

Mme ROUSSEAU A.

Rapport CEA n° 1202

Etude du spectre γ des produits de fission dans la bande 0-500 keV

Sommaire. - Dans l'étude du spectre γ des produits de fission de l'uranium, on s'est plus particulièrement intéressé dans la présente note à déterminer la partie du spectre qui s'étend entre 0 et 500 keV, au bout d'un fonctionnement donné de pile, et à suivre l'évolution de ce spectre dans le temps après un arrêt de pile.

L'étude peut porter sur les produits de fission apparus dans toute la pile ou sur ceux apparus dans un échantillon d'uranium supposé placé en pile. C'est ce dernier cas que nous avons envisagé.

La détermination du spectre s'appuie sur une partie théorique et sur une partie expérimentale. Les fonctionnements de pile choisis sont différents dans les deux cas, ce qui permet d'étendre la gamme de validité des spectres tracés ici.

1959

17 pages

Mme ROUSSEAU A.

Report CEA n° 1202

Study of fission product γ spectra in the band 0-500 keV.

Summary. - In the study of the γ spectrum of uranium fission products, particular attention has been given in this note to the part of the spectrum ranging between 0 and 500 keV after a given pile operating programme and the evolution of this spectrum with time after a pile shut-down has been followed.

The study is related to the fission products which appear in the pile as a whole or on those produced in a uranium sample assumed to have been placed in the pile. The latter case has been envisaged here.

The spectrum determination is based partly on theory and partly on experiment. The pile operating conditions are different in the two cases, which widens the range of validity of the spec-

PREMIER MINISTRE
COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

**Étude du spectre γ des produits de fission
dans la bande 0-500 keV**

par

A. ROUSSEAU

Rapport CEA N° 1202

1959

**CENTRE D'ÉTUDES
NUCLÉAIRES DE SACLAY
SERVICE DE DOCUMENTATION
Boite postale n° 2 - Gif-sur-Yvette (S.-et-O.)**

- Rapport C.E.A. n° 1202 -

Service des Grandes Piles de Saclay

ETUDE DU SPECTRE γ DES PRODUITS DE FISSION
DANS LA BANDE 0 - 500 keV

par

Mme A. ROUSSEAU

R. 59.1372

- 1959 -

**ETUDE DU SPECTRE γ DES PRODUITS DE FISSION
DANS LA BANDE 0 - 500 keV**

Dans l'étude du spectre γ des produits de fission de l'uranium, on s'est plus particulièrement intéressé dans la présente note à déterminer la partie du spectre qui s'étend entre 0 et 500 keV, au bout d'un fonctionnement donné de pile, et à suivre l'évolution de ce spectre dans le temps après un arrêt de pile.

L'étude peut porter sur les produits de fission apparus dans toute la pile ou sur ceux apparus dans un échantillon d'uranium supposé placé en pile. C'est ce dernier cas que nous avons envisagé.

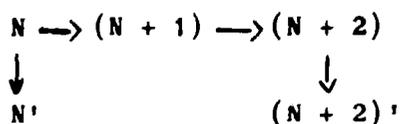
La détermination du spectre s'appuie sur une partie théorique et sur une partie expérimentale. Les fonctionnements de pile choisis sont différents dans les deux cas, ce qui permet d'étendre la gamme de validité des spectres tracés ici.

I - PARTIE THEORIQUE

La méthode consiste à déterminer le nombre de désintégrations par seconde des noyaux émetteurs de γ , pour chaque énergie. On a donc dressé une liste de tous les émetteurs de γ de 0 à 500 keV :

- a) émetteurs directement formés dans la fission : N ;
- b) émetteurs dérivant de produits de fission directs par filiation radioactive : (N + 1), (N + 2) ;

c) émetteurs formés par capture de neutrons à partir de produits directs ou indirects de la fission : N' , $(N + 2)'$



N , $(N + 1)$, $(N + 2)$ sont des isohares,
 N et N' sont des isotopes.

Conduite du calcul

A) MARCHE DE PILE

On rappellera ici brièvement les équations qui régissent la formation des produits de la fission. Elles se ramènent toutes à l'intégration de l'équation différentielle pour un corps N :

$$\frac{dN}{dt} = (\sum \text{formations de } N) \text{ par seconde} - (\sum \text{disparitions de } N) \text{ par seconde}$$

- Dans le cas où le corps N dérive d'un produit $N-1$ par filiation radioactive et résulte aussi d'une fission ,

$$(\sum \text{formations de } N) \text{ par seconde} = \gamma F + R \lambda_{N-1} (N-1)$$

$$(\sum \text{disparitions de } N) \text{ par seconde} = \lambda_N N + A_N N$$

avec γ = rendement de fission pour le corps N

F = nombre de fissions par seconde

λ_N, λ_{N-1} = constantes de décroissance radioactive des corps N et $N-1$

$A_N N$ = terme représentant l'absorption du corps N quand il est en pile

R = fraction du produit $N-1$ donnant N

- Dans le cas où le corps N est formé à partir d'un produit $N-1$ par capture de neutrons et résulte aussi d'une fission,

$$(\sum \text{formations de } N) \text{ par seconde} = \gamma' F + A'_{N-1} (N-1)$$

$$(\sum \text{disparitions de } N) \text{ par seconde} = \lambda_N N + A_N N$$

A'_{N-1} (N-1) représente la fraction des noyaux (N-1) qui par capture de neutrons donnent le corps N.

En résumé,

Equation valable pour N, N + 1, N + 2 isobares

$$\frac{dN}{dt} = \gamma F + R \lambda_{N-1} (N-1) - \lambda_N N - A_N N \quad (1)$$

Equation valable pour N' (N + 2)' isotopes formés à partir de N, (N + 2), etc..

$$\frac{dN'}{dt} = \gamma' F + A'_N N - \lambda_{N'} N' - A_{N'} N' \quad (1')$$

B) ARRET DE PILE OU ANNULATION DU FLUX DE NEUTRONS

Si l'on arrête la pile ou si l'on en retire l'échantillon d'uranium irradié, les équations (1) et (1') se simplifient. En négligeant les fissions spontanées (1) devient (2), (1') devient (2') avec

$$(2) = \frac{dN}{dt} = R \lambda_{N-1} (N-1) - \lambda_N N$$

$$(2') = \frac{dN'}{dt} = - \lambda_{N'} N'$$

Les termes d'absorption (1) ou de capture (1') ont disparu puisqu'on a annulé le flux de neutrons.

Intégration des équations des paragraphes A et B

D'après les formules des paragraphes A et B, on voit qu'il est nécessaire de connaître l'équation donnant (N-1) à l'instant t pour obtenir N (t). Ceci explique que l'équation qui donne le nombre de noyaux à l'instant t du 3ème ou 4ème corps d'une chaîne d'isobares soit assez compliquée.

Il existe cependant des simplifications pour la plupart des corps, ce qui permet de réduire la complexité des formules (voir paragraphes suivants).

Conditions du calcul dans le cas de la présente note

Dans la présente note, on s'est fixé d'étudier le spectre d'un échantillon d'uranium.

1° On a pris arbitrairement comme échantillon 1 cm³ d'uranium-235 absolument neuf.

2° On a supposé que cet échantillon était placé en pile pendant un temps T dans un flux ϕ constant.

3° Au bout du temps T, on a retiré l'échantillon de la pile.

Il résulte donc des hypothèses ci-dessus les remarques suivantes :

a) Conditions initiales

La première hypothèse formulée ci-dessus nous permettra d'écrire que le nombre des noyaux émetteurs γ était nul à l'instant d'entrée en pile (échantillon neuf).

Pour les équations (1) et (1') les conditions initiales s'écriront donc :

$$N(0) = 0 ; N'(0) = 0 \quad \text{etc...}$$

b) Au bout du temps T, le nombre des noyaux de chaque émetteur présents est donné par $N(T)$, intégrale finie des équations (1) ou (1').

On pourra donc dans l'intégration des équations (2) et (2') prendre comme origine des temps, le temps d'arrêt de pile, ou de sortie de pile pour un échantillon, avec comme conditions initiales

$$N(0) = N(T) ; N'(0) = N'(T) \quad \text{etc...}$$

En résumé, les intégrations des équations A et B se font dans les conditions suivantes :

Equations (1) et (1')

Par intégration on obtient $N(t)$ et $N'(t)$ avec

$$N(0) = 0 ; N'(0) = 0$$

Au bout du temps T

$$N = N(T) ; N' = N'(T)$$

Equations (2) et (2')

Par intégration on obtient $N(t)$ et $N'(t)$, t étant le temps écoulé après un arrêt de pile ou temps de refroidissement

avec
$$N(0) = N(T) ; N'(0) = N'(T)$$

c) Discussion sur le facteur F

Le terme F représente le nombre de fissions par seconde soit dans la pile entière, soit comme ici dans un échantillon d'uranium isolé.

Si l'on envisageait la pile entière ou même une barre et si l'on supposait que l'on travaille à puissance constante, alors le nombre de fissions resterait constant.

Comme les pilotages de pile s'effectuent en réalité à flux constant, c'est cette dernière hypothèse qu'on retiendra.

Dans le cas d'un échantillon isolé, si A_0 est le nombre de noyaux d'uranium présents à l'entrée en pile, le séjour en pile provoque une combustion telle que le nombre de noyaux d'uranium est une fonction du temps de la forme

$$A = A_0 e^{-\sigma_D \phi t}$$

avec σ_D = section microscopique de disparition de l'uranium-235.

Si l'on désigne par σ_f la section microscopique de fission de l'uranium-235, le nombre de fissions par seconde est donné par :

$$F = \sigma_f \phi A \text{ pour } A \text{ noyaux présents}$$

$$\text{soit } F = \sigma_f \phi A_0 e^{-\sigma_D \phi t}$$

Dans le cas de la présente note, A_0 est le nombre de noyaux contenus dans 1 cm^3 d'uranium-235, soit :

$$A_0 = 4,8 \cdot 10^{22}$$

Calcul

Hypothèses : 1 cm^3 d'uranium-235

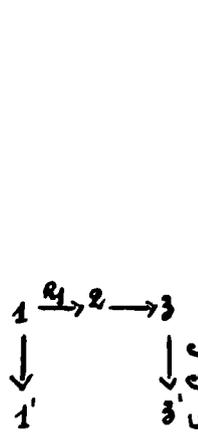
Flux constant choisi $\phi = 10^{12} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$

Temps d'irradiation $T = 200 \text{ j}$

$T = 10^5 \text{ s}$

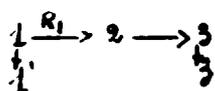
Formules : Intégration des équations A et B

MARCHE DE PILE



$$\begin{aligned}
 (1) \quad N_1 &= \frac{\gamma_1 \Sigma_f \phi}{\lambda_1^x - \sigma_D \phi} \left[e^{-\sigma_D \phi t} - e^{-\lambda_1^x t} \right] \\
 (2) \quad N_2 &= \frac{R_1 \gamma_1 \lambda_1 \Sigma_f \phi}{(\lambda_1^x - \sigma_D \phi)(\lambda_2^x - \sigma_D \phi)} \left[\frac{\lambda_2^x - \sigma_D \phi}{\lambda_2^x - \lambda_1^x} (e^{-\sigma_D \phi t} - e^{-\lambda_1^x t}) - \frac{\lambda_1^x - \sigma_D \phi}{\lambda_2^x - \lambda_1^x} (e^{-\sigma_D \phi t} - e^{-\lambda_2^x t}) \right] \\
 &\quad + \frac{\sigma_2 \Sigma_f \phi}{\lambda_2^x - \sigma_D \phi} (e^{-\sigma_D \phi t} - e^{-\lambda_2^x t}) \\
 (1') \quad N_1' &= \frac{A_1 \gamma_1 \Sigma_f \phi}{(\lambda_1^x - \sigma_D \phi)(\lambda_1'^x - \sigma_D \phi)} \left[\frac{\lambda_1'^x - \sigma_D \phi}{\lambda_1'^x - \lambda_1^x} (e^{-\sigma_D \phi t} - e^{-\lambda_1^x t}) - \frac{\lambda_1^x - \sigma_D \phi}{\lambda_1'^x - \lambda_1^x} (e^{-\sigma_D \phi t} - e^{-\lambda_1'^x t}) \right] \\
 &\quad + \frac{\sigma_1 \Sigma_f \phi}{\lambda_1'^x - \sigma_D \phi} \left[e^{-\sigma_D \phi t} - e^{-\lambda_1'^x t} \right]
 \end{aligned}$$

ARRET DE PILE



$$\begin{aligned}
 (1) \quad N_1 &= N_{10} e^{-\lambda_1 t} \\
 (2) \quad N_2 &= -R_1 \lambda_1 N_{10} \left(\frac{e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_1 - \lambda_2} \right) + N_{20} e^{-\lambda_2 t} \\
 (1') \quad N_1' &= N_{10}' e^{-\lambda_1' t} \\
 (3') \quad N_3' &= N_{30}' e^{-\lambda_3' t}
 \end{aligned}$$

avec γ = rendement de fission de l'émetteur N

$$\Sigma_f \phi = \sigma_f \phi A_c = 26,02 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda^x = \lambda + \sigma_a \phi \quad (\sigma_a = \text{section microscopique d'absorption de l'émetteur en pile})$$

$$\sigma_D = \text{section microscopique de disparition de } ^{235}\text{U}$$

$$\sigma_D = 650 \text{ barns}$$

$$A_1 = \sigma_1 \phi$$

Simplifications

En réalité, les corps relèvent pour la plupart des formules suivantes :

MARCHE DE PILE

$$1C \quad N_1 = \frac{\delta_1 \Sigma f \phi}{\lambda_1} e^{-\sigma_D \phi t}$$

$$2C \quad N_2 = \frac{R_1 \delta_1 + \delta_2}{\lambda_2} e^{-\sigma_D \phi t}$$

⋮

$$NC \quad N_c = \frac{\delta_T}{\lambda_N} e^{-\sigma_D \phi t} \text{ avec } \delta_T = R_2(R_1 \delta_1 + \delta_2) + \dots + \delta_N.$$

$$\text{ou } 2'c \quad N_{2'} = \frac{R_1 \delta_1 \Sigma f \phi}{\lambda_2' - \sigma_D \phi} (e^{-\sigma_D \phi t} - e^{-\lambda_2' t})$$

ARRET DE PILE

$$1D \quad N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

$$2D \quad N_2 = (N_{20} + R_1 N_{10}) e^{-\lambda_2 t}$$

$$2'D \quad N_{2'} = (N_{20} + R_1 N_{10}) e^{-\lambda_2 t} - R_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

$$3D \quad N_3 = (N_{30} + R_2 N_{20} + R_1 R_2 N_{10}) e^{-\lambda_3 t}$$

Les chaînes émettrices de γ sont reproduites ici (fig. 1). En dessous de chaque corps émetteur considéré (0,500 keV) on a rappelé par un chiffre les équations de croissance et décroissance l'intéressant.

Les sigles EGC, EGD représentent respectivement "équation générale de croissance", "équation générale de décroissance", c'est-à-dire les intégrales générales des équations A et B sans simplification.

Les émissions γ pour chaque corps ont été calculées à l'issue d'un fonctionnement T de pile et pour des temps de refroidissement de 2 h, 24 h, 10 j, 100 j. Les spectres obtenus sont tracés sur les figures 2 à 21.

On a donné (tableau 1 à 3) les énergies émises et le nom des émetteurs correspondants avec le pourcentage des noyaux de l'émetteur utilisés pour chaque énergie.

Sur les figures, dps signifie désintégrations par seconde.

II - PARTIE EXPERIMENTALE

La méthode a consisté à mettre en pile un échantillon d'uranium pendant un temps T et à "mesurer" ensuite le spectre γ obtenu au bout de temps de refroidissement différents.

a) Nature de l'appareillage de spectrométrie

On s'est servi du spectromètre RCA à 256 canaux qui permet une observation visuelle du spectre et son enregistrement point par point, en nombre de coups pendant un temps choisi. Ses différentes gammes de mesure permettent de limiter la bande spectrale observée et d'obtenir ainsi un "étalement" du spectre dans la gamme considérée.

Le spectromètre était précédé d'un photomultiplicateur γ .

b) Nature des échantillons

Pour avoir la possibilité d'observer un spectre peu de temps après la sortie de pile, il s'est avéré nécessaire de choisir un volume d'uranium très petit, de façon à ce que l'activité γ de l'échantillon soit suffisamment réduite pour ne pas saturer le photomultiplicateur de mesure.

L'échantillon a donc été réalisé sous forme de "pastilles", constituées par un dépôt d'uranium de faible épaisseur sur un support d'aluminium également très mince, l'épaisseur du dépôt étant choisie en fonction du temps de séjour en pile prévu, de façon à obtenir, pour des pastilles différentes, une activité sensiblement comparable en sortie de pile.

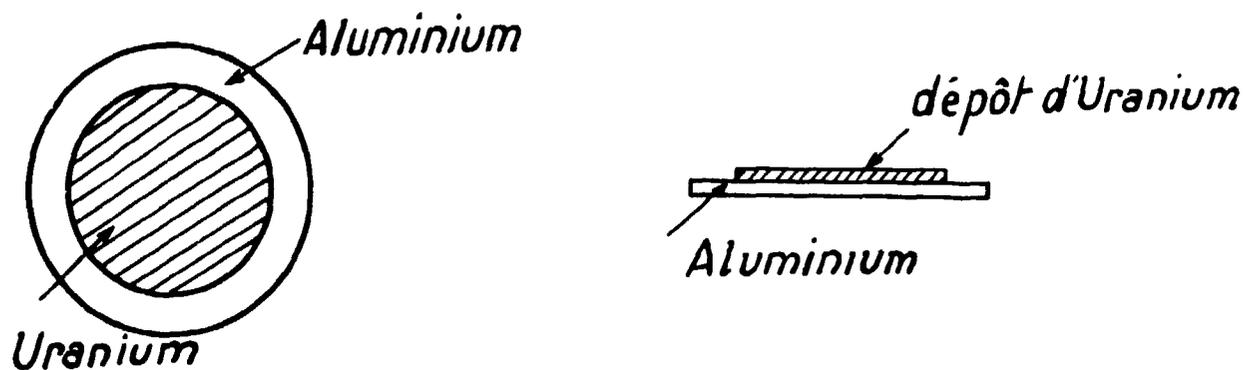
c) Expériences

Elles ont été menées sur 3 pastilles dont les caractéristiques étaient les suivantes :

Echantillon n°	Poids d'uranium en μg	Temps d'irradiation en h	Flux d'irradiation $\text{n/cm}^2 \text{ s}$	Temps de refroidissement au moment de l'observation des spectres (en h)
14	94	3	$3,5 \cdot 10^{11}$	1,7 ; 3 ; 20
15	115	1	$3,5 \cdot 10^{11}$	2,5 ; 4,5 ; 6,75 24,75
16	257	0,5	$3,5 \cdot 10^{11}$	4,5 ; 8 ; 25,8

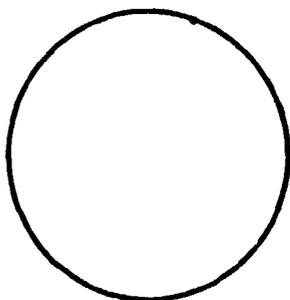
Nota : La pastille d'uranium était constituée comme suit :

Pastille Echantillon



Pastille

de référence →
en aluminium



Les spectres obtenus sont tracés sur les figures 22 à 24.

La comparaison du spectre γ émis par l'aluminium seul (pastille de référence) et du spectre émis par la pastille échantillon, a permis de conclure que sur la gamme d'énergie considérée, le spectre émis par la pastille échantillon représentait sensiblement le spectre de l'uranium seul, les raies γ prédominantes de l'aluminium se situant surtout aux hautes énergies.

III - DISCUSSION DES RESULTATS

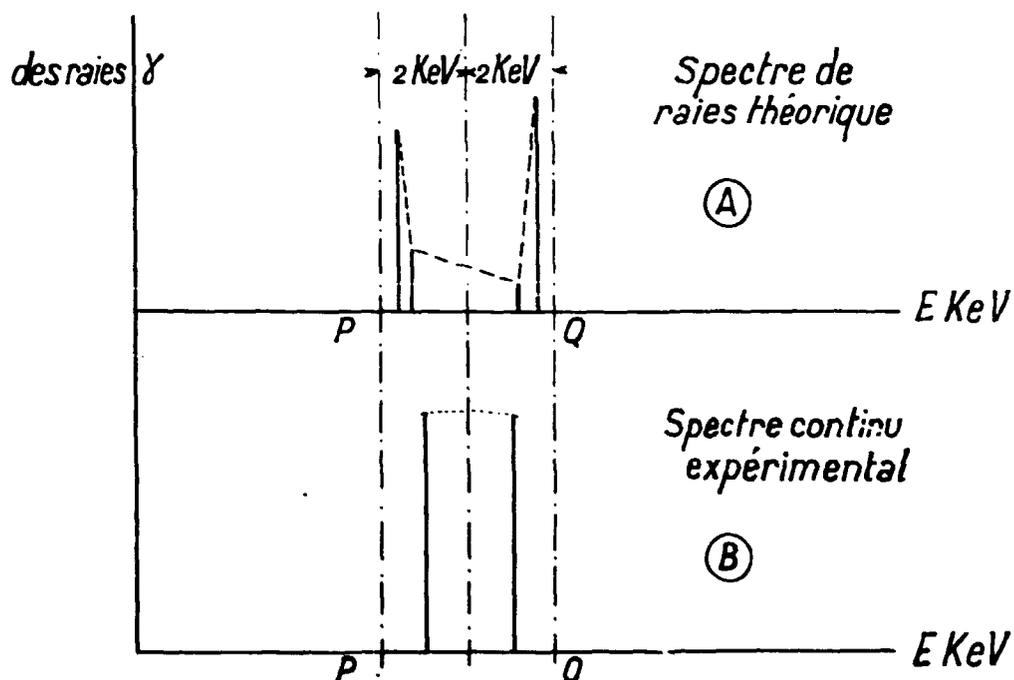
a) Partie théorique

On peut garantir les résultats théoriques dans la mesure où l'on connaît les rendements de fission des corps émetteurs de γ et les énergies exactes émises. On a pris les rendements de fission et les schémas de décroissance radioactive donnés par The Reactor Handbook Physics et le rapport ORNL 2127, étant entendu que sauf informations supplémentaires on a adopté, pour les corps non cités dans ces livres, le rendement de fission de la chaîne. Si l'on se réfère au paragraphe p. 6 où sont établies les formules utilisées dans le présent rapport, on remarquera que l'hypothèse ci-dessus revient à admettre que $\gamma_2 = 0$ ou $\gamma_3 = 0$, etc... (γ_2, γ_3 étant, on le rappelle, les rendements propres de fission des corps 2 et 3), et à prendre comme rendement de fission pour 2 et 3, celui de la "chaîne" γ_1 .

Les corps produits dans la fission ont été sélectionnés en fonction de l'énergie γ émise. Certains de ces corps ont une existence incertaine et il y a lieu de considérer avec prudence les raies γ qu'ils émettent. Cette remarque concerne particulièrement les corps à vie très courte dont l'existence en tête des chaînes est problématique.

b) Partie expérimentale

On a donné ici les spectres correspondant au "découpage" le plus fin du spectre, chaque canal du spectromètre correspondant à 2 keV environ. Il y a donc sur chaque point une double incertitude : une incertitude de position de 2 keV et d'autre part une incertitude d'intensité, ces deux faits s'expliquant très bien par le schéma ci-après :



Dans le cas A, les intensités maximales se situent à $P + 0,25$ keV et $Q - 0,2$ keV environ.

Dans le cas B, on n'a plus qu'une amplitude maximale d'intensité plus grande que les deux précédentes s'étalant de $P + 1$ keV à $Q - 1$ keV.

Le spectre expérimental peut donc être difficile à interpréter si on n'a pas l'appui du spectre théorique.

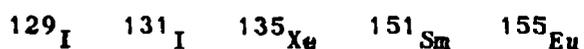
Bien que le spectre théorique ait été tracé pour des temps de fonctionnement différents des temps de fonctionnement effectivement réalisés dans l'expérience, on peut l'utiliser pour déterminer approximativement dans le cas expérimental les corps émetteurs intéressants en tenant compte de leur probabilité d'existence au bout de temps de fonctionnement faibles.

Il faut également remarquer que, dans le calcul du spectre théorique, on n'a pas tenu compte des phénomènes d'autoabsorption, qui existent même dans une pastille très mince. Le coefficient d'autoabsorption étant une fonction décroissante de l'énergie émise, l'autoabsorption a pour effet de réduire les basses énergies par rapport aux grandes et donc d'aboutir à un écrasement relatif du spectre aux basses énergies.

IV - EXTENSION DES RESULTATS

1) Influence du flux

A temps T constant, l'amplitude des raies existantes varie proportionnellement au flux sauf pour quelques corps



Ceci s'explique par le fait que ces corps sont notablement absorbants ou du moins ont une absorption telle que $\sigma_a \phi^{(1)}$ n'est plus négligeable (voir formules de croissance).

Les amplitudes des raies émises par ces corps ne sont donc pas des fonctions linéaires du flux et on devra les recalculer pour $\Phi \neq 10^{12}$.

1) $\lambda^* \neq \lambda$

Corps	Raies γ émises	σ_a	Formule régissant la croissance	Formule régissant la décroissance	Observations
^{129}I	39 keV 100 %	11 barns	EGC	EGD	
^{131}I	364 keV 80 % 284 keV 6,3 % 80 keV 6,3 %	600 barns	3 C	EGD	$\sigma_a \phi < \lambda$ adopter 3 C linéaire jusqu'à $\phi=10^{14}$
^{135}Xe	370 keV 1 % 250 keV 96 %	$2,8 \cdot 10^6$ barns	EGC	EGD	
^{151}Sm	19 keV 100 %	12.000 barns	EGC 3	EGD 3	
^{155}Eu	137 keV { 131 keV { 104 keV { 100 % 86 keV { 59 keV { 18,7 keV {	14.000 barns	EGC 3	2 D	

2) Influence du temps d'irradiation T

La comparaison des spectres tracés pour $T = 10^5$ s et $T = 200$ jours permet de conclure à une faible modification d'ensemble du spectre sur cette gamme, au moins pour les temps de refroidissement faibles.

Si l'on irradie un échantillon durant une période intermédiaire, il sera assez facile de prévoir les raies dominantes d'après ces deux spectres.

De même, les spectres expérimentaux représentent assez bien les périodes comprises entre $T = 0$ et $T = 1$ jour.

Le temps $T = 200$ jours a été choisi de telle sorte que l'on puisse admettre que la saturation est atteinte. Le spectre que l'on obtiendrait pour T_{∞} est le même sensiblement que celui obtenu pour $T = 200$ jours.

Pour mieux s'en rendre compte, on se reportera aux courbes de la figure 25, donnant l'activité globale des produits de fission pour des temps de fonctionnement et de refroidissement différents. Ces courbes ont été tracées en utilisant la formule classique d'activité γ [1].

Les calculs de ce rapport ont été effectués en majeure partie par M. DROCOURT, élève de l'école Polytechnique, en stage au S.G.P.S., en août 1958.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] GLASSTONE S., Principles of Nuclear Reactor Engineering, p. 119 (D. Van Nostrand Company, Inc., New-York).
- [2] The Reactor Handbook Physics, AECD 3645.
- [3] BLOMEKE J.O., TODD Mary F., ORNL 2127.
- [4] WEST J.M., ANL 4807.
- [5] MOTEFF J., APEX 134.
- [6] KOONTZ R.L., JARRETT A.A., Radioactivity of Irradiated Uranium, Nucleonics, Juin 1954.

Manuscrit reçu le 12 mai 1959.

- TABLEAU 1 -

keV	Corps émetteur N	Pourcentage des noyaux de N utilisés	keV	Corps émetteur N	Pourcentage des noyaux de N utilisés	keV	Corps émetteur N	Pourcentage des noyaux de N utilisés	keV	Corps émetteur N	Pourcentage des noyaux de N utilisés
9,3	^{83m}Kr	100	51	^{83}Br	100	93	^{160}Tb	100	117	^{151}Nd	100
13,5	^{73}Ga	100	52	^{104m}Rh	100	94	^{107m}Ag	100	120	^{134}I	~0
18	^{112}Pd	100	54	^{73}Ga	100	95	^{122}Sb	36	122	^{152c}Eu 9,2 h	50
18,7	^{155}Eu	100	54	^{144}Ce	10	96	^{79m}Se	100	122	^{152c}Eu	100
19	^{151}Sm	100	55	^{159}Gd	100	97	^{149}Nd	100	123	13 a	
28	^{88}Kr	7	59	^{155}Eu	100	100	^{144}Ce	10	123	^{152}Eu 13 a	100
29,2	^{93m}Nb	100	61	^{83}Se	100	102	^{161}Gd	100	124	^{149}Nd	100
30	^{140}Ba	100	69	^{153}Sm	29	103	^{81m}Se	100	124	149 Nd	100
30	^{149}Nd	100	80	^{131}I	6,3	103	^{153}Sm	73	126	^{143}Ce	12,1
32,2	^{83m}Kr	100	80,7	^{144}Ce	10	104	^{155}Eu	100	128	^{134m}Cs	100
33,7	^{144}Ce	10	81	^{133}Xe	100	105	^{155}Sm	100	130	^{105m}Rh	100
35	^{125m}Te	100	85	^{151}Nd	100	106	^{129m}Te	100	131	^{155}Eu	100
39	^{129}I	100	86	^{155}Eu	100	110	^{125m}Te	100	134	^{144}Ce	10
40	^{83}Se	100	88	^{109m}Ag	100	110	^{146}Ce	57	135	^{142}Pr	~0
40	^{103m}Rh	100	88,5	^{127m}Te	100	110	^{151}Nd	100	137	^{155}Eu	100
40	^{104}Rh	100	87	^{160}Tb	100	112	^{149}Nd	100	137	^{116m}In	3
41	^{99}Mo	100	92	^{147}Nd	60	114	^{149}Nd	100	140	^{99}Mo	100
50	^{161}Tb	100	93	^{140}La	1,8	116	^{110m}Ag	100	141	^{99m}Tc	100

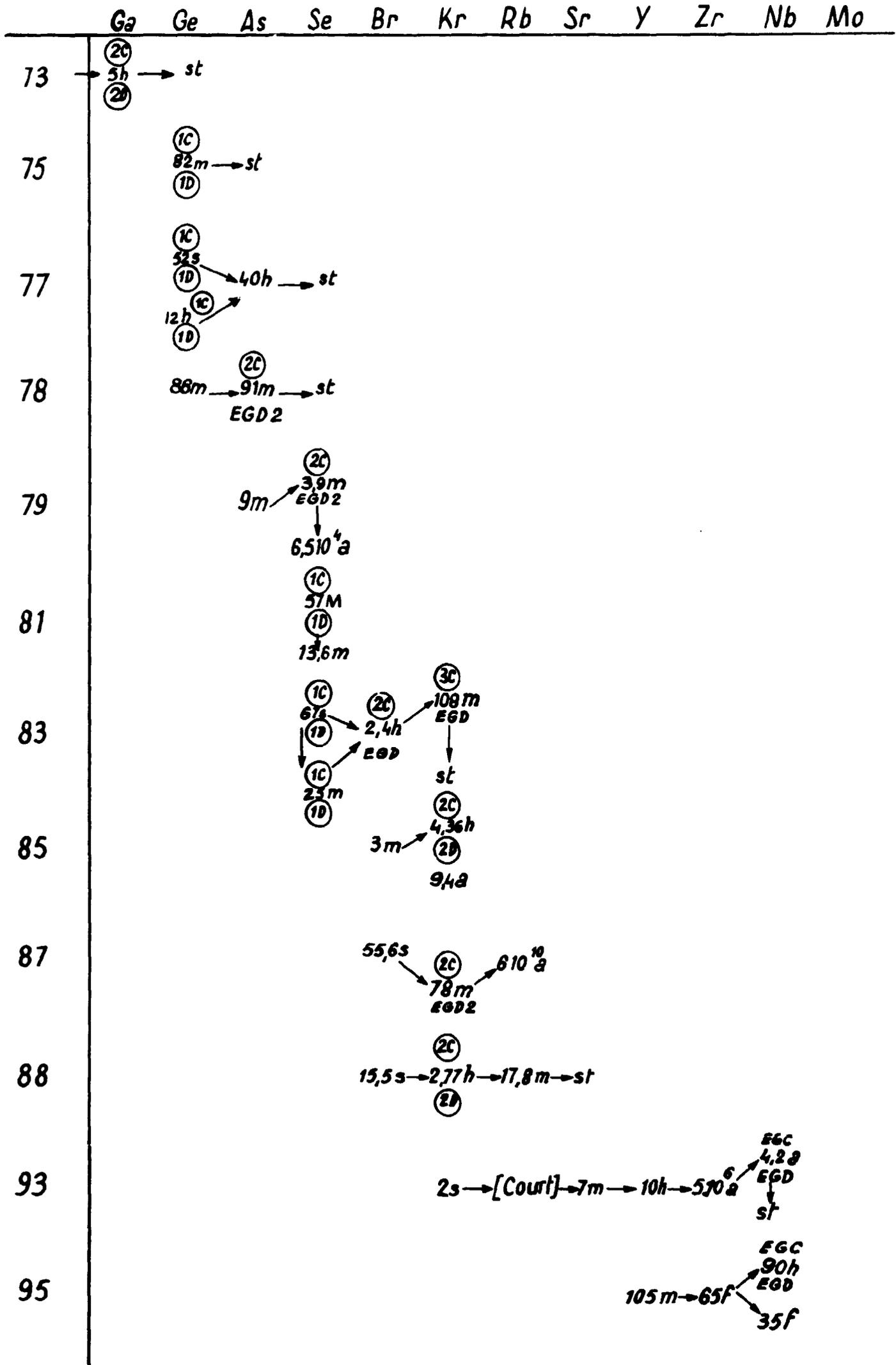


Figure 1A

Nb Mo Tc Rv Rh Pd Ag Cd In Sn Sb Te

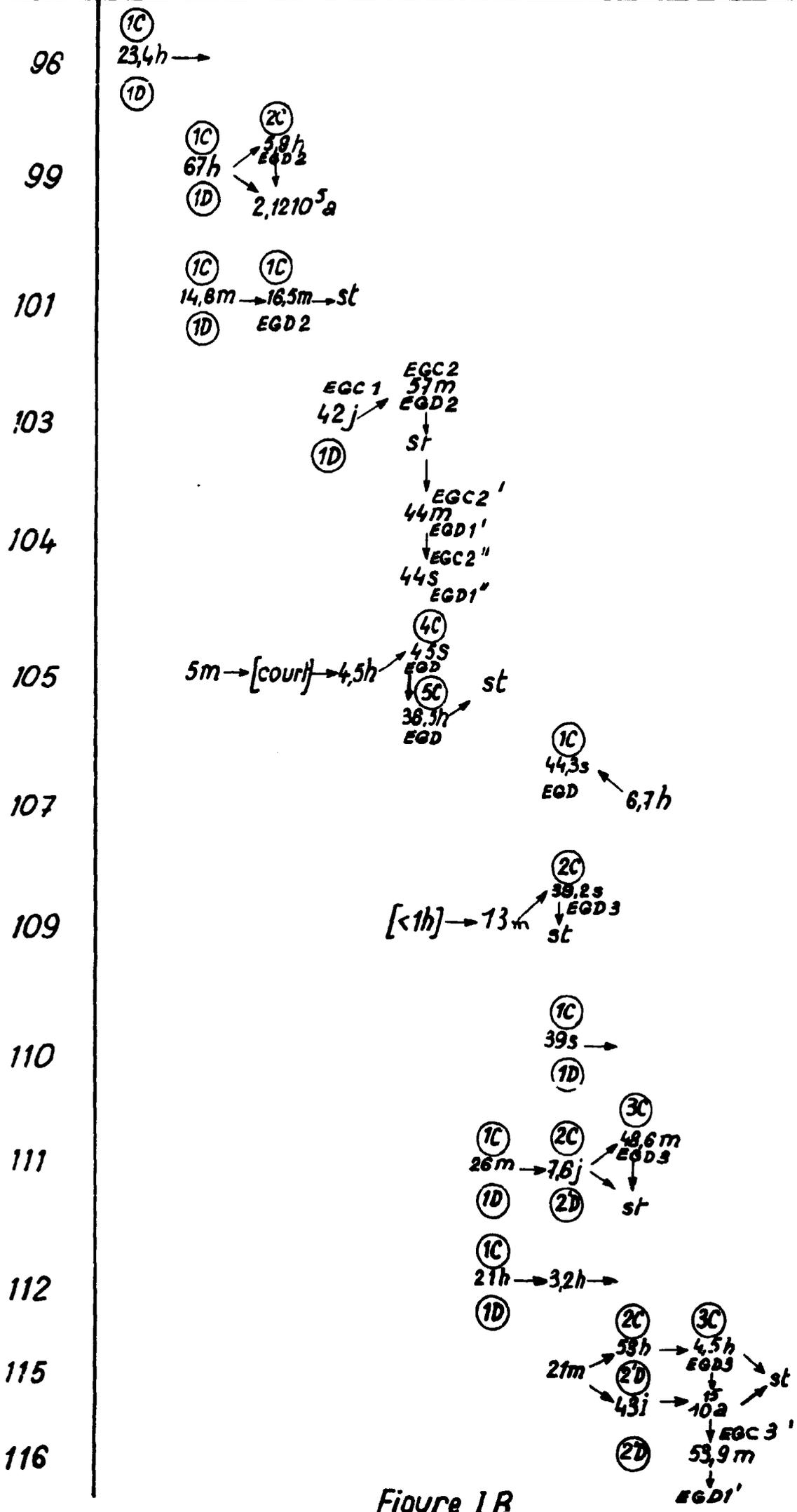


Figure 1 R

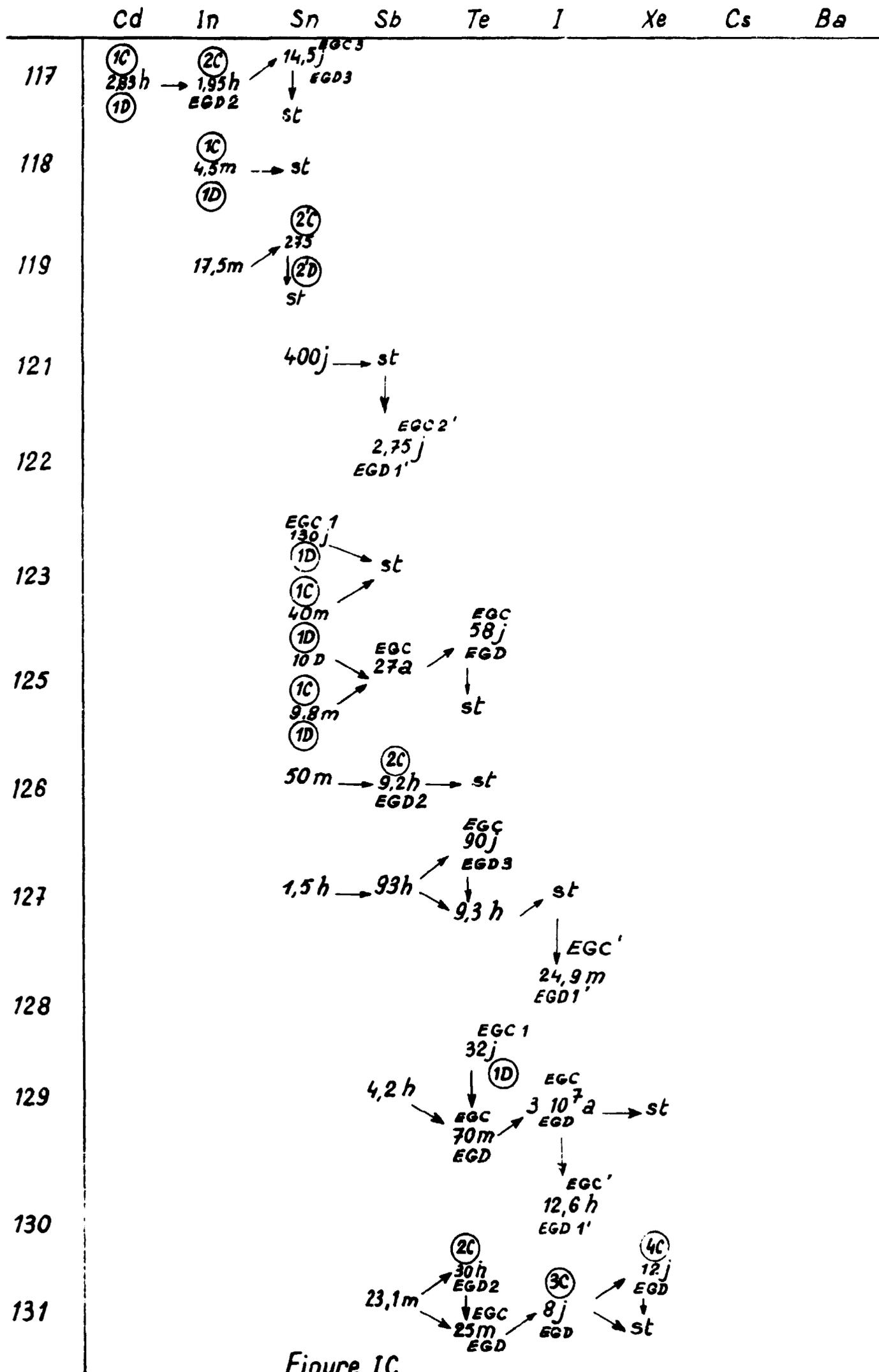


Figure 1C

Sb Te I Xe Cs Ba La Ce Pr Nd Pm Sm Eu

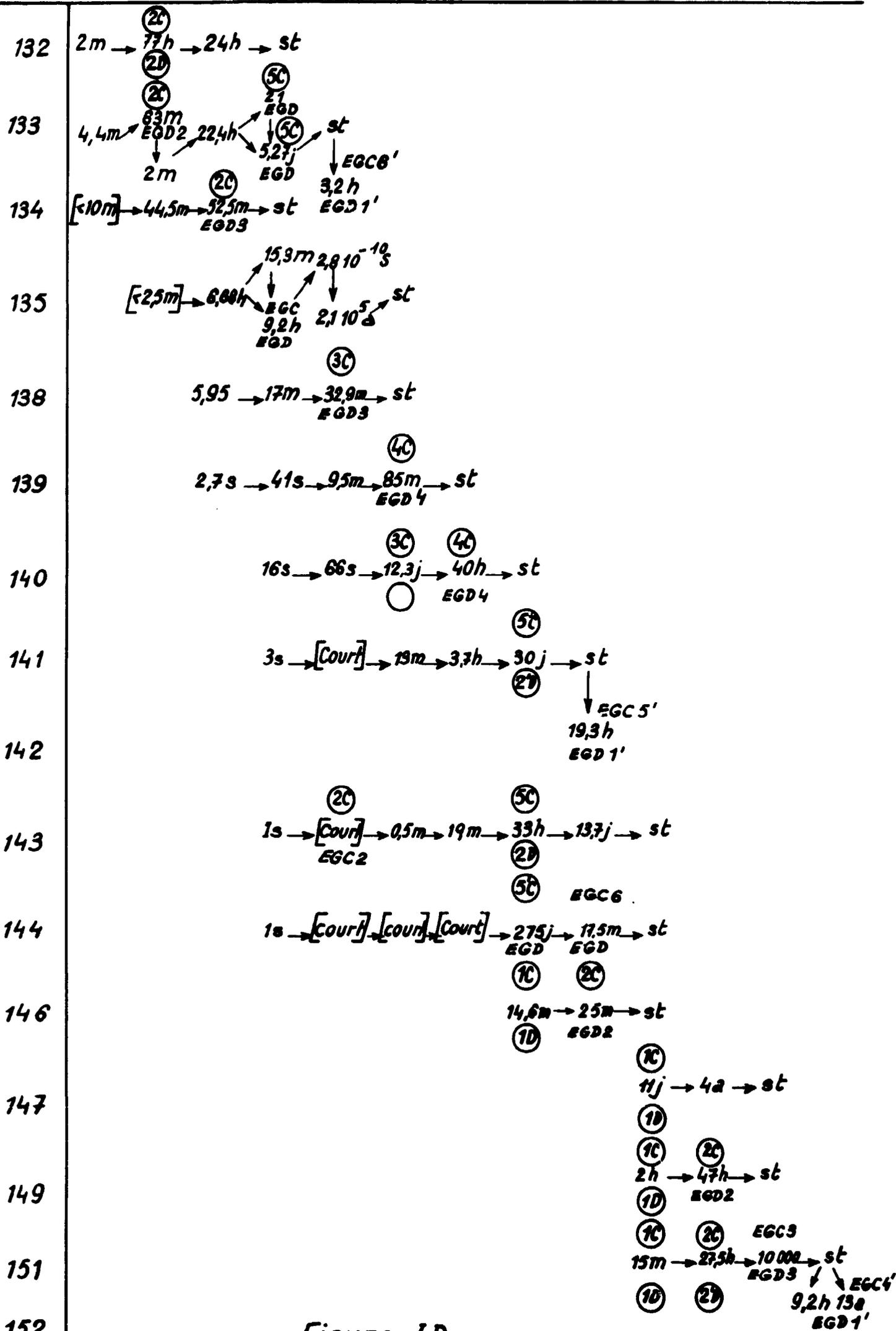


Figure 1D

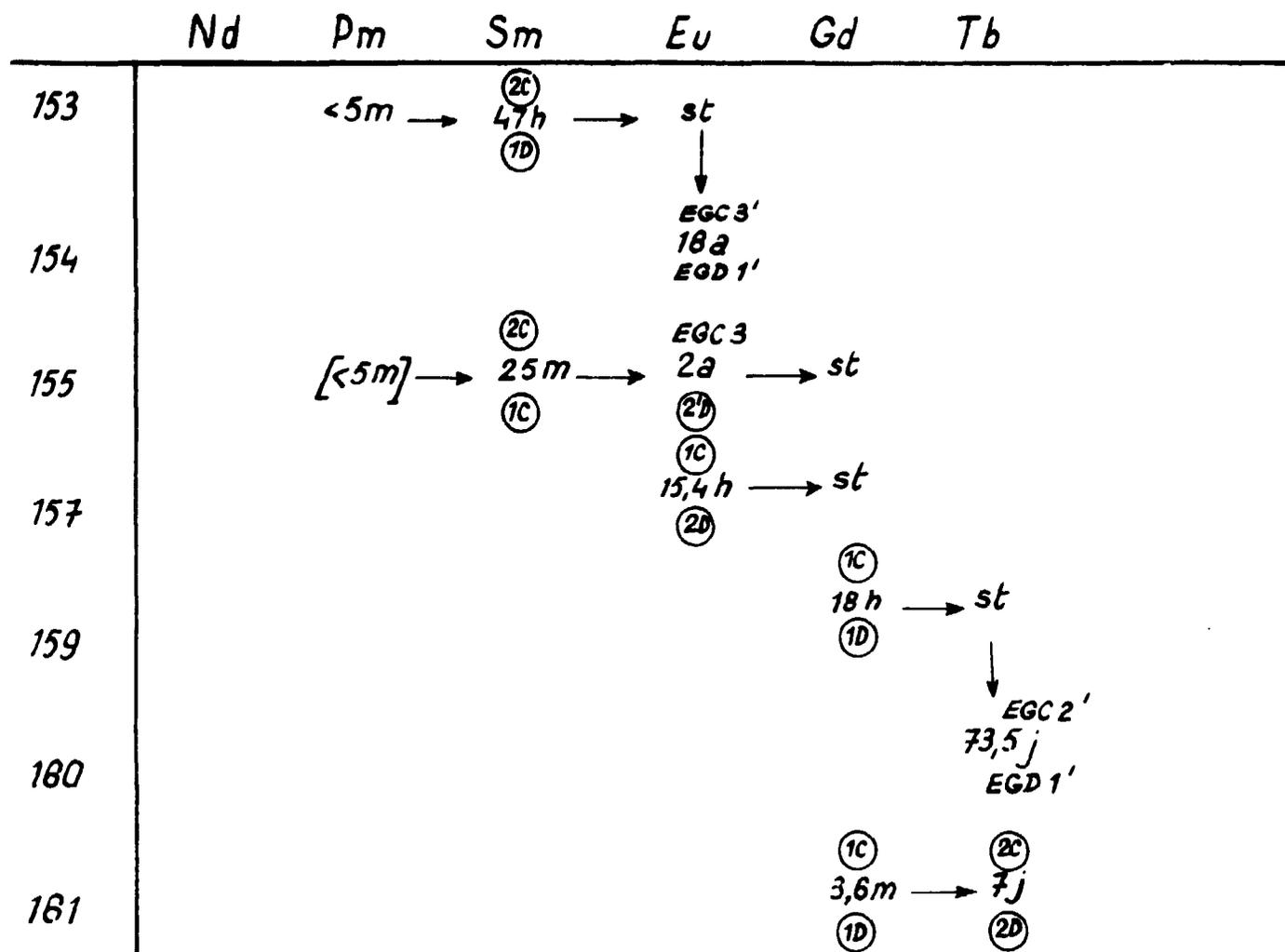


Figure 1E

T = 100 jours

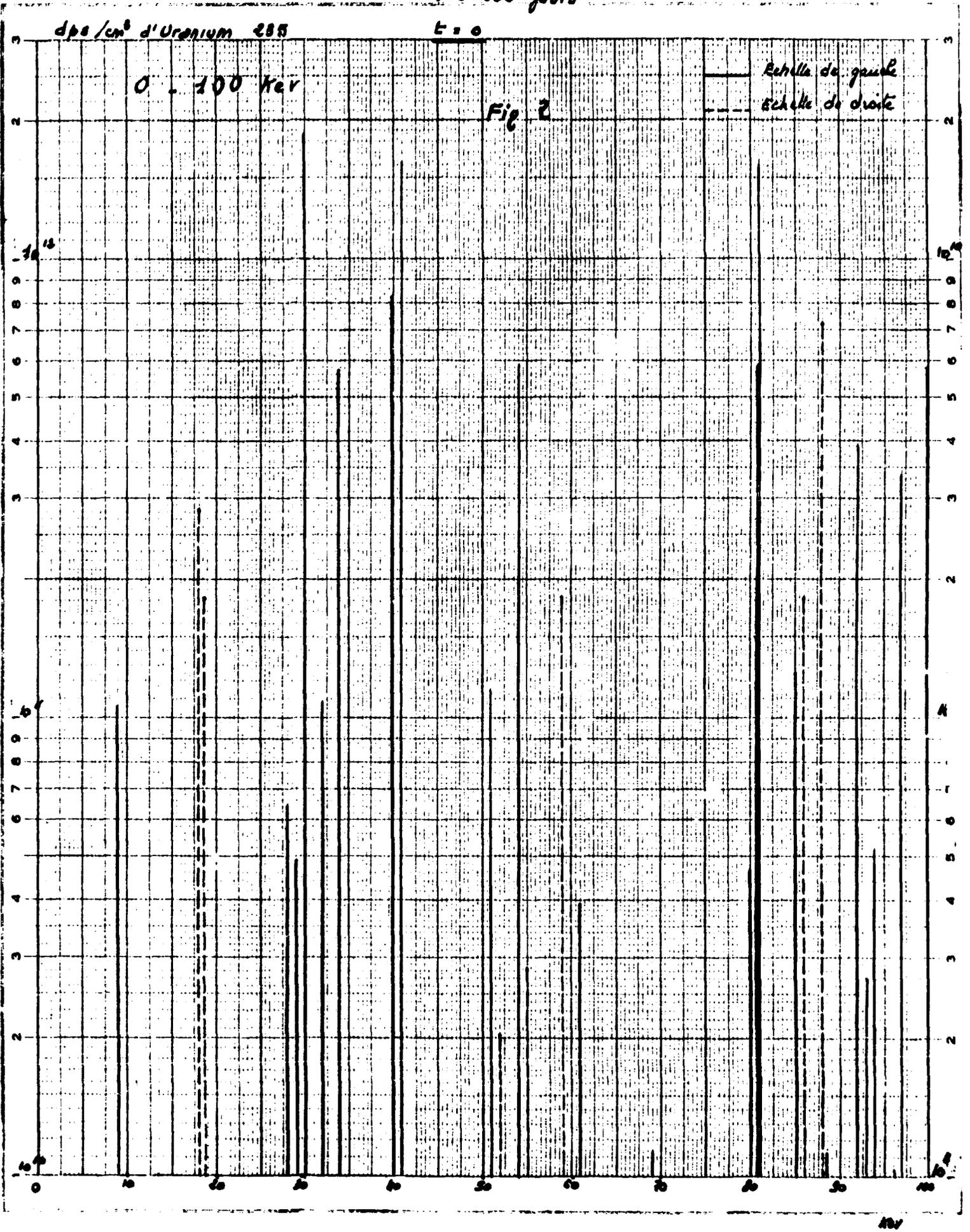
dps/cm² d'Uranium 235

t = 0

0 - 100 KeV

Fig 2

— Echelle de gauche
- - - Echelle de droite



T = 200 jours

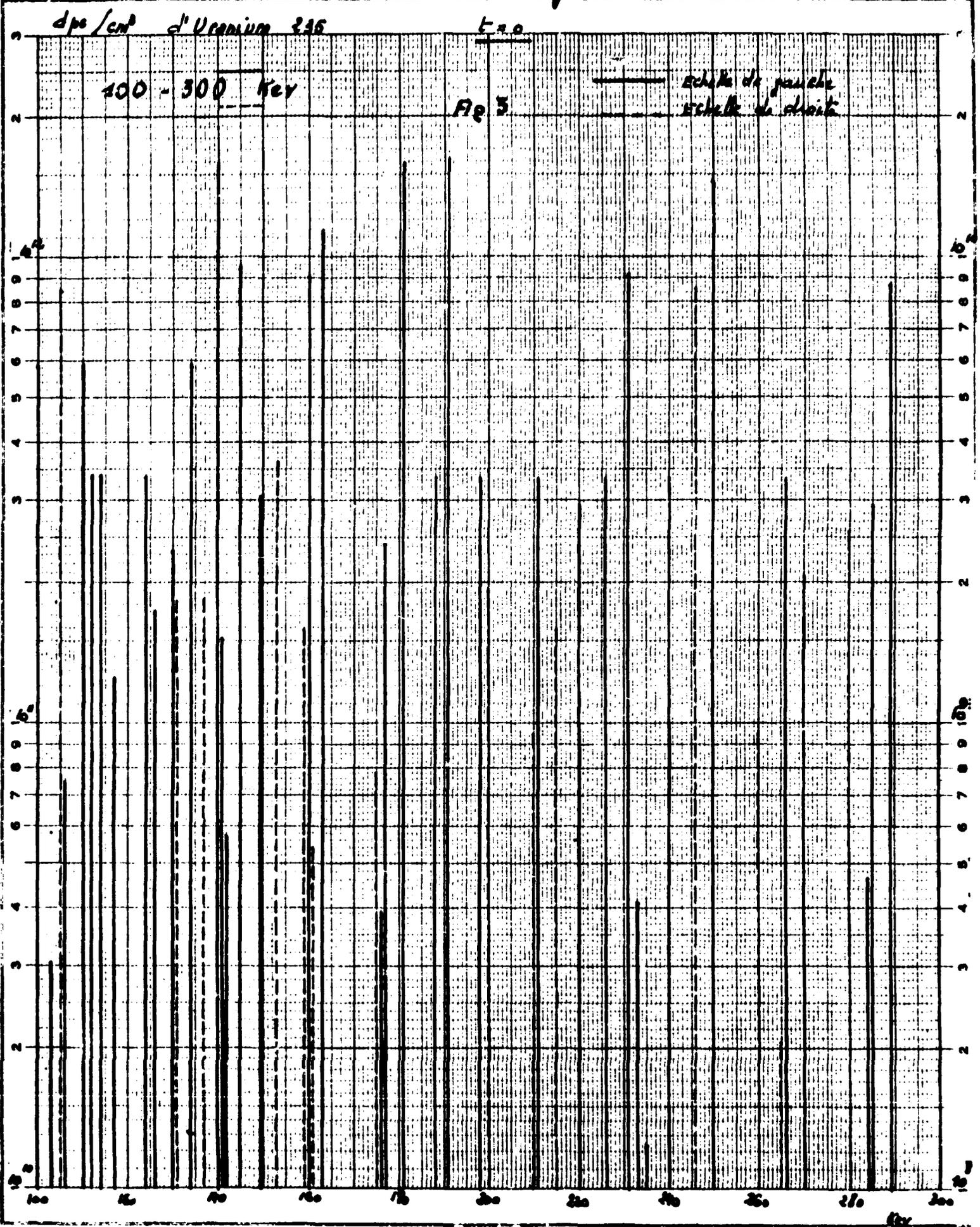
dps/cm² d'Uranium 235

t = 0

100 - 300 KeV

Fig 3

— Echelle de gauche
- - - Echelle de droite



T = 200 jours

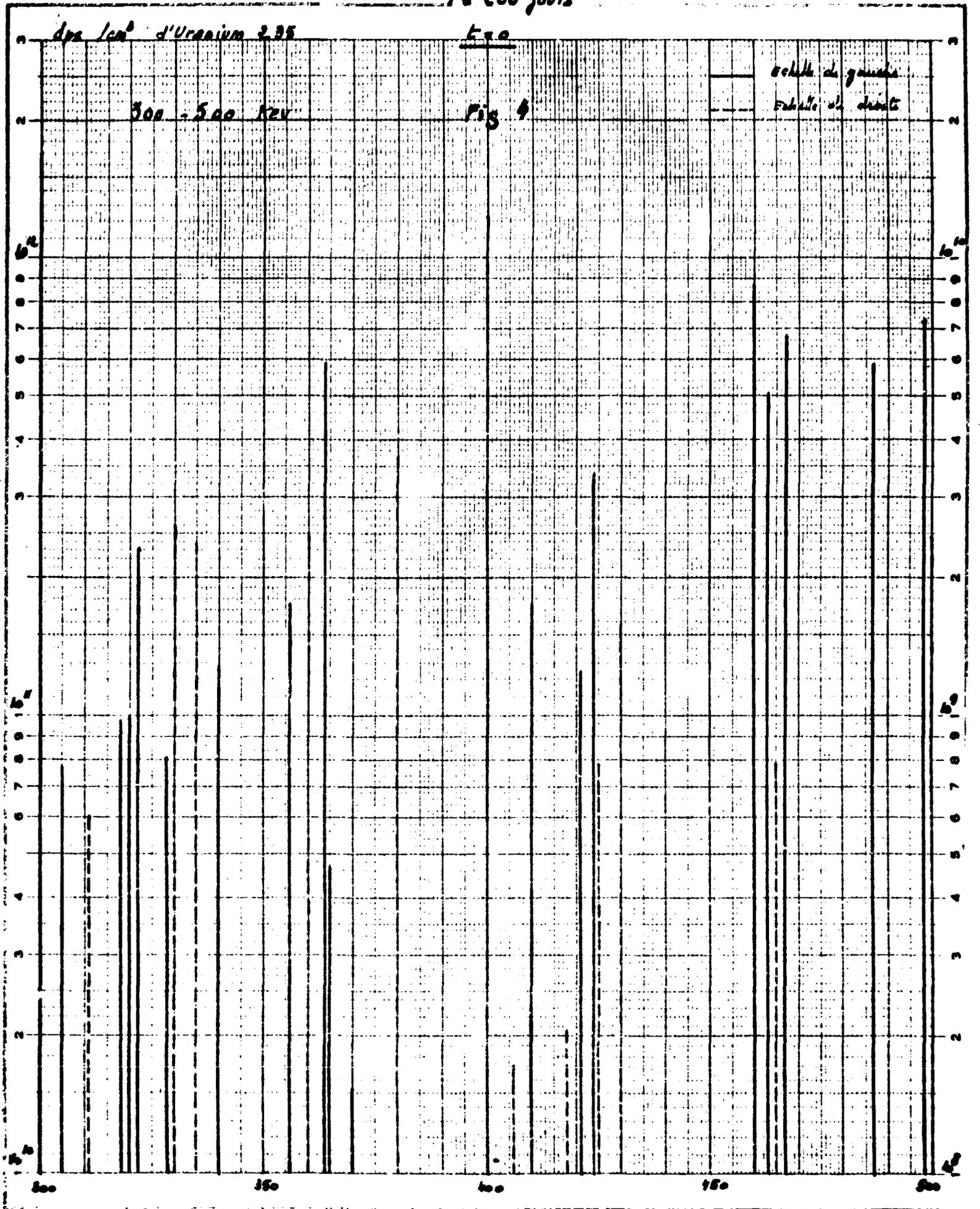
dos 1cm² d'Uranium 235

E_γ

300 - 500 KeV

Fig 4

échelle de gauche
Echelle de droite



$T = 300$ jours

dpa / cm² d'Uranium 235

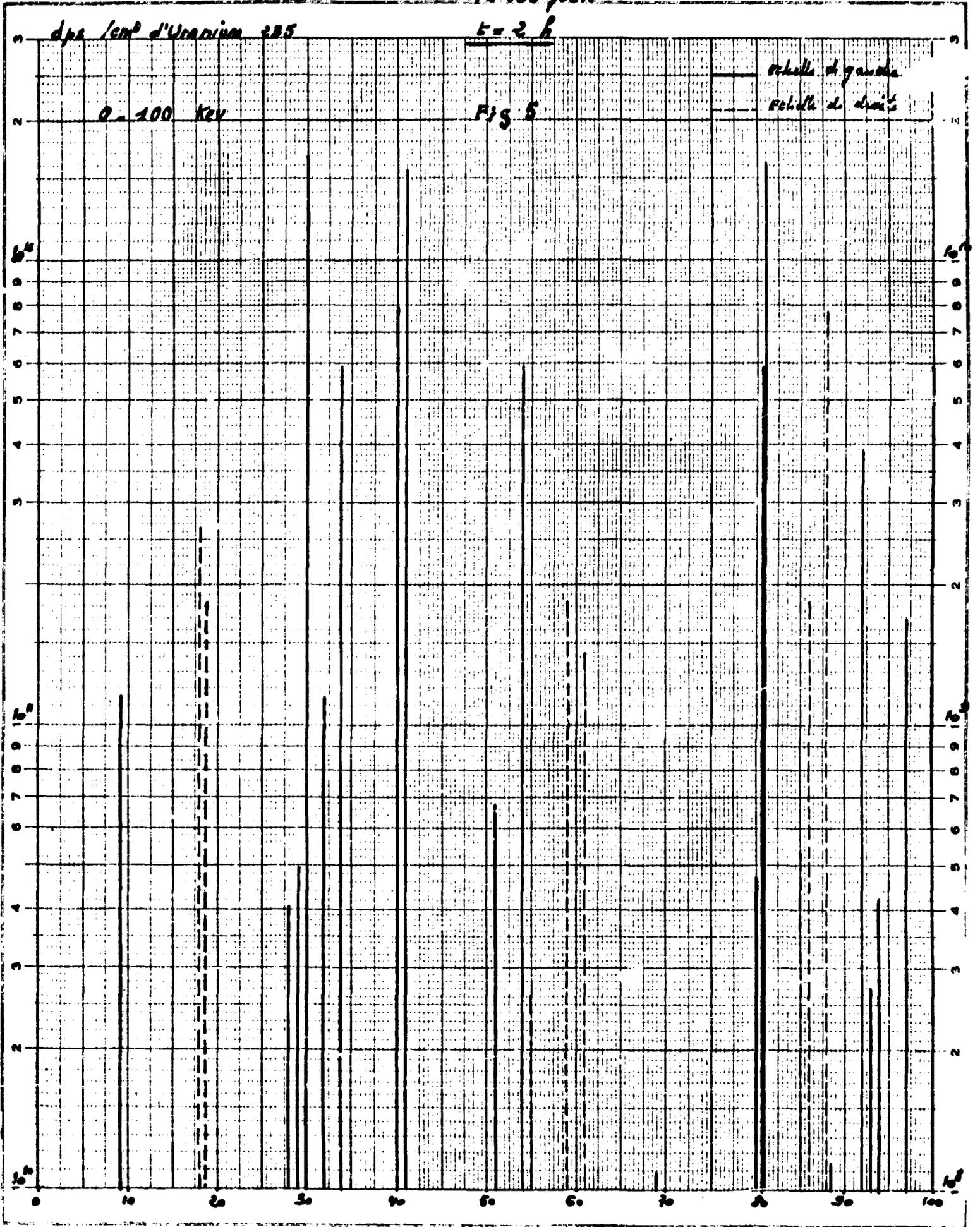
$E = 2$ h

0 - 100 KeV

Fig 5

échelle de gauche

échelle de droite



T = 300 jours

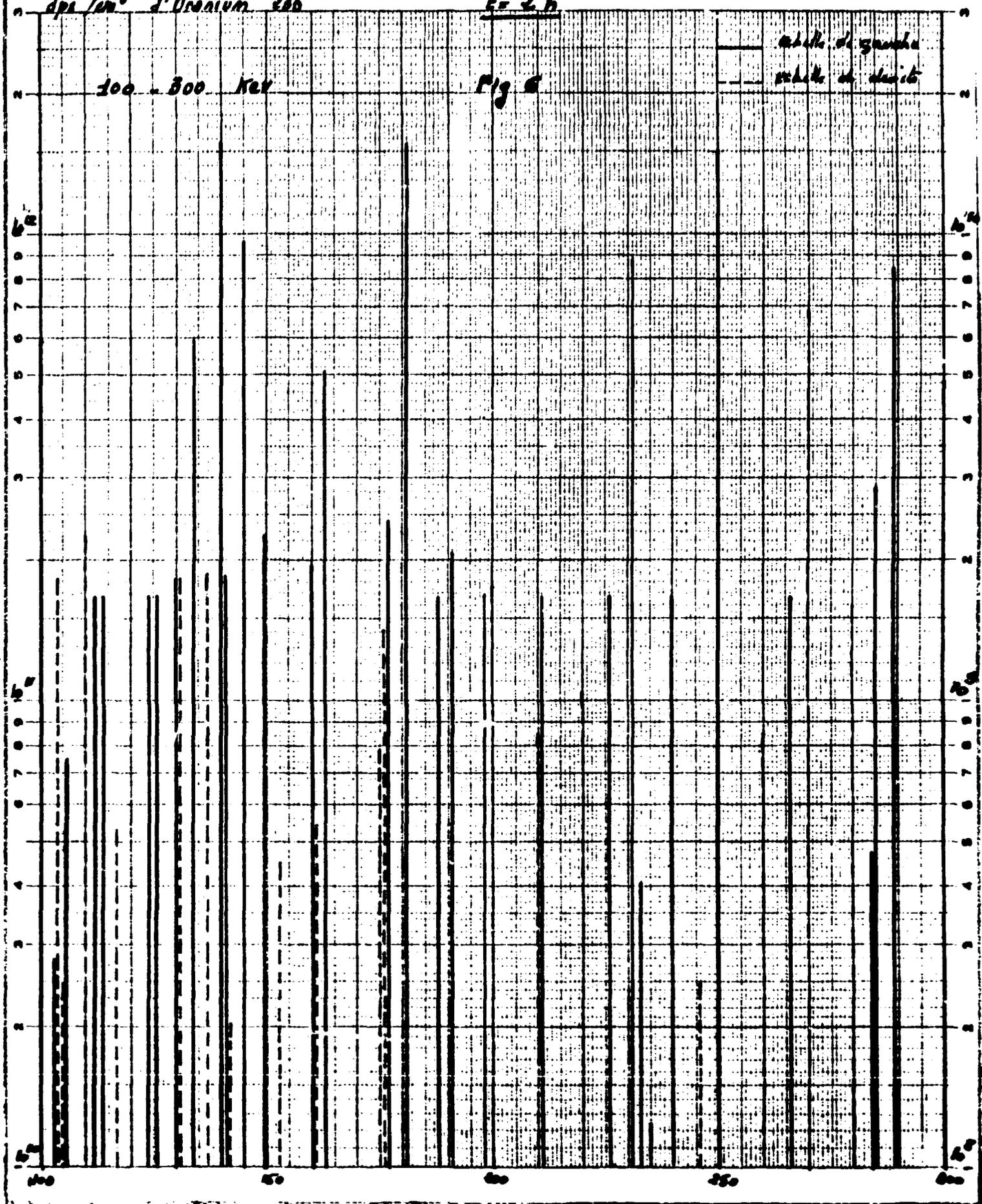
dps/cm² d'Uranium 235

t = 2 h

100 - 300 KeV

Fig 6

———— pile de gauche
- - - - - pile de droite



Tm 200 jours

dps/cm² d'Uranium 235

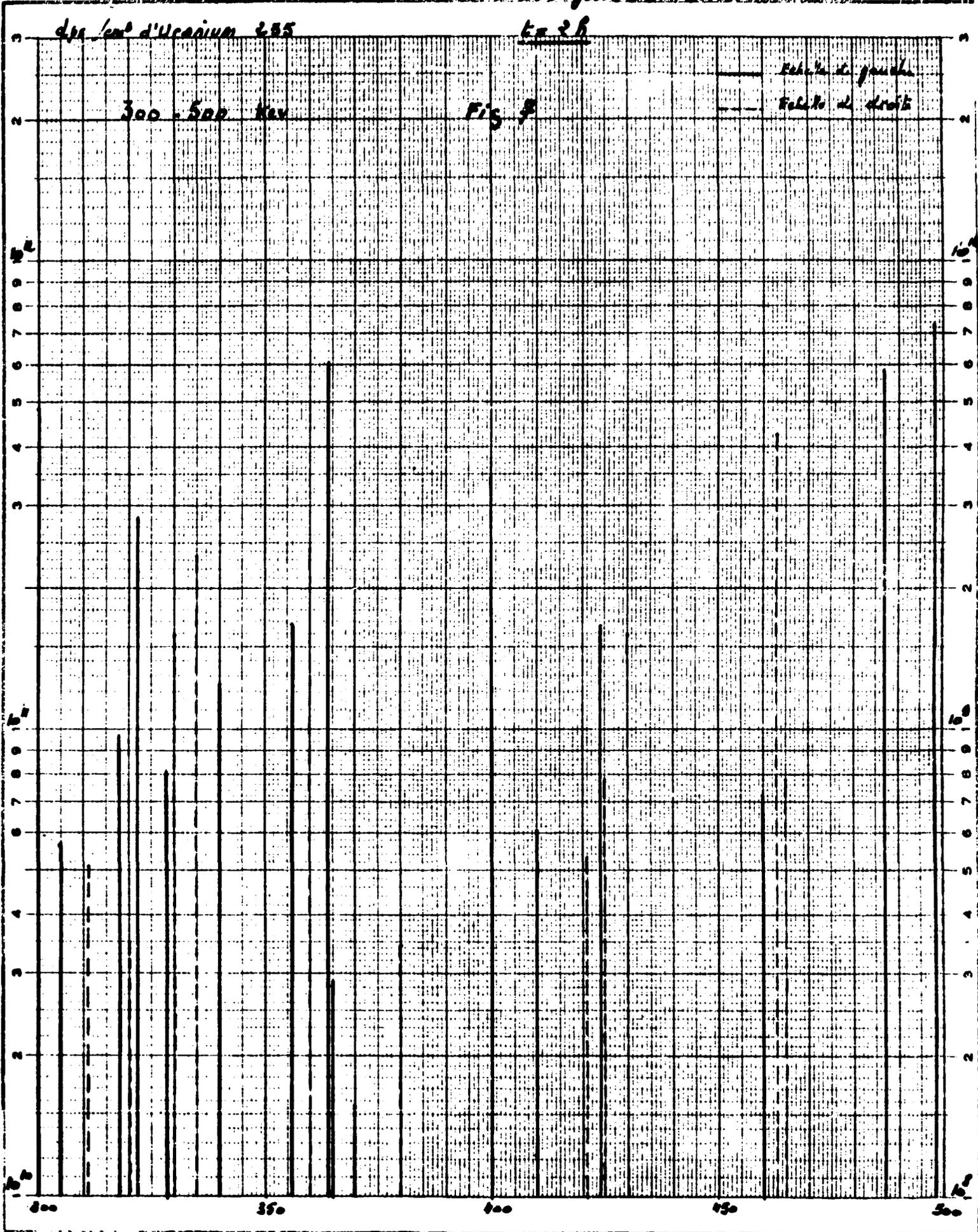
Ln 2h

300 - 500 kev

Fig 3

Échelle de gauche

Échelle de droite



$T = 200 \text{ jours}$

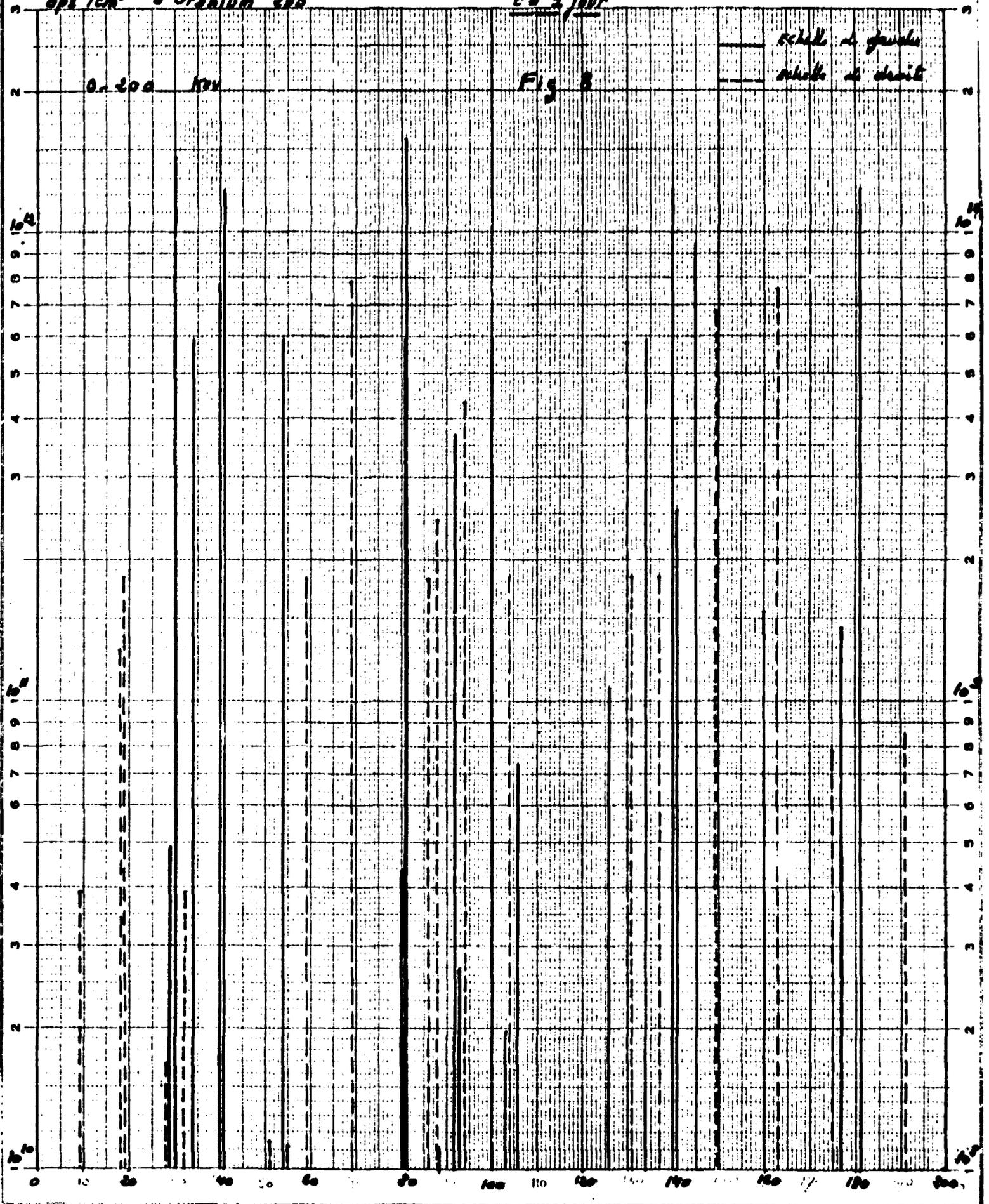
$t = 1 \text{ jour}$

dps/cm² d'Uranium 235

0.200 keV

Fig 8

schell et gauche
droite et droit



T = 200 jours

dpa/cm² d'Uranium 235

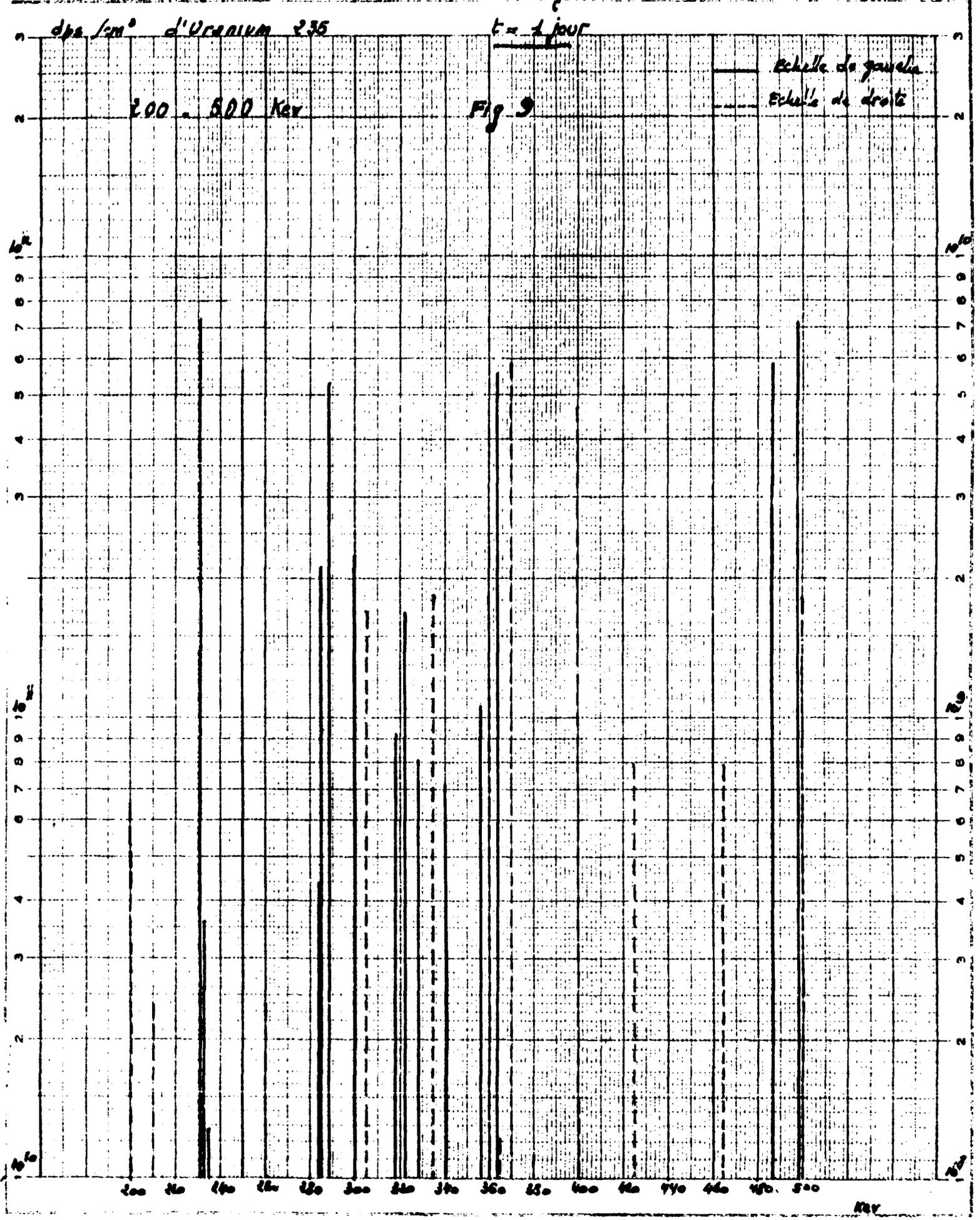
t = 1 jour

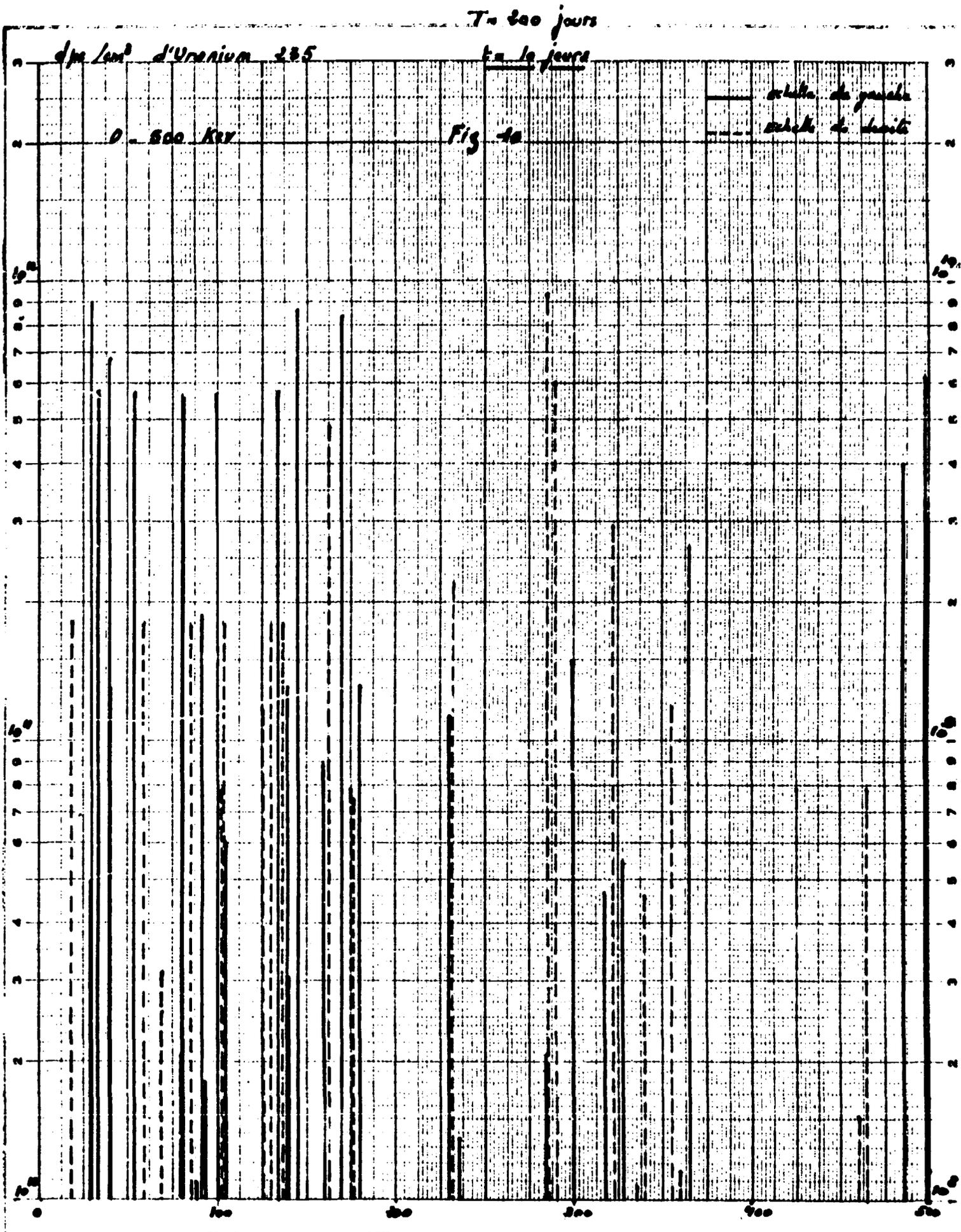
200 - 500 Kev

Fig 9

Echelle de gauche

Echelle de droite





T = 200 jours

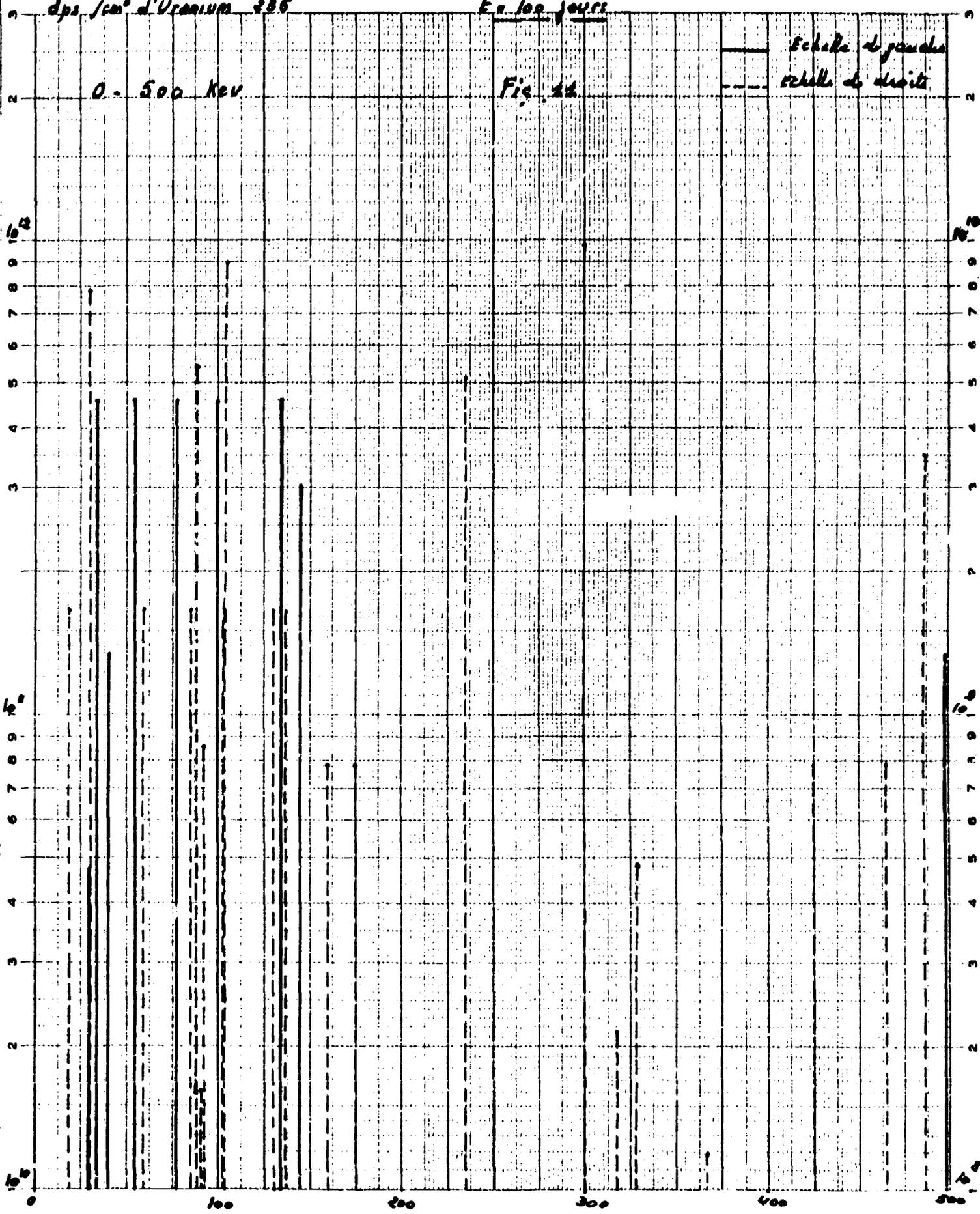
dps / cm² d'Uranium 235

Ex. 100 jours

0 - 500 KeV

Fig. 14

Echelle de gauche
Echelle de droite



$T = 10^6$ s

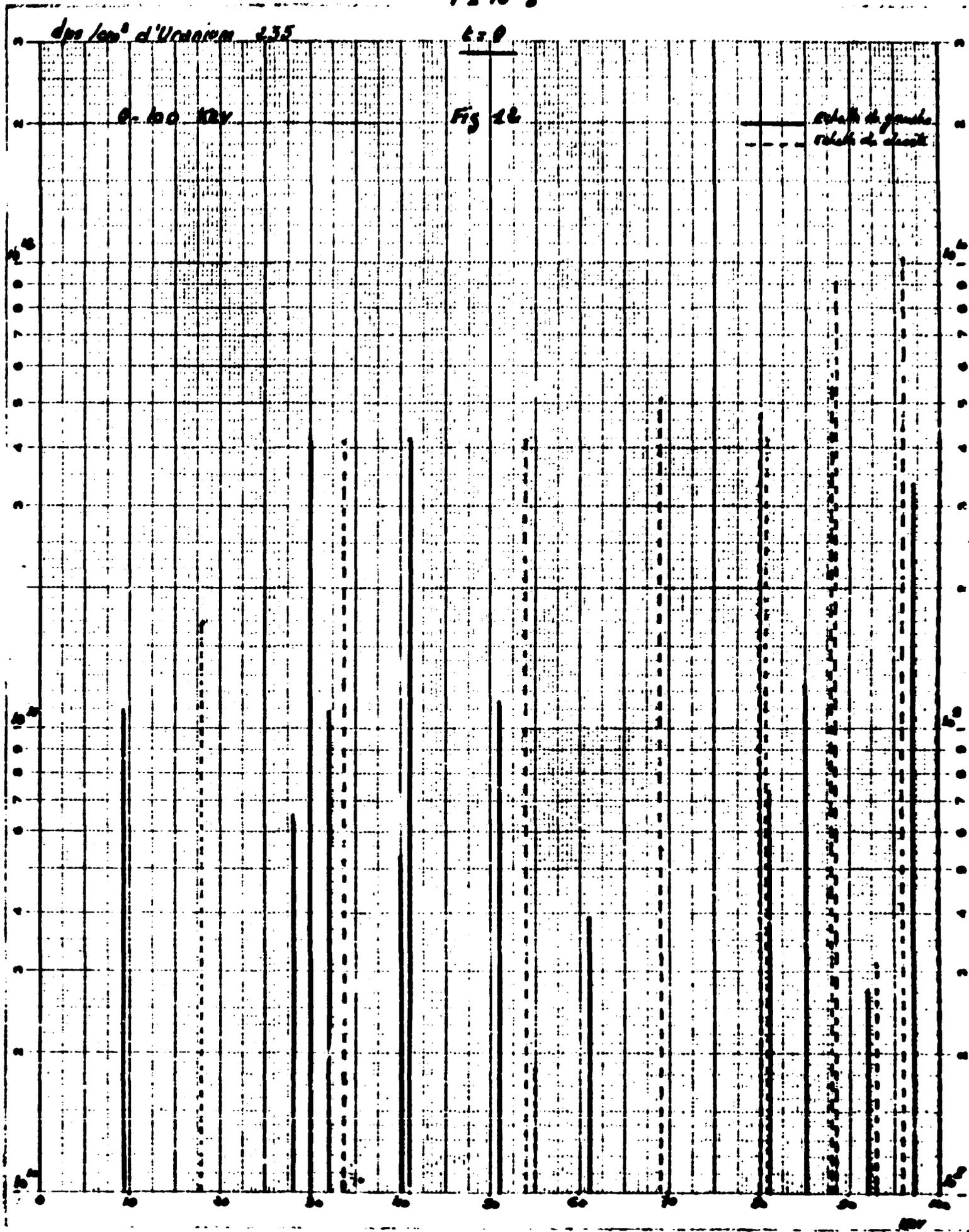
dps/cm² d'Uranium 235

$t = 0$

0-100 Kev

Fig 22

relati de gauche
relati de droite



$T = 10^5$

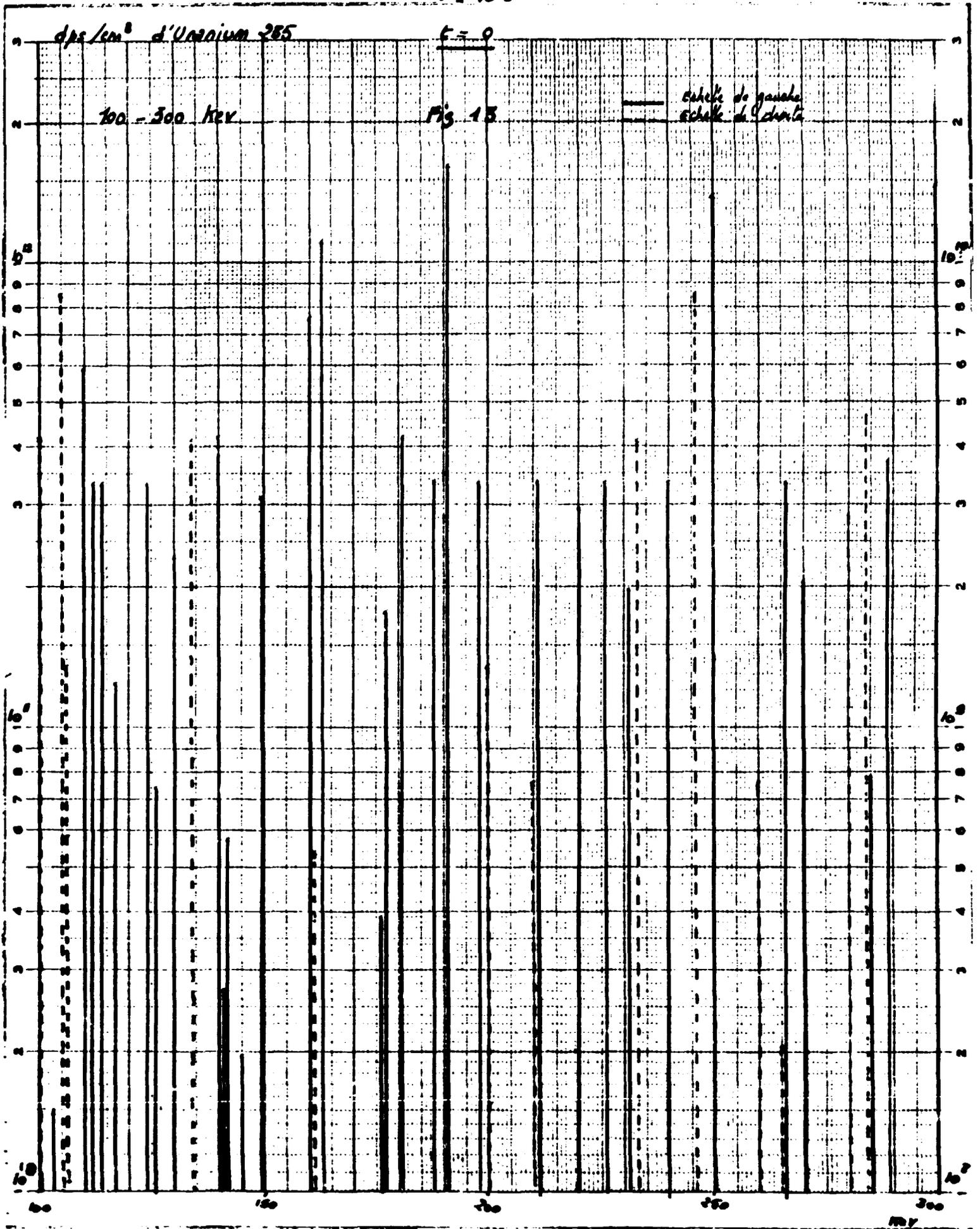
dps/cm² d'Uranium 235

$t = 0$

100 - 300 keV

Fig. 13

échelle de gauche
échelle de droite



$T = 10^5$

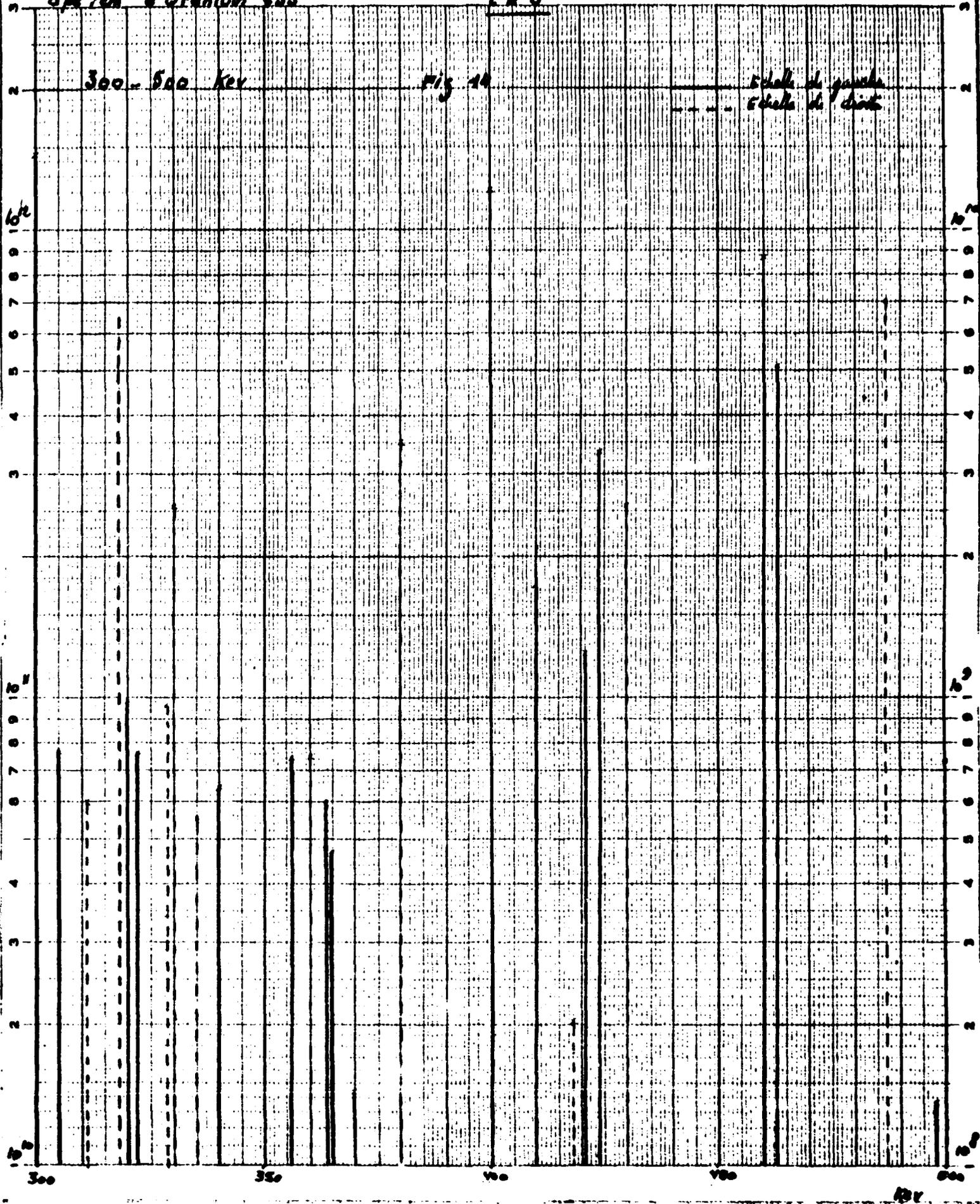
dps/cm² d'Uranium 235

$E = 9$

300 - 500 KeV

Fig. 14

échelle de gauche
échelle de droite



$T = 10^6$

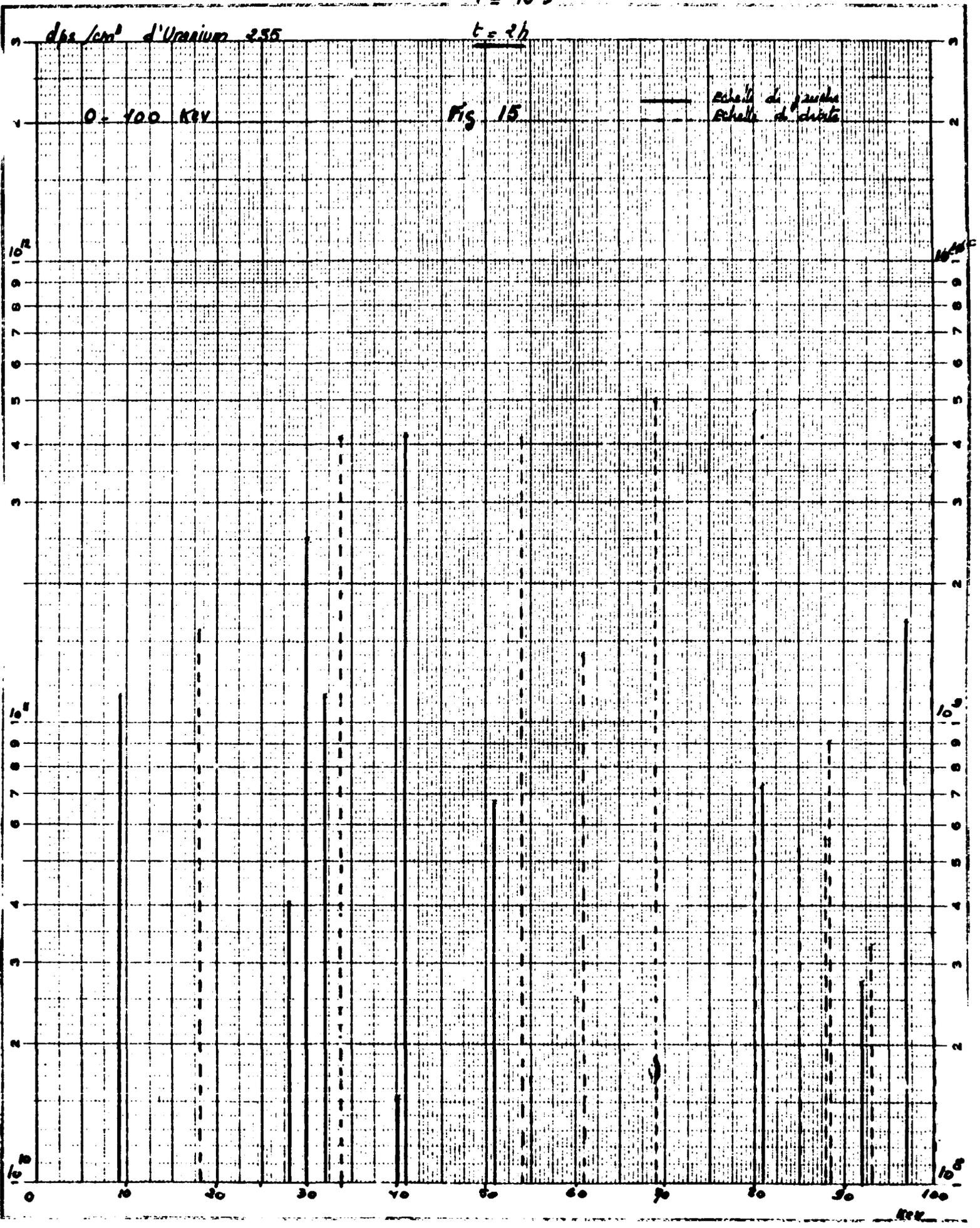
$t = 2h$

d_{235} / cm^2 d'Uranium 235

0 - 100 KeV

Fig 15

— Schelli di jessha
- - - Schelli di ditata



$T = 10^6$

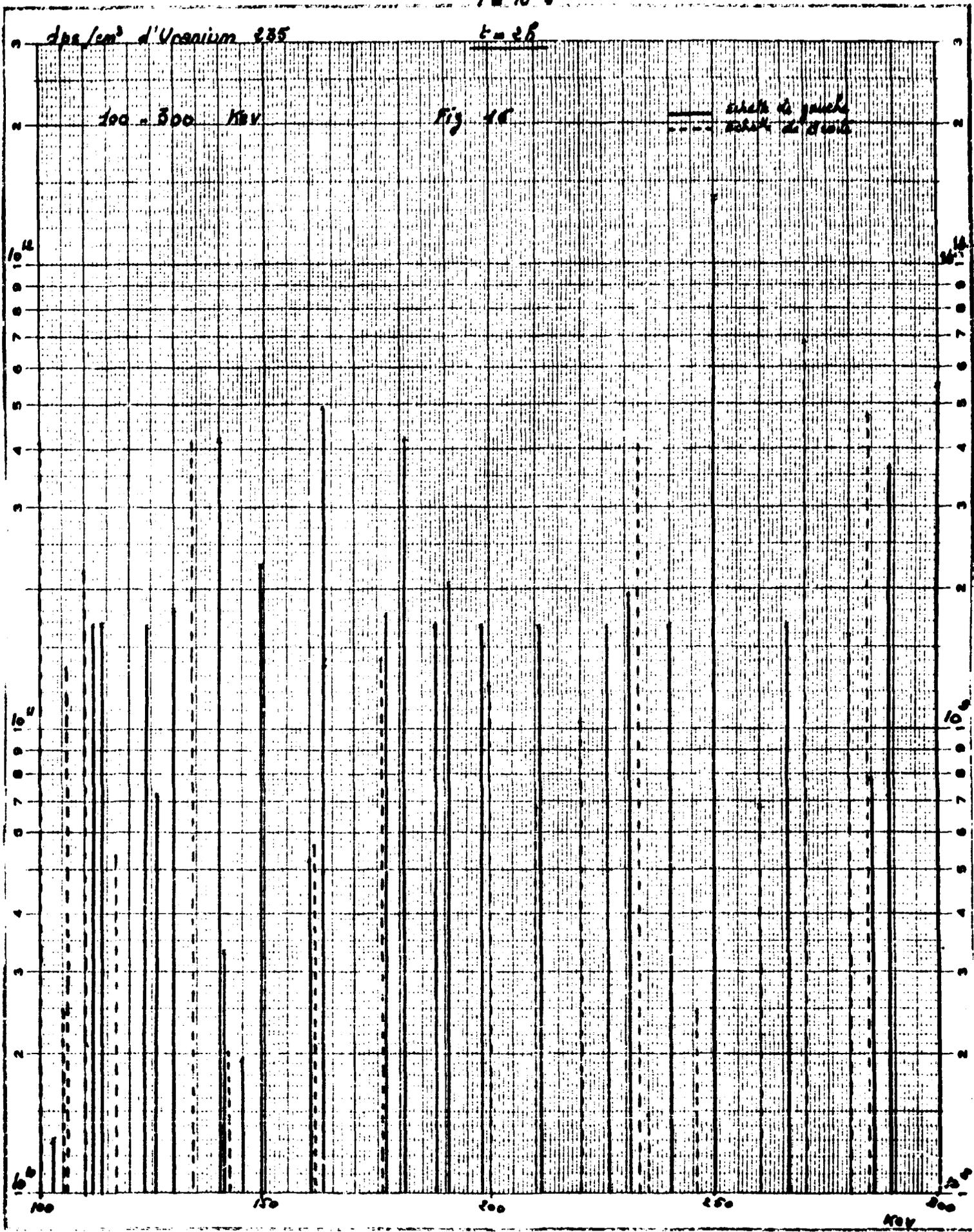
$t = 26$

1 cm² d'Uranium 235

100 - 300 MeV

Fig. 16

----- droite de gauche
----- droite de droite



$$T = 10^6$$

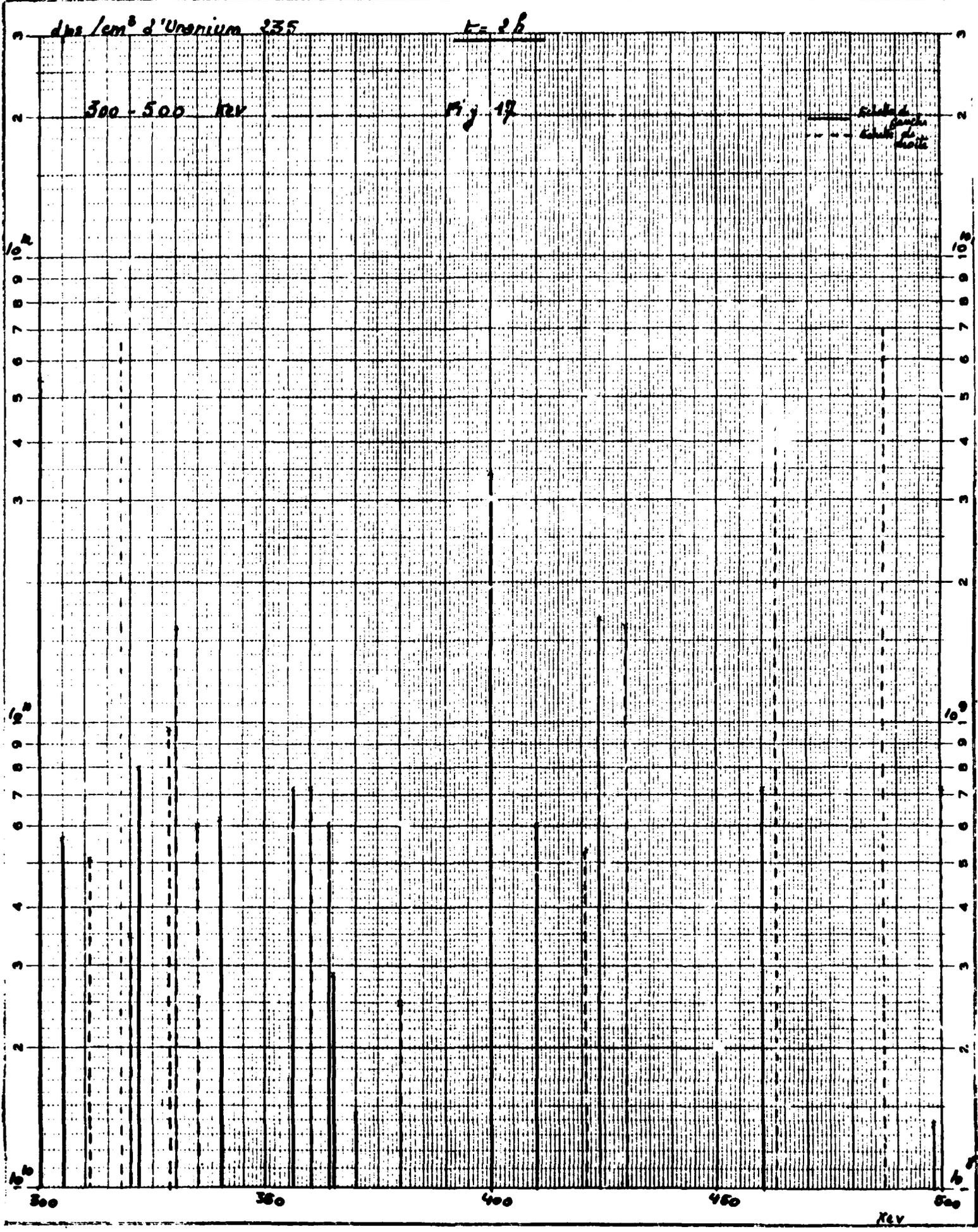
d_{235} / cm^2 d'Uranium 235

$$K = 2.6$$

300 - 500 KeV

Fig 17

filtré de
craquelin
pour
moelle



$T = 10^6$

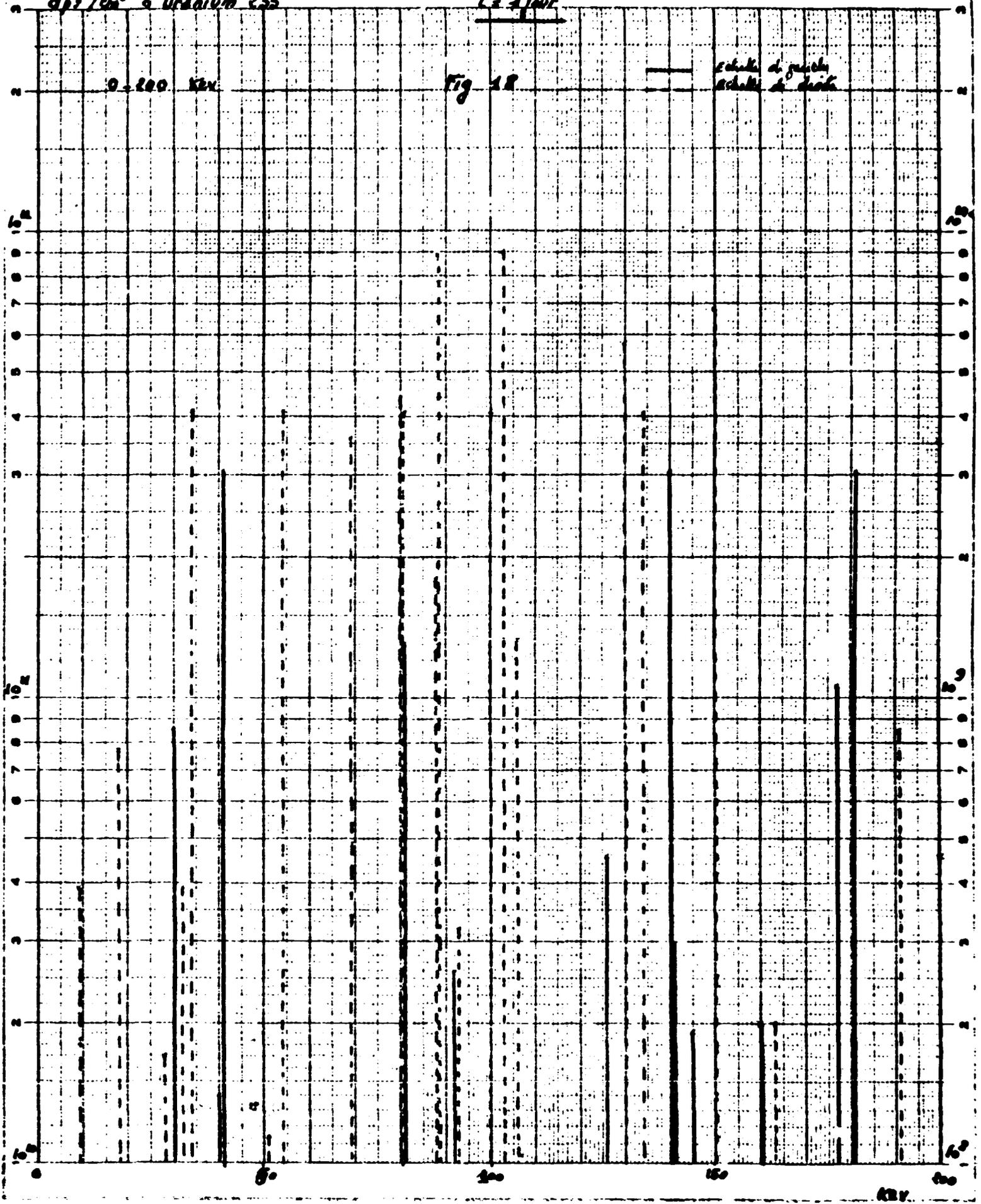
d_{02}/cm^2 d'Uranium 235

$t = 1 \text{ jour}$

0-200 KeV

Fig 18

schéma d'essai
schéma de dépit



$T = 10^5$

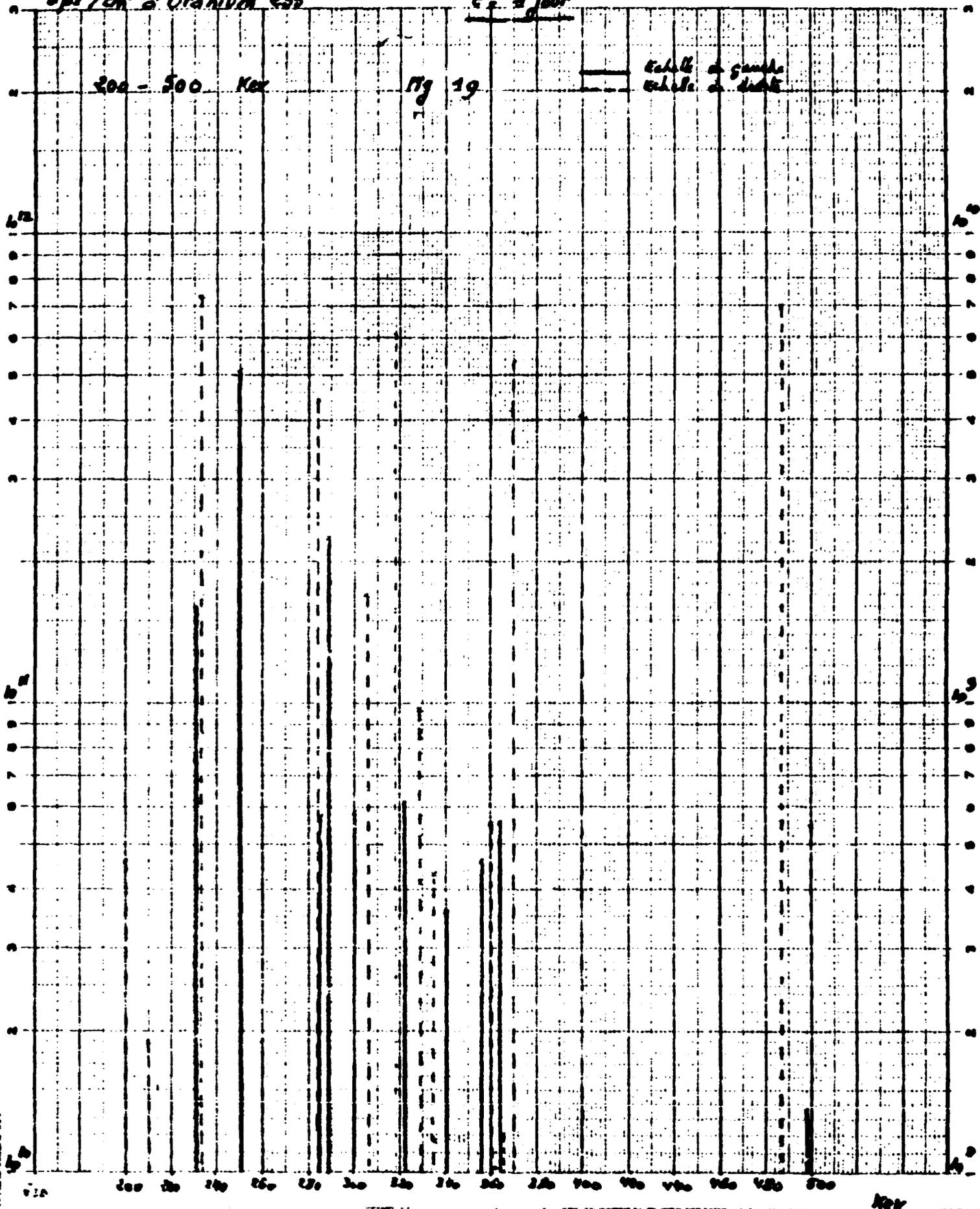
dps/cm² d'Uranium 235

$t = 1 \text{ jour}$

200 - 500 KeV

Fig 19

Table of sands
white & dark



$T = 10^5$

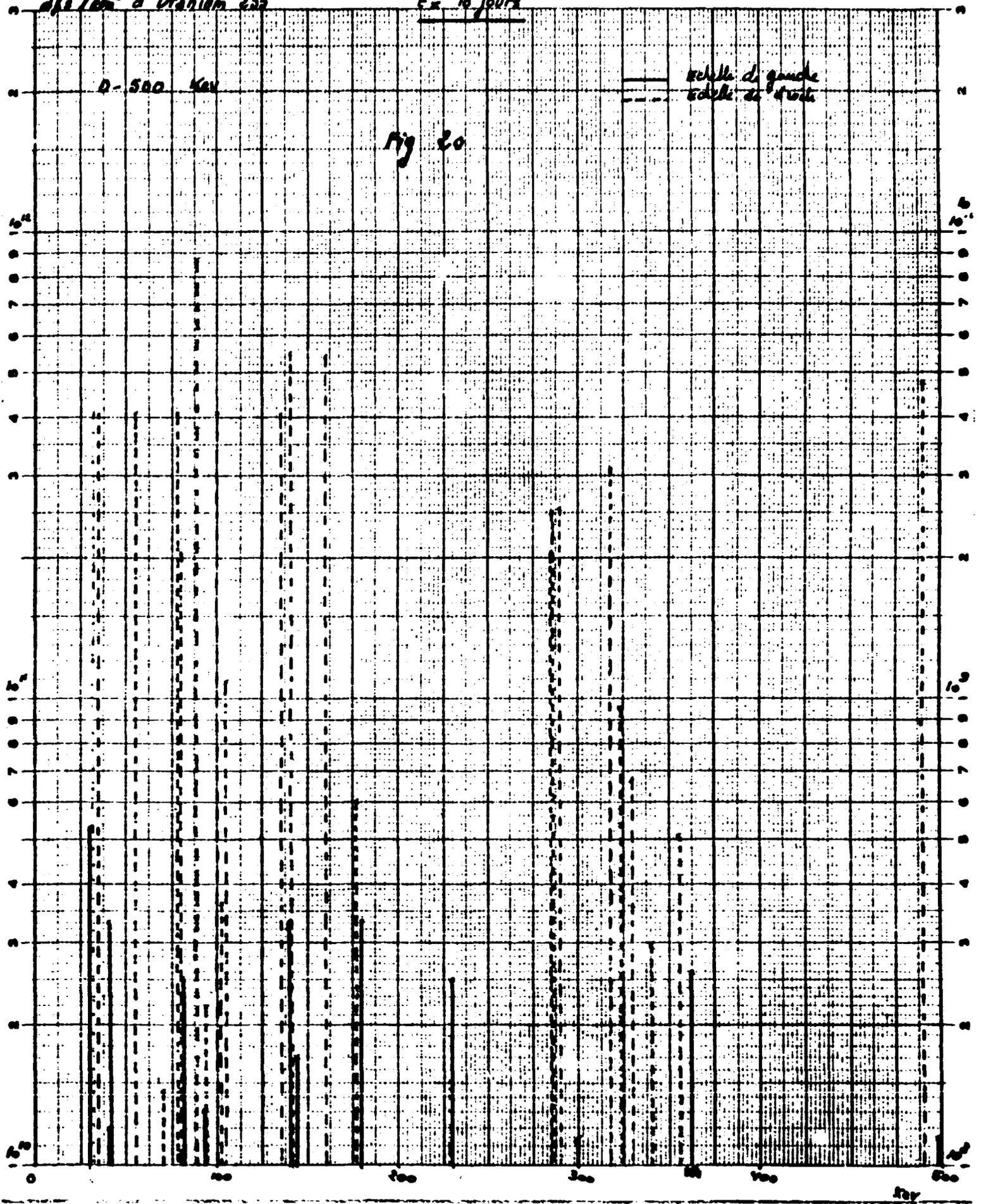
d_{50} / cm^2 d'Uranium 235

$t = 10$ jours

0-500 KeV

— échelle de grande
- - - échelle de petit

Fig 20



6/5

$T = 10^8$

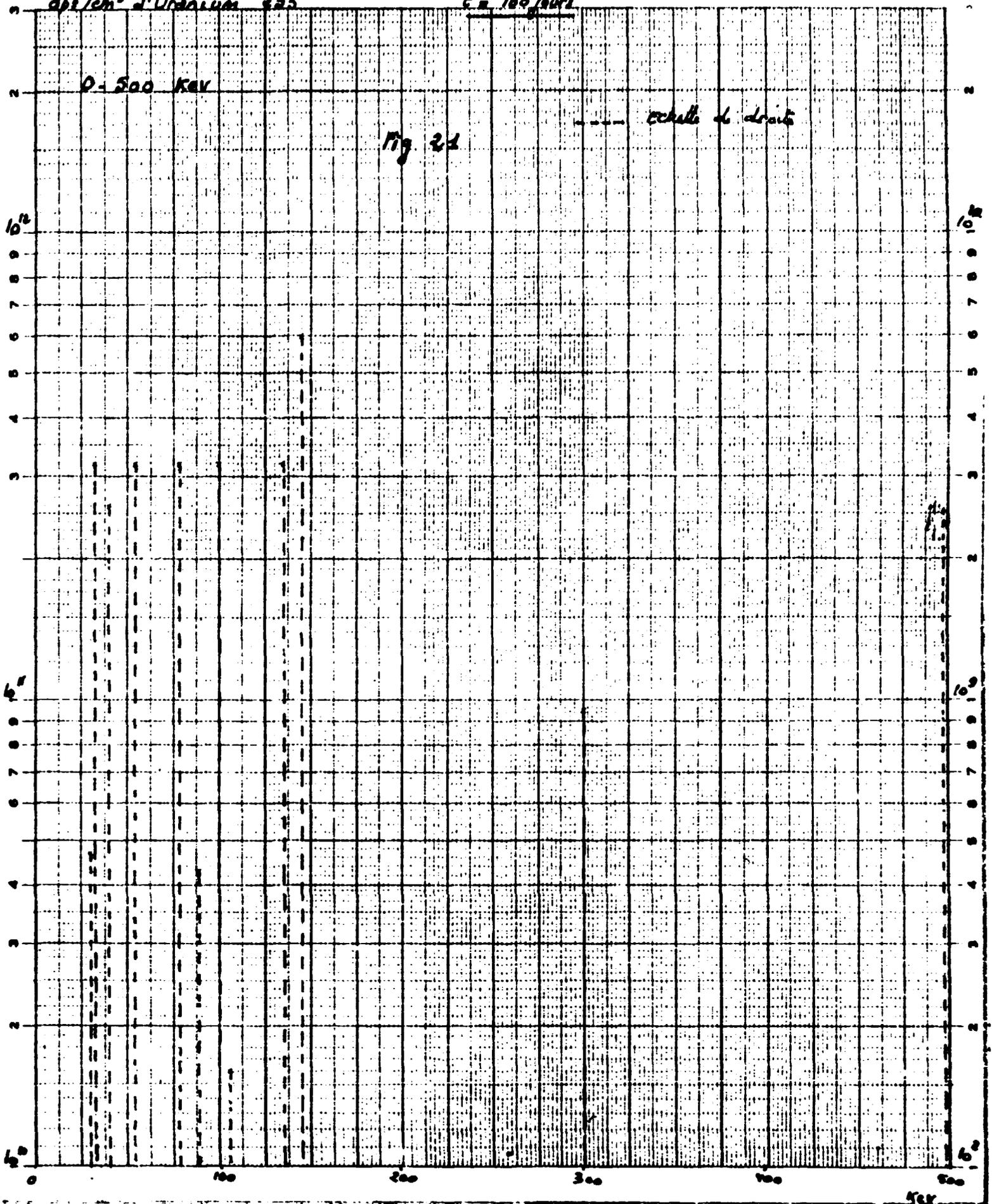
dp/cm² d'Uranium 235

$t = 100$ jours

0-500 KeV

Fig. 21

échelle de droite

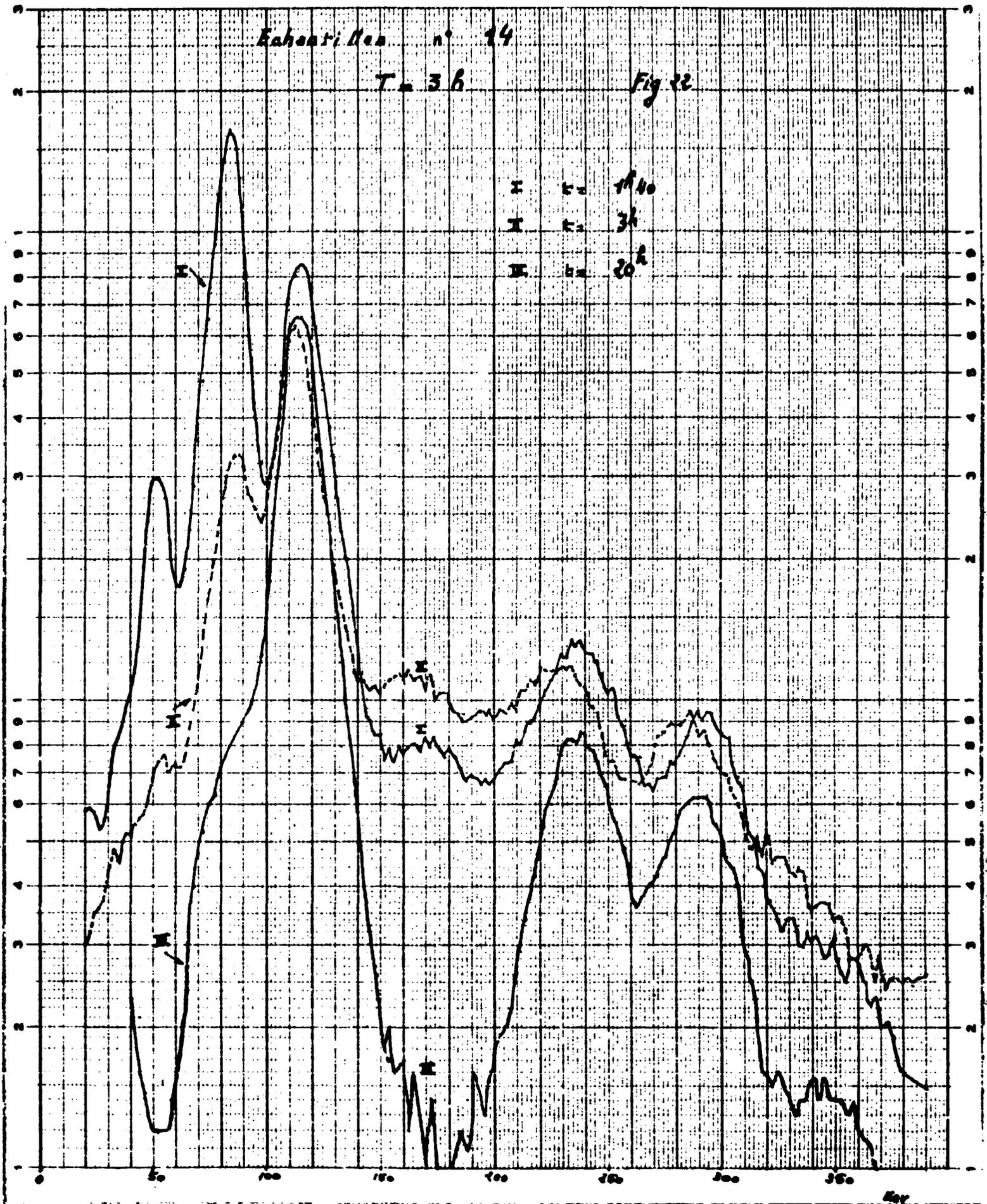


Echantillon n° 14

T = 3.6

Fig 22

I $\epsilon = 140$
II $\epsilon = 34$
III $\epsilon = 20$

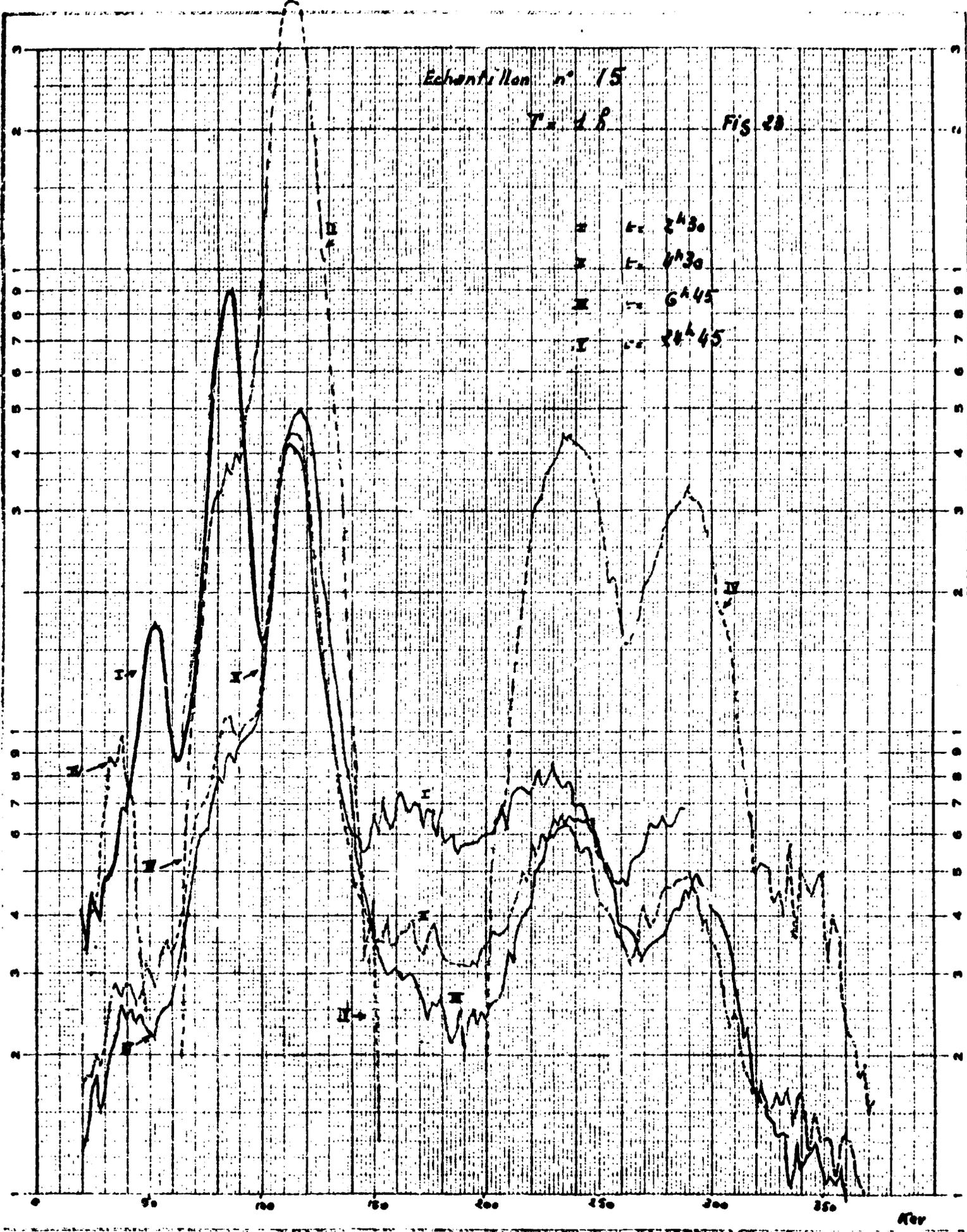


Echantillon n° 15

T = 28

Fig 28

- L₁ 2430
- - - L₂ 2430
- G₁ 45
- - - G₂ 45

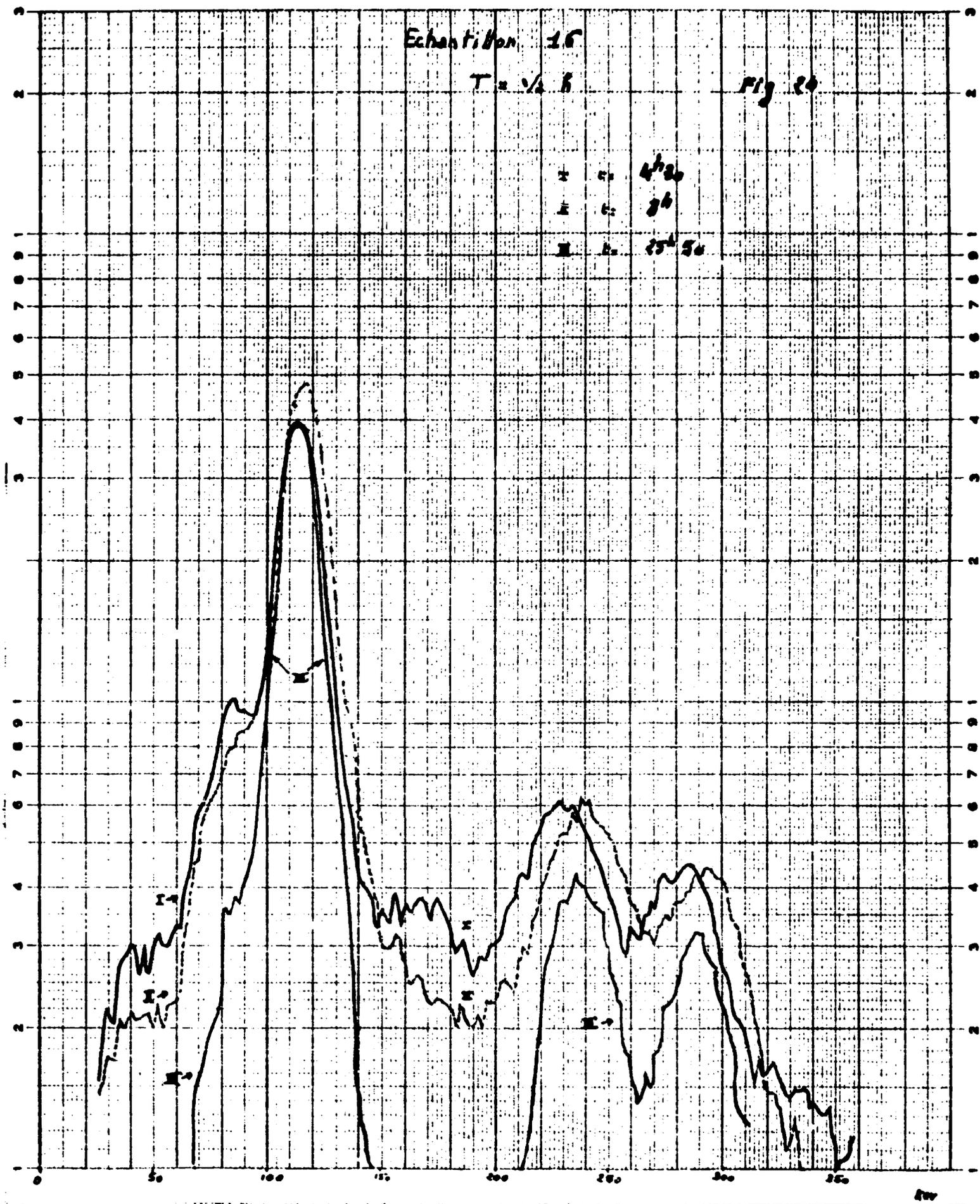


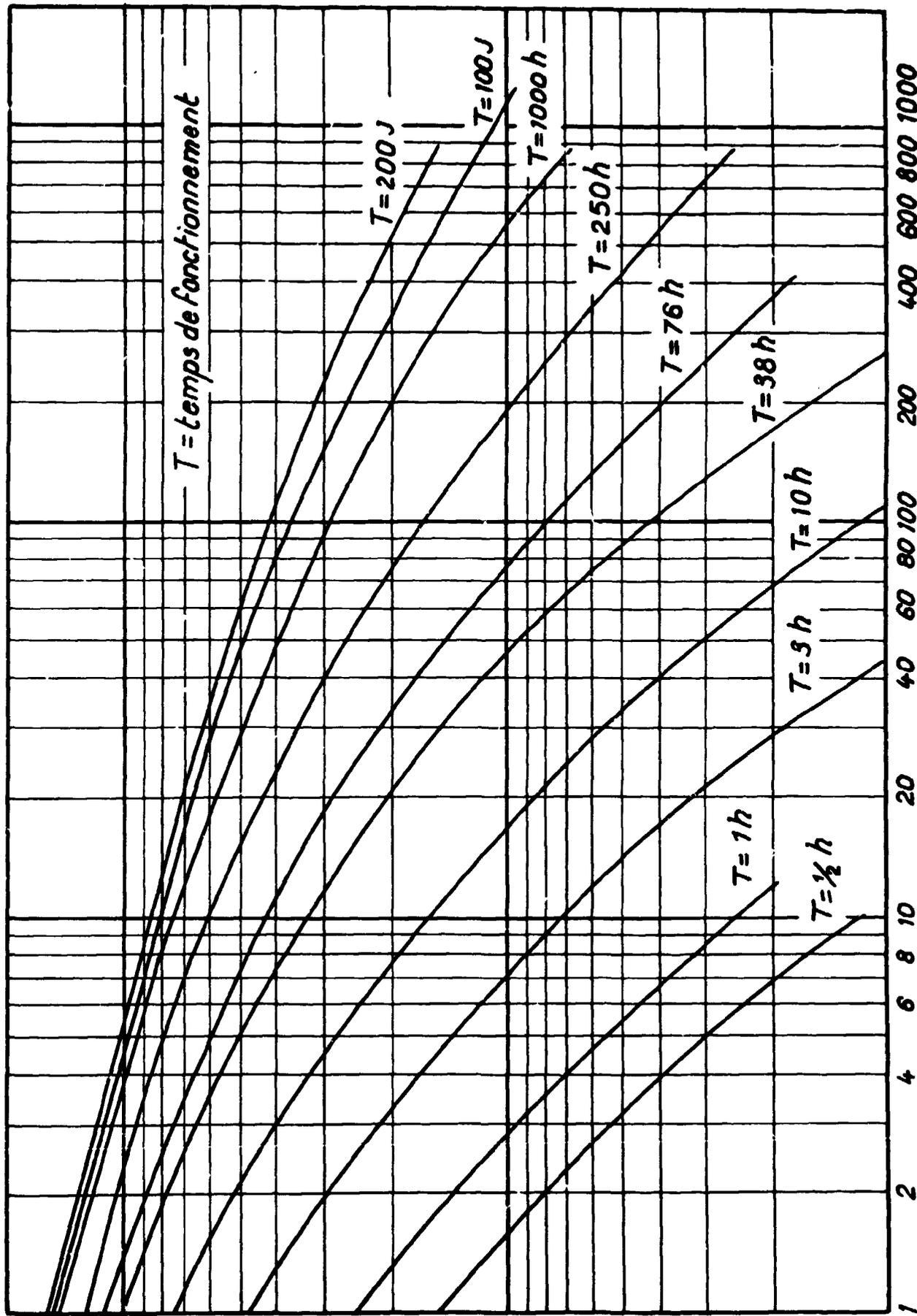
Echantillon 16

$T = \frac{1}{2} h$

Fig 20

I = 4720
II = 20
III = 25-30





$t = \text{temps de refroidissement}$

- Fig. 25 -

Activité globale γ des produits de fission

FIN