

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

FR 890 2193

CENTRE D'ETUDES NUCLEAIRES DE SACLAY

CEA-CONF - -9706

Service de Documentation

F91191 GIF SUR YVETTE CEDEX

L3

TRANSPORT DES NEUTRONS ET DES GAMMA DANS L'AIR PAR TRIPOLI-2  
CALCUL DU DEPOT D'ENERGIE ET DU COURANT D'ELECTRONS EN  
FONCTION DU TEMPS

VERGNAUD T.- NIMAL J.C.- ULPAT J.P.- FAUCHEUX G.  
CEA Centre d'Etudes de Limeil, 94 - Villeneuve-Saint-Georges (FR)

Communication présentée à : 7. International Conference on Radiation Protection

Bournemouth (GB)  
12-16 Sep 1988

TRANSPORT NEUTRON-GAMMA DANS L'AIR ET LA TERRE PAR TRIPOLI-2  
CALCUL EN FONCTION DU TEMPS  
DU DEPOT D'ENERGIE DANS L'AIR ET DU COURANT D'ELECTRONS DE RECOL

T. VERGNAUD  
J. P. ULPAT

J. C. NIMAL  
G. FAUCHEUX

## I) INTRODUCTION

Le code TRIPOLI-2 (1) a été adapté pour pouvoir calculer, outre l'énergie cédée à la matière par les neutrons à des particules chargées (Kerma), celle cédée par les gamma, produits au cours d'un choc neutronique, ainsi que le courant d'électrons de recul induit.

L'énergie déposée conduit à une ionisation de l'air, donc à une conductibilité dont la connaissance, jointe à celle du courant d'électrons, permet de résoudre les équations de Maxwell régissant le champ électromagnétique.

L'étude correspond au cas d'une explosion aérienne ayant lieu à une altitude de 100m. Le calcul du dépôt d'énergie et des composantes radiale et polaire du courant d'électrons a été effectué jusqu'à une distance de 2.5km.

## II) CONFIGURATION ETUDIEE

L'espace étudié, décrit dans un repère cylindrique dont l'origine est le point au sol à l'aplomb du point d'explosion, porte jusqu'à un rayon de 3km, une altitude de 2km et une profondeur de 1m dans la terre. Une condition de fuite est imposée aux limites de la géométrie (voir figure 1). Les compositions de l'air et de la terre sont données en annexe 1.

L'espace est divisé en volumes correspondant à des distances de 300m. Cette distance est réduite à 150m près du point d'explosion. Les résultats sont moyennés sur ces volumes.

La source est ponctuelle, isotrope, située à l'altitude de 100m et d'intensité 1 n/s. Les neutrons sont émis avec une énergie de 14 Mev.

## III) CODE UTILISE

Le code TRIPOLI-2 (1) étudie, en fonction du temps, le transport couplé neutron-gamma par la méthode de Monte Carlo dans des géométries tridimensionnelles. Les interactions propres à chaque élément d'une composition sont traitées séparément.

Pour les neutrons, le code TRIPOLI-2 est couplé à ENDF/B4 par le biais du système THEMIS (2). Les données nucléaires sont décrites à 291 groupes entre 19 Mev et 0.391 ev; un groupe thermique est utilisé pour les neutrons d'énergie inférieure à 0.414 ev. Le transport des neutrons est traité en prenant en compte les interactions suivantes : (n,2n), choc inélastique avec renvoi exact en énergie, choc élastique avec perte exacte d'énergie et description fine de l'anisotropie (32 plages équiprobables du cosinus de l'angle de déviation). Les fonctions Kerma pour l'oxygène et l'azote sont décrites sur le même découpage énergétique et données en annexe 2.

Les données photoniques sont issues de la bibliothèque U.K.N.D.L. et décrites à 75 groupes entre 14 Mev et 10 Kev; l'anisotropie de la diffusion Compton est définie par 60 plages équiprobables du cosinus de l'angle de déviation.

Le code TRIPOLI-2 a été adapté de façon à pouvoir calculer

- le dépôt d'énergie gamma dans la matière
- le courant d'électrons de recul créé par effet Compton

#### IV) FORMALISME

La méthode de Monte Carlo permet de suivre les particules choc après choc de la manière suivante :

- un neutron est émis dans l'air au point  $r_0$  (  $R = 0$  ,  $Z = 100m$  ), au temps  $t_0=0$  ; il subit un certain nombre de chocs dans l'air ou dans la terre. Soit  $r_i$  le point de  $i$  ème choc, au temps  $t_i$ .

Quand il cède une partie de son énergie soit  $\Delta E_i$ , à des particules chargées, ce dépôt d'énergie dans la matière est comptabilisé au moyen de la fonction Kerma.

Quand il subit une diffusion inélastique, une réaction (n,p) ou une capture radiative sur un atome  $j$ , un photon est généré au temps  $t_i$ , au point  $r_i$ , avec une énergie  $E_{i,\gamma}$  et une direction  $\Omega_{i,\gamma}$  suivant la probabilité  $(\sigma(n,\gamma)/\sigma_{tot})_j$ .  $E_{i,\gamma}$  est déterminée par les matrices de production gamma en fonction de l'énergie du neutron émetteur et l'émission est isotrope.

- A chaque choc subi par ce gamma, on comptabilise l'énergie  $\Delta E_\gamma$  qu'il dépose dans la matière, en fonction du temps.

Lorsque ce gamma subit une diffusion Compton, au point  $r$ , avec l'énergie  $E_\gamma$ , avec la direction  $\Omega_\gamma$ , il est dévié de sa trajectoire d'un angle  $\theta$  et cède une partie de son énergie ( $E_e$ ) à un électron; cet électron a une direction  $\Omega_e$ , faisant l'angle  $\psi$  avec  $\Omega_\gamma$  et effectue un parcours dans la matière de valeur moyenne  $\lambda_e$ .

entre  $E_\gamma$ ,  $\theta$  et  $\psi$  on a la relation suivante :

$$\text{tg } \psi = \frac{1}{(1 + E_\gamma/0.511) \text{tg } \theta}$$

le courant d'électrons au point  $r$  s'écrit :

$$J(r,t,\Omega_e) = \Omega_e \cdot q \cdot \int_{t-\lambda_e/v}^t v \cdot N_e(r-v(t-t'),\Omega_e,t',\Omega_e) dt'$$

où  $q$  est la charge de l'électron et  $v$  sa vitesse.

$N_e(r,t',\Omega_e)$  est le nombre d'électrons créés dans la direction  $\Omega_e$  par le flux de gamma au point  $r$  au temps  $t'$

Le parcours moyen  $\lambda_e$  de l'électron dans la matière est faible et sa vitesse  $v$  très grande, de sorte que l'on peut négliger la variation, dans l'intervalle de temps considéré, du terme de production d'électrons. On peut donc écrire :

$$J(\mathbf{r}, t, \Omega_e) = \Omega_e \cdot q \cdot \lambda_e \cdot Ne(\mathbf{r}, t, \Omega_e)$$

Le parcours moyen  $\lambda_e$  de l'électron dans l'air peut être approximé par la formule suivante :

$$\lambda_e = \frac{4 E_e^2}{\rho (0.30 + E_e)}$$

où  $\lambda_e$  est exprimé en mètres,  $E_e$  en Mev et  $\rho$ , la masse volumique de l'air, en kg/m<sup>3</sup>.

On peut projeter  $\Omega_e$  sur deux vecteurs unitaires perpendiculaires, un "vecteur radial"  $n_r$  et un "vecteur polaire"  $n_\theta$  :

$$n_r = (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) / |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|$$

et exprimer les composantes radiale et polaire du courant en fonction de  $\mathbf{r}$  :

$$J_{rad}(\mathbf{r}, \mathbf{r}) = q \cdot \Omega_e \cdot n_r \cdot \lambda_e \cdot Ne(\mathbf{r}, t, \Omega_e)$$

$$J_{pol}(\mathbf{r}, \mathbf{r}) = q \cdot \Omega_e \cdot n_\theta \cdot \lambda_e \cdot Ne(\mathbf{r}, t, \Omega_e)$$

où  $\mathbf{r}$  est un temps relatif :

$$\mathbf{r} = t - |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|/c$$

$$\mathbf{r}_0 = (R=0; Z=100m)$$

$c$  vitesse du photon

Le formalisme utilisé dans le code a été validé sur un cas simple exposé en annexe 3.

Les résultats sont moyennés sur des volumes  $[R_i, R_{i+1}; Z_k, Z_{k+1}]$  ; dans chaque volume le "vecteur radial" est pris au centre  $\mathbf{r}_c$  du volume :

$$\mathbf{r}_c = [(R_i + R_{i+1})/2 ; (Z_k + Z_{k+1})/2]$$

Les contributions des photons à l'énergie déposée dans l'air et aux courants radial et polaire sont différenciées suivant que les photons ont été produits par :

- des neutrons d'énergie supérieure à 500 Kev (diffusion inélastique ou réaction (n,p) ) dans l'air ou dans la terre
- des neutrons d'énergie inférieure à 500 Kev (capture radiative) dans l'air ou dans la terre

## V) RESULTATS

L'énergie déposée, les composantes radiales et polaires du courant d'électrons ont été calculées dans chacun des 56 volumes décrivant l'air, en fonction du temps  $\tau$ , de la nanoseconde à la seconde.

Nous ne présentons ici que les résultats correspondant à 4 volumes significatifs :

- 300m < R < 450m      et    300m < Z < 450m  
volumé situé près de la source ( R=0 ; Z=100m)
- 900m < R < 1200m    et    600m < Z < 900m  
volumé à distance moyenne de la source et de la terre
- 2100m < R < 2400m    et    0 < Z < 300m  
volumé à grande distance de la source et près de la terre
- 2100m < R < 2400m    et    1200m < Z < 1500m  
volumé à grande distance de la source et de la terre

Pour chacun de ces volumes nous présentons (figures 2 à 12) :

- l'énergie déposée par
  - . les neutrons
  - . les photons produits par collision de
    - neutrons d'énergie > 500 Kev dans l'air (notés : GA - G air>500K)
    - neutrons d'énergie < 500 Kev dans l'air (notés : GB - G air<500K)
    - neutrons d'énergie > 500 Kev dans la terre(notés : GC - G terre>500K)
    - neutrons d'énergie < 500 Kev dans la terre(notés : GD - G terre<500K)
  - . les neutrons + les photons
- les composantes radiale et polaire du courant d'électrons avec la contribution de chacune des composantes gamma

La contribution en % de chacune des composantes est indiquée.

L'énergie déposée dans l'air, intégrée en temps et en espace, se répartit comme suit :

neutrons	7.83
G air>500K)	2.03
G air<500K)	0.082
G terre>500K)	0.156
G terre<500K)	0.223
total	10.32 Mev

On peut faire les remarques suivantes concernant l'énergie déposée :

- . la composante neutron n'apparaît évidemment qu'à partir du temps  $\tau$ , nécessaire aux neutrons pour parvenir dans le volume ( un neutron de 14 Mev à une vitesse de  $5.17 \cdot 10^7$  m/s , il met environ 20ns pour parcourir 1 mètre)

- . pour  $\tau < \tau_0$ , la composante GA est la seule importante

- . pour  $\tau_0 < \tau < \tau_1$  la composante NEUTRON devient prépondérante, l'intervalle de temps  $(\tau_0, \tau_1)$  diminue quand la distance au point d'explosion augmente
- . pour  $\tau_1 < \tau < \tau_2$  la composante GD devient prépondérante,
- . pour  $\tau_2 < \tau < \tau_3$  la composante NEUTRON a une certaine importance à courte distance; à grande distance elle n'apparaît pas
- . pour  $\tau_4 < \tau$  la composante GB devient prépondérante. elle est la seule à grande distance :  $\tau_4 = \tau_2$
- . la composante GC est pratiquement négligeable quelque soit la distance

Ces remarques sont également valables pour la composante radiale du courant. La composante NEUTRON n'intervenant pas, la composante GA reste prépondérante plus longtemps. Les composantes radiales et polaires ont le même comportement.

On trouvera en annexe 4 les sections de production gamma de l'air et de la terre, ainsi que les spectres des gamma émis par des neutrons de 10 Mev et à l'énergie thermique.

L'ensemble de ces remarques est regroupé sur le schéma suivant :

R			
300-450	900-1200	2100-2400	2100-2400
Z	Z	Z	Z
300-450	600-900	0-300	1200-1500

R	R	R	R
300-450	900-1200	2100-2400	2100-2400
Z	Z	Z	Z
300-450	600-900	0-300	1200-1500

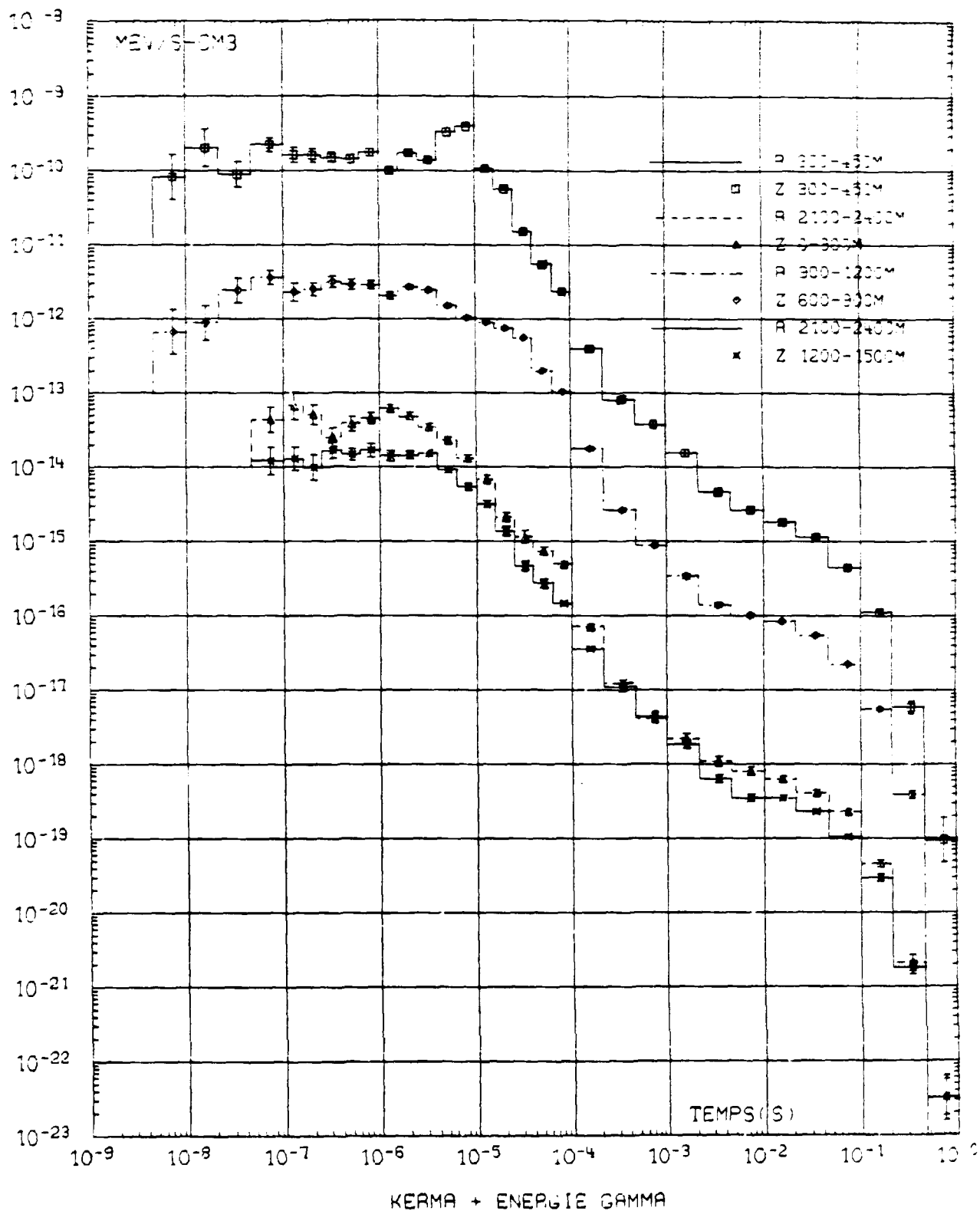
R	R	R	R
300-450	900-1200	2100-2400	2100-2400
Z	Z	Z	Z
300-450	600-900	0-300	1200-1500

145 - A  
 \_\_\_\_\_ A  
 10 -            A  
                  A  
                  A  
 100 -            N  
                  \_\_\_\_\_  
                  A+N  
                  N    N  
 175 - D    D    D    D  
                  \_\_\_\_\_  
                  D+B+N    D+B  
 10    N+B+D    B+N            B  
                  \_\_\_\_\_  
                  N+B            B  
 100 -            B    B  
 5 -

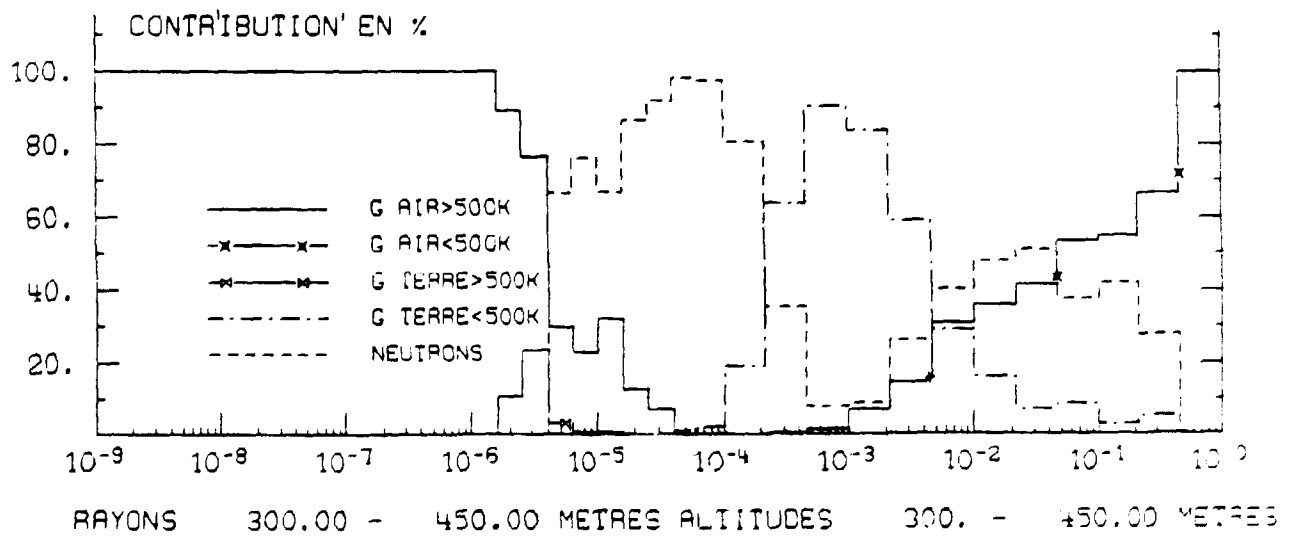
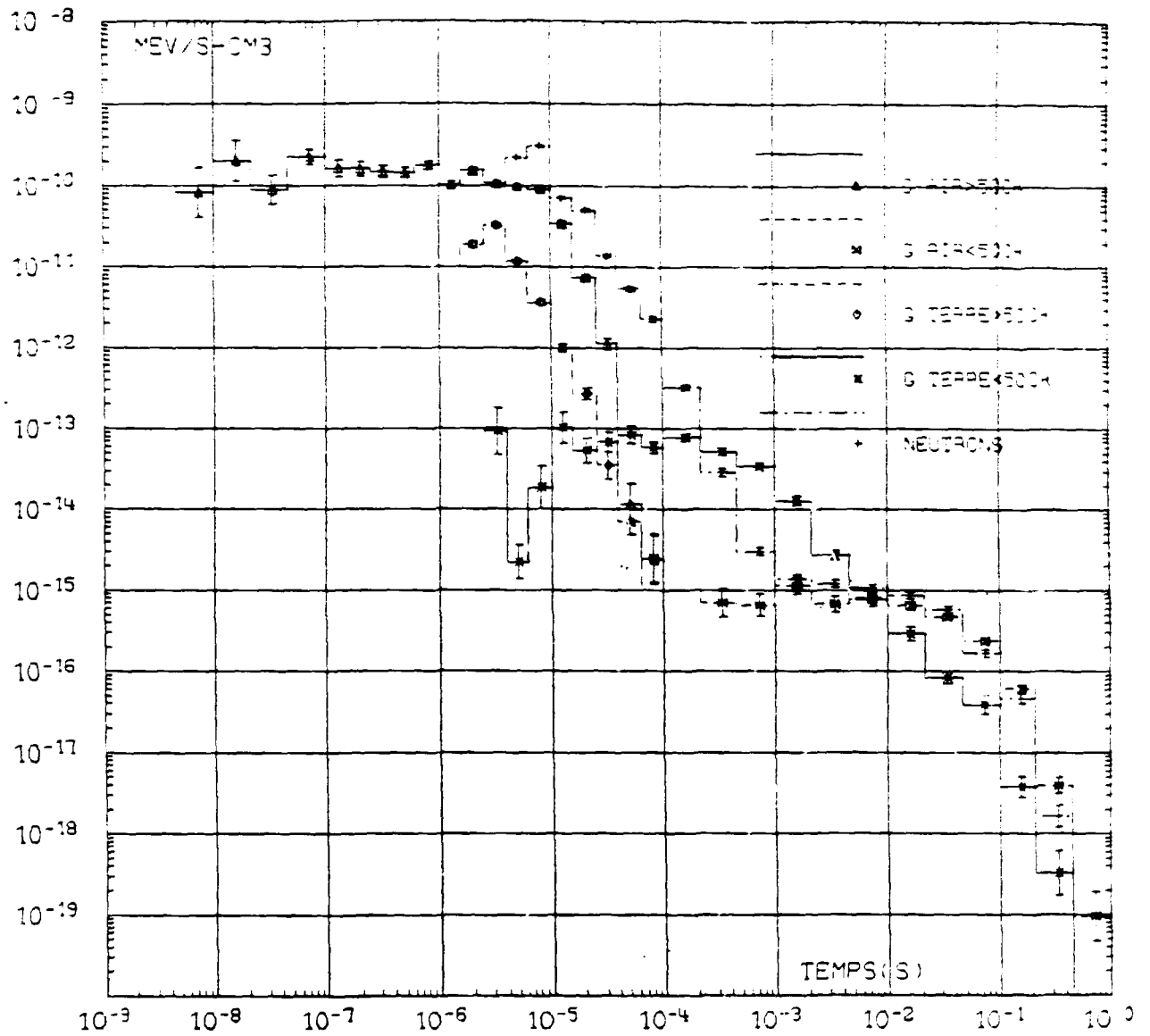
A  
                  A    A    A  
 \_\_\_\_\_  
 C  
 \_\_\_\_\_  
 D    D            D    D  
                  \_\_\_\_\_  
                  B  
 \_\_\_\_\_    B            B  
 B



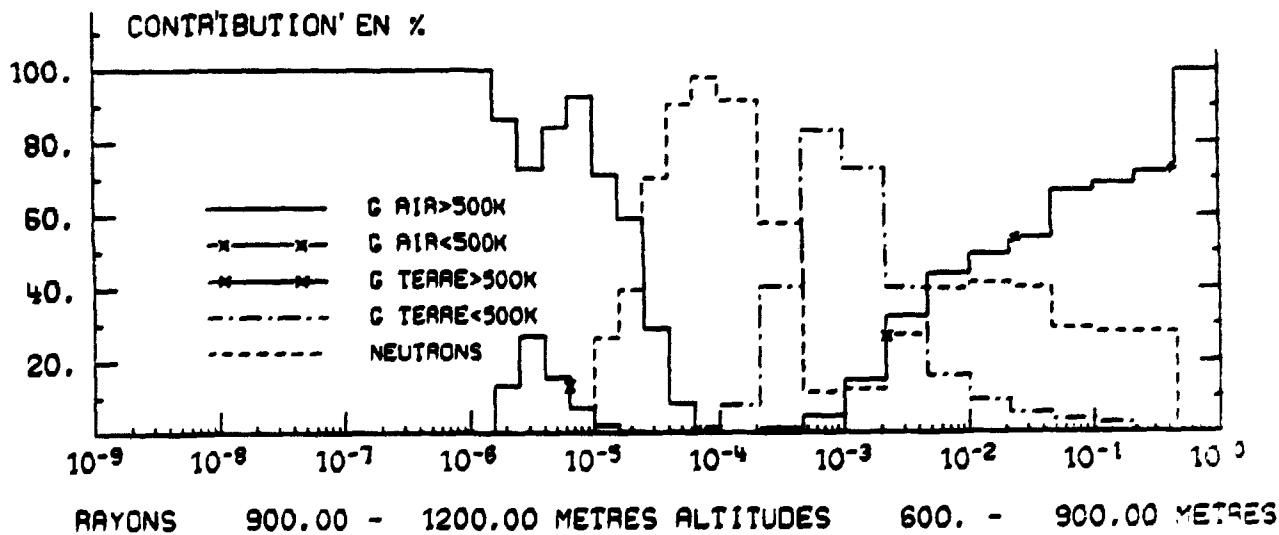
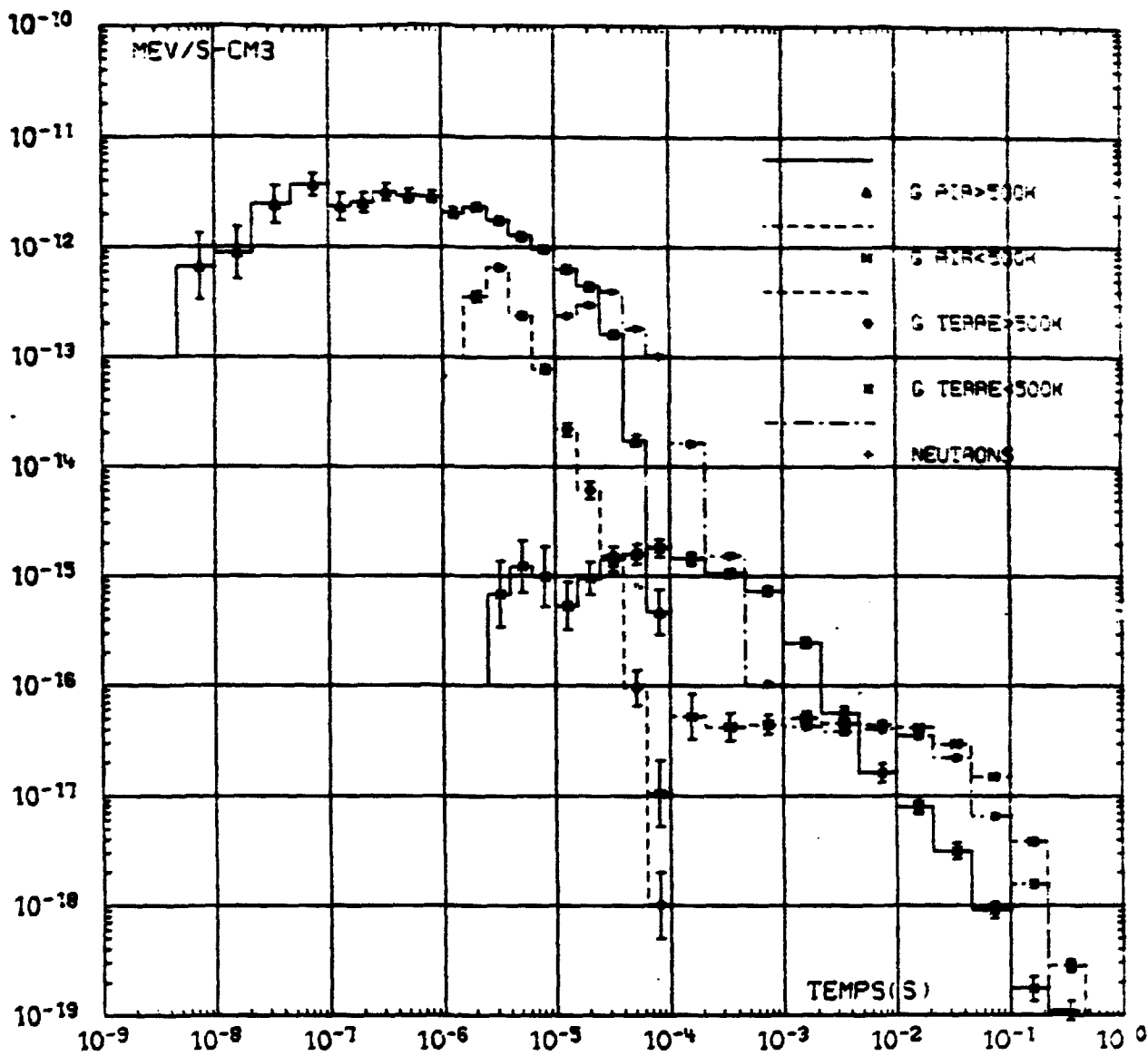
NEUTRONS 14MEV R=10CM ENERGIE DEPOSEE DANS L'AIR



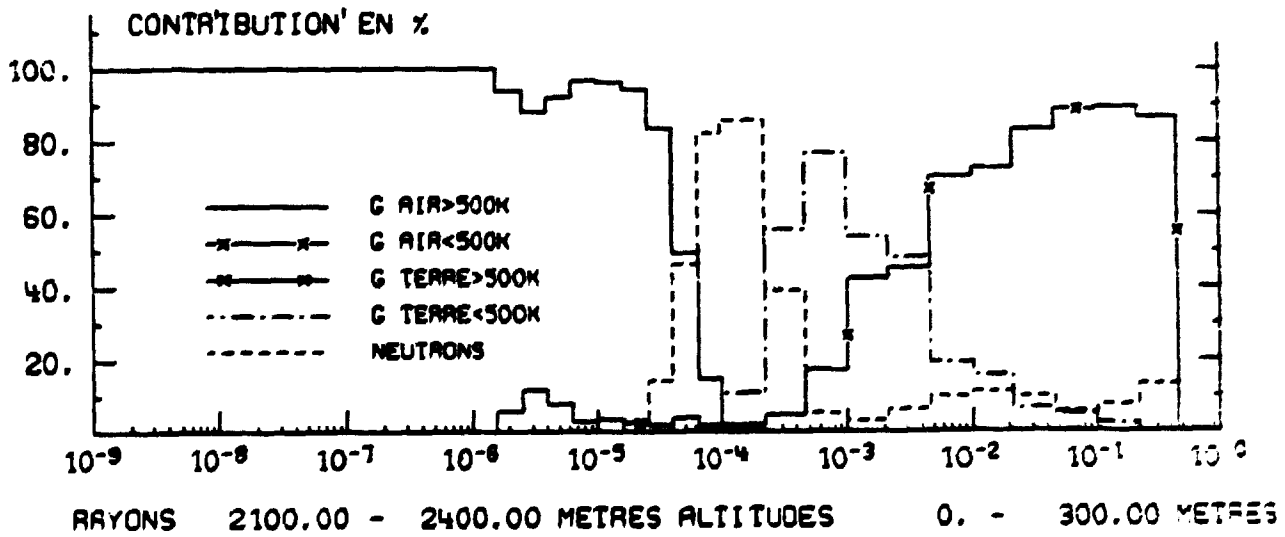
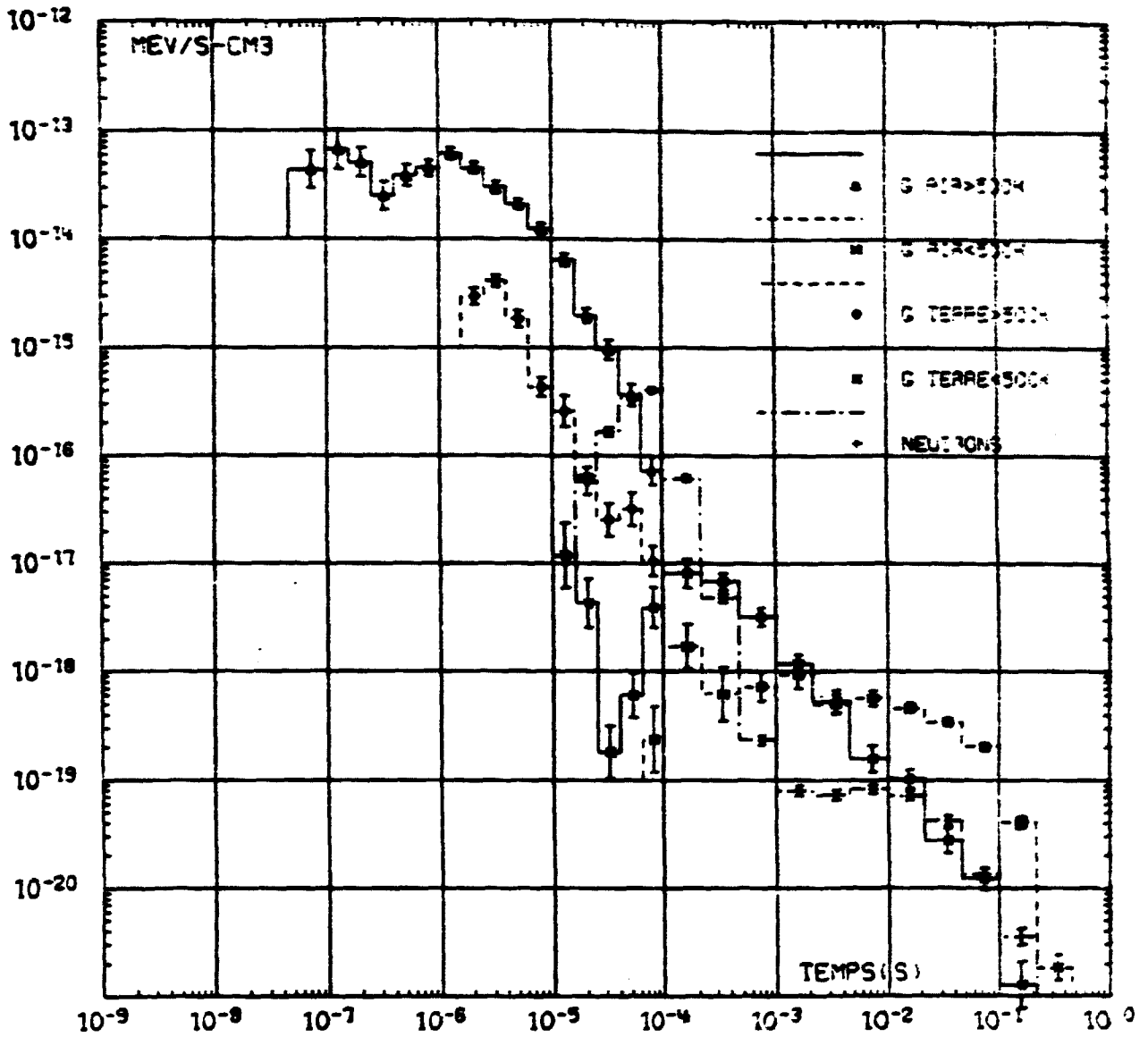
NEUTRONS 14MEV - 100M ENERGIE DEPOSEE DANS L'AIR



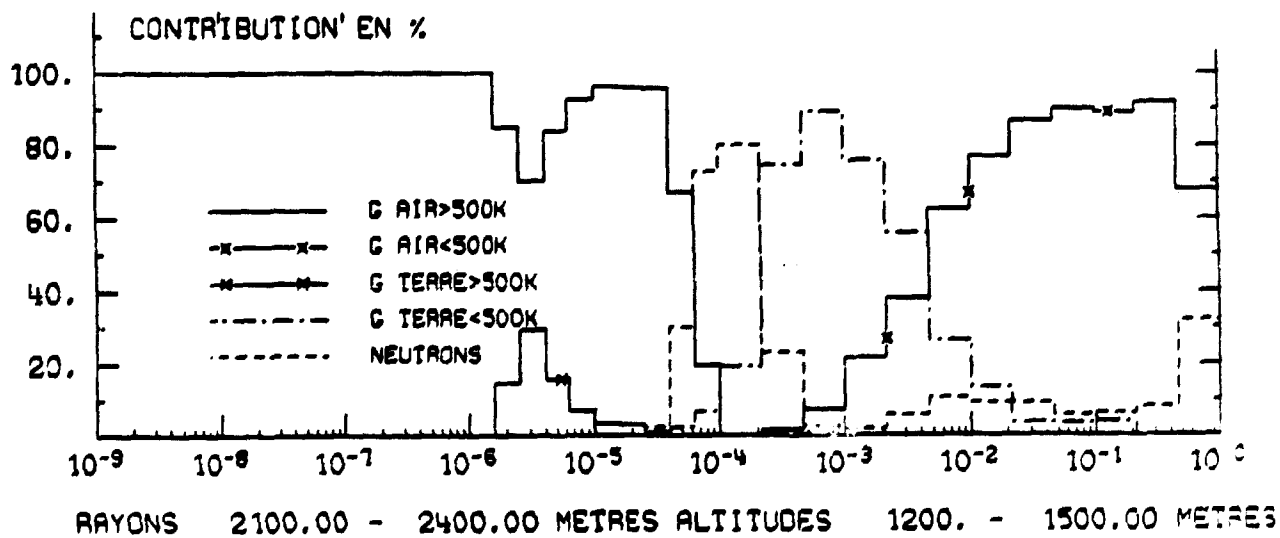
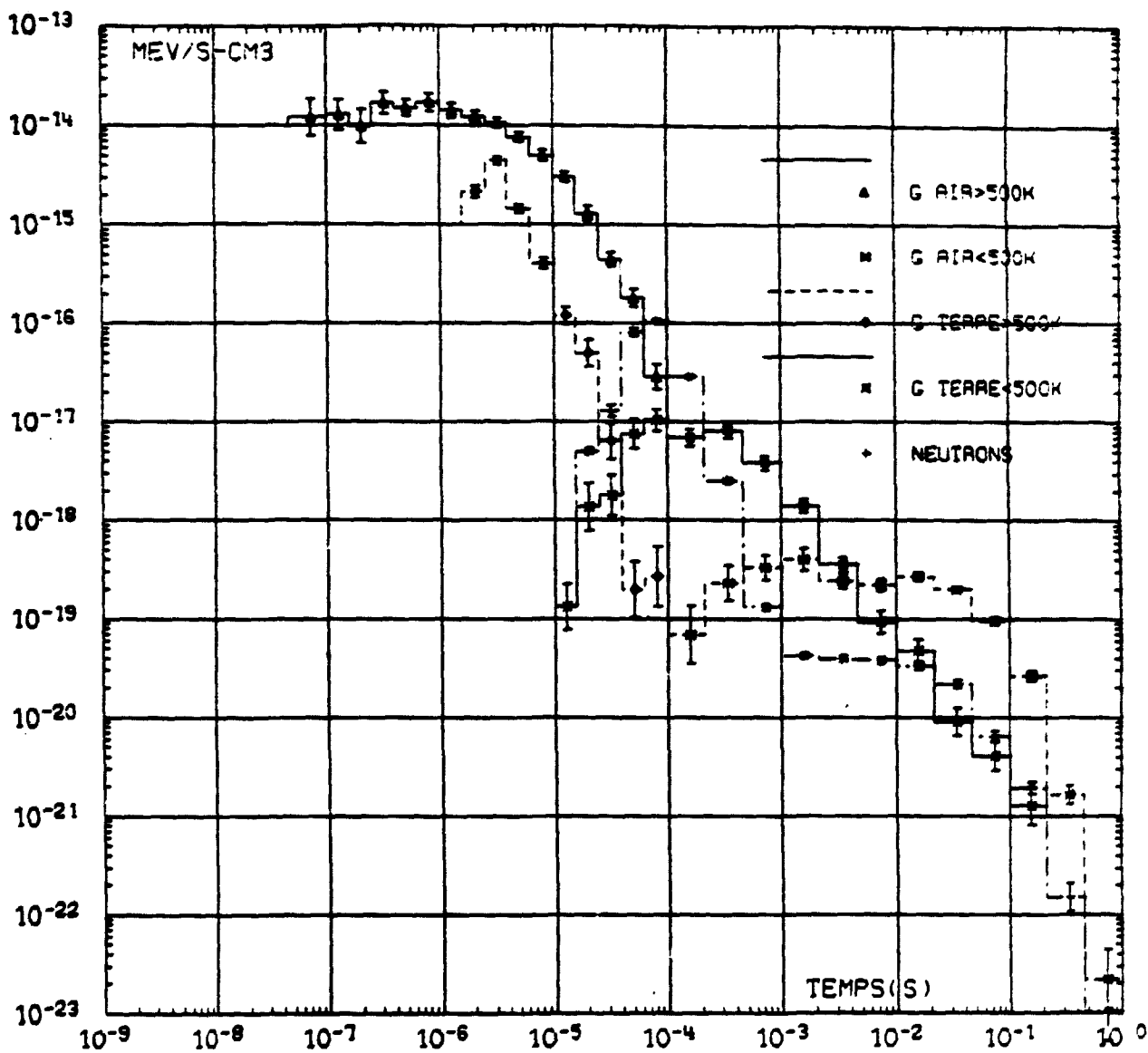
NEUTRONS 14MEV H=100M ENERGIE DEPOSEE DANS L'AIR



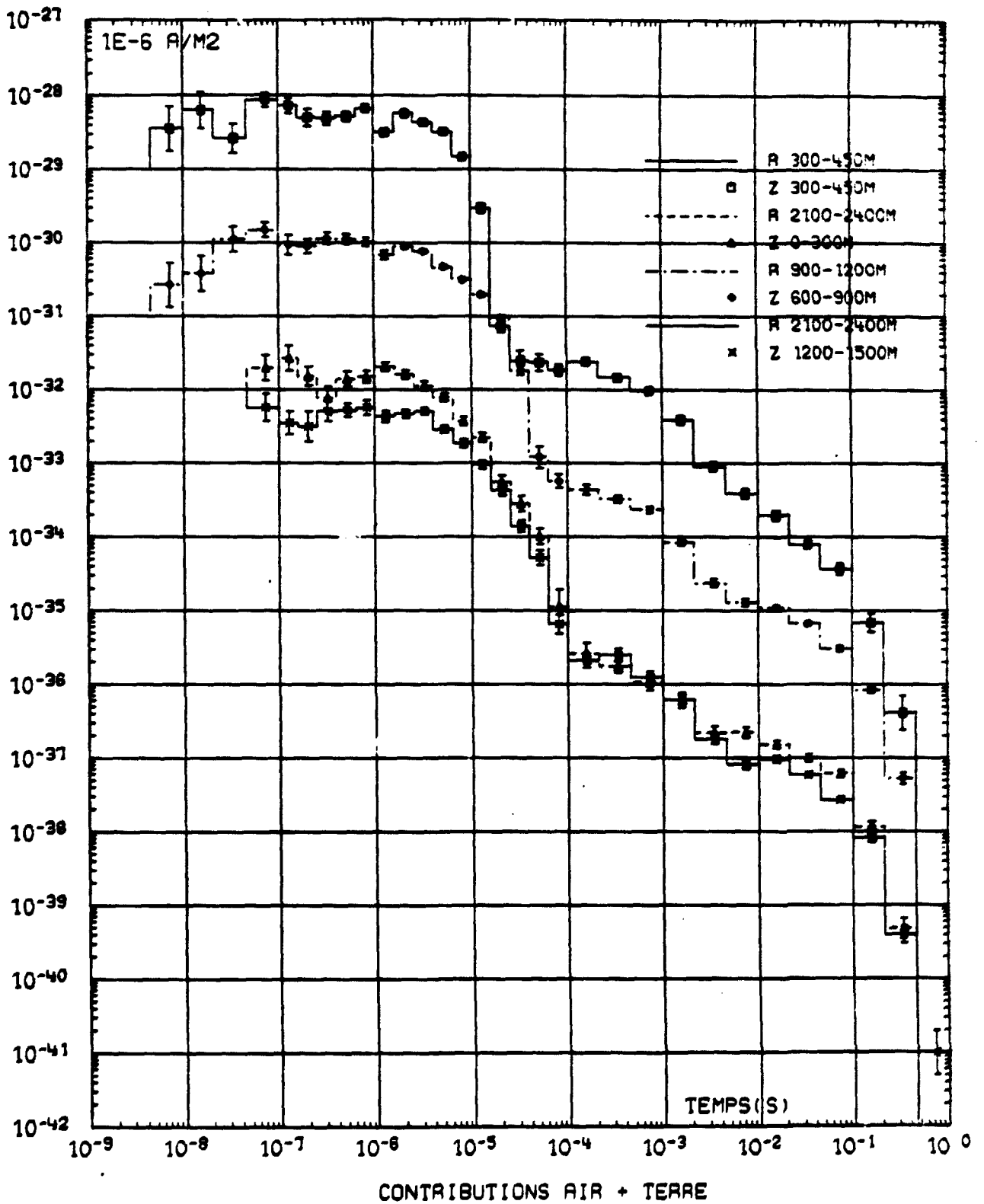
NEUTRONS 14MEV H=100M ENERGIE DEPOSEE DANS



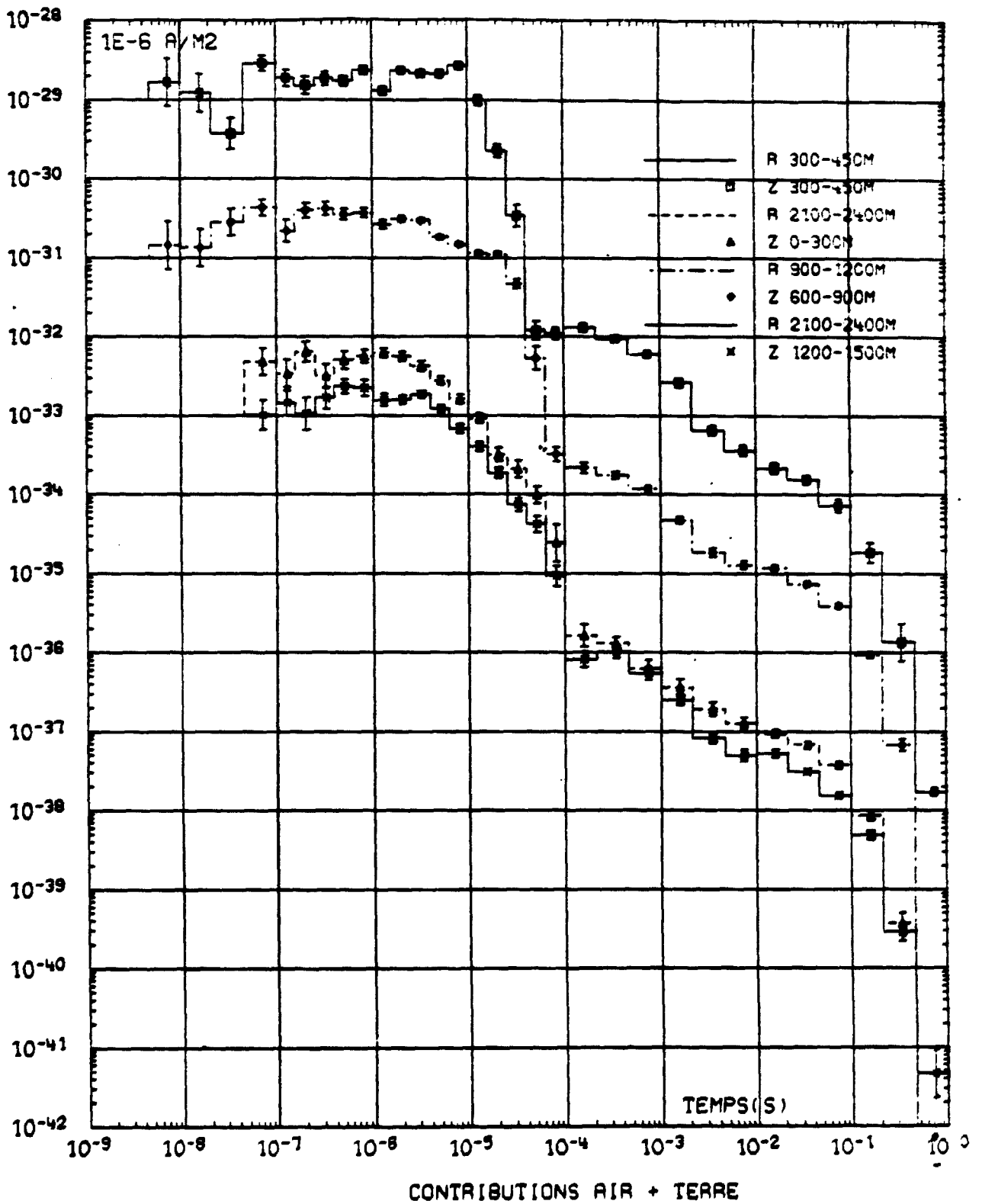
# NEUTRONS 14MEV H=100M ENERGIE DEPOSEE DANS L'AIR



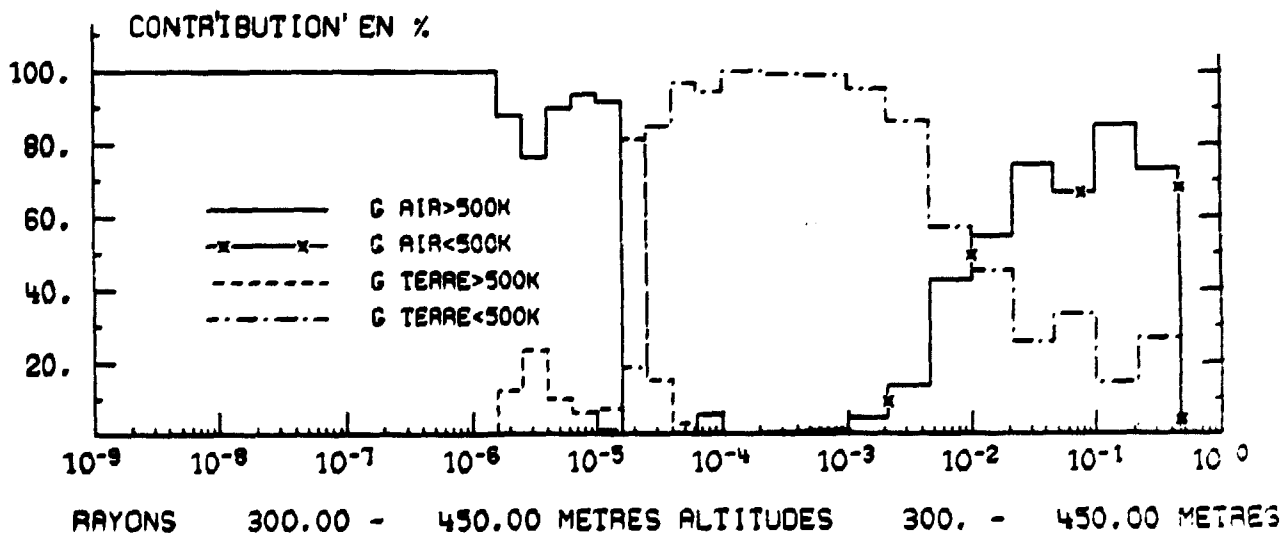
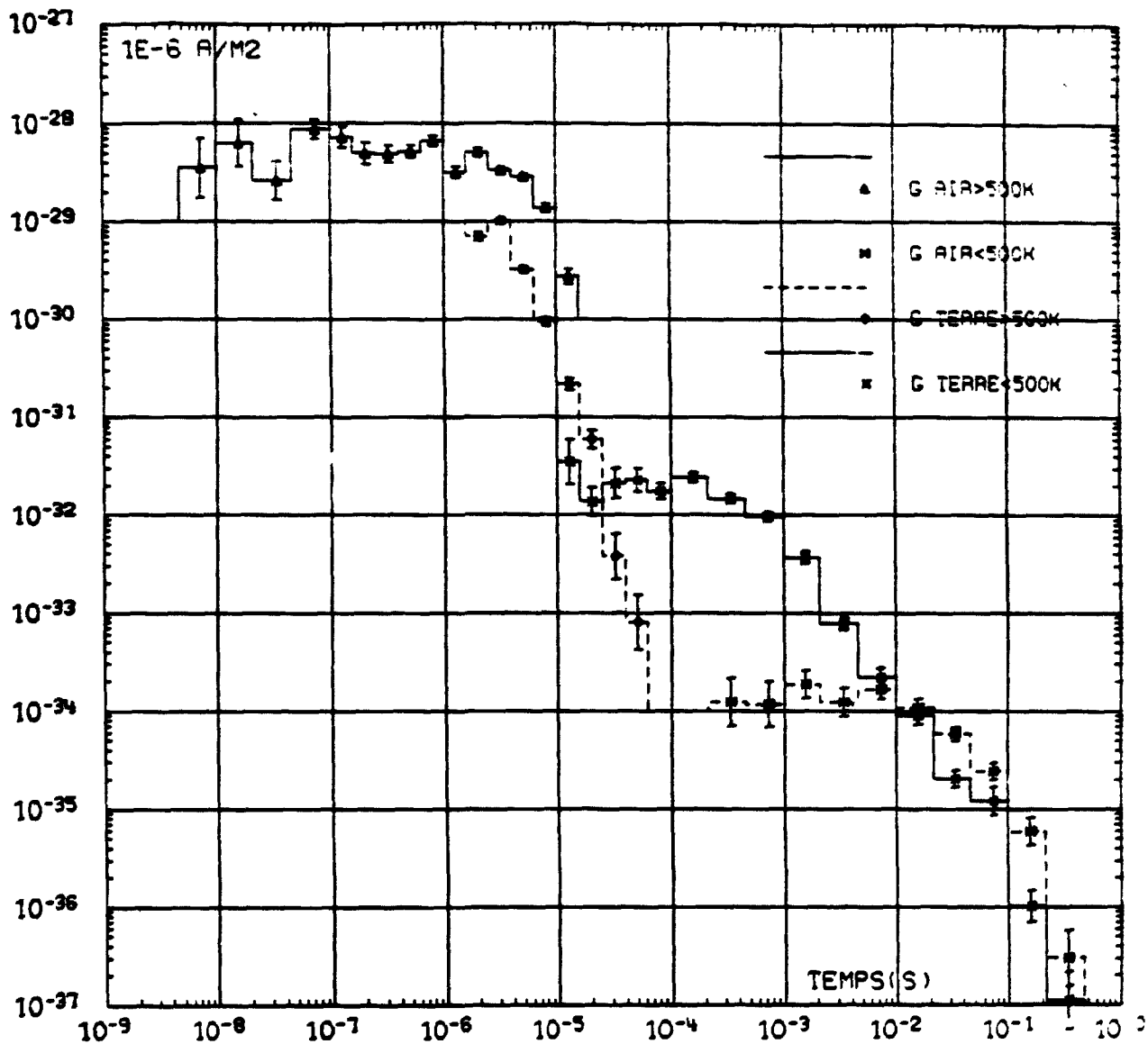
# NEUTRONS 14 MEV H=100M COURANT ELECTRONS RADIAL



# NEUTRONS 14MEV H=100M COURANT ELECTRONS POLAIRE

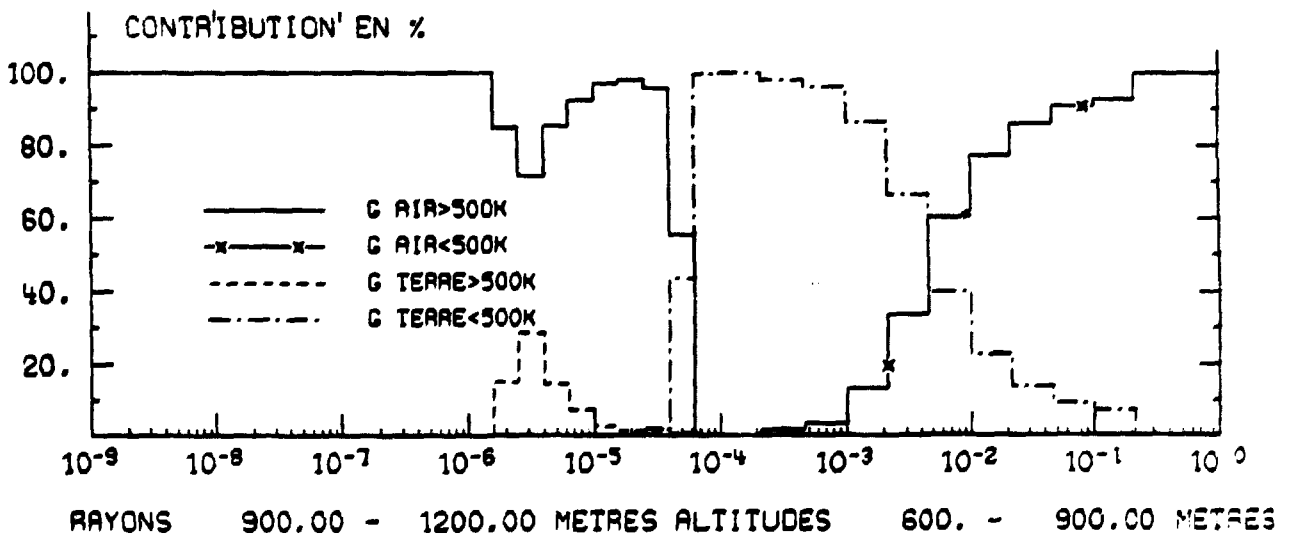
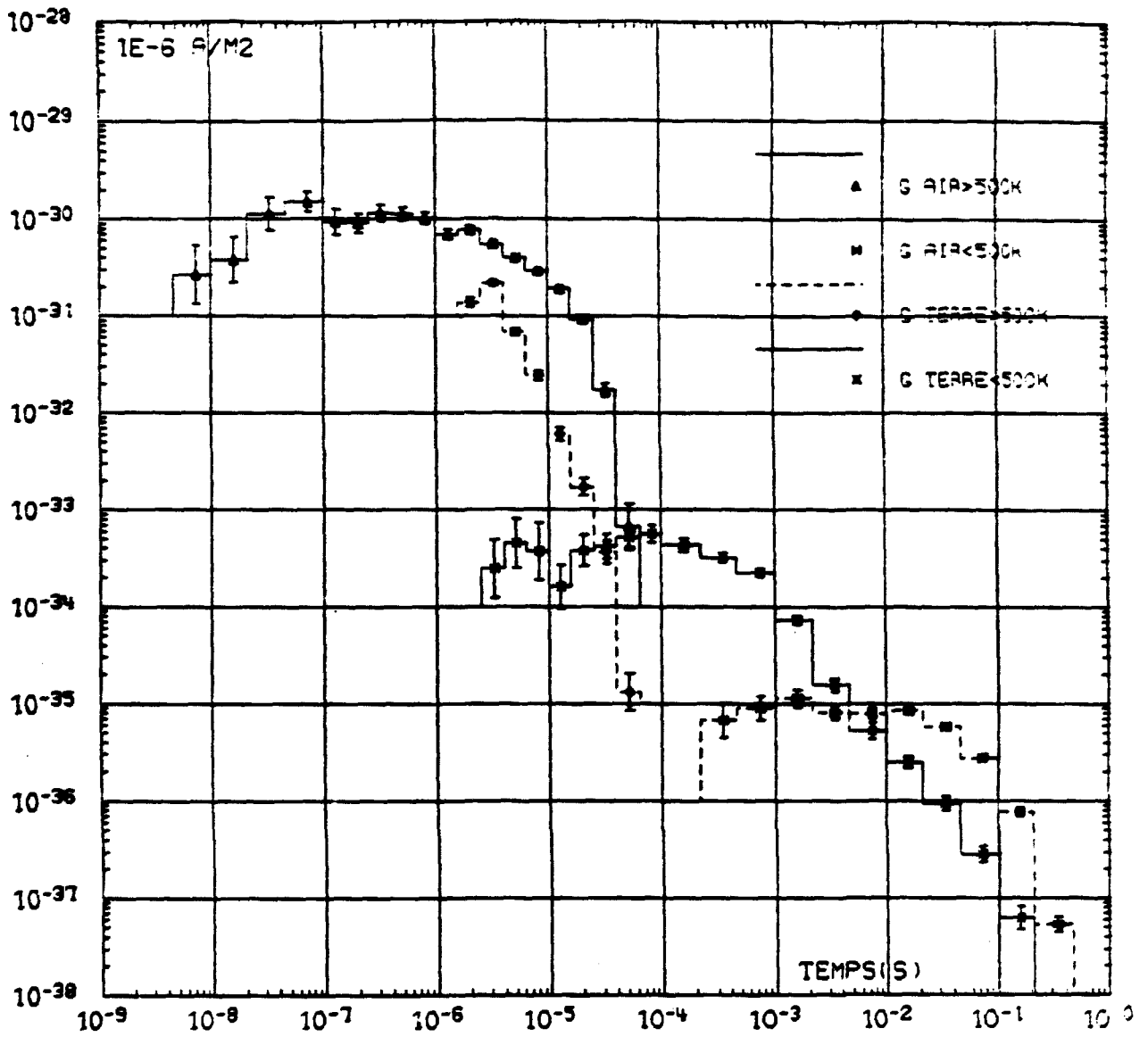


NEUTRONS 14MEV H=100M COURANT ELECTRONS RADIA

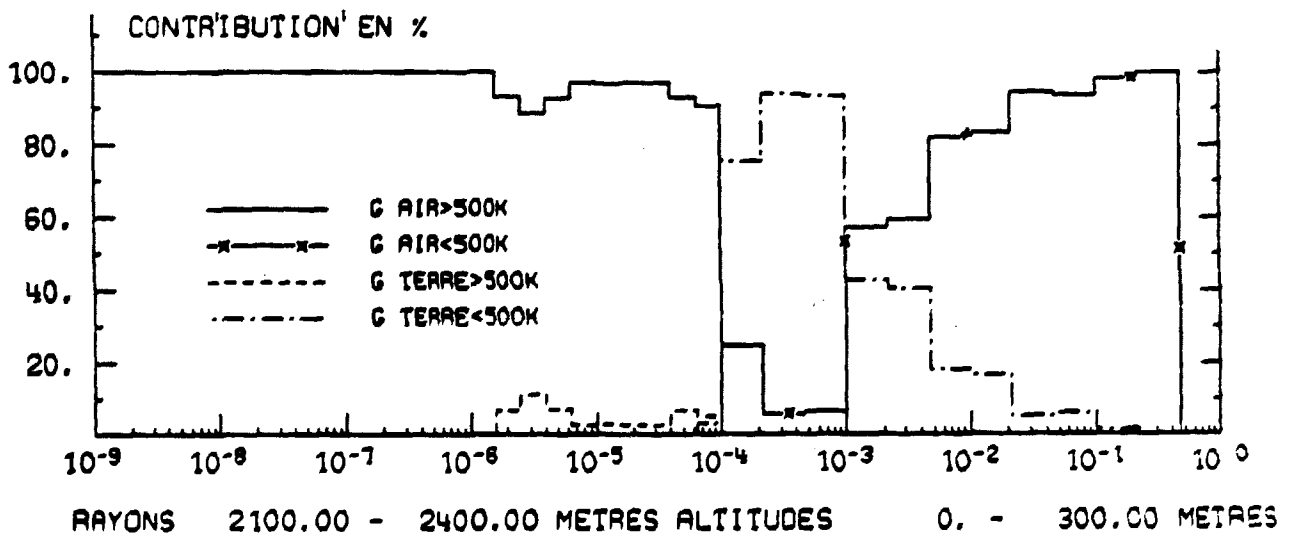
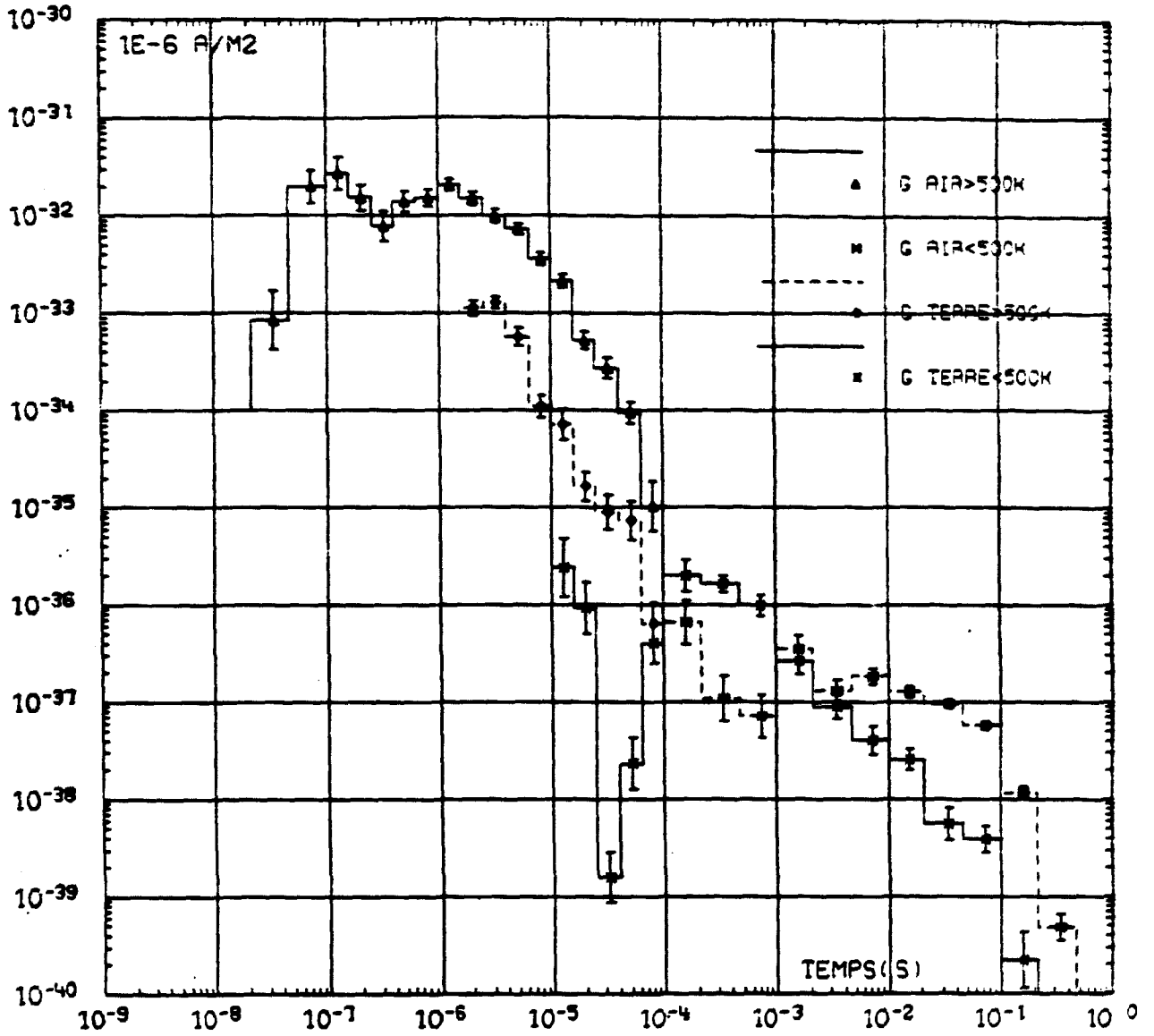




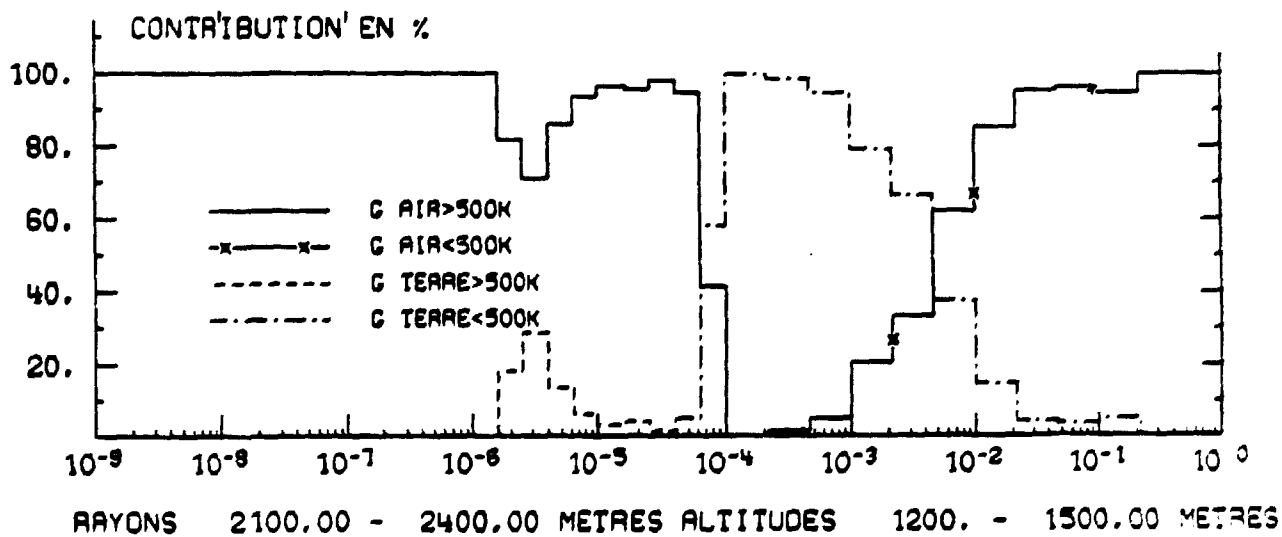
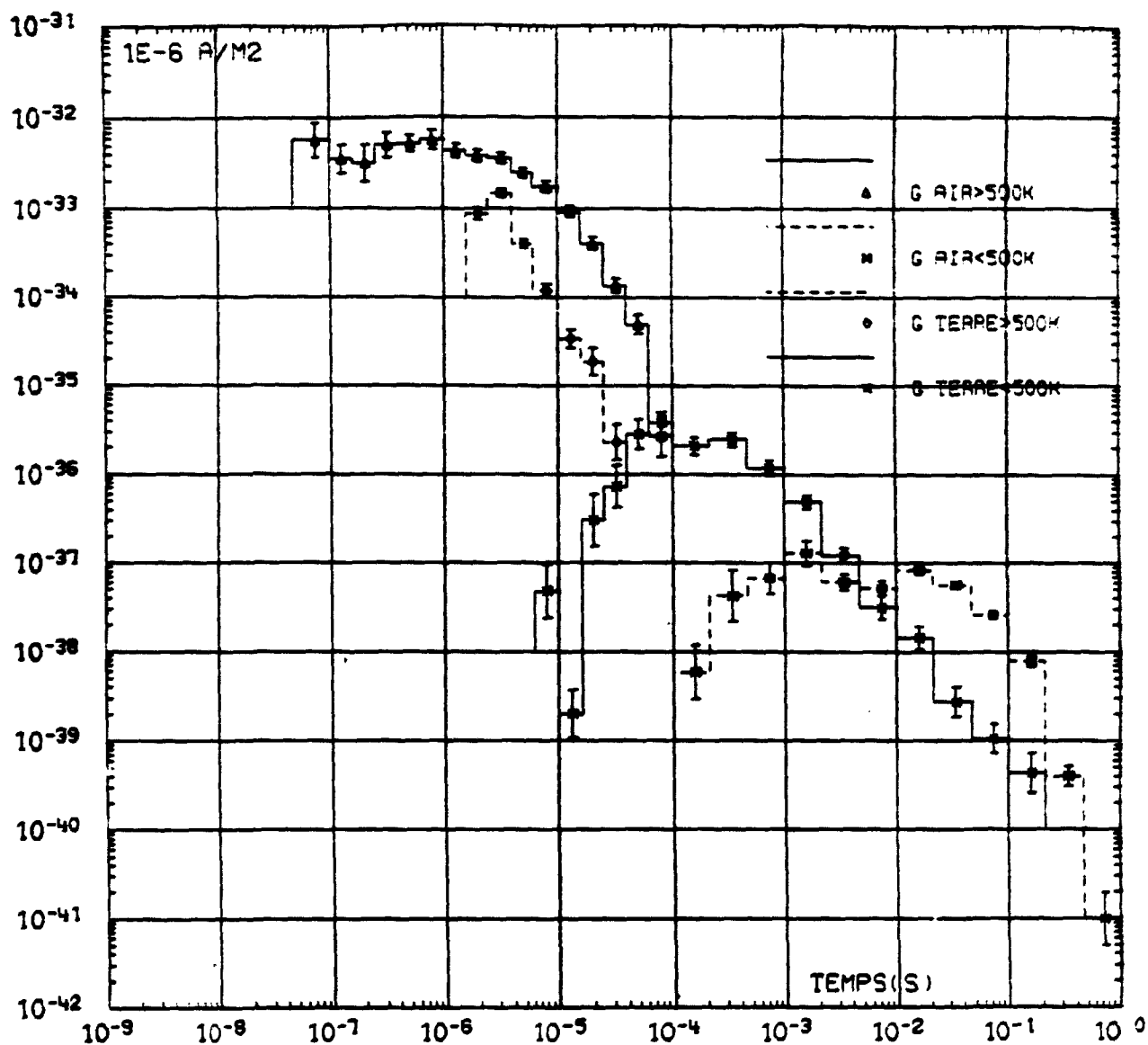
NEUTRONS 14MEV H=100M COURANT ELECTRONS F=0.1A



NEUTRONS 14MEV H=100M COURANT ELECTRONIC FACILE



NEUTRONS 14MEV H=100M COURANT ELECTRONS RADIAL



## REFERENCES

- (1) TRIPOLI-2: programme de Monte Carlo polycinétique à trois dimensions  
J.C.NIMAL and al.  
note CEA à paraître
- (2) THEMIS : a coherent punctual and multigroup cross section library for  
Monte Carlo and SN codes from ENDF/B4  
VI ème Conférence Internationale de Protection TOKYO (mai 1983)
- (3) Nuclear Data Tables (1971 atomic mass evaluation)  
A.H.WAPSTRA N.B.GOVE

## Annexe 1

### COMPOSITIONS DE L'AIR ET DE LA TERRE

	AIR		TERRE	
masse volumique	1.225g/cm <sup>3</sup>		1.7g/cm <sup>3</sup>	
	nb at/cm <sup>3</sup>	% en masse	nb at/cm <sup>3</sup>	% en masse
O16	1.0928E-5	0.235	3.507E-2	0.5435
N14	4.0636E-5	0.765	9.854E-3	0.0096
SII			1.169E-2	0.3182
AL27			4.923E-3	0.1287

## Annexe 2

## KERMA DE L'OXYGENE , DE L'AZOTE ET DU FER

energie(Mev)	oxygene	azote	fer
1.964E+01			
1.733E+01	8.011E+01	2.751E+02	0.000E+00
1.690E+01	8.011E+01	2.751E+02	3.740E+06
1.649E+01	8.011E+01	2.751E+02	3.740E+06
1.568E+01	7.122E+01	2.653E+02	3.573E+06
1.492E+01	6.129E+01	2.510E+02	3.405E+06
1.455E+01	5.782E+01	2.448E+02	3.321E+06
1.419E+01	5.496E+01	2.385E+02	3.272E+06
1.384E+01	5.132E+01	2.335E+02	3.211E+06
1.350E+01	4.825E+01	2.282E+02	3.126E+06
1.284E+01	4.453E+01	2.212E+02	3.034E+06
1.221E+01	3.664E+01	2.083E+02	2.915E+06
1.162E+01	3.411E+01	1.793E+02	2.544E+06
1.105E+01	3.247E+01	1.566E+02	2.312E+06
1.051E+01	2.274E+01	1.369E+02	2.096E+06
1.000E+01	2.312E+01	1.197E+02	1.895E+06
9.512E+00	1.966E+01	9.657E+01	1.704E+06
9.048E+00	1.710E+01	8.011E+01	1.535E+06
8.607E+00	1.784E+01	7.150E+01	1.383E+06
8.187E+00	1.645E+01	6.407E+01	1.248E+06
7.788E+00	1.391E+01	7.466E+01	1.127E+06
7.408E+00	1.654E+01	6.881E+01	1.008E+06
7.047E+00	1.794E+01	6.955E+01	9.053E+05
6.703E+00	1.345E+01	5.349E+01	8.147E+05
6.592E+00	1.220E+01	5.237E+01	7.588E+05
6.376E+00	1.088E+01	5.213E+01	7.192E+05
6.065E+00	8.202E+00	7.024E+01	6.580E+05
5.769E+00	9.090E+00	6.068E+01	5.989E+05
5.488E+00	7.591E+00	5.925E+01	5.404E+05
5.220E+00	5.239E+00	5.920E+01	4.947E+05
4.966E+00	1.164E+01	7.474E+01	4.544E+05
4.724E+00	7.337E+00	5.752E+01	4.236E+05
4.493E+00	6.149E+00	8.383E+01	3.953E+05
4.066E+00	8.672E+00	9.795E+01	3.581E+05
3.679E+00	8.456E+00	8.784E+01	3.174E+05
3.329E+00	1.019E+01	7.637E+01	2.772E+05
3.166E+00	9.139E+00	6.599E+01	2.587E+05
3.012E+00	4.741E+00	6.035E+01	2.569E+05
2.865E+00	3.463E+00	5.229E+01	2.349E+05
2.725E+00	3.261E+00	4.715E+01	2.256E+05
2.592E+00	3.129E+00	3.749E+01	2.118E+05
2.466E+00	2.800E+00	3.189E+01	2.304E+05
2.385E+00	1.703E+00	2.614E+01	2.074E+05
2.365E+00	6.538E-01	2.544E+01	1.744E+05
2.346E+00	4.624E-01	2.538E+01	1.517E+05
2.307E+00	1.089E+00	2.562E+01	1.945E+05
2.231E+00	2.786E+00	2.996E+01	1.614E+05
2.122E+00	3.599E+00	2.702E+01	1.701E+05
2.019E+00	3.692E+00	2.039E+01	1.746E+05
1.920E+00	3.648E+00	1.943E+01	1.611E+05

KERMA DE L'OXYGENE , DE L'AZOTE ET DU FER (suite)

energie(Mev)	oxygene	azote	fer
1.920			
1.827E+00	5.729E+00	1.975E+01	1.377E+05
1.738E+00	3.910E+00	2.905E+01	1.224E+05
1.653E+00	4.129E+00	1.802E+01	1.221E+05
1.572E+00	4.627E+00	1.856E+01	1.280E+05
1.496E+00	3.938E+00	1.756E+01	1.406E+05
1.423E+00	3.918E+00	2.059E+01	1.276E+05
1.353E+00	3.849E+00	3.120E+01	9.278E+04
1.287E+00	5.572E+00	1.896E+01	1.056E+05
1.225E+00	4.769E+00	9.687E+00	1.139E+05
1.165E+00	4.383E+00	9.206E+00	7.082E+04
1.108E+00	4.776E+00	1.028E+01	6.568E+04
1.003E+00	7.330E+00	1.193E+01	7.125E+04
9.616E-01	8.781E+00	8.210E+00	6.768E+04
9.072E-01	5.014E+00	5.968E+00	3.923E+04
8.629E-01	3.397E+00	6.974E+00	5.319E+04
8.208E-01	2.902E+00	7.577E+00	5.481E+04
7.808E-01	2.646E+00	8.087E+00	8.126E+04
7.427E-01	2.461E+00	8.695E+00	9.114E+04
7.065E-01	2.317E+00	9.584E+00	6.947E+04
6.721E-01	2.184E+00	1.183E+01	5.852E+04
6.393E-01	2.043E+00	1.619E+01	4.152E+04
6.081E-01	1.926E+00	1.107E+01	2.865E+04
5.784E-01	1.817E+00	6.304E+00	2.905E+04
5.502E-01	1.707E+00	5.951E+00	4.364E+04
5.234E-01	1.631E+00	6.004E+00	4.143E+04
4.505E-01	5.793E-01	2.527E+00	1.755E+04
4.076E-01	5.771E+00	7.565E+00	6.146E+04
3.877E-01	3.501E+00	6.018E+00	6.830E+04
3.688E-01	2.740E+00	5.711E+00	4.060E+04
3.337E-01	2.167E+00	5.403E+00	3.267E+04
3.020E-01	1.751E+00	5.076E+00	3.159E+04
2.985E-01	1.593E+00	4.902E+00	1.313E+04
2.972E-01	1.574E+00	4.878E+00	1.367E+04
2.945E-01	1.558E+00	4.858E+00	1.606E+04
2.872E-01	1.519E+00	4.806E+00	2.433E+04
2.732E-01	1.442E+00	4.696E+00	4.123E+04
2.472E-01	1.309E+00	4.483E+00	1.895E+04
2.352E-01	1.194E+00	4.267E+00	2.223E+04
2.237E-01	1.126E+00	4.120E+00	2.665E+04
2.128E-01	1.063E+00	3.979E+00	2.594E+04
2.024E-01	1.005E+00	3.842E+00	2.565E+04
1.925E-01	9.509E-01	3.711E+00	3.867E+04
1.832E-01	9.007E-01	3.584E+00	4.542E+04
1.742E-01	8.532E-01	3.462E+00	1.260E+04
1.657E-01	8.084E-01	3.343E+00	2.540E+04
1.576E-01	7.661E-01	3.227E+00	1.283E+04
1.500E-01	7.261E-01	3.114E+00	1.895E+04
1.426E-01	6.887E-01	3.006E+00	3.434E+04
1.357E-01	6.535E-01	2.901E+00	3.241E+04
1.291E-01	6.202E-01	2.800E+00	1.969E+04
1.228E-01	5.887E-01	2.703E+00	7.304E+03

KERMA DE L'OXYGENE , DE L'AZOTE ET DU FER (suite)

energie(Mev)	oxygene	azote	fer
1.228E-01			
1.168E-01	5.588E-01	2.609E+00	1.040E+04
1.111E-01	5.304E-01	2.518E+00	1.137E+04
9.804E-02	4.847E-01	2.368E+00	1.322E+04
8.652E-02	4.265E-01	2.177E+00	1.714E+04
8.250E-02	3.906E-01	2.057E+00	4.600E+04
8.230E-02	3.742E-01	2.002E+00	4.437E+03
7.950E-02	3.742E-01	2.002E+00	4.437E+03
7.499E-02	3.495E-01	1.915E+00	1.896E+04
7.200E-02	3.495E-01	1.915E+00	1.896E+04
6.738E-02	3.213E-01	1.814E+00	5.517E+03
6.172E-02	2.848E-01	1.676E+00	8.139E+03
5.656E-02	2.848E-01	1.676E+00	8.139E+03
5.517E-02	2.507E-01	1.542E+00	1.023E+04
5.247E-02	2.507E-01	1.542E+00	1.023E+04
4.939E-02	2.268E-01	1.444E+00	9.950E+03
4.631E-02	2.268E-01	1.444E+00	9.950E+03
4.359E-02	2.000E-01	1.327E+00	9.700E+03
4.087E-02	2.000E-01	1.327E+00	9.700E+03
3.698E-02	1.721E-01	1.196E+00	9.695E+03
3.431E-02	1.721E-01	1.196E+00	9.695E+03
3.183E-02	1.517E-01	1.092E+00	1.874E+04
3.162E-02	1.382E-01	1.022E+00	3.058E+04
3.073E-02	1.382E-01	1.022E+00	3.058E+04
2.985E-02	1.382E-01	1.022E+00	3.058E+04
2.901E-02	1.382E-01	1.022E+00	3.058E+04
2.850E-02	1.382E-01	1.022E+00	3.058E+04
2.818E-02	1.272E-01	9.603E-01	3.887E+04
2.738E-02	1.272E-01	9.603E-01	3.887E+04
2.700E-02	1.272E-01	9.603E-01	3.887E+04
2.661E-02	1.216E-01	9.282E-01	2.596E+04
2.606E-02	1.216E-01	9.282E-01	2.596E+04
2.585E-02	1.165E-01	8.987E-01	1.299E+03
2.512E-02	1.165E-01	8.987E-01	1.299E+03
2.479E-02	1.165E-01	8.987E-01	1.299E+03
2.441E-02	1.122E-01	8.737E-01	3.883E+02
2.418E-02	1.122E-01	8.737E-01	3.883E+02
2.358E-02	1.094E-01	8.575E-01	4.149E+02
2.304E-02	1.041E-01	8.261E-01	6.464E+02
2.239E-02	1.041E-01	8.261E-01	6.464E+02
2.187E-02	1.041E-01	8.261E-01	6.464E+02
2.113E-02	9.422E-02	7.673E-01	9.050E+02
2.054E-02	9.422E-02	7.673E-01	9.050E+02
1.995E-02	9.422E-02	7.673E-01	9.050E+02
1.930E-02	9.422E-02	7.673E-01	9.050E+02
1.778E-02	7.823E-02	6.694E-01	1.606E+03
1.662E-02	7.823E-02	6.694E-01	1.606E+03
1.585E-02	7.823E-02	6.694E-01	1.606E+03
1.503E-02	7.823E-02	6.694E-01	1.606E+03
1.383E-02	6.089E-02	5.572E-01	2.193E+03
1.273E-02	6.089E-02	5.572E-01	2.193E+03
1.171E-02	6.089E-02	5.572E-01	2.193E+03



## KERMA DE L'OXYGENE , DE L'AZOTE ET DU FER (suite)

energie(Mev)	oxygene	azote	fer
1.171E-02			
1.114E-02	4.741E-02	4.661E-01	2.401E+03
1.008E-02	4.741E-02	4.661E-01	2.401E+03
9.119E-03	4.741E-02	4.661E-01	2.401E+03
8.251E-03	3.691E-02	3.950E-01	1.894E+03
7.466E-03	3.691E-02	3.950E-01	1.894E+03
7.102E-03	3.691E-02	3.950E-01	1.894E+03
6.267E-03	2.874E-02	3.414E-01	1.556E+03
5.531E-03	2.874E-02	3.414E-01	1.556E+03
5.004E-03	2.238E-02	3.026E-01	1.210E+03
4.643E-03	2.238E-02	3.026E-01	1.210E+03
4.307E-03	2.238E-02	3.026E-01	1.210E+03
3.981E-03	1.829E-02	2.802E-01	8.103E+02
3.707E-03	1.829E-02	2.802E-01	8.103E+02
3.548E-03	1.613E-02	2.698E-01	6.934E+02
3.355E-03	1.613E-02	2.698E-01	6.934E+02
3.162E-03	1.460E-02	2.633E-01	6.341E+02
3.035E-03	1.460E-02	2.633E-01	6.341E+02
2.818E-03	1.321E-02	2.583E-01	5.912E+02
2.746E-03	1.321E-02	2.583E-01	5.912E+02
2.661E-03	1.225E-02	2.554E-01	5.660E+02
2.613E-03	1.225E-02	2.554E-01	5.660E+02
2.485E-03	1.165E-02	2.539E-01	5.519E+02
2.371E-03	1.081E-02	2.523E-01	5.339E+02
2.249E-03	1.081E-02	2.523E-01	5.339E+02
2.113E-03	9.783E-03	2.511E-01	5.139E+02
2.035E-03	9.783E-03	2.511E-01	5.139E+02
1.796E-03	8.230E-03	2.523E-01	4.883E+02
1.585E-03	8.230E-03	2.523E-01	4.883E+02
1.507E-03	6.409E-03	2.593E-01	4.622E+02
1.364E-03	6.409E-03	2.593E-01	4.622E+02
1.234E-03	6.409E-03	2.593E-01	4.622E+02
1.117E-03	4.991E-03	2.727E-01	3.976E+02
1.010E-03	4.991E-03	2.727E-01	3.976E+02
9.611E-04	4.991E-03	2.727E-01	3.976E+02
8.482E-04	3.887E-03	2.921E-01	2.949E+02
7.485E-04	3.887E-03	2.921E-01	2.949E+02
7.079E-04	3.027E-03	3.175E-01	2.471E+02
6.773E-04	3.027E-03	3.175E-01	2.471E+02
6.310E-04	3.027E-03	3.175E-01	2.471E+02
5.829E-04	3.027E-03	3.175E-01	2.471E+02
5.145E-04	2.358E-03	3.492E-01	2.059E+02
4.540E-04	2.358E-03	3.492E-01	2.059E+02
3.981E-04	1.836E-03	3.873E-01	1.719E+02
3.536E-04	1.836E-03	3.873E-01	1.719E+02
3.043E-04	1.430E-03	4.323E-01	1.443E+02
2.754E-04	1.430E-03	4.323E-01	1.443E+02
2.430E-04	1.114E-03	4.847E-01	1.226E+02
2.144E-04	1.114E-03	4.847E-01	1.226E+02
2.040E-04	8.673E-04	5.451E-01	1.061E+02
1.778E-04	8.673E-04	5.451E-01	1.061E+02
1.670E-04	8.673E-04	5.451E-01	1.061E+02

## KERMA DE L'OXYGENE , DE L'AZOTE ET DU FER (suite)

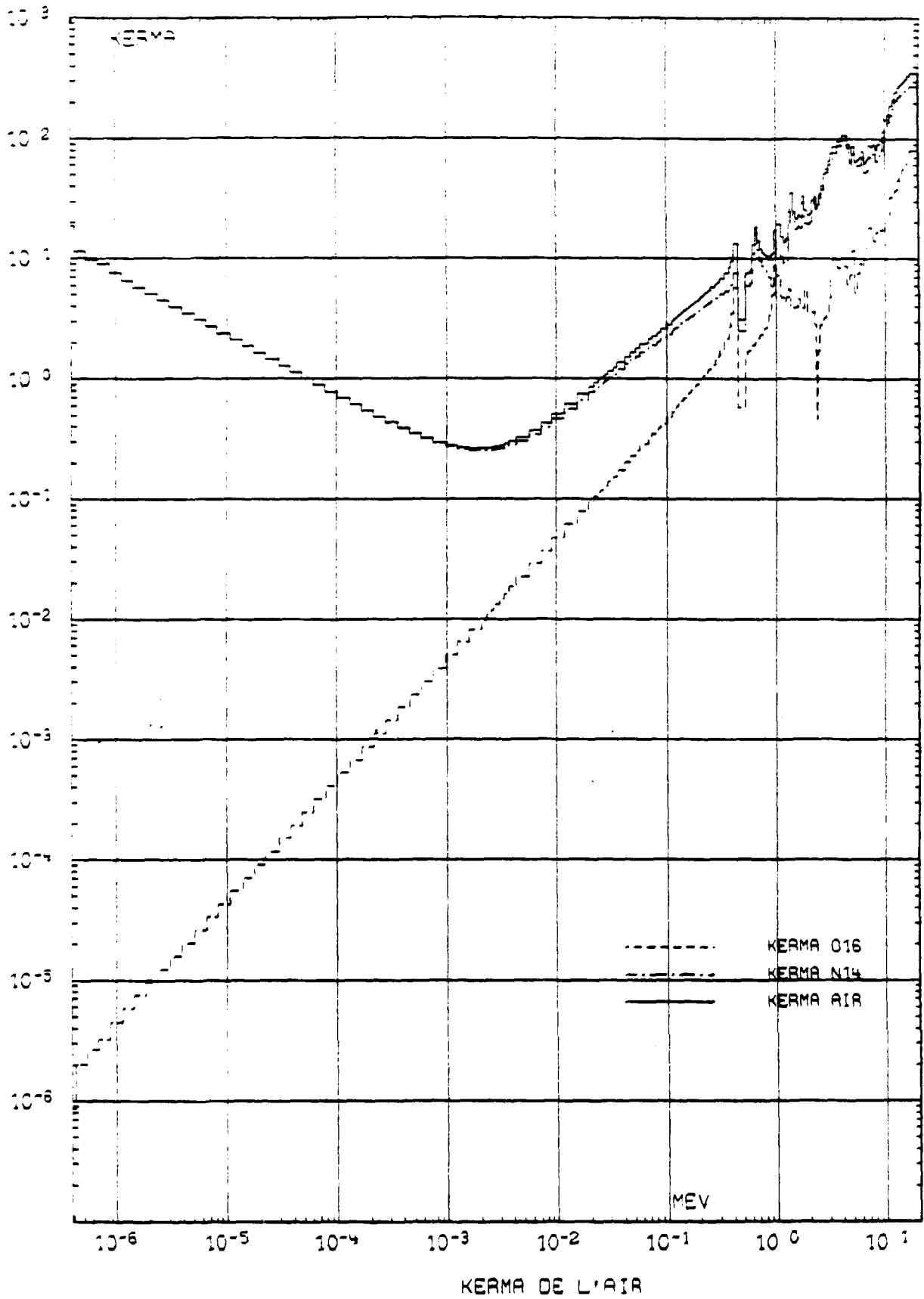
energie (MeV)	oxygene	azote	fer
1.670E-04	6.754E-04	6.145E-01	9.422E+01
1.585E-04	6.754E-04	6.145E-01	9.422E+01
1.367E-04	6.754E-04	6.145E-01	9.422E+01
1.301E-04	6.754E-04	6.145E-01	9.422E+01
1.122E-04	5.260E-04	6.937E-01	8.620E+01
1.013E-04	5.260E-04	6.937E-01	8.620E+01
9.166E-05	4.097E-04	7.841E-01	8.154E+01
8.528E-05	4.097E-04	7.841E-01	8.154E+01
7.869E-05	4.097E-04	7.841E-01	8.154E+01
7.079E-05	3.190E-04	8.869E-01	7.979E+01
6.790E-05	3.190E-04	8.869E-01	7.979E+01
6.310E-05	3.190E-04	8.869E-01	7.979E+01
6.144E-05	3.190E-04	8.869E-01	7.979E+01
5.599E-05	2.485E-04	1.004E+00	8.062E+01
5.012E-05	2.485E-04	1.004E+00	8.062E+01
4.785E-05	2.485E-04	1.004E+00	8.062E+01
4.552E-05	1.935E-04	1.136E+00	8.390E+01
3.981E-05	1.935E-04	1.136E+00	8.390E+01
3.727E-05	1.935E-04	1.136E+00	8.390E+01
3.389E-05	1.512E-04	1.285E+00	8.884E+01
3.051E-05	1.512E-04	1.285E+00	8.884E+01
2.920E-05	1.512E-04	1.285E+00	8.884E+01
2.792E-05	1.177E-04	1.455E+00	9.611E+01
2.498E-05	1.177E-04	1.455E+00	9.611E+01
2.260E-05	1.177E-04	1.455E+00	9.611E+01
2.045E-05	9.141E-05	1.651E+00	1.055E+02
1.903E-05	9.141E-05	1.651E+00	1.055E+02
1.760E-05	9.141E-05	1.651E+00	1.055E+02
1.674E-05	7.119E-05	1.871E+00	1.229E+02
1.523E-05	7.119E-05	1.871E+00	1.229E+02
1.371E-05	7.119E-05	1.871E+00	1.229E+02
1.259E-05	5.544E-05	2.119E+00	1.356E+02
1.122E-05	5.544E-05	2.119E+00	1.356E+02
1.068E-05	5.544E-05	2.119E+00	1.356E+02
1.000E-05	4.318E-05	2.401E+00	1.527E+02
9.190E-06	4.318E-05	2.401E+00	1.527E+02
8.913E-06	4.318E-05	2.401E+00	1.527E+02
8.315E-06	4.318E-05	2.401E+00	1.527E+02
7.943E-06	3.363E-05	2.721E+00	1.786E+02
7.524E-06	3.363E-05	2.721E+00	1.786E+02
7.079E-06	3.363E-05	2.721E+00	1.786E+02
6.476E-06	3.363E-05	2.721E+00	1.786E+02
6.160E-06	2.619E-05	3.083E+00	1.914E+02
5.623E-06	2.619E-05	3.083E+00	1.914E+02
5.043E-06	2.619E-05	3.083E+00	1.914E+02
4.670E-06	2.040E-05	3.494E+00	2.163E+02
4.470E-06	2.040E-05	3.494E+00	2.163E+02
4.129E-06	2.040E-05	3.494E+00	2.163E+02
3.928E-06	2.040E-05	3.494E+00	2.163E+02
3.381E-06	1.589E-05	3.959E+00	2.424E+02

25

KERMA DE L'OXYGENE , DE L'AZOTE ET DU FER (suite)

energie(Mev)	oxygene	azote	fer
3.381E-06			
3.059E-06	1.589E-05	3.959E+00	2.424E+02
2.768E-06	1.237E-05	4.486E+00	2.722E+02
2.372E-06	1.230E-05	4.501E+00	2.731E+02
2.360E-06	9.635E-06	5.083E+00	3.072E+02
2.130E-06	9.635E-06	5.083E+00	3.072E+02
2.020E-06	9.635E-06	5.083E+00	3.072E+02
1.930E-06	9.635E-06	5.083E+00	3.072E+02
1.855E-06	9.634E-06	5.082E+00	3.072E+02
1.840E-06	7.504E-06	5.760E+00	3.730E+02
1.755E-06	7.504E-06	5.760E+00	3.730E+02
1.670E-06	7.504E-06	5.760E+00	3.730E+02
1.590E-06	7.504E-06	5.760E+00	3.730E+02
1.510E-06	7.504E-06	5.760E+00	3.730E+02
1.445E-06	7.504E-06	5.760E+00	3.730E+02
1.440E-06	5.844E-06	6.526E+00	4.129E+02
1.370E-06	5.844E-06	6.526E+00	4.129E+02
1.305E-06	5.844E-06	6.526E+00	4.129E+02
1.235E-06	5.844E-06	6.526E+00	4.129E+02
1.170E-06	5.844E-06	6.526E+00	4.129E+02
1.125E-06	5.844E-06	6.526E+00	4.129E+02
1.110E-06	4.451E-06	7.581E+00	4.802E+02
1.090E-06	4.451E-06	7.581E+00	4.802E+02
1.080E-06	4.451E-06	7.581E+00	4.802E+02
1.070E-06	4.451E-06	7.581E+00	4.802E+02
1.035E-06	4.451E-06	7.581E+00	4.802E+02
1.010E-06	4.451E-06	7.581E+00	4.802E+02
9.860E-07	4.451E-06	7.581E+00	4.802E+02
9.300E-07	4.451E-06	7.581E+00	4.802E+02
8.764E-07	4.451E-06	7.581E+00	4.802E+02
8.600E-07	3.256E-06	9.015E+00	6.505E+02
7.900E-07	3.256E-06	9.015E+00	6.505E+02
7.050E-07	3.256E-06	9.015E+00	6.505E+02
6.826E-07	3.256E-06	9.015E+00	6.505E+02
6.250E-07	2.654E-06	9.782E+00	7.238E+02
5.400E-07	2.654E-06	9.782E+00	7.238E+02
5.316E-07	2.654E-06	9.782E+00	7.238E+02
4.850E-07	2.004E-06	1.150E+01	7.597E+02
4.330E-07	2.004E-06	1.150E+01	7.597E+02
4.140E-07	2.004E-06	1.150E+01	7.597E+02
3.910E-07	8.568E-07	1.883E+01	1.062E+03

# KERMA DANS L'AIR



### annexe 3

#### QUALIFICATION DU FORMALISME

Afin de valider l'étude du transport couplé neutron-gamma par TRIPOLI-2, un cas simple est étudié et on vérifie que l'équation du bilan énergétique est satisfaite :

$$E_s + Q = E_n + E_\gamma + E_d$$

où  $E_s$  est l'énergie des neutrons source

$E_n$  est le Kerma

$E_\gamma$  est l'énergie déposée dans la matière par les photons

$Q$  est la somme des énergies disponibles  $Q_k$  au cours d'une interaction  $k$  de section efficace macroscopique  $S_k$

$$Q = \sum_k Q_k \iint \Phi(E,r) \cdot S_k(E) dE dr$$

$E_d$  est l'énergie dégagée par le retour à l'état fondamental après

une réaction  $j$ , de section efficace  $S_j$ , conduisant à un isotope de période non négligeable, donc non comprise dans  $Q$

$$E_d = \sum_k E_{d,j} \iint \Phi(E,r) \cdot S_j(E) dE dr$$

Une sphère de fer de 100cm de rayon a été étudiée avec une réflexion comme condition aux limites, ceci pour ne pas avoir à tenir compte des fuites dans le bilan neutronique. Aucun biaisage n'est utilisé dans la simulation des neutrons et des gamma.

La source est ponctuelle, au centre de la sphère, et d'énergie  $E_s$ .

Dans le fer les réactions  $(n,p)$  ont lieu pour des énergies supérieures à 5 Mev, les réactions  $(n,\alpha)$  au-dessus de 10 Mev. Pour des énergies inférieures à 860 Kev les seules interactions sont la diffusion élastique et la capture radiative. Pour cette dernière gamme d'énergies  $E_d$  est nulle

et le calcul de  $Q$  se simplifie :

$$Q = \sum_j Q_j \cdot p_j$$

où  $Q_j$  est l'énergie disponible par  $(n,\gamma)$  sur l'isotope  $j$

$p_j$  est le pourcentage de cet isotope dans le fer naturel

les valeurs (3) de  $Q_j$  et de  $p_j$  sont données ci-dessous :

isotope	$p_j$ (%)	$Q_j$ (Mev)
54 Fe	5.8	9.298
56 Fe	91.8	7.646
57 Fe	2.1	10.043
58 Fe	0.3	6.587
Fer	$Q = 7.789$ Mev	

$E_n$  est calculée en utilisant la fonction réponse du Kerma provenant de la MACLIB/4 à 171 groupes en énergie et décrite dans TRIPOLI sur 291 groupes entre 19 Mev et 0.391 ev.

$E_y$  est calculée en utilisant la fonction échauffement dans le fer provenant de la bibliothèque U.K.N.D.L. et décrite à 75 groupes entre 14 Mev et 10 Kev .

Trois énergies  $E_s$  ont été considérées :

- $E_s = 1$  ev : les énergies  $E_s$  et  $E_n$  sont négligeables par rapport à  $Q$  et  $E_y$
- $E_s = 800$  Kev
- $E_s = 5$  Mev : outre la diffusion élastique et la capture radiative, le neutron peut subir des diffusions inélastiques

Le problème étant sans fuite, on doit vérifier que l'absorption neutronique est égale à la source qui est de 1 n/s .

Le tableau suivant détaille les différents éléments du bilan énergétique fait pour les trois énergies de neutron étudiées .

	source neutron Es = 1 ev		source neutron Es = 800 Kev		source neutron Es = 5 Mev	
Absorpt.	1.0067	2.0%	0.9990	1.0%	1.0046	0.9%
En	1.030 Kev	0.5%	628.6 Kev	0.2%	910.9 Kev	1.4%
E $\gamma$	8.003 Mev	2.5%	7.639 Mev	3.1%	11.96 Mev	2.3%
En + E $\gamma$	8.004 Mev	3.0%	8.268 Mev	3.3%	12.87 Mev	3.0%
Es + Q	7.789 Mev		8.589 Mev		12.789 Mev	
En+E $\gamma$ /Es+Q	1.028		0.963		1.006	

L'écart type indiqué correspond à 95% de confiance .

Il est à noter qu'il est nécessaire d'avoir une parfaite cohérence entre les sections efficaces utilisées pour calculer le kerma et la production de photons et celles servant au transport des neutrons et des photons.

## Annexe 4

### SECTIONS DE PRODUCTION GAMMA DANS L'AIR ET DANS LA TERRE

La génération de photons lors d'une collision d'un neutron sur un atome  $k$  est réalisée proportionnellement à la matrice de production  $(n, \gamma)$ . Soit  $\sigma(k, G_n, G_\gamma)$  le terme de cette matrice : le neutron ayant une énergie dans le groupe  $G_n$ ,  $\sigma(k, G_n, G_\gamma)$  photons sont générés avec une énergie dans le groupe  $G_\gamma$ .

Les graphiques 13 et 14 donnent les sections de production gamma dans l'air et dans la terre, intégrées sur les 75 groupes gamma

$$\sigma(G_n) = \sum_k n_k \sum_{G_\gamma} \sigma(k, G_n, G_\gamma)$$

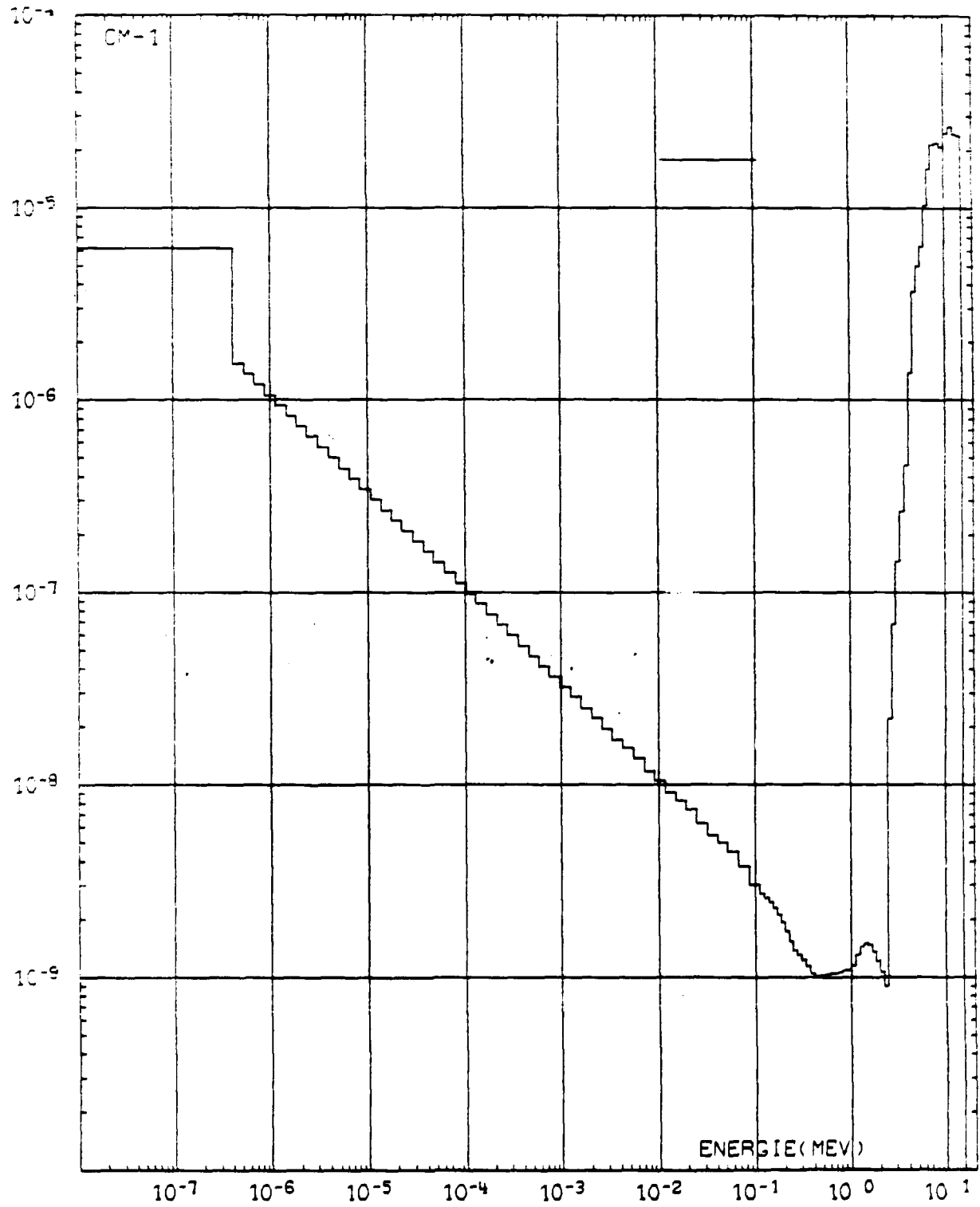
où  $n_k$  est le nombre d'atomes de l'élément  $k$  dans la composition

Les graphiques 15 et 16 donnent le spectre des photons émis pour deux énergies caractéristiques de neutrons : 10 Mev et l'énergie thermique

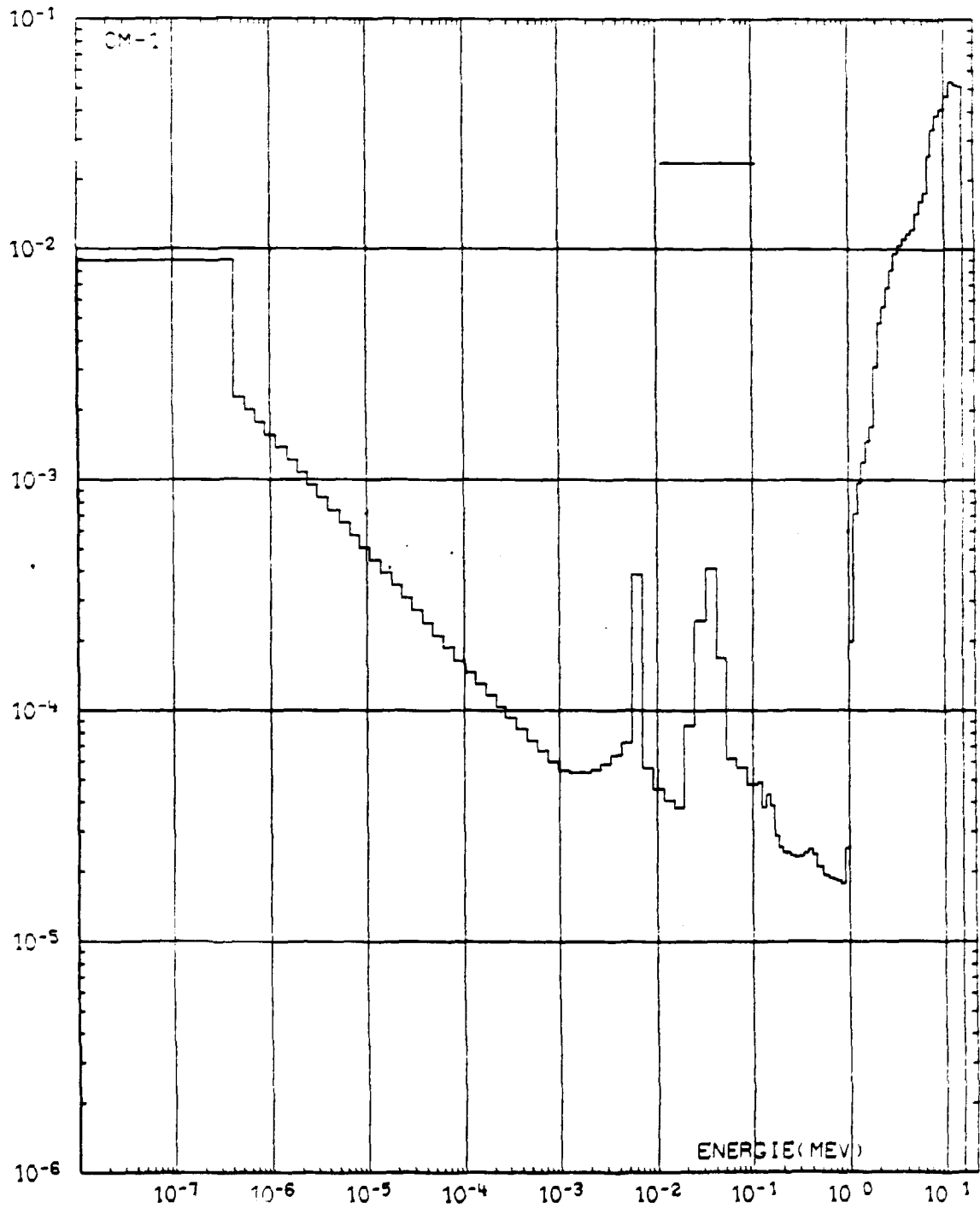
$$\sigma(G_n, G_\gamma) = \sum_k n_k \sigma(k, G_n, G_\gamma)$$



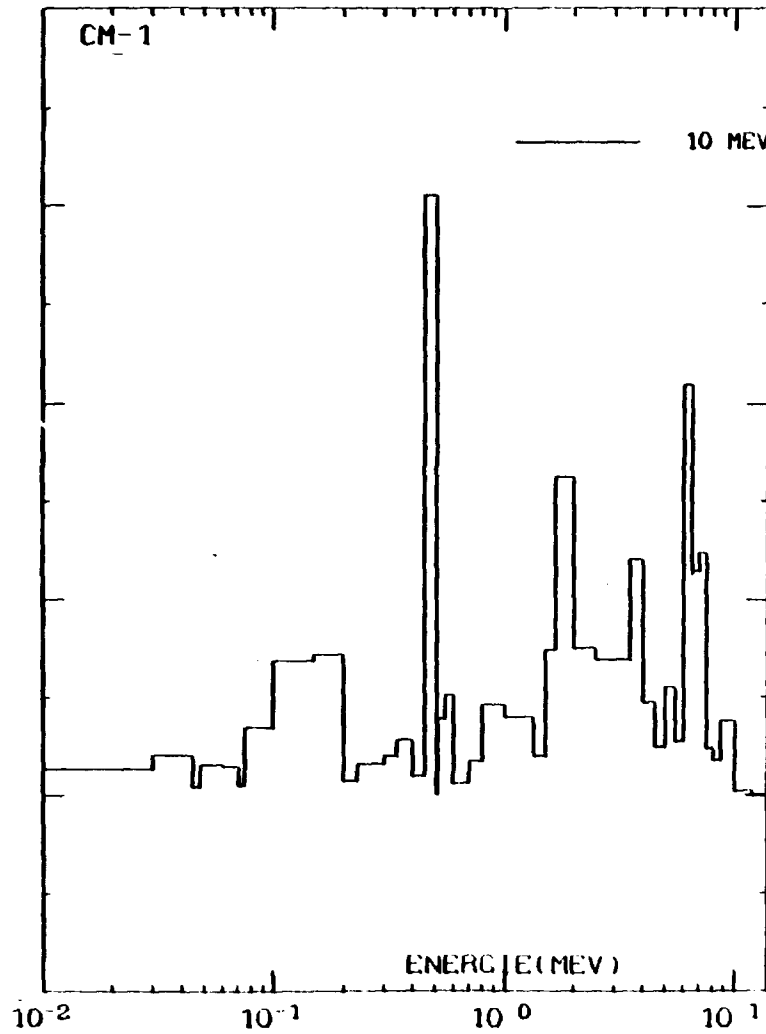
SECTION DE PRODUCTION GAMMA DANS L AIR



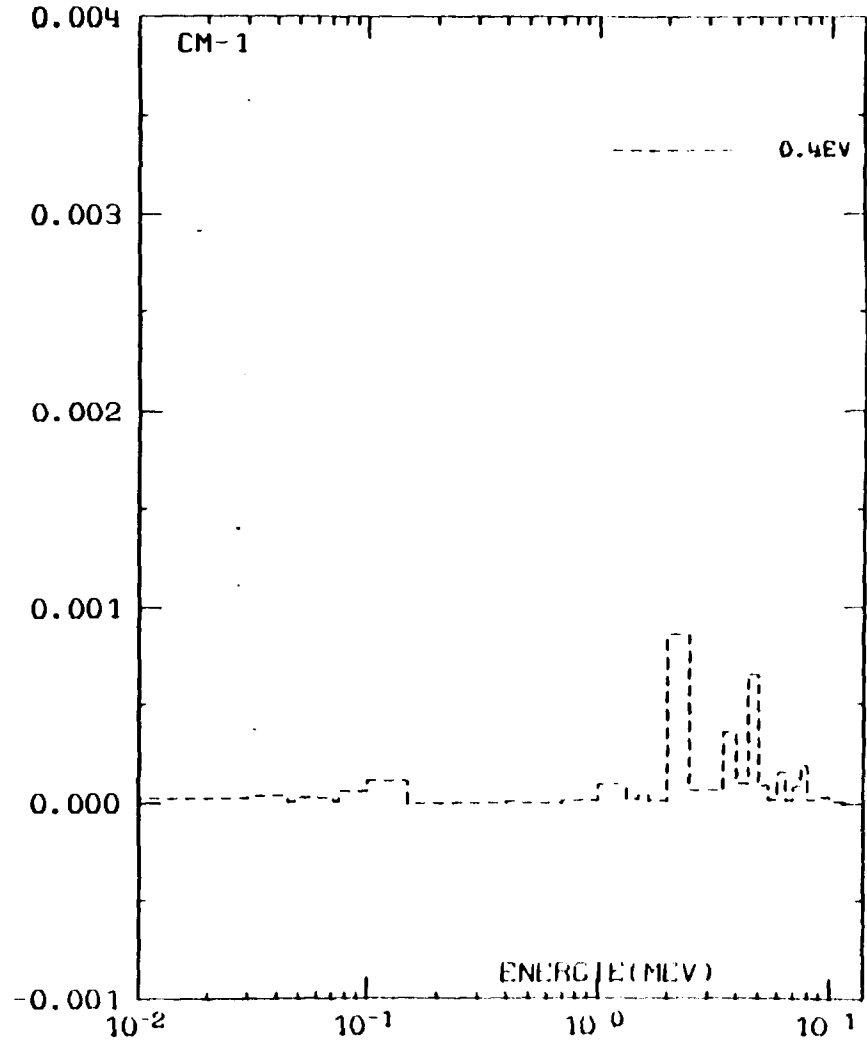
SECTION DE PRODUCTION GAMMA DANS LA TERRE



SPECTRE DES GAMMA PRODUITS DANS LA TERRE



NEUTRONS D ENERGIE 10 MEV

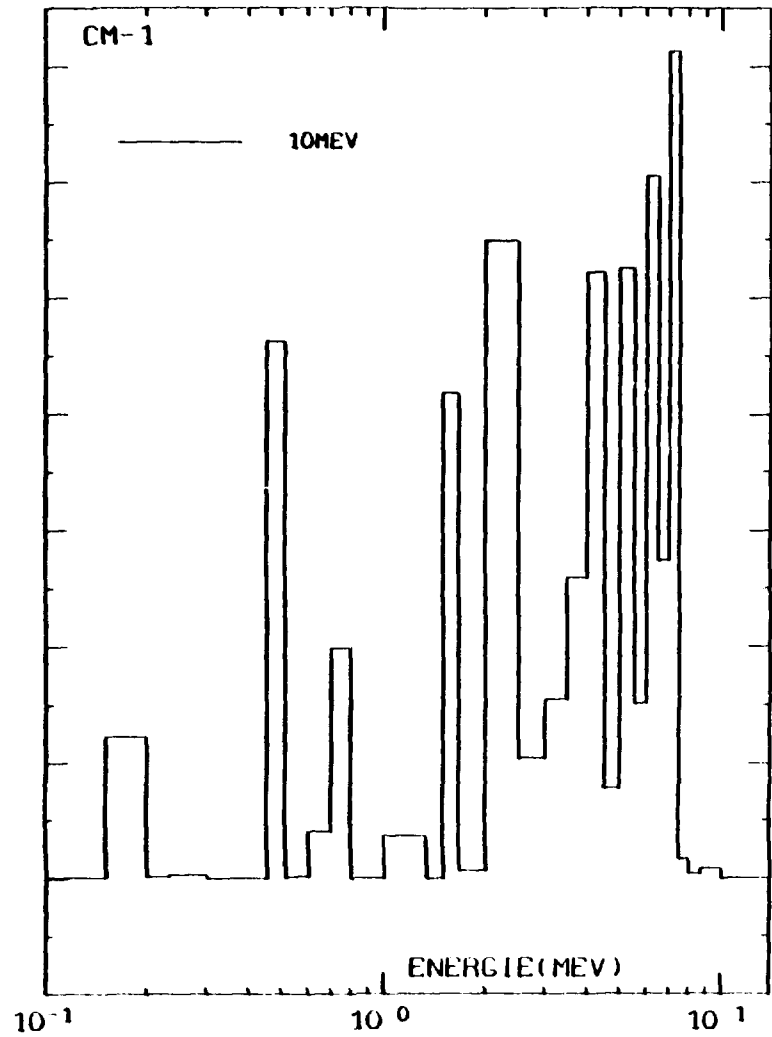


NEUTRONS D ENERGIE THERMIQUE

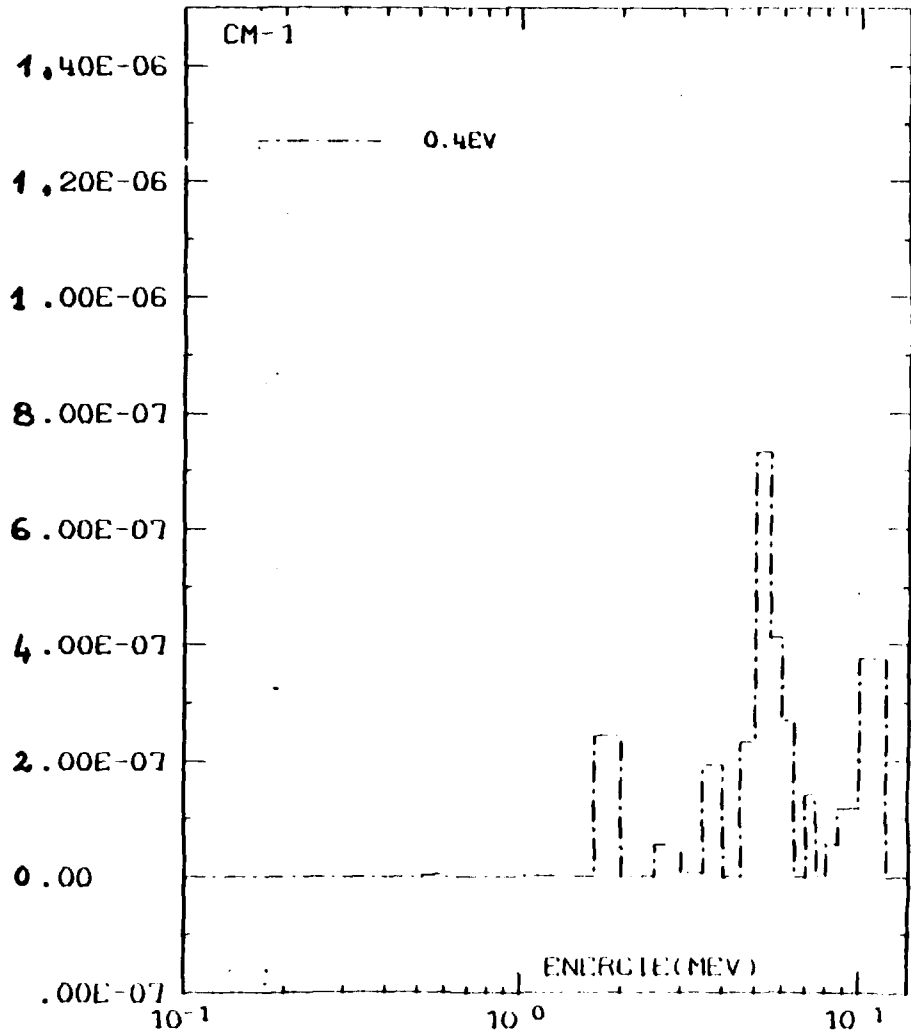
34

# SPECTRE DES GAMMA PRODUITS DANS L. A. 3

28



NEUTRONS D ENERGIE 10 MEV



NEUTRONS D ENERGIE THERMIQUE

We regret that some of the pages in the microfiche copy of this report may not be up to the proper legibility standards, even though the best possible copy was used for preparing the master fiche