

ETUDES D'ANALYSE PAR ACTIVATION. LE COMPTAGE DES RADIO-NUCLEIDES DE PERIODES COURTES. VOLUME 1 : PARTIES A et B

Sommaire. - Un radionucléide de période courte étant défini spécialement par la décroissance de son activité pendant la durée même du comptage, on rappelle en première partie de ce rapport les relations fondamentales qui lient période, temps de comptage, taux de comptage et nombre d'impulsions enregistrées.

La seconde partie est consacrée au problème des corrections de pertes au comptage dues au temps mort des analyseurs multicanaux. On a établi les formules de correction exactes lorsque le radionucléide de période courte est pur ou seulement accompagné d'un radionucléide de période longue. Par comparaison on a tracé sous forme d'abaques les approximations fournies par le comptage dit "en temps actif" et par un mode de comptage en temps réel associé à la mesure du temps mort global, ce second procédé se révélant plus valable que le premier. Dans le cas d'un mélange complexe, on donne le moyen de le ramener au problème à deux constituants.

1966 - Commissariat à l'Energie Atomique - France

88 p.

ANALYTICAL STUDIES BY ACTIVATION. COUNTING OF SHORT HALF-LIFE RADIO-NUCLIDES. VOLUME 1. PARTS A AND B

Summary. - Since a radio-nuclide of short half-life is characterized essentially by the decrease in its activity even while it is being measured, the report begins by recalling the basic relationships linking the half-life the counting time, the counting rate and the number of particles recorded.

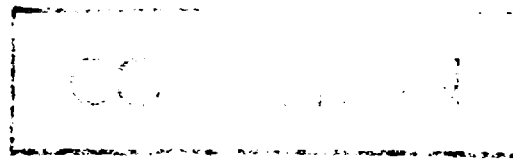
The second part is devoted to the problem of corrections for counting losses due to the idle period of multichannel analyzers. Exact correction formulae have been drawn up for the case where the short half-life radio-nuclide is pure or contains only a long half-life radio-nuclide. By comparison, charts have been drawn up showing the approximations given by the so-called "active time" counting and by the counting involving the real time associated with a measurement of the overall idle period, this latter method proving to be more valid than the former. A method is given for reducing the case of a complex mixture to that of a two-component mixture.

1966 - Commissariat à l'Energie Atomique - France

88 p.

PREMIER MINISTRE
COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

CEA - R 2980



ETUDES D'ANALYSE PAR ACTIVATION
LE COMPTAGE DES RADIONUCLEIDES DE PERIODES COURTES
VOLUME I
(Parties A et B)

par

Eric JUNOD

Rapport CEA - R 2980

1966

Ha

CENTRE D'ETUDES
NUCLÉAIRES DE SACLAY

- Rapport CEA-R 2980

Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble
Département des Radioéléments
Section d'Application des Radioéléments

ETUDES D'ANALYSE PAR ACTIVATION
LE COMPTAGE DES RADIONUCLEIDES DE PERIODES COURTES
VOLUME I
(PARTIES A ET B)

par

Eric JUNOD

Les rapports du COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE sont, à partir du n° 2200, en vente à la Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 16, rue Lord Byron, PARIS VIIIème.

The C.E.A. reports starting with n° 2200 are available at the Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 16, rue Lord Byron, PARIS VIIIème.

- Mars 1966 -

Etudes d'analyse par activation

LE COMPTAGE DES RADIONUCLÉIDES DE PÉRIODES COURTES

AVANT-PROPOS

C'est dans le domaine de l'analyse par radioactivation que nous avons étudié les problèmes particuliers soulevés par le comptage des radionucléides de périodes courtes. Un certain nombre d'éléments ne sont dosables par cette méthode que par l'intermédiaire de radionucléides dont les périodes sont inférieures à une demi-heure, par exemple O, Al, V, Ti, Mg, N. Cependant ce rapport laisse de côté les problèmes d'analyse par activation proprement dits (sensibilité, interférences, etc) pour ne considérer que l'aspect quantitatif du comptage. Cette optique lui donne ainsi une portée générale.

Que le radionucléide de période courte ait été isolé à l'état radiochimiquement pur ou, ce qui est plus fréquent, qu'il doive être mesuré de manière non destructive en présence de radionucléides de périodes plus longues, deux techniques principales sont mises en oeuvre: enregistrement d'une courbe de décroissance - ou celui d'une suite de spectres multicanaux, avec des variantes telles que le comptage différentiel ou le recours aux mesures de coïncidences limité d'ailleurs aux cas de fortes activités.

La préparation des mesures et leur dépouillement reposent sur un certain nombre de procédés et de formules qui jusqu'ici sont restés épars dans la littérature. Il nous a donc paru utile de préparer un document rassemblant ces éléments sous une forme aussi concise que possible en y ajoutant ce que nous tenons de notre expérience.

Ainsi un problème très important semble avoir été à peu près négligé. Les sélecteurs multicanaux actuels sont caractérisés par un temps mort d'analyse nettement plus grand que celui d'une échelle classique et d'un discriminateur. Il en résulte des pertes au comptage pour lesquelles il faut chercher à calculer une correction. Même lorsque le radionucléide de période courte peut être isolé à l'état pur, tout comptage comparatif avec un témoin de même nature appelle ces corrections si les activités ne sont pas très voisines. Nous avons étudié systématiquement ce problème qui a été résolu sous une forme rigoureuse ou approchée en considérant les comptages de radionucléides de périodes courtes purs et ceux de mélanges avec des radionucléides de périodes longues.

Le document que nous présentons comprendra quatre parties.

Dans la première nous décrirons les phénomènes (que l'on peut qualifier de réels) tels que pourrait les mettre en évidence un appareillage sans temps mort. De plus nous ne tiendrons pas compte des fluctuations statistiques.

Les relations fondamentales extraites de cette partie serviront d'ossature pour la description des phénomènes effectifs où entrent en jeu les pertes au comptage signalées. Le sujet de la deuxième partie est le problème général des corrections de temps mort en spectrométrie gamma des radionucléides de périodes courtes.

Ultérieurement la troisième partie traitera des considérations statistiques attachées à la mesure d'une source dont l'activité décroît rapidement; de la précision des comptages et des limites de mesure.

Enfin la quatrième partie sera davantage pratique. Elle décrira certains dispositifs d'appareillage de mesure. Elle contiendra des modes opératoires généraux de comptage ainsi que des procédés de dépouillement des résultats (organigrammes de calcul électronique).

L'étude systématique des phénomènes réels et effectifs a été nécessairement conduite à l'aide de développements mathématiques, d'ailleurs assez simples. Afin d'en clarifier le formalisme, nous avons choisi d'écrire les symboles d'une manière se rapprochant de celle qui sert en programmation sur calculatrice électronique.

Dans une perspective pratique, on pourra se reporter directement à la dernière section de ce rapport où un rapide survol des problèmes introduit les conclusions générales.

S O M M A I R E

AVANT-PROPOS	i
Table des Figures	v
Table des Symboles	vii
ETUDE SYSTEMATIQUE	1
Partie A: Phénomènes réels	2
Partie B: Corrections de temps mort	14
B 1. Comptage d'une période courte pure	16
B 2. Comptage d'un radionucléide de période courte mélangé à un ou plusieurs radionucléides de périodes longues	32
B 3. Comptage d'un mélange de plusieurs radionucléides de périodes courtes et longues	47
Bibliographie	51
RESUME DES PROBLEMES ET CONCLUSIONS	
PRATIQUES	52

TABLE DES FIGURES

(Les indications entre parenthèses renvoient les Figures en annexe aux pages du texte.)

1	Décroissance à partir de t_0	2
2	Décroissance à partir de t_1	3
3	Définition de $\bar{A}$, $(A_1 + A_2)/2$, t_x et t_y	4
4	Facteurs g et k en fonction de TC/T	(6)
5	Décroissance totale	7
6	Rapport entre taux à mi-comptage et taux moyen	(8)
7	TX/T et TX/TC en fonction de TC/T	(9)
8	Séquence de comptage en mode multiéchelle	10
9	Comptage en mode multiéchelle	(11)
10	Séquence de comptages répétés avec temps d'arrêt	12
11	Relation entre σ et i moyen	(17)
12	Décroissance de A' et TMI	(18)
13	Calcul de N'	19
14	Correction automatique de temps mort	21
15	Valeurs de A_1 et N'	(25)
16	Variation de TMF et TMF	(25)
17	Abaque pour RAA	(26)
18	Abaque pour RAN	(26)
19	Abaque pour RAT	(26)
20	Comptage en temps réel	27
21	Variation de TMF	(30)
22	Abaque pour RRA	(30)

TABLE DES FIGURES (SUITE)

23	Abaque pour RRT	(30)
24	Variation de la forme d'un spectre complexe au cours de la décroissance de la période courte	33
25	Décroissance effective de mélanges à 2 constituants	(36)
26	Abaque pour RAT2	(42)
27	Rapport entre TMF_c et TMF	(44)
28	Abaque pour RRT2	(45)
29	Rapport entre A_c et A_l	(46)
30-		
31	Décroissance effective de mélanges à plusieurs constituants	(47)

TABLE DES SYMBOLES

(Pour les textes de définition, se reporter aux pages indiquées en marge.)

indice	c	Instant de référence, p. ex. Fin d'irradiation	
	1	Début de comptage	
	2	Fin de comptage	
	c	Radionucl. de pér. courte	
	l	Radionucl. de pér. longue	
sans exposant		Quantité réelle (nb d'imp., taux de compt.)	
exposant	'	Quantité effective	
	+	Correspond à un comptage en "temps actif"	21
	*	Correspond à un comptage en temps réel corrigé par TC/TA	27
	n	Nombre de canaux d'un spectre gamma	
	i	Numéro d'un canal quelconque	
	j	Radionucléide quelconque	
	t	Instant quelconque	
	t_x	Instant où $A = \bar{A}$	5
	t_y	Instant où $A = 0,5(A_1 + A_2)$	5
	x	Rapport des taux de comptage réels Pér. longue/Pér. courte	38
	y	Rapport des nombres d'impulsions enregistrées Pér. longue/Pér. courte	38
	z	Rapport des temps morts moyens Pér. longue/Pér. courte	38
	λ	Constante radioactive	

TABLE DES SYMBOLES (SUITE)

τ	Temps mort par impulsion / sec/imp /	15
ω	Temps mort par impulsion moyenné sous le spectre d'un radionucléide pur / sec/imp /	16
A	Taux de comptage / ips /	
$\bar{A}$	Taux de comptage moyen / ips /	4
N	Nombre d'impulsions enregistrées dans un spectre ou par une échelle	
N_t	Nombre d'impulsions enregistrées pendant la vie totale du radionucléide	7
T	Demi-vie radioactive (période)	
TC	Temps (durée) de comptage	
TA	Temps actif de comptage	16
TCA	Temps de comptage prédéterminé en temps "actif" par un chronomètre d'efficacité	21
TM	Temps mort global d'un comptage	16
TR	Temps de refroidissement ou de transfert	
TMI	Temps mort instantané / sans dimens. /	17
TMF	Temps mort fractionnaire / " /	17
TMP	Temps mort prolongeant / " /	17
TX	$= t_x - t_1$	9
TY	$= t_y - t_1$	12
TCY	Durée d'un cycle déparant deux débuts de comptage	12
TAR	Temps d'arrêt = TCY - TC	12
TME	En mode multiéchelle, durée du comptage dans un canal	10

TABLE DES SYMBOLES (SUITE)

Les rapports des taux de comptage (ou nombres d'impulsions) donnés par les approximations "TCA" et "TC/TA" aux taux (ou nombres d'impulsions) vrais sont symbolisés ainsi:

1ère lettre	R = Rapport
2ème lettre	A = Temps "actif" de comptage R = Temps réel de comptage
3ème lettre	A = Taux vrai initial donné N = Nb d'imp. enregistrées donné T = Temps mort fractionnaire donné
Chiffre 2	= 2 composants (PC + PL)

RAA	Voir paragraphe 8.1	23
RAN	8.2	24
RAT	8.3	24
RRA	10.1	28
RRN	10.2	29
RRT	10.3	29
RAN2	17.1	40
RAT2	17.2	41
RRA2	18.1	42
RRT2	18.3	44

E T U D E S Y S T E M A T I Q U E

La définition de Période courte est assez imprécise, puisqu'elle couvre dans la littérature un domaine qui va de moins d'une seconde à quelques jours. Pratiquement la limite inférieure est toutefois assez facilement fixée à 1 seconde par la possibilité de faire actuellement des mesures avec un appareillage classique: échelle ou sélecteur multicanal.

Notre sujet étant de traiter des particularités du comptage des radionucléides de périodes courtes, nous précisons la définition de ceux-ci par le fait que l'activité - d'où le taux de comptage - décroît pendant la durée du comptage. Celle-ci est choisie selon le niveau de l'activité à mesurer; elle peut varier dans des limites importantes. Aussi plutôt que de fixer arbitrairement le domaine des Périodes courtes, est-il plus justifié de se relier au rapport TC/T . On conçoit qu'au-dessous d'une certaine valeur de ce facteur, toute période peut être considérée comme longue. De l'autre côté les relations que nous établirons pour décrire les phénomènes réels aussi bien que pour calculer les pertes au comptage seront presque toujours fonction de TC/T . Cette caractéristique est un élément de généralisation qui facilitera beaucoup la consultation des Tables et Abaques contenus dans ce rapport.

Le domaine des Périodes courtes est de plus déterminé par la rapidité d'analyse des sélecteurs multicanaux en ce sens que les corrections linéaires de pertes au comptage - excates vis-à-vis des périodes longues - et qui sont fonction du temps mort moyen de l'appareil n'y sont plus applicables ou seulement par approximation.

PARTIE A

PHENOMENES REELS

1. Calcul de A_0 en fonction du Nombre d'impulsions enregistrées, du Temps de comptage et de la Période

1.1 Les calculs suivants portent sur les variables A , N réelles, théoriques. Réel signifie que l'appareillage est supposé parfait (sans temps mort amenant des pertes au comptage), théorique signifie que les fluctuations statistiques ne sont pas prises en considération.

1.2 La grandeur accessible par la mesure est N , nombre d'impulsions enregistrées pendant un temps TC au cours de la décroissance d'un radionucléide de constante radioactive λ .

1.3 On fixe comme instant de référence un instant t_0 . On veut calculer le Taux de comptage (instantané, exprimé en impulsions par seconde) à cet instant.

1.4 Le temps de comptage, TC , s'étend de $t_1 = t_0$ à $t_2 = t_0 + TC$:
 $A_0 = A_1$

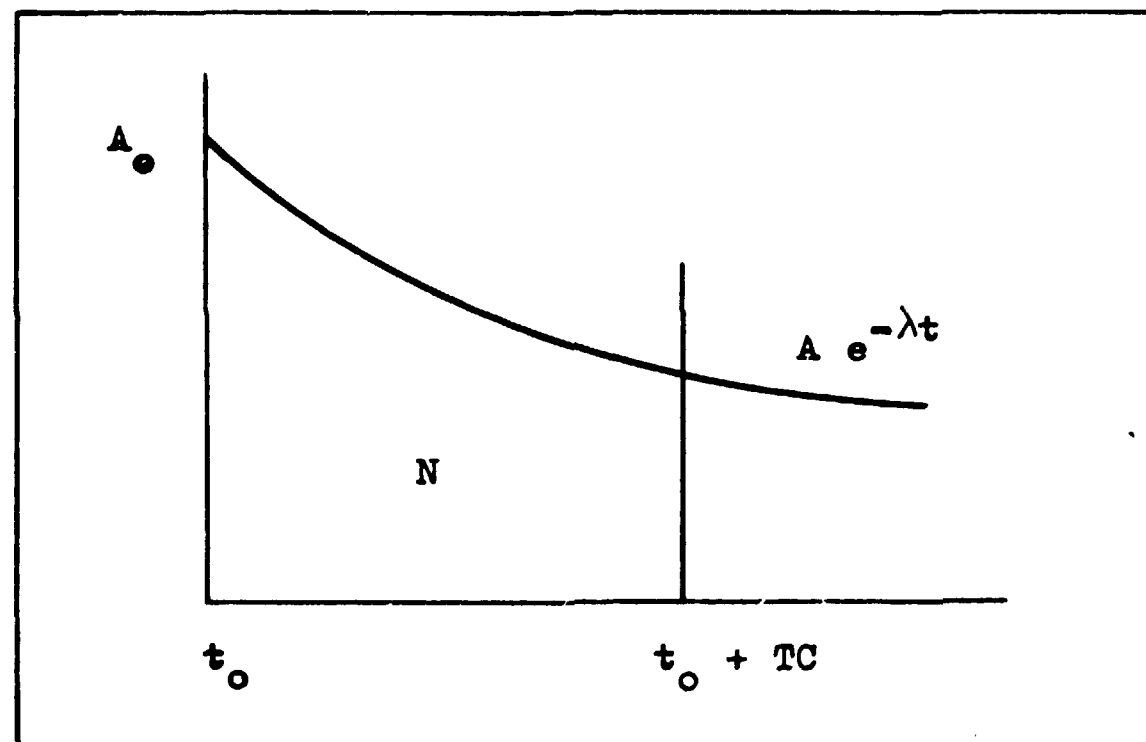


Figure 1

$$N = A_0 \int_{t_0}^{t_0+TC} e^{-\lambda t} dt = A_0 \frac{1 - e^{-0,693TC/T}}{0,693/T} \quad (1)$$

d'où

$$A_0 = N \frac{0,693/T}{1 - e^{-0,693TC/T}} \quad (2)$$

1.5 Le temps de comptage s'étend de t_1 à t_2 :

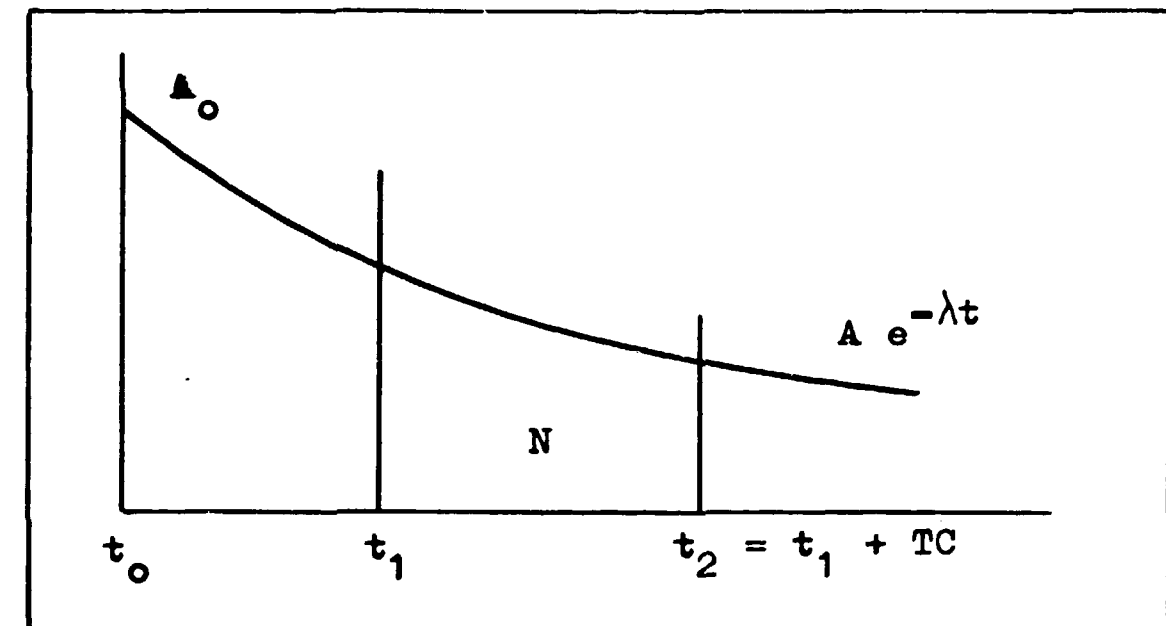


Figure 2

$$A_0 = N \frac{\lambda}{e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}} = N \frac{\lambda}{e^{-\lambda t_1} (1 - e^{-\lambda TC})}$$

$$A_0 = N \frac{0,693/T}{1 - e^{-0,693TC/T}} e^{0,693t_1/T} \quad (3)$$

Ceci correspond au calcul 1.4 suivi d'une correction de décroissance.

2. Taux de comptage moyen

2.1 On définit le Taux de comptage moyen, $\bar{A}$, par

$$\bar{A} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt = \frac{N}{TC} \quad (4)$$

2.2 On définit un Taux de comptage à mi-temps de comptage, $A(TC/2)$, par

$$A(TC/2) = A_1 e^{-0,693 TC/2T} \quad (5)$$

2.3 On peut encore considérer la moyenne des Taux de comptage initial et final : $(A_1 + A_2)/2$.

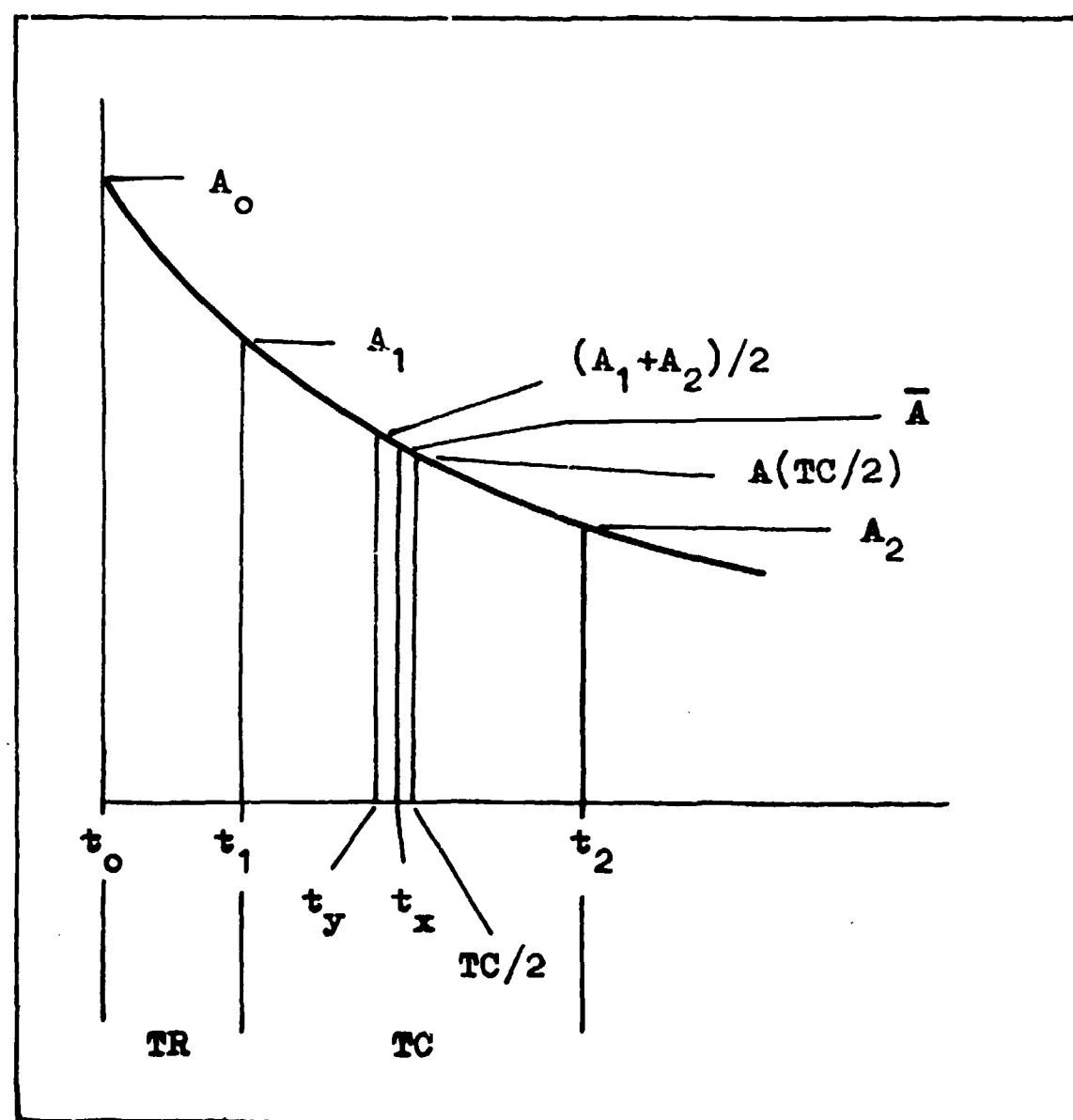


Figure 3

3. Temps moyens, définition de TR

3.1 L'instant où le taux de comptage est égal à $\bar{A}$ est noté t_x . L'instant où le taux de comptage est égal à $(A_1 + A_2)/2$ est noté t_y .

3.2 L'intervalle $t_1 - t_0$ est symbolisé par TR. Si t_0 est l'instant de fin d'irradiation, TR est le temps de refroidissement ou de transfert.

4. Fonction TC/T

4.1 Une Période courte peut être définie - vis à vis du comptage - par le rapport TC/T. En faisant varier celui-ci entre 0,01 et 10, on précisera cette définition et établira les limites de validité de certaines simplifications.

4.2 En partant de (2) on peut poser un facteur g tel que

$$A_0 = (N/T) \cdot g \quad (6)$$

$$\text{où } g = 0,693 / (1 - e^{-0,693 TC/T})$$

Une liste de valeurs de g en fonction de TC/T est donnée dans le Tableau I tandis que la Figure 4 en représente la variation continue.

4.3 L'emploi de g est malcommode car T, valeur absolue de la période subsiste dans l'équation (6). Il vaut mieux transformer (2) en

$$A_0 = \frac{N}{TC} \cdot \frac{0,693 TC/T}{1 - e^{-0,693 TC/T}}$$

et définir k par

$$A_0 = (N/TC) \cdot k = \bar{A} k \quad (7)$$

On a la concordance: $k = g \cdot TC/T$. Voir également les Tableau I et Figure 4.

TABLEAU I. FACTEURS g ET k EN FONCTION DE TC/T

TC/T	g	$k=A_1/\bar{A}$
0,01	100,34	1,003
,02	50,35	1,007
,05	20,34	1,017
,1	10,36	1,036
,2	5,35	1,071
,3	3,69	1,108
,4	2,86	1,145
,5	2,37	1,183
,75	1,71	1,282
1	1,39	1,386
2	0,92	1,848
3	0,79	2,377
5	0,72	3,578
7	0,70	4,890
10	0,694	6,936

4.4 Une "Période longue" est définie selon nos critères par la constance du taux de comptage pendant tout le temps de comptage. On a $A = N/TC$, $k = 1,000$. Toute période peut être considérée comme "longue" avec une erreur inférieure à 1 % vis-à-vis d'un comptage ne durant pas davantage que 2 % de sa valeur absolue.

4.5 Les formules (6) et (7) sont restreintes au cas où TC est décompté à partir de t_0 . D'une façon générale on a

$$A_0 = (N/T).g. \exp(0,693 TR/T) \quad (6a)$$

$$A_0 = (N/TC).k. \exp(0,693 TR/T) \quad (7a)$$

5. Comptage durant la vie totale du radionucléide

Si le facteur TC/T dépasse 5, l'expression $(1 - \exp(-0,693TC/T))$ de l'équation (1) tend vers 1 ainsi que le montre le tableau :

TC/T	$1 - \exp(-0,693TC/T)$
5	0,969
6	,984
7	,992
8	,996
10	,999

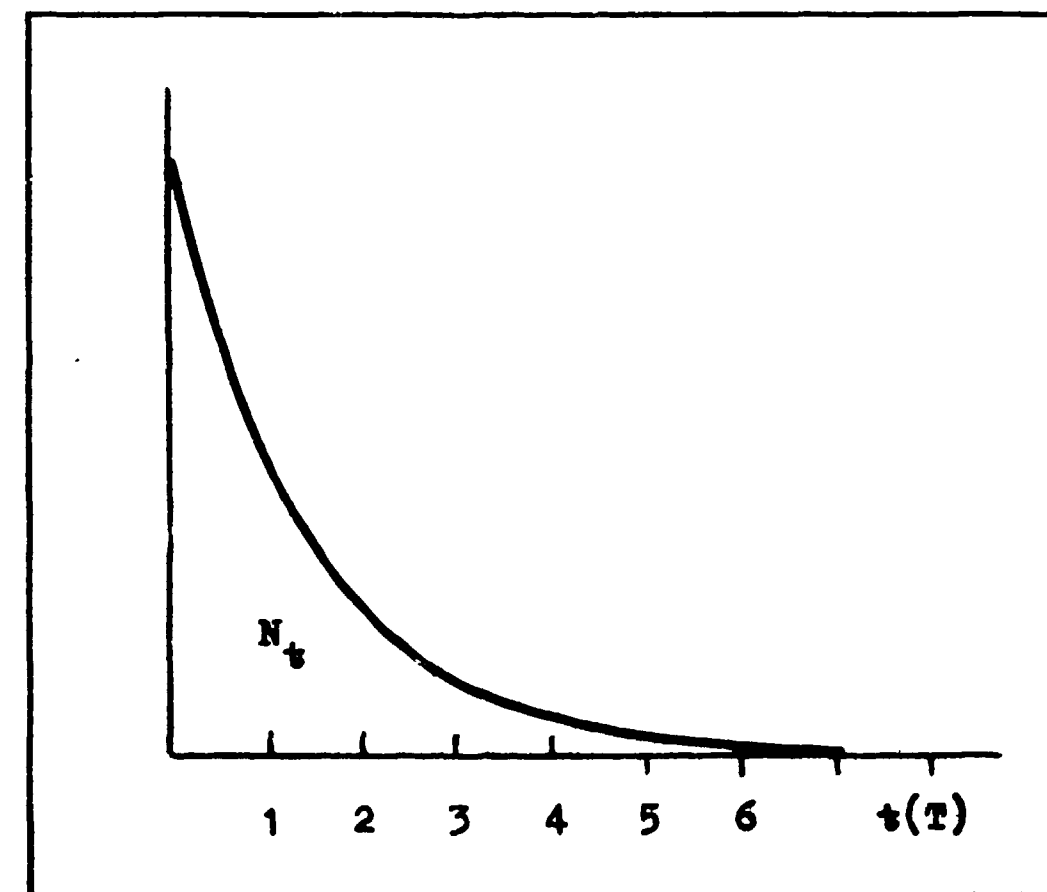


Figure 5

Le nombre d'impulsions accumulées pendant 5 périodes ou plus est donc très approximativement proportionnel au nombre total de désintégrations subies par le radionucléide au cours de sa vie depuis t_0 . On a

$$N_t \approx A_0 (T/0,693) \text{ d'où } A_0 \approx N_t (0,693/T) \quad (8)$$

L'erreur est calculable d'après le tableau ci-dessus.

6. Comparaison entre Taux de comptage moyen et Taux à mi-comptage

Elle est établie en fonction de TC/T à partir des équations (4), (5) et (1)

$$\frac{A(TC/2)}{\bar{A}} = 0,693 \frac{TC}{T} \cdot \frac{e^{-0,693 TC/2T}}{1 - e^{-0,693 TC/T}} \quad (9)$$

Le Tableau II et la Figure 6 présentent cette comparaison dans le domaine $0,01 < TC/T < 10$. On observe des écarts de 1% pour $TC = 0,66T$, de 2% pour $TC=T$, de 7,5% pour $TC = 2T$, etc.

TABLEAU II. RAPPORT DU TAUX A MI-COMPTAGE AU TAUX MOYEN EN FONCTION DE TC/T

TC/T	$A(TC/2) / \bar{A}$
0,01	1,0
0,1	0,9993
0,25	,9989
0,33	,9977
0,5	,9951
0,67	,9910
0,75	,9887
1	,9799
2	,9240
3	,8401
5	,6324
10	,217

7. Relation entre TX et T

Pendant la décroissance d'un radionucléide de période courte l'instant où le taux de comptage est égal au taux moyen précède l'instant de mi-comptage d'autant plus que TC est grand vis-à-vis de T (Cf. Fig. 3: $t_x - t_1 < TC/2$). On a noté t_x l'instant où le taux de comptage est égal à $\bar{A}$. Le calcul de t_x est le suivant:

7.1 Comptage débutant à t_0 . On pose $TX = t_x - t_0$ et $t_0 = 0$. Par définition on a $A(t_x) = N/TC$, N étant donné par (1).

$$A(t_x) = A_0 e^{-\lambda TX} = A_0 \frac{1 - e^{-\lambda TC}}{\lambda} \frac{1}{TC}$$

d'où

$$TX = \frac{T}{0,693} \ln \frac{0,693 TC/T}{1 - e^{-0,693 TC/T}} \quad (10)$$

Les rapports TX/TC et TX/T sont donc des fonctions de TC/T . On les a calculés pour des valeurs du paramètre comprises entre 0,1 et 7 et portés dans le Tableau III et la Figure 7.

7.2 Le taux de comptage initial est en définitive calculable à partir du taux moyen et de TX :

$$A_0 = \bar{A} e^{\lambda TX} = \frac{N}{TC} e^{\lambda TX} \quad (11)$$

On comparera cette formule à (2).

7.3 Comptage débutant à t_1 . TX est alors défini par $TX = t_x - t_1$. L'équation générale est donc:

$$A_0 = \frac{N}{TC} e^{\lambda (TR + TX)} \quad (12)$$

TABLEAU III. RAPPORTS TX/TC ET TX/T EN FONCTION DE TC/T

TC/T	TX/TC	TX/T
0,1	0,497	0,050
,2	,494	,099
,33	,490	,163
,5	,486	,243
,75	,478	,358
1	,471	,471
2	,443	,886
3	,416	1,249
5	,368	1,839
7	,327	2,290

8. Comptage en "Multiéchelle"

Le mode "multiéchelle" de comptage consiste à enregistrer la décroissance d'une source de période courte en comptant les impulsions fournies par le détecteur pendant une suite d'intervalles égaux se suivant régulièrement sans temps d'arrêt. La séquence est schématisée sur la Figure 8.

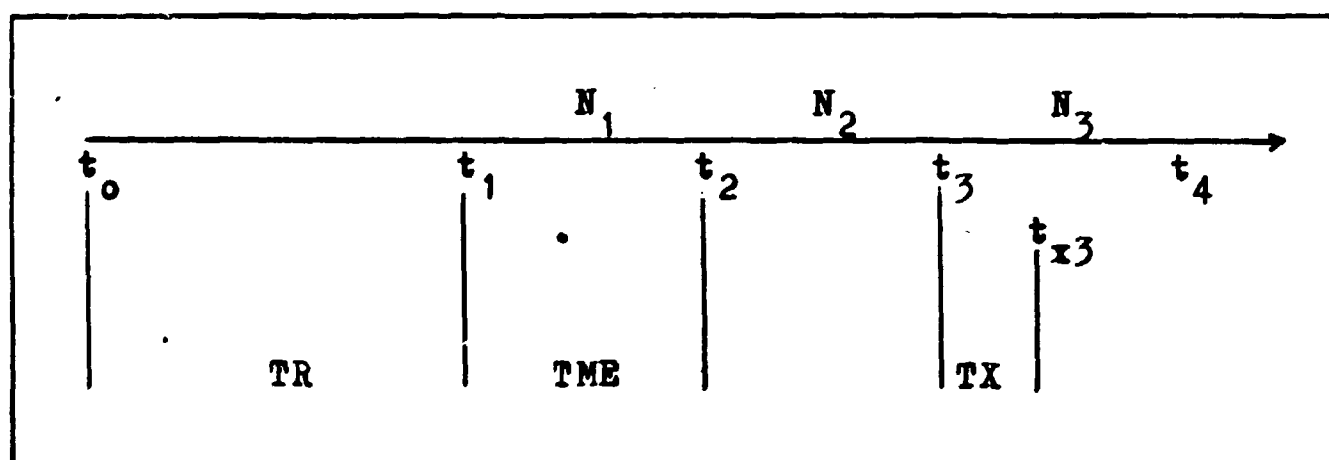


Figure 8

Le nombre d'impulsions enregistrées pendant un intervalle - dont la durée est notée TME - divisé par la valeur de TME fournit le taux de comptage moyen au sens donné ci-dessus. Le dépouillement des mesures faites selon cette technique s'effectuant le plus ordinairement par analyse graphique sur quadrillage semi-logarithmique (en ordonnée les logarithmes des taux de comptage moyens), il est

nécessaire de calculer les abscisses des points par lesquels sera tracée la meilleure droite de pente $-0,693/T$ dont l'extrapolation à t_0 donnera la valeur de A_0 .

8.1 Multiéchelle sans temps d'arrêt. Par (12) en identifiant TME et TC on calcule pour le premier intervalle: $A_0 = N_1/TME \cdot e^{\lambda(TR+TX)}$ pour le n ième intervalle:

$$A_0 = N_n/TME \cdot e^{\lambda(TR+(n-1)TME+TX)}$$

On en conclut que les abscisses des points de décroissance sont donnés en toute rigueur par

$$t_{xn} = t_n + TX \quad (13)$$

et non par : $t_n + TME/2$.

Exemple (théorique). Partant de $A_0 = 10000$ ipm et $T = 2$ mn, on a calculé par (3) les premiers N_n pour $TME = 0,5 - 1 - 2 T$.

	TME/T = 0,5	1	2
N_1	8430	14430	21640
N_2	5965	7215	5420
N_3	4220	3608	1325
N_4	3000	1804	346
N_5	2105	902	
N_6	1500		

On a porté sur la Figure 9 les nombres d'impulsions (en escaliers; ordonnée logarithmique) pour la suite des intervalles de comptage. Dans ce cas les droites de décroissance doivent être tracées à partir d'ordonnées à l'origine égales à $A_0 \times TME$, c'est-à-dire 10000, 20000, 40000 ipm. On constate que ces droites coupent chaque escalier à TX en concordance avec les valeurs extraites du Tableau III. Les parallèles passant par les abscisses TME/2 donnent des valeurs trop élevées pour A_0 .

8.2 Comptages répétés avec temps d'arrêt. Si l'on enregistre la décroissance avec un appareil qui marque un temps d'arrêt entre chaque intervalle de comptage - par ex. pour permettre la lecture du résultat - la séquence est celle de la Figure 10. Il ne s'agit plus à proprement parler de multiéchelle, mais la détermination des abscisses des points de mesure procède du même mode de calcul que ci-dessus. A_0 est exprimé par

$$A_0 = N_n / TC \cdot e^{\lambda(TR + (n-1)(TC + TAR) + TX)}$$

TX peut être tiré du Tableau III. L'analyse graphique est identique à condition de tenir compte des temps d'arrêt.

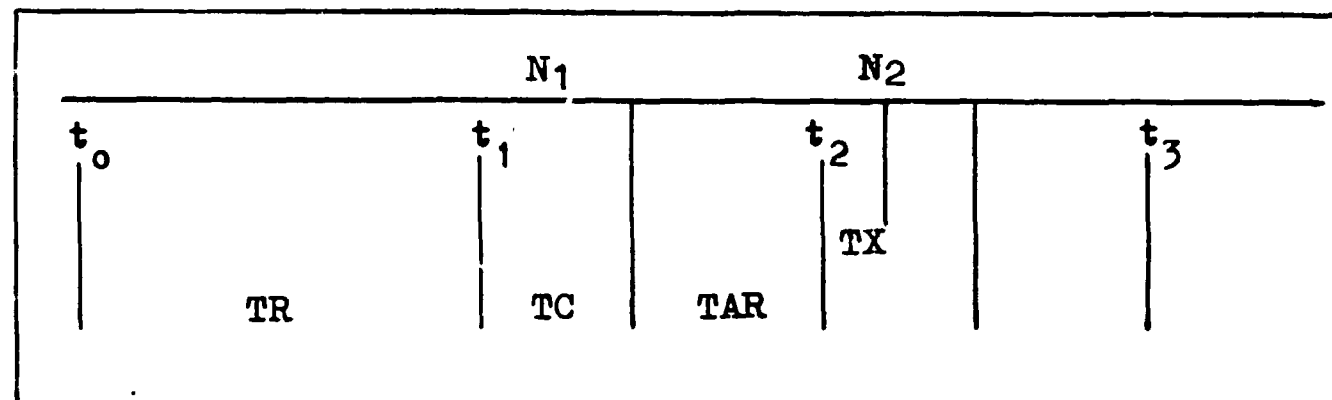


Figure 10

9. Relation entre TY et T

On a défini t_y comme l'instant où l'activité est moyenne des activités initiale et finale au cours d'un comptage. On notera TY la durée $t_y - t_1$. Le calcul de TY en fonction de TC et de T est le suivant.

On pose l'égalité

$$A_1 e^{-\lambda TY} = 0,5 A_1 (1 + e^{-\lambda(t_2 - t_1)})$$

d'où on tire

$$TY = \frac{T}{0,693} \ln \frac{2}{1 + e^{-0,693 TC/T}} \quad (14)$$

Le Tableau IV donne quelques valeurs des rapports TY/TC et TY/T en fonction de TC/T. La comparaison avec le Tableau III montre que TY est plus petit que TX. L'approximation par rapport à 0,5 TC est encore moins bonne dans ce dernier cas.

TABLEAU IV. RAPPORTS TY/TC ET TY/T EN FONCTION DE TC/T

TC/T	TY/TC	TY/T
0,1	0,482	0,048
,25	,468	,117
,5	,454	,227
1	,412	,412
2	,339	,678
4	,226	,904

PARTIE B

CORRECTIONS DE TEMPS MORT

1. Introduction

Il faut maintenant prendre en compte les écarts par rapport aux phénomènes réels dus aux conditions effectives de fonctionnement des appareillages électroniques de mesure. La détection d'un rayonnement et le comptage ou l'analyse de l'impulsion électrique résultante introduisent un "temps mort", ce qui se traduit par une "perte au comptage" lorsque le taux de comptage est élevé. Avec une sonde à scintillation NaI(Tl) les temps morts de la détection peuvent être négligés devant ceux de l'appareillage électronique.

L'emploi d'échelles et de discriminateurs d'amplitude ne pose de problème de perte au comptage que lorsque l'activité est très élevée au début d'une décroissance. On sait d'ailleurs qu'une méthode de mesure du temps mort d'une échelle est basée sur cette observation.

La spectrométrie gamma par contre, qui est basée sur le fonctionnement des analyseurs multicanaux, se heurte quand il s'agit de mesurer des périodes courtes à des difficultés dues aux temps morts moyens relativement élevés de ces appareils. Au contraire de ce qui se passe avec des périodes longues, le recours à la correction automatique des temps mort par le "chronomètre d'efficacité" (en anglais "live timer") n'est pas possible à priori. L'objet de cette Partie B est de montrer le problème et d'établir des corrections rigoureuses ou approchées des pertes au comptage.

2. Temps mort d'un analyseur multicanal

L'expression du temps mort d'un analyseur multicanal à convertisseur amplitude-temps et à mémoire magnétique à tores de ferrite est de la forme

$$\tau = \alpha + \beta i \quad \mu\text{s}/\text{imp}$$

τ est le temps nécessaire pour analyser et stocker une impulsion. α représente une partie fixe due aux circuits d'entrée et au cycle de mémoire. βi correspond à la longueur du signal d'adressage, proportionnel au numéro du canal, i , dans lequel est stocké l'impulsion. Notons qu'une impulsion perçue mais rejetée avant analyse ne donne lieu qu'à un temps mort fixe réduit: $\tau' = \alpha$.

2.1 Les valeurs de α et β varient d'un analyseur à l'autre et déterminent la "rapidité" de l'appareil, par exemple:

Analyseur	α	β (en μs)
Intertechnique SA 40	17	0,5
Intertechnique SA 40B	17	0,25
RIDL - Nanolyser	1,75	0,01

Pour les analyseurs Intertechnique, α est de l'ordre de 4 μs .

2.2 Certains analyseurs sont équipés d'un circuit assurant un temps mort constant (maximum) quelle que soit l'adresse de stockage. Cette distinction ne joue pas de rôle dans les calculs de correction de pertes au comptage qui suivent.

B 1. COMPTAGE D'UNE PERIODE COURTE PURE

3. Temps mort moyen fixe

Un spectre de radionucléide de période courte pure présente la caractéristique de conserver sa forme en cours de décroissance. Cette invariance se rencontre évidemment aussi pour toute période longue et tout mélange de périodes longues. Par contre elle ne se vérifie plus lorsqu'on a affaire à un mélange de plusieurs radionucléides à demi-vies courtes (à moins que les périodes ne soient très voisines) ou à un mélange d'une période courte et d'une ou plusieurs périodes longues.

3.1 Le temps mort moyen par impulsion analysée et enregistrée dans le spectre est donné par l'expression:

$$\begin{aligned} \bar{m} &= \alpha + \beta \bar{m}_{\text{moyen}} \\ \bar{m} &= \alpha + \beta \frac{\sum_{i=1}^n ic(i)}{\sum_{i=1}^n c(i)}, \text{ } \mu\text{s/imp} \end{aligned} \quad (15)$$

où n est le nombre de canaux
i un canal quelconque
c(i) le nombre d'impulsions enregistrées dans ce canal

Au cours de la décroissance d'un radionucléide de période courte - comme au cours d'un comptage de période longue - ce temps mort moyen, $\bar{m}$, reste constant.

3.2 Le Temps mort total d'un comptage est noté TM:

$$TM = \bar{m} \sum_{i=1}^n c(i) = \bar{m} N' \quad (16)$$

où N' est le nombre total d'impulsions stockées dans le spectre.

NB. Le prime (') désigne les variables effectives, les distinguant ainsi des variables réelles.

Le Temps actif, TA, est celui pendant lequel l'analyseur est ouvert à toute impulsion se présentant à lui. TA est le temps effectif de comptage. Il peut être mesuré par un chronomètre extérieur.

Le temps mort est la différence entre le Temps de comptage TC (défini encore comme temps total ou temps d'horloge) et le temps actif TA:

$$TM = TC - TA$$

On peut donc déterminer expérimentalement le temps mort moyen par

$$\bar{m} = TM / N' \quad (17)$$

ce qui doit donner une valeur proche de celle calculée par (15).

Pratiquement les calculs de corrections de pertes au comptage sont basés sur la mesure de TA.

3.3 On définit un Temps mort fractionnaire, rapporté au temps de comptage, qui est noté TMF:

$$TMF = TM / TC = (TC - TA) / TC \quad (18)$$

Exprimé en % il correspond à l'indication de "temps mort" des analyseurs multicanaux classiques.

Accessoirement on parlera de Temps mort prolongeant, TMP:

$$TMP = TM / TCA = TM / (TC - TM) \quad (19)$$

On a les correspondances

$$\begin{aligned} TMP &= TMF / (1 - TMF) \\ TMF &= TMP / (1 + TMP) \end{aligned} \quad (20)$$

3.4 On définit un Temps mort instantané par

$$TMI = \bar{m} A' \quad (21)$$

cù A' est le taux de comptage effectif: il est exprimé en imp. par seconde; $\bar{m}$ est donné en s/imp. TMI est ainsi sans dimension.

En période longue, on a l'identité $TMF = TMI$. En comptage de période courte, ceci n'est valable que pour $TC = 1$ s. De manière générale on a

$$TMF = 1/TC \cdot \int_0^{TC} TMI dt$$

3.5 Valeurs habituelles de $\bar{m}$. La Figure 11 donne la relation entre le numéro du canal moyen d'un spectre et le temps mort moyen $\bar{m}$, selon le type d'appareil utilisé. Si on travaille sur 200 canaux, le canal moyen se situe entre le 20ième et le 100ième de manière générale. On devra donc par la suite considérer pour $\bar{m}$ un domaine possible compris entre 20 et 80 $\mu\text{s/imp}$ avec un point de comparaison optimum à 3 $\mu\text{s/imp}$.

4. Relations fondamentales entre les taux de comptage réel et effectif

Soit $A(t)$ taux de comptage réel à l'instant t = nombre d'impulsions sortant du détecteur pendant l'unité de temps.
 $A'(t)$ taux de comptage effectif = nombre d'impulsions analysées et mises en mémoire.

La perte relative de taux de comptage est mesurée par le temps mort instantané

$$\Delta A / A = \text{TMI} \quad (22)$$

Sous une autre forme

$$A' / A = 1 - \text{TMI}$$

On en tire la relation fondamentale, par (21)

$$A(t) - A'(t) = A(t)A'(t)\omega \quad (23)$$

et déduit les équations pratiques suivantes

$$A(t) = \frac{A'(t)}{1 - \omega A'(t)} \quad (24)$$

$$A'(t) = \frac{A(t)}{1 + \omega A(t)} \quad (25)$$

$$\text{TMI} = \frac{\omega A(t)}{1 + \omega A(t)} \quad \text{et} \quad 1 - \text{TMI} = \frac{1}{1 + \omega A(t)} \quad (26)$$

5. Décroissance apparente du taux effectif de comptage. Variation du temps mort instantané

Par suite du temps mort la décroissance apparente du taux de comptage effectif ne suit pas la période du radio-nucléide mesuré, sauf à la limite. La perte relative au comptage, en d'autres termes le temps mort instantané diminue progressivement jusqu'à devenir nuls. La Figure 12 montre l'allure du phénomène. Deux familles de courbes sont

tracées pour les valeurs de ω : 3 - 20 - 80 $\mu\text{s}/\text{imp}$, représentant

$$A'(t) = \frac{A_0 e^{-\lambda t}}{1 + \omega A_0 e^{-\lambda t}} \quad \text{et} \quad \text{TMI}(t) = \omega A'(t)$$

La courbe de décroissance apparente $A'(t)$ s'approche d'autant plus de la pente réelle que le facteur $\omega A_0 e^{-\lambda t}$ tend vers 0. On voit l'intérêt de diminuer ω par construction de l'analyseur.

6. Correction exacte du temps mort. Calcul de A_1

Soit une période courte pure définie par

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad \text{et} \quad \omega = \text{cte}$$

On mesure pendant un temps réel TC , c-à-d un temps actif TA , un nombre de coups N' . On veut calculer A_1 taux de comptage réel à l'instant t_1 , début du comptage.

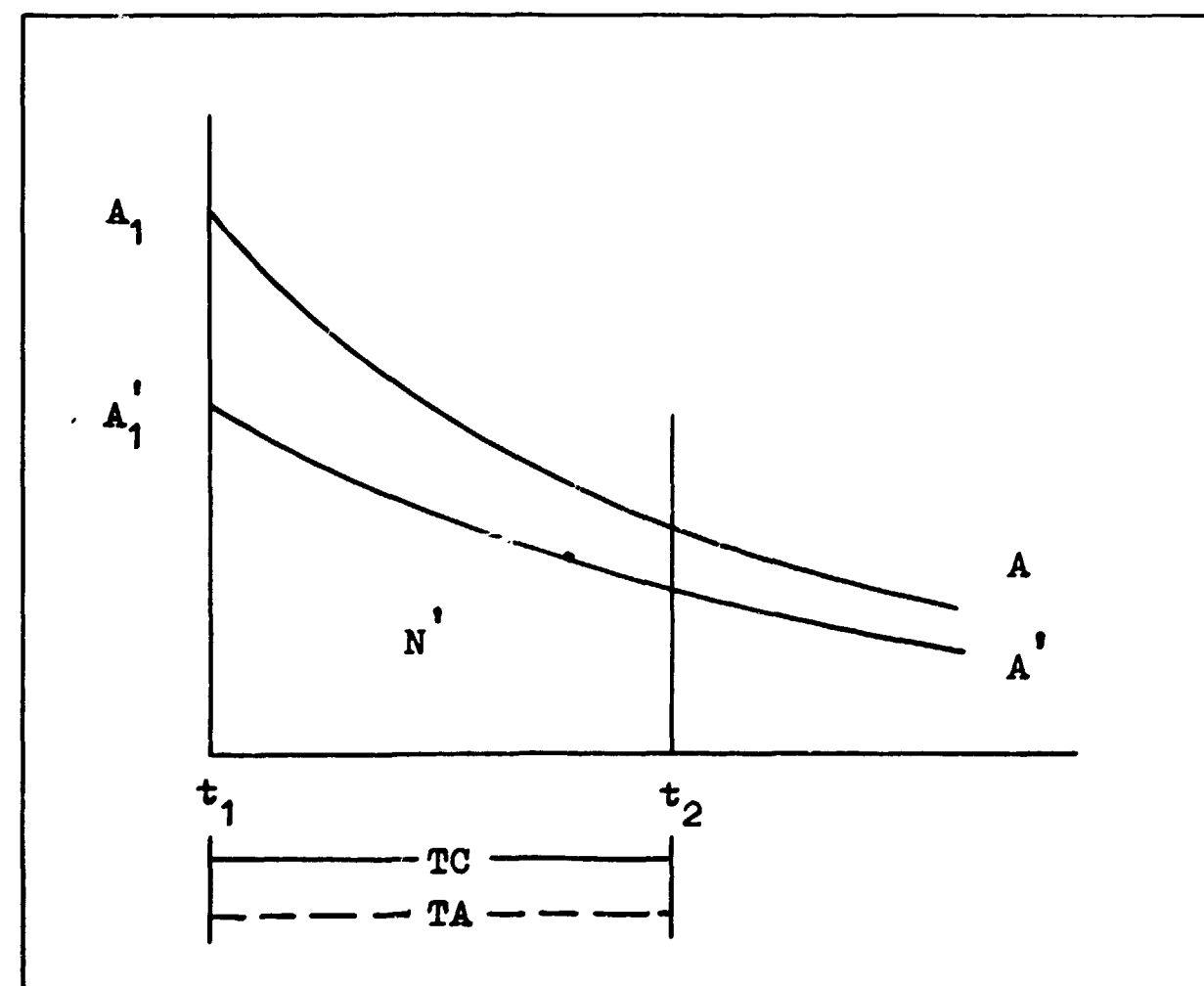


Figure 13

L'intégration de

$$N' = \int_0^{TC} \frac{A_1 e^{-\lambda t}}{1 + \omega A_1 e^{-\lambda t}} dt$$

donne

$$N' = \frac{1}{\lambda \omega} \ln \frac{1 + \omega A_1}{1 + \omega A_1 e^{-\lambda TC}} \quad (27)$$

On transforme en posant $TM = \omega N'$ et $TA = TC - TM$

$$N' = \frac{1}{\lambda \omega} \ln (1 + \omega A_1 (1 - e^{-\lambda TA})) \quad (28)$$

et trouve A_1

$$A_1 = \frac{e^{\lambda TM} - 1}{\omega(1 - e^{-\lambda TA})} = \frac{N'}{TM} \frac{e^{\lambda TM} - 1}{1 - e^{-\lambda TA}} \quad (29)$$

En développant $e^{\lambda TM} - 1$ en série, on trouve

$$A_1 = \frac{N'}{1 - e^{-\lambda TA}} \left(\lambda + \frac{\lambda^2 TM}{2!} + \frac{\lambda^3 TM^2}{3!} + \dots \right) \quad (30)$$

expression qui redonne (2) si $TM = 0$, donc $TA = TC$.

6.1 Formulation à partir du temps mort fractionnaire.

TMF a été défini par l'équation (18). C'est une référence d'usage courant. On sait en premier lieu que la précision de la correction automatique du chronomètre d'efficacité diminue fortement si TMF dépasse 0,5. D'autre part on verra que la validité des corrections de pertes au comptage dépend en particulier de ce paramètre.

De (18) on tire $TM = TC \cdot TMF$ et $TA = TC (1 - TMF)$. (29) devient

$$A_1 = \frac{N^+}{TC \cdot TMF} \cdot \frac{(e^{\lambda TC \cdot TMF} - 1)}{(1 - e^{-\lambda TC (1 - TMF)})} \quad (31)$$

7. Correction automatique du temps mort

En mettant en oeuvre le chronomètre d'efficacité ("live timer") des analyseurs multicanaux, on fixe comme temps de comptage un certain temps "actif" indépendant des pertes au comptage; une certaine durée globale pendant laquelle l'analyseur est "ouvert" vis-à-vis des impulsions qui peuvent survenir. Par suite le temps d'horloge - réel - est égal à la somme de ce temps "actif" et du temps mort.

Si l'on note TCA le Temps de comptage affiché en temps "actif",

$TC^+ = TCA + TM = TCA + \omega N^+$ est la durée totale du comptage. N^+ est le nombre d'impulsions enregistrées pendant un comptage en temps actif.

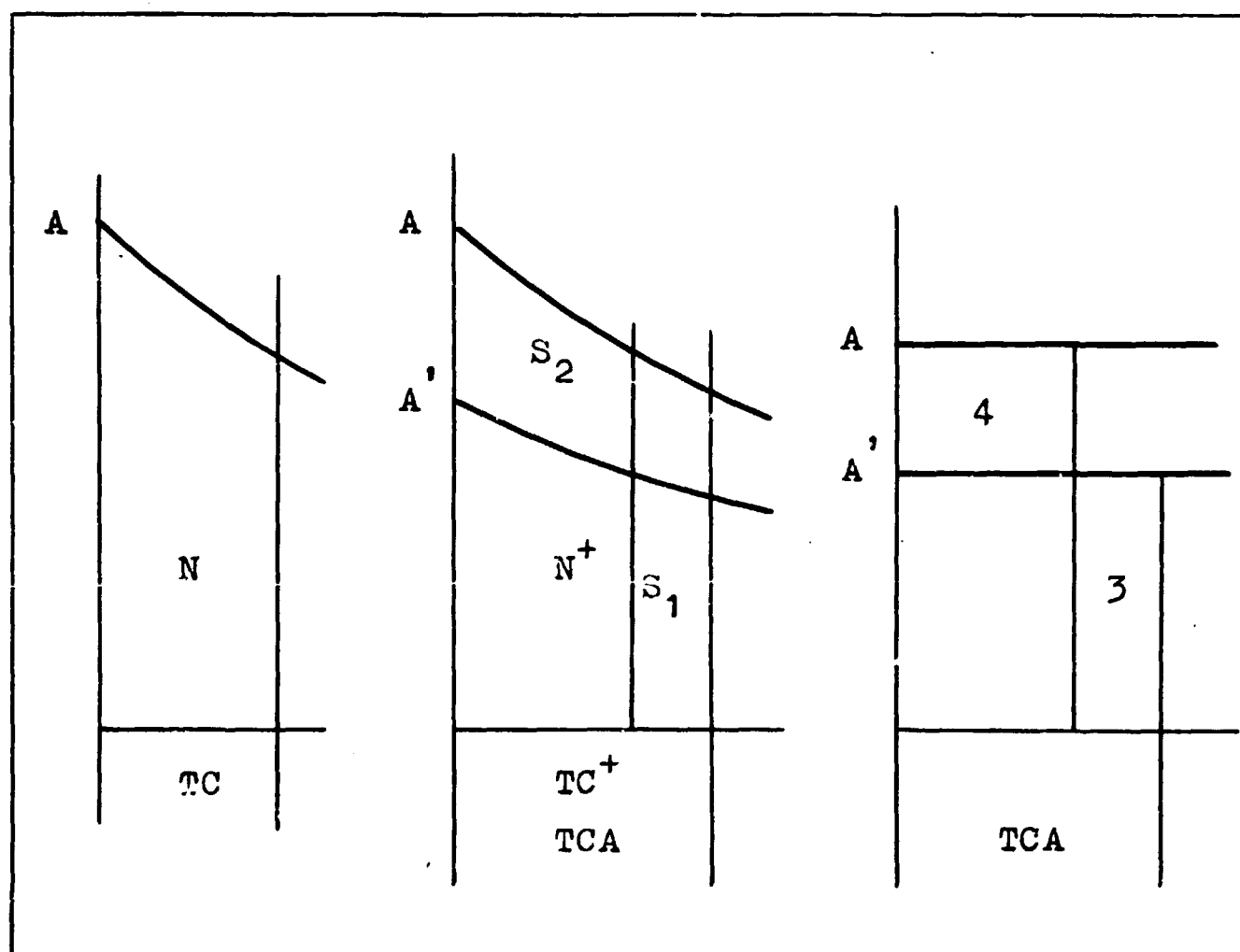


Figure 14

En regardant la Figure 14 on conçoit que le nombre d'impulsions N^+ compté dans ces conditions est inférieur à N qui aurait été compté en TC réel avec un appareil sans temps mort. En effet les temps morts individuels accumulés pendant le début du comptage sont compensés à la fin de celui-ci quand le taux de comptage a décliné. Les deux surfaces hachurées S_1 et S_2 ne sont pas égales: la première étant un peu plus petite que la seconde. (En période longue, le taux de comptage est constant si bien que la récupération des temps morts correspond à une récupération totale des impulsions: les surfaces S_3 et S_4 sont égales.)

On calcule N^+ par l'équation (28) en remplaçant TC par $TCA + \omega N^+$, autrement dit où TA devient TCA

$$N^+ = \frac{1}{\lambda \omega} \ln (1 + \omega A_1 (1 - e^{-\lambda TCA})) \quad (32)$$

7.1 Le taux de comptage initial réel déduit du nombre d'impulsions stockées est réciproquement

$$A_1 = \frac{\omega \lambda N^+ - 1}{\omega (1 - e^{-\lambda TCA})} = \frac{N^+ \omega \lambda TM - 1}{TM (1 - e^{-\lambda TCA})} \quad (33)$$

équation exacte analogue à (29)

7.2 En introduisant TMP, rapport du temps mort global $TM = \omega N^+$ au temps de comptage "actif" (Cf. 3.3 éq (19)), on peut écrire

$$A_1 = \frac{N^+ (\omega \lambda TCA \cdot TMP - 1)}{TCA \cdot TMP (1 - e^{-\lambda TCA})} \quad (34)$$

7.3 On préférera pour l'homogénéité des représentations rapporter le temps mort au temps réel de comptage, c-à-d se ramener à une expression en TMF

$$TMF = \omega N^+ / (TCA + \omega N^+) \quad (35)$$

On écrira

$$A_1 = N^+ \frac{1 - TMF}{TCA \cdot TMP} \frac{\omega \lambda TCA \cdot TMP / (1 - TMF) - 1}{1 - e^{-\lambda TCA}} \quad (36)$$

7.4 Calcul de N réel. Etant donné N^+ , nombre d'impulsions accumulées pendant une durée TCA, on calculera maintenant le nombre réel d'impulsions, N , qui aurait été enregistré pendant un temps réel TC égal à TCA avec un appareil sans temps mort.

N est donné par (1) où A_0 (équivalent dans ce cas à A_1) prend la valeur trouvée ci-dessus (33) en identifiant TC et TCA

$$N = \frac{e^{\lambda \omega N^+} - 1}{\lambda \omega} \quad (37)$$

On remarque que N est fonction de N^+ et du produit $\lambda \omega$.

8. Domaine de validité de la correction automatique

En comptage de période longue on a toujours le droit d'assimiler N^+ à N et de calculer le taux de comptage (constant) par la formule $A = N^+ / TCA$. Pour une période courte par contre cette réduction est en principe abusive. Mais pratiquement nous allons définir - à l'aide des paramètres ω , A_1 , TC/T ou ω , TC/T , N^+ (TMF) - un domaine où l'erreur est assez petite.

$$8.1 \text{ Rapport } RAA = \frac{(A_1^+ / A_1) - 1}{1 - A_1} = \frac{(N^+ / N) - 1}{1 - A_1}$$

On définit ainsi le rapport des "activités" ou nombres d'impulsions mesurés en temps actif et réels, l'"activité" vraie initiale étant donnée.

On part d'un taux de comptage initial réel A_1 et calcule le nombre d'impulsions enregistrées pendant un temps TCA (λ et ω donnés). Ce nombre d'impulsions N^+ est assimilé à N qui aurait été obtenu en un comptage sans temps mort de durée $TC = TCA$. On en tire le taux A_1^+ qui est comparé à A_1 .

N^+ est calculé par (32). On pose ensuite $N^+ = N$, $TCA = TC$ et par (2) on trouve

$$A_1^+ = \frac{\ln (1 + \omega A_1 (1 - e^{-\lambda TC}))}{\omega (1 - e^{-\lambda TC})} \quad (38)$$

Le rapport cherché est exprimé par

$$RAA = \frac{\ln (1 + \omega A_1 (1 - e^{-\lambda TC}))}{\omega A_1 (1 - e^{-\lambda TC})} \quad (39)$$

On voit qu'il est fonction du paramètre TC/T et du produit ωA_1 . Il est plus ou moins inférieur à 1 (Voir les Abaques ci-dessous) et tend vers 1 pour TC/T petit ou ωA_1 petit.

Le rapport des taux de comptage initiaux est évidemment aussi celui des nombres d'impulsions enregistrées. Calculant N par (1) et divisant (32) par la valeur trouvée, on obtient bien (39).

$$8.2 \quad \text{Rapport RAN} = \frac{(A_1^+/A_1)_{N^+}}{1} = \frac{(N^+/N)_{N^+}}{1}$$

Le sigle indique qu'il s'agit d'un rapport (des taux de comptage ou des nombres d'impulsions) pour une mesure en temps actif, le donné étant le nombre d'impulsions enregistrées.

Pratiquement on fait des mesures qui fournissent N^+ . A_1 est inconnu. On le calcule par (33). Mais puisqu'on a opéré la correction du temps mort par le chronomètre d'efficacité, il peut sembler légitime d'utiliser la formule réelle (2) sous la forme

$$A_1^+ = \frac{\lambda N^+}{1 - e^{-\lambda TCA}}$$

RAN est la mesure de l'erreur ainsi commise

$$RAN = \frac{\lambda \omega N^+}{e^{\lambda \omega N^+} - 1} \quad (40)$$

En divisant N^+ donné par N calculé au moyen de (37) on obtient évidemment RAN.

$$8.3 \quad \text{Rapport RAT} = \frac{(A_1^+/A_1)_{TMF}}{1} = \frac{(N^+/N)_{TMF}}{1}$$

(Rapport (des taux de comptage ou des nombres d'impulsions) pour une mesure en temps actif, le paramètre principal étant le temps mort fractionnaire du comptage.)

Même si TMF ou TMP ne sont exactement calculés qu'à partir de TCA et de la mesure directe de TC⁺ ou indirecte de ωN^+ , la lecture du galvanomètre de "temps mort" des analyseurs à environ mi-temps de comptage permet une estimation suffisante de TMF pour juger de la validité du calcul approché de A^+ . On posera un nouveau rapport RAT.

$$RAN_{TMP} = \frac{\lambda TCA.TMP}{e^{\lambda TCA.TMP} - 1}$$

et

$$RAN_{TMF} = \frac{\lambda TCA.TMF/(1-TMF)}{e^{\lambda TCA.TMF/(1-TMF)} - 1} \quad (41)$$

que l'on tire de (40) ou directement de (36).

Cette présentation a l'avantage de normaliser les résultats puisque le paramètre disparaît au profit de λTCA , c-à-d du rapport du temps de comptage - en actif - à la période.

En définitive la valeur calculée de A_1^+ à partir des données d'une mesure en temps actif peut être comparée à la valeur réelle qui aurait été mesurée avec un appareil idéal - ou calculée exactement - en fonction de TCA/T et TMF.

8.4 Les relations établies ci-dessus font ressortir que ω n'est pas une variable à proprement parler indépendante; mais qu'elle est toujours associée à A_1 ou N^+ . Pour simplifier les abaques qui vont être construits, on prendra pour paramètres les produits ωA_1 et ωN^+ . La Figure 15 permet d'en tirer les valeurs de A_1 (en ips) et N^+ pour différentes valeurs de ω comprises entre 1 et 100 $\mu s/imp$.

8.5 Calcul de TMF connaissant A_1 , ω , TCA/T.

Pour préparer une mesure il peut être utile de connaître à priori TMF puisque ce paramètre autorisera ou non la mesure en temps actif. Si A_1 est estimé, ω donné, on peut ainsi fixer TCA/T pour rester dans le domaine d'erreur acceptable (cf. ci-dessous).

On part de

$$TMF = \omega N^+ / (TCA + \omega N^+)$$

et remplace N^+ par sa valeur tirée de (32)

$$TMF = \frac{\ln(1 + \omega A_1 (1 - e^{-\lambda TCA}))}{\lambda TCA + \ln(1 + \omega A_1 (1 - e^{-\lambda TCA}))} \quad (42)$$

On aurait de même

$$TMP = \frac{\ln(1 + \omega A_1 (1 - e^{-\lambda TCA}))}{\lambda TCA} \quad (42a)$$

La Figure 16 présente les deux familles de courbes pour TC/T compris entre 0,03 et 3 et ωA_1 compris entre 0,03 et 3. On vérifie que pour ωA_1 petit, TMP^1 est équivalent à TMF .

8.6 Abaques pour RAA, RAN, RAT.

Pour permettre de juger pratiquement et rapidement l'erreur à laquelle on s'expose en opérant une mesure en temps "actif" suivant les conditions de départ ω , TC/T , (A_1) , les observations de temps mort et les résultats obtenus N^+ , on a établi 3 abaques par un calcul systématique sur machine électronique.

La Figure 17 concerne RAA. Elle a seulement une valeur indicative pour la préparation d'une mesure car la base en est le taux initial réel de comptage, inconnu en pratique mais qu'on peut parfois estimer.

Sur la Figure 18 - RAN - la période (non pas le rapport TC/T) apparaît comme paramètre, ce qui lui retire beaucoup de son utilité.

La Figure 19 - RAT - est la plus importante pratiquement. En effet si on prend TMI lu au début du comptage comme valeur (légèrement exagérée) de TMF , on en tire immédiatement l'erreur dont le comptage sera entaché. Elle permet corrélativement de fixer une durée de comptage à partir de TCA/T compatible avec une erreur acceptable.

Une fois la mesure terminée, les Figures 18 et 19 permettent de juger son degré de précision.

8.7 Valeur de la correction automatique de temps mort.

Il ressort de ces trois figures que la correction automatique de temps mort conduit à des valeurs de A_1 ou N^+ trop faibles par rapport aux valeurs réelles qui auraient été obtenues avec un appareillage idéal (sans temps mort) - ou ce qui revient au même qui procèdent d'un calcul rigoureux des pertes au comptage.

De plus un paramètre apparaît avoir une influence plus grande que les autres: il s'agit du facteur TC/T . Pour un couple donné de valeurs ωA_1 ou ωN^+ , l'erreur augmente rapidement avec TC/T .

L'ensemble de ce chapitre montre que le recours au chronomètre d'efficacité ("live timer") est acceptable dans un domaine très restreint de conditions expérimentales même si on admet une erreur de 5%. Ce n'est donc pas le mode de comptage adéquat pour les radionucléides à périodes courtes.

9. Comptage en temps réel avec mesure du temps actif. Facteur de correction TC/TA

On a cherché un autre mode de comptage associé à une correction simple qui fournisse une valeur suffisamment exacte de A_1 (ou N) dans un domaine plus étendu de conditions expérimentales.

Au lieu de fixer un temps de comptage "actif" (TCA) et de laisser opérer le chronomètre d'efficacité, on peut afficher un temps réel (d'horloge) TC et mesurer le temps actif TA qui lui correspond. Cette mesure est réalisable à l'aide d'un chronomètre extérieur au sélecteur multicanal sur lequel agit le signal de temps mort de celui-ci. Cf. PARTIE D.

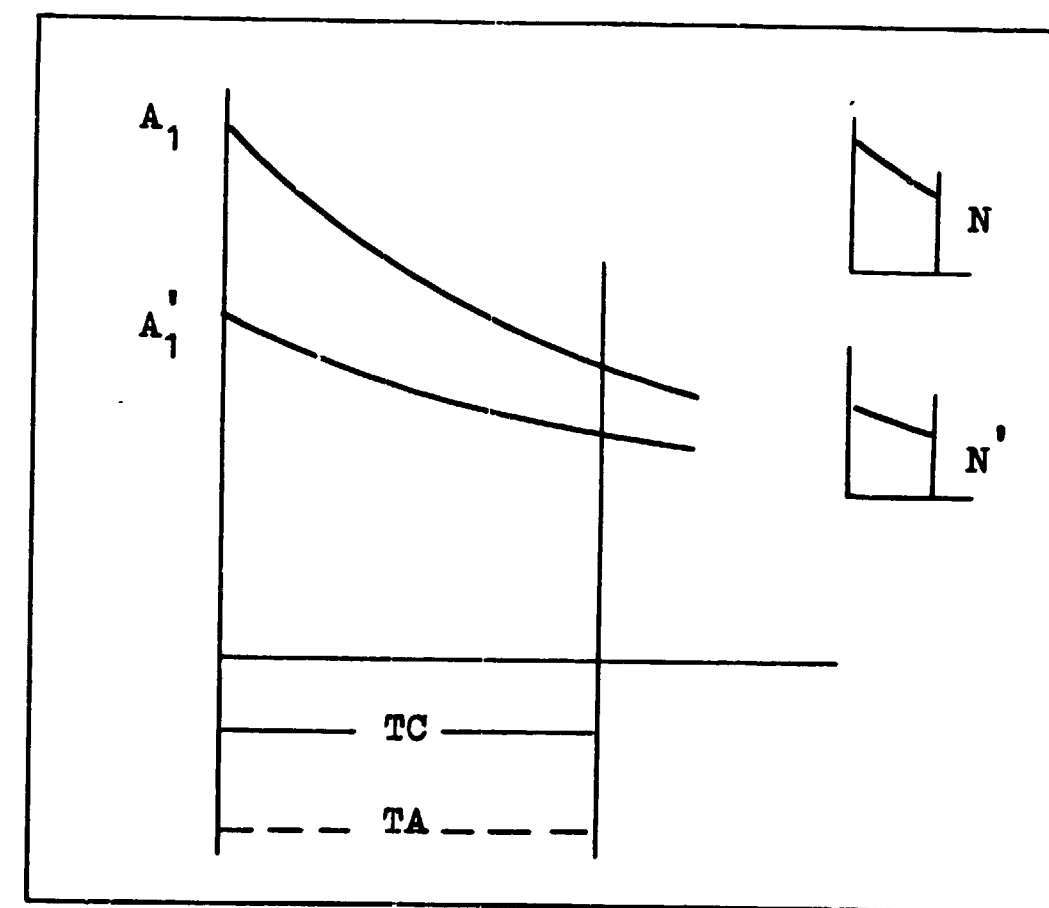


Figure 20

A partir de N' et TA mesurés (λ , TC , ω donnés) le calcul exact de A_1 est possible par (29). On pourra toujours l'effectuer à l'extérieur du domaine que nous cherchons à délimiter où une correction linéaire appliquée à N' par le facteur TC/TA amène une erreur négligeable.

Soit (Figure 20) λ , ω donnés,

TC durée réelle de la mesure,

TA durée "active" mesurée conjointement,

N' nombre d'impulsions enregistrées,

on pose que le nombre d'impulsions corrigé est égal au résultat du comptage multiplié par le rapport des temps de comptages réel et actif.

On marquera d'un astérisque les quantités ainsi corrigées.
Donc par définition

$$N^* = N' \frac{TC}{TA} = N' \frac{TC}{TC - \omega N'} \quad (43)$$

Par (2) on obtient

$$A_1^* = N' \frac{TC}{TA} \frac{\lambda}{1 - e^{-\lambda TC}} \quad (44)$$

Il s'agit maintenant de comparer N^* à N, parallèlement A_1^* à A_1 pour déterminer le domaine d'application.

10. Domaine de validité de la correction par le facteur TC/TA

$$10.1 \quad \text{Rapport RRA} = \frac{(A_1^*/A_1)_{A_1}}{A_1} = \frac{(N^*/N)_{A_1}}{A_1}$$

(Rapport (des taux de comptage ou des nombres d'impulsions) pour une mesure en temps réel, l' "activité" - taux de comptage - initiale étant donnée.)

On emploie le même procédé qu' en 8.1. Pour alléger la suite des calculs on posera

$$K = \frac{1 + \omega A_1}{1 + \omega A_1 e^{-\lambda TC}} \quad (45)$$

Par (43) et (27) on obtient

$$N^* = \frac{1}{\omega} \frac{TC \cdot \ln K}{TC - \ln K} \quad (46)$$

Remontant à A_1^* par (2)

$$A_1^* = \frac{\lambda TC \cdot \ln K}{\omega(1 - e^{-\lambda TC})(\lambda TC - \ln K)} \quad (47)$$

En divisant (47) par A_1 donnée initiale, on trouve

$$RRA = \frac{\lambda TC \cdot \ln K}{\omega A_1 (1 - e^{-\lambda TC}) (\lambda TC - \ln K)} \quad (48)$$

Puisque le terme $\lambda / (1 - e^{-\lambda TC})$ est commun à (2) et à (44), on a aussi

$$N^* / N = RRA$$

On constate qu'ici encore on obtient une fonction des couples ωA_1 et TC/T .

$$10.2 \quad \text{Rapport } RRN = \frac{(A_1^*/A_1)_{N'}}{1-1} = (N^*/N)_{N'}$$

(Rapport (des taux de comptage ou des nombres d'impulsions) pour une mesure en temps réel, le nombre d'impulsions enregistrées étant donné.)

De même qu'en 8.2, on part maintenant de N' pour calculer A_1 par (44) que l'on compare à A_1 vrai donné par (29).

On se souvient que l'on a $TA = TC - TM$ et $TM = \omega N'$.

$$RRN = \frac{\omega N' \cdot TC (1 - e^{-\lambda (TC - \omega N')})}{(TC - \omega N') (1 - e^{-\lambda TC}) (e^{\lambda \omega N'} - 1)} \quad (49)$$

Le calcul de N^*/N s'effectuerait de son côté en partant de (43) et de (1) où A_1 est remplacé par sa valeur tirée de (29). On trouve bien que le rapport des nombres d'impulsions est égal à RRN .

RRN apparaît être fonction non seulement de $\omega N'$ et TC/T mais aussi de λ et TC indépendamment.

$$0.3 \quad \text{Rapport } RRT = \frac{(A_1^*/A_1)_{TMF}}{1-1} = (N^*/N)_{TMF}$$

(Rapport (des taux de comptage ou des nombres d'impulsions) pour une mesure en temps réel, le paramètre principal étant le temps mort fractionnaire.)

Pour réduire le nombre de paramètres aux deux couples habituels, on introduira ici encore $TMF = \omega N' / TC$.

$$RRT = \frac{\lambda TC \cdot TMF (1 - e^{-\lambda TC (1 - TMF)})}{(1 - TMF) (1 - e^{-\lambda TC}) (e^{\lambda TC \cdot TMF} - 1)} \quad (50)$$

10.4 Calcul de TMF en fonction de A_1 .

A toutes fins utiles (Cf. 8.5) on donne dans la Figure 21 la variation de TMF en fonction de TC/T calculée à partir de ωA_1 par

$$TMF = \omega N' / TC$$

N' étant tiré de (27), on a

$$TMF = \ln K / \lambda TC \quad (51)$$

La Figure 21 montre de plus que pour de faibles valeurs de ωA_1 et TC/T, TMF est identique que l'on compte en temps réel ou en temps "actif".

10.5 Abaques pour RRA et RRT.

Parallèlement à ce qui a été fait en 8.6, des abaques ont été construits pour RRA et RRT, afin de juger de la valeur de la correction par TC/TA. Cependant RRA qui est fonction de λ et TC indépendamment est difficile à représenter et n'offre pas d'intérêt pratique.

La Figure 22 met en évidence l'influence d'importance inégale des deux paramètres ωA_1 et TC/T et sert de pendant à la Figure 17.

Pour préparer une mesure et ensuite juger de sa précision, la Figure 23 construite pour RRT est essentielle. Pour la raison qui a été dite, les courbes n'ont été tracées que pour TMF s'élevant jusqu'à 60%.

10.6 Valeur de la correction par TC/TA. Comparaison avec la correction automatique de temps mort.

On observe ici - comme en temps actif - que la correction proposée aboutit à des résultats trop faibles par rapport aux valeurs calculées rigoureusement. Le rapport du temps de comptage à la période joue un rôle encore plus important que pour un comptage en temps actif.

Il apparaît immédiatement de la comparaison des Figures 17 et 22 et des Figures 19 et 23 que le domaine de validité de la correction linéaire appliquée à un comptage en temps réel est beaucoup plus étendu que celui de la correction automatique du temps mort.

Ainsi pour ωA_1 s'élevant à 3, il faut pour ne pas dépasser -1% d'erreur limiter le temps de comptage à $0,01T$ en temps actif et à $0,5T$ en temps réel. De même on peut conserver cette précision lors d'un comptage durant $1T$ pour TMF égal à 20% en temps réel alors que le comptage en temps actif serait invalidé au-dessus de 2-3%.

En conclusion de ce chapitre on tire de la Figure 23 la règle suivante:

Etant donné que le taux de comptage ne peut être tel que le temps mort fractionnaire dépasse 50-60% - ceci pour assurer un fonctionnement correct de l'analyseur - tout comptage en temps réel d'un radionucléide de période courte pur durant au plus 0,5 période peut être corrigé simplement en multipliant le nombre d'impulsions enregistrées par le rapport du temps de comptage au temps actif mesuré, l'erreur ne dépassant pas 1% par défaut.

B 2. COMPTAGE D'UN RADIONUCLÉIDE DE PERIODE COURTE
MELANGE A UN OU PLUSIEURS RADIONUCLÉIDES DE
PERIODES LONGUES.

11. Remarque préliminaire

L'étude des corrections approchées de temps mort faite au chapitre précédent peut paraître superflue puisqu'on a établi par ailleurs les formules rigoureuses qui permettent dans un mode de comptage comme dans l'autre de trouver le taux de comptage initial exact. Cependant ces équations ne sont pas très simples et dans la pratique on se tient généralement aux approximations décrites. Il était donc nécessaire de montrer qu'il s'agit bien d'approximations et d'en délimiter quantitativement la validité.

De plus les calculs effectués sur un cas simple (période courte pure) doivent servir d'introduction à l'étude des phénomènes plus souvent rencontrés où la source à analyser par spectrométrie gamma est composée d'un ou plusieurs radionucléides à périodes courtes et d'un ou plusieurs radionucléides à périodes longues.

Dans le cas où une seule période courte est mélangée à une ou plusieurs périodes longues, on peut encore effectuer des calculs exacts néanmoins plus complexes. Il s'avérera d'autant plus utile de reconnaître les possibilités des corrections approchées. Ce sera l'objet de la PARTIE B 2.

Par contre le problème général (plusieurs périodes courtes mélangées à plusieurs périodes longues) ne pourra être résolu que par approximation en réduisant ce cas au précédent (PARTIE B 3). C'est alors que les abaques de la PARTIE B 2 serviront le mieux à fixer les conditions d'une mesure aussi précise - sur ce point - que l'on voudra.

12. Temps mort moyen variable

Quand plusieurs spectres gamma d'un mélange de radionucléides à périodes courte et longue sont enregistrés au cours de la décroissance de la période courte, la forme du spectre varie.

En d'autres termes le temps mort moyen pour chaque spectre successif varie - diminuant ou augmentant selon que l'énergie gamma du radionucléide de période courte est plus grande ou plus petite que celle du radionucléide de période longue. La Figure 24 présente un exemple de ce phénomène.

12.1 On peut définir un temps mort moyen pour le mélange, $\bar{\omega}$, par la formule

$$\bar{\omega} = \frac{\sum \omega_j A_j'(t)}{\sum A_j'(t)} \quad (52)$$

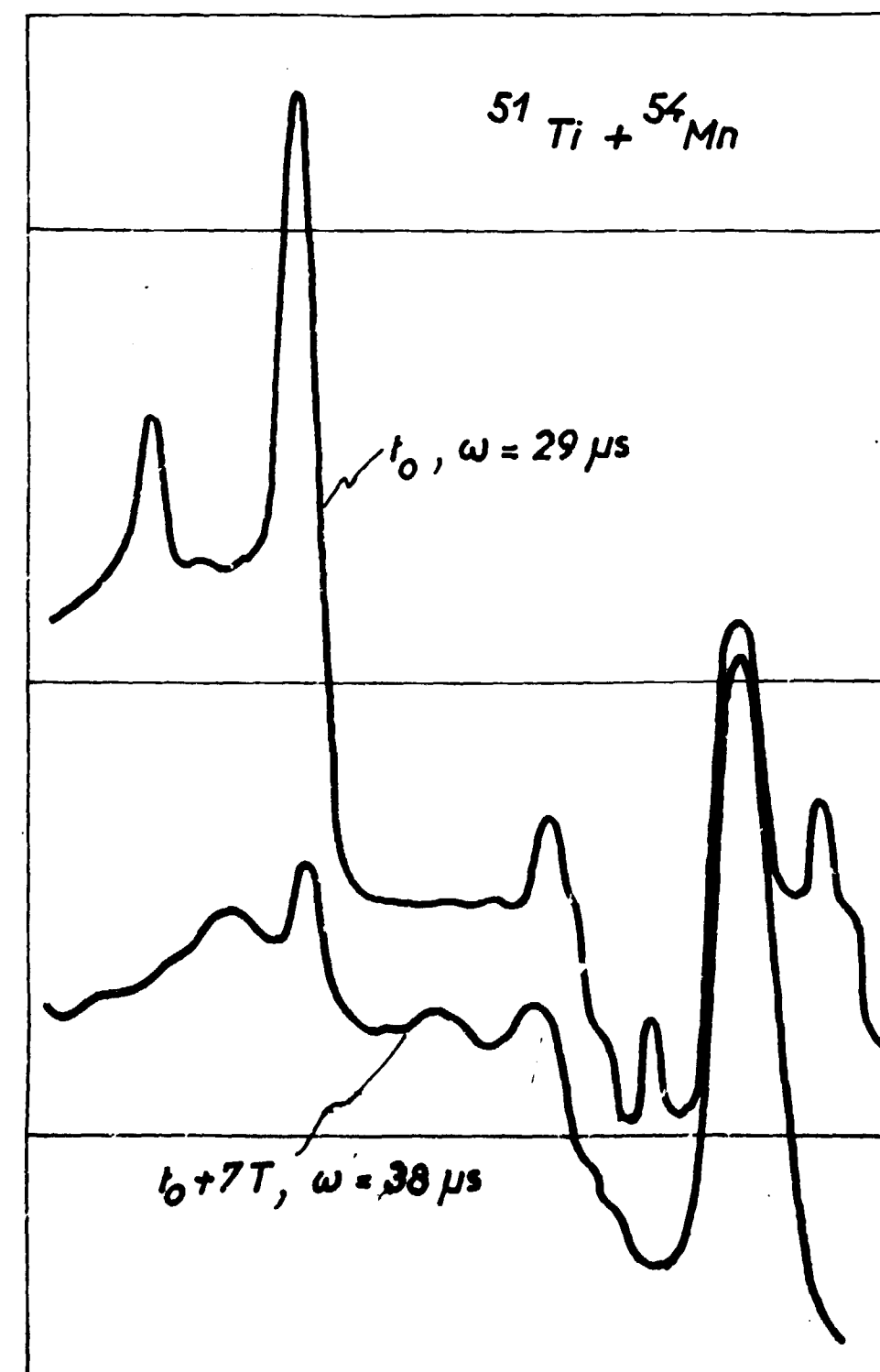


Fig. 24

13. Temps mort moyen composé

Cependant pour les calculs de correction qui suivent, on peut considérer le temps mort moyen comme une combinaison des temps morts moyens liés aux spectres élémentaires de la période courte et de la période longue: ω_c et ω_1 .

Ceux-ci sont constants au cours du temps. Ils peuvent être calculés par la formule (15) respectivement pour l'un et l'autre spectre pur. De plus la présence de plusieurs radio-nucléides de périodes longues ne pose pas de problème sinon de calculer le temps mort moyen ω_1 (fixe) résultant du mélange en proportions constantes des diverses périodes longues en jeu.

13.1 Le Temps mort global est ici

$$TM = \sum_j \omega_j \sum_i c_{ij} \quad (53)$$

que l'on peut décomposer

$$\begin{aligned} TM &= \omega_c \sum c_{ic} + \omega_1 \sum c_{i1} \\ &= \omega_c N'_c + \omega_1 N'_1 \\ &= TM_c + TM_1 \end{aligned} \quad (54)$$

13.2 Le Temps mort fractionnaire est de même décomposable

$$\begin{aligned} TMF &= \omega_c N'_c / TC + \omega_1 N'_1 / TC \\ &= TMF_c + TMF_1 \end{aligned} \quad (55)$$

13.3 TMI sera encore défini par

$$TMI = \sum_j \omega_j A'_j \quad (56)$$

On a en particulier

$$TMI(t) = \omega_c A'_c(t) + \omega_1 A'_1(t) \quad (57)$$

variable avec le temps.

14. Relations fondamentales entre les taux de comptage réel et effectif

Comme en B 1, 4, on part du fait que TMI mesure la perte au comptage

$$\sum A'_j = \sum A_j (1 - TMI) \quad (58)$$

En même temps on remarquera que cette perte est proportionnellement identique pour chaque constituant. Il est évident que si à un moment donné $TMI = 0,5$, chaque taux de comptage individuel sera moitié de ce qu'il serait sans temps mort et que le taux global effectif est également moitié du taux global réel. On a donc la double relation

$$\frac{\sum A'_j}{\sum A_j} = \quad (59a)$$

$$\begin{aligned} 1 - TMI &= 1 - \sum_j \omega_j A'_j \\ \frac{A'_j}{A_j} &= \quad (59b) \end{aligned}$$

(En comptage de périodes longues, on peut raisonner sur les nombres d'impulsions enregistrées pendant TC (TA):

$$\frac{N'_1}{N_1} = \frac{N'_2}{N_2} = \frac{N'_1 + N'_2}{N_1 + N_2} = \frac{TA}{TC}$$

A partir de cette équation on peut calculer A'_j en fonction des quantités réelles

$$\frac{A'_j}{A_j} = 1 - \sum_j \omega_j A'_j = 1 - \sum_j \omega_j A_j \frac{A'_j}{A_j}$$

soit

$$A'_j = \frac{A_j}{1 + \sum_j \omega_j A_j} \quad (60)$$

De (56) et (60) on tire

$$TMI = \frac{\sum \omega_j A_j}{1 + \sum \omega_j A_j} \quad (61)$$

En décomposant

$$TMI_c = \frac{\omega_c A_c}{1 + \sum \omega_j A_j} \quad (62)$$

15. Décroissance apparente des taux de comptage effectifs et du temps mort instantané

Pour illustrer la décroissance apparente du taux de comptage effectif d'un radionucléide de période courte en présence d'un radionucléide de période longue, on a choisi le couple $^{28}\text{Al} + ^{24}\text{Na}$. Sur les Figures 25 a et b sont tracées pendant 1 période de ^{28}Al les courbes $A'_{\text{Al}}(t)$ et $A'_{\text{Na}}(t)$ ainsi que $TMI(t)$ pour deux rapports initiaux $A_{\text{Al}}/A_{\text{Na}}$.

On constate que le taux de comptage de la période courte décroît un peu moins vite que théoriquement pour les raisons qui ont été dites en B 1,5, mais aussi un peu moins vite que si la période courte était seule. Il est d'autre part intéressant de noter que le taux de comptage de la période longue commence par croître jusqu'à tendre, après décroissance totale de la période courte, au taux constant donné par: $TMI \rightarrow TMI_1$, $A'_1 \rightarrow A_1/(1+\omega_1 A_1)$

16. Correction exacte du temps mort. Calcul de A_{1c} et A_{1l} .

Soit un mélange de 1 radionucléide de période courte et de 1 radionucléide de période longue. On a les taux réels

$$A_c(t) = A_{oc} e^{-\lambda t} \quad \text{et} \quad A_l(t) = \text{cte},$$

les spectres individuels étant caractérisés par les temps morts moyens ω_c et ω_l .

On mesure pendant un temps réel TC - soit un temps actif TA - des nombres d'impulsions N'_c et N'_l . Ces nombres sont en fait obtenus à partir du spectre complexe enregistré par un procédé de calcul comme la méthode des moindres carrés (Cf. PARTIE D).

On veut calculer les taux de comptage initiaux réels

de la période courte et accessoirement de la période longue, à l'instant t_1 : A_{1c} et A_{1l} , que l'on notera ci-dessous simplement A_c et A_l .

L'expression des taux de comptage effectifs est:

$$A'_c(t) = \frac{A_c e^{-\lambda t}}{1 + \omega_l A_l + \omega_c A_c e^{-\lambda t}} \quad (60a)$$

$$A'_l(t) = \frac{A_l}{1 + \omega_l A_l + \omega_c A_c e^{-\lambda t}} \quad (60b)$$

16.1 Calcul de A_c .

L'intégration de (60a) entre $t = 0$ et $t = TC$ donne

$$N'_c = \frac{1}{\lambda \omega_c} \ln \frac{1 + \omega_l A_l + \omega_c A_c}{1 + \omega_l A_l + \omega_c A_c e^{-\lambda TC}} \quad (63)$$

Pour alléger l'écriture on pose

$$Q = \ln \frac{1 + \omega_l A_l + \omega_c A_c}{1 + \omega_l A_l + \omega_c A_c e^{-\lambda TC}} \quad (64)$$

d'où

$$N'_c = \frac{\ln Q}{\lambda \omega_c} \quad (63a)$$

De (63) on tire une première expression pour A_c

$$A_c = \frac{(1 + \omega_l A_l)(e^{\lambda \omega_c N'_c - 1})}{\omega_c (1 - e^{-\lambda(TC - \omega_c N'_c)})} \quad (65)$$

Conventions d'écriture:

Par la suite on notera toujours A_1 en fonction de A_c par le rapport

$$x = A_1/A_c$$

De même

$$y = N'_1/N'_c \quad (66a, b, c)$$

et

$$z = \omega_1/\omega_c$$

(65) se transforme ainsi en

$$A_c = \frac{e^{\lambda \omega_c N'_{c-1}}}{\omega_c (1 - e^{-\lambda(TC - \omega_c N'_c)} - xz(e^{\lambda \omega_c N'_{c-1}}))} \quad (67)$$

On constate facilement qu'en égalant xz à 0 ($\omega_c N'_c \rightarrow TM$) - c-à-d en revenant au cas de la période courte pure - on retrouve bien l'équation (29).

Mais (67) est hétérogène car A_c est exprimé en fonction du nombre d'impulsions enregistrées de période courte et du taux de comptage initial de la période longue. On va la rendre homogène par l'intermédiaire du calcul de A_1 .

16.2 Calcul de A_1 .

En intégrant (60b) entre les mêmes limites on obtient

$$N'_1 = \frac{A_1 TC}{1 + \omega_1 A_1} - \frac{A_1}{(1 + \omega_1 A_1)} \ln Q \quad (68)$$

Après décroissance complète de la période courte, on a $A_c = 0$ et on trouve $N'_1 = A_1 TC / (1 + \omega_1 A_1)$, qui amène

$$A_1 = N'_1 / TA \quad (69)$$

ce qui est évident.

On va montrer que même en présence de période courte A_1 est toujours donné par la formule (69). Cela s'explique bien si l'on considère que pendant tout le temps de mesure le taux de comptage réel de la période longue est constant.

Si on remplace dans (68) $\ln Q$ par son expression tirée de (63a): $\ln Q = \lambda \omega_c N'_c$, N'_1 vient

$$N'_1 = \frac{A_1 (\lambda TC - \lambda \omega_c N'_c)}{(1 + \omega_1 A_1)}$$

d'où

$$A_1 = \frac{N'_1}{TC - \omega_c N'_c - \omega_1 N'_1} \quad (70)$$

et par (54)

$$A_1 = N'_1 / (TC - TM) = N'_1 / TA \quad (69)$$

16.3 Expression définitive de A_c .

Introduisant (70) dans (65) et avec les conventions ci-dessus, on trouve

$$A_c = \frac{\left(1 + \frac{yz \omega_c N'_c}{TC - \omega_c N'_c (1 + yz)}\right) (e^{\lambda \omega_c N_{c-1}})}{\omega_c (1 - e^{-\lambda (TC - \omega_c N'_c)})} \quad (71)$$

A_1 peut être formulé accessoirement par

$$A_1 = \frac{y N'_c}{TC - \omega_c N'_c (1 + yz)} \quad (72)$$

17. Correction automatique du temps mort

On se reportera à l'introduction de B1, 7. Ce qui est en jeu ici est l'erreur que des mesures en temps "actif" peuvent introduire dans des comptages d'un radionucléide de période courte mélangé à un ou plusieurs radionucléides de périodes longues.

Il s'agit donc de calculer le rapport A_c^+/A_c pour un couple donné des quantités initiales $\omega_1 A_1 / \omega_c A_c$ ou à partir des résultats expérimentaux N_1^+ / N_c^+ . En fait le premier de ces rapports n'est pas calculable aisément. Comme il a peu d'importance pratique il peut être négligé.

$$17.1 \quad \text{Rapport RAN2} = \frac{(A_c^+/A_c)_{yN_c^+}}{yN_c^+} = \frac{(N_c^+/N_c)_{yN_c^+}}{yN_c^+}.$$

(Rapport (des taux de comptage ou des nombres d'impulsions -de la période courte-) pour une mesure en temps actif, le donné étant les nombres d'impulsions -P. courte et P. longue-enregistrées; problème à deux constituants.)

En écrivant (65) pour un comptage de durée active TCA, c-à-d de durée réelle

$$TC^+ = TCA + \omega_c N_c^+ + \omega_1 N_1^+$$

et remplaçant A_1 par

$$A_1 = N_1^+ / TCA \quad (69a)$$

on obtient

$$A_c = \frac{\left(1 + \frac{\omega_1 N_1^+}{TCA}\right) (e^{\lambda \omega_c N_c^+} - 1)}{\omega_c (1 - e^{-\lambda(TCA + \omega_1 N_1^+)})} \quad (73)$$

Comme en B1, 8.2, on pose par définition

$$A_c^+ = \frac{\lambda N_c^+}{1 - e^{-\lambda TCA}}$$

et en introduisant les conventions d'écriture (66) on trouve

$$\text{RAN2} = \frac{\lambda \omega_c N_c^+ (1 - e^{-\lambda(TCA + yz \omega_c N_c^+)})}{(1 - e^{-\lambda TCA}) (e^{\lambda \omega_c N_c^+} - 1) (1 + \frac{yz \omega_c N_c^+}{TCA})} \quad (74)$$

Si $yz = 0$, (74) se simplifie et redonne (40) valable pour une période courte seule.

$$17.2 \quad \text{Rapport RAT2} = (A_c^+/A_c)_{yz, TMF} = (N_c^+/N_c)_{yz, TMF}.$$

(Les deux paramètres sont le temps mort fractionnaire et le rapport des temps morts individuels liés à la période longue et à la période courte.)

De (18) et (54) on tire

$$\text{TMF} = \frac{TM}{TC^+} = \frac{(1+yz) \omega_c N_c^+}{TCA + (1+yz) \omega_c N_c^+} \quad (75)$$

d'où est extrait $\omega_c N_c^+$

$$\omega_c N_c^+ = TCA \frac{\text{TMF}}{1 - \text{TMF}} \frac{1}{1 + yz} \quad (76)$$

que l'on remplace dans (74) par l'expression trouvée pour obtenir RAT2

$$\text{RAT2} = \frac{\lambda TCA \frac{\text{TMF}}{1 - \text{TMF}} \frac{1}{1 + yz} (1 - e^{-\lambda TCA (1 + \frac{\text{TMF}}{1 - \text{TMF}} \frac{yz}{1 + yz})})}{(1 - e^{-\lambda TCA}) (e^{\lambda TCA \frac{\text{TMF}}{1 - \text{TMF}} \frac{1}{1 + yz}} - 1) (1 + \frac{\text{TMF}}{1 - \text{TMF}} \frac{yz}{1 + yz})} \quad (77)$$

On vérifie que si $yz = 0$ on retrouve l'expression (41).

17.3 Abaque pour RAT2.

On retrouve sur la Figure 26 la présentation de ce rapport en fonction de TCA/T , avec cette fois 2 paramètres: TMF et yz .

Pour $yz = 0$ on retombe dans le cas de la période courte pure et reconnaît la famille de courbes de la Figure 19.

On constate que quel que soit le rapport Période longue/ Période courte, la mesure en temps "actif" est aussi peu satisfaisante, sauf lorsque TCA/T ne dépasse pas 0,1.

18. Comptage en temps réel. Facteur de correction TC/TA

On a indiqué en B1, 9 le principe de la mesure en temps réel. On cherchera ici à calculer le rapport

$$N_c^*/N_c \text{ où } N_c^* = N_c' \frac{TC}{TA} = N_c' \frac{TC}{TC - \omega_c N_c' - \omega_1 N_1'} , \text{ soit le rapport}$$

équivalent A_{1c}^*/A_{1c} , A_{1c}^* étant le taux de comptage initial de la Période courte calculé, A_{1c} son taux vrai.

(On simplifiera l'écriture en négligeant l'indice (1) de début de comptage.)

$$18.1 \quad \text{Rapport RRA2} = \frac{(A_c^*/A_c)_{xy, \omega_c A_c}}{(N_c^*/N_c)_{xy, \omega_c A_c}} = \frac{(A_c^*/A_c)_{xy, \omega_c A_c}}{(N_c^*/N_c)_{xy, \omega_c A_c}}$$

Avec les conventions (66) on écrit Q

$$Q = \frac{1 + \omega_c A_c (1 + xz)}{1 + \omega_c A_c (e^{-\lambda TC} + xz)} \quad (64a)$$

et N_1'

$$N_1' = \frac{x A_c (\lambda TC - \ln Q)}{\lambda (1 + xz \omega_c A_c)} \quad (68b)$$

N_c^* est calculé selon la formule de définition ci-dessus

$$N_c^* = \frac{\lambda TC \cdot \ln Q}{\omega_c \left((\lambda TC - \ln Q) \left(1 - \frac{xz\omega_c A_c}{1+xz\omega_c A_c} \right) \right)} \quad (78)$$

Divisant par N (1) on trouve

$$RRA2 = \frac{\lambda TC \cdot \ln Q (1+xz\omega_c A_c)}{\omega_c A_c (1-e^{-\lambda TC}) (\lambda TC - \ln Q)} \quad (79)$$

Si $xz = 0$, on retrouve bien l'équation (48).

18.2 Calcul de TMF , TMF_c , TMF_c/TMF . Calcul de N_c'/N_1' .

Il peut être intéressant de montrer la variation du temps mort fractionnaire dû à la période courte par rapport au temps mort fractionnaire total en fonction de $xz\omega_c A_c$ et de TC/T . Partant de ces données connues à priori ou estimées on peut aussi calculer le rapport des nombres d'impulsions enregistrées pour la Période courte et la Période longue.

Par (63a) et (68b) on trouve

$$\frac{N_c'}{N_1'} = \frac{\ln Q (1+xz\omega_c A_c)}{xz\omega_c A_c (\lambda TC - \ln Q)} \quad (80)$$

En multipliant par $\omega_c / xz\omega_c$, on obtiendrait le rapport TM_c/TM_1 .

TMF_c est exprimé par $\ln Q / \lambda TC$ (63a). On calcule TMF par l'intermédiaire de (69) et (68b)

$$TMF = (TC - N_1' / A_1) / TC$$

d'où

$$\frac{TMF_c}{TMF} = \frac{\ln Q \cdot (1 + xz \omega_c A_c)}{\lambda TC \cdot xz \omega_c A_c + \ln Q} \quad (81)$$

On vérifie encore que si $xz = 0$ TMF_c se confond avec TMF .

La Figure 27 présente une famille de courbes pour le rapport TMF_c / TMF en fonction de TC/T et xz . On constate que pour TC/T petit, le rapport se rapproche de $1/(1+xz)$, valeur qui serait obtenu pour un mélange de périodes longues, et diminue évidemment avec l'augmentation du rapport TC/T . En fait (81) est encore fonction de la valeur absolue de $\omega_c A_c$. Le calcul systématique a montré cependant que pour $\omega_c A_c$ variant de 0,03 à 3, la différence sur TMF_c / TMF ne dépasse pas 3% dans le cas le plus défavorable où TC/T est grand et xz petit. On peut admettre que TMF_c / TMF ne dépend que de TC/T et xz .

$$18.3 \quad \text{Rapport } RRT2 = (A_c^* / A_c)_{yz, TMF} = (N_c^* / N_c)_{yz, TMF}$$

Il s'agit ici de traiter le problème général où N_c^* et N_1^* sont données d'expérience, à partir de quoi on veut calculer A_c . L'approximation exposée en B1, 9 est utilisée et l'on veut déterminer l'erreur commise dans un certain domaine de variation des facteurs TC/T et yz .

On part de

$$N_c^* = N_c' \frac{\lambda TC}{TC - \omega_c N_c' - \omega_1 N_1'} \quad (82)$$

et calcule A_c^* par (2). A_c vrai est donné par (71). Il vient

$$RRT2 = \frac{\omega_c N_c' \lambda TC (1 - e^{-\lambda (TC - \omega_c N_c')})}{(1 - e^{-\lambda TC}) (e^{\lambda \omega_c N_c'} - 1) (TC - \omega_c N_c' (1 + yz)) (1 + \frac{yz \omega_c N_c'}{TC - \omega_c N_c' (1 + yz)})} \quad (83)$$

En reprenant (54) et (66) on obtient la relation

$$TM_c / TM_1 = TM_c / (TM - TM_c) = 1/yz$$

d'où l'on tire

$$TM_c = TM / (1 + yz)$$

Puis en introduisant les temps morts fractionnaires, on transforme (83)

$$RRT2 = \frac{\lambda TC \cdot TMF \frac{1}{1 + yz} (1 - e^{-\lambda TC (1 - \frac{TMF}{1 + yz})})}{(1 - TMF) (1 - e^{-\lambda TC}) (e^{\lambda TC \frac{TMF}{1 + yz}} - 1) (1 + \frac{yz \cdot TMF}{(1 - TMF) (1 + yz)})} \quad (84)$$

On vérifie une fois de plus que pour $yz = 0$ on retrouve l'expression donnée en traitant une Période courte seule.

18.4 Abaque pour RRT2. Figure 28.

(Pour $yz = 0$, on retrouve les courbes de la Figure 23).

La constatation que l'on tire de cette Figure est que la correction est d'autant meilleure que la proportion d'activité de période longue est plus grande. Il est évident qu'en ce cas on se rapproche de la Période longue pure où la correction est toujours exacte.

Il faut ajouter que ces courbes traduisent un état de fait, à savoir la nécessité de compter un radionucléide de période courte contaminé par un autre radionucléide de période longue. Nous ne nous occupons pas ici des conséquences que cela peut avoir sur la sensibilité des mesures.

18.5 Rapport $(A_c/A_1)_{yz,z,TC/T,TMF}$.

En divisant (71) par (72) et en simplifiant on trouve

$$\frac{A_c}{A_1} = \frac{(TC - \omega_c N'_c)(e^{\lambda \omega_c N'_c} - 1)}{y \omega_c N'_c (1 - e^{-\lambda(TC - \omega_c N'_c)})}$$

qui se transforme finalement en

$$\frac{A_c}{A_1} = \frac{(1 + yz - TMF)(e^{\lambda TC \frac{TMF}{1 + yz}} - 1)}{\frac{TMF}{1 + yz} (1 - e^{-\lambda TC (1 - \frac{TMF}{1 + yz})})} \quad (85)$$

La Figure 29 montre d'abord que le rapport A_c/A_1 est pratiquement indépendant de TMF jusqu'à $TC/T = 1$ et en dépend très peu à $TC/T = 3$.

Il est à peu près égal à l'inverse du rapport des nombres d'impulsions - compte tenu du rapport ω_c/ω_1 - pour TC/T inférieur à 0,1 et augmente ensuite de plus en plus vite puisque le temps de comptage s'allongeant, un nombre d'impulsions N'_c correspond à un taux de comptage initial plus élevé.

Les courbes de la Figure 29 sont tracées pour $z = 1$. Pour z quelconque on a la relation

$$(A_c/A_1)_z = (A_c/A_1)_{z=1} \cdot z \quad (86a)$$

on a évidemment de même

$$(A_c/A_1)_y = (A_c/A_1)_{y=1} \cdot \frac{1}{y} \quad (86b)$$

B 3. COMPTAGE D'UN MELANGE DE PLUSIEURS RADIO-
NUCLEIDES DE PERIODES COURTES ET D'UN OU
PLUSIEURS RADIONUCLEIDES DE PERIODES LONGUES.

19. L'équation (60) écrite en fonction du temps

$$A_j'(t) = \frac{A_j e^{-\lambda t}}{1 + \sum w_j A_j e^{-\lambda t}} \quad (87)$$

décrit le phénomène général quel que soit le nombre et les périodes des radionucléides. Calculées par cette formule, les courbes de la Figure 30 montrent sur un exemple l'allure de la décroissance effective de 2 radionucléides de périodes courtes et de 2 radionucléides de périodes longues mélangés. On constate que ^{38}Cl , qui est dans l'absolu une "période courte" se présente ici comme une période longue. (Se reporter à B2, 15 et Fig. 25). La Figure 31 se rapporte à un autre exemple où la décroissance est suivie plus longtemps.

Lorsque le mélange comprend plus d'un radionucléide de période courte, l'équation (87) est difficile à intégrer.

19.1 On a cherché cependant à se faire une idée du phénomène par le calcul numérique de quelques exemples. Un programme pour calculatrice électronique a été écrit (en FORTRAN) d'après l'organigramme suivant.

DONNEES: NOMS DES RADIONUCLEIDES
 TAUX DE COMPTAGE INITIAUX REELS - ips
 TEMPS MORTS MOYENS - spi
 DUREE DU COMPTAGE - mn
 PAS DE LA "MESURE" - mn - (env. 1/10 ième de la
 période la plus courte)

ORGANIGRAMME:

1) CALCUL DES $A_j'(t)$ ET DE $TMI(t)$ POUR CHAQUE POINT DE "MESURE"

- 2) INTEGRATION PAR LA METHODE DE SIMPSON, DONNANT LE NOMBRE D'IMPULSIONS MESUREES POUR CHAQUE CONSTITUANT: NI MES.
- 3) CALCUL DES TEMPS MORTS PARTIELS POUR CHAQUE CONSTITUANT:
 $TM(I) = TMM(I) * NIMES(I)$
- 4) CALCUL DU TEMPS MORT TOTAL: $TM = \text{SOMME DE } TM(I)$; DU TEMPS MORT FRACTIONNAIRE TMI : DU FACTEUR DE CORRECTION: $TC/(TC-TM)$
- 5) CALCUL DES NOMBRES D'IMPULSIONS CORRIGES POUR CHAQUE CONSTITUANT: $NICORR(I)$
- 6) CALCUL POUR CHAQUE CONSTITUANT DU NOMBRE D'IMPULSIONS CORRESPONDANT A UN COMPTAGE SANS TEMPS MORT, PAR (1)
- 7) CALCUL DES RAPPORTS DES NOMBRES D'IMPULSIONS CORRIGES ET REELS: $RAPPORT = NICORR(I) / NIREEL(I)$

19.2 Le Tableau V présente deux exemples dont on peut tirer les remarques suivantes.

Dans le premier exemple on peut distinguer 1 Période courte (28-Al) et un groupe de Périodes longues (38-Cl + 56-Mn + 24-Na). On calcule $TM_c/TM_l = 0,45 = yz$. En se reportant à la Figure 28, avec comme autres paramètres $TC/T = 1$ et $TMF = \text{env. } 40\%$, on retrouve bien pour Al un rapport CORR/REEL voisin de 0,99.

Le deuxième exemple permet la même vérification. Le groupe 28-Al + 52-V constitue "la" Période courte. On calcule $yz = 0,34$, et prend $TC/T = 1$ en accord avec la période la plus courte.

19.3 En conclusion lorsque plusieurs Périodes courtes seront présentes on pourra choisir des conditions de mesure les plus favorables en groupant toutes les périodes courtes en un ensemble défini par la somme des activités initiales ou des nombres d'impulsions enregistrées, par w_{cj} le plus élevé et par la période la plus courte ainsi que toutes les périodes longues dans un autre ensemble facile à définir. On garantira ainsi une précision maximum.

TABLEAU V. EXEMPLES DE CALCULS A PLUSIEURS CONSTITUANTS

EXEMPLE NO 1.					
			TC = 2,3 MN	PAS = 0,23 MN	
ELEMENT	28-Al	38-Cl	56-Mn	24-Na	
PERIODE	2,3	37,5	154,0	900,0	
TM MOYEN	0,000070	0,000080	0,000055	0,000090	
ACTI INI	10000	1000	1000	1000	
		TM = 57,86	TC/(TC-TM) = 1,72	TMF = 0,42	
ELEMENT	NI MES	NI CORR	NI REEL	TM(I)	yz RAPPORT
28-Al	571408	983969	995525	40,00	0,988
38-Cl	78404	135012	135109	6,7	0,999
56-Mn	79712	137264	137289	4,38	1,000
24-Na	80066	137874	137880	7,21	1,000
				} 0,45	
EXEMPLE NO 2.					
			TC = 2,3 MN	PAS = 0,23 MN	
ELEMENT	28-Al	52-V	56-Mn	24-Na	
PERIODE	2,3	3,8	154,0	900,0	
TM MOYEN	0,000070	0,000060	0,000055	0,000090	
ACTI INI	8000	8000	1000	1000	
		TM = 66,58	TC/(TC-TM) = 1,93	TMF = 0,48	
ELEMENT	NI MES	NI CORR	NI REEL	TM(I)	yz RAPPORT
28-Al	406800	786058	786420	28,48	0,987
52-V	462961	894577	901709	27,78	0,992
56-Mn	71035	137261	137289	3,91	1,000
24-Na	71352	137873	137880	6,42	1,000
				} 0,34	

20. Remarque sur les Analyseurs à temps mort fixe

Nous avons signalé en B1, 2.2 que certains analyseurs multicanaux ont un temps mort constant quelle que soit l'adresse de stockage des impulsions analysées. Cette particularité ne joue qu'un rôle accessoire dans les calculs de pertes au comptage. On peut en effet reprendre les formules des PARTIES B 2 et B 3 en égalant ω_c et ω_1 à ω_{cte} caractéristique de l'appareil. Il vient par suite $z = 1$ qui disparaît, le paramètre yz étant réduit à y .

21. Remarque sur la mesure du Temps actif TA

Sans disposer du dispositif signalé au paragraphe B 1. 9. On peut mesurer le temps actif de la façon suivante. (Se reporter aux notations introduites en B 1, 7)

On présélectionne un temps actif TCA qui est identifié au temps TA. On mesure avec un simple chronomètre TC^+ qui devient le temps TC. On applique alors la correction

$$N^* = N' \cdot TC^+ / TCA = N' \cdot TC / TA$$

Cette opération ne permet pas cependant de choisir directement le rapport TC/T désiré ou seulement par approximation d'après le temps mort estimé.

BIBLIOGRAPHIE

Nous donnons ci-après les références principales où l'on trouvera des indications se rapportant aux questions qui font l'objet de ce rapport.

- A, 4. Sharpe et Taylor, Mesure et Détection des rayonnements nucléaires, Chap. 2. Dunod (1958)
5. Haerdi, Martin, Monnier, Helv. Chim. Acta, Vol. XLVI, 1573 (1963)
6. M.A. Wahlgren, TID-11807, 63 (1961)
7. W.S. Lyon, Guide to Activation Analysis, 77, Van Nostrand (1964)
- W. Schulze, Neutronenaktivierung, 85, Enke, Berlin (1962)
- B, K. Löw, Dead time corrections on measurements of short-lived activities, Nucl. Instr. Meth. 26, 216 (1964)
- L'auteur calcule en fonction du temps mort mesuré et de la période l'instant auquel le résultat de comptage doit être rapporté. Il détermine x , comme facteur $x/0,5(TCA+TM)$, en fonction de TM/TCA et de $0,693TCA/T$. (1 Figure) et le rapport des taux de comptage $A_{t=0,5(TCA+TM)} / A_{t=x}$ avec les mêmes paramètres (1 Fig.).

RESUME DES PROBLEMES ET CONCLUSIONS PRACTIQUES

Nous supposons pour le moment que le temps mort est négligeable selon que l'électronique est rapide ou que l'activité à mesurer reste assez faible.

Puisque le taux de comptage d'une source de période courte décroît pendant le temps de comptage, la relation entre le nombre d'impulsions enregistrées et le taux à l'instant initial du comptage résulte d'une intégration:

$$A_1 = N \frac{\lambda}{1 - e^{-\lambda TC}} \quad (2)$$

En divisant simplement N par TC , on obtient un taux moyen $\bar{A}$, évidemment différent de A_1 , et qui n'est pas équivalent au taux à mi-temps de comptage $A_{TC/2}$. Pour des comptages ne durant qu'une faible fraction de la période, on conçoit que $\bar{A}$ se rapproche de $A_{TC/2}$ et même de A_1 . En fonction de TC/T , on a calculé les rapports $A_{TC/2} / \bar{A}$ (Tableau II, p 8 et Fig. 6) et $A_1 / \bar{A}$ (Tableau I, p 6 et Fig. 4). Ainsi quelle que soit la durée du comptage, on peut déterminer A_1 . Il est évident que pour la comparaison de plusieurs comptages effectués dans des conditions différentes, seules les valeurs "normalisées" de A_1 sont significatives.

Une méthode de comptage particulièrement utilisée en analyse de périodes courtes est le mode multiéchelle, (Cf. Fig. 8, p 10). On compte globalement une activité décroissante pendant une suite d'intervalles sans temps d'arrêt. Les contenus des "échelles" (les canaux d'un analyseur) divisés par la durée du canal (TME) fournissent des taux moyens $\bar{A}_i$

au sens indiqué ci-dessus. Lors du dépouillement des résultats, sans calculer les taux initiaux, on se contente de tracer la droite de décroissance sur quadrillage semi-logarithmique. La question se pose de fixer les abscisses. Si les intervalles sont petits par rapport à la période, on peut choisir les instants milieux. Cependant d'une manière rigoureuse et nécessairement lorsque $TME/T \gg 1$, le problème revient à calculer l'instant où les $\bar{A}_i$ sont égaux aux taux instantanés. L'extrapolation donne alors exactement A_0 taux de comptage à l'instant de référence. Comptée à partir du début de chaque intervalle, l'abscisse cherchée (TX) est une constante vis-à-vis du numéro d'ordre de l'intervalle et dépend du rapport TME/T . Elle est donnée par le Tableau III et la Figure 7 sous la forme TX/TC ($TC = TME$) en fonction de TC/T (Cf. Eq. 10, p 9). La Figure 9 présente un exemple de dépouillement de comptage en multi-échelle. On remarquera que toute séquence de comptages répétitifs comportant des temps d'arrêt est également analysée de la même manière (Cf. Fig. 10, p 12).

Si maintenant nous tenons compte du fait que les appareils actuels de mesure de radioactivité ont un temps mort non négligeable, nous devons envisager des pertes au comptage dès que le taux est élevé ou quand l'analyse des impulsions est complexe. Le temps mort du circuit de comptage en mode multiéchelle est constant, au même titre que celui d'une seule échelle. La correction qui intervient est facile à calculer. Par contre lorsqu'on fait de la spectrométrie gamma avec un analyseur multicanal, le problème se complique. Tant que l'on mesure des activités de périodes longues, c-à-d qui ne décroissent pas ou très peu durant le temps de comptage, le chronomètre d'efficacité ("live timer") qui équipe les analy-

seurs corrige automatiquement les temps morts - en allongeant le temps de comptage de façon à l'égaliser au temps "actif" choisi. Mais on imagine que la correction par prolongement du temps de comptage n'est pas satisfaisante quand, pendant ce temps-là, l'activité de la source décroît. On perd plus au début du comptage qu'on ne récupère à la fin.

Un second problème apparaît quand on fait une mesure d'un mélange d'une période courte avec un ou plusieurs périodes longues. Ce cas est fréquent en analyse par activation non destructive. Le temps mort d'analyse d'une impulsion n'est pas constant mais fonction de son amplitude. Ce qui le reste par contre est le temps mort moyen correspondant à un spectre de radionucléide pur, tandis que le temps mort moyen d'un mélange est variable.

Pour autant que la période courte soit pure ou seulement accompagnée d'une période longue, il est possible de calculer exactement les corrections de pertes au comptage, c-à-d d'obtenir le taux initial vrai de la période courte. Les équations établies dans ce but sont basées sur la connaissance du temps mort du comptage que l'on peut mesurer par un dispositif chronométrique adaptable facilement aux analyseurs multicanaux (ou par le moyen détourné signalé au paragraphe 21 p 50) et sur la mesure préalable des temps morts moyens caractéristiques des spectres des périodes courte et longue en jeu.

Dans la pratique, plutôt que de recourir à ces équations, il serait commode de disposer de procédés élémentaires pour autant que les approximations obtenues soient satisfaisantes dans un domaine étendu de conditions expérimentales parmi lesquelles le rapport du temps de comptage à la période joue un rôle prépondérant. Nous avons déjà intuitivement compris que la mise en oeuvre du "chronomètre d'efficacité" est inadéquate. Nous avons néanmoins déterminé son domaine restreint

d'application. Par contre un nouveau mode de comptage est apparu beaucoup plus valable. Il consiste à mesurer le temps "actif" d'un comptage dont la durée est fixée en temps "réel" et ensuite à multiplier simplement le nombre d'impulsions enregistrées par le rapport du temps réel au temps actif.

Soit maintenant une période courte pure, de période T, dont le spectre correspond à un temps mort moyen ω :

On fait une mesure en temps "actif" de durée TCA

On fait une mesure en temps "réel" de durée TC et note le temps "actif" TA, d'où
TM = TC - TA

Les équations exactes pour obtenir le taux initial sont

$$A_1 = \frac{e^{\lambda \omega N^+} - 1}{\omega (1 - e^{-\lambda TCA})} \quad (33)$$

$$A_1 = \frac{e^{\lambda \omega N'} - 1}{\omega (1 - e^{-\lambda TA})}$$

$$= \frac{N'}{TM} \frac{e^{\lambda TM} - 1}{1 - e^{-\lambda TA}} \quad (29)$$

Elles sont identiques si l'on assimile N^+ à N' et TCA à TA.

Les approximations que nous discutons sont exprimées par des équations dérivées de l'équation sans temps mort (2) :

$$A_1^+ = N^+ \frac{\lambda}{1 - e^{-\lambda TCA}} \quad (2')$$

$$A_1^* = N' \frac{\lambda}{1 - e^{-\lambda TC}} \frac{TC}{TA} \quad (44)$$

N^+ = nb impuls. enregistr.
pendant TCA

N' = nb impuls. enregistr.
pendant TC

Les erreurs commises sont donc exprimées par les rapports des taux initiaux calculés aux taux vrais (c-à-d déduits des équations exactes (33) et (29)) :

$$\frac{A_1^+}{A_1}$$

$$\frac{A_1^*}{A_1}$$

Ceux-ci sont en principe inférieurs à 1. L'erreur est par défaut. On peut par ailleurs écrire les rapports équivalents en nombre d'impulsions :

$$\frac{N^+}{N}$$

$$\frac{N^*}{N} = \frac{N'}{N} \frac{TC}{TA}$$

Parmi les abaques que nous avons tracées, les plus utiles sont définis par les deux paramètres suivants :

- le rapport du temps de comptage à la période

$$TCA / T$$

$$TC / T$$

- le temps mort fractionnaire

$$TMF = TM / (TCA + TM)$$

$$TMF = TM / TC$$

connu approximativement par lecture du galvanomètre de temps mort à mi-temps de comptage

calculable à partir de la mesure de TA
 $TMF = (TC - TA) / TC$

Ce sont pour le mode de comptage en temps "actif" et parallèlement pour le mode en temps réel :

Fig. 19 Abaque RAT

Fig. 23 Abaque RRT

(Le symbolisme des désignations est défini page ix)

Ces abaques sont en vérité moins destinées à servir au calcul précis des corrections à apporter aux résultats du comptage qu'à fixer les conditions pratiques les meilleures de celui-ci. On constate que le domaine - défini par TC/T et TMF - où l'erreur est inférieure à 1 % est très restreint pour le mode de comptage en "temps actif" mais par contre assez étendu dans le cas du comptage en "temps réel".

Considérons ensuite une période courte unique en présence d'une période longue. Le calcul exact est encore possible, mais il est fonction de 2 couples de variables: les temps morts moyens ω_c et ω_l des spectres des périodes courte et longue, les nombres d'impulsions N'_c et N'_l . Ceux-ci ne sont pas d'accès immédiat mais peuvent être obtenus par décomposition du spectre complexe à l'aide de la méthode des moindres carrés. L'équation (71) obtenue pour A_{lc} , taux initial vrai de la période courte peut être trouvée page 39.

En appliquant ici les mêmes approximations que ci-dessus, on trouve les résultats présentés par les Abaques :

Fig. 26 Abaque RAT2

Fig. 28 Abaque RRT2

pour le mode "temps actif"

pour le mode "temps réel"

Ils sont de nouveau tracés en fonction des deux variables TC/T (TCA/T) et TMF . Ce dernier, dû à l'ensemble des impulsions de période courte et de période longue analysées, est obtenu comme ci-dessus. Par contre 2 paramètres supplémentaires interviennent : $y = N'_l / N'_c$ et $z = \omega_l / \omega_c$. Pour préparer un comptage, il est nécessaire de mesurer préalablement ω_l et ω_c indépendamment (dont le domaine de variation est d'ailleurs petit). On s'aperçoit d'autre part qu'une estimation du rapport y est suffisante. On ne fera jamais une

erreur plus grande qu'en tenant toutes les impulsions comme provenant de la période courte. En effet les abaques RAT et RRT sont la déduction des abaques RAT2 et RRT2 pour $yz = 0$. Pour un temps mort égal la présence de période longue implique une contribution plus petite de la période courte, donc une approximation meilleure; les courbes pour $yz > 0$ se placent au-dessus de la courbe pour $yz = 0$. A la limite il n'y a plus que la période longue et les approximations deviennent la règle exacte.

Le problème du mélange d'une Période courte avec plusieurs Périodes longues se ramène aisément au précédent. Il convient de sommer les impulsions et de déterminer le temps mort moyen du spectre complexe des périodes longues (lequel dépend évidemment des proportions des différents radionucléides).

Le cas le plus général met en jeu plusieurs Périodes courtes et plusieurs Périodes longues. Il n'a pas été résolu mathématiquement. Cependant dans la pratique il découle de ce qui a été énoncé ci-dessus qu'on pourra facilement choisir des conditions expérimentales autorisant une erreur aussi petite que l'on voudra.

On ramènera le problème général à un exemple à 2 constituants et utilisera l'Abaque RRT2 (éventuellement RAT2). On sait déjà comment grouper toutes les périodes longues en un seul ensemble (nb. d'impulsions, temps mort moyen). On caractérisera alors une période courte fictive en sommant les nombres d'impulsions et à laquelle on attribuera le temps mort moyen individuel le plus grand et la période la plus courte: en présence de 28-Al et 52-V, on aura $\omega_{\text{fictif}} = \omega_{\text{Al}} > \omega_{\text{V}}$, $T_{\text{fictif}} = T_{\text{Al}} < T_{\text{V}}$. On déduit par ce procédé des rapports y et z qui surestiment les erreurs. L'approximation devient la meilleure possible.

En conclusion générale, si maintenant on laisse de côté le mode en "temps actif" par trop limité, on constate à l'examen des Figures 23 et 28 qu'un seul paramètre régit essentiellement les conditions de mesure : le rapport du temps de comptage à la période. En partant du cas le plus difficile à corriger, celui d'une période courte pure, on peut établir le Tableau-Résumé suivant.

Pour un TMF donné, la durée maximum du comptage sera égale à

TMF	Durée max.
5 %	2. T
10	1.4
20	1.
40	0.7
60	0.5

L'erreur restera inférieure à 1 %.

Il va de soi que la solution définitive aux difficultés que nous avons rencontrées sera obtenue par les progrès de l'électronique nucléaire en ce qui concerne sa rapidité : ce qui réduira les particularités du comptage des radionucléides de périodes courtes à celles décrites dans la PARTIE A de ce rapport et aux problèmes de statistiques qui seront abordés ultérieurement.

Manuscrit reçu le 4 février 1966

FIG.4. FACTEURS k ET g EN FONCTION DE TC/T

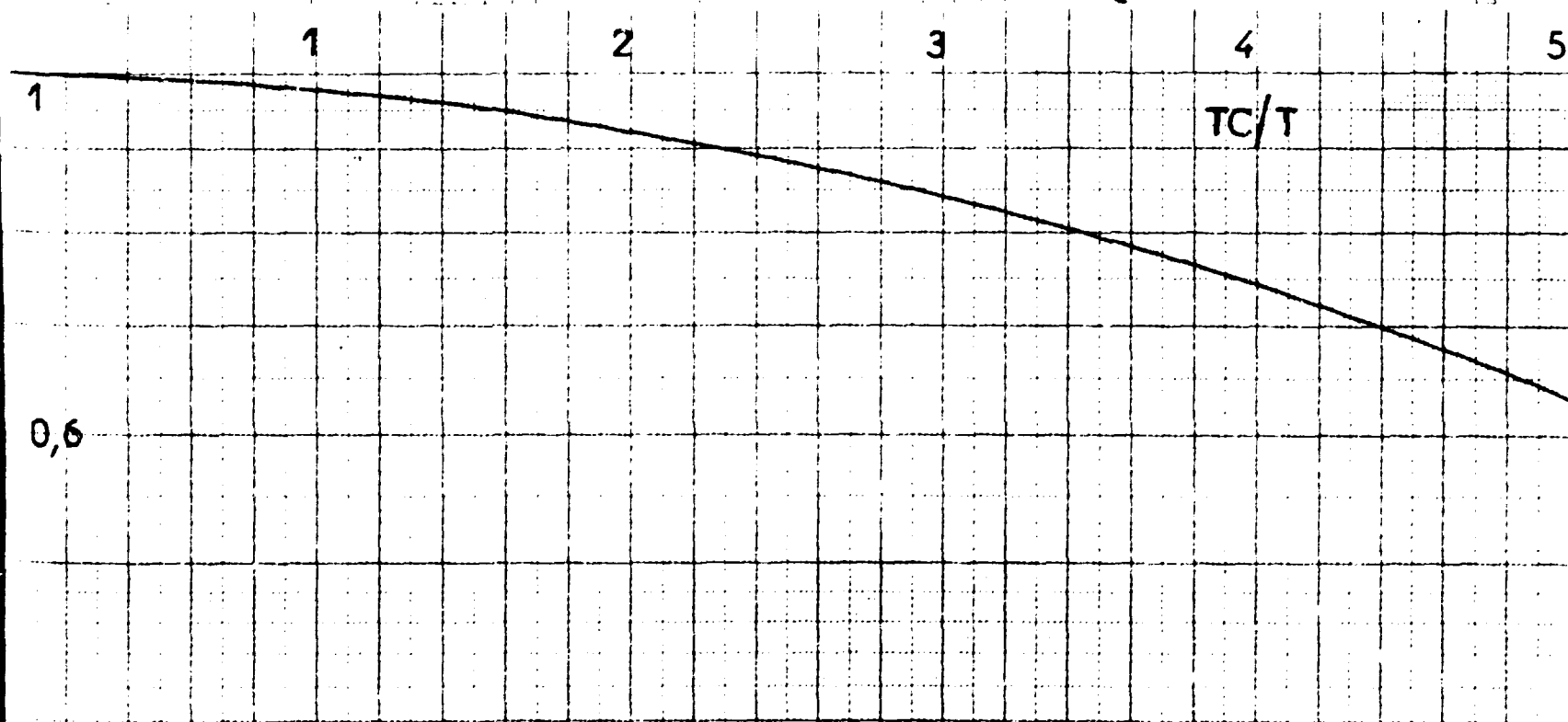
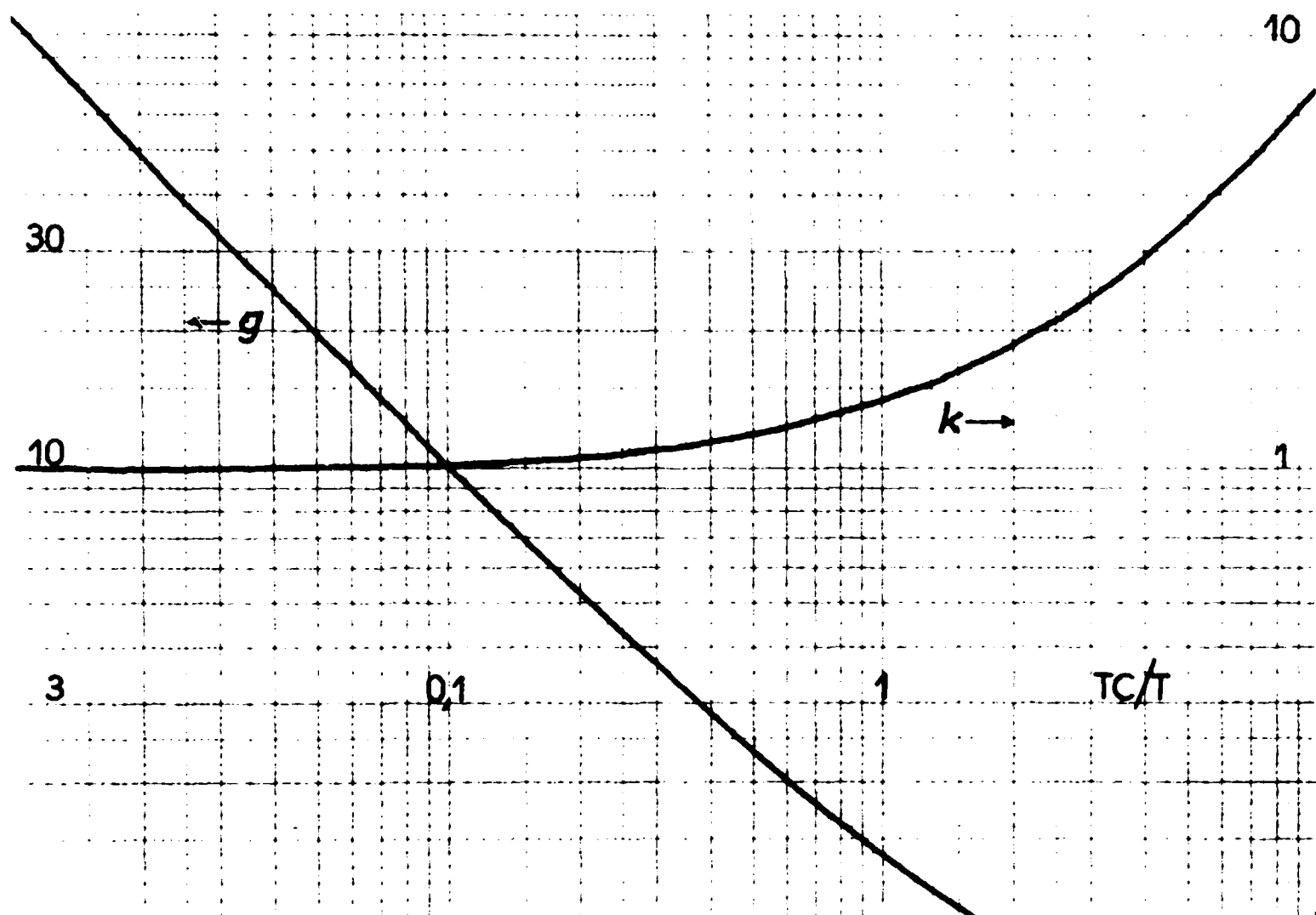


FIG.6. RAPPORT ENTRE TAUX A MI-COMPTAGE ET TAUX MOYEN

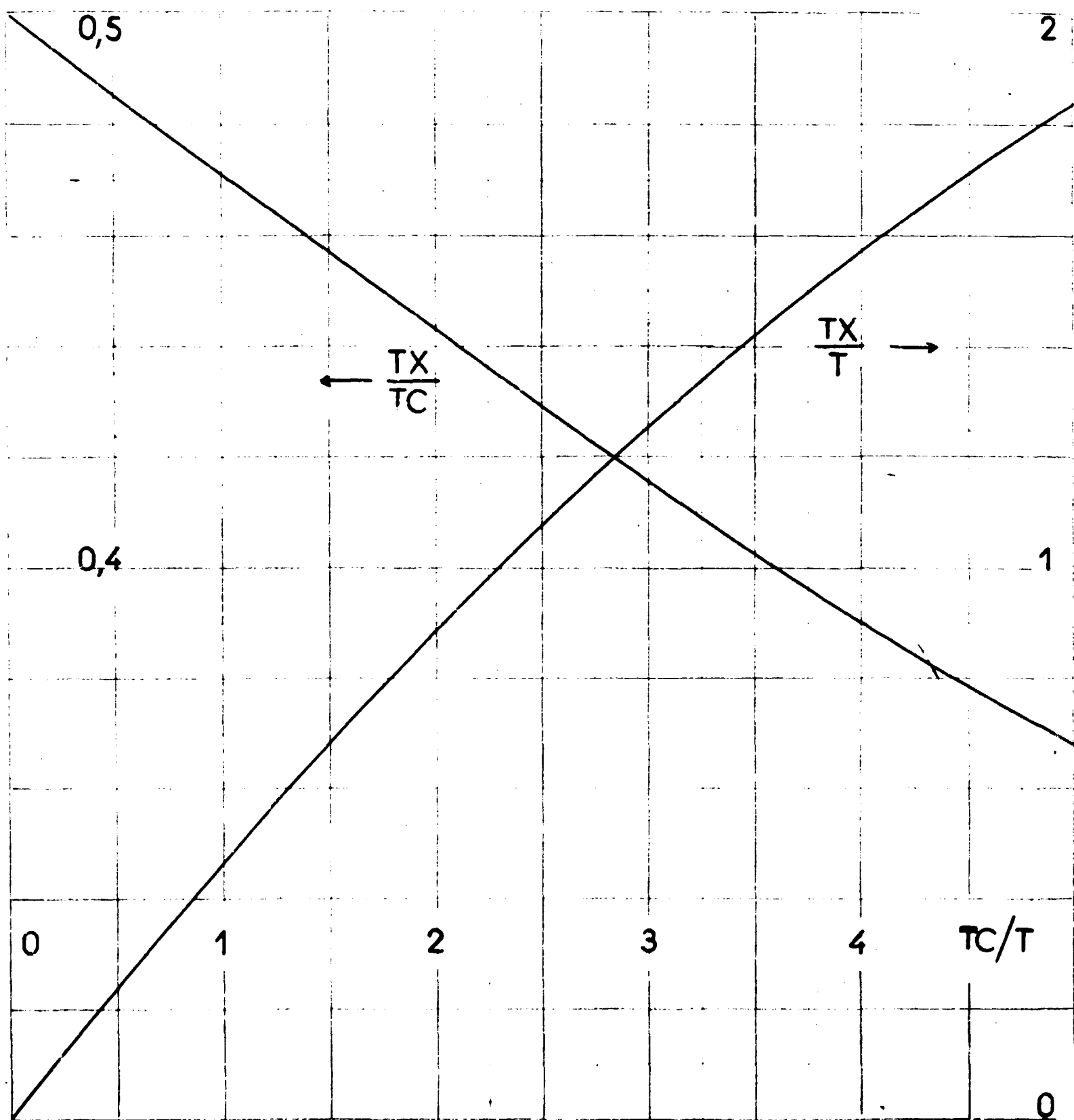


FIG.7. $\frac{TX}{T}$ ET $\frac{TX}{TC}$ EN FONCTION DE $\frac{TC}{T}$

FIG.9. COMPTAGE EN MODE MULTIECHELLE

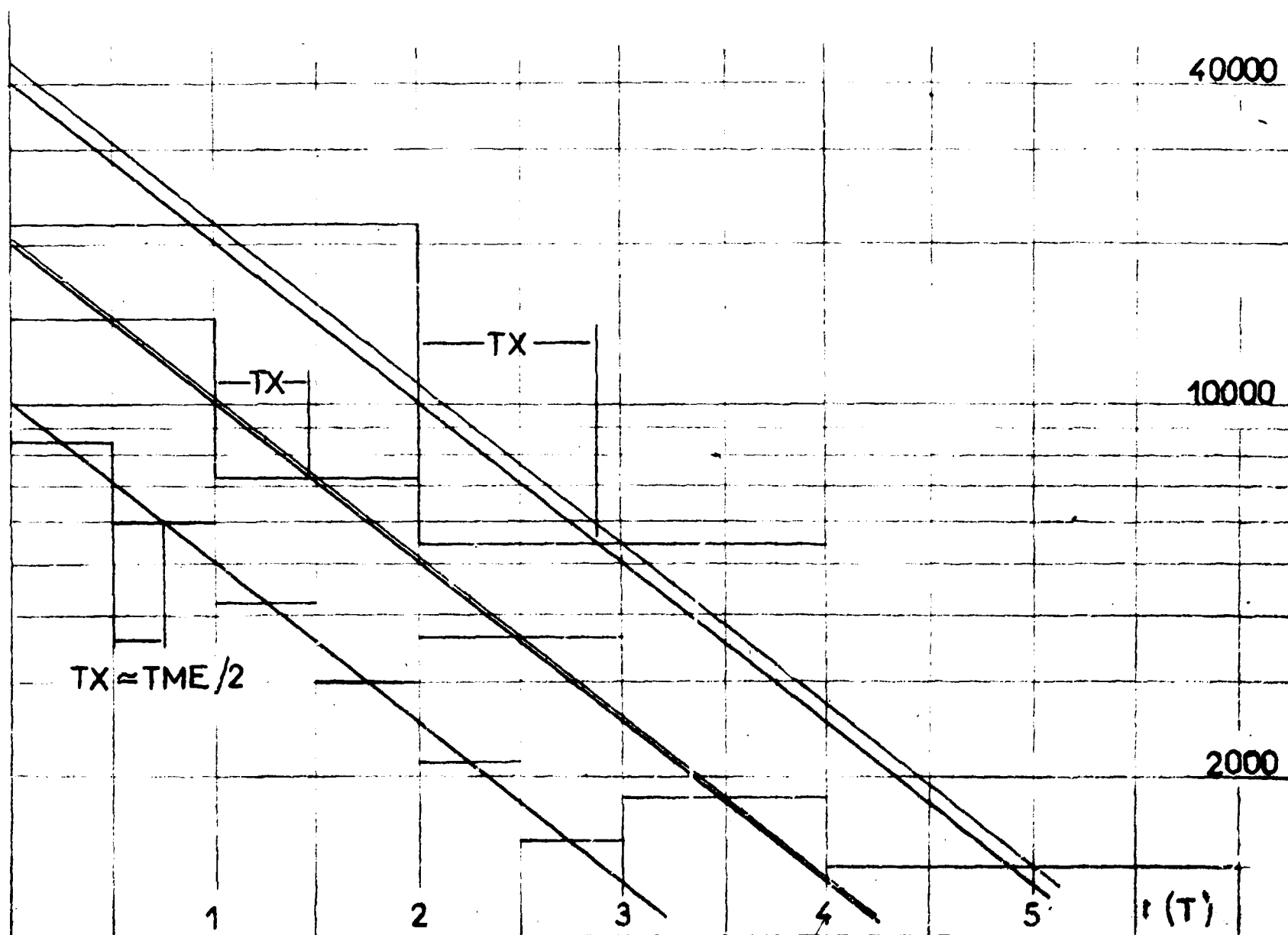


FIG.11. RELATION ENTRE ω ET i moyen

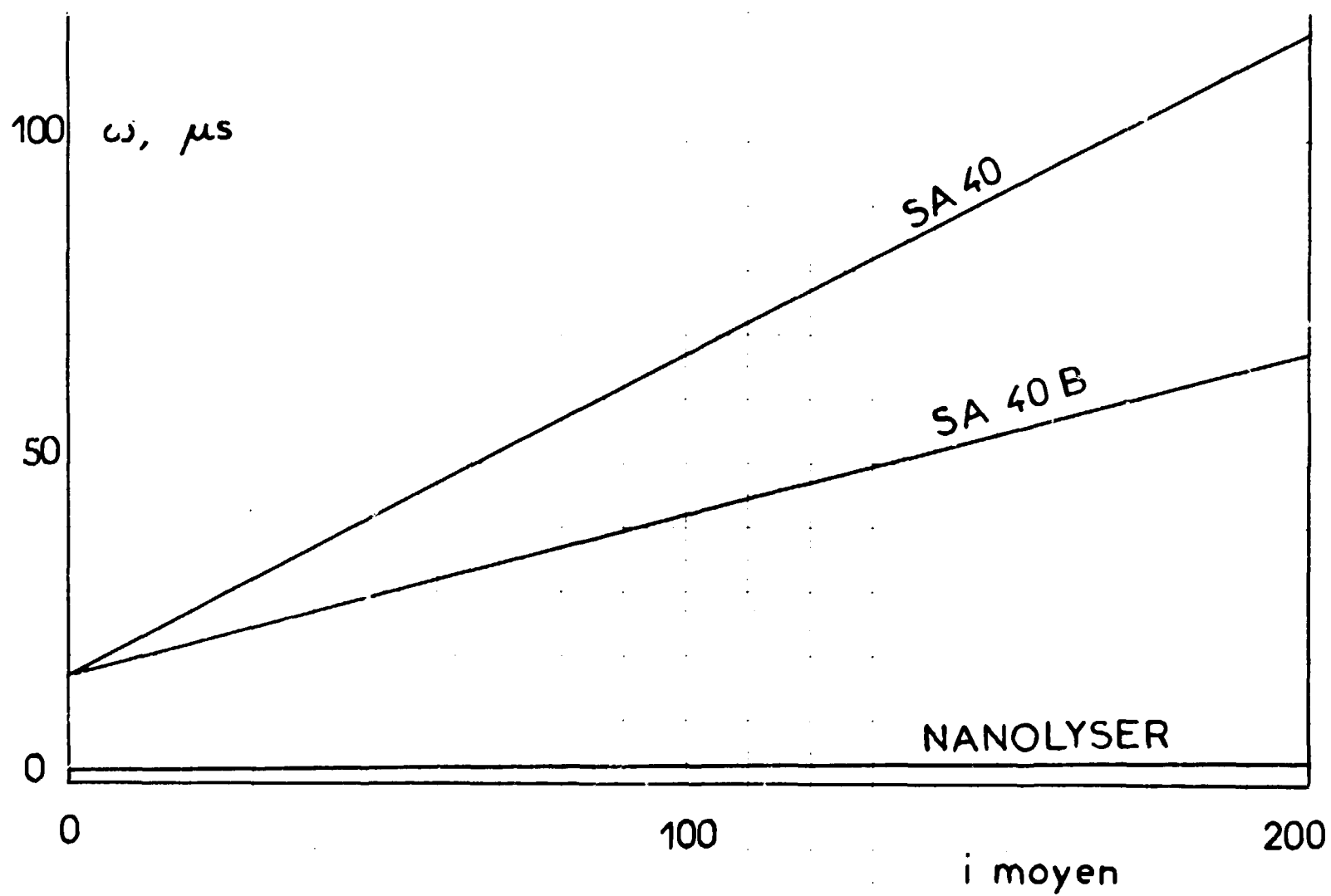


FIG. 12. DECROISSANCE DE A' ET TMI

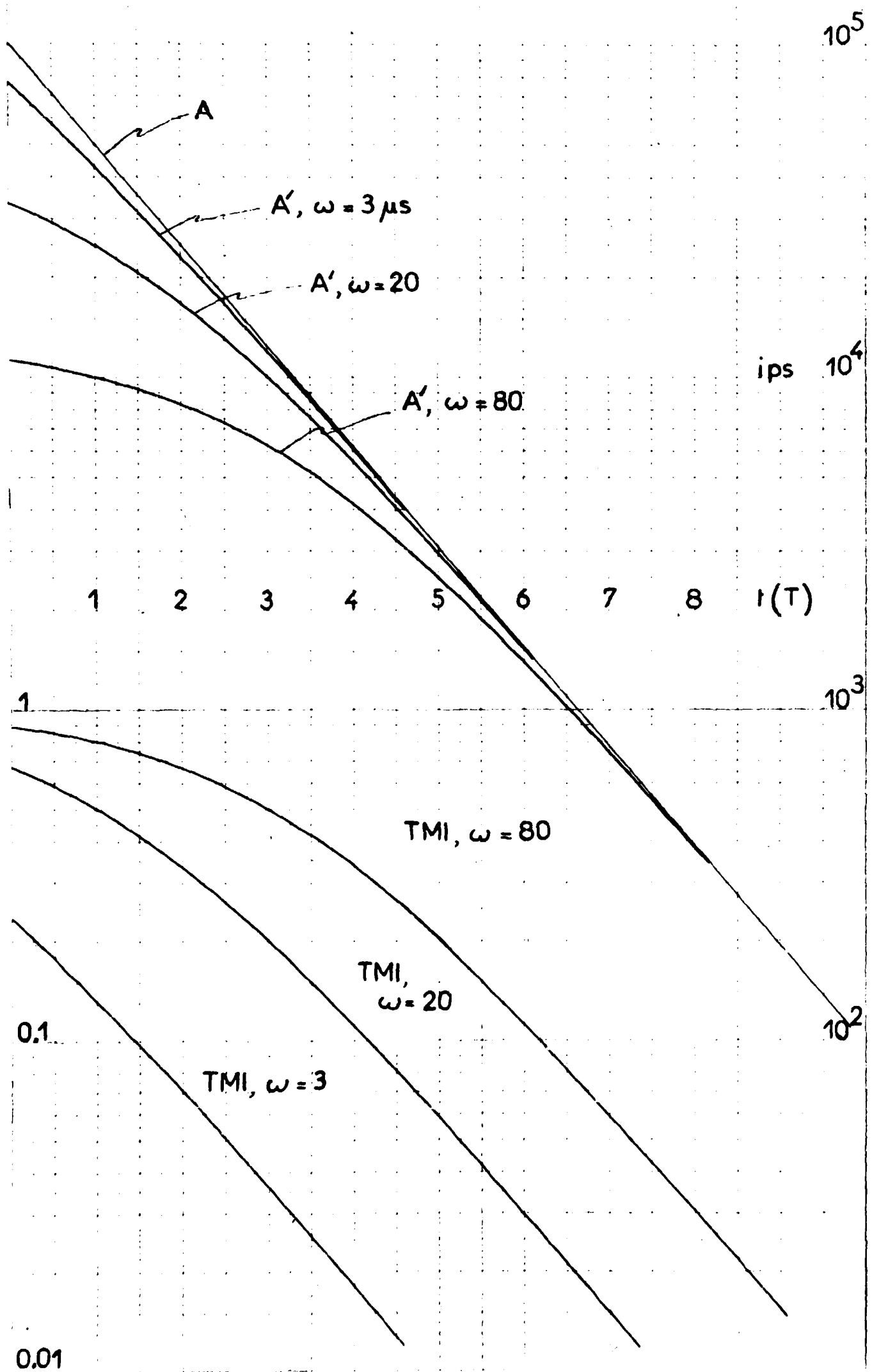


FIG. 15. VALEURS DE A_1 ET DE N'

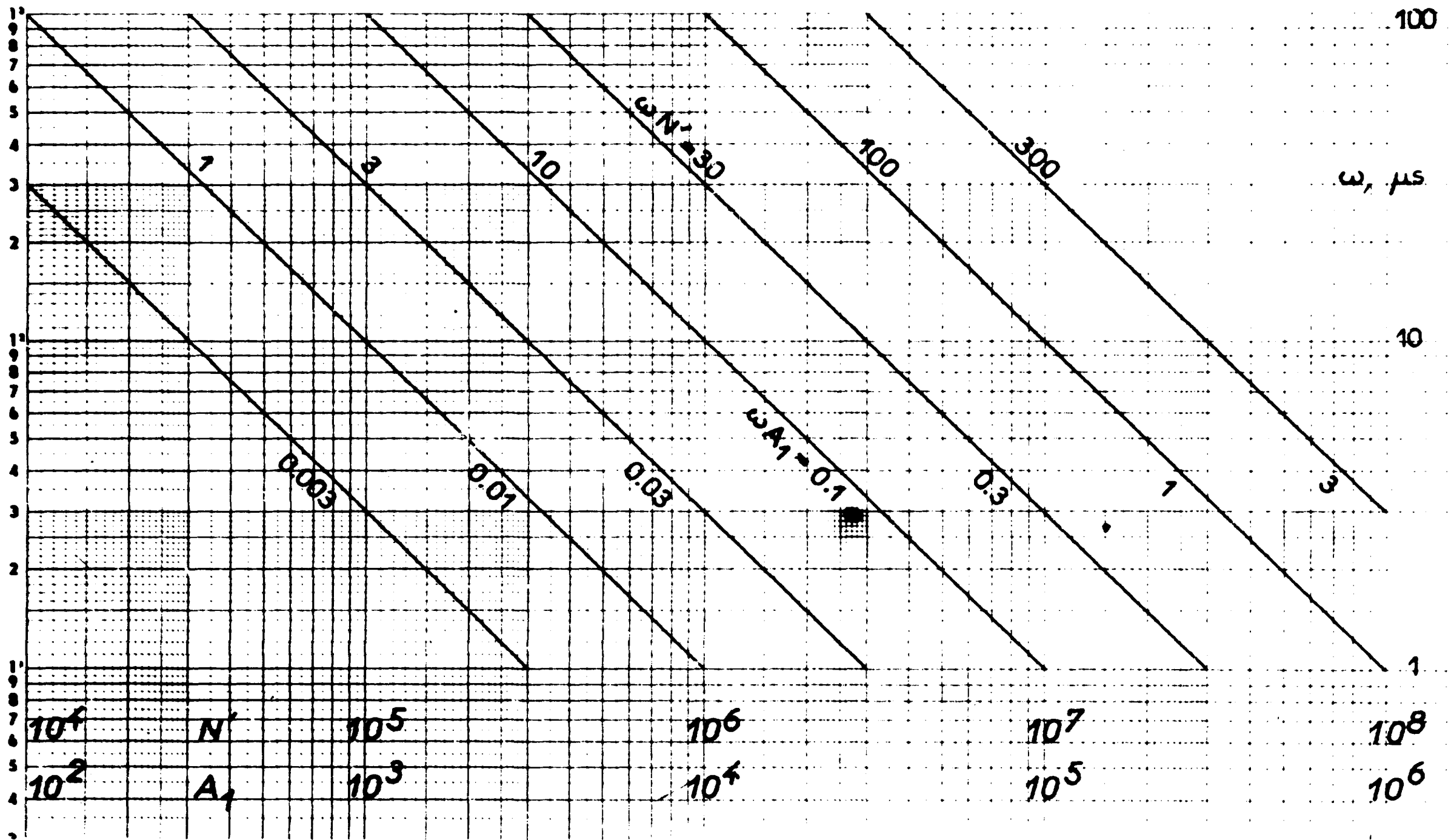


FIG. 16. VARIATION DE TMF ET DE TMP

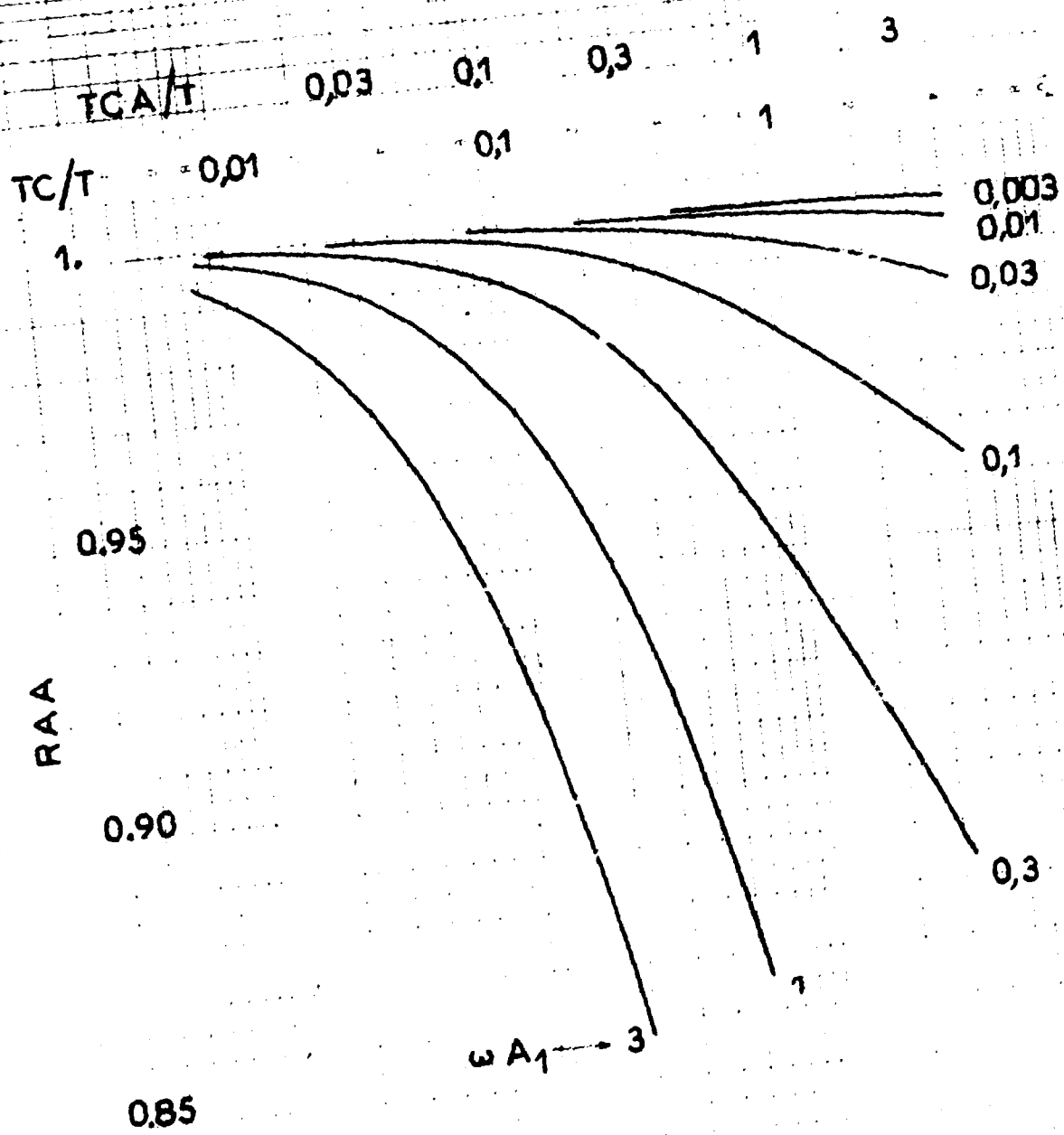
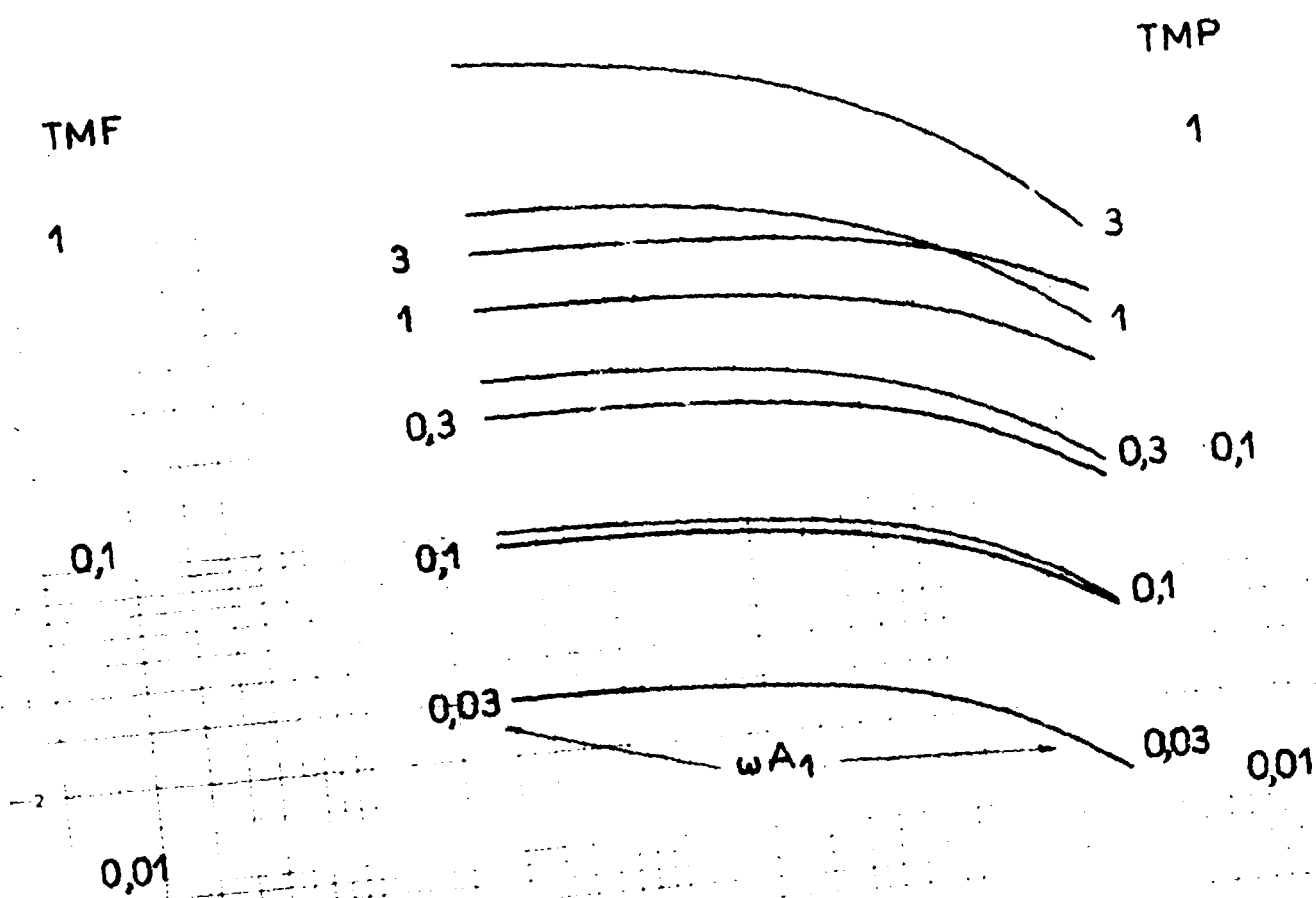


FIG 17. ABAQUE POUR RAA

T (s) 10 100 1000

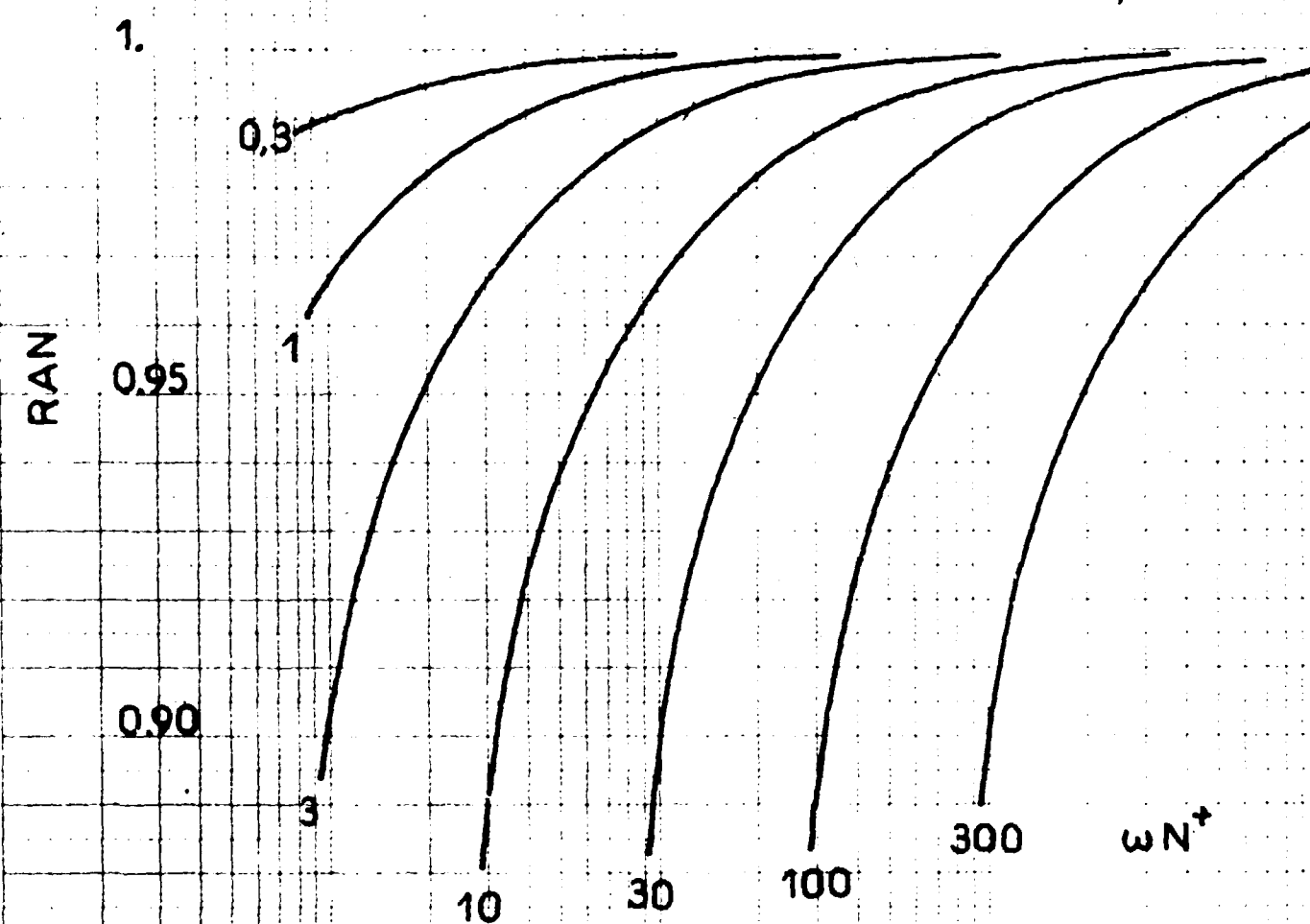


FIG.18. ABAQUE POUR RAN

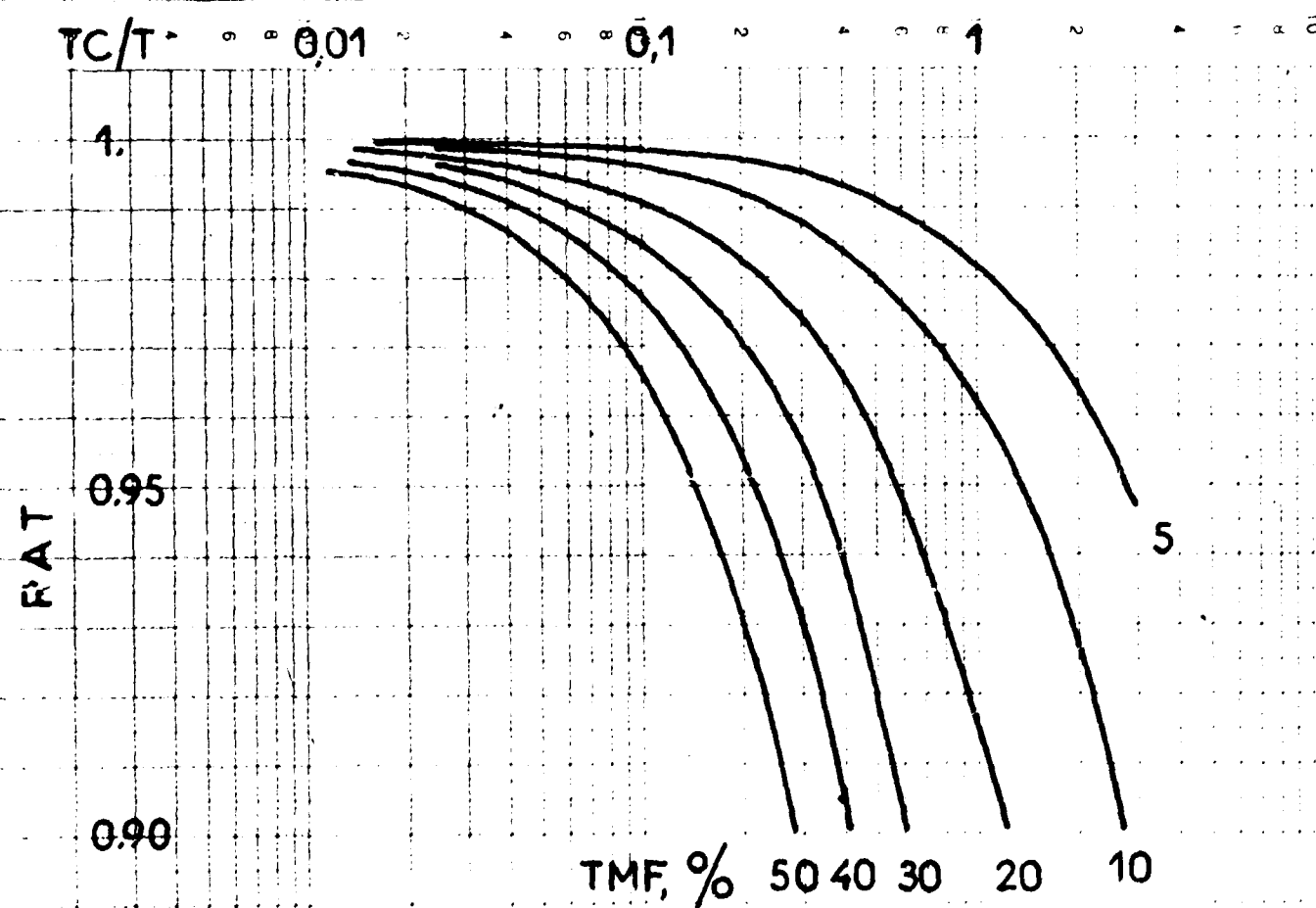
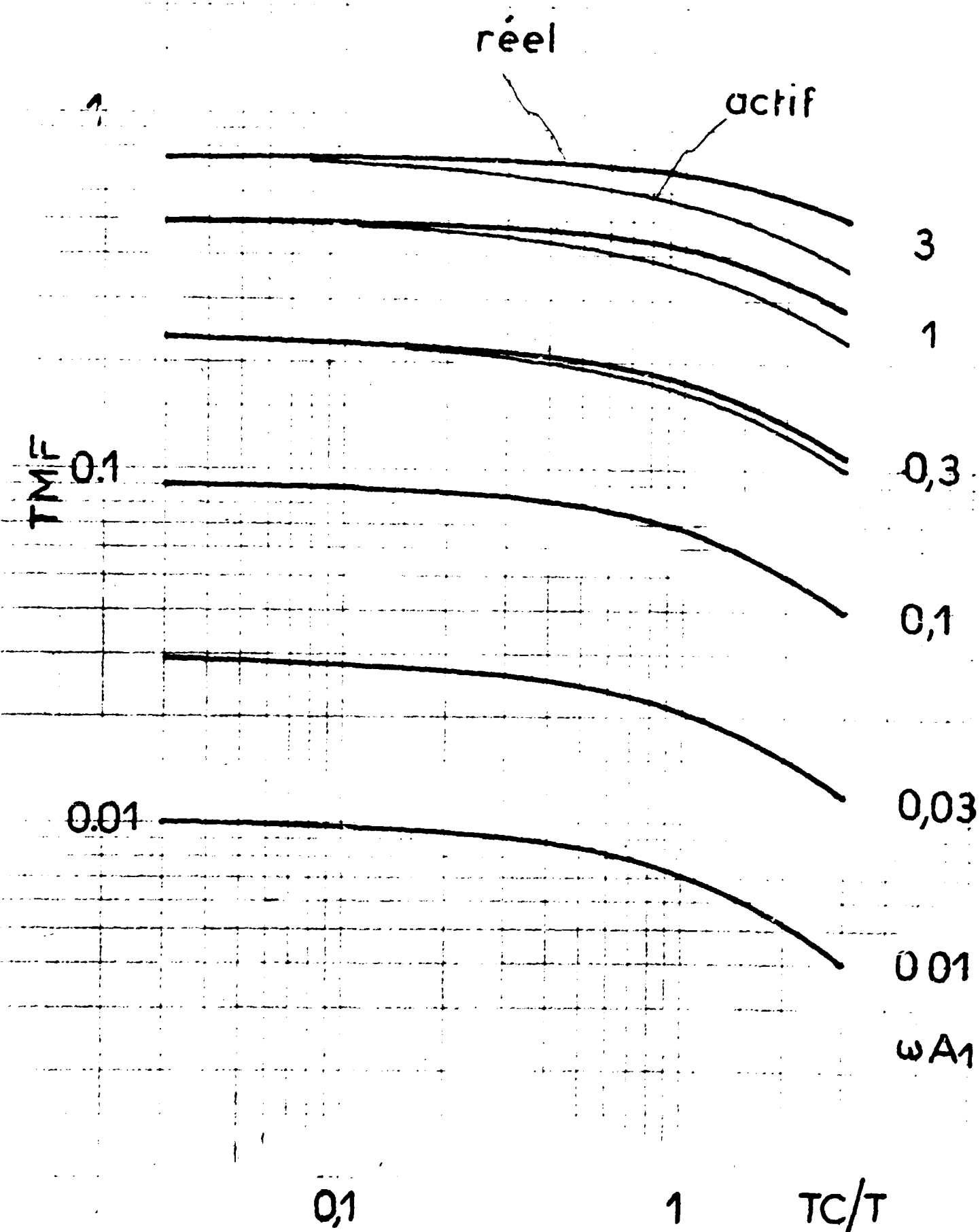


FIG.19. ABAQUE POUR RAT

FIG.21. VARIATION DE TMF



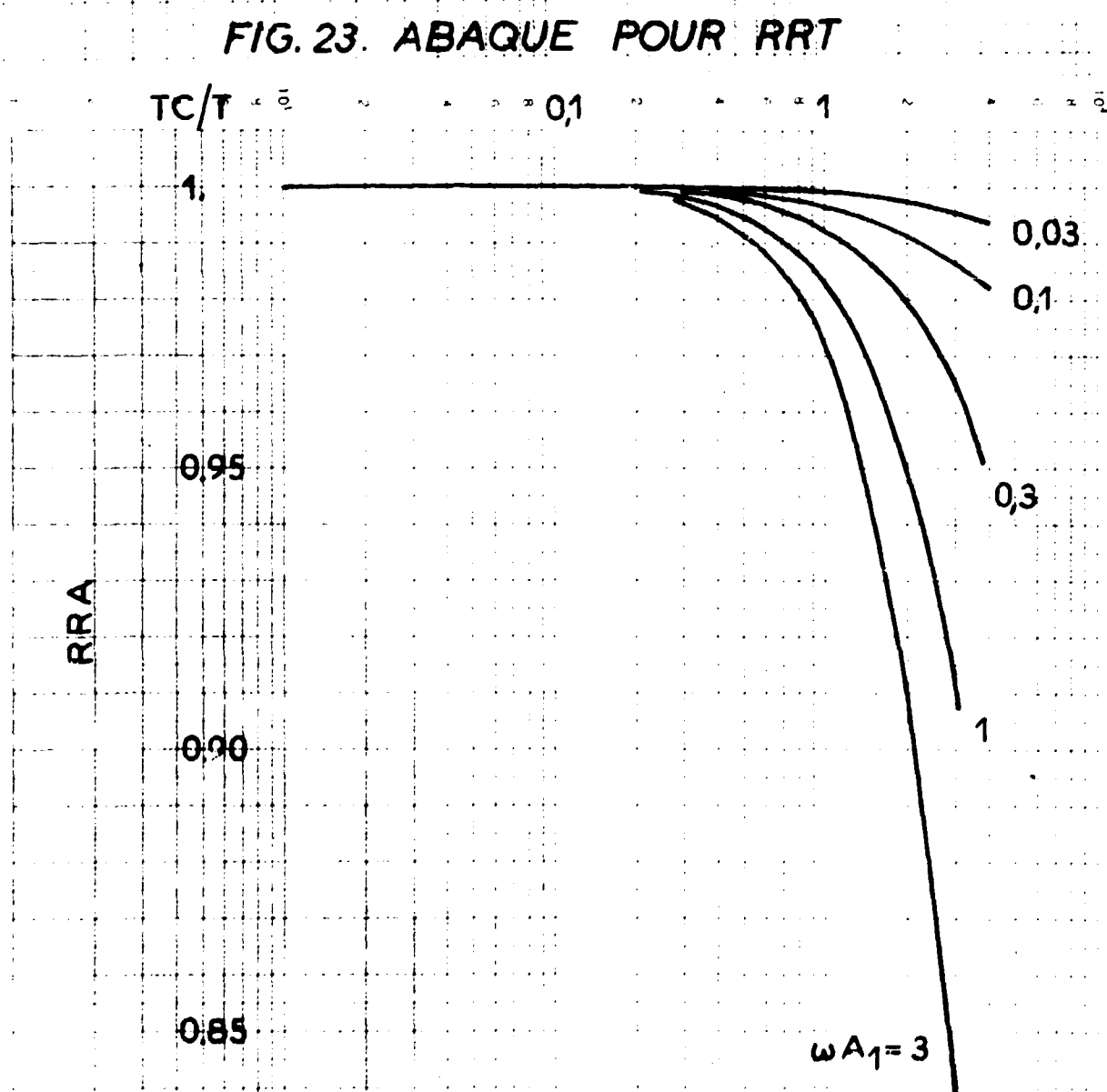
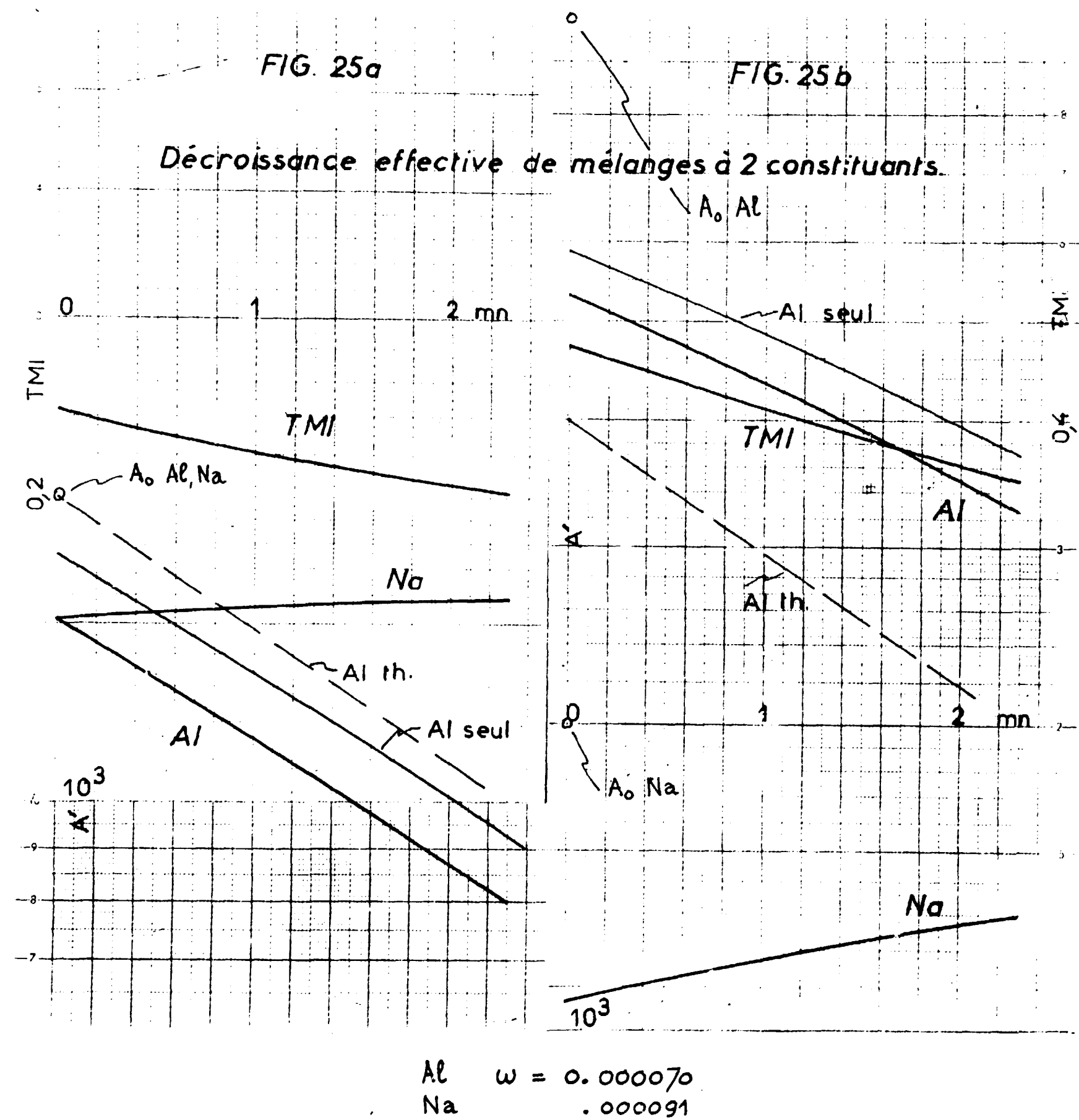


FIG.22. ABAQUE POUR RRA



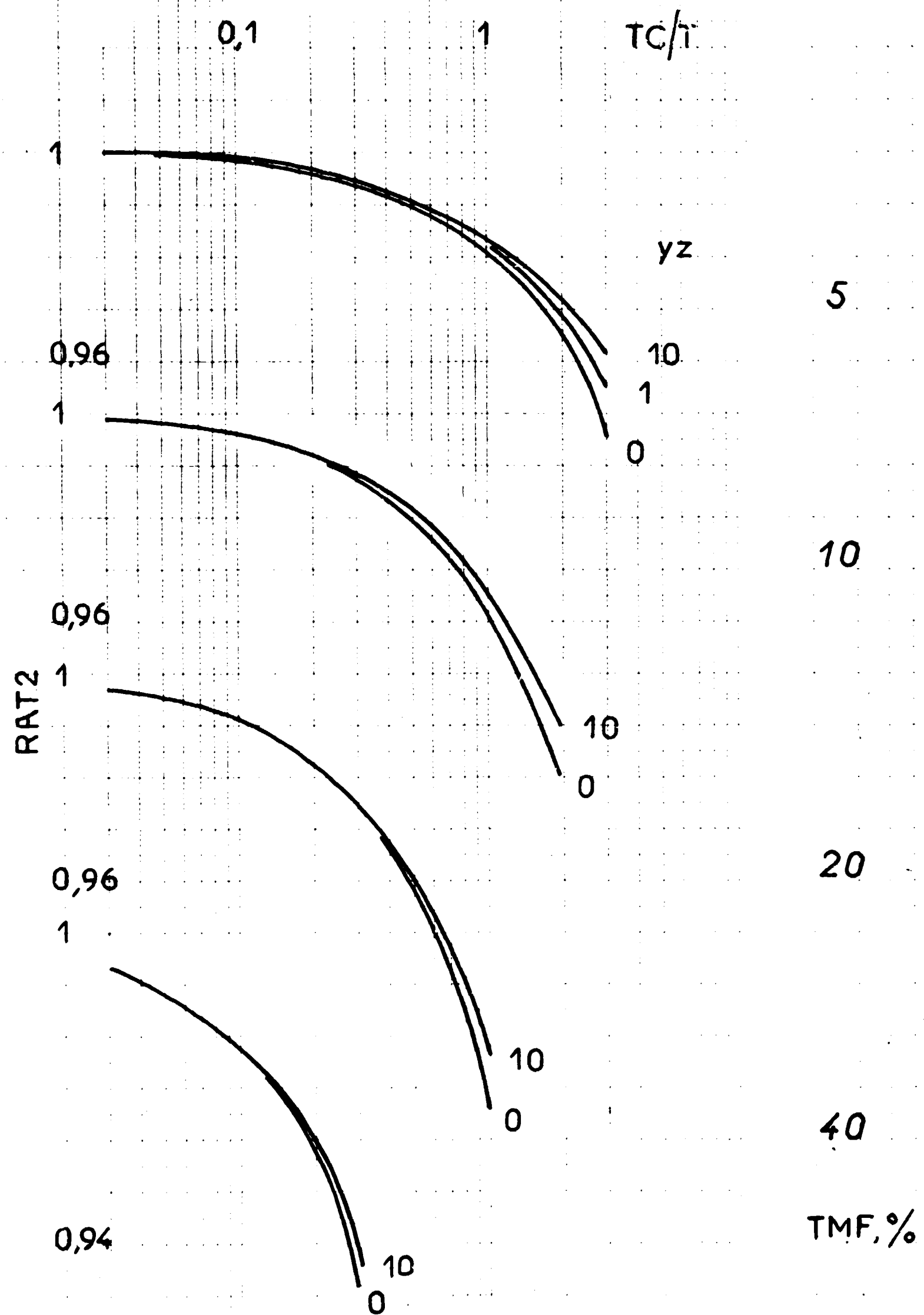


FIG. 26. ABAQUE POUR RAT2

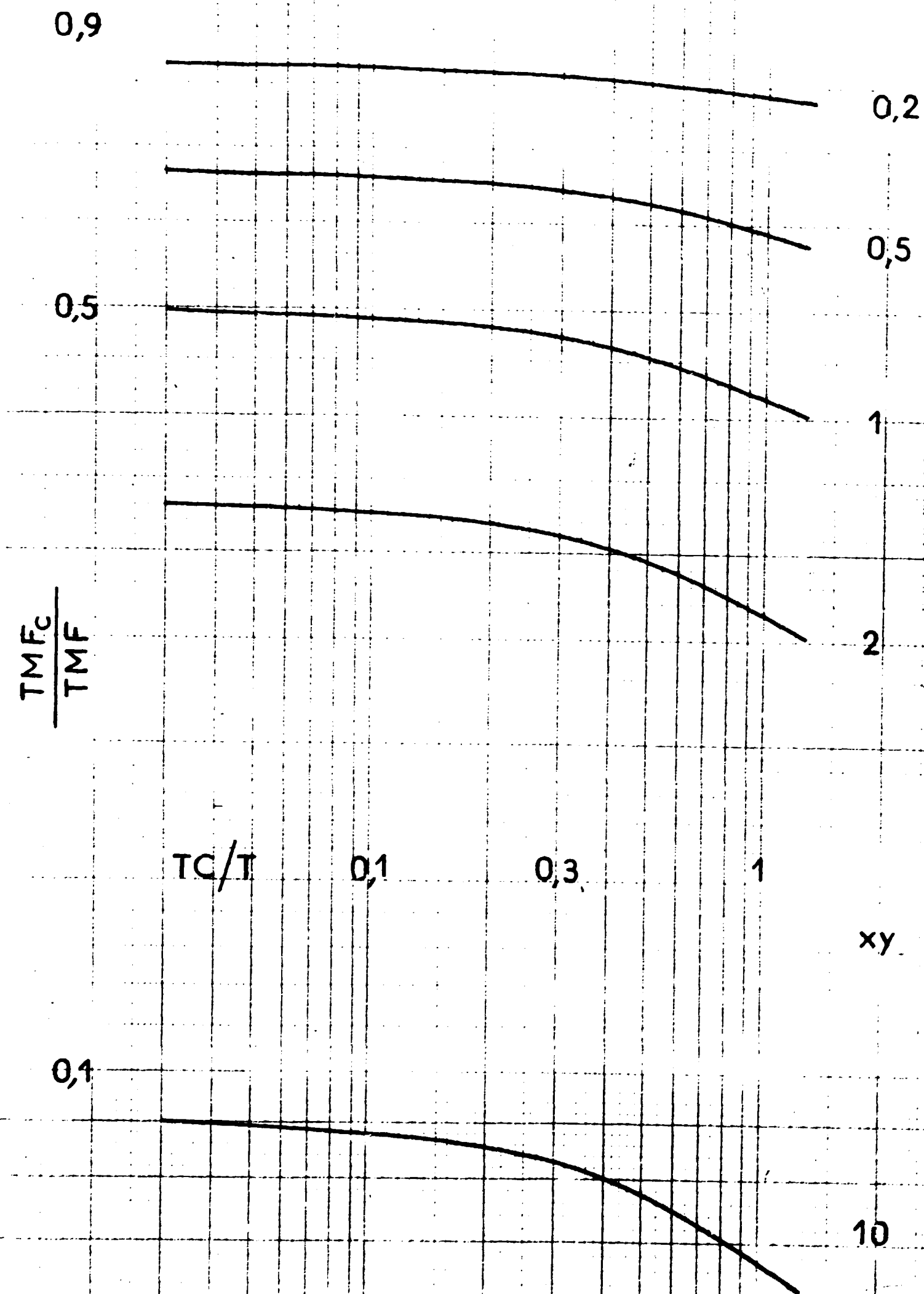


FIG. 27. RAPPORT ENTRE TMF_c ET TMF

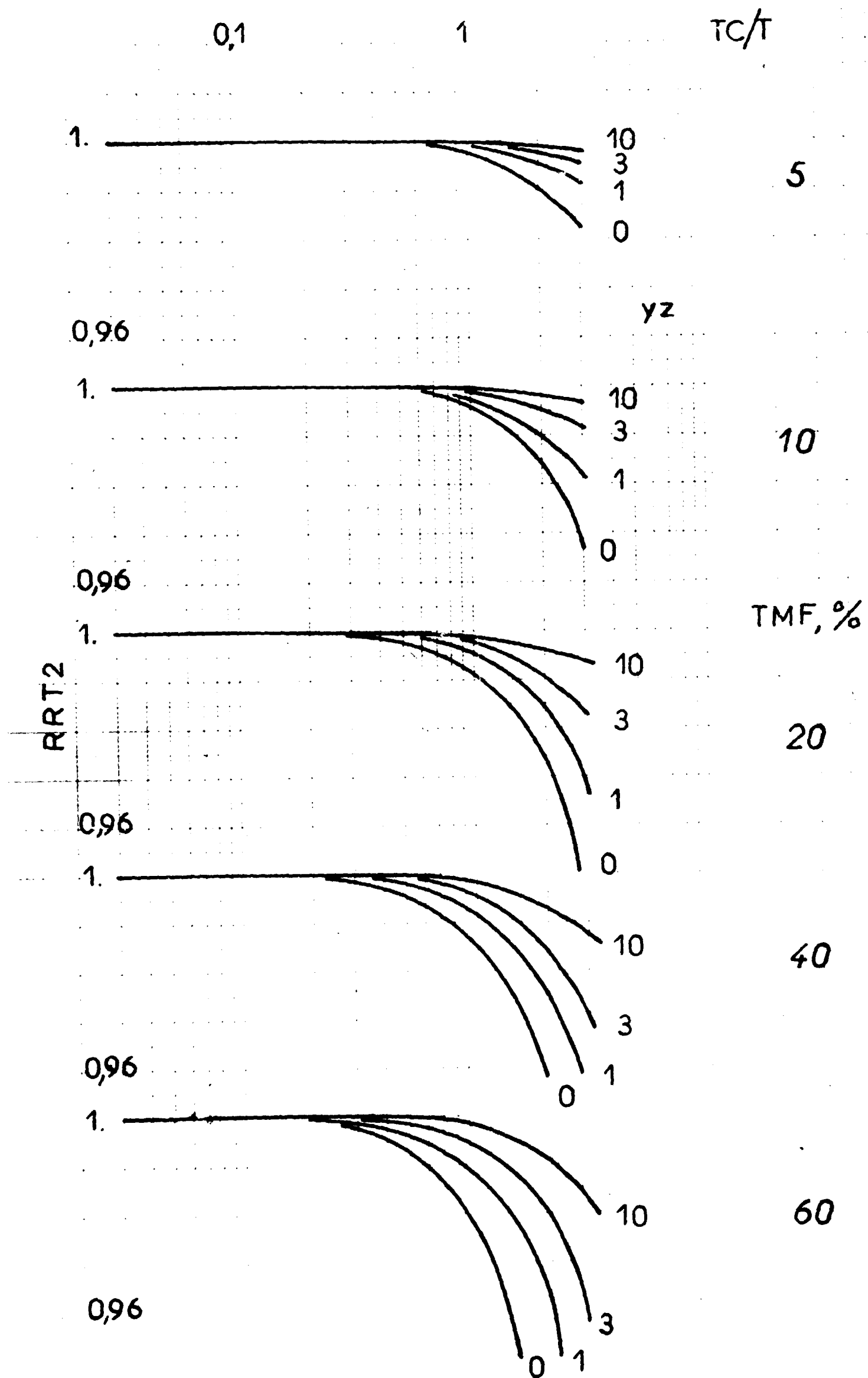
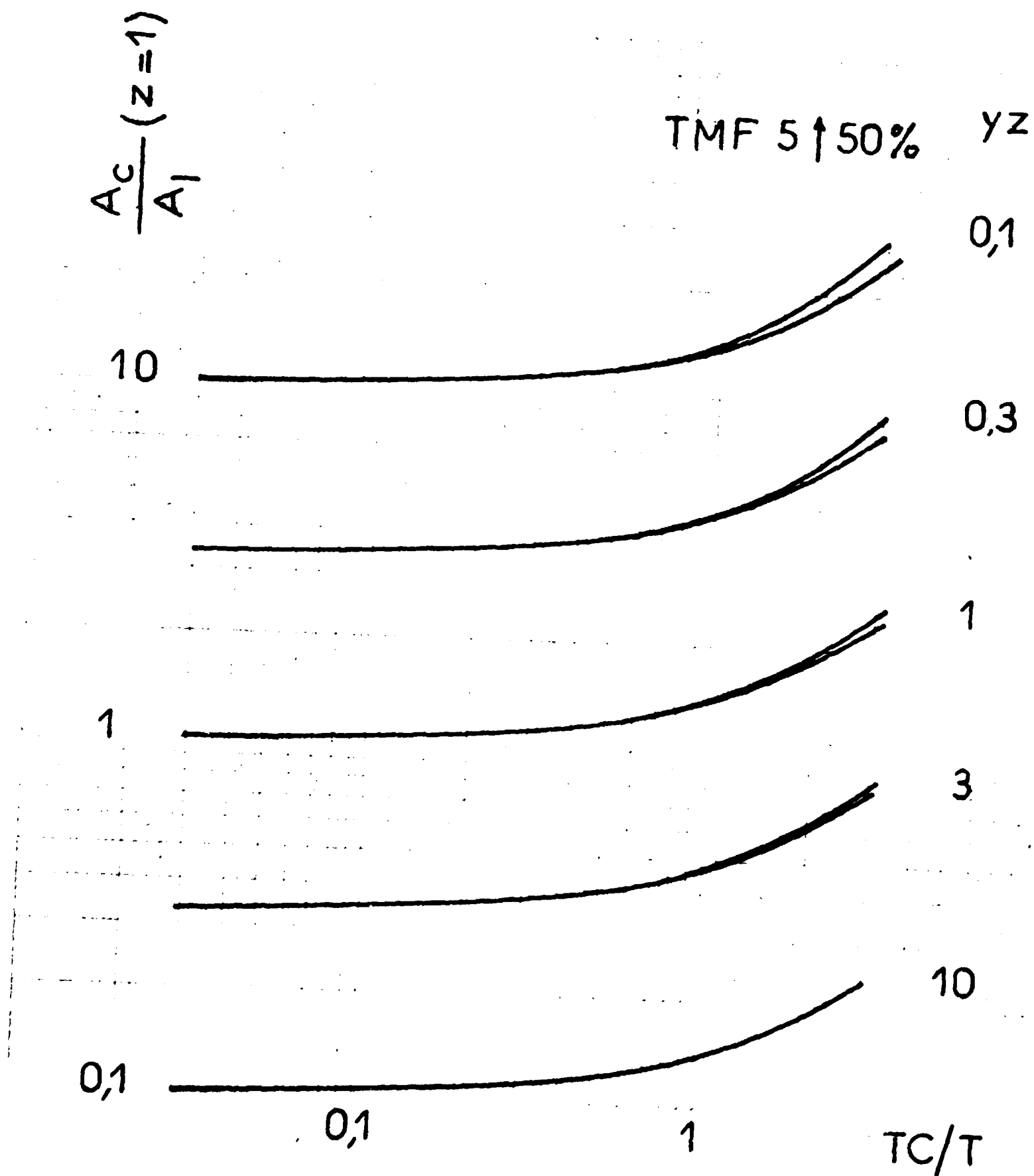
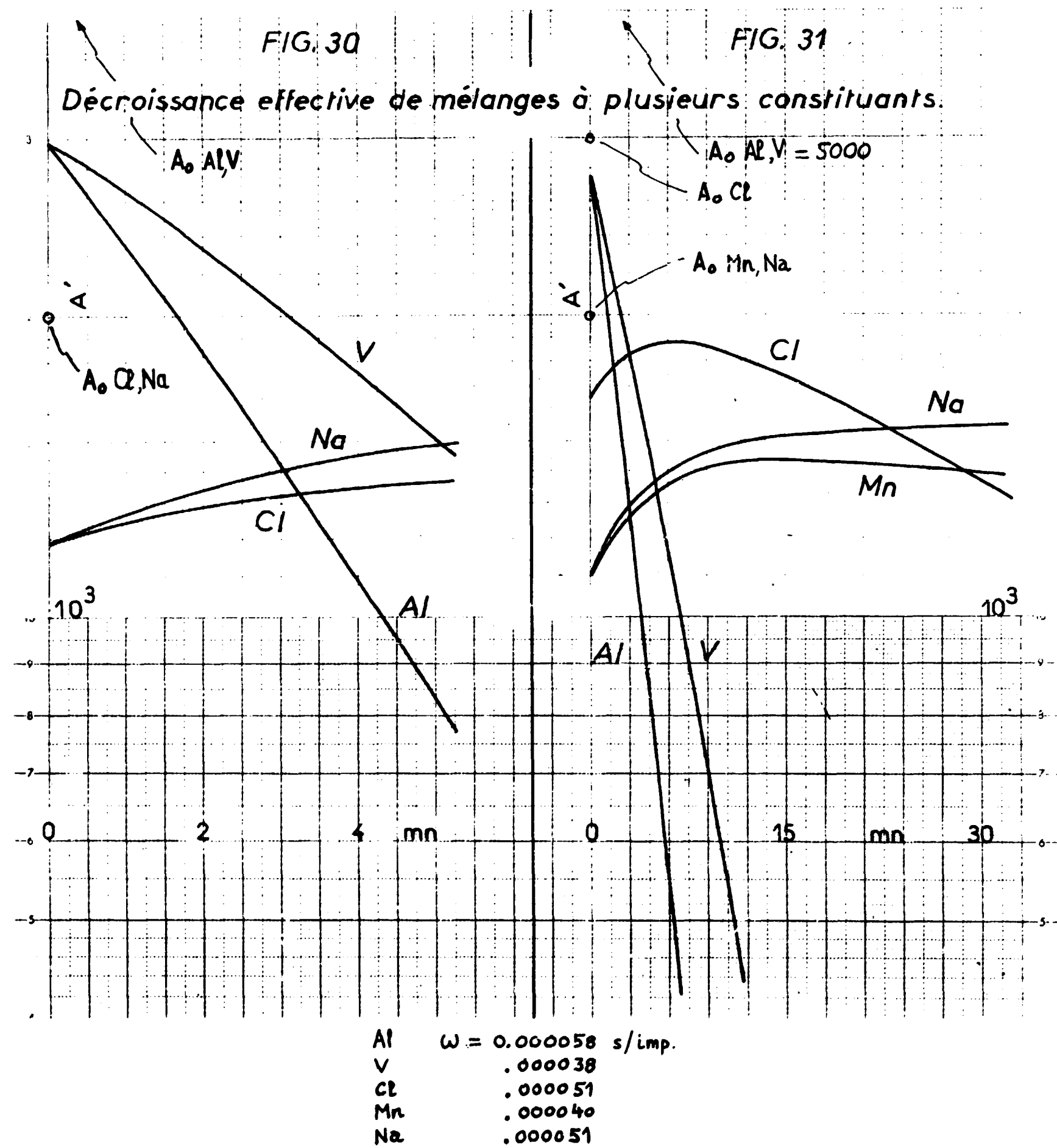


FIG. 28. ABAQUE POUR RRT2

FIG. 29. RAPPORT ENTRE A_c ET A_l





FIN

CEA-R-2980(2) - JUNOD Eric

ETUDES D'ANALYSE PAR ACTIVATION - LE COMPTAGE
DES RADIONUCLEIDES DE PERIODES COURTES
Volume II - Partie C : PROGRAMMES DE DEPOUILLEMENT
DES COURBES DE DECROISSANCE

Sommaire. - On présente les problèmes que pose l'analyse qualitative et quantitative des courbes de décroissance d'un mélange de sources radioactives dont au moins une de période courte. Six procédés fondamentaux sont décrits mathématiquement pour lesquels sont proposés des éléments de programmes FORTRAN.

Deux programmes supplémentaires sont construits pour traiter globalement des problèmes de dosages en analyse par activation : l'un basé sur l'irradiation simultanée d'un

./.

CEA-R-2980(2) - JUNOD Eric

ACTIVATION ANALYSIS - COUNTING OF SHORT HALF-LIFE
RADIONUCLIDES - Volume II - Part C : ANALYTICAL
PROGRAMS FOR DECAY CURVES

Summary. - The problems connected with the qualitative and quantitative analysis of the decay curves of a mixture of radioactive sources of which one at least has a short half-life are presented. A mathematical description is given of six basic processes for which some elements of FORTRAN programs are proposed.

Two supplementary programs are drawn up for giving an overall treatment of problems of dosage in activation analysis : one on the basis of a simultaneous irradiation of the

échantillon et d'un ou plusieurs témoins ; l'autre sur l'irradiation séparée de l'échantillon et du témoin, un dosimètre (par activation ou extérieur) servant à normaliser les conditions de flux d'irradiation.

1970

55 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

sample and of one or several known samples, the other with separate irradiation of the unknown and known samples, a dosimeter (activation, or external) being used for normalizing the irradiation flux conditions.

1970

55 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

3.2

**ETUDES D'ANALYSE PAR ACTIVATION
LE COMPTAGE DES RADIONUCLEIDES
DE PERIODES COURTES
VOLUME II
PARTIE C : PROGRAMMES DE DEPOUILLEMENT
DES COURBES DE DECROISSANCE**

par

Eric JUNOD

**DIRECTION DES MATERIAUX
ET DES COMBUSTIBLES NUCLEAIRES**

Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble

Rapport CEA - R - 2980 (2)

1970

Ea

SERVICE CENTRAL DE DOCUMENTATION DU C.E.A

C.E.N. - SACLAY B.P. n°2, 91 - GIF-sur-YVETTE - France

- Rapport CEA-R-2980 (2) -

Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble
Direction des Matériaux et des Combustibles Nucléaires
Département des Radioéléments
Section des Applications des Radioéléments

ETUDES D'ANALYSE PAR ACTIVATION
LE COMPTAGE DES RADIONUCLEIDES DE PERIODES COURTES
VOLUME II
Partie C : Programmes de dépouillement
des courbes de décroissance

par

Eric JUNOD

- Janvier 1970 -

)

SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION	1
1.1	Exposé des problèmes	1
2.	BASES MATHEMATIQUES ET ALGORITHMES DE CALCUL	10
2.1.	Moindres-carrés linéaires	10
2.2.	Moindres-carrés non linéaires	13
2.3.	Méthode de Prony	15
2.4.	Procédé Biller-Perkel	16
3.	PROGRAMME 'ANABASE'	19

Annexes

1.	Organigramme simplifié d'ANABASE
2.	Tables des données
3.	Liste FORTRAN du programme et des sous-programmes

ETUDES D'ANALYSE PAR ACTIVATION LE COMPTAGE DES RADIONUCLEIDES DE PERIODES COURTES

VOLUME II

PARTIE C : PROGRAMMES DE DEPOUILLEMENT DES COURBES DE DECROISSANCE

1 - INTRODUCTION

Dans le rapport CEA-R 2950, nous avons traité le problème du comptage des périodes courtes en spectrométrie gamma, en cherchant à corriger les pertes au comptage dues au temps mort des analyseurs multicanaux. Le présent rapport est consacré à une autre technique générale de comptage : l'enregistrement de courbes de décroissance en mode multiéchelle. Les impulsions provenant de la sonde et qui après amplification peuvent avoir été filtrées par un sélecteur monocanal ou un simple discriminateur à seuil inférieur sont stockées dans un canal de l'analyseur pendant un temps TME puis dans le suivant et ainsi de suite. Le problème du temps mort apparaît sous deux formes : d'abord le temps de basculement d'un canal au suivant est de l'ordre de 10 μ sec, c'est dire qu'il peut être négligé dès que TME dépasse 1 seconde. Deuxièmement la chaîne électronique-ampli-sélecteur monocanal - seuil d'entrée du registre de l'analyseur - présente un temps mort faible et pratiquement constant, de l'ordre de quelques microsecondes. Nous rappellerons le calcul de correction du phénomène dit de saturation aux taux de comptage élevés. Ceci dit le problème du temps mort ne nous occupera plus.

1 - 1 - Exposé des problèmes

Une courbe de décroissance radioactive est représentée par

$$y_1 = a_1 e^{-\lambda_1 t_1} + a_2 e^{-\lambda_2 t_1} + \dots + a_m e^{-\lambda_m t_1} + b_1$$

ou

$$y_1 = \sum_{j=1}^m a_j e^{-\lambda_j t_1} + b_1$$

avec - y_1 = contenu du canal 1

- t_1 = temps de décroissance se rapportant au canal 1, compté entre l'instant t_0 (fin d'irradiation) ou t_1 (début du comptage) jusqu'à l'instant milieu du canal 1. On a vu (CEA-R 2980 p. 855) que pour $a_j = n_j/TME$ - activité moyenne pendant la durée d'un canal TME - l'instant de référence peut être assimilé à l'instant milieu du canal tant que cette durée n'excède pas 30% de la période ; on verra plus loin qu'il est parfois préférable de considérer comme référence l'instant début du comptage et de tenir compte explicitement du facteur intégrant :

$$\frac{1 - e^{-\lambda TME}}{\lambda TME}$$

- a_j taux de comptage de l'isotope j à l'instant de référence
- λ_j constante radioactive de l'isotope j
- b_1 = b, bruit de fond, en principe indépendant du temps (de 1) dans des conditions de comptage normales.

L'expérimentateur qui a mesuré une source d'activité décroissante cherche à résoudre deux problèmes d'inégales complexités.

1 - 1 - 1 - Déterminer la nature du ou des radioisotopes constitutifs de la source, c'est-à-dire la ou les constantes radioactives λ_j . Cette opération est très difficile à mener à bien en l'absence de toute connaissance supposée ou approximative des λ_j . En analyse par activation par contre, la composition globale de l'échantillon irradié introduit des éléments qui facilitent le dépouillement préalable, ne laissant éventuellement indéterminées que les interférences : périodes qui ne sont pas l'objet du dosage.

1 - 1 - 2 - Une fois la composition qualitative de la courbe connue, l'intérêt se porte sur la détermination des taux de comptage à un temps de référence (t_0) pour chacun des constituants ou pour un seul d'entre eux, à partir de quoi une analyse quantitative est possible.

La figure 1 schématise les onze types du problèmes, relevant de l'analyse qualitative ou de l'analyse quantitative ou des deux simultanément, qui se présentent le plus souvent et qui sont traités par le programme "ANABASE".

Type 1 : "PERX" : Soit une courbe de décroissance apparemment "pure" c'est à dire à un seul composant - ou une portion de courbe - telle qu'une représentation semi-logarithmique la transforme en droite. Le problème est de calculer la période

FIG 1 - PERX

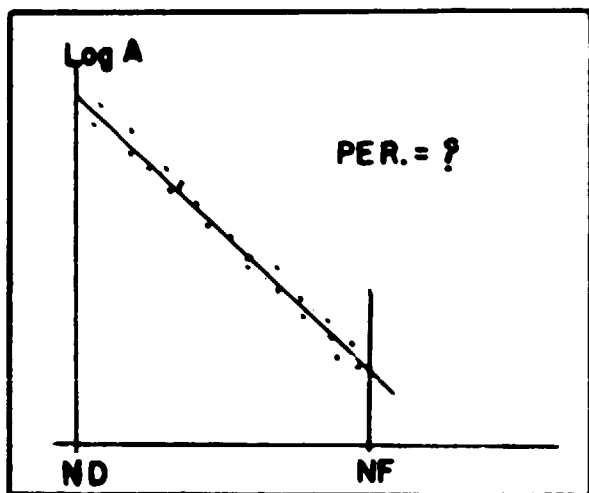


FIG 2 - PXCT

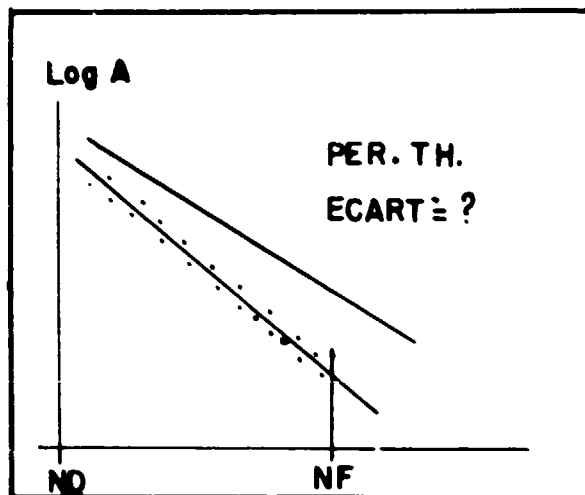


FIG 3 - SPLM

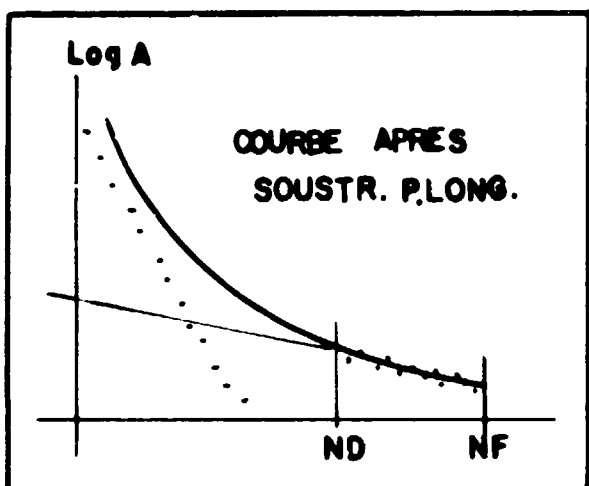


FIG 4 - PCSL

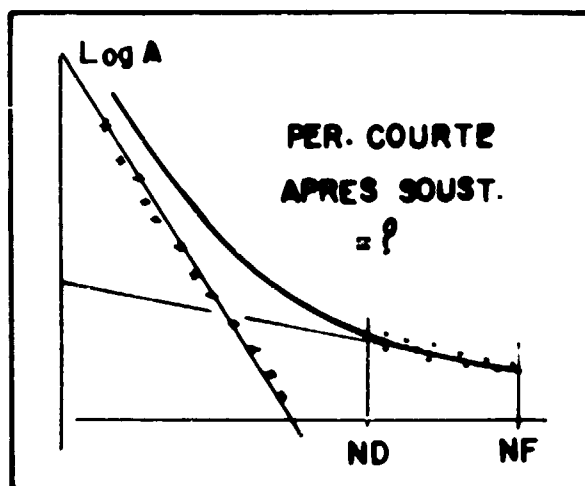


FIG 5 - RPER

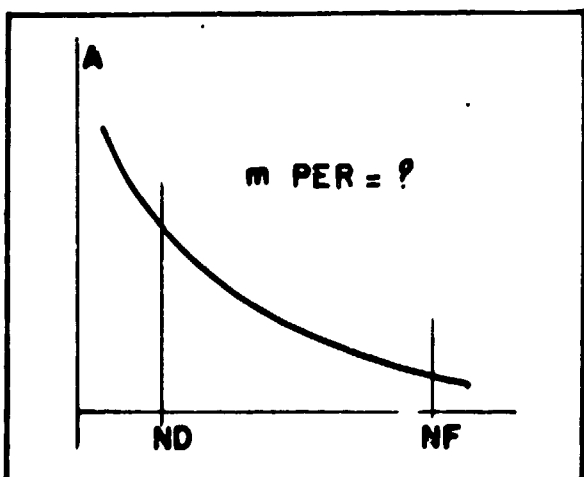
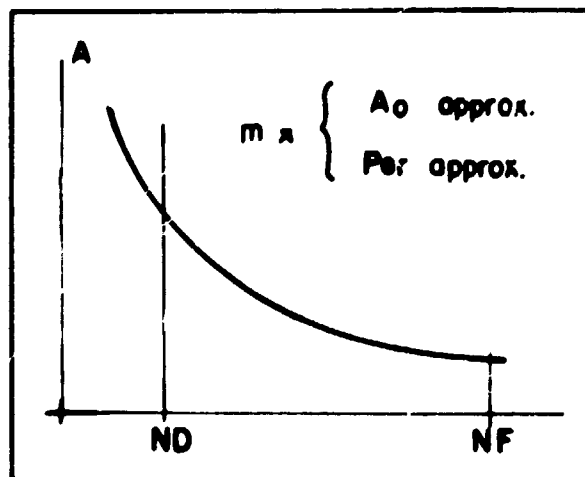


FIG 6 - AMPD



"expérimentale" correspondant au mieux aux mesures et le taux de comptage à l'origine.

Type 2 : "PXCT" : Le procédé PERX étant réalisé, on peut de surcroît vouloir comparer la période expérimentale trouvée à une période théorique (bibliographique) attendue et si l'écart excède une valeur choisie à priori, éliminer le résultat douteux d'une série de mesures portant sur un même échantillon ou des échantillons semblables.

Type 3 : "SPLM" : soit une courbe d'une période courte dégradée par la présence d'une période (plus) longue. A condition d'avoir poursuivi la mesure assez longtemps pour observer en fin de courbe une portion de période pure, le problème revient à déterminer sur cette portion a_L^0 et λ_L (à effectuer éventuellement une comparaison avec la période attendue) et à soustraire canal par canal la contribution calculée à partir de ces paramètres. Ceci fait, on pourra soumettre la courbe "nette" à l'une ou l'autre des options 5- 6- 7- 8- 9.

Type 4 : "PCSL" : Cette option revient à enchaîner automatiquement SPLM et PERX (PXCT) c'est-à-dire à chercher sur la courbe nette obtenue par soustraction - considérée alors comme pure - la période "expérimentale", (cf ci-devant).

Type 5 : "RPER" : Soit une courbe évidemment complexe et aucune idée sur la nature ni même le nombre des constituants. Dans ce cas l'habitude des expérimentateurs est de procéder graphiquement à des essais de soustractions successives. Or il apparaît très vite que l'accumulation des erreurs rend l'opération de plus en plus hasardeuse et quasi impossible à soumettre à un algorithme itératif de dépouillement automatique. (le procédé PCSL ci-dessus est fondé sur la reconnaissance explicite de la zone : Période la plus longue pure par l'expérimentateur et peut évidemment être repris, mais au cours de plusieurs passages en ordinateur). Signalons pourtant notre intention de conduire quelques soustractions successives automatiquement en intercalant des opérations de lissage aux fins de réduire les erreurs aléatoires. Signalons aussi la tentative de Gardner, *all* (J. chem. Phys. 31, 978, 1959

et NAS-NS 3107, p33, 63) de calculer les m (inconnu) constantes radioactives à partir de la seule connaissance de la courbe de décroissance par une méthode utilisant les transformées de FOURIER, méthode dont nous ne disposons pas encore. RPER concerne une analyse qualitative dans le cas où le nombre m de constituants est connu (ou supposé). La base mathématique du procédé est la méthode de Prany (cf. par exemple : Hildebrand, Introduction to numerical analysis, Mc Graw Hill, p 378 ss) qui admet que les mesures sont équidistantes dans le temps -condition remplie par le mode multi-échelle de mesure. La méthode ne conduit pas toujours à trouver m coefficients réels c'est-à-dire physiquement significatifs. RPER ne doit donc être considéré que comme une tentative d'analyse de courbes (sommes exponentielles). Les conditions de succès sont difficiles à définir.

Type 6 : "AMPD" : soit une courbe composite dont on connaît pour les m constituants, des constantes λ_j' et a_j' approximatives, telles qu'on a pu les obtenir par exemple au moyen d'un dépouillement graphique. Il est alors relativement facile d'améliorer les $2m$ paramètres par une méthode de moindres-carrés non linéaires itératifs jusqu'à atteindre une certaine précision jugée satisfaisante. (cf NAS-NS 3109, p. 107-8 et CUMMING, NAS-NS-3107, p. 2655).

Type 7 : "MCEX" : il s'agit du sous-programme de très large application qui réalise la décomposition d'une courbe somme d'exponentielles en ses m constituants de λ_j connus. La formulation mathématique est la même que celle qui sert à la décomposition de spectres gamma, à la différence que le modèle se réduit ici à l'ensemble rigoureux des constantes de décroissance des m constituants.

Type 8 : ERMA : Ceci constitue une tentative -assez délicate- de déterminer les taux de comptage à l'origine à partir d'une courbe complexe, en ne connaissant que le nombre de constituants, m . On opère par l'enchaînement automatique de RPER, MCEX, AMPD. Si RPER fournit correctement m constantes λ_j approximatives, MCEX les utilise pour calculer m taux a_j^0 , qui seront évidemment eux-mêmes

FIG 7 - MCEX

6

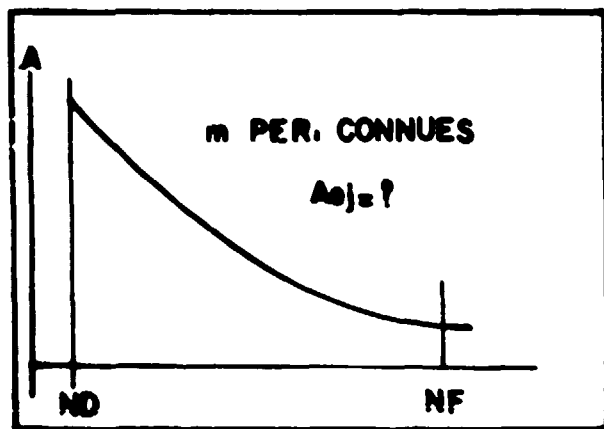


FIG 10a - ATEM

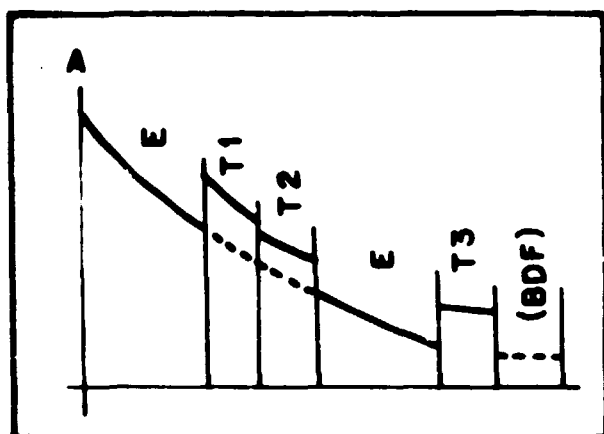


FIG 10b - ATEM

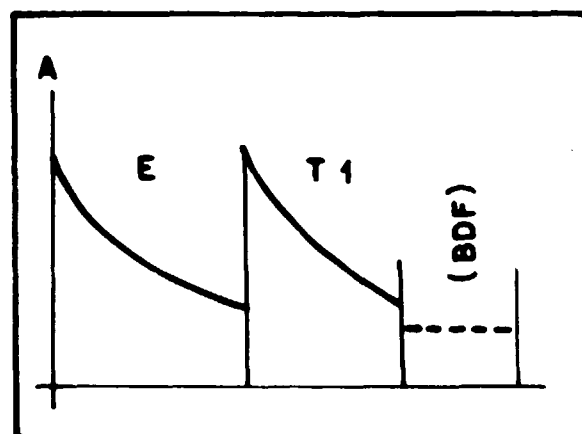


FIG 11a - ADOS

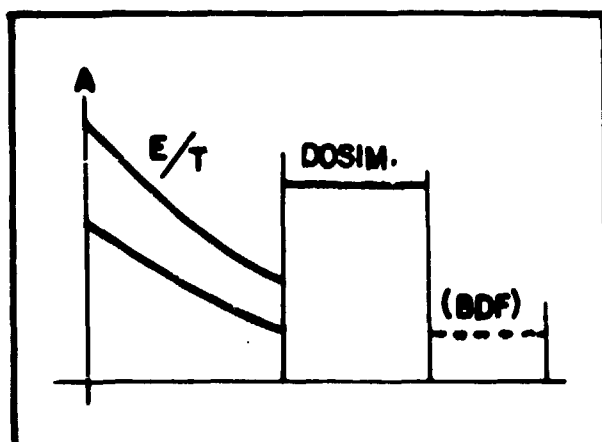
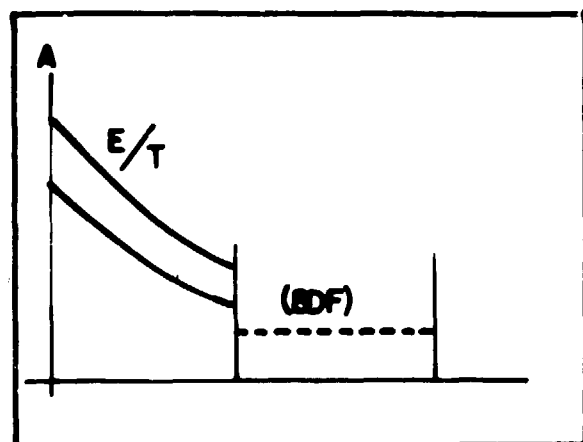


FIG 11b - ADOS



1 SEUL TEMOIN

approximatifs. Il reste à améliorer les m couples (a_j^0, λ_j^0) par AMDP. L'écueil est à redouter surtout au niveau RPER.

Type 9 : PERK : Si la courbe est composée de deux constituants de périodes radioactives voisines, il peut être impossible de trouver leurs contributions individuelles par AMDP ou MCEX. Par contre la transformation mathématique décrite par Biller et reprise par Perkel (Nucleonics 15, 103, 1957) semble plus efficace. Elle permet aussi de mettre en évidence la présence d'une interférence plus courte ou plus longue que l'une et l'autre des périodes en jeu.

Type 10 : ATEM : Ce type est le suivant, au contraire des autres qui s'appliquent à des courbes indépendantes, concernent des problèmes d'analyse par activation où il est question de comparer des taux de comptage se rapportant à des constituants d'échantillons et à des témoins purs de ces constituants pour en tirer des teneurs, résultats de dosages quantitatifs.

ATEM est adapté aux conditions dites d'irradiation simultanée de l'échantillon et du (des) témoin(s). La "courbe" obtenue par la mesure successive des différentes sources est schématisée dans les figures 10a et 10b. La seconde représente par exemple le cas du dosage de l'oxygène en neutrons rapides, la figure 10a montre que l'on peut généraliser en introduisant jusqu'à 4 témoins, la courbe Echantillon étant découpée au mieux des exigences du dosage, en 4 bandes au plus. (pratiquement 2 - 3). Une variante consiste à considérer une dernière zone où est enregistré le bruit de fond que l'on peut soustraire avant traitement. Celui-ci comprend 2 phases, sur la bande Echant. (simultanément sur l'ensemble des bandes), on opère par MCEX. Dans le cas où la courbe Echant. est théoriquement due à un seul constituant, on peut prendre le BDF comme second. Sur la (les) bande(s) témoins, on opère par PXCT (contrôle de la période expérimentale). Le calcul des teneurs (et de leurs écart-types) est immédiat, puisque les taux de comptage de chaque activité sont tous calculés à l'instant début de la mesure (canal zéro de l'analyseur) ou à l'instant Fin d'irradiation (en tenant compte du TR, temps de transfert).

TYPE 11 : ADOOS : Les conditions sont celles d'irradiation séparée cf figure 11a. Un échantillon est irradié avec un "Dosimètre" ; les deux sources sont comptées successivement. (Après quoi intervient éventuellement la mesure du BDF). Le témoin est manipulé de la même façon. Dans la version actuelle d'ANABASE, on ne considère qu'un seul élément dosé, cas le plus fréquent des dosages (par exemple oxygène) ; pratiquement on pourra utiliser plusieurs témoins "matériels" pour une suite de dosages. Par contre, en ce qui concerne le dosimètre (ex. Cuivre en analyse d'oxygène), on utilisera des pastilles identiques.

Le dosimètre a pour but de normaliser les conditions de flux d'irradiation. Le schéma 11b représente le cas où le dosimètre est remplacé par un moniteur extérieur de flux dont les indications sont relevées et entrées manuellement à l'exécution du programme.

La suite des irradiations Echantillon-témoin peut être quelconque. Le calcul des teneurs est à 2 options. La première consiste à moyenner les activités spécifiques normalisées calculées pour toutes les mesures du témoin, et à rapporter l'activité spécifique de chaque échantillon à cette moyenne. La seconde peut tenir compte de variations difficiles à contrôler des conditions d'irradiation. La suite des irradiations est alors construite de telle sorte qu'un petit nombre de mesures d'échantillons sont encadrées par des mesures de témoin. L'activité normalisée du témoin servant de référence est alors la moyenne des seules deux mesures encadrantes.

NB1 : Le calcul de l'écart-type d'un résultat est donné par la loi de combinaison des erreurs. On a :

X_E = taux de comptage de l'échantillon

$\sigma(X_E)$ = écart-type du calcul de X_E (moindres-carrés)

X_T = taux de comptage du témoin

$\sigma(X_T)$ = écart-type du calcul de X_T (moindres-carrés)

On calcule :

$$TEN = X_E / X_T \times \text{Masse Témoin} / \text{Masse Echantillon}$$

$$\sigma(TEN) = TEN \times \sqrt{(\sigma(X_E)/X_E)^2 + (\sigma(X_T)/X_T)^2}$$

NB 2 : ANABASE comporte un calcul (option) de moyenne et écart-type portant sur plusieurs mesures du même échantillon ; ceci aussi bien pour ATEM que pour ADOS.

2 - BASES MATHÉMATIQUES ET ALGORITHMES DE CALCULS

2 - 1 - Moindres-carrés linéaires

Les moindres-carrés consistent à approcher une courbe donnée par points (y_i, x_i) où l'incertitude (erreurs aléatoires) ne porte que sur les y_i par une fonction

$$Y_i = \sum_{j=1}^m C_j \phi_j(x_i) + \epsilon_i \quad (\text{résidu})$$

On cherche à minimiser

$$S = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n w_i \left(y_i - \sum_{j=1}^m C_j \phi_j(x_i) \right)^2$$

où w_i est un terme de pondération qui est égal à 1 si les variances des y_i sont égales, sinon $w_i = 1/\text{VAR}(y_i)$.

Pour cela on dérive et égale à 0

$$\delta S / \delta C_j = 0$$

On obtient m "équations normales" linéaires dont les solutions sont les C_j . Il est plus commode d'utiliser la forme matricielle du système qui s'écrit :

$$\begin{pmatrix} A^T & W & A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A^T & W & y \end{pmatrix}$$

(m,n)(n,n)(n,m) (m) (m,n)(n,n)(n)

dont la solution est donnée par :

$$C = (A^T W A)^{-1} \cdot A^T W y$$

$$C = AM^{-1} \cdot V$$

De plus il est démontré que la matrice de covariance de a est donnée par :

$$\frac{S}{n-m} (A^T W A)^{-1}$$

dont on tire la variance : $\text{VAR}(C_j) = \frac{S}{n-m} (A^T W A)^{-1}_{jj}$

(éventuellement coefficient de corrélation entre C_i et C_j par

$$r_{ij} = b_{ij} / \sqrt{b_{ii} b_{jj}} \quad , \quad b_{ij} = (A^T W A)^{-1}_{ij}$$

Ce coefficient doit être aussi petit que possible.)

On peut avoir encore une estimation de la précision de l'ajustage par le test du CHI2

$$\text{CHI2} = \sum_{i=1}^n \frac{r_i^2}{\text{VAR}(y_i)}$$

où r_i est le résidu non pondéré : $Y_i - \sum_{j=1}^m C_j \phi_j(x_i)$

et y_i une estimation de $\text{VAR}(y_i)$.

CHI2 suit une loi de probabilité à $n-m$ ddl, c'est-à-dire que pour n assez grand, $\text{CHI2}/(n-m)$ doit être proche de 1.

ORGANIGRAMMES :

SUBROUTINE AMVISO (A, Y, W, M, ND, NF, AM, C)

Ce sous-programme calcule à partir de la matrice rectangulaire $A(I,J)$, I allant de ND à NF (soit $n = NF - ND + 1$), $J = 1, M$, du vecteur poids W , la matrice carrée d'ordre M , AM . Appelle INVMD pour l'inversion de AM , calcule le vecteur $V = A^T W Y$, calcule enfin le vecteur solution C . Le calcul de AM est effectué en double précision.

SUBROUTINE INVMD (M, AM)

opère en double précision - l'inversion de AM symétrique par une méthode classique. A la sortie on dispose de la matrice inverse.

SUBROUTINE SIGTHR (A, Y, W, M, ND, NF, AM, C, SIGX, CTH, CRES, CHI2) et SUBROUTINE SIGLOG
La suite $A, \dots, C$, étant définie, ce sous-programme calcule po point par point (de ND à NF)

- La courbe théorique (ajustée), $CTH(I)$
 - Le résidu (différence entre courbe exp. et théorique, $CRES(I)$)
- De la somme des carrés des résidus, il déduit le CHI2 et tenant compte de la diagonale de AM , les variances de C , soit $SIGX$.
- En outre $CRES$ est le résidu normalisé, c'est-à-dire comparé à l'écart-type de la valeur de la courbe théorique :

2 - 1- 1- Application à une droite : Ce calcul intervient dans PERX, PXCT, PCSL (2 fois), PERK et sur les bandes-témoins (dosimètre) dans ATEM, ADDS. La décroissance d'un radioisotope pur est décrite par

$$a_i = a^0 e^{-\lambda t_i}$$

que l'on peut mettre sous la forme :

$$\ln a_i = \ln a^0 - \lambda t_i$$

équation d'une droite dont il faut trouver les 2 coefficients $\ln a^0$ et λ . Connaissant la pondération qu'il faudrait apporter à a_i (en statistique poissonnienne $\text{VAR}(a_i) = a_i$), le poids de $\ln a_i$ est donné par $\text{VAR}(\ln a_i) = \text{VAR}(a_i)/a_i^2 = 1/a_i$ (cf NAS-NS-3109, p. 102)

Le Système de m - c est défini par :

$$\left. \begin{array}{l} \Lambda_{1,1} = 1 \\ \Lambda_{1,2} = t_1 \end{array} \right\} \text{ pour } i = 1, n$$

$$w_1 = a_1$$

$$y_1 = \ln a_1$$

$$\begin{aligned} \text{On trouve : } a^0 &= e^{x_1} \\ \lambda &= x_2, \quad T1/2 = -0.69315/x_2 \end{aligned}$$

Par la loi de compétition des erreurs que l'on rappelle ici :

pour $Q = f(X, Y, \dots)$

$$\sigma^2(Q) = \left(\frac{\delta Q}{\delta X}\right)^2 \sigma_X^2 + \left(\frac{\delta Q}{\delta Y}\right)^2 \sigma_Y^2 + \dots$$

On déduit

$$\sigma(a^0) = a^0 \cdot \sigma(x_1)$$

$$\sigma(T1/2) = \left| T1/2 \cdot \sigma(x_2)/x_2 \right|$$

ORGANIGRAMMES :

Pour PERX, (PXCT), PCSL, le programme principal établit la matrice A, les vecteurs W et Y. On utilise ensuite AMVISD et SIGLOG. Les transformations inverses sont reprises par le programme principal.

2 - 1 - 2 - Application à une somme d'exponentielles de coefficients connus :

cf, MCEX, ATEM, ADDS. La fonction à approcher est la suivante

$$b_1 = \sum_{j=1}^m a_{j,1}^0 \cdot e^{-\lambda_j t_1} \quad (\text{cf. 2.1.2A})$$

La matrice A est constituée des termes $e^{-\lambda_j t_1}$ pour $j = 1, m$: m colonnes ; $i = 1, n$: n lignes. (Remarque : ce terme peut devenir nul pour j et/ou t_1 grands) ; $y_1 = b_1$, points expérimentaux ; $w_1 = 1/\text{VAR}(b_1) \approx 1/b_1$. Le vecteur solution $C_j = a_j^0$ taux de comptage à l'instant de référence défini par l'échelle des t_1 . De plus

$$\sigma(a_j^0) = \sigma(C_j)$$

ORGANIGRAMME :

Même principe que ci-dessus (utilisation de AMVISD et SIGTHR). Dans ANCX, on peut avoir affaire à une courbe (complexe) discontinu formée de bandes séparées par des intervalles consacrés ici à des mesures de témoins. De toute façon, quelle que soit la succession des t_i indépendants, l'équation (2.1.2.A) reste valable. Il suffit de former la matrice A en faisant varier I de ND(1) à NF(1), puis de ND(2) à NF(2)... etc. (Demême pour y_i et w_i) le calcul est considéré comme correct (quelle que soit la précision atteinte) lorsque le modèle

$$\sum_{j=1}^m a_{j,i}^0 \cdot e^{-\lambda_j t_i}$$

est satisfait, c'est à dire, lorsque la courbe complexe est bien représentée par une combinaison linéaire des m composants. Mais si une ou plusieurs valeurs a_j^0 sont en fait nulles (surestimation de la présence de ces composants), on obtient $c_j \approx \pm 0$, pour ceux-ci et des résultats peu précis pour les composés réellement présents. Aussi est-il nécessaire dans ce cas de recommencer le calcul en ayant modifié le modèle, soit le jeu de composants. Dans ANABASE, un composant est éliminé quand son $a_j < 10$, ceci à titre d'essai.

2 - 2 - Moindres carrés non linéaires - Procédé AMPD.

L'équation

$$b_i = \sum_{j=1}^m a_{j,i}^0 e^{-\lambda_j t_i}$$

n'est pas linéaire en λ_j . Le cas précédent ne s'applique que lorsque les λ_j sont connus. Mais partons de m approximations de a_j^0 et λ_j : a'_j et λ'_j on opère une petite variation δa_j et $\delta \lambda_j$:

$$a'_j e^{-\lambda'_j t_i} \rightarrow (a'_j + \delta a_j) \exp(-(\lambda'_j + \delta \lambda_j) t_i)$$

et simplifie :

$$\exp(-(\lambda'_j + \delta \lambda_j) t_i) \approx (1 - \delta \lambda_j t_i) \exp(-\lambda'_j t_i)$$

$$\rightarrow (a'_j + \delta a_j) \exp(-\lambda'_j t_i) - (a'_j + \delta a_j) \delta \lambda_j t_i \cdot \exp(-\lambda'_j t_i)$$

en négligeant le terme en $\delta a_j \delta \lambda_j$, on obtient finalement

$$b_i = \sum_{j=1}^m \left[a'_j \exp(-\lambda'_j t_i) + \delta a_j \cdot \exp(-\lambda'_j t_i) - a'_j \delta \lambda_j t_i \cdot \exp(-\lambda'_j t_i) \right]$$

En séparant les termes connus des variables,

$$b_i - \sum_{j=1}^m a'_j \exp(-\lambda'_j t_i) = \sum_{j=1}^m \delta a_j \exp(-\lambda'_j t_i) - \sum_{j=1}^m \delta \lambda_j \cdot a'_j t_i \exp(-\lambda'_j t_i)$$

On est ramené à résoudre un système linéaire à 2m inconnus : $\delta a_j, j = 1, m; \delta \lambda_j, j = 1, m$. La matrice A est double.

$$A = \left[\begin{array}{c|c} e^{-\lambda'_j t_i} & -a'_j t_i e^{-\lambda'_j t_i} \end{array} \right] \quad \begin{array}{c} i = 1 \\ \vdots \\ n \end{array} \quad \begin{array}{c} j = 1 \quad \dots \quad m \quad 1 \quad \dots \quad m \end{array} \quad \begin{array}{c} (n, 2m) \\ \downarrow \\ n \end{array}$$

y (vecteur connu) =

$$\left[b_i - \sum_{j=1}^m a'_j e^{-\lambda'_j t_i} \right] \quad (n, 1)$$

(w = 1, on ne considère pas de pondération)

X (vecteur solution) =

$$\left[\begin{array}{c} \delta a_j \\ \delta \lambda_j \end{array} \right] \quad \begin{array}{c} j = 1 \\ \vdots \\ m \\ j = 1 \\ \vdots \\ m \end{array}$$

Le procédé est itératif : on corrige les valeurs de a'_j et λ'_j par

$$a'_j = a'_j + \delta a_j$$

$$\lambda'_j = \lambda'_j + \delta \lambda_j$$

Dès que δa_j et $\delta \lambda_j$ sont suffisamment petits, le procédé est interrompu. Les dernières valeurs de a'_j et λ'_j sont considérées comme les meilleures approximations de a^0_j et λ_j .

ORGANIGRAMME :

La résolution du système $AX = Y$ a été essayée par AMVISD, mais avec une précision insuffisante. En conséquence on a eu recours au sous-programme QRMDRC (algorithme du QR) mis à disposition par le LCN/CENG (INT/LCN/67-29/AL-GS/me).

La "précision" de l'ajustage dépend dans ce cas de la valeur imposée du test d'arrêt. Provisoirement il a été fixé à 2% de variation max. sur DAO (δa_j) et DLAM ($\delta \lambda_j$).

2 - 3 - Méthode de Prony.

L'équation (2 - 1 - 2A) peut s'écrire, avec $u_k = e^{-\lambda_k}$

$$b_i = \sum_{j=1}^m a_j^0 u_j^{t_i} \quad (2. 3. A)$$

Si les t_i sont également espacés, on peut développer

$$\begin{aligned} b_1 &= a_1^0 + a_2^0 + \dots + a_m^0 \\ b_2 &= a_1^0 u_1 + a_2^0 u_2 + \dots + a_m^0 u_m \\ &\vdots \\ b_n &= a_1^0 u_1^{n-1} + a_2^0 u_2^{n-1} + \dots + a_m^0 u_m^{n-1} \end{aligned} \quad (2. 3. B)$$

soit n équations non linéaires en u .

La méthode de Prony revient à établir une équation d'ordre m , dont les racines seraient les u_j , soit

$$u^m - z_1 u^{m-1} - z_2 u^{m-2} - \dots - z_{m-1} u - z_m = 0 \quad (2. 3. C)$$

Les coefficients z sont obtenus en résolvant par moindres-carrés un système de $n-m$ équations

$$\begin{aligned} z_m b_1 + \dots + z_1 b_m &= b_{m+1} \\ z_m b_2 + \dots + z_1 b_{m+1} &= b_{m+2} \\ &\vdots \\ z_m b_{n-m} + \dots + z_1 b_{n-1} &= b_n \end{aligned} \quad (2. 3. D)$$

Ce système est obtenu en prenant successivement des groupes de $m+1$ équations de (2. 3. B), multipliant la première par z_m , la seconde par z_{m-1} , et la dernière par -1 , additionnant et simplifiant par la condition (2. 3. C.)

L'équation (2. 3. C) peut avoir des racines complexes. Dans ce cas naturellement, la solution sera jugée non satisfaisante, ce procédé sera considéré comme ayant échoué à résoudre le problème physique posé.

ORGANIGRAMME :

Le programme principal ayant établi la matrice des coefficients pour le vecteur constant du système (2. 3. D), on utilise ici aussi le sous-programme QRMDRC (AMVISD s'étant avéré nettement insuffisant). La recherche des racines de l'équation (2. 3. C) est opérée par la méthode de Bairstow (sous-programme

BSTOW (INT/LCN-CENG/67-32/JD/ma) sauf si $N = 2$ auquel cas on résoud par l'algèbre classique. La recherche est interrompue avant appel de BSTOW si les signes des coefficients de (2. 3. C) ne se suivent pas en ordre alterné (toutes racines 0). Le procédé est abandonné si on ne trouve pas N racines réelles.

Au titre de la mise au point, on a introduit une procédure de lissage pour tenter d'éviter les échecs qui pourraient être dus aux fluctuations statistiques des mesures. Le procédé est répété au maximum 4 fois après l'échec en soumettant la courbe à SLIS. On peut penser que le lissage s'il conduit au succès amène par contre un léger décalage sur les périodes trouvées. Mais celles-ci ne peuvent de toute façon qu'être tenues pour approximatives.

2 - 4 - Procédé BILLER - PERKEL

La courbe-somme de 2 exponentielles s'écrit :

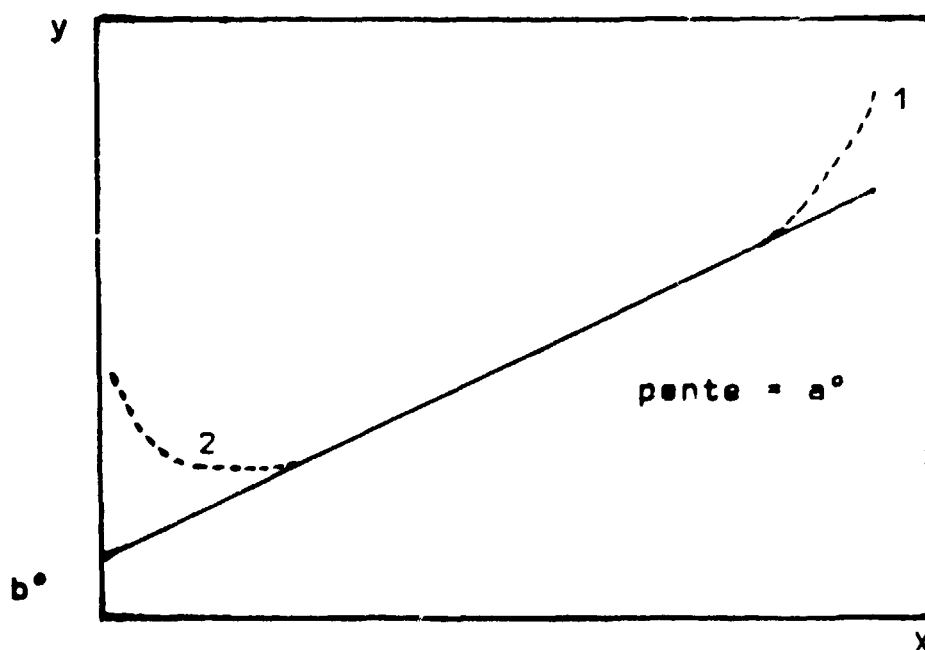
$$y_1 = a^0 e^{-\lambda_a t_1} + b^0 e^{-\lambda_b t_1}$$

Choisissons $\lambda_a > \lambda_b$ et multiplions par $e^{\lambda_b t_1}$, on obtient

$$y_1 e^{\lambda_b t_1} = a^0 e^{(\lambda_b - \lambda_a) t_1} + b^0$$

équation droite $y = mx + b$. En portant sur un graphique à axes linéaires $y = y_1 e^{\lambda_b t_1}$ en fonction de $x = e^{(\lambda_b - \lambda_a) t_1}$

on obtient la pente $= a^0$ et l'ordonnée à l'origine b^0 . Il est intéressant de noter les interférences dues à un troisième composant de période plus courte -ou plus longue- en traits pointillés sur la figure ci-dessous.



- 1 : interférence de période courte
2 : interférence de période longue

Dans le programme ANABASE, les coefficients a^0 et b^0 sont déterminés par moindres-carrés (cf. 2.1).

ORGANIGRAMME :

Le programme principal établit la matrice $A(I,J)$:

$$A(I,1) = 1.$$

$$A(I,2) = \text{EXP} [(LAM(2) - LAM(1)) \times T(I)]$$

et le vecteur constant $y(I) = y(I) \times \text{EXP} [LAM(2) \times T(I)]$
le système est traité par AMVISD et SIGTHR.

A titre expérimental, le contrôle des interférences possibles a été conduit de la façon suivante : la courbe de décroissance expérimentale est segmentée en un petit nombre de parties. Le traitement ci-dessus s'applique à chacun des segments et la concordance des résultats permet de conclure (ou non) à l'absence d'interférence ou à la présence d'une interférence de l'un ou l'autre type.

2 - 5 - Corrections à apporter lorsque le temps de comptage n'est pas négligeable devant la période :

Ce qui a été établi ci-dessus ne vaut en toute rigueur que lorsqu'il n'y a pas décroissance sensible pendant chaque intervalle de mesure, en d'autres termes lorsque :

$$\bar{A} \approx A_1$$

(cf. CEA-R 2980, P. 4_{ss} et Tab. I, III)

$$\bar{A} = \text{taux moyen de comptage} = N/TME$$

$$A_1 = \text{taux de comptage vrai au début de l'intervalle.}$$

Ceci est correct tant que $TME/T_{1/2}$ ne dépasse pas 0,02.

La correction de décroissance intervenant alors de la manière suivante. Le rapport entre A_1 et $\bar{A}$, en fonction de $TME/T_{1/2}$ est rappelé :

$$k = A_1/\bar{A} = \lambda \cdot TME / (1 - \text{EXP} (-\lambda TME))$$

Par ailleurs on considérera -sans normalisation- les taux de comptages en coups par unité de temps égale à TME, soit :

$$k = A_1 \cdot TME / N$$

où N est le nombre de coups, contenu du canal (en mode multi-échelle).

2 - 5 - 1 - Une période courte pure (PERX ; ATEM, ADOS dans les zones témoins-dosimètre)

La détermination de la période expérimentale n'est pas affectée puisque le rapport $A_1/\bar{A}$ est constant pour tous les intervalles TME. L'établissement du système linéaire reste ce qu'il est d'après 2.1.1. le taux de comptage à l'origine est simplement corrigé par

$$e^0 = e^{x1} \cdot k$$

D'après ce rapport cité(17), on pourrait aussi bien remplacer la suite des t_1 , instants de début des intervalles TME par $t'_1 = t_1 - (TME - TX)$, TX étant l'instant compté à partir de t_1 où l'on a exactement $\bar{A} = A(TX)$. On a établi :

$$A_0 = \bar{A} e^{\lambda TX}$$

et on peut vérifier que $e^{\lambda TX}$ égale k.

2 - 5 - 2 - Plusieurs périodes en jeu (AMDP, MCEX)

La correction est introduite dans la matrice A : on prendra comme terme général de celle-ci

$$e^{-\lambda_j t_1} \cdot \frac{1}{k_j}$$

Dans AMPD on multiplier de même les termes de A et de B par $1/k_j$

$$1/k_j = (1 - \text{EXP}(-\lambda_j \text{TME}))/\lambda_j \text{TME}$$

3 - PROGRAMME ANABASE

Les chapitres 1 et 2 ont traités des diverses méthodes d'analyses de courbes de décroissance, des techniques mathématiques utilisées et des sous-programmes de calcul requis. On peut concevoir toute une série de mises en oeuvre d'après les besoins et les moyens des utilisateurs. On peut ainsi écrire un programme particulier à chaque option de dépouillement en fixant au minimum nécessaire la lecture des données sur cartes -et par ailleurs l'édition des résultats (intermédiaires et finaux).

On donne ci-dessous une description de programme ANABASE comme exemple d'un ensemble regroupant toutes les méthodes décrites ci-dessus ; un certain nombre d'entrées-sorties étant communes, le choix du calcul ou de l'enchaînement possible de calculs différents sur une même courbe est sous la dépendance d'options spécifiées par des codes.

3 - 1 - Parmi les sous-programmes "de service" d'usage général (et d'ailleurs inclus dans les autres programmes de SAR/APA) il y a :

ACDS5 : lecture et contrôle des rubans perforés.

PSLD : sous-programme de lecture de données sans format (mis à disposition par LCN (cf. INT.LCN.67-12,18,22/BR/ma).

NORTS : Les données de temps (comptage, décroissance, périodes) étant dues par PSLD sous forme de couples = valeur + unité en clair, NORTS établit la correspondance avec une table et normalise les variables en secondes.

SLIS : Sous-programme de lissage de courbes données par points (spectres, courbes de décroissance) basé sur la formule :

$$YL(I) = (17 \times Y(I) + 12 \times (Y(I+1) + Y(I+1)) - 3 \times (Y(I-2) + Y(I+2)))/35$$

EDITA = impression des parties utiles des tableaux représentant les courbes de décroissance, avec adresse en début de ligne.

DVSTF : contient une table simplifiée de test t de Fisher ; calcule sur un ensemble de résultats, la moyenne, l'écart-type et les limites de confiance en fonction du nombre de données.

Ces sous-programmes seront décrits dans le rapport en préparation :

"ELEMENTS DE PROGRAMMATION EN SPECTROMETRIE GAMMA ET EN ANALYSE PAR ACTIVATION".

3 - 2 - L'introduction des données et le contrôle du déroulement des calculs (options, enchainements) sont effectués par une suite de cartes numérotées dont le tableau I donne l'ordonnance et le modèle.

Les données de mesure (max. 400 canaux) sont lues sur ruban perforé ou sur cartes. Les instants de mesure sont calculés si l'intervalle séparant 2 canaux reste constant, ou lus sur cartes. Les données brutes sont éventuellement corrigées des pertes au comptage par la formule de correction du temps mort (cf. NAS-NS-3109, p 12) :

$$Y(I) = Y(I) \frac{TME}{TME - TAU \times Y(I)}$$

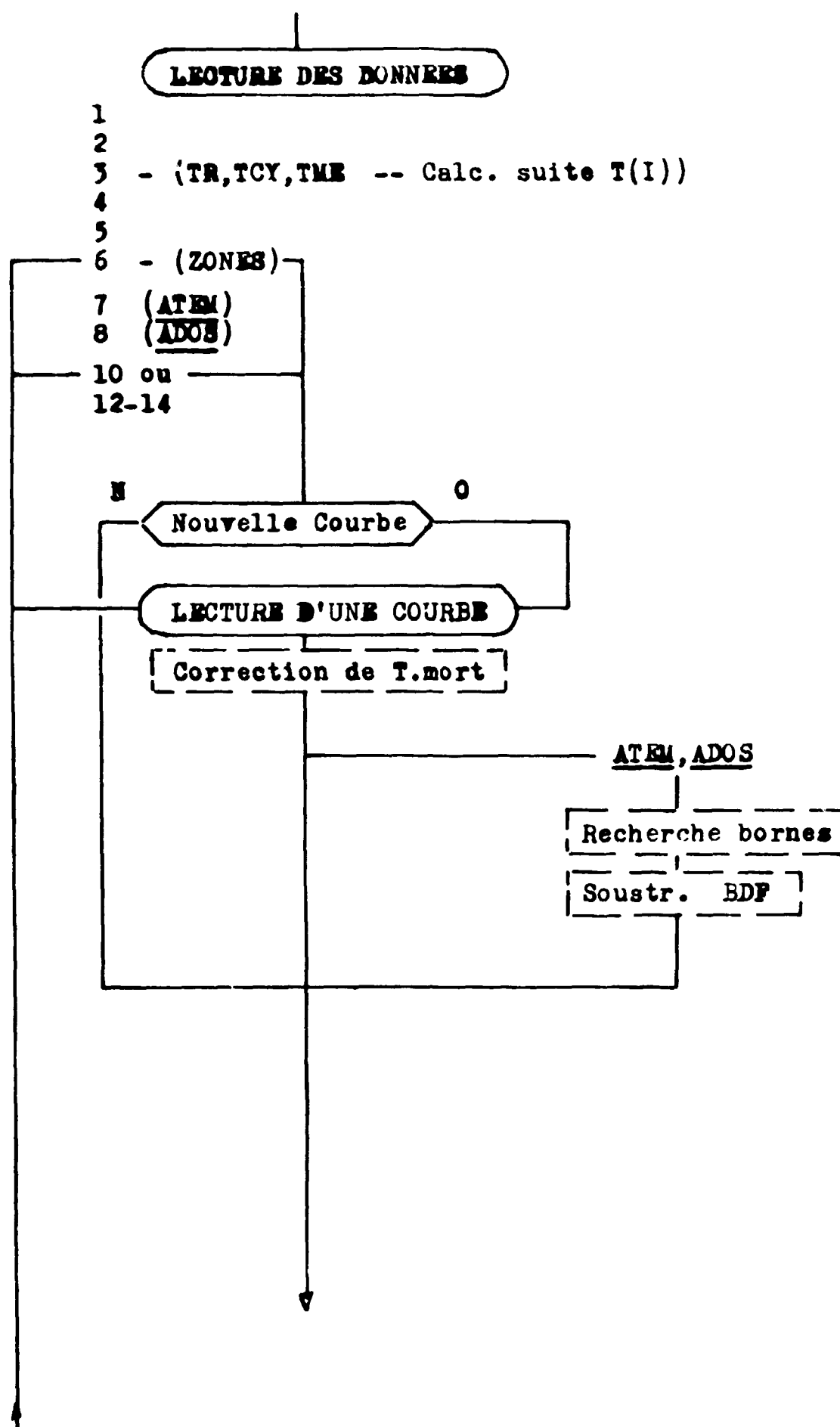
3 - 3 - Pour les 9 premiers types de calculs, il est prévu de pouvoir opérer sur une même courbe un nombre indéfini de traitements, soit en modifiant par exemple les bornes de la zone à utiliser, soit en essayant différentes options. Pratiquement à la fin d'un calcul on reviendra lire une carte 4 ou 5 et obligatoirement 6 en notant KS U = 1 conduisant au by-passage de la lecture d'une nouvelle courbe.

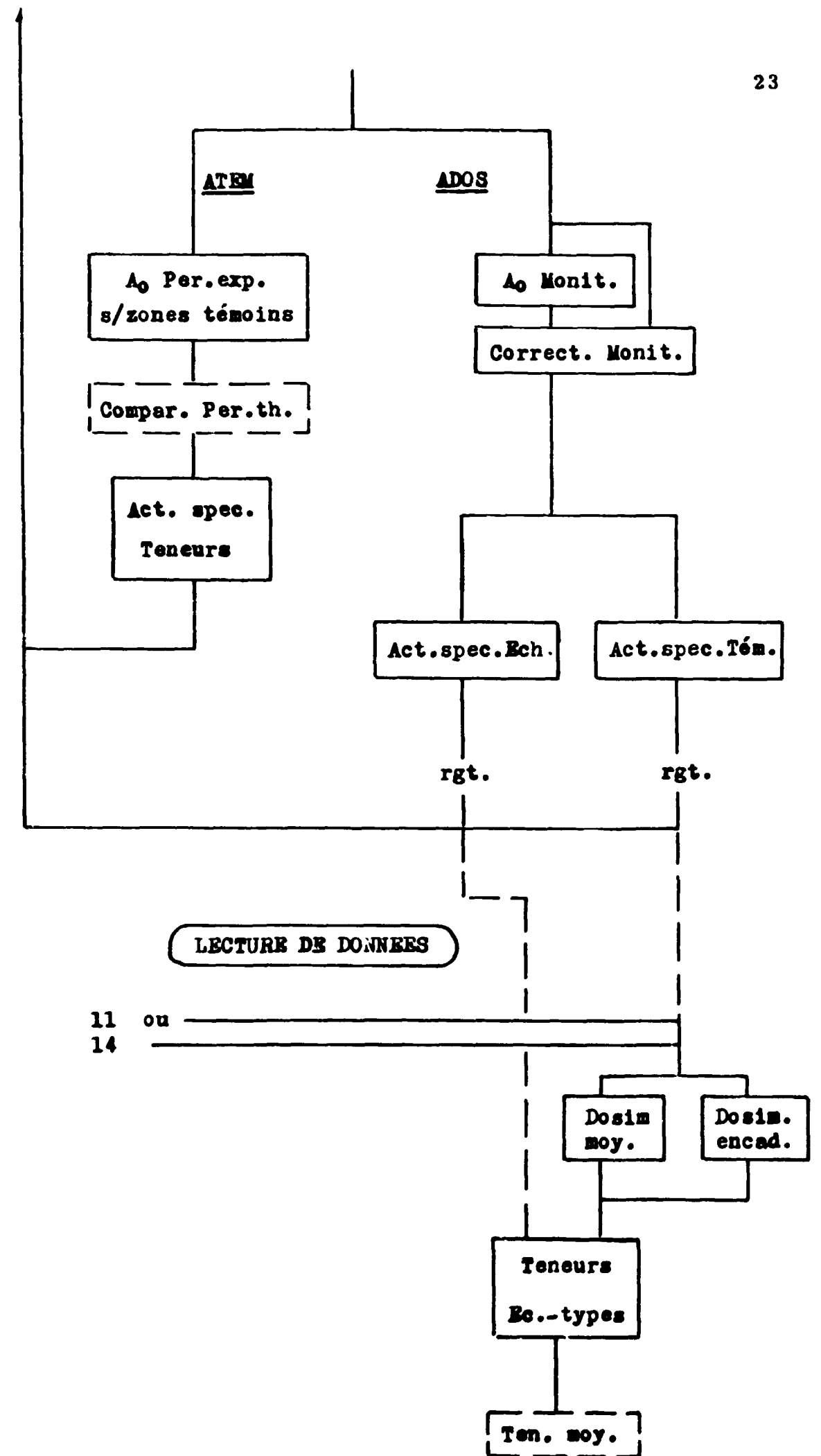
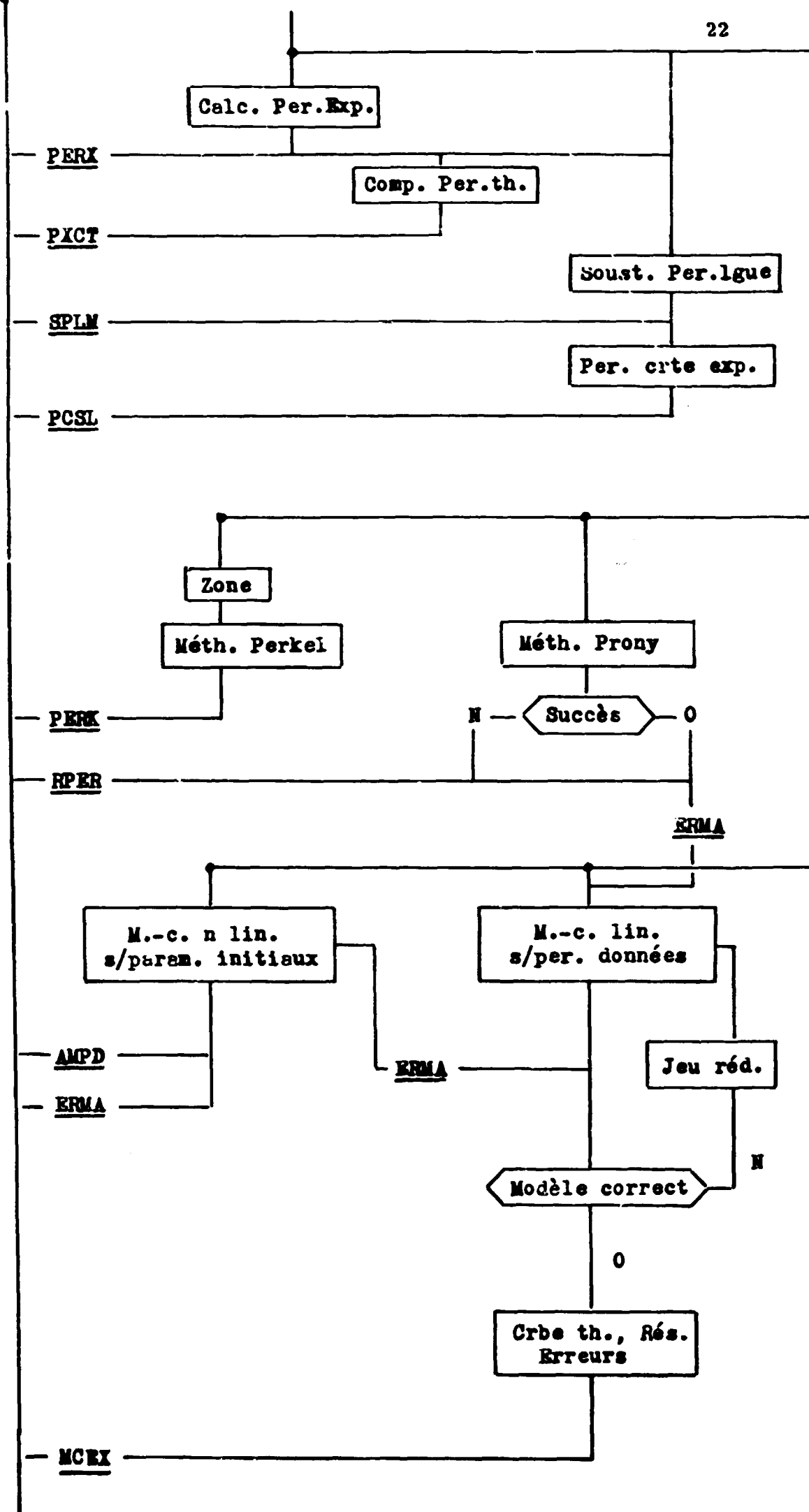
3 - 4 - ATEM et ADOS impliquent une carte-données supplémentaire (7 (ATEM) ou 8 (ADOS)) portant des indications générales constantes, telles que zones de calculs, activités de référence du dosimètre, option de soustraction de bruit de fond. (Un sous-programme est à l'étude pour déterminer automatiquement les différentes zones de calculs (cf. Fig. 10 et 11) qu'il peut être parfois difficile de maintenir identiques à elles-mêmes au cours d'une suite de dosage.)

Ensuite chaque courbe est introduite par une carte portant l'indication et la nature de la source (Ech. ou témoin, n° dans la série), le facteur de correction de flux s'il utilise un moniteur extérieur (sinon on inscrit FFLUX = 1), et la masse EMAS ou PMAS. (On pourra écrire "IDEM" ou "ID" pour simplifier.)

Après passage de toutes les courbes d'un JOB, une carte 11 (ou 14) déclenchera -pour ADOS- l'une ou l'autre des options KDOS (moyenne ou encadrante) et plus généralement le programme de mise en ordre des résultats.

Manuscrit reçu le 19 Novembre 1969

Annexe 1, Organigramme simplifié d' ANABASE



CARTES NUMEROTEES

- 1/ NOM(ALPHA),REF(ALPHA), NO,DATE (EX. 100969)
- 2/ LABO(ALPHA),INSTR(ALPHA), NCS,NCL, TAU(A)
(A) TEMPS MORT PAR IMP., EN MICROSEC.
- 3/ JPERF(A), TR, TCY, TME, UNIT (B)
(A) 0, PROG.TEST S/MESURES/ -1, IDEM S/DONNEES CALC.
1, RUBAN PERFORE
2, CARTES (Y) AU FORMAT(5X,10F7.0) OU (5X,10I7)
3, CARTES (Y) COMME CI-DESSUS SUIVIES DE CARTES (T) AU FORMAT
(5X,10F7.2) // PAS DE TR,TCY,TME,UNIT
(B) TR = TEMPS DE REFROIDISSEMENT, TCY = INTERV. ENTRE DEBUTS SUCCES.
DE COMPTAGE, TME = DUREE DU COMPTAGE
FN MODE MULTIECHELLE TCY = TME
UNIT = S,SEC,SECO., MN,MIN,MINU., H,HEUR., J,JOUR., A,ANS,ANNE.,
- 4/ TYPE, JTYPE(A), JEDIT(B), SREJ(C)
(A) CF. TABLEAU CI-DESSOUS
(B) 1, RESULTATS/ 2, + COURBES EXP.(CORR. IM) ET COURBES CALC./
3, + PERFO. COURBES EXP. ET COURBES CALC.
(C) SEUIL DE REJET SUR PER. EXP. POUR ATEM,ADDS
TEST ARRET SUR AMPD, NB.ZONES POU? PERK

5/ LISTE ISOTOPES ET CONSTANTES - TEMOINS - // MAX. 4 COMPOSANTS

JTYPE	NOEL	EL	AO	PER,UNIT	MASSE,UNIT
PERX 1	+	-	-	-	-
PXCT 2	+	+	-	+(*)	-
SPLM 3	+	+	-	+(**)	-
PCSL 4	+	+	-	+(**)	-
RPER 5	+	-	-	-	-
AMPD 6	+	+	+(***)	+(***)	-
MCEX 7	+	+	-	+	-
ERMA 8	+	-	-	-	-
PERK 9	+	+	-	+	-
ATEM 10	+	+	-	+	+
ADDS 11	+	+	-	+	+

(*) PER. THEORIQUE POUR COMPARAISON
(**) PER.IMPOSEE POUR SOUSTR. SINON 0.
(***) PARAM. INITIAUX APPROXIMATIFS
SI TMA# 0, ELEM. DOSE
SI TMA# 0, ELEM. NON DOSE
///IMPERATIF: PLACER ELEM. DOSES AVANT ELEM. NON DOSES///

--- * DONNEES PAR COURBE ---

SEUL MODE DE DONNEES POUR TYPES 1 A 9, PERX , PERK

- 6/* NOC(A), KSU(B), ND,NF(C)
(A) NUMERO D'ORDRE DU COMPTAGE
(B)0, NOUVELLE COURBE/, 1, MEME COURBE (NOUVEAU CALCUL)
(C) ZONE DE CALCUL/ PR 'SPLM' ET 'PCSL', BORNES DE LA ZONE MOYENNE-LONGUE
RECYCLAGE A 6
SUITE A 17 OU 18

--- // DONNEES SPECIALES POUR ATEM OU ADDS

- 7/ PR 'ATEM10', JBORN(A), NZ(B), NDZ,NFZ(B), NT(C), NDT,NFT(C),
JBF(D), NDBF,NFBF(D)
(A) 1, BORNES DONNEES/, 2, DETERMINATION AUTOMATIQUE
(B) NB. ZONES ET BORNES DES ZONES DE LA MESURE 'ECHANTILLON'
(C) NB. TEMOINS ET BORNES ZONES CORRESPONDANTES
(D) 0, SANS SOUSTRACTION DE BDF CONSTANT/, 1, AVEC + BORNES ZONE BDF
- 8/ PR 'ADDS11', JBORN(A), NDZ,NFZ(1) (B), NDT,NFT(1) (C), MONIT(D),
- EL,PER,MUPER -(E), SDOS(FLUXM) (F), JBF, NDBF,NFBF(G)
(A) CF 7/ (A)
(B) BORNES ZONE (UNIQUE) ECHANTILLON OU TEMOIN
(C) BORNES ZONE 'DOSIMETRE'
(D) 1, DOSIMETRE PAR ACTIVATION
2, MONITEUR DE FLUX 'EXTERIEUR' CF. 10/ OU 13/, FFLUX
(E) SI MONIT = 1, ELEM., PERIODE(UNIT) DU DOSIMETRE
(F) VALEUR DE REFERENCE DU MONITEUR DU DOSIMETRE
(G) CF. 7/ (D)

--- * DONNEES PAR COURBE ---

- MEMES ZONES POUR TOUTES COURBES
- 10/* ISOC(A), FFLUX(B), EMAS OU TMAS : 'ID' = DEJA MENTIONNE
(A) 0, COURBE A NE PAS TRAITER/, -1, TEMOIN/,
1,2,.. , ECHANTILLONS
(B) FACTEUR DE CORRECTION DE FLUX, DONNE PAR MONITEUR EXTERIEUR (OU 1)
(C) SUIVANT ISOC: MASSE TEMOIN OU MASSE ECHANTILLON, AVEC UNITE
'ID' = DEJA MENTIONNE
SI JPERF = 2 OU 3
// PAQUET CARTES (Y) OU (Y) ET (T)

RECYCLAGE A 7 OU 8 SI CHANGT. DE ZONE

- 11/* KDOS(A)
(A) 1, DOSIMETRIE 'MOYENNE'/, 2, DOSIMETRIE 'ENCADRANTE'
- SUITE A 17 OU 18

--- ** DONNEES RASSEMBLEES ---

- MEMES ZONES POUR TOUTES COURBES
- 12/** NBECH, LISTE EMAS, UNIT (A)
(A) NB. ECHANT. DIFFERENTS/ LISTE DES MASSES
- 13/** NBCOU, LISTE SOURCES (B), LISTE FFLUX (C)
(B) NB. COURBES SUR BANDE PERF./ LISTE SOURCES AVEC CODES DE 10/ (A)
SI MONIT = 2, (EXT.)
(C) LISTE DES FACTEURS DE CORR. 'MONITEUR'
ON CORRIGE PAR FLUX MOYEN / FFLUX
- 14/** KDOS(A)
(A) CF. 11/ (A)
SI JPERF = 2 OU 3
/// SUITE DES PAQUETS CARTES (Y) OU (Y) ET (T)

SUITE A 17 OU 18

17/ RETOUR A 1/, NOUVELLE MANIP.

18/ 'FIN'

C **** ANABASE ** ANALYSE DE COURBES DE DECROISSANCE RADIOACTIVE ****
 C VERSION FORTRAN F DE SEPT. 1969, CENG, SAR, APA, E.JUNOD--
 C

LOGICAL NVAL, KDON
 DIMENSION
 1 CEX(400), B(400), T(400), W(400), CRES(400), CTH(400),
 2 A(400,8),
 3 SIGA(5), SIGP(5), SIGT(5), SIGPT(5), SIGREL(5),
 3 PER(5), PEREX(5), AD(5), AOEX(5), AOT(5),
 4 XB(5), YB(5), ZB(5), CB(5),
 6 NDZ(4), NFZ(4), NDT(4), NFT(4),
 7 MASAT(5), KST(5), NOELP(5), IMAS(5),
 8 X(10), SIGX(10), XE(5), SIGXE(5), TEN(5,50), DSTEN(5,50)
 DIMENSION C(200,5), F(5), FP(5), NPB(6)
 DIMENSION ISOC(50), EMAS(50)
 DIMENSION FLT(4), FCD(4)
 DIMENSION AZEX(5,50), SIGAZ(5,50), ASPT(5,50), XTEN(50)
 DIMENSION FFLUX(50), ASP(50), PMAS(50)
 REAL LAM(5), LAMEX(5)
 DOUBLEPRECISION AM(10,10), TAB(2640),
 1 FIC, SYMB(5), MUPER, MUTRME, MUMAE, MUMAT,
 2 TYPE, LABO, INSTR, NOM, REF
 EQUIVALENCE (FIC,KFIC), (MUPER,KUPER),
 1 (MUTRME,KUTRME), (XE(1),AO(1))
 EQUIVALENCE (ND,NDZ(1)), (NF,NFZ(1)), (FLUXM,SDOS)

C
 COMMON /JES/ JLC,JIM,JPC
 JLC = 1
 JIM = 3
 JPC = 2

C
 11111 CALL KPSLID
 WRITE(JIM,6600)
 NZ=1
 NT=0
 DO 10100 J=1,5
 PER(J)=0.
 PEREX(J)=0.
 AD(J)=0.
 AOEX(J)=0.
 LAM(J)=0.
 LAMEX(J)=0.
 10100 CONTINUE
 NOC=0
 MONIT=0
 KDON = .FALSE.
 KDOS=0
 SDOS=0.
 NOCH = 0
 NBECH=0
 DO 3901 K=1,50
 ISOC(K)=10000
 FFLUX(K)=1.
 DO 3901 J=1,5

```

      AZEX(J,K)=0.
      SIGAZ(J,K)=0.
      TEN(J,K)=0.
      DSTEN(J,K)=0.
      ASPT(J,K)=0.
3901 CONTINUE
C
C      LECTURE DU TITRE ET DES DONNEES
10000 CALL RPSLDI(NOCA)
      GO TO (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18),NOCA
1      CALL RPSLDM(NOM,REF)
      CALL RPSLDI(NOMAN,ICATE)
      GO TO 10000
2      CALL RPSLDM(LABO,INSTR)
      CALL RPSLDI(NCS,NCL)
      CALL RPSLDE(TAU)
      WRITE(JIM,6602)
      GO TO 10000
18     CONTINUE
      CALL EXIT
9      GO TO 10000
15     GO TO 10000
16     WRITE(JIM,6600)
      GO TO 10000
C      RECYCLAGE SUR JOB
17     GO TO 11111
3      CALL RPSLDI(JPERF)
      WRITE(JIM,6603)
      IF(JPERF.GT.2) GO TO 10000
      CALL RPSLDE(TR,TCY,TME)
      CALL RPSLDX(MUTRME)
      CALL NORTS(TR,KUTRME)
      CALL NORTS(TCY,KUTRME)
      CALL NORTS(TME,KUTRME)
C      INSTANT DE REFERENCE EST LE DEBUT DE L'INTERVALLE TME
      DO 22 I=1,400
22     T(I) = TR + TCY * (I-1)
      GO TO 10000
4      CALL RPSLDM(TYPE)
      WRITE(JIM,6604)
      CALL RPSLDI(JTYPE,JEDIT)
C      JEDIT = 1, RFSULTATS
C      JEDIT = 2, IMP. COURBES EXP. + CALC.
C      JEDIT = 3, PFRF. COURBES EXP + CALC. (SPLM,PERK9, CTH(I))
      IF(JTYPE.LE.5 .OR. JTYPE.EQ.7) GO TO 10000
      CALL RPSLDE(SREJ)
C      POUR PERK9,
      NZ=SREJ
      GO TO 10000
5      CALL RPSLDI(NEL)
      WRITE(JIM,6605)
      GO TO (31,33,33,33,31,33,33,31,33,33,33),JTYPE
33     CALL RPSLDI(MASAT(NEL))
      CALL RPSLDX(FIC)

```

```

      IF (KFIC .NE. -733986752) GO TO 913
      KST(NEL)=KFIC
      CALL RPSLDX(SYMB(NEL))
      GO TO 916
913   KST(NEL)=0
      SYMB(NEL)=FIC
916   GO TO (31,36,36,36,31,35,36,31,36,36,36),JTYPE
35    CALL RPSLDE(AD(NEL))
36    CALL RPSLDE(PER(NEL))
      IF (PER(NEL) .EQ. 0.0) GO TO 31
      CALL RPSLDX (MUPER)
      CALL NORTS(PER(NEL),KUPER)
      LAM(NEL)=0.69315/PER(NEL)
      GO TO (31,31,31,31,31,31,31,31,34,34),JTYPE
34    CALL RPSLDE(TMAS(NEL))
      IF (TMAS(NEL) .EQ. 0.0) GO TO 31
      NT = NT + 1
      CALL RPSLDX (MUMAT)
31    GO TO 10000
C
6     CALL RPSLDI(NOC,XSU,ND,NF)
      WRITE(JIM,6616)
      ND=ND+1
      NF=NF+1
      DUREE = (NF-ND) *TCY/60.
      WRITE(JIM,2200) DUREE
      GO TO 7777
C      //// ATEM          IRRADIATION SIMULTANEE
C      JBORN = 1, DONNEES SUR CARTE;  = 2, CALCULEES
C      JBORN = 2, SEULEMENT SI 1 ZONE ECH. + 1 ZONE TEM. (+ 1 ZONE BDF)
?     CALL RPSLDI (JBORN, LBORN, NZ)
      SBORN = LBORN
      MAN=2
      DO 5005 K=1,NZ
      CALL RPSLDI(NDZ(K),NFZ(K))
      NDZ(K)=NDZ(K)+1
5005  NFZ(K)=NFZ(K)+1
      CALL RPSLDI(NTT)
      IF (NTT .NE. NT) GO TO 10
      DO 5006 K=1,NT
      CALL RPSLDI(NDT(K),NFT(K))
      NDT(K)=NDT(K)+1
5006  NFT(K)=NFT(K)+1
5011  CALL RPSLDI(JBF)
      IF (JBF .EQ. 0) GO TO 10000
      CALL RPSLDI (NDBF,NFBF)
      MAN = MAN +1
      NDBF=NDBF+1
      NFBF=NFBF+1
C      SI BF=0, DETERMIN. SUR ZONE SPECIFIQUE
      CALL RPSLDE(BF)
      GO TO 10000
C      //// ADUS          IRRADIATION SEPAREE
C      JBORN = 2, SEULT SI 1 ZONE ECH./TEM. ET/OU NON 1 ZONE DOSIM.

```

```
8      CALL RPSLDI(JBORN,LBORN,NDZ(1),NFZ(1),NDT(1),NFT(1), MONIT)
      SBORN = LBORN
      MAN = 3 -MONIT
      NDZ(1)=NDZ(1)+1
      NFZ(1)=NFZ(1)+1
      NDT(1)=NDT(1)+1
      NFT(1)=NFT(1)+1
      GO TO (5010,5017),MONIT
5010   CALL RPSLDI(MASAT(5))
      CALL RPSLDX(SYM8(5))
      CALL RPSLDE(PER(5))
      CALL RPSLDX(MUPER)
      CALL NORTS(PER(5),KUPER)
      LAM(5)= 0.69315/PER(5)
5017   CALL RPSLDE(SDCS)
      GO TO 5011
C      PAR COURBE : IDENT. DE LA SOURCE, FFLUX, MASSE(UNIT) (CF. 'ID')
C      ISOC = 0 : COURBE A NE PAS TRAITER
C      ISOC INF. A 0 : NUMERO DU TEMOINS
C      ISOC SUP. A 0 : NUMERO DE L'ECHANTILLON
10     NOC=NOC+1
      CALL RPSLDI(ISOC(NOC))
      CALL RPSLDE(FFLUX(NOC))
      IF (ISOC(NOC) .EQ. 0) GO TO 8808
      CALL RPSLDX(FIC)
C      FIC POSITIF : IMAS(PMAS), EMAS; = ID, DEJA MENTIONNE
      IF (FIC.LE.0.0) GO TO 8808
      PMAS(NOC) = FIC
      IF (ISOC(NOC).GT.0) GO TO 88
      CALL RPSLDX(MUMAT)
      GO TO 8808
88     NOECH = ISOC(NOC)
      EMAS(NOECH) = FIC
      CALL RPSLDX(MUMAE)
      IF(NOECH.LE.NOCH) GO TO 8808
      NOCH = NOECH
      NBECH=NBECH+1
      GO TO 8808
81     IF (ISOC(NOC) .GT. 0) GO TO 888
      PMAS(NOC) = ZMAS
      GO TO 8808
888    NOECH=ISOC(NOC)
      EMAS(NOECH)=YMAS
880    GO TO 8808
C
12     CALL RPSLDI(NBECH)
      DO 8011 K=1,NBECH
8011   CALL RPSLDE(EMAS(K))
      CALL RPSLDX(MUMAE)
      GO TO 10000
13     CALL RPSLDI(NBCOU)
      KDON = .TRUE.
      NOC=1
      DO 8021 K=1,NBCOU
```

```
      PHAS(K)=THAS(1)
8021  CALL RPSLDI(1SUC(K))
      GO TO (10000,8025),MONIT
8025  DO 8026 K=1,NBCOU
8026  CALL RPSLDE(FFLUX(K))
      GO TO 8808
14    CALL RPSLDI(KDOS)
      GO TO 3303

C
7777          GO TO (63), KSU
8808  IF(JPERF)8801,8802,8880
C      ACQUISITION DE DONNEES POUR TEST
8802  READ(JLC,8000) NNC
      READ(JLC,8009) (FF(K),K=1,NNC)
      WRITE(JIM,8700) NNC
      WRITE(JIM,8009) (FF(K),K=1,NNC)
      DO 8001 J=1,NNC
8001  READ(JLC,2141) (C(I,J),I=1,200)
      DO 8003 I=1,200
      CEX(I)=0.
      DO 8003 J=1,NNC
8003  CEX(I)=CEX(I)+C(I,J)*FF(J)
      GO TO 91

C
8801  READ(JLC,8000) NNC
      WRITE(JIM,8700) NNC
      READ(JLC,8009) (FF(K),FP(K), K=1,NNC)
      WRITE(JIM,8009) (FF(K),FP(K), K=1,NNC)
      DO 8803 I=1,200
      CEX(I)=0.
      DO 8803 K=1,NNC
8803  CEX(I)=CEX(I)+ FF(K)*EXP(-0.693*T(I)/FP(K))
      GO TO 63

C
8880  IF (JPERF .LT. 2) GO TO 130
      READ(JLC,2141) (CEX(I), I=1,NCS)
      IF (JPERF .EQ. 2) GO TO 91
      READ(JLC,2141) (T(I), I=1,NCS)
      GO TO 91
130  DO 133 I=1,NCS
133  CEX(I)=0.
      CALL ACDS5 (NCS,NCL,NDC,ND,NF,CEX,NVAL)
      IF (.NOT. NVAL) GO TO 999

C
91    DO 60 I= 1,NCS
      FTM=TME/(TME-TAU*1.E-6*CEX(I))
      IF(FTM-1.001)63,63,62
62    CEX(I)=CEX(I)*FTM
60    CONTINUE

C
63    WRITE(JIM,2220) NDC, 1SUC(NDC)
      GO TO (101,90,96),JFDIT
90    CALL EDITA (CEX,1,NCS)
      GO TO 101
```

```
96  CALL PRFO(NCS,CEX)
101  CONTINUE
    GO TO (100,100,400,400,200,500,600,200,800,3000,3000),JTYPE
C
3000  IF (ISOC(NDC) .EQ. 0) GO TO 10000
    IF (NVAL) GO TO 3053
    ISOC(NDC) = 0
    GO TO 3800
3053  KD=2
    DO 3537 I=KD,NCS
    IF(CEX(I).LE.0.0) GO TO 3538
3537  CONTINUE
3538  KF=I-1
C
    GO TO (3063,3163),JBORN
C    RECHERCHE DES BORNES SUR TOUS SEGMENTS CONCERNES
3163  CALL BORNS (NCS,CEX,NPB,MAN,SBORN)
    NDZ(1)= NP8(1)
    NFZ(1) = NP8(2)
    GO TO (3063),MAN
    NDT(1) = NP8(3)
    NFT(1) = NP8(4)
    GO TO (3063,3063),MAN
    NDBF =NP8(5)
    NFBF = NP8(6)
C
C
C    SI OPTIO,J JBF=1
C    SOUSTRACTION DU BRUIT DE FOND      = CONSTANT
3063  IF (JBF .EQ. 0) GO TO 3030
    CBF = 0.0
    DO 3055 I=NDBF,NFBF
3055  CBF=CBF + CEX(I)
    CBF = CBF / (NFBF-NDBF+1)
    DO 3056 I=1,NDBF
3056  CEX(I)=CEX(I)- CBF
    GO TO (3030,3032,3033),JEDIT
3032  CALL EDITA(CEX,ND,NF)
    GO TO 3030
3033  CALL PRFO(NCS,CEX)
    GO TO 3030
C
3030  CONTINUE
    GO TO 600
C
C    PERX, JTYPE =1
C
100  PERX=PER(1)
    DO 102 I=ND,NF
    A(1,1)=1.
    A(1,2)= T(1)
    B(1)=ALOG(CEX(1))
102  W(1)=CEX(1)
    CALL AMVISD (A,B,W,?,ND,NF,AM,X)
```

```

      CALL SIGLOG(A,B,W,2,ND,NF,AM,X,SIGX,CTH,CRES,CHI2)
      FLT(1) = X(2) *TME
      FCD(1) = FLT(1) / (1.-EXP(-FLT(1)))
      AO(1) = EXP(X(1)) *FCD(1)
      PER(1) = -.69315/X(2)
      SIGA(1) = AO(1) * SIGX(1)
      SIGP(1) = ABS(PER(1)*SIGX(2)/X(2))
      WRITE(JIM,2101) NOC,ND,NF,TME,MUTRME,AO(1),SIGA(1),PER(1),
1 SIGP(1),CHI2
      IF (JTYPE .NE. 2) GO TO 10000

C
C      PXCT, JTYPE = 2
C      COMPARAISON DU RESULTAT DE PERX AVEC PER. TH. DONNEE
C
300  ECART=100.*(PERX-PER(1))/PER(1)
      WRITE(JIM,2310) ECART
      GO TO 10000

C
C      SPLM: JTYPE = 3
C      SOUSTRACTION DE PERIODE LONGUE DONNEE(PER(1), OU NON);
C      DETERMINEE SUR SEGMENT DONNE
C      PCSL: JTYPE = 4; IDEM +
C      RECHERCHE DE PERIODE COURTE APRES SOUSTRACTION
400  PERX=PER(1)
      KD=2
      ID = ND
      IF=NF
      IF(PERX.EQ.0.0) GO TO 401
      PERL = PER(1)
      S=0.0
      DO 4404 I=ID,IF
4404  S = S + CEX(I)*EXP(0.69315*T(I)/PERL)
      AOL = S / (IF-ID+1)
      WRITE(JIM,2107) NOC,ID,IF,TME,MUTRME,AOL
      GO TO 403
401  DO 402 I=ID,IF
      A(I,1)=1.
      A(I,2)= T(I)
      B(I)=ALOG(CEX(I))
402  W(I)=CEX(I)
      CALL AMVISD (A,B,W,2,ID,IF,AM,X)
      CALL SIGLOG(A,B,W,2,ID,IF,AM,X,SIGX,CTH,CRES,CHI2)
      AOL=EXP(X(1))
      PERL=-0.69315/X(2)
      SIGAL=AOL*SIGX(1)
      SIGPL=ABS(PERL*SIGX(2)/X(2))
      WRITE(JIM,2101) NOC,ID,IF,TME,MUTRME,AOL,SIGAL,PERL,SIGPL
403  DO 404 I=KD,IF
      A(I,1)=1.
      A(I,2)=T(I)
      APL=AOL*EXP(-0.69315*T(I)/PERL)
      CEX(I)=CEX(I)-APL
      IF (CEX(I) .GE. 1.0) GO TO 407
      CEX(I) = 1.0

```

```

407  W(1)=CEX(1)+2.*APL
404  CONTINUE
      IF=ND-1
      DO 4331 I=ND,NCS
4331  CEX(1) = 1.0
      GO TO (431,432,433),JEDIT
432  WRITE(JIM,2222)
      CALL EDITA (CEX,KD,IF)
      GO TO 431
433  CALL PRFO(NCS,CEX)
C
431  IF (JTYPE .NE. 4) GO TO 10000
C
413  DO 415 I=KD,IF
      IF (CEX(1)) .LT. 10.0) GO TO 419
      B(1)=ALOG(CEX(1))
415  CONTINUE
419  NFPC=I-1
      CALL AMVISO (A,B,W,2,KD,NFPC,AM,X)
      CALL SIGLOG(A,B,W,2,KD,NFPC,AM,X,SIGX,CTH,CRES,CHI2)
      AO(2)= EXP(X(1))
      PER(2) = -.69315/X(2)
      SIGA(2) = AO(2) * SIGX(1)
      SIGP(2) = ABS(PER(2) * SIGX(2) /X(2))
      WRITE(JIM,2101) NOC,KD,NFPC,TME,MUTRME,AO(2),SIGA(2),PER(2),
1  SIGP(2), CHI2
      GO TO 10000
C
C
C      RPER, JTYPE = 5;
C      1 SEGM., RECHERCHE DE N PERIODES APPROX. CONNAISSANT SEULT. N
C      ERMA: JTYPE = 8; ENCHAINT RPER - MCEX - AMPD
200  NDL=NF-ND+1-NEL
      MM=NEL+1
      IT=1
201  WRITE(JIM,2298) IT
      DO 203 I= 1,NDL
      A(I,J)=0.
      DO 203 J=1,NEL
      K=I+J-1
203  A(I,J)= - CEX(K)
      DO 210 I=1,NDL
      K=I+NEL
210  B(I)= CEX (K)
      CALL QRMURC (A,B,X,NDL,NEL,ISORT,400,8,TAB)
      IF(ISORT)120,121,122
120  IND=1
      GO TO 497
121  IND=2
      GO TO 497
122  CONTINUE
      CO(1)=1.
      K=NEL+2
      DO 270 J=1,NEL

```

```

      K=K-1
27C   CO(K)=X(J)
      WRITE(JIM,2401) (CO(I), I=1,MM)
      DO 240 I=1,MM,2
        IF(CO(I) .GT. 0.0) GO TO 240
        IND = 3
      GO TO 499
240   CONTINUE
      DO 241 I=2,MM,2
        IF(CO(I) .LT. 0.0) GO TO 241
        IND = 4
      GO TO 499
241   CONTINUE
      IF (NEL .GT. 2) GO TO 277
      KB = 2
      LB=0
      FAC=SQRT(CO(2)*CO(2)*.25 -CO(3))
      IF (FAC .GT. 0.0) GO TO 274
      IND = 5
      GO TO 499
274   XB(1)= - CO(2)*.5 + FAC
      XB(2)= -CO(2)*.5 - FAC
      GO TO 216
277   CALL BSTOW (NEL,CO,XB,YB,ZB,KB,LB,INDB)
      IF (KB .EQ. NEL) GO TO 216
      IND = 6
      GO TO 499
216   WRITE(JIM,2402) (XB(J), J=1,KB)
      DO 220 J=1,KB
        LAM(J)= -ALOG(XB(J))/TME
        PER(J)= .69315/LAM(J)
220   CONTINUE
      WRITE(JIM,2403) (PER(J), J=1,KB)
      GO TO 998
497   WRITE(JIM,2297) IND
      GO TO 998
499   WRITE(JIM,2299) IND
998   GO TO (489,489,489,997),IT
489   IT=IT+1
      CALL LIEXP (ND,NF,CEX,CTH)
      DO 488 I=ND,NF
488   CEX(I)=CTH(I)
      GO TO 201
997   IF (JTYPE .EQ. 8) GO TO 600
      GO TO 999

C
C      AMPD, JTYPE = 6;
C      AMELIORATION DES PARAMETRES INITIAUX PAR ITERATION
C
500   IT=0
      ND=N-ND+1
      MM=NEL*2
590   IT=IT+1
      DO 502 J=1,NEL

```

```

      LAMEX(J)=LAM(J)
      PEREX(J)=PER(J)
502   AOEX(J)=AO(J)
      DO 501 K = ND,NF
      I = K-ND+1
      B(I) = CEX (K)
      DO 501 J=1,NEL
      L=J+NEL
      FLT(J) = TME* LAMEX(J)
      FCD(J)= (1.-EXP(-FLT(J)))/ FLT(J)
      A(I,J)= EXP (-LAMEX(J)*T(K)) *FCD(J)
      A(I,L)= - A(I,J) * T(K) * AOEX(J)
501   B(I)=B(I)- AOEX(J) *EXP(-LAMEX(J)*T(K)) *FCD(J)
      CALL QRMORC (A,B,X,NDL,MM,ISORT,400,8,TAB)
      IF(ISORT)520,521,522
520   IND=1
      GO TO 496
521   IND=2
      GO TO 496
522   CONTINUE
      WRITE(JIM,2501) (X(I), I=1,MM)
      JTEST=0
      DO 513 J=1,NEL
      L=J+NEL
      AO(J)=AOEX(J)+X(J)
      LAM(J)=LAMEX(J)+X(L)
      DAO= 100.*(AOEX(J)-AO(J))/AO(J)
      DLAM= 100.*(LAMEX(J)-LAM(J))/LAM(J)
      PER(J) = 0.69315/LAM(J)
      WRITE(JIM,2510) AOEX(J),AO(J),DAO,PEREX(J),PER(J),DLAM
      IF (ABS(DLAM).GT.SREJ .OR. ABS(DAO).GT.SREJ) GO TO 513
      JTEST = JTEST + 1
513   CONTINUE
      IF(JTEST .EQ. NEL) GO TO 471
      IF (IT .LT. 5) GO TO 590
      WRITE(JIM,2289) SREJ
      GO TO 999
496   WRITE(JIM,2297) IND
      GO TO 999
471   DO 472 J=1,NEL
472   WRITE(JIM,2512) J,AO(J),PER(J)
      GO TO 999
C
C      PERK, JTYPE = 9;
C
800   NDL=NF-ND+1
      NCZ=NDL/NZ
      LD=-NCZ+ND
      LF=ND
      DO 808 K=1,NZ
      LD=LD+NCZ
      LF=LF+NCZ
      CALL LIEXP(ND,NF,CFX,CTH)
      DO 898 I=ND,NF

```

```

898 CEX(1)=CTH(1)
    DO 810 I=LD,LF
        W(1)=1.
        A(1,1)=1.
        A(1,2)=EXP((LAM(2)-LAM(1))*T(1))
        B(1)=CEX(1)*EXP(LAM(2)*T(1))
        GO TO (810,811,812),JEDIT
812 WRITE(JPC,2201) A(1,2),B(1)
811 WRITE(JIM,2201) T(1),A(1,2),B(1)
810 CONTINUE
    CALL AMVISO (A,B,W,?,LD,LF,AM,X)
    CALL SIGTHR (A,B,W,?,LD,LF,AM,X,SIGX,CTH,CRES,CHI2)
    WRITE(JIM,2800) LD,LF,X(2),SIGX(2),X(1),SIGX(1),CHI2
808 CONTINUE
    GO TO 10000

```

```

C
C      MCEX, JTYPE = 7;
C
C      DECOMP. PAR M-C CONNAISSANT LES N PERIODES
C      ATEM: JTYPE = 10; IRRADIATION SIMULTANEE
C      = MCEX SUR EVENT. PLUSIEURS SEGMENTS, AVEC MESURES DE TEMOINS
C      - PAR ANCX - ET CALCUL DES TENEURS
C      ADDS: JTYPE = 11; IRRADIATION SEPAREE (PROV. SUR 1 ELEM.)
C
C
C      ATEM                                ADDS
C
C      MCEX                                ECHANT.                                ECH. OU TEM.(**)
C      ANCX                                TEM. (*)                                DOSIM. (OU RIEN)
C
C      (*) PEUVENT ETRE COMPLEXES      (**) TEM. UNIQUE + BDF
C

```

```

600 K=0
    DO 607 N=1,NZ
        NDD=NDZ(N)
        NFF=NFZ(N)
        DO 607 I=NDD,NFF
            K=K+1
            B(K)=CEX(I)
            W(K)=1./CEX(I)
            DO 607 J=1,NEL
                FLT(J) = TME*LAM(J)
                FCD(J) = (1.-EXP(-FLT(J)))/ FLT(J)
                EX = LAM(J)*T (I)
                IF (EX .GT. 100.0) GO TO 611
                A(K,J)=EXP(-EX) *FCD(J)
            GO TO 607
611 A(K,J)=0.
607 CONTINUE
    NFB=K
    CALL AMVISO (A,B,W,NEL,1,NFB,AM,XE)
    WRITE(JIM,2201) (XF(J), J=1,NEL)
    IF (JTYPE .EQ. 8) GO TO 500
    NELP = 0
    DO 615 J=1,NEL

```

```
        IF(XE(J)-10.)613,613,612
612     NELP=NELP+1
        NOELP(NELP)=J
        LAMEX(NELP)=LAM(J)
        GO TO 615
613     XE(J)=0.
615     CONTINUE
        IF(NELP.EQ.NEL) GO TO 650
        K = 0
        DO 627 N=1,NZ
        NDD=NDZ(N)
        NFF=NFZ(N)
        DO 627 I=NDD,NFF
        K=K+1
        DO 627 J=1,NELP
        EX= LAMEX(J)*T(I)
        IF (EX.GT. 100.0) GO TO 631
        A(K,J)= EXP(-EX) *FCD(J)
        GO TO 627
631     A(K,J)=0.
627     CONTINUE
        NFB=K
        CALL AMVISO (A,B,W,NELP,1,NFB,AM,XE)
        WRITE(JIM,2201) (XE(J),J=1,NELP)
650     CALL SIGTHR(A,B,W,NELP,1,NFB,AM,XE,SIGXE,CTH,CRES,CHI2)
651     DO 673 N=1,NELP
        J=NOELP(N)
        X(J)=XE(N)
        SIGX(J)=SIGXE(N)
3651    AZEX(J,NOC)=XE(J)
        SIGAZ(J,NOC)=SIGXE(J)
        SIGREL(J) = 100.*SIGX(J) /X(J)
        WRITE(JIM,2207) MAS*(J),KST(J),SYMB(J),X(J),TME,MUTRME,
1      SIGX(J),SIGREL(J)
673     CONTINUE
        WRITE(JIM,2227) CHI2
        GO TO (638,638,639),JEDIT
639     CALL PRFO(NCS,CTH)
638     GO TO (999,999,999,999,999,999,999,999,999,999,707,701),JTYPE
C
C      ANCX: CALCUL DE PER. EXPER. SUR TEM. (MULT.) OU DOSIMETRE
C
701     GO TO (702,3278),MONIT
702     K=5
        GO TO 704
707     DO 710 K=1,NT
704     NDD=NDT(K)
        NFF=NFT(K)
        DO 712 I=NDD,NFF
        A(I,1)=1.
        A(I,2)= T(I)
        B(I)=ALOG(CEX(I))
712     W(I)=CEX(I)*CEX(I)
        CALL AMVISO(A,B,W,2,NDD,NFF,AM,X)
```

```

      CALL SIGLOG( A,B,W,2,NDD,NFF,AM,X,SIGX,CTH,CRES,CHI2)
715  FLT(K) = TME* X(2)
      FCD(K) = FLT(K) / (1.-EXP(-FLT(K)))
      AOT(K) = EXP(X(1)) * FCD(K)
      SIGT(K)=AOT(K)*SIGX(1)
      PEREX(K)=-0.69315/X(2)
      SIGXE(K)=PEREX(K) *SIGX (2)/X(2)
C
      IF(JTYPE-10)3300,732,3710
C
732  ECART=100.*(PEREX(K)-PER(K))/PER(K)
      IF (ABS(ECART) .LE. SREJ) GO TO 720
      WRITE(JIM,2740) K,PEREX(K)
      AOT(K)=1.E50
      GO TO 710
720  WRITE(JIM,2313) K,AOT(K)
710  CONTINUE
      DO 730 K=1,NT
      TEN(K,NOC)=AZEX(K,NOC)/AOT(K) * THAS(K)/EMAS(NOC)
      DSTEN(K,NOC)=SQRT((SIGXE(K)/X(K))**2+(SIGT(K)/AOT(K))**2)
1    *TEN(K,NOC)
      WRITE(JIM,2270) MASAT(K),KST(K),SYMB(K),TEN(K,NOC), MUMAT,
1    MUMAE, DSTEN(K,NOC)
730  CONTINUE
      GO TO 979
C
C
3710  ADOS = AOT(5)
      DO 3270 K=1,NT
3270  AZEX(K,NOC)=AZEX(K,NOC) *SDOS/ADOS
      SIGAZ(K,NOC) =SIGAZ(K,NOC)*SDOS/ADOS
      GO TO 979
3278  DO 3277 K=1,NT
3277  AZEX(K,NOC)=AZEX(K,NOC) *FLUXM/FFLUX(NOC)
      SIGAZ(K,NOC) = SIGAZ(K,NOC)*FLUXM/FFLUX(NOC)
979  IF (.NOT. KDUM) GO TO 10000
      NOC = NOC + 1
      IF (NOC .LE. NBCOU) GO TO 8808
      GO TO 10000
C
C
11  CONTINUE
3800  NBCOU=NOC
      CALL RPSLDI(KDOS)
C
C
3303  IF (JTYPE .LT. 11) GO TO 3300
C      CALCUL DES ACTIVITES SPECIFIQUES DES TEMOINS
C      TEMOIN 'PUR' UNIQUE
      DO 3330 NOC=1,NBCOU
      IF (ISOC(NOC) .GE. 0) GO TO 3300
      ASPT(1,NOC)=AZEX(1,NOC)/PHAS(NOC)
      SIGAZ(1,NOC) = SIGAZ(1,NOC)/PHAS(NOC)
3330  CONTINUE

```

```
C
C      DOSIMETRIE MOYENNE
3380  WRITE(JIM,2325)
      GO TO (3400,3460),KNOS
C      ACTIVITE SPECIFIQUE MOYENNE DES DOSIMETRES
3400  NBI=0
      DO 3404 NOC=1,NBCOU
      IF (ISOC(NOC) .GE. 0) GO TO 3404
      NBI = NBI + 1
      ASP(NBI)=ASPT(1,NOC)
      DVSTT = SIGAZ(1,NOC)
3404  CONTINUE
      IF (NBI .GT. 1) GO TO 408
      WRITE(JIM,2326) TME,ASPM,DVSTT
      ASPM=ASP(1)
      GO TO 410
408   CALL DVSTF(NBI,ASP,ASPM ,DVSTT,FDVST,COEVAR)
      WRITE(JIM,2316) NBI,TME,ASPM,DVSTT
C      CALCUL DES TENEURS
410   DO 414 NOC=1,NBCOU
      IF (ISOC(NOC) .LE. 0) GO TO 414
      NOECH=ISOC(NOC)
      TEN(1,NOC)=AZEX(1,NOC)/(ASPM *EMAS(NOECH))
      IF (TEN(1,NOC) .LE.0.0) GO TO 414
      DSTEN(1,NOC) = TEN(1,NOC) *SQRT((SIGAZ(1,NOC)/AZEX(1,NOC))**2 +
1 (DVSTT/ASPM)**2 )
414   CONTINUE
      GO TO 3300
C
C      DOSIMETRIE ENCAADRANTE
C      ON NE PREND QU'UN TEMOIN A GAUCHE ET A DROITE
3460  M=0
480   NOC=M+1
465   ASP(1) = ASPT(1,NOC)
      L=NOC+1
470   NOC=NOC+1
      IF (ISOC(NOC))465,470,482
482   NOC=NOC+1
      IF (ISOC(NOC) .GE. 0) GO TO 482
      M = NOC - 1
      ASP(2) = ASPT(1,NOC)
      CALL DVSTF (2,ASP,ASPM,DVSTT,FDVST,COEVAR)
      NT1=L-1
      NT2=M+1
      WRITE(JIM,2336) NT1,NT2,TME,ASPM,DVSTT
      DO 3490 NOC=L,M
      IF (ISOC(NOC) .LE. 0) GO TO 3490
      NOECH = ISOC(NOC)
      TEN(1,NOC)=AZEX(1,NOC)/(ASPM *EMAS(NOECH))
      IF (TEN(1,NOC) .LE. 0.0) GO TO 3490
      DSTEN(1,NOC) = TEN(1,NOC)*SQRT((SIGAZ(1,NOC)/AZEX(1,NOC))**2 +
1 (DVSTT/ASPM)**2)
3490  CONTINUE
      IF (M+1 .LT. NBCOU) GO TO 480
```

```

C
C
C      SUITE DES COURBES
C      IMPRESSION ET CALCUL STATISTIQUE
3300    WRITE(JIM,2218)
        WRITE(JIM,2230)
        NOECH=0
1300    NOECH=NOECH+1
        WRITE(JIM,2217) NOECH
        NBMES=0
        DO 1100 NOC=1,NBCOII
            IF (ISOC(NOC) .NE. NOECH) GO TO 1100
            ERR = 100. * DSTEN(1,NOC) / TEN(1,NOC)
            WRITE(JIM,2208) NOC,TEN(1,NOC), DSTEN(1,NOC), ERR
            NBMES=NBMES+1
            XTEN(NBMES)=TEN(1,NOC)
            GO TO 1100
1100    CONTINUE
        IF (NBMES .LT. 2) GO TO 1800
        CALL DVSTF(NBMES,XTEN,TENMOY,DVSTT,FDVST,COEVAR)
        WRITE(JIM,2210) NBMES,TENMOY,DVSTT,COEVAR
C      SUITE DES ECHANTILLONS
1800    IF (NOECH .EQ. NBECH) GO TO 10000
        GO TO 1300
C
999    GO TO 10000
9999   CALL EXIT
C
C
2101   FORMAT(1H0,T10,'COURBE',I3,' BORNES,CX',2I4/,
1 T10,'AO, CP/',F7.2,A4,T35,E13.5,', SIGMA'-E13.5/,
2T10,'PER, SEC.',T35,E13.5,', SIGMA',E13.5 /,
3 T80,'CHI2',E13.2)
2107   FORMAT(1H0,T10,'COURBE',I3,' BORNES,CX',2I4/,
1 T10,'AO, CP/',F7.2,A4,T35,E13.5,T60,'PER. IMPOSEE')
2141   FORMAT(5X,10F7.0)
2200   FORMAT(1H ,T21,'DUREE UTILE DE LA MESURE, MIN', E15.5)
2201   FORMAT(T11,5E15.5)
2207   FORMAT(1H0,T40,I3,A1,'-',A2,E15.5,' CP/',F7.2,A4,' SIGMA= ',
1 2E15.5,'X')
2208   FORMAT(T15,I5,T28,F10.0,T43,F10.0,T53, F10.2)
2210   FORMAT(T70,I3,T80,F10.0,T93,2F12.2)
2217   FORMAT(T5,I5)
2218   FORMAT(1H0,T5,'NO.ECH.',T15,'NO.COMPT.',T30,'TENEUR,PPM, EC.TYPE,
1ERR.REL.(%)')
2220   FORMAT(1H0 ,T30,'****COURBE NO',I4,' SOURCE NO',I4 /)
2222   FORMAT(1H0,T30,'****COURBE RESIDUELLE')
2227   FORMAT(T15,'CHI2/NDL',E12.3)
2230   FORMAT(T70,'NB.MES.',T80,'TEN.MOY.,PPM',
1 T95, 'ECART-TYPE, LIM.CONF.(%)')
2250   FORMAT(T38,'AO',T51,'PER.EX.',T62,'ECART(%))')
2270   FORMAT(1H ,T10,I3,A1,'-',A2,' TEN=',E15.5,1X,A4,'/',A4,5X,
1 'EC.-TYPE=', E15.4)
2289   FORMAT(1H0,T21,'PROCEDE AMPD ECHOUÉ AVEC SREJ=',F6.2/)

```

```
2297 FORMAT(1H0,T21,'QRMDCR ECHOUE ',IND=',13 )
2298 FORMAT(1H0,T21,'ITFRATION NO',I4)
2299 FORMAT(1H0,T21,'PROCEDE RPER ECHOUE, IND=',13 )
2306 FORMAT(10F11.0)
2310 FORMAT(1H ,T10,'ECART,',T35,E13.5) PXCT
2313 FORMAT(1H ,T20,'AO TEMUIN NO', 15,E15.5)
2316 FORMAT(4X,'ACT.SP.TEM. -MOY.DE',I3,' MES.- C/',F4.0,' SEC,TO,PAR M
      1UG.',E13.5,' EC.TYPE',E13.5)
2325 FORMAT(1H0/,T50,'RESULTATS DEFINITIFS')
2326 FORMAT(4X,'ACT.SP.TEM.,C/',F4.0,' SEC,TO,PAR MUG.',E13.5,
      1 ' EC.TYPE',E13.5)
2336 FORMAT(4X,'ACT.SP.TEM. - MOY. DES MES.',2I4,' -C/',F4.0,' SEC,TO,M
      1UG.',E13.5,' EC.TYPR',E13.5)
2401 FORMAT(' COEF.POLYN.BSTOW', T30,5E15.5)
2402 FORMAT(' SULUT.BSTOW',T30,5E15.5)
2403 FORMAT(' PER.TROUVEES (SEC)',T30,5E15.5)
2501 FORMAT('OSDLUT. QRMDCR',T30,5E15.5)
2510 FORMAT(' AOEX',E13.5,' AO',E13.5,' DAO',E13.5,' PEREX',E13.5,
      1 ' PER',E13.5,' DLAN',E13.5)
2512 FORMAT(T21,I1,' AO',E13.5,' PER',E13.5)
2740 FORMAT(1H ,T80,'PER.EXP. DU TEM. NO',I4,F10.3,' RES.ANNULE')
2800 FORMAT(' ZONE,CX',2I4,5X,'AO(1)',2E13.5,5X,'AO(2)',
      1 2E13.5,' CHI2',E11.3)
6600 FORMAT(1H1,T21,'***AYABASE, VERSION SEPT. 69')
6602 FORMAT(1H+,T80,'(NCS,NCL,TAU)')
6603 FORMAT(1H+,T80,'(JPERF,TR,TCY,TME)')
6604 FORMAT(1H+,T80,'(JTYPE,JEDIT,(SREJ(NZ)))')
6605 FORMAT(1H+,T80,'(NEL,ISOT,(AO),PER,(TMA5))')
6606 FORMAT(1H ,T90,2E13.5)
6616 FORMAT(1H+,T80,'(NOC,KSU,ND,NF)')
8000 FORMAT(15)
8009 FORMAT(8F10.2)
8700 FORMAT(1H0,I5)
8800 FORMAT(5X,10F7.0)
      END
```

```

SUBROUTINE ACDSS (NCS,NCL,NO,ND,NF,D,NVAL)
C      ***LECTURE SUR BANDE PERFOREE DU CONTENU DE SA408 OU BM96
C      NCS = NB CAN. MAX.      NCL = NB CAN. PAR LIGNE
C      AVEC OU SANS ADRESSES EN DEBUT DE LIGNE
C      LECT. AVEC ADRESSES PERMET DEBUT DE REMPLISSAGE A N'IMPORTE
C      QUELLE ADRESSE
C      ** ADRESSE FORTRAN = ADRESSE MESURE + 1
C      LA LIGNE DE BASE EST AU NIVEAU 1 COUP
C      UNE ERREUR DE PERFORATION ENTRE ND ET NF INVALIDE LE SPECTRE
C      NVAL = .TRUE. SI DONNEES CORRECTES
      LOGICAL NVAL
      DIMENSION D(4096), ICAN(10)
      COMMON /JES/ JLC,JIM,JPC
      NVAL = .TRUE.
      ID=-NCL
100 CALL LECLI (ICAN,N,IAD,IND)
      IF (IAD .GE. 0) GO TO 30
      ID = ID + NCL
      GO TO 32
30  ID=IAD
32  GO TO (1,2,3,1,2),IND
1   DO 40 J=1,N
      I=ID+J
      D(I)=ICAN(J)
      IF (D(I) .GE. 1.0) GO TO 40
      D(I) = 1.0
40  CONTINUE
      GO TO 36
C      CONTROLE DE LA VALIDITE DANS LES LIMITES PRESCRITES
2   IF(ID.LT.NO-NCL .OR. ID.GE.NF) GO TO 36
      NVAL = .FALSE.
      WRITE(JIM,110) NO,ID
110 FORMAT(T21,'COURBE',I4,' NON VALABLE, ERR. TRANS. DANS',I4,
1  'IEME LIGNE')
36  GO TO (100,100,3,4,4),IND
3   WRITE(JIM,111)
111 FORMAT(T21, 'NB. COURBES NON CONFORME')
      CALL EXIT
4   RETURN
      END

```

```
SUBROUTINE LISEXP (ND,NF,C,CL)
  DIMENSION C(400),CL(400)
  N1=ND+2
  N2=NF-2
  DO 1 I=N1,N2
1  CL(I)=(17.*C(I)+12.*(C(I-1)+C(I+1))-3.*(C(I-2)+C(I+2)))/35.
  CL(ND)=C(ND)
  CL(ND+1)=C(ND+1)
  CL(NF-1)=C(NF-1)
  CL(NF)=C(NF)
  RETURN
END
```

```
      SUBROUTINE BURNS( NCS,Y,NPB,MAN,SBURN)
      DIMENSION NPB(6)
      N=0
      I=1
3     N=N+1
      IF (Y(I) .GT. Y(I+1)) GO TO 2
      I = I + 1
      GO TO 3
2     NPB(N)=I
      N=N+1
5     I=I+1
      IF (Y(I) .GE. SBURN) GO TO 5
      NPB(N) = I - 2
      I=I+1
      IF (I.LT. NCS .OR. N/2 .LT. MAN) GO TO 3
      RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE AMVISO (A,D,W,NST,ND,NF,AINV, XE)
      DIMENSION A(400,5),D(400),W(400),XE(10),V(10)
      REAL*8 AINV(10,10)
      DO 300 J=1,10
      DO 300 K=1,10
300    AINV(J,K)=0.
C      FORMATION DE LA MATRICE
      NV=NST
      DO 10 J=1,NV
      DO 10 M=1,NV
      AINV(J,M)=0.
      DO 10 I=ND,NF
      AINV(J,M)=AINV(J,M)+A(I,J)*A(I,M)*W(I)
10    CONTINUE
C      INVERSION
      CALL INVMD(NV,AINV)
C      CALCUL DU VECTEUR
      DO 60 J=1,NV
      V(J)=0.
      DO 60 I=ND,NF
      V(J)=V(J)+A(I,J)*W(I)*D(I)
60    CONTINUE
C      SOLUTION
      DO 70 I=1,NV
      XE(I)=0.
      DO 70 J=1,NV
70    XE(I)=XE(I)+AINV(I,J)*V(J)
      RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE INVMD (N,A)
      DOUBLE PRECISION A(10,10),AB(10,20),BB(10,20)
      DO 8 I=1,N
      DO 8 J=1,N
8      AB(I,J)=A(I,J)
      ID=N+1
      IF=N*2
      DO 13 I=1,N
      DO 13 J=ID,IF
13      AB(I,J)=0.
      DO 9 I=1,N
      J=I+N
9      AB(I,J)=1.
      DO 11 K=1,N
      DO 14 J=1,IF
      BB(K,J)=AB(K,J)/AB(K,K)
14      CONTINUE
      DO 12 I=1,N
      IF (I .EQ. K) GO TO 12
      DO 112 J=1,IF
      BB(I,J)=AB(I,J)-AB(I,K)*BB(K,J)
112     CONTINUE
12      CONTINUE
      DO 15 I=1,N
      DO 15 J=1,IF
      AB(I,J)=BB(I,J)
15      CONTINUE
11      CONTINUE
      DO 40 I=1,N
      DO 40 J=1,N
      K=J+N
40      A(I,J)=AB(I,K)
      RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE SIGTHR (A,B,W,N,ND,NF,AM,X,SIGX,CTH,CRES,CHI2)
C      CALCULE VARIANCES, CHI2 ET RESIDUS NORM. SUR S.STENE (Y - X)
      DOUBLE PRECISION AM(10,10)
      DIMENSION A(400,5),B(400),W(400),CTH(400),CRES(400),
1 X(5),SIGX(5)
      CHI2=0.
      SOCARE =0.
      XNDL =NF-ND-N+1
      DO 1 I=ND,NF
        CTH(I)=0.
      DO 2 J=1,N
2      CTH(I)=CTH(I) + A(I,J) * X(J)
        CRES(I)= B(I) - CTH(I)
        SOCARE = SOCARE + W(I) * CRES(I)*CRES(I)
        CRES(I)=CRES(I)/SQRT(CTH(I))
1      CHI2=CHI2+ CRES(I)*CRES(I)
      DO 3 J=1,N
3      SIGX(J) = DSQRT(SOCARE * AM(J,J) / XNDL)
      CHI2 = CHI2/XNDL
      RETURN
      END
```

SUBROUTINE SIGLOG(A,B,W,N,ND,NF,AM,X,SIGX,CTH,CRES,CHI2)

```
C
C      APRES RESOLUTION DU SYSTEME (LOG Y - X), CALCULE LES RESIDUS NORM.
C      ET CHI2 SUR LE SYSTEME (Y - X)
      REAL*8 AM(10,10)
      DIMENSION A(400,5),B(400),W(400),CTH(400),CRES(400),
1  X(5),SIGX(5)
      CHI2 = 0.0
      SOCARE = 0.0
      XNDL = NF-ND-N+1
      DO 1 I=ND,NF
        CTH(I) = 0.0
      DO 2 J=1,N
2      CTH(I) = CTH(I) + A(I,J) * X(J)
        CRES(I) = B(I) - CTH(I)
        SOCARE = SOCARE + W(I) * CRES(I) * CRES(I)
        B(I) = EXP(B(I))
        CTH(I) = EXP(CTH(I))
        CRES(I) = (B(I)-CTH(I))/ SQRT(CTH(I))
1      CHI2 = CHI2 + CRES(I) * CRES(I)
      DO 3 J=1,N
3      SIGX(J) = DSQRT (SOCARE * AM(J,J) /XNDL)
      CHI2 = CHI2 / XNDL
      RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE EDITA (A,ND,NF)
      DIMENSION A(200),AX(10)
      COMMON /JES/ JLC,JIM,JPC
      WRITE(JIM,123)
123   FORMAT(1H )
      DO 1 I=1,10
1     AX(I)=.1E10
      NADD=((ND-1)/10)*10
      NADF=((NF-1)/10)*10
C     SI UNE SEULE LIGNE NON COMPLETE
      IF(NADF .LE. NADD) GO TO 8
      NAD2=NADD+10
      KD=ND-NADD-1
      IF (KD .GT. 0) GO TO 11
      NAD1 = ND
      GO TO 2
11   WRITE(JIM,75) NADD,(AX(I),I=1,KD),(A(I),I=ND,NAD2)
5     NADD=NAD2
8     NAD1=NADD+1
      NAD2=NADD+10
      KD=NAD2-NF
      IF (KD .GT. 0) GO TO 7
2     WRITE(JIM,75) NADD,(A(I),I=NAD1,NAD2)
      IF (NF .GT. NAD2) GO TO 5
      GO TO 3
7     WRITE(JIM,75) NAD2,(A(I),I=NAD1,NF),(AX(I),I=1,KD)
3     WRITE(JIM,123)
75   FORMAT(1H ,I10,10(1X,F10.2))
      RETURN
      END
```

```

SUBROUTINE PRFO (NCS, Y)
DIMENSION Y(200)
COMMON /JES/ JLC,JIM,JPC
NF = NCS/10
NAD = -10
DO 1 K=1,NF
NAD = NAD + 10
NADD = NAD + 1
NAFF = NAD + 10
1  WRITE(JPC,20) NAD, (Y(I),I=NADD,NAFF)
20  FORMAT(14,1X,10F7.0)
RETURN
END

```

```
      SUBROUTINE DVSTF (NBMES, X,XMOY,DVSTA,FDVST,COVAR)
C      SOUS-PROGRAMME DE CALCUL DE LA DEVIATION STANDARD D'UNE MOYENNE
C      DE NBMES MESURES
C      CALCUL DES LIMITES DE CONFIANCE A PARTIR D 'UNE TABLE DE
C      FISCHER SIMPLIFIEE
      DIMENSION X(20)
C      TABLE SIMPLIFIEE DE FISCHER
      N=NBMES-1
      IF(N-2)100,101,102
100    TF=12.7
      GO TO 120
101    TF=4.3
      GO TO 120
102    IF(N.GT.3) GO TO 104
      TF = 3.2
      GO TO 120
104    IF(N.GT.4)GO TO 106
      TF=2.8
      GO TO 120
106    IF(N.GT.7) GO TO 108
      TF=2.4
      GO TO 120
108    IF(N.GT.10) GO TO 110
      TF=2.25
      GO TO 120
110    IF(N.GT.20) GO TO 112
      TF=2.1
      GO TO 120
112    TF=2.
C      CALCUL DE LA MOYENNE ET DVSTA
120    SX=0.
      SX2=0.
      DO 10 K=1,NBMES
      SX=SX+X(K)
10    SX2=SX2+X(K)*X(K)
      XMOY=SX/NBMES
      DVSTA=SQRT((SX2-(SX**2/NBMES))/(NBMES*N))
      FDVST=DVSTA*TF
      COVAR=100.*FDVST/XMOY
      RETURN
      END
```


FIN