

Détermination Expérimentale du Spectre des Photons Gamma dans l' Atmosphère à 12 GV de Coupure Geomagnétique

I. M. MARTIN, S. L. G. DUTRA et R. PALMEIRA

Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos SP

G. VEDRENNE et F. ALBERNHE

Centre d'Études Spatiales des Rayonnements, Toulouse, France

Recebido em 4 de Fevereiro de 1975

The energy spectrum of atmospheric gamma-rays from 0.9 to 18.0 MeV has been measured as a function of altitude in a series of two balloon flights from São José dos Campos, São Paulo, Brazil (12 GV cut-off rigidity). The detector used was a 4 x 4 NaI(Tl) crystal with a 1 cm thick plastic scintillator anti-coincidence shield, connected to a 128 channel pulse height analyser. Above 20 g/cm², the energy spectrum could be fitted to a power law with exponent 1.0 ± 0.1 independent of the altitude. From 20 to 760 g/cm², the spectrum was found to be somewhat steeper with the exponential index being 1.3 ± 0.1 . At 3.5 g/cm², the gamma-ray flux was 0.30 photons/cm²-s at 1 MeV. These measurements are discussed and compared with calculated results.

Neste trabalho analisamos dados do fluxo de fofons de raios gama em função da altitude entre 0,9 e 18,0 MeV obtidos em dois vôos de balões estratosféricos lançados em São José dos Campos, São Paulo, Brasil (12 GV de rigidez magnética de corte). Foi usado nesta experiência um detetor de NaI (TI) de 4 x 4, envolto num cintilador plástico de 1 cm de espessura funcionando em anticoincidência, com o cristal de análise associado a um analisador de pulso de 128 canais. Acima de 20 g/cm², o espectro diferencial pode ser melhor representado por uma lei em potência com expoente de $1,0 \pm 0,1$, independente da altura. Entre 20 e 760 g/cm², o espectro medido é mais pronunciado, com um índice espectral de $1,3 \pm 0,1$. A 3,5 g/cm², o fluxo de raios gama é de 0,30 fofons/cm²-s. Estes resultados serão comparados e discutidos com previsões já existentes.

1. Introduction

Les rayons gamma atmosphériques sont créés par le rayonnement cosmique primaire qui, en pénétrant dans les couches de l'atmosphère, interagit avec les noyaux de l'air. Les rayons γ mesurés aux altitudes atteintes par des ballons stratosphériques sont d'origine atmosphérique, solaire et extraterrestre. Les photons γ d'origine extraterrestre peuvent provenir des sources galactiques bien localisées et d'un bruit de fond diffus.

En ce qui concerne le spectre des rayons γ de basse énergie, dans l'atmosphère aucune prévision théorique globale de la variation du flux en fonction de la latitude n'a été faite jusqu'à nos jours. L'étude théorique de la production de rayons γ dans l'atmosphère, en fonction de la latitude et de la pression résiduelle, doit s'appuyer sur des résultats expérimentaux (Martin¹, Beuerman², Puskin³, Ling⁴).

Les seules mesures du spectre des rayons γ entre 1 à 10 MeV est due à Peterson *et al.*⁵, Klumplar *et al.*⁶, à 42°N, et Martin *et al.*⁷ à 10°N, 42°N et 62°N de latitude géomagnétique.

Après une description du dispositif expérimentale et de la méthode d'analyse, nous présentons dans ce travail les résultats essentiels du spectre des rayons γ , entre 0,9 et 18,0 MeV, en fonction de la profondeur atmosphérique.

2. Dispositif Expérimental

La détection des rayons γ est assurée par un scintillateur inorganique de NaI(Tl) de 10,16 x 10,16 cm² directement associé à un photomultiplicateur RCA 8055. Dans l'intervalle d'énergie que nous sommes intéressés les mécanismes d'interactions des photons γ dans le scintillateur est due aux effet photoélectrique, effet Compton et effet de production de paires. Dans le trois cas, nous avons la production d'électrons et par interactions avec les atomes du NaI(Tl) donnent des émissions de lumière visible détectés par les photomultiplicateurs. La restitution du spectre des photons incidents dans le scintillateurs, à partir du spectre des pertes des énergies détectée dans le cristal par le photomultiplicateur, a constitué un programme de simulation du type "Monte Carlo" développé par Martin *et al.*⁸.

Un deuxième détecteur, constitué par un scintillateur plastique entourant le scintillateur d'analyse et fonctionnant en anticoincidence, permet d'éliminer les particules chargées.

Le schéma général du spectromètre est représenté dans la Fig. 1. Les paramètres technologiques, ainsi que les informations provenant du analyseur d'impulsions (codeur), sont retransmis au sol par une télémesure du type FM/FM en 137 MHz.

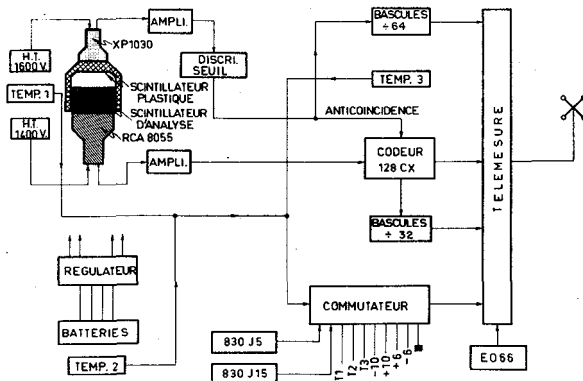
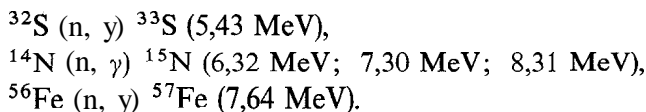
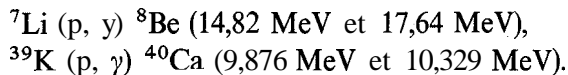


Figure 1 - Schema synoptique de l'ensemble de détection.

La linéarité du scintillateur et la étalonnage du codeur sont effectués au laboratoire par l'intermédiaire des sources monoénergétiques de rayons γ . Nous avons utilisé les sources radioactives de ^{22}Na , ^{60}Co , ^{88}Y , ^{228}Th , Am — Be et des photons γ produits par le réacteur de l'*Instituto de Energia Atômica* — São Paulo. Nous avons exploité les réactions suivantes:



Nous avons utilisé les accélérateurs linéaires du *Departamento de Física*, Universidade de São Paulo (USP), et de la *Pontificia Universidade Católica* (PUC) — Rio de Janeiro, en exploitant les deux réactions (p, γ), respectivement:



La surface équivalente du détecteur vue par un flux isotropique est calculée à partir de l'expression

$$S = \frac{\pi}{4} a h \left(1 + \frac{a}{2h} \right),$$

où h et a sont respectivement la hauteur et le diamètre du scintillateur.

3. Discussion des Résultats

Deux vols en ballons stratosphériques ont été effectués en 1973, à partir de São José dos Campos, São Paulo, coordonnées géographiques de (23°12'43"S, 45°51'35"W). Les récupérations des dispositifs expérimentaux après chaque vol ont permis d'une part d'opérer avec le même détecteur, donc dans des conditions rigoureusement identiques et, d'autre part, de vérifier les étalonnages après chaque vol.

Le premier vol a eu lieu le 7 Octobre 1973 (vol 17/73) dans des conditions magnétiques calmes tandis que le deuxième vol, qui a été effectuée le 20 Octobre 1973 (vol 18/73), s'est déroulée dans des conditions magnétiques perturbées.

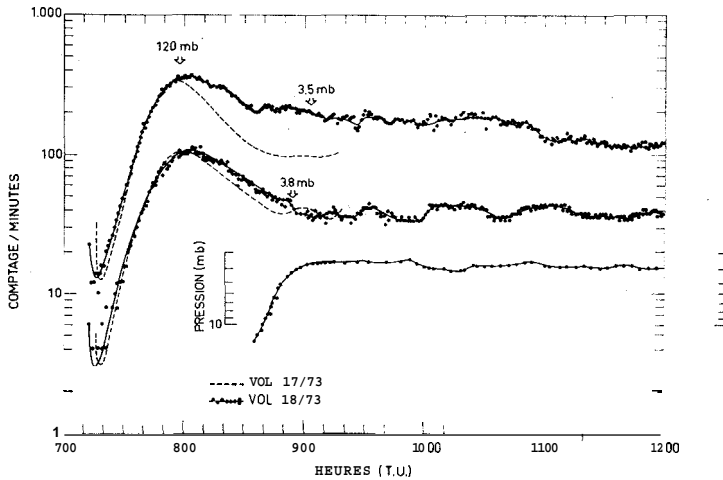


Figure 2a – Taux de comptage des photons γ et des particules chargées en fonction du temps de vol.

Ce dernier a atteint le plafond, à une pression résiduelle comprise entre 3,5 mb et 6 mb, pendant environ 10 heures. La Fig. 2 représente, pour ces deux vols, la variation en fonction du temps du taux de comptage des photons γ dans la gamme d'énergie 0,9 — 18 MeV et celle des particules chargées d'énergie supérieure à 0,7 MeV. Ces taux de comptage, calculés en fonction de la pression résiduelle sont représentés dans la Fig. 3. L'examen des courbes 2 et 3 montre des différences dans les taux de comptages dues aux perturbations magnétiques qui apparaissent dès 8 H 00 TU et pour une pression de 120 mb environ. Les perturbations restent sensibles jusqu'à 11 H 00 TU mais il est important de noter que ces effets magnétiques affectent les taux de comptage

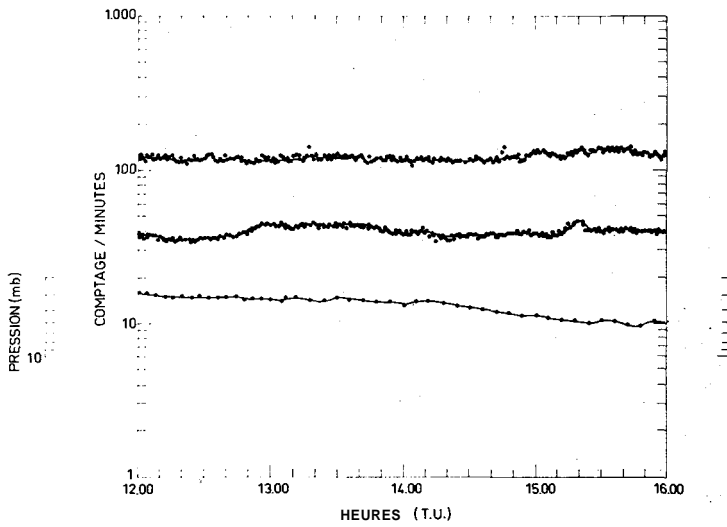


Fig. 2b - Continuation de la Figure 2a.

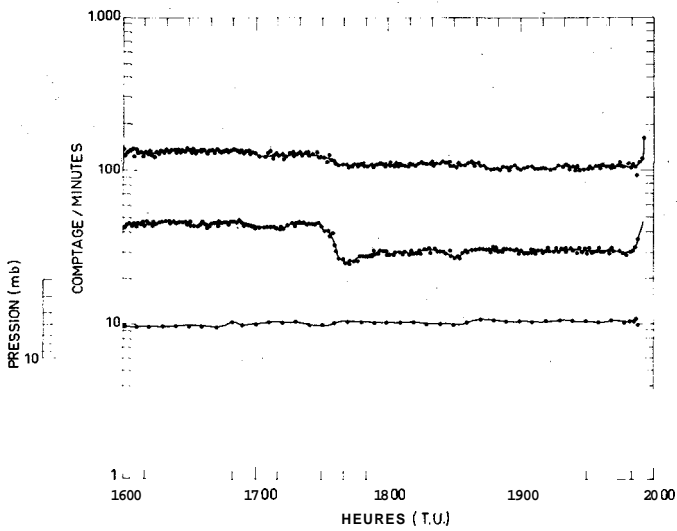


Fig. 2c - Continuation de la Figure 2b.

correspondant au flux de photons γ . La Fig. 4 représente pour mémoire l'enregistrement au sol à São José dos Campos des variations du champ magnétique total.

4. Variations de la Forme du Spectre des Photons γ Atmosphériques en Fonction de la Pression

La vitesse de montée d'un ballon stratosphérique est en moyenne de 400 m/minute. Dans ces conditions, il est difficile d'obtenir une mesure spectrale avec une bonne statistique car les taux de comptage enregistrés dans chaque canal restent très faibles pour des variations de la pression atmosphérique de quelques millibars entre 800 mb et 3,5 mb. Aussi les spectres ne peuvent être considérés que dans de larges domaines de pression.

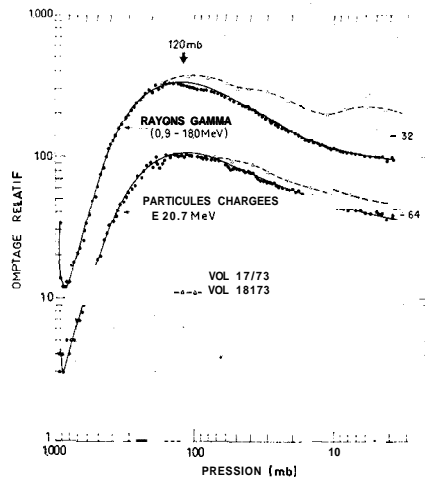


Figure 3 – Taux de comptage des photons γ et des particules chargées en fonction de la pression atmosphérique.

La variation du spectre en fonction de la pression a été obtenue à partir des données enregistrées pendant l'ascension du ballon au cours des vols 17/73 et 18/73. La Fig. 5 représente les spectres mesurés dans différentes bandes de pression pour le vol 17/73. Le Tableau I donne, pour chacune de ces bandes de pression, l'expression analytique des spectres observés.

La technique de simulation "Monte Carlo" qui est décrite en (Martin *et al.*)⁸ a été utilisée pour déterminer, à partir de ces spectres mesurés, les spectres de photons γ incidents.

Pression (mb)	Temps d'observation (minutes)	Spectre de photons (photons/cm ² .s.MeV)
765 - 305	20	$\frac{dN}{dE} = 0,12 E^{-1,3 \pm 0,1}$
235 - 83	15	$\frac{dN}{dE} = 0,47 E^{-1,3 \pm 0,1}$
38 - 12	17	$\frac{dN}{dE} = 0,35 E^{1,2 \pm 0,1}$

Tableau I -- Vol. 17/73.

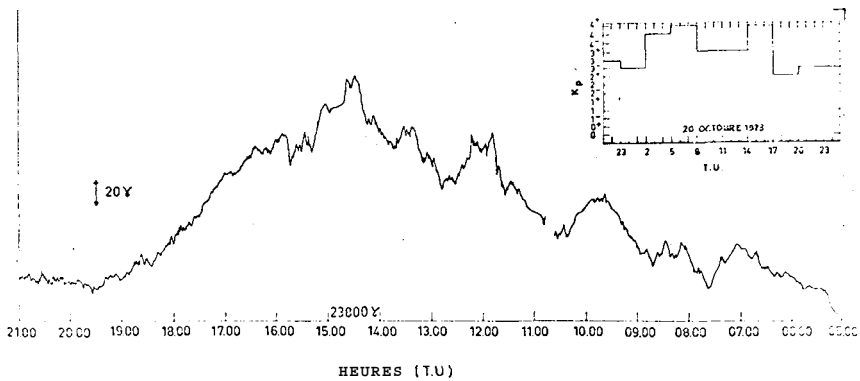


Figure 4 - Champ magnétique total mesuré à *São José dos Campos*, Brésil.

Pour le vol 18/73, sont reportés dans la Fig. 6 les spectres observés entre 360 et 200 mb et entre 125 et 90 mb. Les flux de photons correspondant sont donnés par les relations présentées au Tableau II.

Pression (mb)	Temps d'observation (minutes)	Spectre des photons (photons/cm ² .s.MeV)
360 - 200	10	$\frac{dN}{dE} = 1,2 E^{-1,3 \pm 0,1}$
125 - 90	5	$\frac{dN}{dE} = 0,87 E^{-1,3 \pm 0,1}$

Tableau II -- Vol. 18/73.

5. Détermination des Spectres des Photons γ Observés au Sommet de l' Atmosphère

Comme il a déjà été signalé dans ce travail, les mesures effectuées entre 08 H 00 et 11 H 00 TU, dans le vol 18/73, sont soumises à l'influence de perturbations magnétiques (Fig. 2). Par contre, entre 11 H 00 et 19 H 54 TU, le ballon est resté à une pression atmosphérique comprise entre 4,0 et 6,0 mb et les conditions étaient calmes comme dans le vol 17/73.

Dans la Fig. 7, sont reportés les spectres observés au cours du vol 17/73 pendant 35 minutes à un plafond de 3,8 mb et pour le vol 18/73 montre que la forme des spectres obtenus est la même pour les 2 vols considérés dans une période calme.

La forme analytique du spectre des photons correspondant à ces mesures est reportée dans le Tableau III.

Pression (mb)	Temps d'observation (minutes)	Spectre des photons (photons/cm ² .s.MeV)
3,8	35	$\frac{dN}{dE} = 0.27 E^{-1.0 \pm 0.1}$
4,5	32	$\frac{dN}{dE} = 0.30 E^{-1.0 \pm 0.1}$
4,3	30	$\frac{dN}{dE} = 0.28 E^{-1.0 \pm 0.1}$

Tableau III

6. Variation des Spectres Observés en Fonction de la Profondeur Atmosphérique

Dans les deux vols, les spectres mesurés sont comparés au plafond et à grande profondeur atmosphérique. Ceci est intéressant pour voir s'il existe un changement de pente du spectre en fonction de la pression. Pour le vol 18/73, sont considérés les spectres mesurés au plafond à 4,3 mb pendant la période calme et entre 360 et 200 mb (Figs. 8a et b). Pour le vol 17/73, sont également reportés, sur la Figs. 9a et b, les spectres mesurés au plafond à 3,8 mb et dans une couche atmosphérique correspondante à 735 – 305 mb.

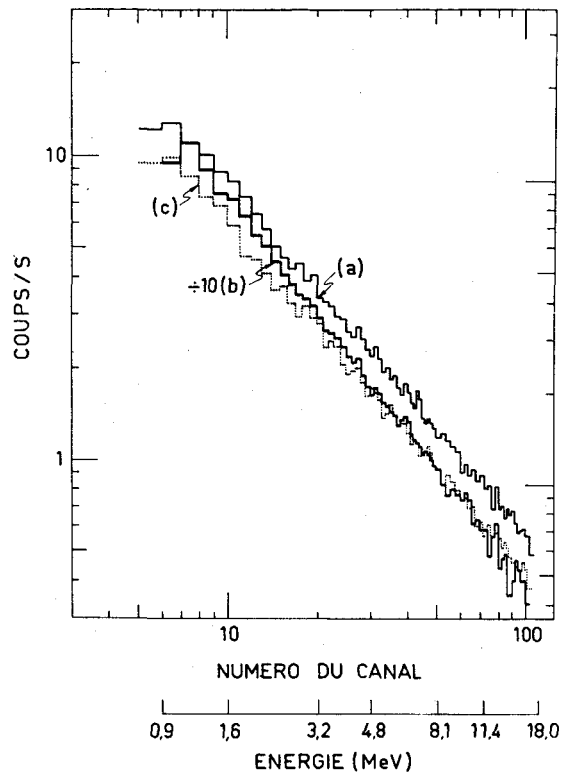


Figure 5 - Comparaison des spectres mesurés à grandes profondeurs atmosphériques pour le vol 17/73: (a) (235 - 83) mb, (b) (765 - 305) mb et (c) (38 - 12) mb.

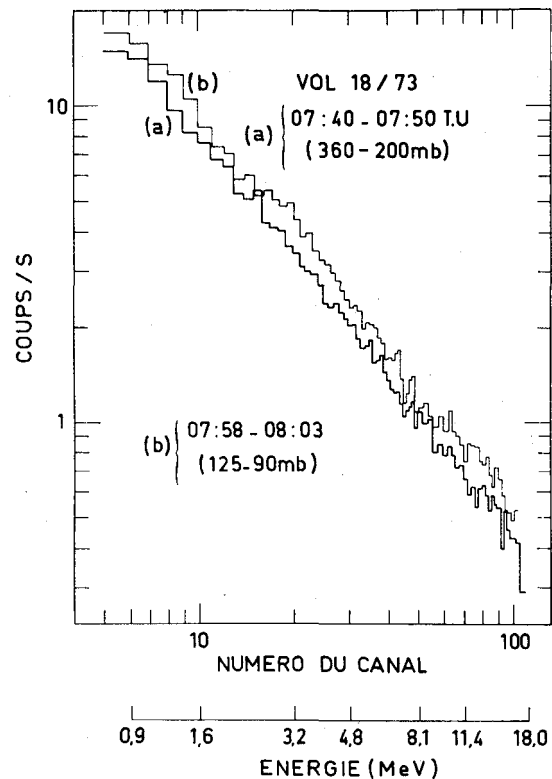


Figure 6 - Comparaison des spectres mesurés à grande profondeur atmosphérique pour le vol 18/73.

-A titre d'exemple, les spectres mesurés sont comparés sur les Figs. 10 a et b entre 235 et 83 mb pour le vol 17/73 et entre 360 et 200 mb pour le vol 18/73.

Nous constatons que, pendant les deux vols, la forme spectrale ne change pas pour des profondeurs atmosphériques supérieures a 90 mb. Les spectres des photons γ correspondant sont donnés dans le Tableau IV.

Pression (mb)	Temps d'observation (minutes)	Spectre des photons (photons/cm ² .s.MeV)
235 - 83	15	$\frac{dN}{dE} = 0,47 E^{-1,3 \pm 0,1}$
125 - 90	5	$\frac{dN}{dE} = 0,87 E^{-1,3 \pm 0,1}$

Tableau IV

L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus à différentes latitudes et entre 3,5 et 6,0 mb de pression atmosphérique résiduelle est présenté dans le Tableau V.

REFERENCE	TYPE DE DETECTEUR	LATITUDE GEOMAGNETIQUE	ENERGIE (MeV)	PRESSION (mb)	SPECTRE DES PHOTONS (photons/cm ² .s.MeV)
ALBERNHE <i>et al.</i> , 1971	STILBENE 1" x 1"	10°N	0,7 - 4,5	4,0	$\frac{dN}{dE} = 0,10 E^{-1,2}$
MARTIN <i>et al.</i> , 1971	STILBENE 1" x 1"	42°N	0,7 - 4,5	4,0	$\frac{dN}{dE} = 0,30 E^{-1,5}$
MARTIN <i>et al.</i> , 1971	STILBENE 1" x 1"	62°N	0,7 - 4,5	4,0	$\frac{dN}{dE} = 0,65 E^{-1,5}$
DANIEL <i>et al.</i> , 1972	NaI(Tl) 3" x 3"	8°N	0,7 - 10	4,7	$\frac{dN}{dE} = 0,16 E^{-1,5}$
*PETERSON <i>et al.</i> , 1973	NaI(Tl) 3" x 3"	42°N	0,7 - 10	3,5	$\frac{dN}{dE} = 0,36 E^{-1,4}$
KLUMPAR <i>et al.</i> , 1973	NE - 213	65°N	1 - 4,0	6,0	$\frac{dN}{dE} = 1,05 E^{-2,2}$
KLUMPAR <i>et al.</i> , 1973	NE - 213	65°N	4 - 10	6,0	$\frac{dN}{dE} = 0,40 E^{-1,5}$
KLUMPAR <i>et al.</i> , 1973	NE - 213	42°N	1 - 4	3,5	$\frac{dN}{dE} = 0,82 E^{-2,2}$
KLUMPAR <i>et al.</i> , 1973	NE - 213	42°N	4 - 10	3,5	$\frac{dN}{dE} = 0,36 E^{-1,6}$
NOS MESURES (1973) vols 17/73 et 18/73	NaI(Tl) 4" x 4	12°S	0,9 - 18,0	3,5	$\frac{dN}{dE} = 0,30 E^{-1,0}$

Tableau V (*non corrigé de l'efficacité du détecteur.)

7. Conclusions

Nous avons constaté, d'après les résultats de ces deux vols, que la longueur d'atténuation pour les rayons γ de 0,9 à 18,0 MeV est de $(110 \pm 10) \text{ g/cm}^2$ pour la latitude correspondante à 12 GV de coupure géomagnétique. La forme spectrale des rayons γ dans cette gamme d'énergie et entre 765 mb à 38 mb est du type

$$\frac{dN}{dE} = A E^{-1,3 \pm 0,1} \quad \text{photons/cm}^2 \cdot \text{s.MeV},$$

ou A est fonction de la pression atmosphérique.

Dans le domaine de pression correspondante à 6,0 et 3,5 mb la forme spectrale est du type

$$\frac{dN}{dE} = A E^{-1,0 \pm 0,1} \quad \text{photons/cm}^2 \cdot \text{s.MeV},$$

avec $A = 0,30$.

L'analyse des spectres obtenus en fonction de la profondeur atmosphérique montre que l'indice spectrale ne varie pas entre ~ 760 et 20 mb. À l'altitude supérieure à 20 mb, le spectre devient de plus en plus plat et au plafond de 3,5 mb l'indice spectral est de $(1,0 \pm 0,1)$. La prévision théorique donne, comme spectre atmosphérique à 3,5 mb un indice spectrale de $\sim 1,4$. Cette différence du spectre mesuré au sommet de l'atmosphère et à haute profondeur semble indiquer qu'un flux d'origine extraterrestre vient s'ajouter à celui produit dans l'atmosphère.

En conclusion, ce travail supporte une meilleure connaissance de la variation des flux de photons γ atmosphériques en fonction de pression résiduelle. En outre, il a montré la possibilité d'accéder à la détermination du bruit de fond γ d'origine cosmique grâce à des expériences embarquées en ballons. Les résultats déjà obtenus justifient de nouvelles mesures à basse latitude et avec des détecteurs semi-directif qu'il est possible de construire actuellement.

Nous avons à remercier à Dr. F. de Mendonça et Dr. Luiz Gylvan Meira Jr. de l'INPE pour avoir appuyé cette recherche. Ce travail a été possible grâce à la collaboration entre l'INPE, Brésil, et le CESR, France dont nous remercions Dr. F. Cambou pour son aide dans ce domaine de recherche. La mise au point des ensembles de détection a été le fruit d'un travail d'équipe de R. Senador, F. G. Blanco, E. Schneider, M. dos Santos, M. de Oliveira.

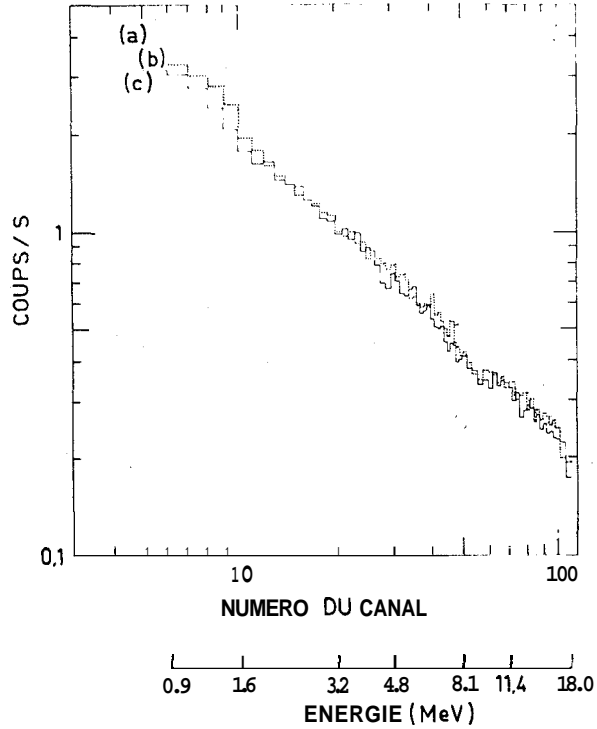


Figure 7 – Comparaison des spectres mesurés au plafond et en période magnétiquement calme pour les vols 17/73 et 18/73: (a) vol 17/73 (3,8 mb), (b) vol 18/73 (4,5 mb) et (c) vol 18/73 (4,3 mb).

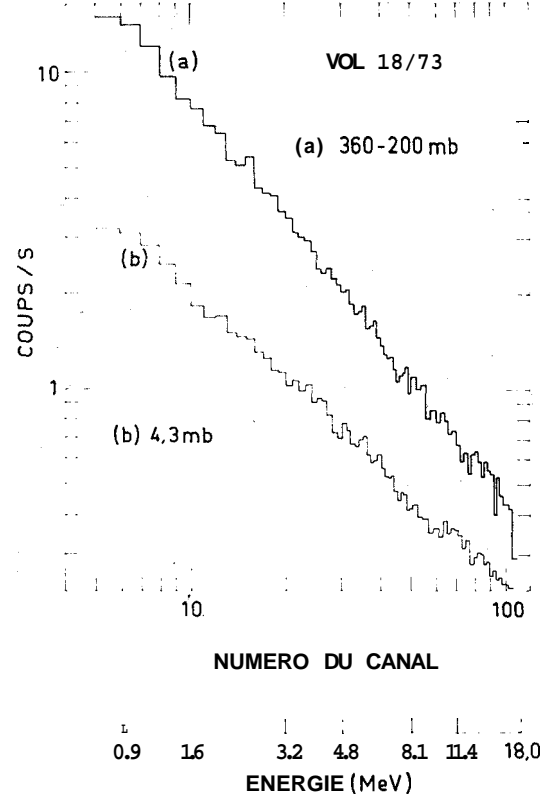


Figure 8 – Comparaison entre les spectres mesurés au plafond et à grande profondeur atmosphérique pour le vol 18/73.

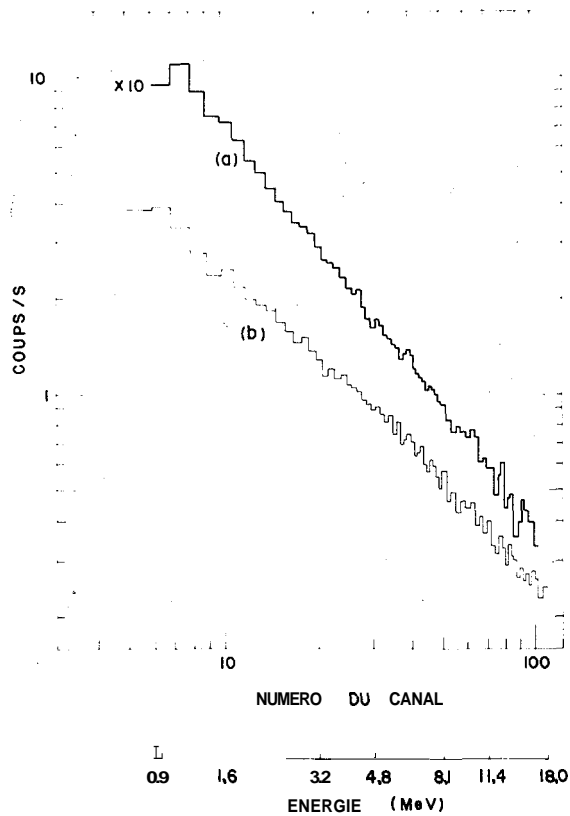


Figure 9 Comparaison entre les spectres mesurés au plafond et à grande profondeur atmosphérique pour le vol 17173: (a) (765 - 305) mb et (b) (3,8) mb.

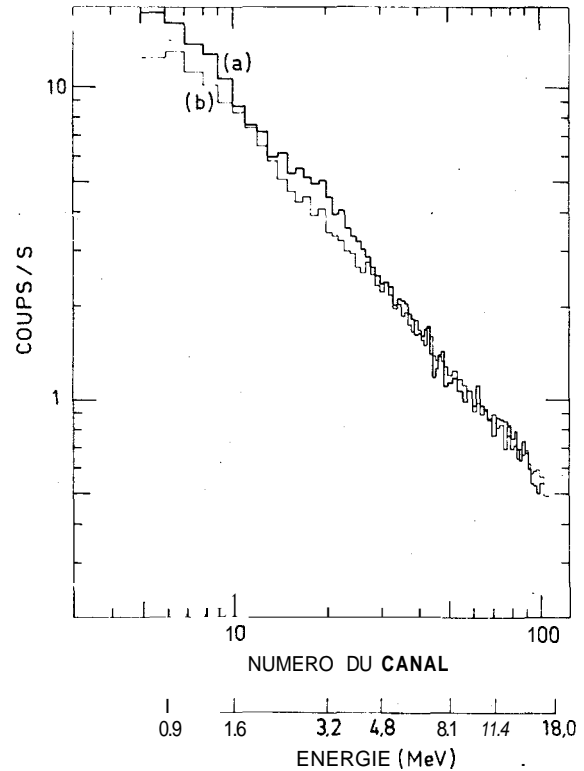


Figure 10 - Comparaison entre les spectres mesurés à grande profondeur atmosphérique dans les vols 17/73 et 18/73: (a) vol 18/73 (360 - 200) mb et (b) vol 17/73 (235 - 83) mb.

Bibliographie

1. **I. M. Martin**, Thèse d'État, Université de Toulouse, France (1974).
2. **K. P. Beuermann**, *J. G. R.*, **76**, 4291 (1971).
3. **J. S. Puskin**, SAO Special Report n.° 318 (1970).
4. **J. C. Ling**, Ph. D. Thesis, University of California, San Diego (1974).
5. **L. E. Peterson**, **D. A. Schwartz** and **J. C. Ling**, *J. G. R.*, **78**, 7942 (1973).
6. **D. M. Klumpar**, **J. A. Lockwood**, **R. N. St Onge** and **L. A. Friling**, *J. G. R.*, **78**, 7959 (1973).
7. **I. M. Martin**, **F. Albernhe** et **G. Vedrenne**, *R. B. F.*, **1**, 263 (1971).
8. **I. M. Martin**, **S. L. G. Dutra** et **R. A. R. Palmeira**, Rapport INPE-533-RI/023, Brésil (1974).