



**UNE NOUVELLE METHODE D'UTILISATION DES CRIS-
TAUX DE NaI(Tl) DANS LA DETECTION DE RAYONS
GAMMA DE HAUTE ENERGIE**

MANOEL AMÉRICO NOGUEIRA DE ABREU et J. H. NIFENECKER

PUBLICAÇÃO I.E.A. N.º 108

Dezembro — 1965

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)
CIDADE UNIVERSITÁRIA "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"
SÃO PAULO — BRASIL

UNE NOUVELLE METHODE D'UTILISATION DES CRISTAUX DE NaI(Tl)
DANS LA DETECTION DE RAYONS GAMMA DE HAUTE ENERGIE(")

Manoel Américo Nogueira de Abreu⁽¹⁾ et J.H. Nifenecker

Divisão de Física Nuclear
Instituto de Energia Atômica
São Paulo - Brasil

Publicação IEA nº 108
Dezembro - 1965

-
- (") Travail réalisé au Service de Mesures Neutroniques Fondamentales - Département de Recherches Physiques - Centre D'Études Nucléaires de Saclay.
- (1) Stagiaire du Commissariat à l'Énergie Atomique du Gouvernement Français (A.S.T.E.F.) et boursier de la Comissão Nacional de Energia Nuclear du gouvernement brésilien. (1963/1964)

Comissão Nacional de Energia Nuclear

Presidente: Prof. Luiz Cintra do Prado

Universidade de São Paulo

Reitor: Prof. Luiz Antonio da Gama e Silva

Instituto de Energia Atômica

Diretor: Prof. Rômulo Ribeiro Pieroni

Conselho Técnico-Científico do IEA

Prof. Hélio Lourenço de Oliveira	}	pela USP
Prof. Walter Borzani		
Prof. Rui Ribeiro Franco	}	pela CNEN
Prof. Theodoreto H. I. de Arruda Souto		

Divisões Didático-Científicas:

Div. de Física Nuclear: Prof. Marcello D.S. Santos

Div. de Engenharia Nuclear: Pedro Bento de Camargo

Div. de Ensino e Formação: Prof. Luiz Cintra do Prado
(Licenciado)

Div. de Radioquímica: Prof. Fausto Walter de Lima

Div. de Radiobiologia: Prof. Rômulo Ribeiro Pieroni

Div. de Metalurgia Nuclear: Prof. Tharcísio D.S. Santos

Div. de Engenharia Química: Prof. Kazimierz J. Brill

Div. de Física de Reatores:

UNE NOUVELLE METHODE D'UTILISATION DES CRISTAUX DE NaI (TL)
DANS LA DETECTION DE RAYONS GAMMA DE HAUTE ENERGIE

Manoel Américo Nogueira de Abreu et J.H. Nifenecker
Instituto de Energia Atômica, São Paulo, S.P., Brasil

RESUMO

A complexidade da resposta de cristais de iodeto de sódio na detecção de raios gama de alta energia ($E > 2$ MeV) é devida principalmente à possibilidade de escape do cristal, de um ou dois raios gama de 511 KeV devidos a aniquilação de um par positron-eletron ou ainda de um raio gama após sofrer um ou vários espalhamentos Compton no cristal.

O princípio do método proposto consiste em observar apenas raios gama que perderam a maior parte de sua energia na região central do cristal.

Considerações teóricas sobre o funcionamento, forma da resposta e eficiência são apresentadas juntamente com resultados experimentais.

RESUMÉ

La complexité de la réponse des cristaux d'iodure de sodium a des rayonnements gamma de haute énergie ($E > 2$ MeV) est bien connue. Elle est due à la possibilité d'échappement hors du cristal d'un ou deux rayons gamma de 511 KeV consécutifs à une création de paires ou encore d'un rayon gamma ayant subi une ou plusieurs diffusions Compton dans le cristal.

Le principe de la méthode proposée est de n'observer que les rayons gamma ayant perdu une partie de leur énergie au moins dans la région centrale du cristal, on peut en effet supposer légitimement que les interations incomplètes avec le cristal correspondent surtout à les interations superficielles.

Des considerations théoriques sur les conditions d'opération, forme de la réponse et de la efficacité sont présentés aussi comme les résultats expérimentaux.

ABSTRACT

The detection of high energy gamma rays ($E > 2$ MeV) with NaI(Tl) crystals is very complex due to the fact that one or two gamma rays of 511 KeV, from pair annihilation, or the primary gamma ray, after Compton scattering, can escape from the crystal.

If only the gamma rays that loose a great part of their energy in the central region of the crystal are observed, assuming that the partial interactions occur mainly at the crystal surface, only gamma rays loosing their whole energy in the crystal, will be detected.

Theoretical considerations for the detection of high energy gamma rays, taking into account the shape of the spectrum and its efficiency are presented with the experimental data.

I. INTRODUCTION

La complexité de la réponse des cristaux d'iodure de sodium à des rayonnements gamma de haute énergie (supérieure à 2 MeV) est bien connue. Elle est due à la possibilité d'échappement hors du cristal d'un ou deux rayons gamma de 511 KeV consécutifs à une création de paires ou encore d'un rayon gamma ayant subi une ou plusieurs diffusions Compton dans le cristal.

Les méthodes les plus couramment utilisées pour réduire cette complexité gênante sont de deux types:

- les spectromètres de paires sélectionnant précisément les événements ayant sûrement donné lieu à une création de paires.
- les spectromètres dits anti-Compton dont le but est de

n'analyser que les rayons gamma ayant perdu la totalité de leur énergie dans le cristal.

Ces deux solutions ont l'inconvénient de réclamer l'usage de plusieurs cristaux et dans le cas des spectromètres anti-Compton en particulier, un cristal annulaire très onéreux.

La solution présentée ici se rattache à la catégorie des spectromètres à absorption totale mais ne nécessite l'emploi que d'un seul cristal. Le principe de la méthode est de n'observer que les rayons gamma ayant perdu une partie de leur énergie au moins dans la région centrale du cristal: on peut en effet supposer légitimement que les interactions incomplètes avec le cristal correspondent surtout à des interactions superficielles.

Les figures 1A et 1B représentent le montage utilisé. Trois photomultiplicateurs A, B et C voient simultanément la scintillation d'un cristal de dimensions raisonnables (ici 5" x 4"). Le photomultiplicateur C est utilisé normalement: la surface utile de photocathode est aussi grande que possible, un joint optique unit la photocathode à la fenêtre du cristal. Au contraire les fenêtres correspondant aux photomultiplicateurs A et B sont petites, aucun joint optique n'est utilisé et les photomultiplicateurs peuvent même être situés à une certaine distance de la fenêtre. Ainsi ces photomultiplicateurs ne sont sensibles qu'aux photons lumineux émis dans un angle solide inférieur à 2π .

On n'analysera en amplitude les impulsions données par le photomultiplicateur C que lorsque les impulsions des photomultiplicateurs A et B auront dépassé un certain seuil.

La question qui se pose est donc de savoir si l'on pourra ainsi distinguer les événements ayant lieu au centre du cristal c'est-à-dire vus directement par les photomultiplicateurs A et B, des autres qui ne sont vus qu'indirectement, les photons lumineux ne pouvant alors parvenir sur les photocathodes de A et B

qu'après avoir subi une ou plusieurs diffusions. Nous allons démontrer cette possibilité.

II. DEMONSTRATION

A. Calcul du nombre de photons parvenant directement sur la photocathode d'un des photomultiplicateurs latéraux.

La figure 2 précise les notations suivantes:

Soient N photons émis au centre du cristal

$\bar{\omega}$ - l'angle solide sous lequel le centre émetteur voit la partie utile de la photocathode du photomultiplicateur latéral.

$\bar{\alpha}$ - l'angle solide déterminé par la photocathode du photomultiplicateur et la fenêtre de sortie correspondante du cristal. Cet angle devra tenir compte de la réfraction de la lumière à la sortie du cristal.

S - la surface interceptée par $\bar{\alpha}$ sur la face du cristal opposée à la fenêtre.

$\bar{\Omega}$ - l'angle solide sous lequel S est vue du centre du cristal.

l - la distance entre la photocathode des photomultiplicateurs A et B et le cristal. Posons:

$$\omega = \frac{\bar{\omega}}{4\pi} \quad \Omega = \frac{\bar{\Omega}}{4\pi} \quad \alpha = \frac{\bar{\alpha}}{4\pi}$$

Le nombre de photons incidents vus directement par le photomultiplicateur est

$$N_D = N\omega$$

B. Nombre de photons parvenant sur la photocathode du photomultiplicateur après avoir été diffusés.

Les photons arrivant sur la photocathode après une diffusion doivent avoir été diffusés par la surface S . La fenêtre du photomultiplicateur est vue de S sous un angle solide approximativement égal à $\omega/4$.

Le nombre de photons parvenant à la photocathode après une diffusion est donc: (en supposant que la surface diffusante du cristal n'est pas absorbante)

$$N \sim \omega/4$$

Soit T la probabilité pour qu'un photon s'échappe du cristal après chaque diffusion (le photon s'échappe par les fenêtres du cristal).

Au bout de (n-1) diffusions il reste:

$$NT^{n-1} \text{ photons dans le cristal}$$

Le nombre de ces photons diffusés la nième fois par un point de S est approximativement:

$$NT^{n-1} \Omega$$

car Ω représente à peu près le rapport entre la surface S et la surface totale des parois et fenêtres du cristal. Le nombre de photons qui parviennent à la photocathode du photomultiplicateur latéral après n diffusions est donc:

$$N^{(n)} = N \Omega \omega T^{n-1} / 4$$

Le nombre total de photons parvenant à la photocathode après avoir été diffusés est donc:

$$\mathcal{N} = N \Omega \omega / 4 \sum_1^{\infty} T^{n-1} = N \Omega \omega / 4 (1-T)$$

C. Calcul de la probabilité pour qu'un nombre de photons supérieur ou égal à n parviennent à la photocathode du photomultiplicateur latéral.

a) Photons n'ayant pas subi de diffusion

On admet que la distribution des photons arrivant sur la photocathode sans avoir subi de diffusion est une gaussienne de valeur moyenne:

$$N_D = N \omega$$

et d'écart quadratique:

$$\sigma = \sqrt{N \omega}$$

d'où

$$f_D(n) = \exp \left[-(n - N \omega)^2 / N \omega \right] / \sqrt{N \omega \pi}$$

La probabilité pour qu'un nombre de photons supérieur ou égal à n parvienne sur les deux photocathodes est donc:

$$P_D(n) = \left[1 - \mathcal{H} \left(\frac{n - N \omega}{\sqrt{N \omega}} \right) \right]^2$$

$\mathcal{H}(x)$ étant la fonction d'erreur.

La fonction $P_D(n)$ passe rapidement de 1 à 0 dans l'intervalle $N \omega \pm \sqrt{N \omega}$

b) Photons ayant été diffusés

On trouve de même

$$P_I(n) = \left[1 - \mathcal{H} \left(\frac{n - \mathcal{N}}{\sqrt{\mathcal{N}}} \right) \right]^2$$

qui passe de 1 à 0 dans l'intervalle

$$N\omega\Omega/4 (1 - T) \leq \sqrt{N\omega\Omega/4 (1-T)}$$

D. Conditions de fonctionnement

Pour qu'on puisse distinguer les événements ayant lieu au centre du photomultiplicateur il faut qu'on puisse écrire:

$$P_D(n) \gg P_I(n)$$

Cette condition sera remplie d'après ce qui précède, si:

$$N\omega\Omega/4 (1-T) < n < N\omega$$

posons

$$F = \Omega/4 (1-T)$$

La condition de possibilité s'écrit:

$$F < 1$$

1. Calcul de F

En négligeant l'absorption des parois diffusantes du cristal on peut dire que 1-T correspond à la probabilité d'échappement du cristal. On a donc:

$$1 - T = \frac{\text{surface des fenêtres}}{\text{surface latérale totale}} = \frac{2 \int r^2 f_1 + \int R^2 f_2}{2 \int R^2 + 2 \int R H}$$

où r est le rayon des fenêtres latérales

R les rayon du cristal et de sa fenêtre principale

H la hauteur du cristal

f_1 et f_2 des facteurs rendant compte du phénomène de réflexion totale à la sortie du cristal par les fenêtres

fenêtres A et B et la fenêtre C respectivement. On obtient donc:

$$1 - T = \frac{(r/R)^2 f_1 + f_2/2}{1 + H/R} \quad \text{formule 3}$$

De même on peut calculer Ω en fonction de la distance du photomultiplicateur latéral à la fenêtre, de r rayon de cette fenêtre supposé égal à celui de la photocathode du photomultiplicateur et de R rayon du cristal. On obtient:

$$\Omega = 0,5 \left[1 + \frac{1 + \ell/2R}{1 + (\ell/2r)^2} \right] \left(1 + \frac{1}{(2r/\ell + r/R)^2} \right) \left(1 + \frac{1}{(2r/\ell)^2} \right)$$

On a ainsi tracé les courbes représentatives de $(1-T)$ et de $F = \frac{\Omega}{4(1-T)}$ dans les figures 4 et 5.

Ces calculs étant effectués on peut déterminer l'intervalle dans lequel le fonctionnement du montage sera satisfaisant.

Soit E le seuil de détection des deux petits photomultiplicateurs. Le fonctionnement sera satisfaisant dans l'intervalle

$$E < E' < E/F$$

2. Forme de raies

Il est prévisible qu'une scintillation se produisant au centre du cristal et ayant une énergie suffisante pour que la création de paires soit importante, donnera lieu à un spectre comprenant trois pics: le pic d'absorption totale et les deux pics correspondant à l'échappement d'un ou deux photons de 511 KeV.

Le rapport entre le pic d'absorption totale et le pic d'échappement d'un photon sera fonction de la probabilité pour qu'un photon de 511 KeV émis au centre du cristal sorte de celui-ci sans avoir interagi.

La probabilité pour que le rayon gamma de 511 KeV subisse une interaction avant de sortir du cristal est donnée par:

$$P = 1 - \exp(-\mu E^x)$$

Où μE est le coefficient d'absorption totale du cristal pour des rayons gamma de E (KeV) et x l'épaisseur que doivent traverser ces rayons. Les différentes valeurs de P pour différentes valeurs de x sont données au tableau 1.

Définissons H, hauteur relative du pic d'échappement par rapport au pic d'absorption totale.

En première approximation la hauteur du pic d'absorption totale est proportionnelle à:

$$1 - \exp(-\mu 511^x)$$

celle du pic d'échappement à:

$$2 \exp(-\mu 511^x)$$

car deux rayons de 511 KeV ^{sont} émis lors d'une création de paires, d'où:

$$H = 2 \exp(-\mu 511^x) / \left[1 - \exp(-\mu 511^x) \right] \quad \text{formule 1}$$

3. Efficacité de détection

On peut avoir une idée approchée de l'efficacité de détection du montage comparée à l'efficacité de détection du cristal d'iodure de sodium fonctionnant normalement, en faisant le raisonnement suivant:

Le rapport des deux efficacités est égal au rapport du

volume total du cristal au volume vu par les deux photomultiplicateurs latéraux. Celui-ci sera pris comme étant sensiblement égal à celui d'une sphère centrée au centre du cristal et inscrite dans l'angle solide α .

En tout état de cause de rayon maximum de cette sphère est égal à la mi-hauteur du cristal.

On a:

$$\xi = 4 \pi \rho^3 / 3 \int \int R^2 H \quad \text{formule 2}$$

ρ étant le rayon de la sphère défini ci-dessus R et H le rayon de la hauteur du cristal.

Le tableau 2 donne les valeurs de ξ obtenues en faisant varier la distance des photomultiplicateurs latéraux à la fenêtre du cristal leur correspondant.

III. APPAREILLAGE

Le cristal que nous avons utilisé était un cristal Harshaw de 5" x 4" remonté selon nos instructions par la maison Quartz et Silice associé à un photomultiplicateur 54 AVP (φ photocathode = 4"). Ce cristal donnait une résolution de 19% sur le pic de 660 KeV du Cs 137. Associé à un photomultiplicateur EMI 9545 B (φ photocathode = 12") la résolution s'abaissait à 14%. En tout état de cause la résolution de l'ensemble était médiocre.

Les photomultiplicateurs latéraux étaient des photomultiplicateurs 52 AVP. Une dissymétrie involontaire s'était introduite dans le montage du fait qu'une faible couche de Magnésie s'était intercalée entre une des fenêtres latérales et le cristal proprement dit. Cette couche diminuait donc le rendement optique de l'une des voies latérales.

Le bloc diagramme de l'électronique est représenté fig. 3. L'impulsion du photomultiplicateur principal n'était analysée que lorsque les deux photomultiplicateurs latéraux délivraient chacun une impulsion supérieure à un certain seuil.

IV. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les essais ont été effectués pour la plupart à l'aide des rayons gamma de 4,45 MeV émis par une source de Po-Be.

Les gains des deux voies latérales ont été maintenus égaux pendant tous les essais en s'arrangeant pour que les deux spectre analysés à l'aide d'un sélecteur multicanaux soient aussi superposables que possible. Les spectres de la voie principale analysés en coïncidence avec les voies latérales ont été caractérisés par les quantités suivantes:

- Résolution du pic d'absorption totale
- Hauteur relative du pic d'échappement
- Efficacité définie comme le rapport du taux de comptage au pic dans le fonctionnement en coïncidence à celui obtenu sans coïncidence.

On a étudié les variations de ces paramètres en fonction: des seuils des voies latérales, de la distance au cristal des photomultiplicateurs latéraux, de la résolution obtenue sans coïncidence.

A. Etude de la résolution

La figure 8 et le tableau 3 montrent la variation de la résolution en fonction du seuil.

On peut remarquer que la résolution est surtout sensible à la valeur des seuils des voies latérales. Elle tend, dans les

meilleures conditions vers la valeur 7% pour les photomultiplicateurs EMI et 54 AVP. Il s'ensuit que la méthode décrite ici ne semble pas améliorer la résolution intrinsèque de l'ensemble cristal-photomultiplicateur.

B. Efficacité

Les figures 7 et 8 et les tableaux 2 et 3 montrent la variation de l'efficacité en fonction du seuil ainsi que les résultats des calculs faits à l'aide de la formule 2. On peut remarquer que calcul et expérience concordent qualitativement. Ajoutons que l'on peut améliorer l'efficacité en utilisant un joint optique entre les photomultiplicateurs et les fenêtres du cristal, c'est-à-dire en faisant dans la formule 3, $f_1 = f_2 = 1$.

C. Relation du pic d'échappement au pic d'absorption totale

La figure 8 montre la variation de la hauteur relative du pic d'échappement en fonction du seuil. On voit que cette hauteur H tend vers une valeur égale à 60% correspondant à un parcours de 2,2" selon la formule 1. D'après cette formule on voit encore que pour un cristal de dimensions supérieures à 6", H serait négligeable.

On peut toutefois obtenir dans le montage actuel des valeurs de H inférieures à 60% mais cela au prix d'une perte considérable d'efficacité. Ce résultat est en effet dû au fait qu'en se plaçant dans la région de transition dans laquelle le seuil de détection est proche de l'énergie du gamma étudié, on peut désavantager notablement un gamma de 4 MeV par rapport à un gamma de 4,45 MeV.

D. Fonctionnement pour des rayons gamma de basse énergie

La figure 6 montre les spectres de Cs 137 et Co 60 obtenus en utilisant la méthode proposée ici. On voit que l'on peut affaiblir notablement la partie du spectre ne correspondant pas à une absorption totale.

V. CONCLUSION

La méthode proposée ici permet donc d'obtenir à l'aide d'un seul cristal des spectres dont l'allure se rapproche de celles obtenues avec les spectromètres à absorption totale classiques.

L'efficacité relative atteint une valeur de 10% sans que la résolution ou la forme du spectre soient détériorées.

La méthode doit donner des résultats d'autant plus satisfaisants qu'elle est utilisée à haute énergie où les créations de paires sont prédominantes. Elle a toutefois l'inconvénient de ne fonctionner que dans une gamme définie d'énergie.

Nous remercions monsieur Pascal du Département d'Electronique de Saclay qui a bien voulu nous prêter le photomultiplicateur E.M.I. utilisé dans le montage.

TABLEAU 1

ϕ (pouces)	P (%)	H (%)
0,5	28	500
1	49	470
2	74	72
2,2	77	61
2,5	81	47
3	87	31
4	93	15
5	96	7,5
6	98	4
7	99	2
8	99,5	0,6

Variations de l'efficacité du cristal pour la détection de rayons gamma de 511 KeV émis en son centre (P) et de la hauteur relative du pic d'échappement (H) en fonction du diamètre du cristal (ϕ). La dernière quantité est calculée d'après la formule 3.

TABLEAU 2

λ (pouces)	$\mathcal{E}(\%)$		
	H/R = 0,5	H/R = 1	H/R = 1,6
0,715	-	-	43
1,25	-	17	10
1,43	-	12	8
2	-	6	4
2,5	-	4	2
3	-	2,5	1,5
3,3	4,2	-	1
4	3	1,5	0,7
5	2	1	0,5
6	1,6	0,8	0,4
7	1,3	0,7	-
8	1	0,6	-

pour $R = 2,5''$

$r/R = 0,1$

Variations de l'efficacité relative (\mathcal{E}) du montage en fonction de la position des petits photomultiplicateurs (λ) et des dimensions du cristal (H/R). La formule utilisée est la formule 2.

TABLEAU 3

λ (pouces)	S_a (v)	S_B (v)	R (%)	H (%)	\mathcal{E} (%)
1,3	10	0	15 \pm 1	70 \pm 10	18 \pm 1
1,3	20	0	9 \pm 0,7	56 \pm 8	2,6 \pm 0,3
1,3	25	0	7,7 \pm 0,6	55 \pm 8	2,4 \pm 0,3
1,3	30	0	6 \pm 0,6	55 \pm 8	1,2 \pm 0,2
1,3	40	0	7 \pm 1,4	60 \pm 10	-
1,3	50	0	8,6 \pm 0,7	74 \pm 6	0,3 \pm 0,1
1,3	30	0	5 \pm 0,7	46 \pm 9	1,2 \pm 0,2
1	30	0	6 \pm 0,7	50 \pm 10	2,1 \pm 0,3
0,8	30	0	7 \pm 0,7	58 \pm 5	4 \pm 0,4
0,6"	30	0	8,5 \pm 0,6	57 \pm 5	9 \pm 0,7
0,6"	0	0	-	90 \pm 3	45 \pm 2
0,6"	10	0	14 \pm 1	68 \pm 5	30 \pm 2
0,6"	20	0	10 \pm 0,7	60 \pm 5	14,0 \pm 1
0,6"	30	0	8,5 \pm 0,6	57 \pm 5	9,0 \pm 0,7
0,6"	40	0	7 \pm 0,5	57 \pm 6	5 \pm 0,5
0,6"	50	0	7 \pm 0,5	60 \pm 8	4 \pm 0,4

Valeurs expérimentales de la résolution R, de la hauteur relative du pic d'échappement H, et de l'efficacité relative du montage \mathcal{E} , en fonction de la position des petits photomultiplicateurs et des seuils des voies latérales.

"essais réalisés avec la PMEMI 9545 B

FIGURE 1-A

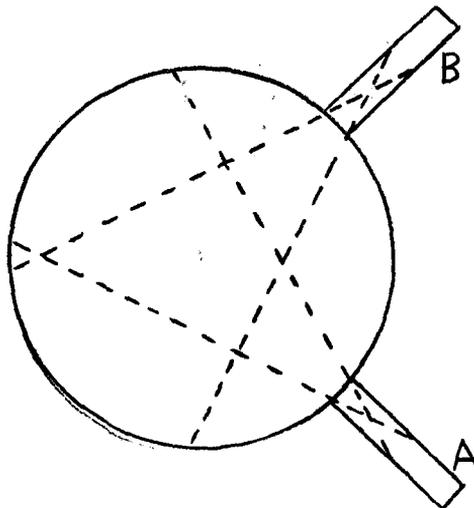
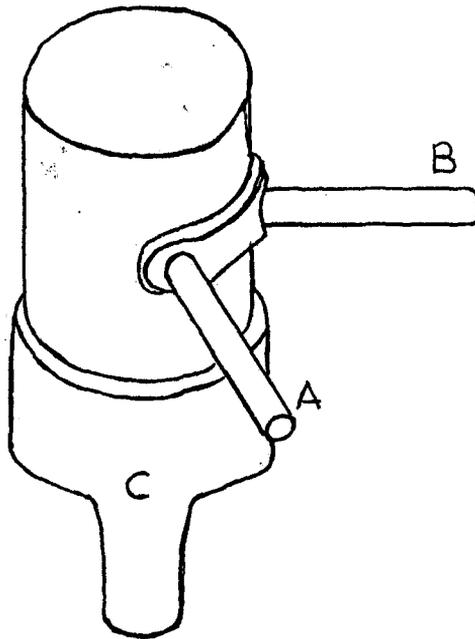


FIGURE 1-B

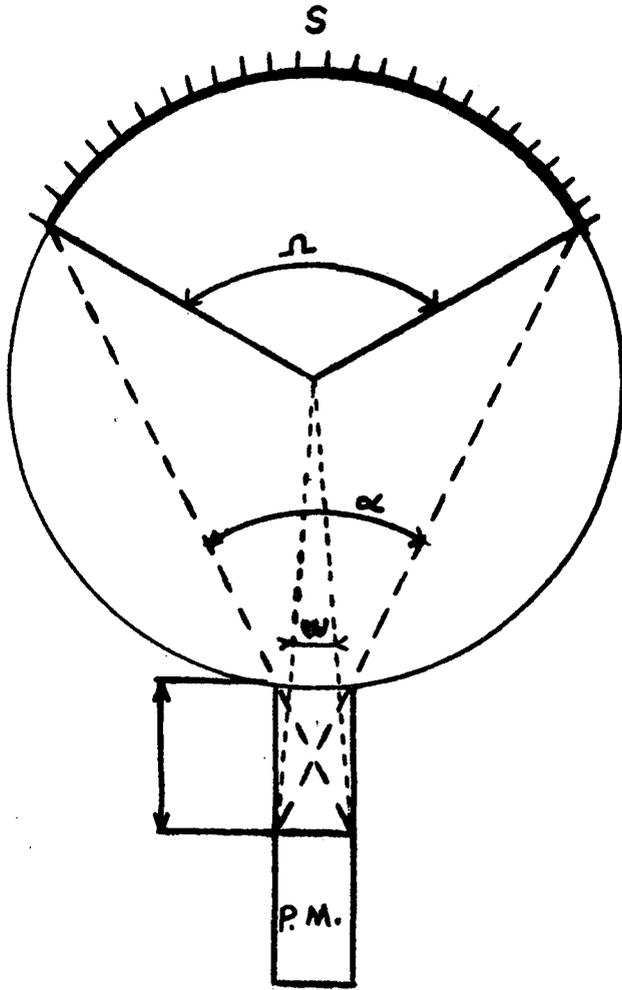


FIGURE 2

FIGURE 3

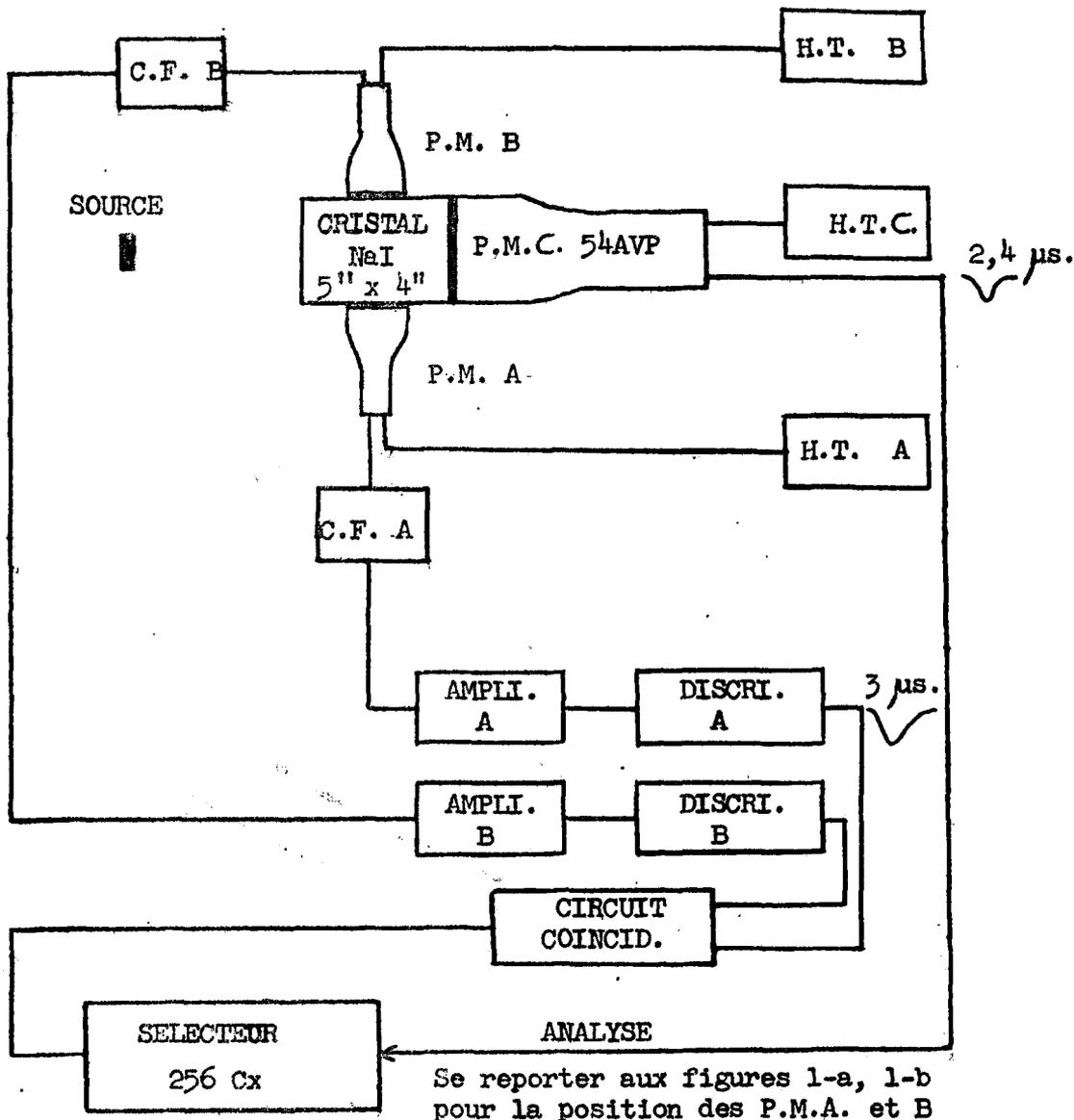
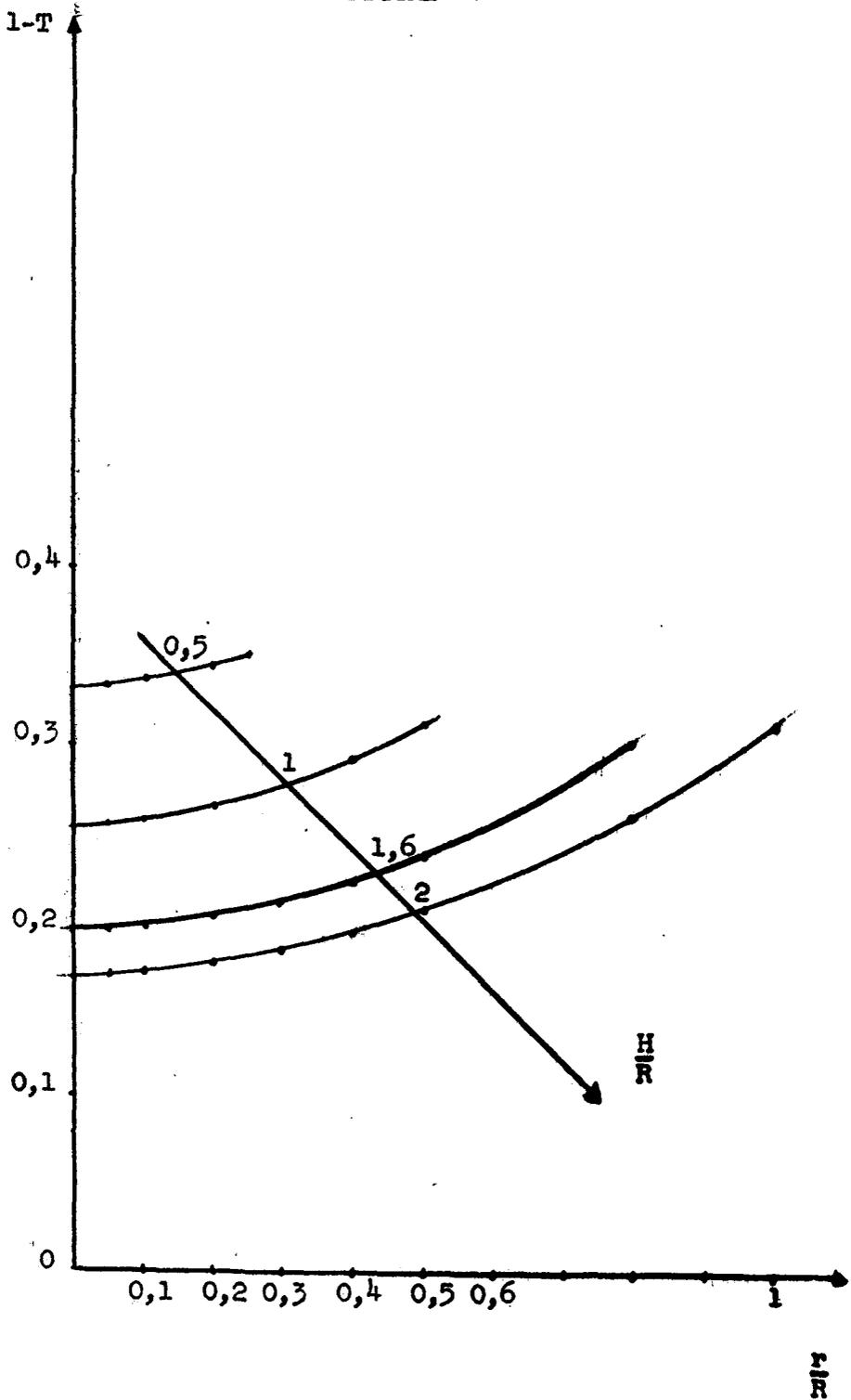


FIGURE 4



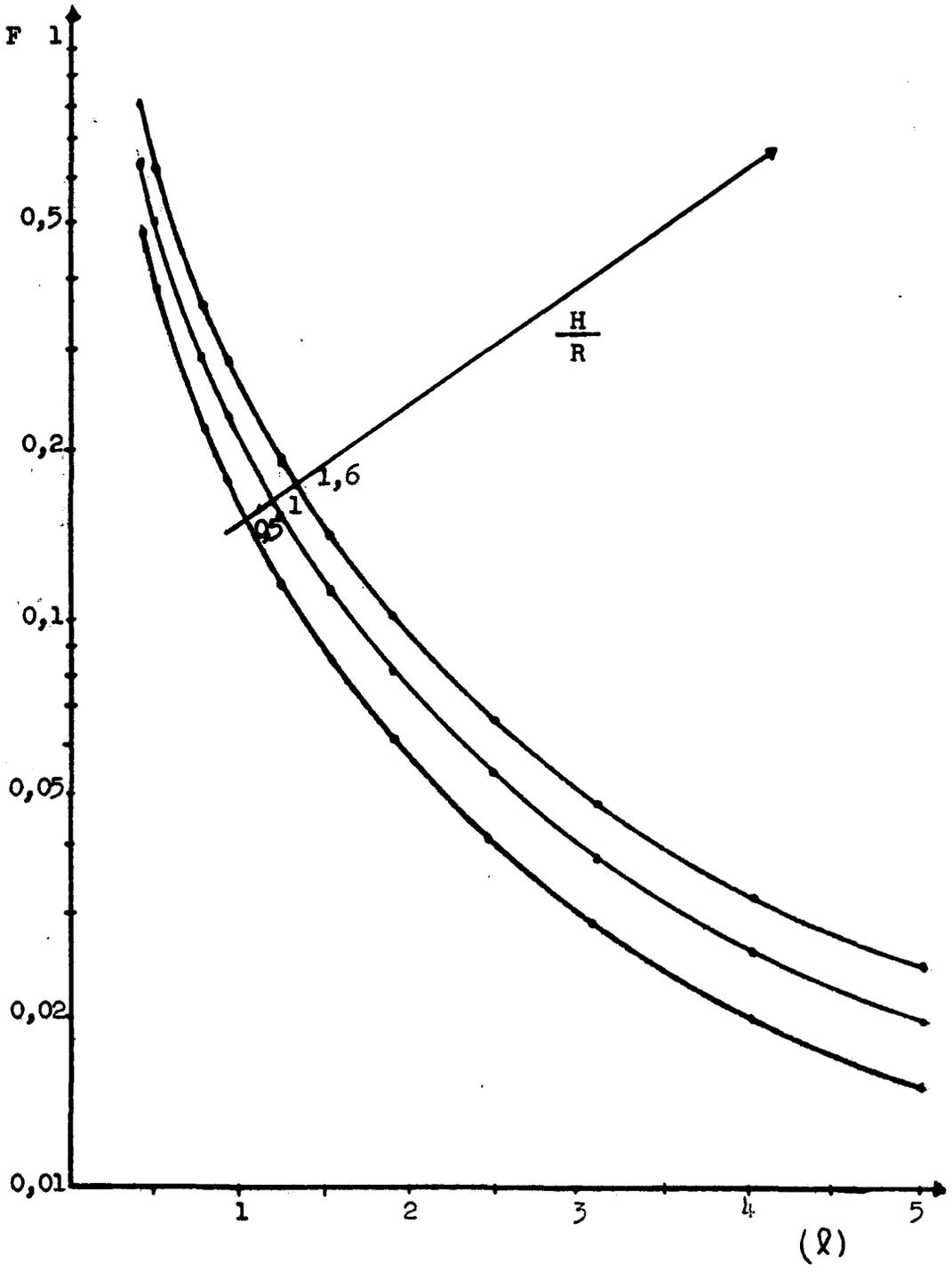


Figure 6

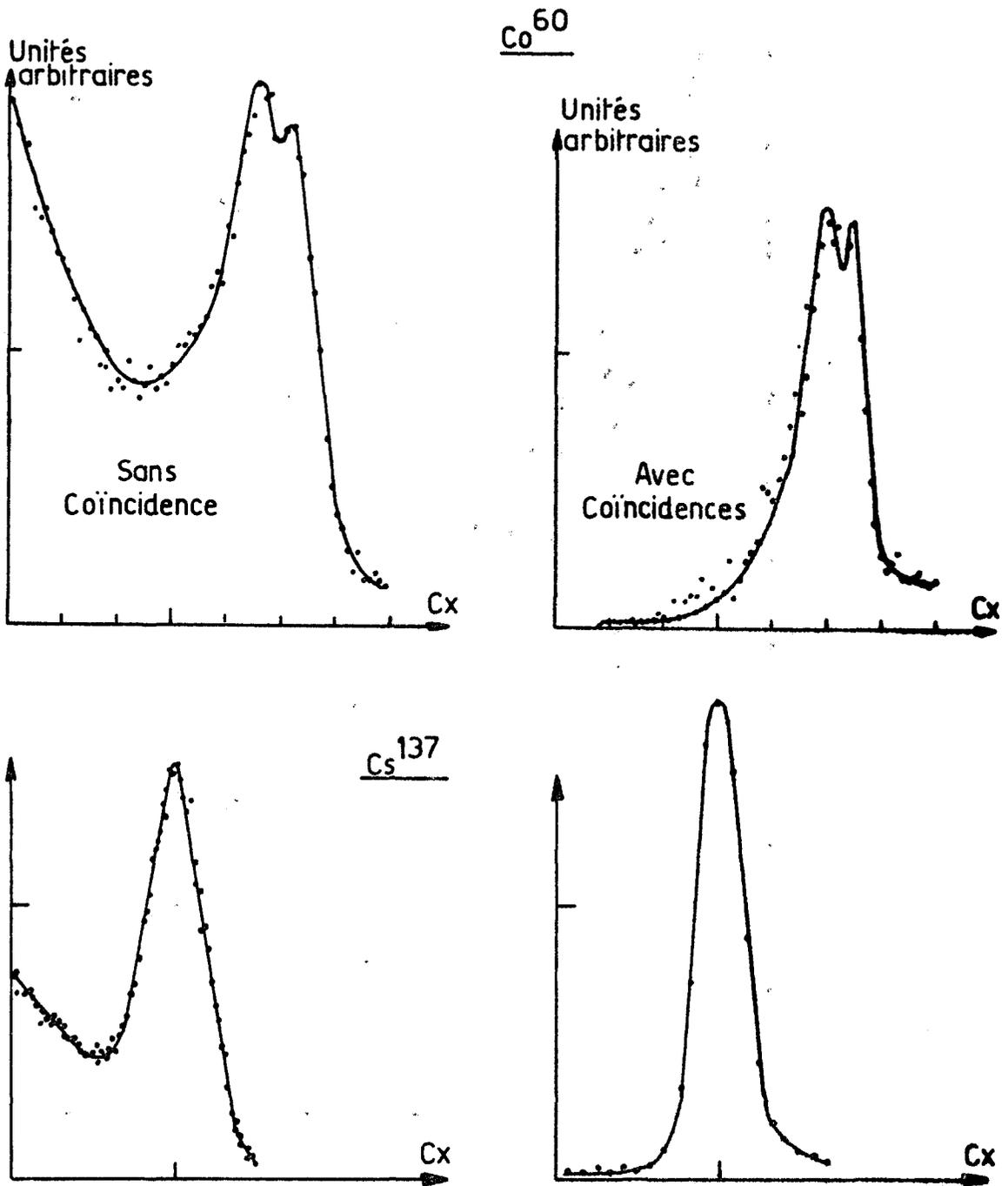


Figure 7

Po-Bc

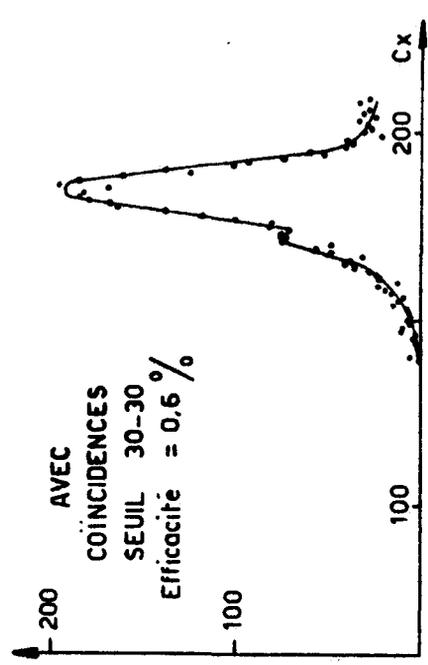
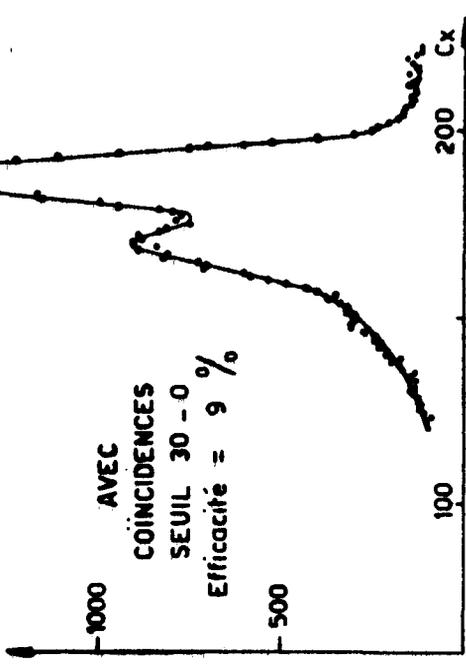
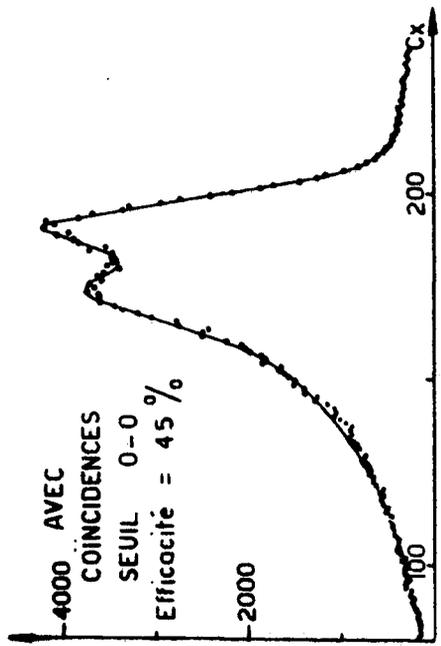
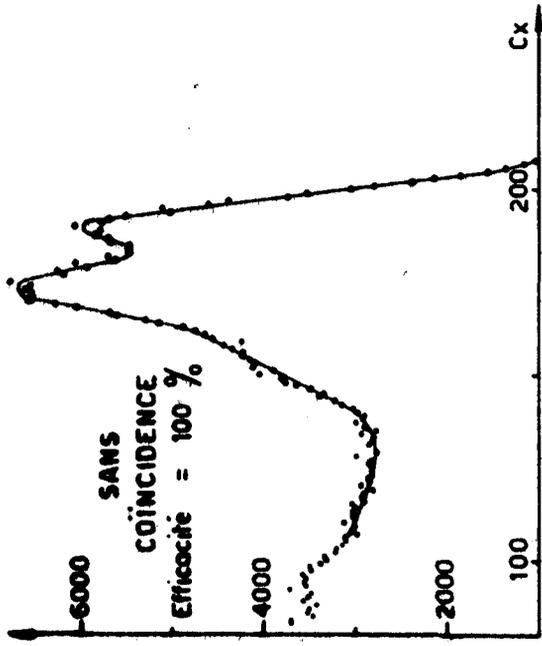


FIGURE 8

