

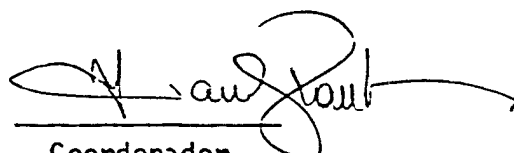
INPE 588-RI/277

TÍTULO: DETERMINATION EXPERIMENTALE DU SPECTRE
DES PHOTONS GAMMA DANS L'ATMOSPHERE A
12 GV DE COUPURE GEOMAGNETIQUE.

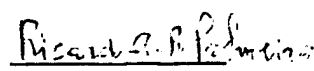
AUTORES: I.M. Martin, S.L.G. Dutra, R.A.R. Pal
meira, G. Vedrenne, F. Albernhe.

PROJETO: TELA

PUBLICADO EM JANEIRO DE 1975



Coordenador



Gerente

DETERMINATION EXPERIMENTALE DU SPECTRE DES PHOTONS
GAMMA DANS L'ATMOSPHERE A 12 GV DE COUPURE GEOMAGNETIQUE

I.M. Martin, S.L.G. Dutra, R.A.R. Palmeira

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE

São José dos Campos - São Paulo - Brasil

G. Vedrenne, F. Albernhe

Centre d'Etudes Spatiales des Rayonnements

Toulouse - França

ABSTRACT

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, Brasil (12 GV cut-off rigidity). The detector used was a 4" x 4" NaI(Tl) crystal with a 1cm thick plastic scintillator anti-coincidence shield, connected to a 128 channel pulse height analyser. Above 20g/cm^2 the energy spectrum could be fitted to a power law with exponent 1.0 ± 0.1 independent of the altitude. From 20 to 760g/cm^2 the spectrum was found to be somewhat steeper with the exponential index being 1.3 ± 0.1 . At 3.5g/cm^2 the gamma-ray flux was $0.30\text{ photons/cm}^2\text{-s}$ at 1 MeV. These measurements will be discussed and compared with calculated results.

RESUMO

Neste trabalho analisamos dados do fluxo de fotons 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 (Tl) de 4" x 4", envolto num cintilador plástico de 1cm de espessura funcionando em anticoincidência, com o cristal de análise associado a um analisador de pulso de 128 canais. Acima de 20g/cm^2 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 a 760g/cm^2 o espectro medido é mais pronunciado, com um índice espectral de $1,3 \pm 0,1$. A $3,5\text{g/cm}^2$ o fluxo de raios gama era de 0,30 fotons/ cm^2 -s. Estes resultados serão comparados e discutidos com previsões já existentes.

RESUME

Nous avons mesuré le spectre des photons gamma de 0,9 à 18,0 MeV d'origine atmosphérique en fonction de l'altitude. Nous avons effectuée deux vols ballon à partir de São José dos Campos, São Paulo, Brasil (12 GV de coupure geomagnétique).

Le detecteur d'analyse que nous avons employée a été un scintillateur de NaI (Tl) de 4" x 4" avec un scintillateur plastique de NE102A en anticoincidence. Le scintillateur d'analyse a été liée avec un analysateur d'impulsion de 128 canaux. Au dessus de 20g/cm² le spectre peut meilleur s'aproximer par une loi en puissance avec l'indice spectrale de $(1,0 \pm 0,1)$ independant de l'altitude. Entre 20g/cm² et 760g/cm² le spectre devient plus raid avec l'indice spectrale de $1,3 \pm 0,1$, Au plafond, à 3,5g/cm², le flux des photons à l'énergie de 1 MeV a été de 0,30 photons/cm²-s. Nous avons comparé dans ce travail les resultats mesuré et les previsions théoriques existant.

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 essentielles du spectre des rayons γ entre 0,9 et 18,0 MeV en fonction de la profondeur atmosphérique.

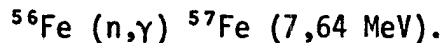
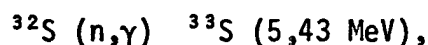
2 - DISPOSITIF EXPERIMENTALE

La détection des rayons γ est assurée par un scintillateur inorganique de NaI(Tl) de $10,16 \times 10,16 \text{ cm}^2$ directement, associée à un photomultiplicateur RCA 8055. Dans l'intervalle d'énergie que nous sommes intéressée les mécanismes d'interactions des photons γ dans le scintillateur est due aux effet photoelectrique, 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 la photomultiplicateur constitué un programme de simulation du type "Monte Carlo" développée par Martin et al.⁸.

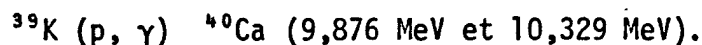
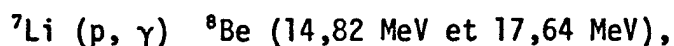
Un deuxième détecteur constitué par un scintillateur plastique entourant le scintillateur d'analyse et fonctionnant en anticoincidence, permet d'éliminer les particules chargées.

Le schéma général du spectromètre est représenté dans la figure 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.

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



Nous avons utilisées les accélérateurs linéaire du Departamento de Física l'Universidade de São Paulo (USP) et de la Pontifícia 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

- 4 -

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

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

3 - DISCUSSIONS DES RÉSULTATS

Deux vols en ballons stratosphériques ont été effectués en 1973 à partir de São José dos Campos, São Paulo, coordonnées géographiques de $(23^{\circ}12'43''S, 45^{\circ}51'35''W)$. 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 effectué le 20 Octobre 1973 (vol 18/73) s'est déroulée dans des conditions magnétiques perturbées.

Ce dernier a atteint le plafond, à une pression résiduelle comprise entre 3,5 mb et 6 mb, pendant environ 10 heures. La figure 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 figure 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 correspondant au flux de photons γ . La figure 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.

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 figure 5 représentent 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.

Vol 17/73

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

Pour le vol 18/73 sont reportés dans la figure 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:

Vol 18/73

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

TABLEAU II

5 - DETERMINATION DES SPECTRES DES PHOTONS γ OBSERVES AU SOMMET DE L'ATMOSPHERE

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 (figure 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 figure 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 OBSERVES EN FONCTION DE LA PROFONDEUR ATMOSPHERIQUE

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 (figure 8a et b). Pour le vol 17/73 sont également reportés sur la figure 9a et b, les spectres mesurés au plafond à 3,8 mb et dans une couche atmosphérique correspondante à 735 - 305 mb.

A titre d'exemple les spectres mesurés sont comparés sur la figure 10a 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 à 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 et al., 1971	STILBENE 1"x1"	10°N	0,7 - 4,5	4,0	$\frac{dN}{dE} = 0,10 E^{-1,2}$
MARTIN et al., 1971	STILBENE 1"x1"	42°N	0,7 - 4,5	4,0	$\frac{dN}{dE} = 0,30 E^{-1,5}$
MARTIN et al., 1971	STILBENE 1"x1"	62°N	0,7 - 4,5	4,0	$\frac{dN}{dE} = 0,65 E^{-1,5}$
DANIEL et al., 1972	NaI(Tl) 3"x3"	8°N	0,7 - 10	4,7	$\frac{dN}{dE} = 0,16 E^{-1,5}$
* PETERSON et al., 1973	NaI(Tl) 3"x3"	42°N	0,7 - 10	3,5	$\frac{dN}{dE} = 0,36 E^{-1,4}$
KLUMPAR et al., 1973	NE - 213	65°N	1 - 4,0	6,0	$\frac{dN}{dE} = 1,05 E^{-2,2}$
KLUMPAR et al., 1973	NE - 213	65°N	4 - 10	6,0	$\frac{dN}{dE} = 0,40 E^{-1,5}$
KLUMPAR et al., 1973	NE - 213	42°N	1 - 4	3,5	$\frac{dN}{dE} = 0,82 E^{-2,2}$
KLUMPAR et al., 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"x4"	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.

CONCLUSION

Nous avons constatée d'après les résultats de ces deux vols que la longueur d'atténuation pour les rayons γ 0,9 à 18,0 MeV est de (110 ± 10) g/cm² pour la latitude correspondante à 12 GV de coupure géomagnétique. La forme spectrale des rayons γ dans ce gamme d'énergie et entre 765 mb à 38 mb est du type,

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

où 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,

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

avec $A = 0,30$.

L'analyse des spectres obtenus en fonction de la profondeur atmosphérique montrée que l'indice spectrale ne varie pas entre - 760 et 20 mb. A l'altitude supérieur 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 prevision théorique donnent comme spectre atmosphérique à 3,5 mb un indice spectrale de $\sim 1,4$. Ce difference du spectre mesuré au sommet de l'atmosphère et à haute profondeur semble indiquer qu'un flux d'origine extraterrestre viens 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 residuelle. En outre il a montré la possibilité d'accéder à la détermination du bruit de fond γ d'origine cosmique grâce à des expériences embarqué en ballons. Les résultats déjà obtenus justifient de nouvelles mesures à basse latitude et avec des détecteurs semi-directif dont il est possible de construire actuellement.

REMERCIEMENTS

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

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - I.M. Martin, Thèse d'Etat, Université de Toulouse, France (1974).
- 2 - K.P. Beuermann, J.G.R., 76, 4291 (1971).
- 3 - J.S. Puskin, SAO Special Report no. 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).

LÉGENDE DES FIGURES

- Figure 1 Schéma synoptique de l'ensemble de détection.
- Figure 2 Taux de comptage des photons γ et des particules chargées en fonction du temps de vol.
- Figure 3 Taux de comptage des photons γ et des particules chargées en fonction de la pression atmosphérique.
- Figure 4 Champ magnétique total mesuré à São José dos Campos, Brésil.
- 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.
- 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 17/73: (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.

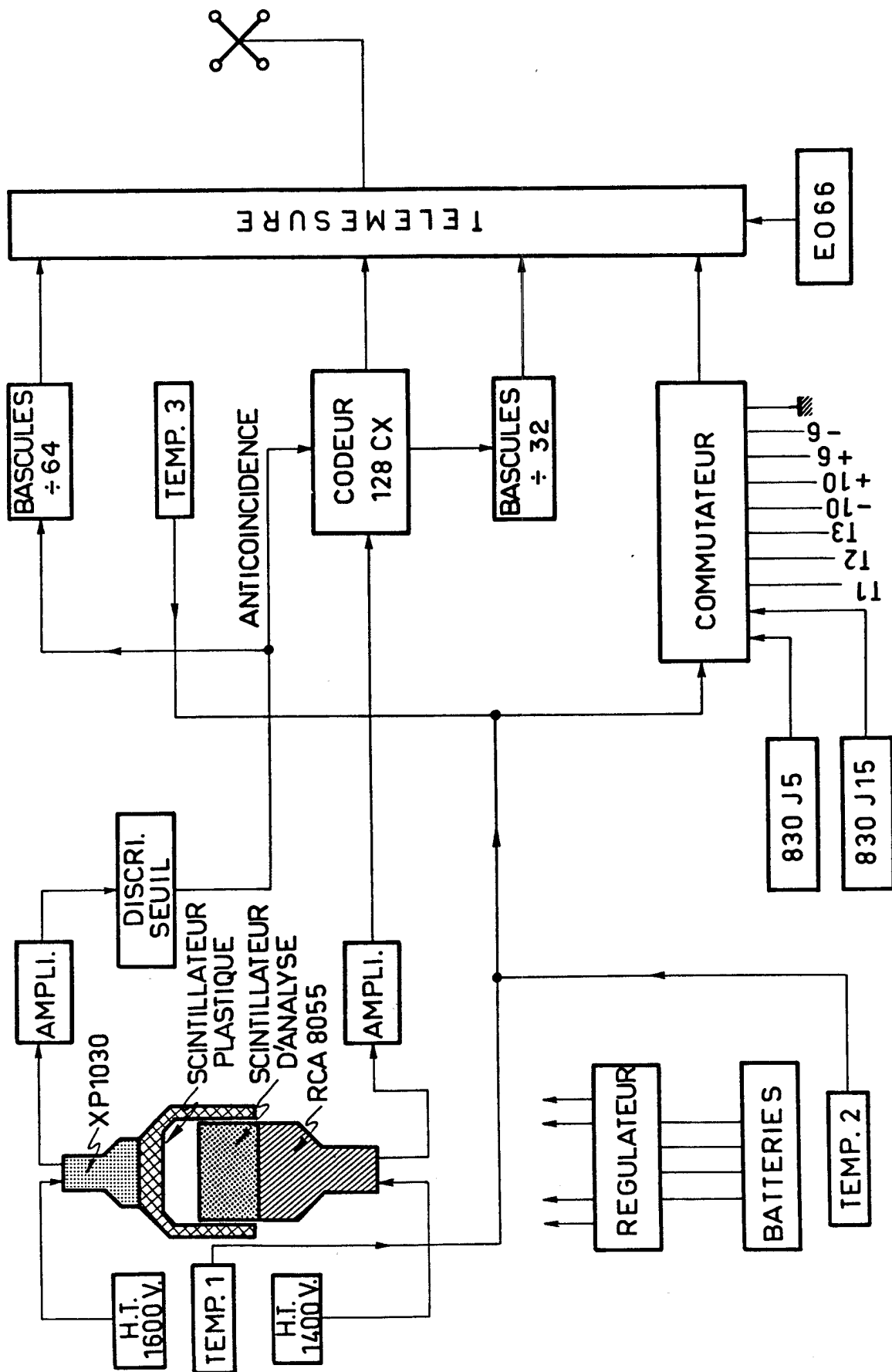


Figure 1.

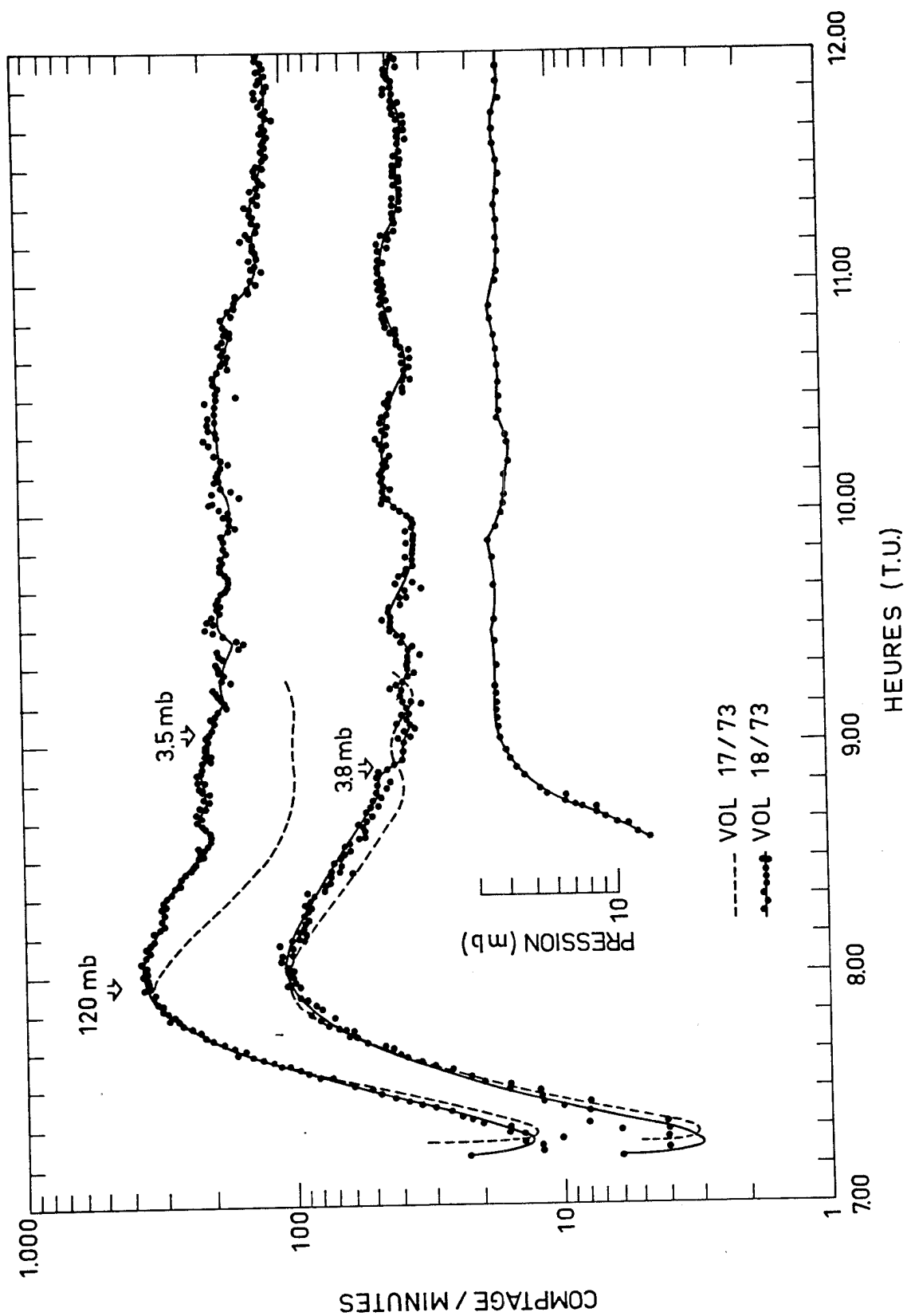


Figure 2a.

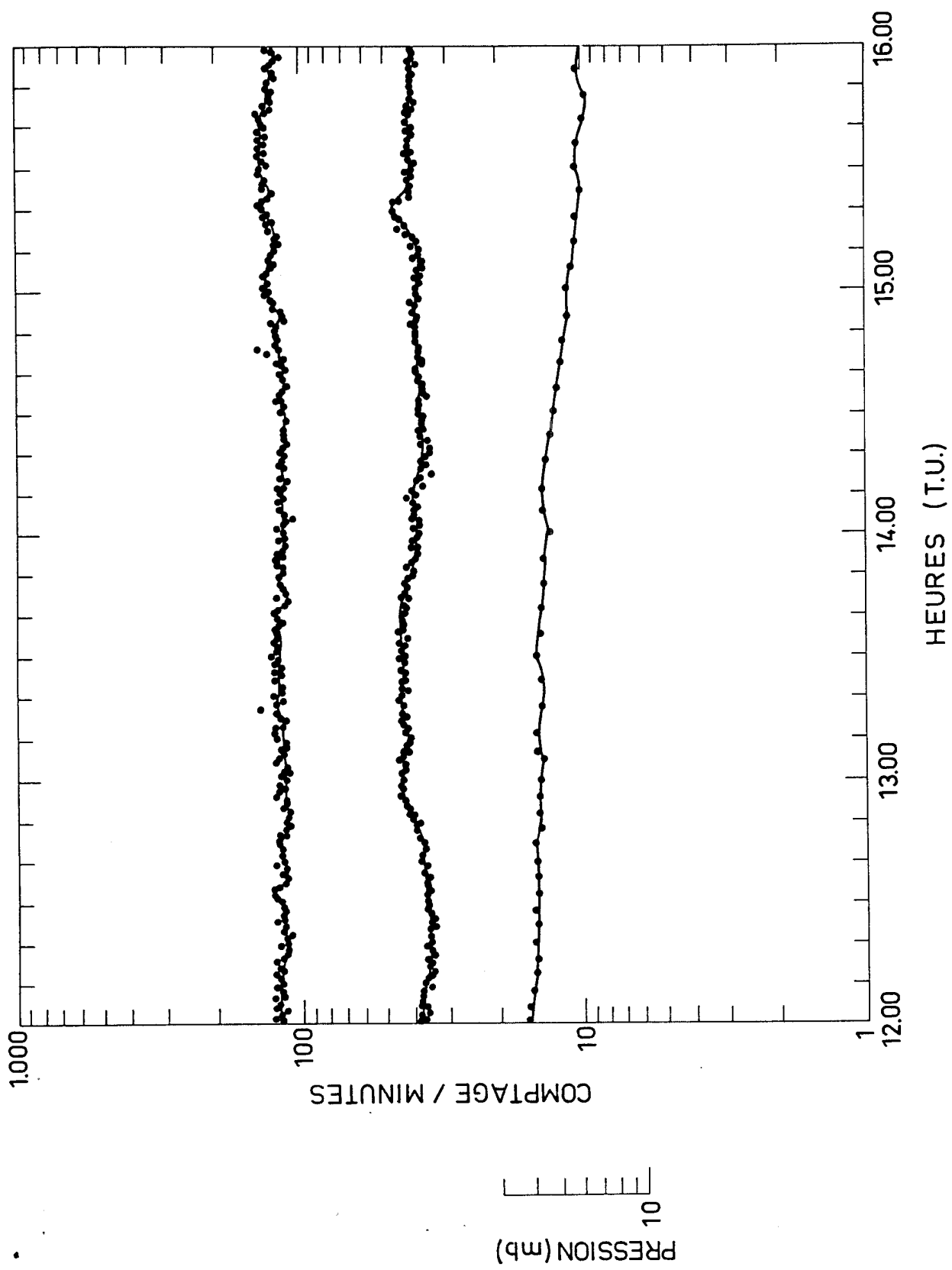


Figure 2b.

(Continuation de la Figure 2a.).

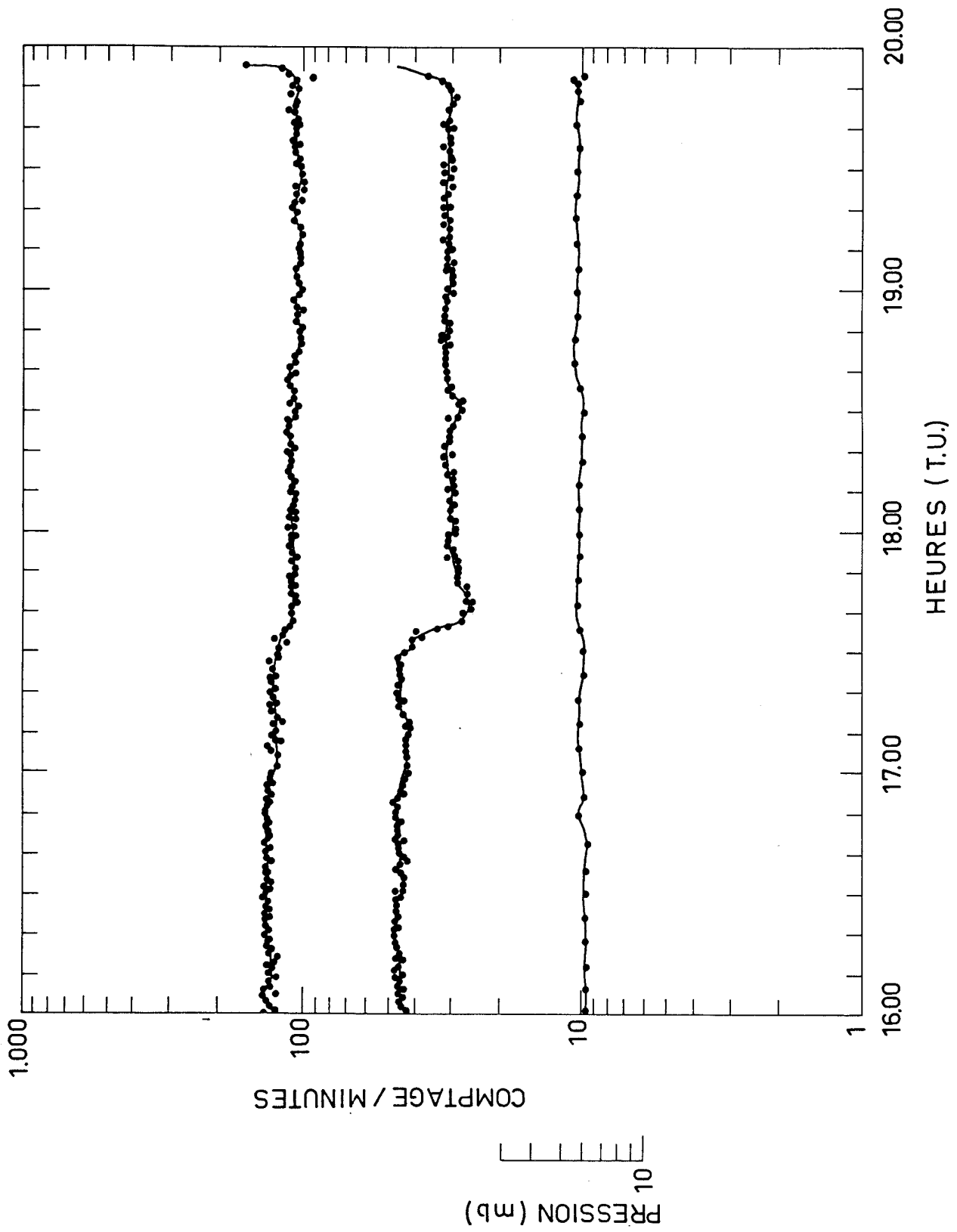


Figure 2c.

(Continuation de la Figure 2b.).

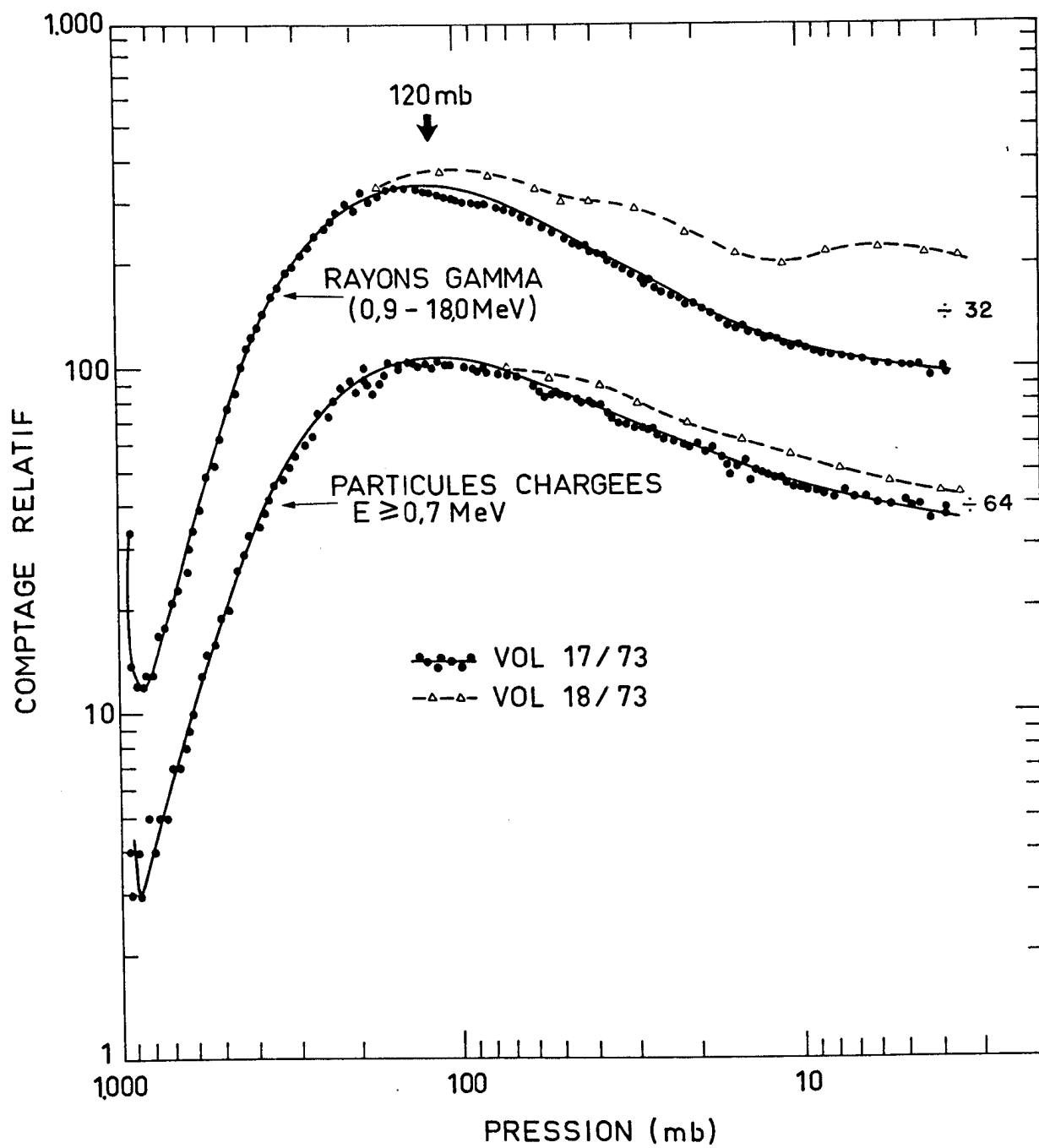


Figure 3.

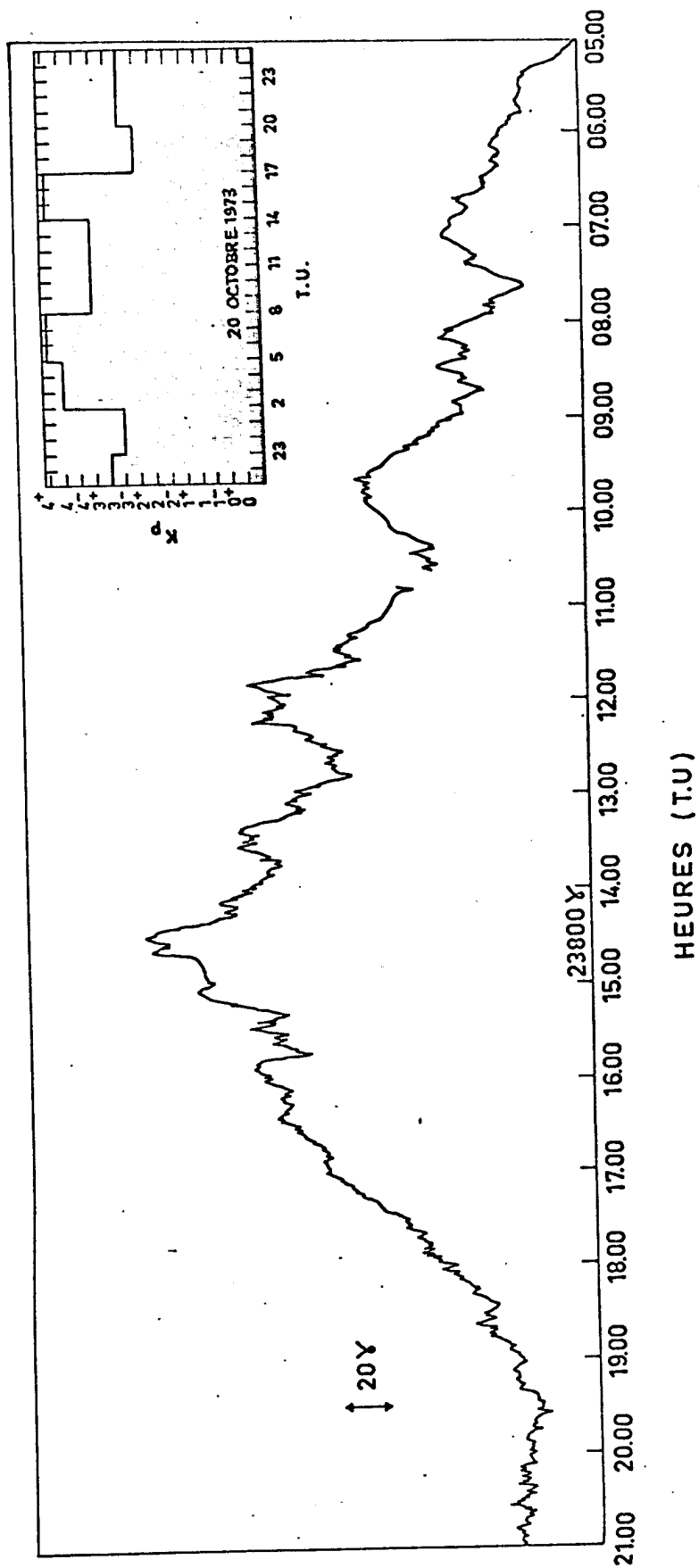


Figure 4.

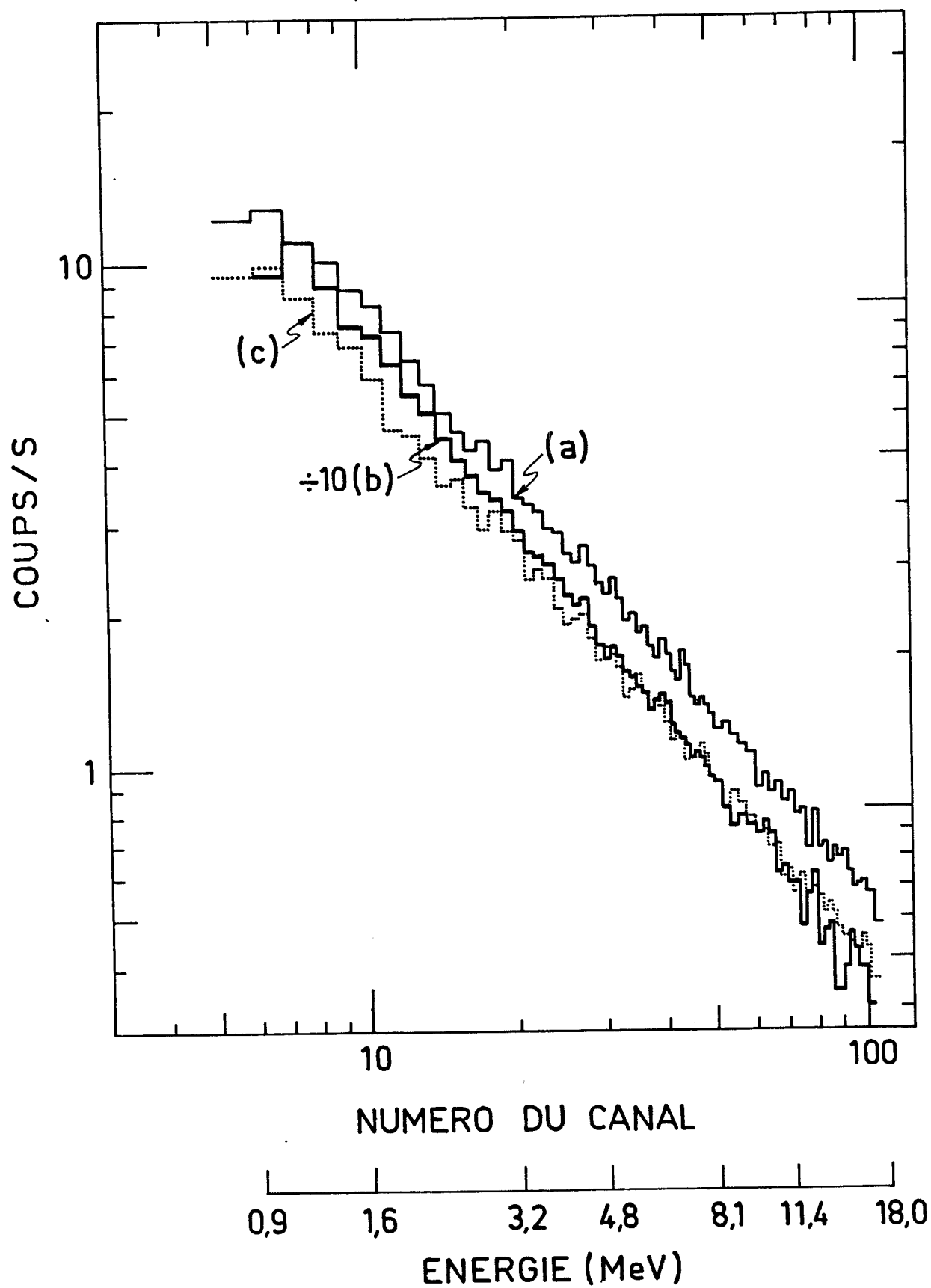
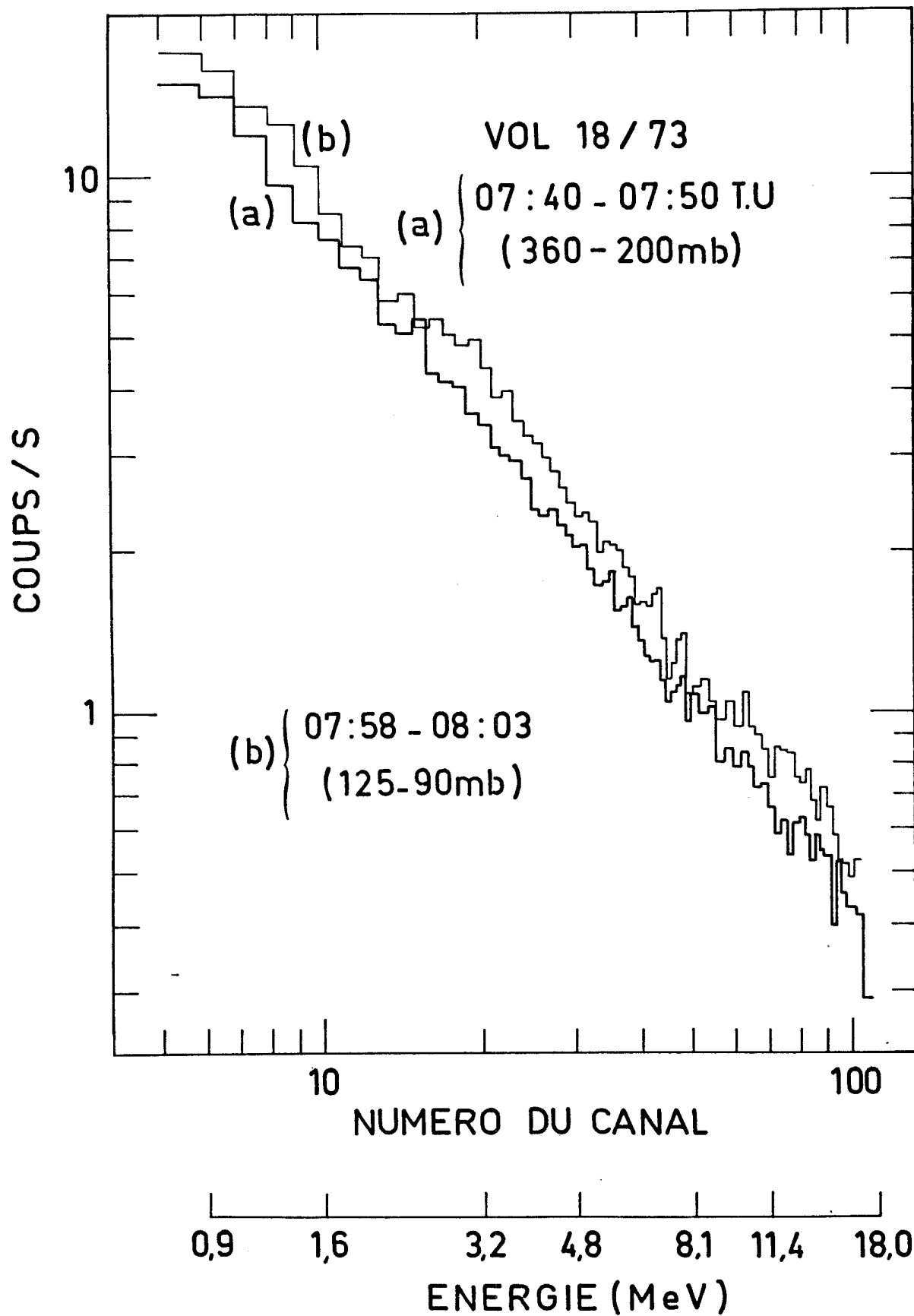


Figure 5.



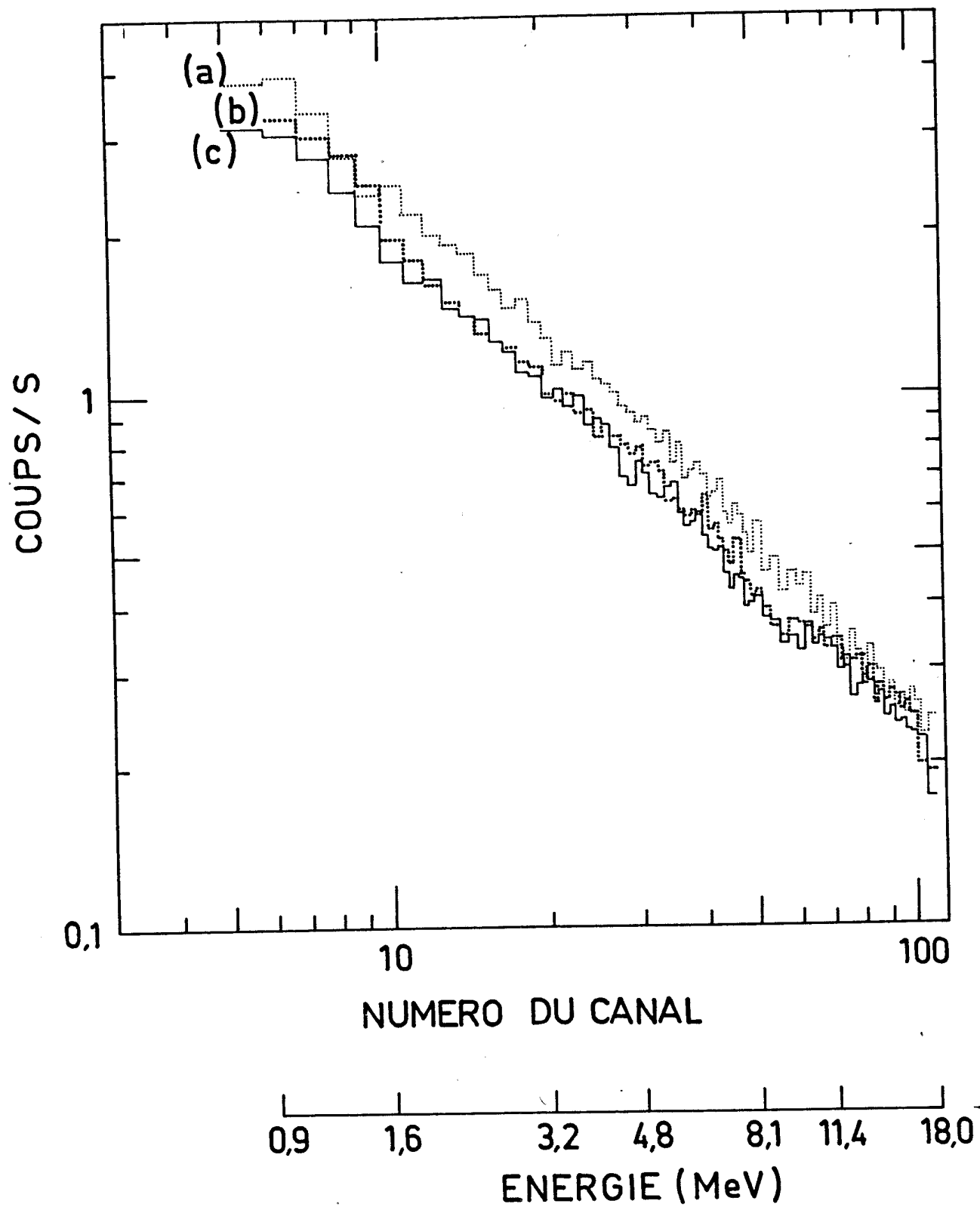


Figure 7.

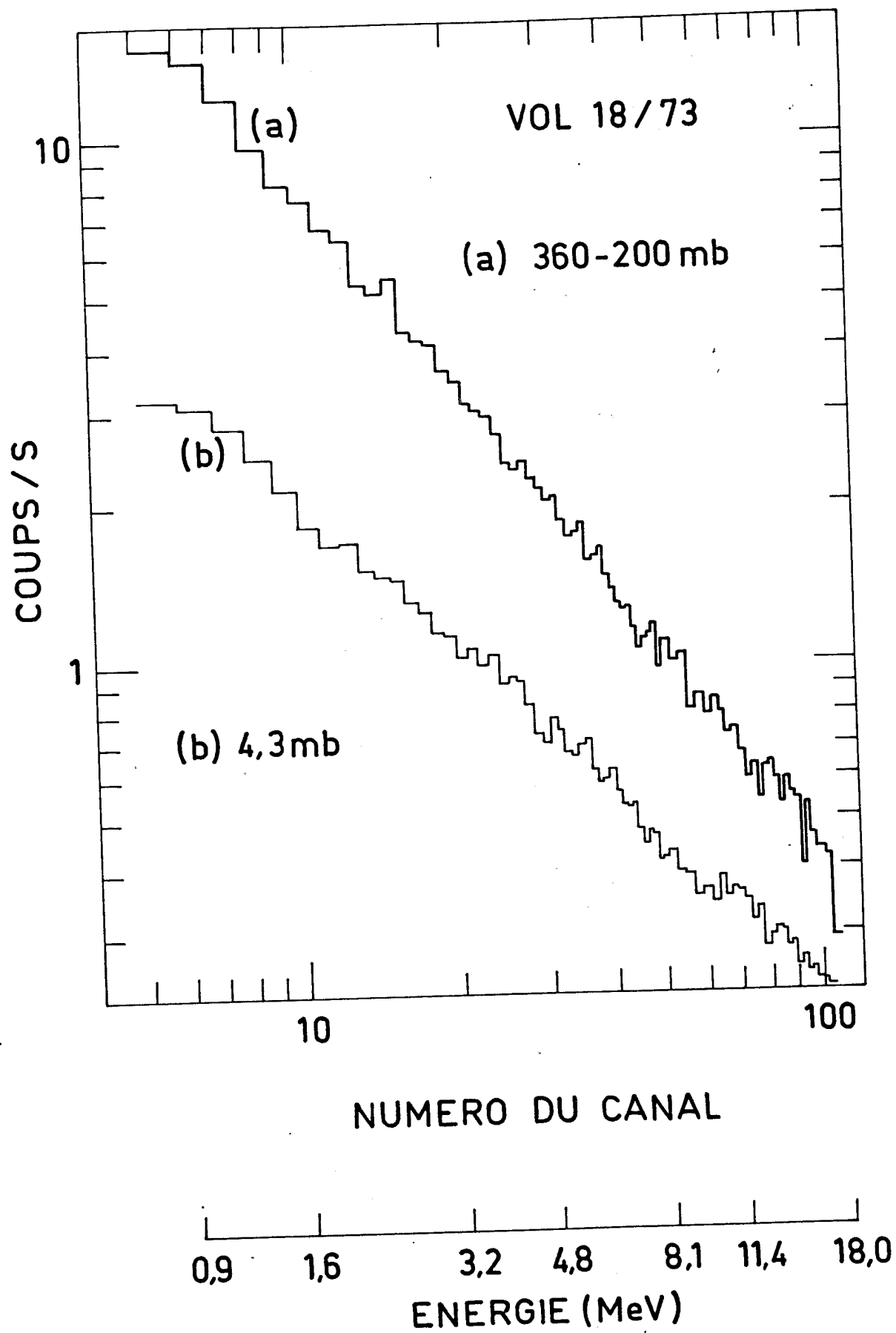


Figure 8.

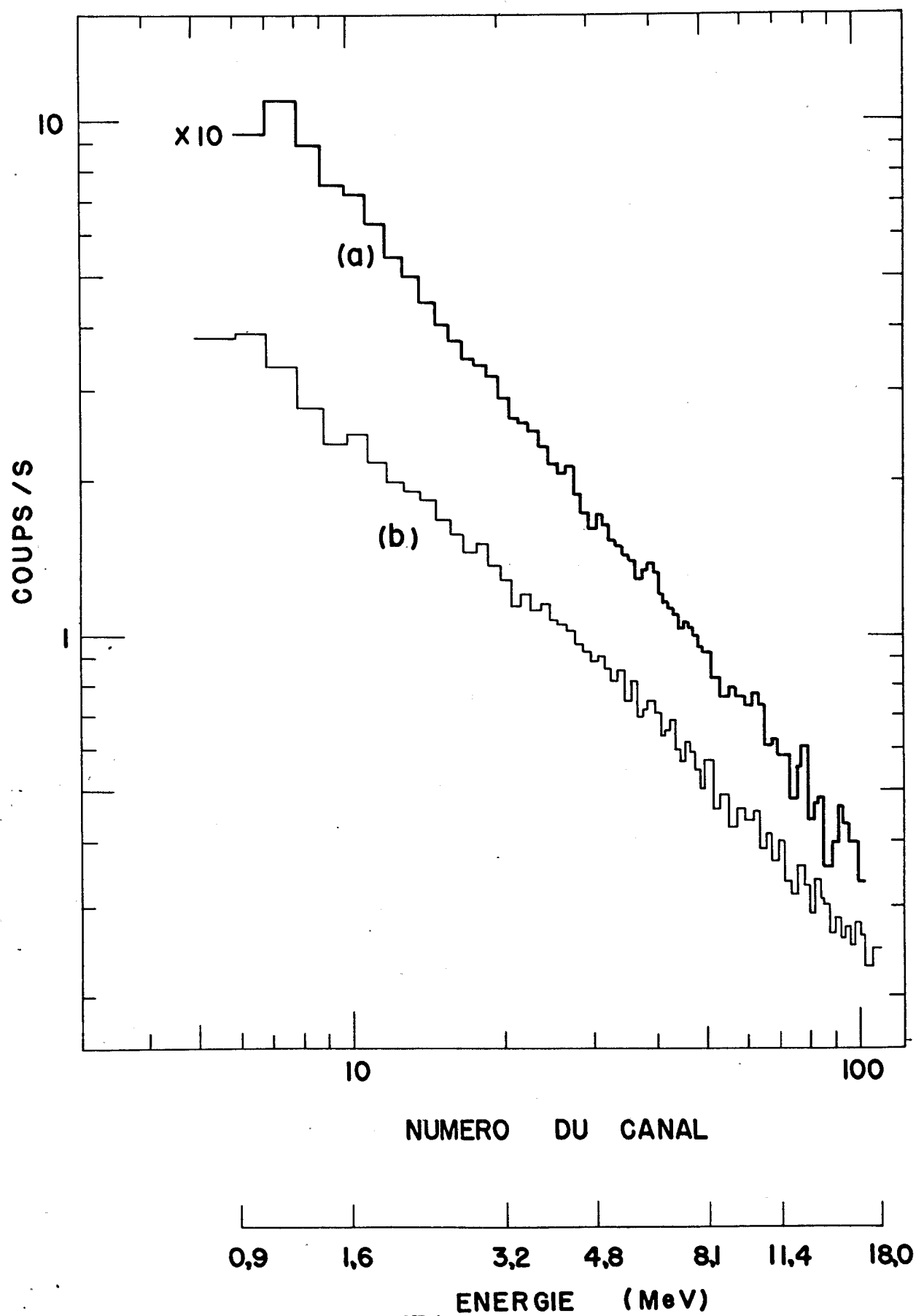


Figure 9.

