référence ne soit pas perturbée par l'apparition du fond issu du spectre de la source parasite.

Pour vérifier l'invariabilité de la réponse de la chaîne électronique aux énergies incidentes, plusieurs domaines d'énergies ont été exploités et correspondent aux configurations suivantes :

source de référence : ^{60}Co (raies gamma exploitées : 1173,2 keV et 1332,5 keV)
source parasite : ^{133}Ba (énergies émises : 80 keV à 384 keV)

source de référence : ^{137}Cs (raie gamma exploitée : 661.6 keV)
source parasite : ^{57}Co (énergies émises : 122 keV et 136 keV)

source de référence : ^{60}Mn (raie gamma exploitée : 1173,2 keV et 1332,5 keV)
source parasite : ^{54}Mn (énergies émises : 835 keV)

Ces trois configurations permettent d'obtenir une gamme d'énergies perturbatrices suffisamment large pour observer l'évolution la réponse du système en fonction de l'énergie incidente sur le détecteur.

3.2.2 Source de référence : ^{60}Co – Source parasite : ^{133}Ba

Des relevés ont été réalisés jusqu'à un taux de comptage de 180 000 impulsions par seconde. Les résultats obtenus figurent dans le tableau 2 et la variation des comptages comparativement à la mesure réalisée à bas taux de comptage est montrée sur la figure 3.

Ces résultats montrent un comportement peu dépendant du taux de comptage. Les variations dans les surfaces obtenues restent du même ordre de grandeur que les incertitudes mentionnées et ne dépassent pas 2% sur toute la gamme de taux de comptage. On peut donc conclure que le système se comporte convenablement jusqu'à 180 000 impulsions par seconde avec une perte de comptage très faible avoisinant 1%.

Taux de comptage (s-1)	Surface 1332 keV	inc. %	Snormalisée	Inc. abs	Surface 1173 keV	inc. %	Snormalisée	inc. abs
1230	19312	0,54	1,0000	0,0072	22410	0,57	1,0000	0,0081
12400	19371	0,79	1,0031	0,0088	22193	0,81	0,9903	0,0098
25500	19171	0,77	0,9927	0,0086	22307	0,85	0,9954	0,0102
50300	19368	0,79	1,0029	0,0088	21970	0,9	0,9804	0,0104
75200	19350	0,79	1,0020	0,0088	22285	0,89	0,9944	0,0105
99000	19390	0,8	1,0040	0,0089	22007	0,91	0,9820	0,0105
124800	19462	0,81	1,0078	0,0090	22127	0,93	0,9874	0,0108
153000	19072	0,85	0,9876	0,0090	22226	0,93	0,9918	0,0108
181000	19164	0,86	0,9923	0,0091	22049	0,96	0,9839	0,0110

Tableau 2 : Variation des comptages des raies à 1173 et 1332 keV avec comme parasite du ^{133}Ba

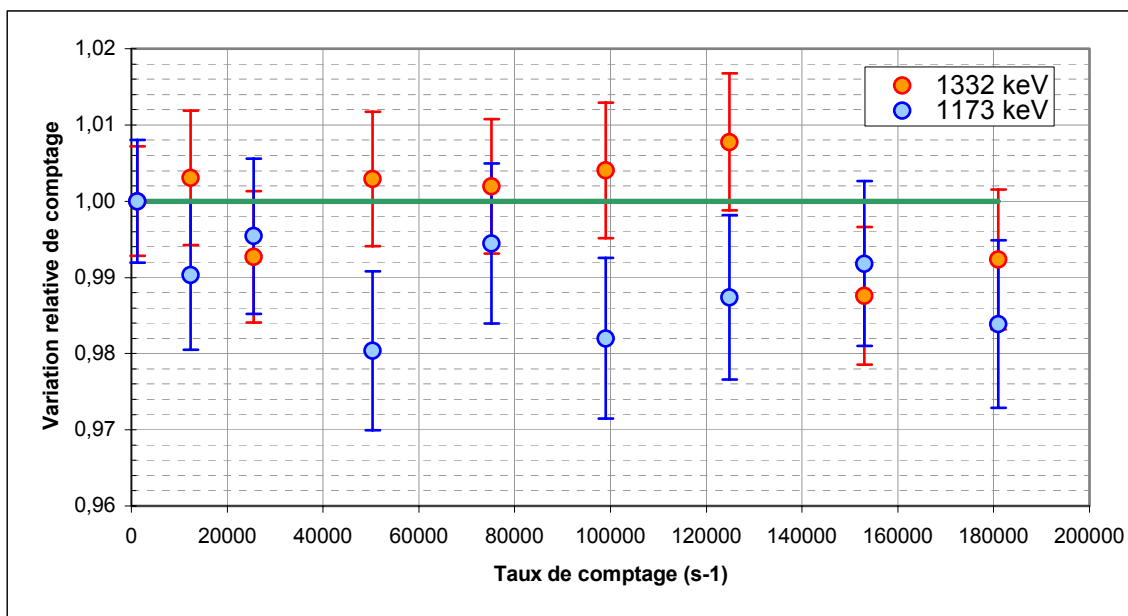


Figure 3 : Courbe de l'évolution des comptages de la raie à 1332 keV avec comme parasite du ^{133}Ba

3.2.3 Source de référence : ^{137}Cs – Source parasite : ^{57}Co

Les résultats obtenus dans cette configuration sont représentés sur le tableau 3 et sur la figure 4. Les écarts observés entre la valeur de référence (à bas taux de comptage) et les mesures à différents taux de comptage ne dépassent pas 2 %. Une fois de plus, les valeurs trouvées sont très homogènes et montrent qu'il n'y a pas de réels biais de mesure lorsque le taux de comptage augmente.

Taux de comptage (s-1)	Surface 662 keV	inc. %	Snormalisée	inc. abs
1100	26758	0,62	1,0000	0,0074
12400	26305	0,63	0,9831	0,0074
24200	26812	0,62	1,0020	0,0075
49400	26407	0,64	0,9869	0,0075
75800	26598	0,64	0,9940	0,0075
99500	26338	0,65	0,9843	0,0075
121000	26953	0,64	1,0073	0,0076
152300	26781	0,66	1,0009	0,0077
186000	26974	0,677	1,0081	0,0079

Tableau 3 : Variation des comptages de la raie à 662 keV avec comme parasite du ^{57}Co

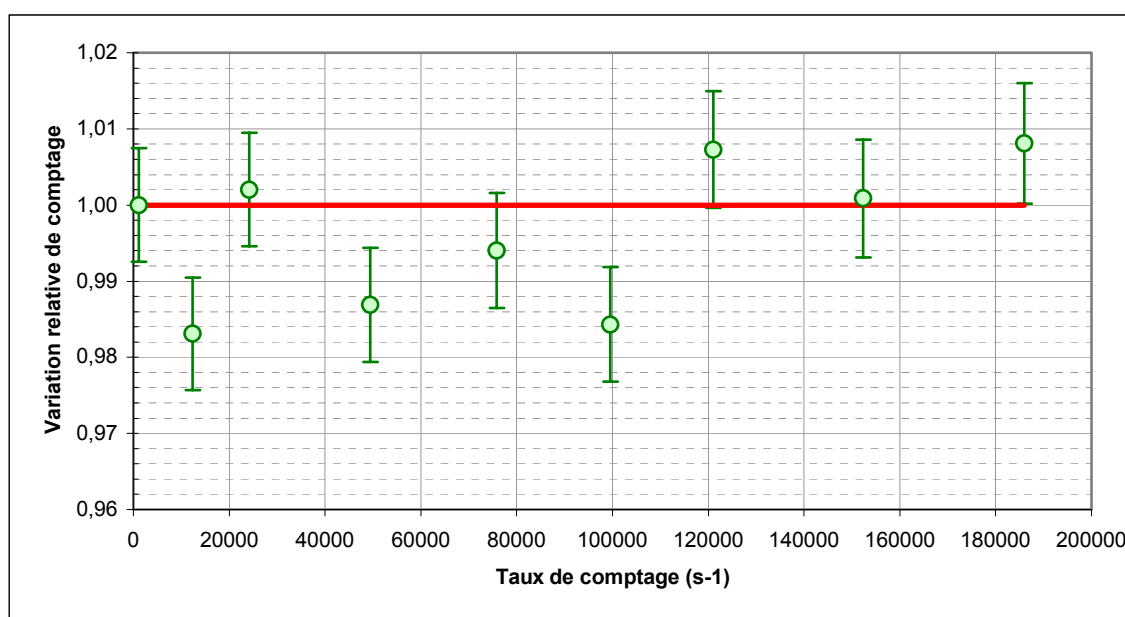


Figure 4 : Courbe de l'évolution des comptages de la raie à 662 keV avec comme parasite du ^{57}Co

3.2.4 Source de référence : ^{60}Co – Source parasite : ^{54}Mn

Les résultats obtenus dans cette dernière configuration correspondant au parasite d'énergie maximale (834 keV) figurent dans le tableau 4 et sur la figure 5. Les écarts observés correspondent une fois encore à ce qui a été trouvé jusqu'à présent. Ils ne dépassent pas 2 % jusqu'à 200 000 impulsions par seconde. Au-delà de cette valeur, le fond d'empilements synchrones devient très important sous les pics de 1173 keV et 1332 keV ce qui gêne la détermination de la surface de chacun des pics. Cela explique l'importante augmentation de l'incertitude associée à la surface des pics ainsi que les écarts observés.

Ces résultats restent malgré tout très bons et montrent le bon comportement de l'électronique même à fort taux de comptage.

Taux de comptage (s-1)	Surface 1332 keV	inc. %	Snormalisée	inc. abs	Surface 1173 keV	inc. %	Snormalisée	inc. abs
1200	18534	0,8	1,0000	0,0084	21042	0,8	1,0000	0,0113
12600	18130	0,79	0,9782	0,0081	20990	0,85	0,9975	0,0116
26300	18531	0,81	0,9998	0,0084	20920	0,91	0,9942	0,0120
50200	18359	1	0,9906	0,0099	21116	1,02	1,0035	0,0130
75300	18008	1,12	0,9716	0,0106	21332	1,26	1,0138	0,0151
100000	18168	1,45	0,9803	0,0132	21064	1,54	1,0010	0,0174
124600	18342	1,6	0,9896	0,0144	21523	1,8	1,0229	0,0201
149800	18611	2	1,0042	0,0175	21290	2,4	1,0118	0,0256
175000	18173	2,3	0,9805	0,0191	20550	3,2	0,9766	0,0322
206200	18852	3,5	1,0172	0,0277	21231	3	1,0090	0,0313
249300	18563	3,6	1,0016	0,0279	21640	3,7	1,0284	0,0389
303000	19846	5	1,0708	0,0388	20973	5	0,9967	0,0505

Tableau 4 : Variation des comptages des raies à 1173 et 1332 keV avec comme parasite du ^{54}Mn

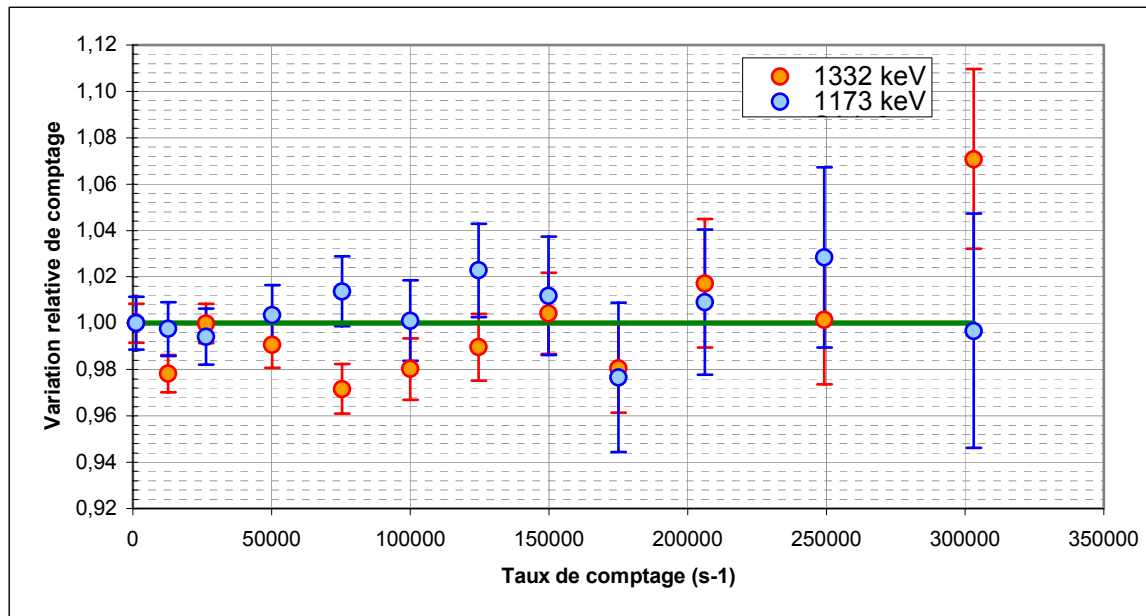


Figure 5 : Courbe de l'évolution des comptages des raies à 1173 et 1332 keV avec comme parasite du ^{54}Mn

3.2.5 Variation du temps mort

A l'issue de ces différents tests, il est aussi intéressant de tracer l'évolution du temps mort en fonction du taux de comptage et de l'énergie incidente mise en jeu. La figure 6 montre l'évolution des résultats obtenus. On constate que quelle que soit l'énergie mise en jeu, le temps mort reste fixe pour un taux de comptage donné. Il dépend uniquement du taux de comptage en entrée de chaîne. Ceci s'explique par l'utilisation d'un codeur à temps de conversion fixe dont le temps mort interne est totalement indépendant de l'énergie à coder. L'utilisation d'un tel système permet une bonne métrologie du temps mort ce qui explique les bons résultats obtenus jusqu'à maintenant.

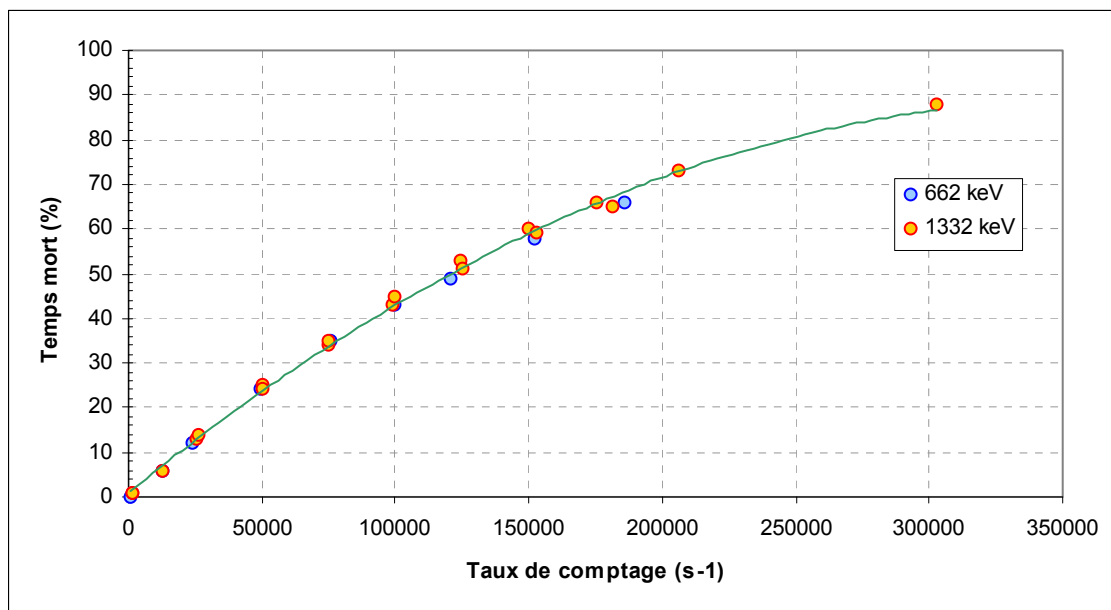


Figure 6 : Variation du temps mort en fonction du taux de comptage

4 CONCLUSION

Les résultats obtenus ont mis en évidence le bon fonctionnement du couple : amplificateur 2024 + codeur 8715 jusqu'à 200 000 impulsions par seconde.

La dégradation en résolution ne dépasse pas 10% lorsque le taux de comptage varie de 0 à 200 000 impulsions par seconde avec une constante de mise en forme optimisée pour la mesure des fortes activités. Les performances initiales en terme de résolution dépendent uniquement de la valeur de la constante de mise en forme utilisée.

Les pertes de comptage issues de l'apparition d'empilements électronique à mesure que l'activité augmente, ne dépassent pas 2 % à 200 000 impulsions par seconde. Il est important de noter qu'aucune dépendance en fonction de l'énergie incidente n'a pu être mise en évidence dans le cadre de ces essais.

On peut donc conclure que d'un point de vue métrologique, ce système permet de réaliser des mesures parfaitement fiables jusqu'à 200 000 impulsions par seconde sans l'apparition de biais de comptage ni de grosses pertes du pouvoir résolutif.

La chaîne ainsi réglée et testée remplit parfaitement le cahier des charges que l'on s'était fixé initialement.