Rapport BIPM-75/2

Description de l'ensemble no. 3 de comptage par coïncidences $4\pi\beta(CP)-\gamma$ utilisé au B.I.P.M.,

par P. Bréonce, A. Rytz et C. Veyradier

Septembre 1975

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

F-92310 SEVRES

Rapport BIPM-75/2

Description de l'ensemble no. 3 de comptage par coïncidences $4\pi\beta$(CP)-γ utilisé au B.I.P.M.,

par P. Bréonce, A. Rytz et C. Veyradier

Septembre 1975

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

F-92310 SEVRES

TABLE DES MATIERES

	page
Introduction	1
I - Description des détecteurs	4
1. Compteur proportionnel	4
2. Détecteur à scintillation	7
II - Description du système électronique	7
1. Préamplificateur de charges	7
2. Circuit de mise en forme	7
3. Amplificateur	11
4. Discriminateur-sélecteur d'amplitude	11
5. Fonctionnement du circuit de temps mort	15
6. Sélecteur de coïncidences	17
7. Circuits de commande mesures (CCM) et de commande impression (CCI)	17
III - Résultats obtenus et mesures auxiliaires	27
1. Calcul du taux de désintégration	27
2. Paliers de comptage	27
3. Mesure de l'amplification gazeuse du compteur proportionnel	32
4. Détermination du seuil de détection du compteur proportionnel	32
5. La correction K_{ε}	36
6. Influence et suppression d'un retard relatif entre les voies β et γ	36
7. Validité des corrections dépendant du taux de comptage	38
8. Fidélité des mesures	41
Références	43

INTRODUCTION

Depuis 1962, le laboratoire de mesure des radionucléides du Bureau International des Poids et Mesures (B.I.P.M.) emploie la méthode de comptage par coïncidences $4\pi\beta$(CP)-γ pour étalonner des sources radioactives. L'équipement utilisé a déjà été décrit dans des rapports internes (1,2). Par suite du progrès technique et de l'usure de certaines parties, un tel ensemble ne peut guère rester plus de quelques années sans modifications, parfois importantes. En effet, la description de l'ensemble no. 2 (à lampes) était à peine terminée lorsqu'on commença la construction de l'ensemble no. 3, entièrement transistorisé.

Pour répondre à des sollicitations fréquentes, nous avons rédigé le présent rapport qui contient, dans les parties I et II, une description détaillée des détecteurs et du système électronique. Dans la partie III, on trouvera des explications concernant l'évaluation des résultats et un aperçu de quelques manipulations auxiliaires courantes.

A l'exception des alimentations haute tension, du détecteur à scintillation et de la machine imprimante, tout l'ensemble no. 3 a été mis au point et construit au B.I.P.M. Certaines parties de l'ensemble précédent ont été conservées, mais un effort particulier a été fait pour réaliser les améliorations suivantes:

- meilleur comportement des amplificateurs en présence de surcharges;
- très bonne qualité des discriminateurs-sélecteurs d'amplitude et des égaliseurs de retards;
- meilleure définition et stabilité des temps morts, ainsi que du temps de résolution des coïncidences; contrôle facile.

Un schéma de principe de l'ensemble no. 3 est représenté dans la figure 1. On notera qu'il n'y a qu'un seul détecteur γ et que les deux voies, β et γ, sont tout à fait identiques, ce qui présente des avantages certains pour la construction et l'entretien.

La figure 2 donne une vue générale de l'ensemble qui est installé dans une salle climatisée dont la température est maintenue à (20,0 $\pm$ 0,5) °C.

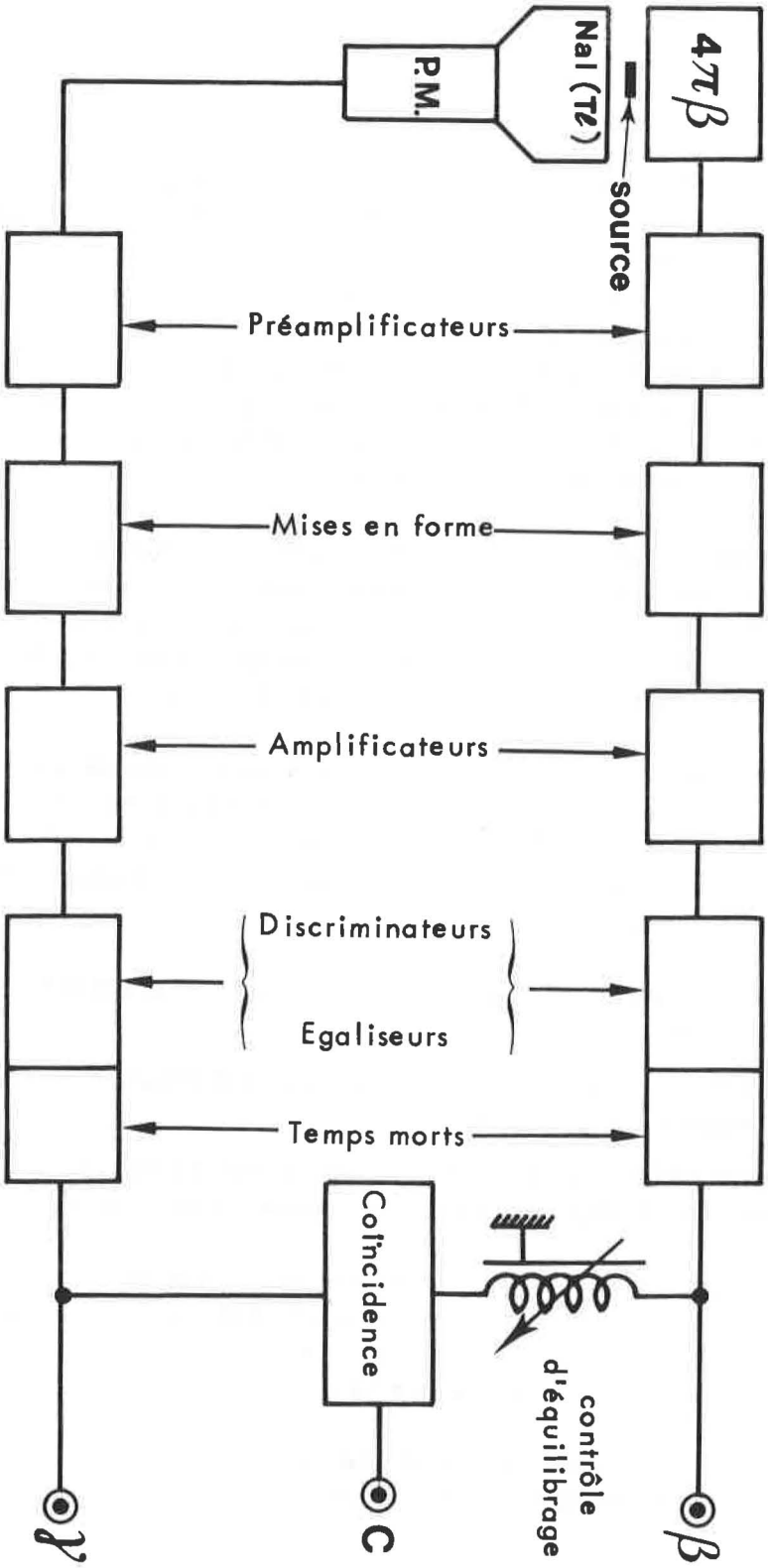


Fig. 1 - Schéma de principe de l'ensemble $4\pi\beta$(CP)-γ no. 3

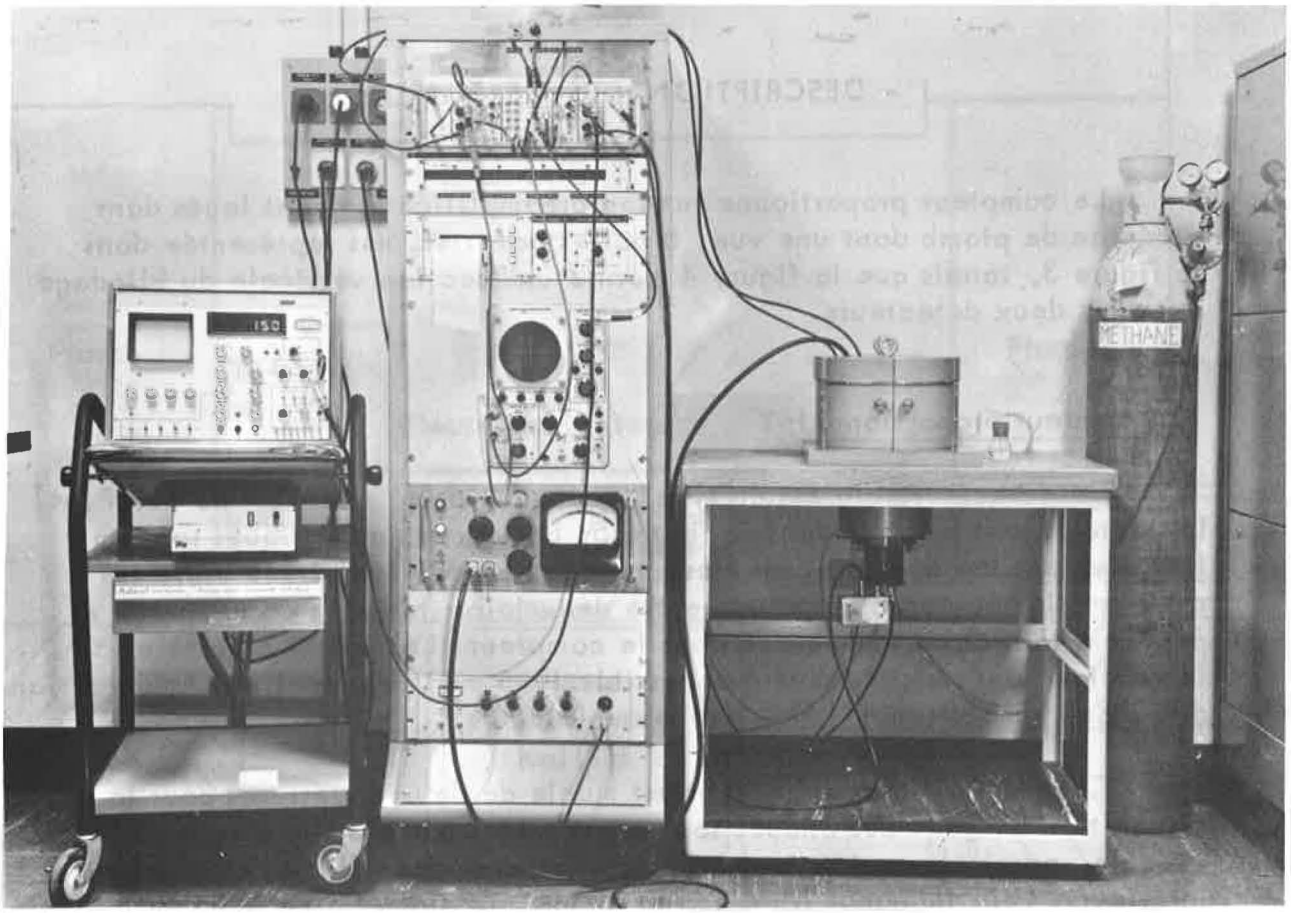


Fig. 2 - Vue générale de l'ensemble $4\pi\beta(CP)-\gamma$ no. 3

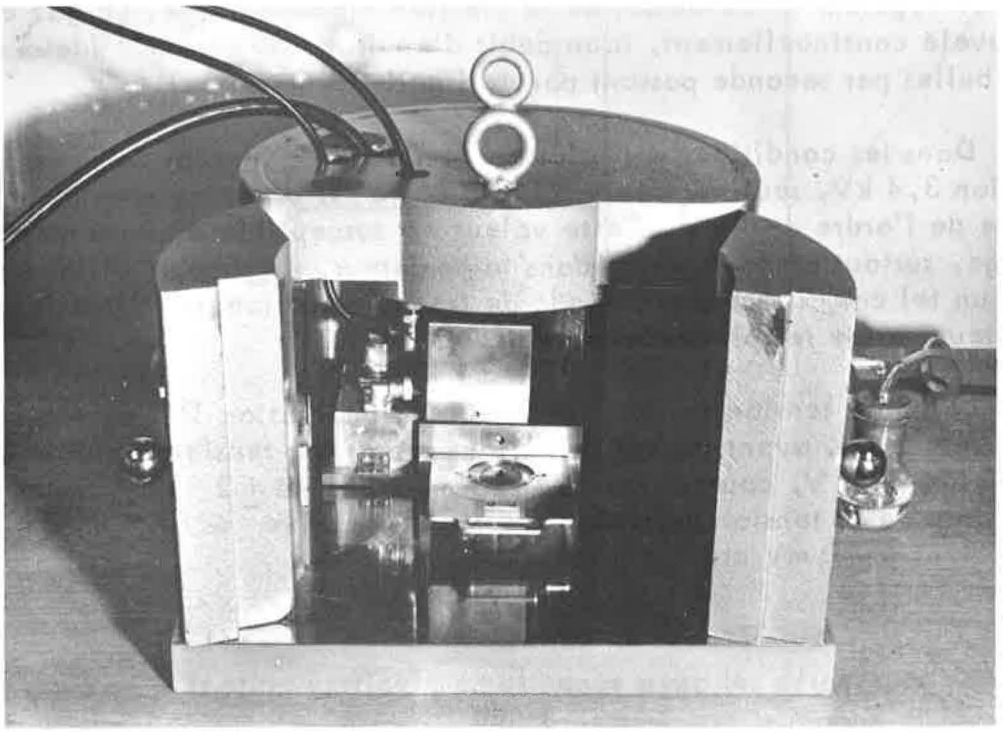


Fig. 3 - Compteur proportionnel et préamplificateur, protégés par un écran de plomb de 5 cm d'épaisseur. A droite, le "bulle-à-bulle" pour observer le débit gazeux.

I - DESCRIPTION DES DETECTEURS

Le compteur proportionnel et son préamplificateur sont logés dans un écran de plomb dont une vue, à portes ouvertes, est représentée dans la figure 3, tandis que la figure 4 montre une section verticale du blindage avec les deux détecteurs.

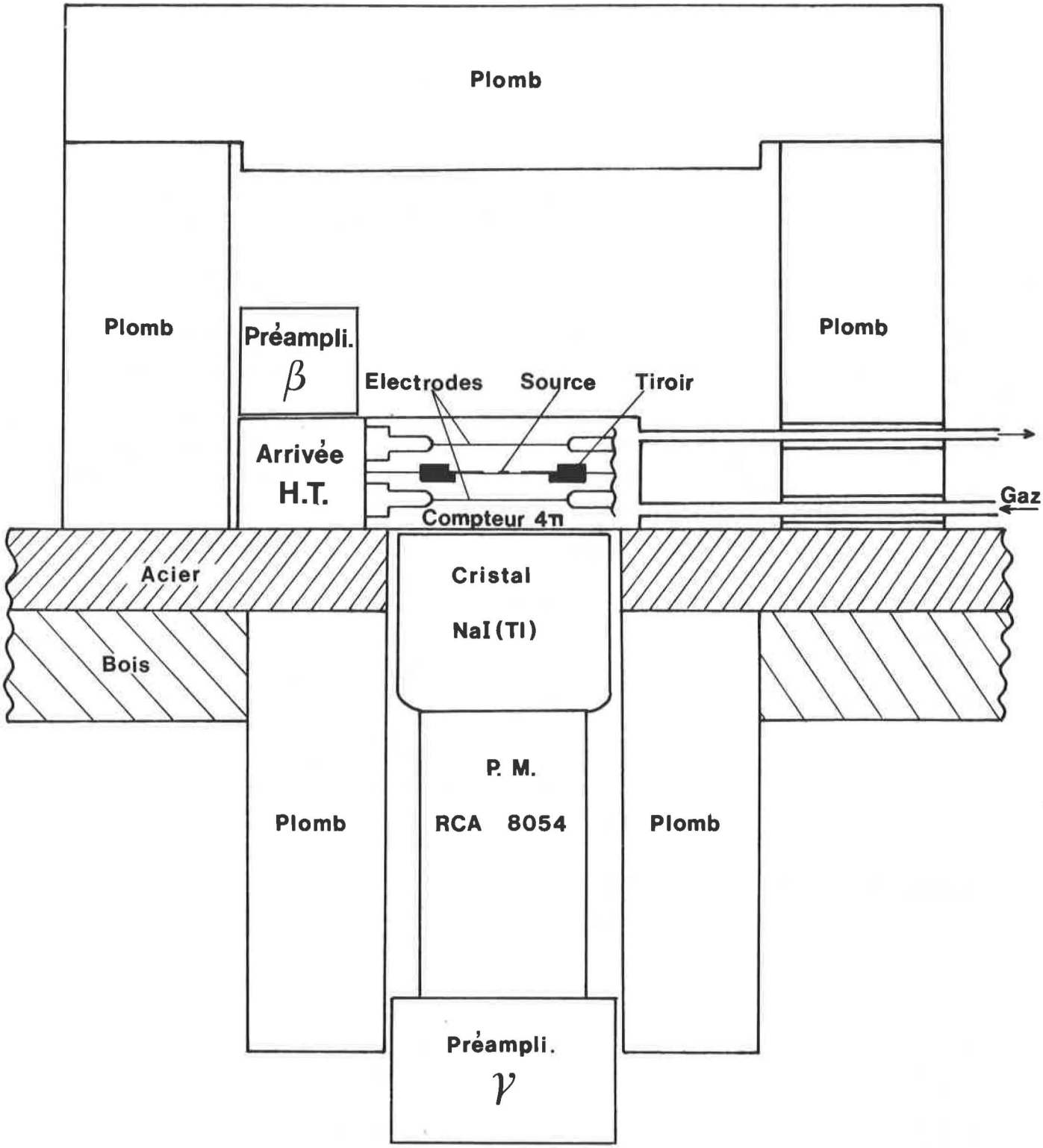
1. Compteur proportionnel

Ce détecteur, qui est du type "pillbox", a été construit au B.I.P.M. Les détails sont montrés dans la figure 5. Les parties métalliques sont en laiton et ont été dorées avant l'assemblage. La coulisse située entre les deux moitiés du détecteur glisse entre deux joints toriques en néoprène et permet d'introduire une source dans le compteur. Les parois parallèles à la coulisse sont aussi minces que possible (0,5 mm) pour faciliter la détection de rayons γ mous (du ^{241}Am, par exemple).

Chaque moitié du détecteur est munie de deux ouvertures pour la circulation du gaz. Les anodes sont constitutées par des fils d'acier inoxydable parallèles qui se trouvent dans les axes des volumes cylindriques intérieurs. Leur longueur libre est de 47 mm, le diamètre de 0,05 mm; l'isolement est en téflon. La distance entre les anodes est de 23 mm. Le volume du compteur entier est 88 cm^3; il est rempli de méthane (techniquement pur) ou d'un mélange argon-méthane (dans un rapport 9 à 1) à une pression légèrement au-dessus de la pression atmosphérique. Le gaz est renouvelé continuellement, à un débit d'environ 750 cm^3 h^{-1} (deux ou trois bulles par seconde passant par de l'huile de vaseline).

Dans les conditions normales de comptage de sources de ^{60}Co (tension 3,4 kV, seuil de détection β à 160 eV), on enregistre un mouvement propre de l'ordre de 1 s^{-1}. Cette valeur est susceptible d'augmenter avec l'usage, surtout après rupture, dans le compteur, du support d'une source. Dans un tel cas, il est recommandé de frotter et de redorer l'intérieur du compteur, et de remplacer les anodes.

La haute tension est fournie par une alimentation THT de Mesco, type APN 5003, ayant les spécifications suivantes: tension réglable de $\pm$ (250 à 5 000) V, courant maximal 3 mA, stabilité $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ pour des variations de la tension du secteur de $\pm$ 10%, dérive $\leq 10^{-3}$ en 8 h, ronflement $\leq$ 30 mV crête à crête.



Echelle 1:2

Fig. 4 - Section verticale du blindage avec les détecteurs

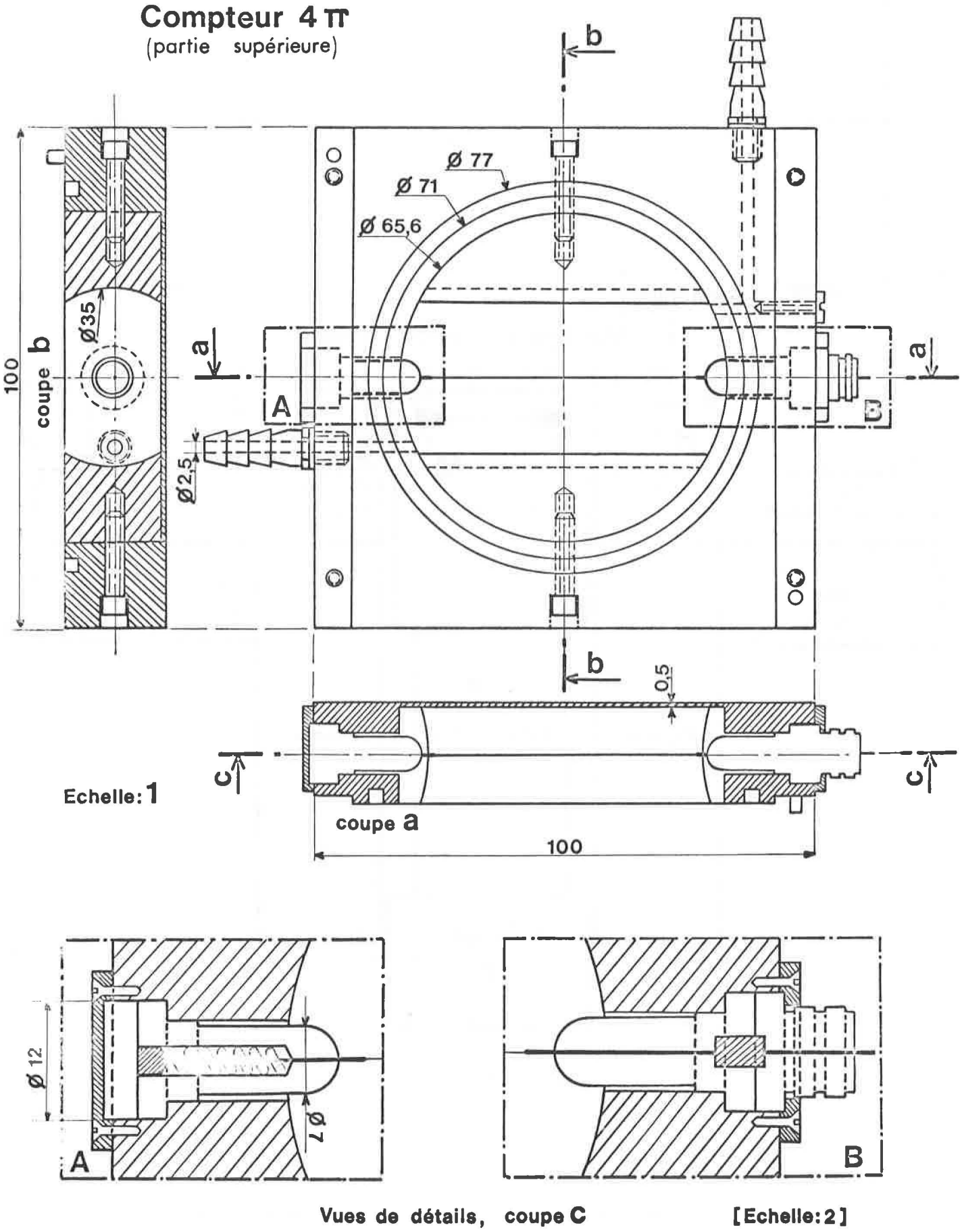


Fig. 5 - Détails de construction du compteur proportionnel

2. Détecteur à scintillation

Il s'agit d'un ensemble Harshaw comprenant un cristal d'iodure de sodium de 76 mm de diamètre et de 50 mm de hauteur, et un photomultiplicateur RCA, type 8054. Le diviseur de tension est constitué de résistances à haute stabilité et à faible coefficient de température.

Quelques spectres γ enregistrés avec ce détecteur sont représentés sur la figure 6. Le mouvement propre du détecteur, dans sa position normale et pour un seuil de détection de 500 keV, est de 3,6 s^{-1}.

La haute tension est fournie par une alimentation Keithley, type 245, dont les spécifications sont les suivantes: tension réglable de 0 à $\pm$ 2 100 V, courant maximal 10 mA, stabilité $\pm 10^{-5} \pm 2$ mV pour une variation du secteur de $\pm$ 10%, dérive $\pm 10^{-4} \pm 2$ mV pendant 8 h, ronflement < 1 mV (valeur quadratique moyenne) au-dessus de 5 Hz.

II - DESCRIPTION DU SYSTEME ELECTRONIQUE

1. Préamplificateur de charges

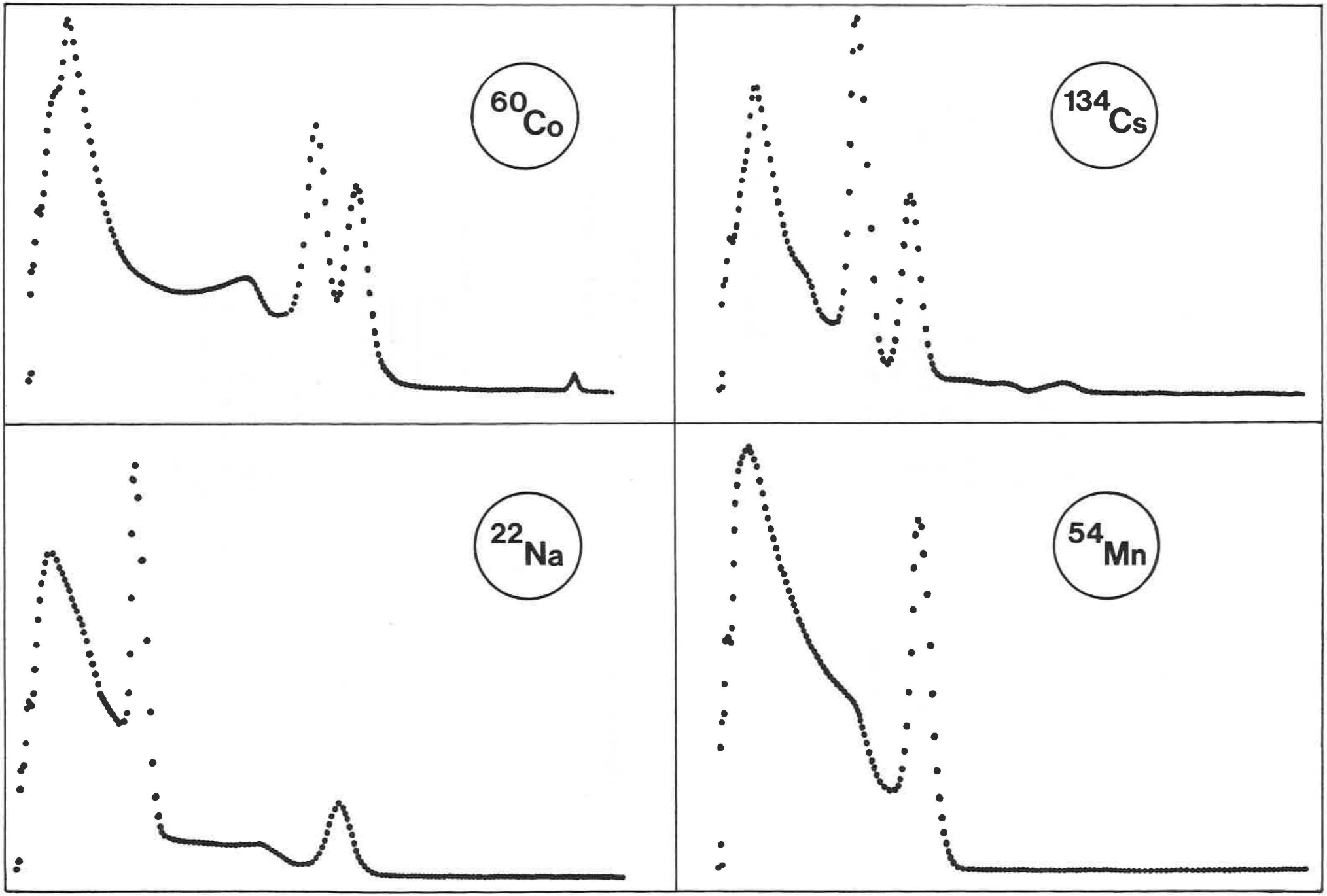
Ce convertisseur charge-tension est d'un modèle très courant. Son schéma est représenté sur la figure 7. Le rapport de conversion tension/charge dépend essentiellement du gain de l'ensemble BFW11, BCY71.

2. Circuit de mise en forme

Après divers essais, on a retenu le procédé de mise en forme par ligne à retard car il permet d'obtenir les temps de restitution les plus courts et le meilleur comportement en présence de surcharge de l'amplificateur. Ce circuit prévoit un choix entre la mise en forme par ligne simple ou par ligne double; cela veut dire que l'on peut produire des impulsions unipolaires ou bipolaires.

Nous décrivons brièvement le fonctionnement de ce circuit en nous référant aux figures 8a et 8b. Le potentiomètre P_1 est ajusté de telle sorte qu'après l'instant $t_o + T_r$ les amplitudes des signaux en A_1 et B_1 soient égales. T_r est le retard provoqué par la ligne. A partir de l'instant $t_o + T_r$, l'amplificateur différentiel 1 fonctionne en mode commun, et si son taux de réjection est élevé, on observe un retour rapide et définitif du signal S_1 au niveau zéro. Cette propriété est mise en évidence par l'observation

Fig. 6 - Quelques spectres γ relevés avec le détecteur à scintillation de l'ensemble 4πβ(CP)-γ no. 3



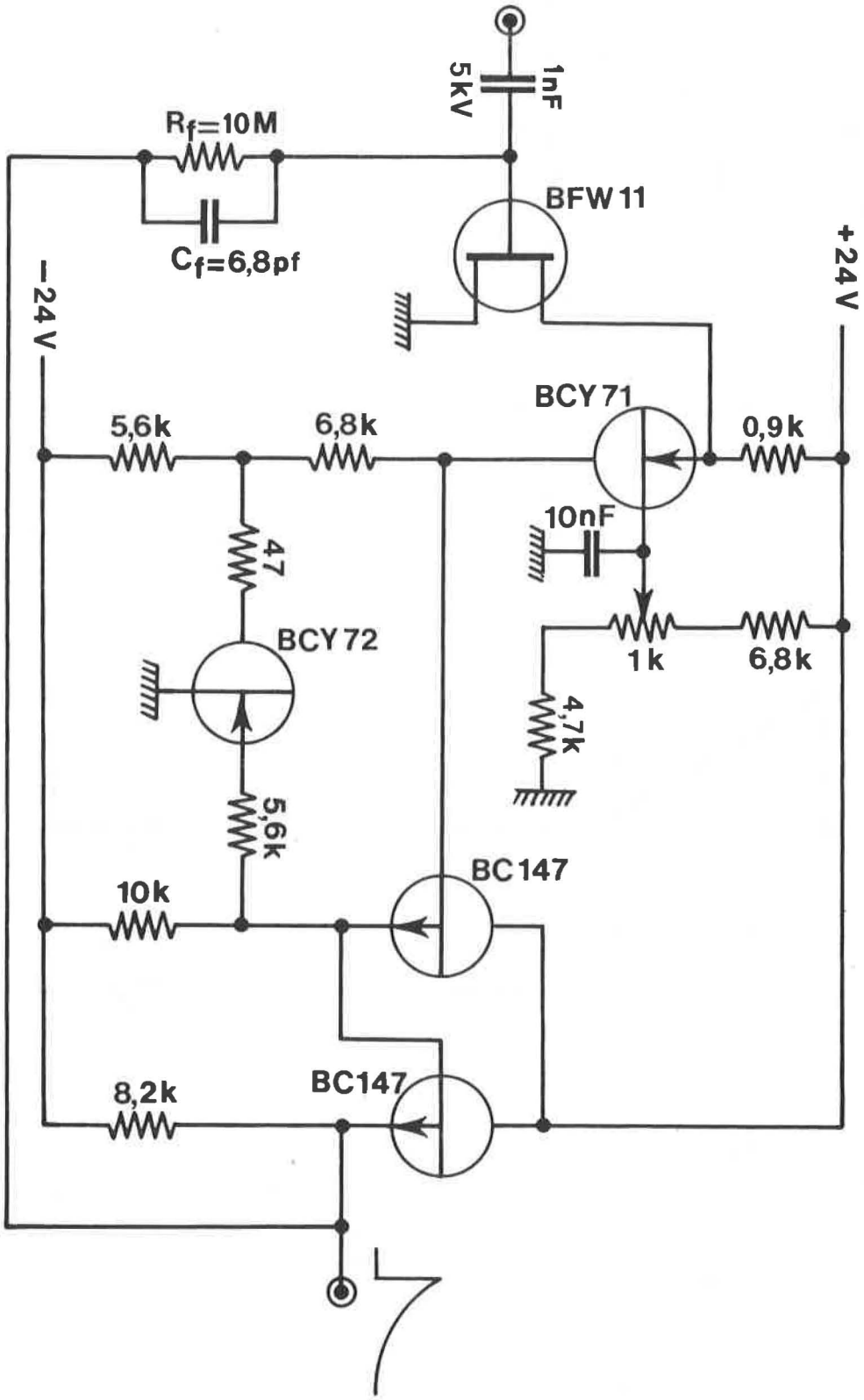


Fig. 7 - Préamplificateur de charges

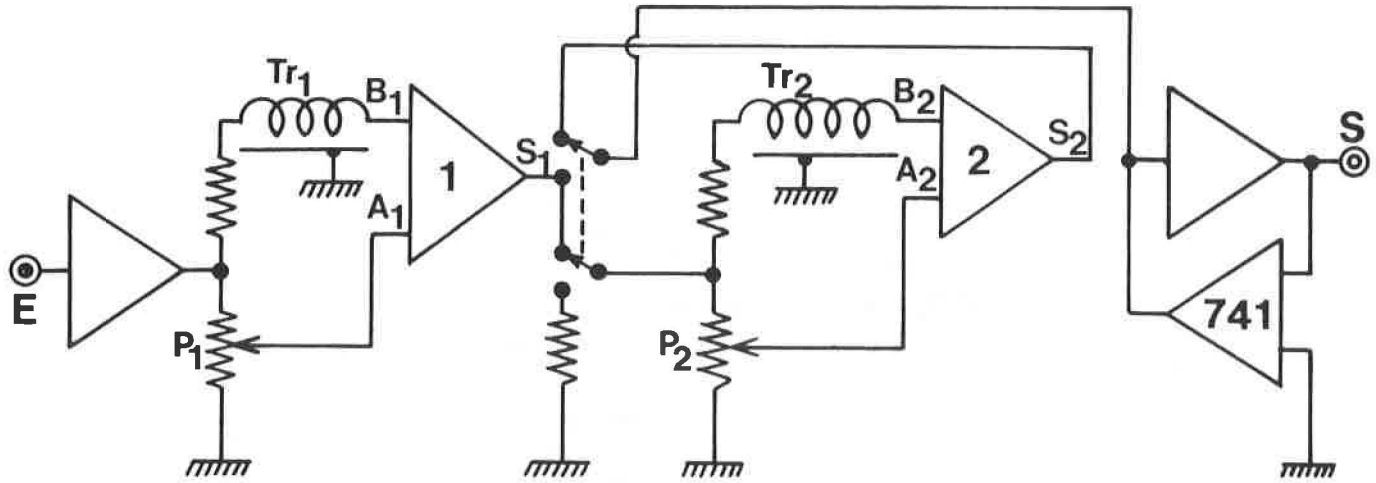


Fig. 8a - Schéma de principe du circuit de mise en forme

Tr_1 , Tr_2 : retards provoqués par les lignes

1, 2 : amplificateurs différentiels. Un contacteur permet de choisir la mise en forme par ligne simple ou double.

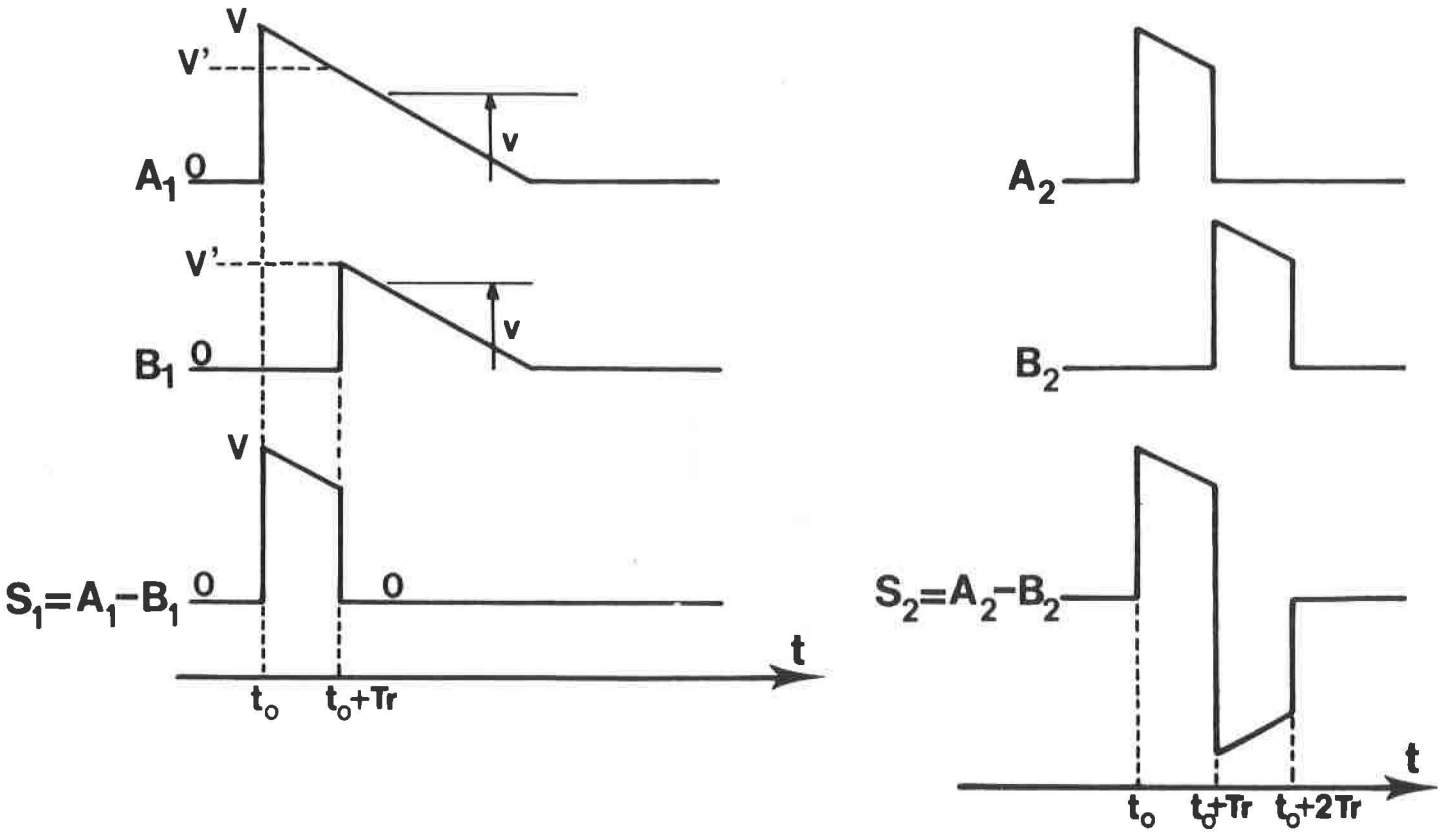


Fig. 8b - Formes des signaux aux points indiqués de la figure 8a

des signaux de sortie de l'amplificateur qui suit ce circuit de mise en forme. Le potentiomètre P_2 permet de rendre égales les aires positive et négative du signal obtenu par la mise en forme double. L'amplificateur 741 de la figure 8a fixe à zéro le niveau continu de sortie de ce circuit. Cela permet de réaliser une liaison directe entre la mise en forme et l'amplificateur.

Le schéma complet du circuit de mise en forme est reproduit sur la figure 9.

3. Amplificateur

L'amplificateur dont le schéma est représenté dans la figure 10 est caractérisé par le fait qu'il supporte aisément des surcharges de 2 000. Par ailleurs, on notera qu'il est entièrement lié en continu. Ses quatre étages ont chacun un gain voisin de 8, compte tenu des diverses intégrations. Le gain total est d'environ 4 000 au maximum; on ne peut le régler à moins de 50.

Chaque étage est précédé d'un limiteur qui réduit à 1,2 V les amplitudes positive et négative du signal appliqué. De cette manière, l'amplificateur ne fonctionne jamais en saturation. Le comportement de l'ensemble s'avère très satisfaisant.

Si aucun des limiteurs n'agit sur les signaux qui lui sont appliqués, l'amplification est linéaire. Aucun contrôle précis n'a été effectué, mais l'observation de spectres sur un sélecteur multicanaux permet de penser que la non-linéarité est inférieure à 1%. La haute régularité des comptages de la voie γ montre que l'amplificateur a une bonne stabilité dans le temps.

4. Discriminateur-sélecteur d'amplitude

Il est composé presque entièrement de circuits intégrés. On remarque sur la figure 11 deux discriminateurs A et B qui définissent respectivement les seuils inférieur et supérieur de détection des impulsions appliquées à l'entrée E. La différence entre les seuils A et B est réglable et maintenue constante quelle que soit la valeur du seuil A. Elle est obtenue à l'aide de l'amplificateur opérationnel 741. En fonction "discri", on ne tient pas compte de l'information fournie par le discriminateur B.

Le discriminateur C détecte les impulsions d'entrée à un niveau très bas. Le signal qu'il fournit peut être utilisé comme référence de temps. Cela se produit en fonction "EG" (égalisé), de manière à réduire les fluctuations des retards.

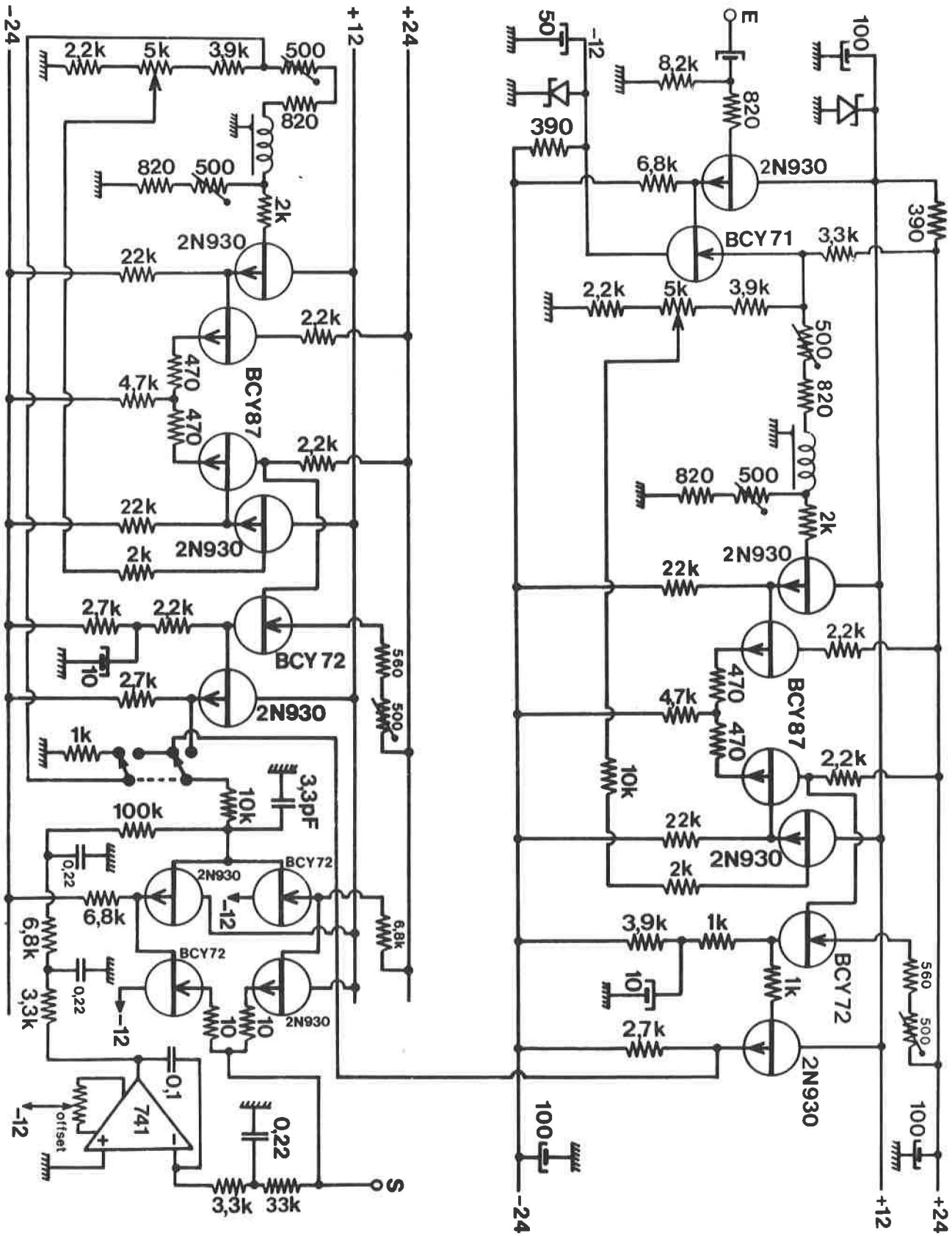


Fig. 9 - Schéma complet du circuit de mise en forme

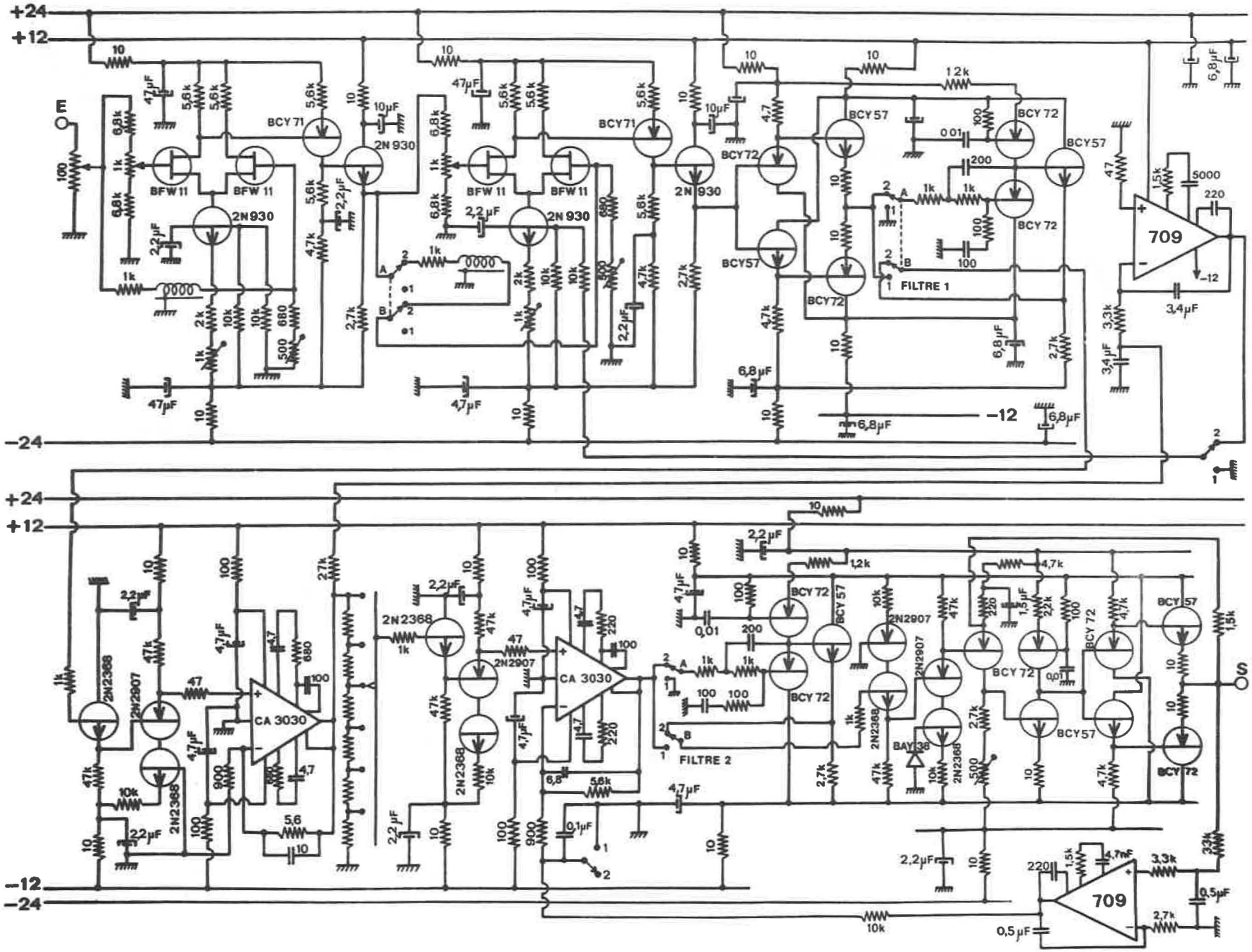
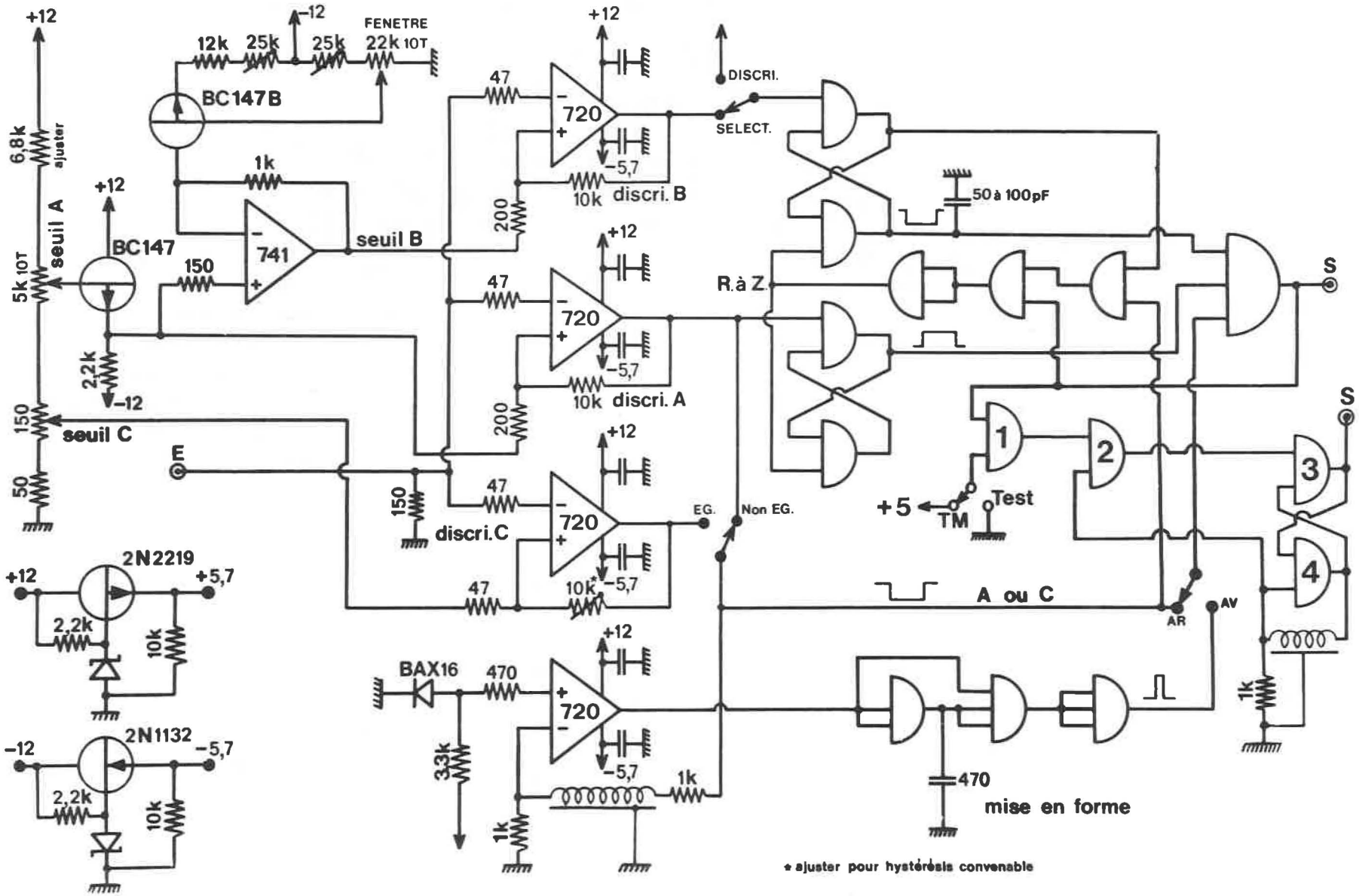


Fig. 10 - Schéma de l'amplificateur

Fig. 11 - Schéma des discriminateurs-sélecteurs d'amplitudes et du circuit de temps mort.
AV (AR): synchronisation sur front avant (arrière) de l'impulsion; EG (non EG): avec (sans) égaliseur de retard;
R à Z: remise à zéro; 1, 2, 3, 4: portes formant le dispositif de temps mort;
TM: fonctionnement normal du dispositif de temps mort; Test: permet de mesurer le temps mort.



Les informations fournies par les discriminateurs A, B et C sont analysées par des circuits logiques connectés à la sortie. Ces circuits veillent à ce que les fonctions sélectionnées soient correctement exécutées. Ces fonctions sont les suivantes:

- Sélecteur synchronisé sur le front avant, avec égalisation des retards
- " " " " " " , sans " " "
- " " " " " arrière, avec " " "
- " " " " " " , sans " " "
- Discriminateur " " " " avant, avec " " "
- " " " " " " , sans " " "
- " " " " " arrière, avec " " "
- " " " " " " , sans " " "

Une description très détaillée du fonctionnement est disponible. Quelques essais ont permis de montrer que la linéarité est au moins aussi bonne que celle du sélecteur multicanaux utilisé lors du contrôle de linéarité de l'amplificateur.

5. Fonctionnement du circuit de temps mort

Le dispositif de temps mort est composé de quatre portes et d'une ligne à retard. Son schéma est incorporé dans la figure 11. Pour mieux expliquer le fonctionnement, il a aussi été ajouté à la figure 12 qui décrit ce qui se passe en six points différents de ce circuit, désignés par les lettres E, A, B, Q, $\overline{Q}$ et C, et dont chacun peut prendre les états logiques 0 ou 1. Les niveaux indiqués dans le schéma sont ceux de l'état initial, c'est-à-dire quand le dispositif est prêt à fonctionner.

L'impulsion a, appliquée en E, est transmise par les portes 1 et 2 et actionne la bascule constituée par les portes 3 et 4. Le signal obtenu en Q peut être compté. La bascule ne revenant à son état initial qu'après un temps Rd, défini par la ligne à retard, l'impulsion b, bien que transmise jusqu'en B, ne produit aucun effet sur la bascule et n'est pas comptée. L'impulsion c n'est pas transmise par la porte 2 car l'une de ses entrées est maintenue au niveau O par le signal, retardé, en $\overline{Q}$. Les conditions initiales ne sont rétablies qu'après un intervalle de temps τ = 2 Rd = temps mort. L'impulsion d peut donc être comptée au même titre que l'impulsion a.

Les avantages que présente ce dispositif sont considérables et peuvent être résumés comme suit:

- simplicité;
- sécurité de fonctionnement;
- absence de toute mise au point;
- mesure rapide de la valeur du temps mort: en plaçant l'inverseur (fig. 11) en position "Test", on transforme le dispositif en oscillateur dont la période

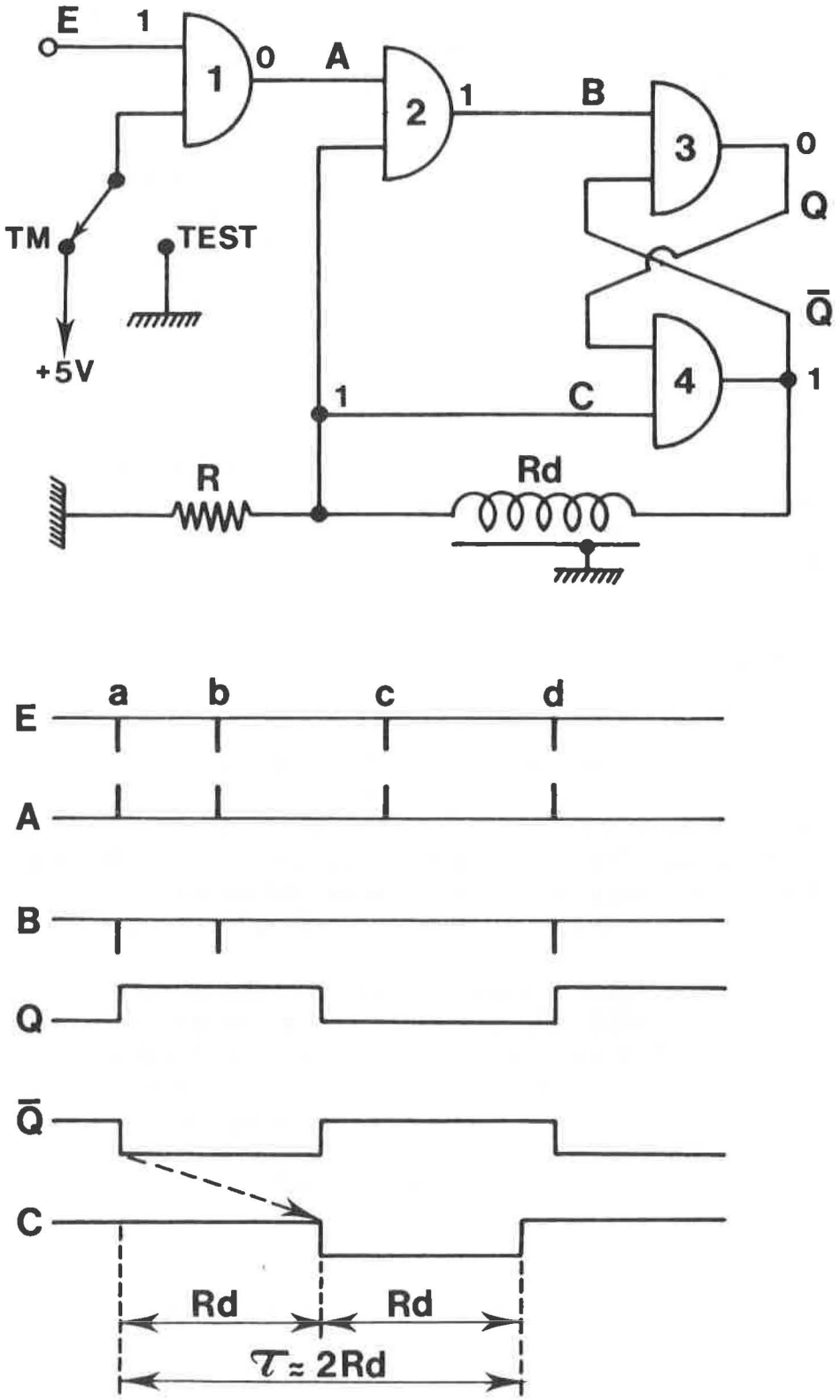


Fig. 12 - Principe du dispositif de temps mort. Les tensions qui règnent dans les points E, A, B, Q, $\overline{Q}$ et C peuvent avoir le niveau 1 ou 0. Le bas de la figure indique les niveaux initiaux et l'effet des impulsions a, b, c et d appliquées en E.

est égale, à quelques nanosecondes près, à la valeur du temps mort;
- haute stabilité à court et à long terme;
- absence d'un effet cumulatif.

Vis-à-vis de ces avantages, les inconvénients suivants ne pèsent pas très lourd:

- pour changer τ, il faut changer la ligne à retard;
- le dispositif doit être précédé d'une mise en forme. Le temps mort n'est bien défini que si les impulsions appliquées en E sont très courtes comparées à τ. Dans le cas présent, on utilise des impulsions d'environ 15 ns; les temps morts sont actuellement $\tau_\beta = 3,18\ \mu s$ et $\tau_\gamma = 5,42\ \mu s$, avec des incertitudes de 0,01 s.

6. Sélecteur de coïncidences

La mise en forme des impulsions (fig. 13) issues des discriminateurs des voies β et γ ou des dispositifs de temps mort est réalisée à l'aide de circuits assez semblables au circuit de temps mort. La durée des impulsions produites est sensiblement égale à la valeur du retard introduit par la ligne. Elle détermine en majeure partie le temps de résolution des coïncidences τ_r.

Ce temps peut être défini par $\tau_r = \frac{1}{2} \frac{n_{acc}}{n_\beta\, n_\gamma}$, où n_{acc} est le taux de coïncidences (accidentelles) quand les taux de comptage non corrélés des voies β et γ sont n_β et n_γ, respectivement. Le sélecteur est réglé à $\tau_r = (1,05 \pm 0,01)\ \mu s$.

Les coïncidences sont détectées par la porte C et les impulsions issues de cette porte sont uniformisées en durée par le monostable constitué par les portes 1 et 2.

La figure 14 représente une courbe d'équilibrage relevée sur ce circuit de coïncidences précédé des éléments décrits.

7. Circuits de commande mesures (CCM) et de commande impression (CCI)

Ces circuits s'intègrent dans un ensemble dont le schéma de principe est représenté sur la figure 15. Le rôle du CCI est de fournir à l'imprimante toutes les données nécessaires à l'impression correcte du contenu de chacune des n échelles de comptage. Ce nombre est actuellement de quatre et pourrait au besoin être augmenté jusqu'à 8. L'ordre d'impression parvient au CCI de l'extérieur (CCM ou base de temps). Lorsqu'il est donné, le CCI réalise seul les opérations de transfert d'informations entre lui-même et les échelles, d'une part, et entre lui-même et l'imprimante, d'autre part.

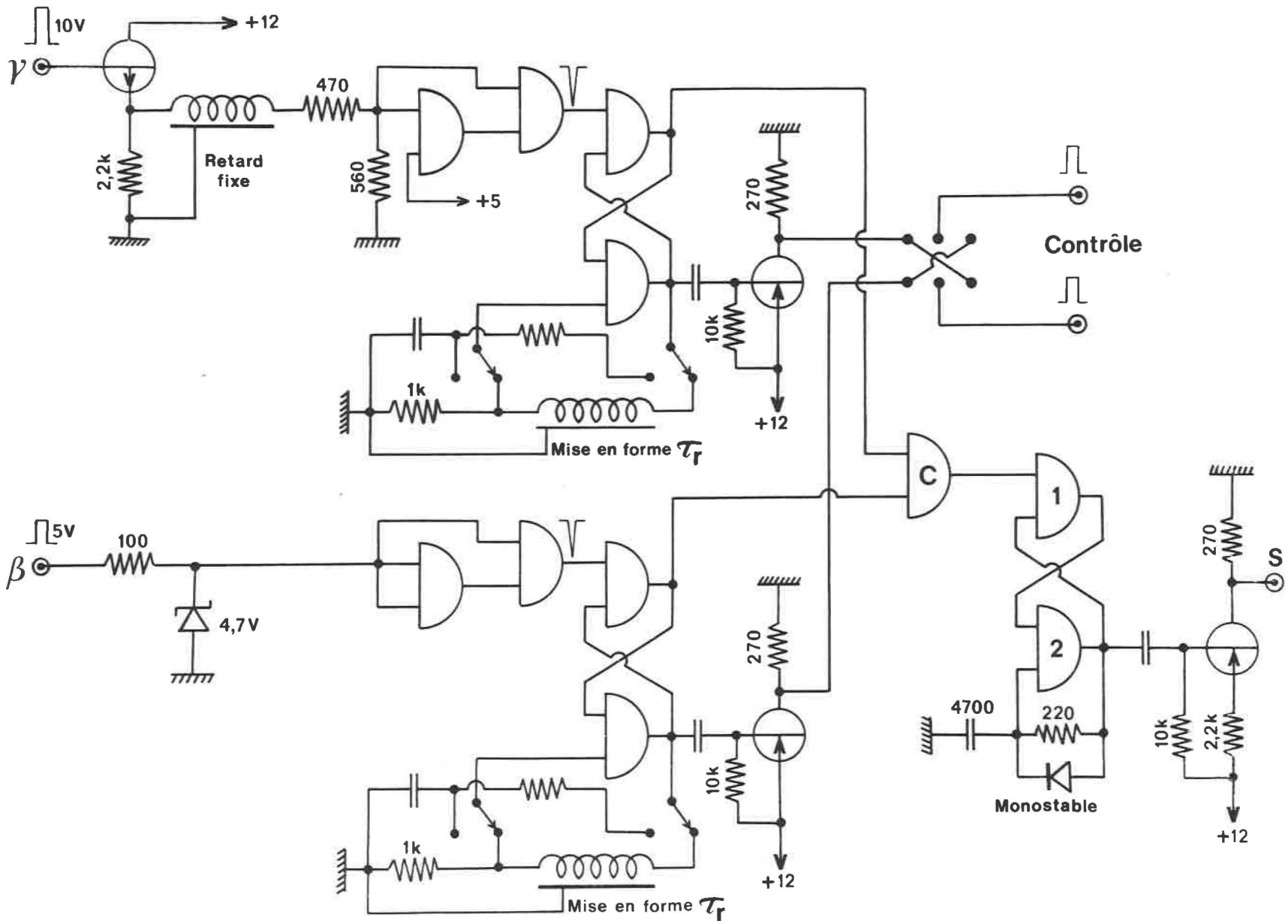
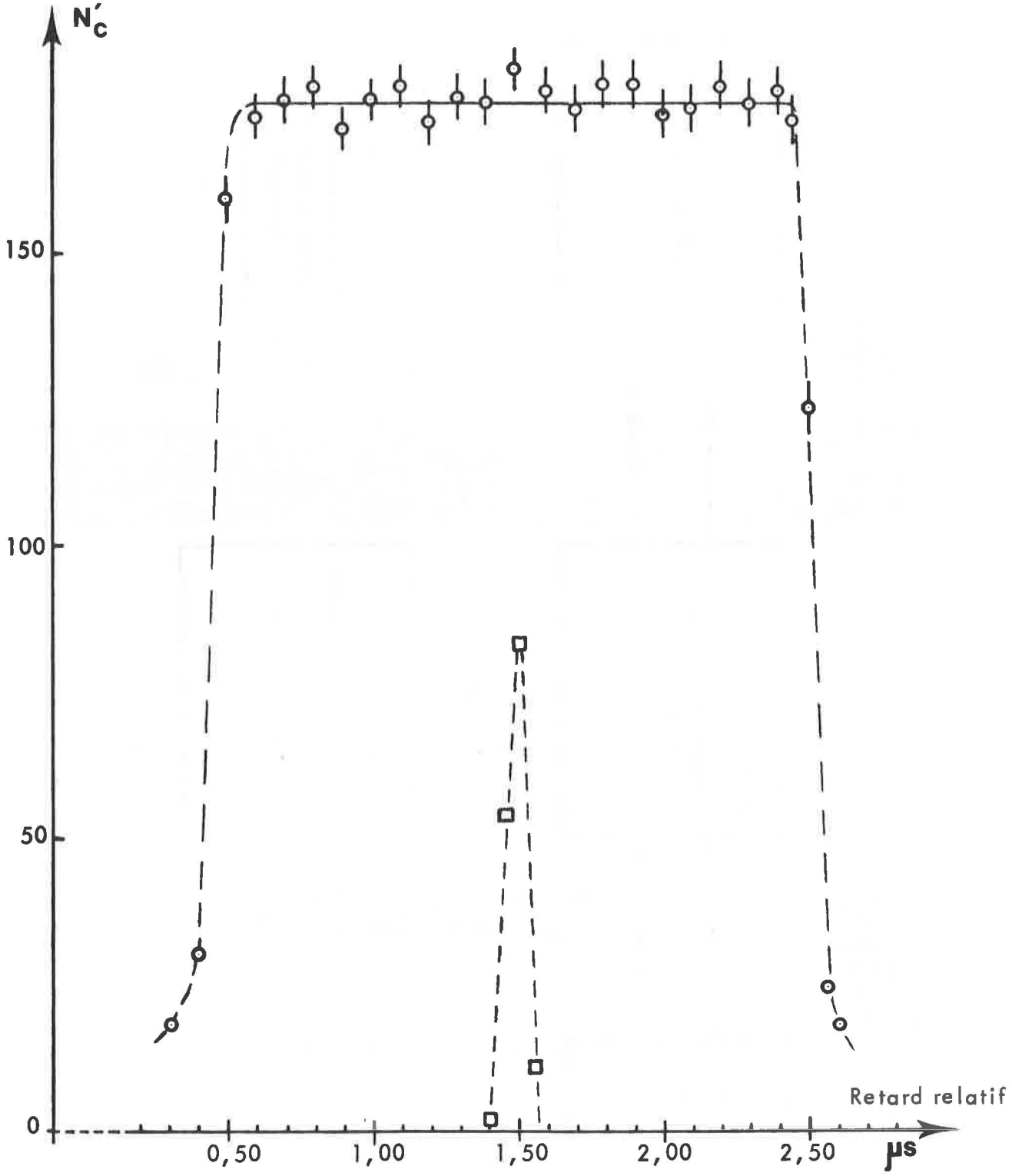


Fig. 13 - Schéma du sélecteur de coïncidences

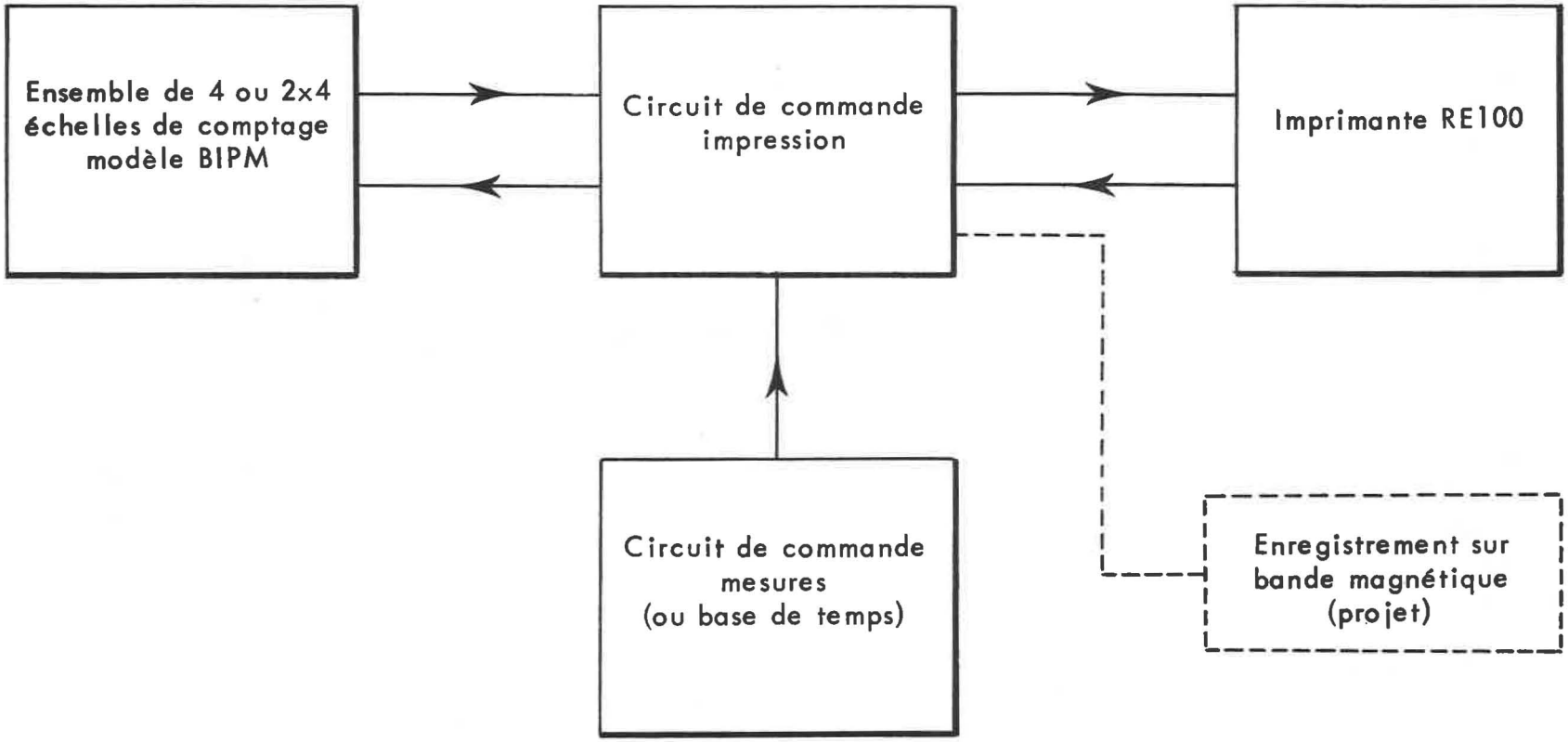


o avec $\tau_r = 1{,}05\,\mu s$

□ " " $= 0{,}02\,\mu s$

Fig. 14 - Courbes d'équilibrage déterminées avec le dispositif présent. Les points expérimentaux représentent des taux de coïncidences avec leurs incertitudes, en fonction du retard entre les voies β et γ

Fig. 15 - Schéma de principe de l'ensemble de commande



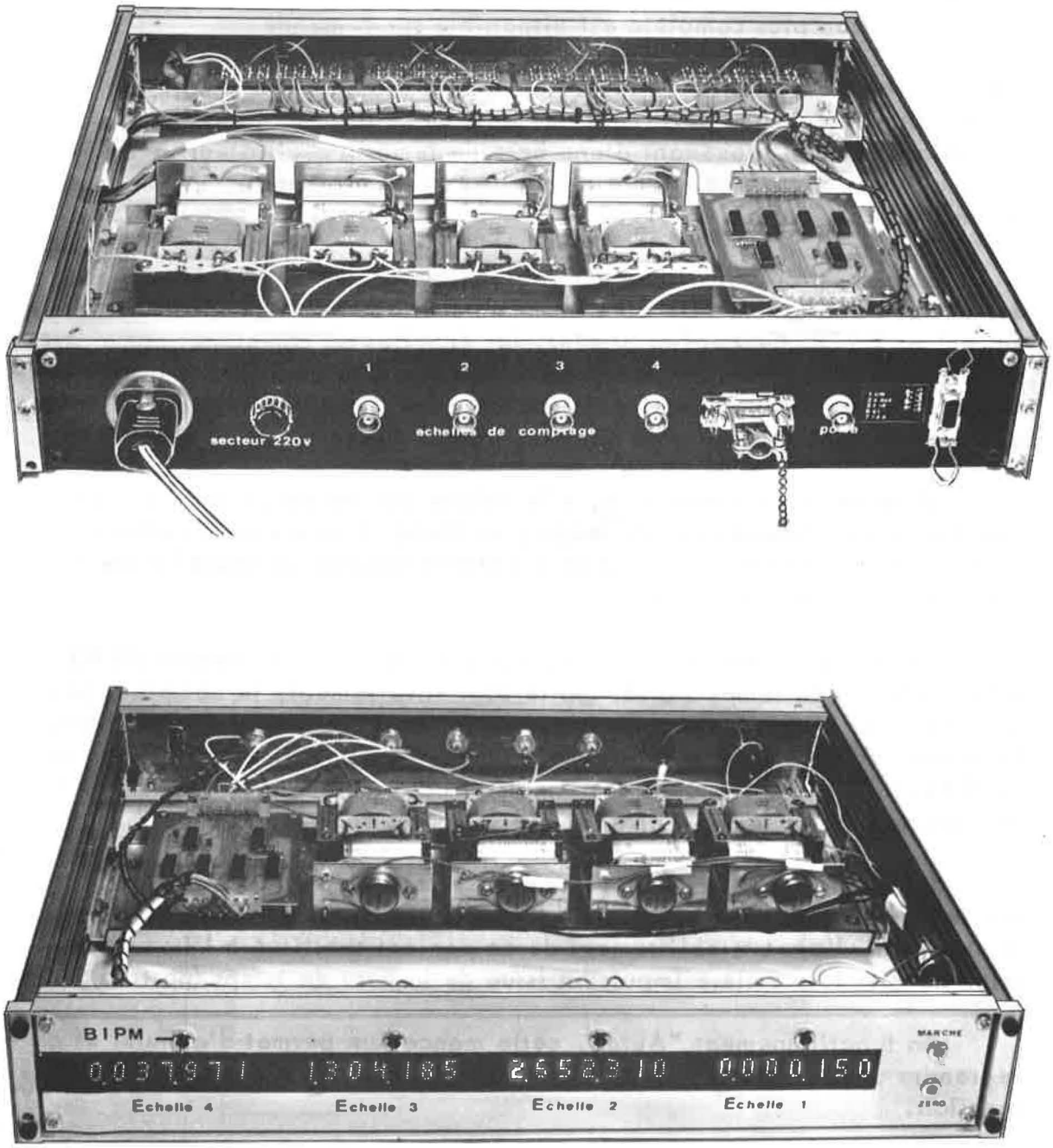


Fig. 16 - Vue des échelles de comptage (construction BIPM)

La figure 16 donne une vue des échelles de comptage. Les schémas détaillés des deux circuits sont reproduits sur les figures 17 et 18. Nous nous bornons dans ce qui suit à exposer le principe de fonctionnement. Une description plus complète est disponible sur demande.

- CCM (figure 17) - Une "mesure" comprend le comptage simultané d'impulsions aléatoires provenant des trois voies (β, γ, c) et d'impulsions périodiques (1 Hz) provenant d'une base de temps à oscillateur à quartz. On a le choix entre une mesure manuelle, unique (Manuel), et une mesure automatique, répétée (Auto).

Une mesure automatique est déclenchée par un ordre (M = marche) donné par l'opérateur. Elle dure un nombre de secondes qui peut être choisi entre 1 et 9 999. Ce nombre atteint, les échelles de comptage sont arrêtées simultanément pour une durée, présélectionnée elle aussi, pendant laquelle leurs contenus sont imprimés, puis remis à zéro. Le comptage reprend et la séquence se répète jusqu'à ce que l'opérateur donne l'ordre d'arrêt (A).

Si la mesure est manuelle, elle débute comme en automatique et s'arrête après l'écoulement du temps préaffiché. L'impression s'effectue comme précédemment, mais l'appareil attend ensuite un nouvel ordre (M) avant de recommencer le cycle.

La remise à zéro (R_o) du compteur pour le temps de mesure (PSM) a lieu à la fin du temps d'arrêt (porte 37). Inversement, le compteur pour le temps d'arrêt (PSA) est remis à zéro à la fin du temps de mesure (porte 38). La durée des impulsions qui transmettent ces ordres (portes 35 et 36 ou 40 et 41) évite l'enregistrement des impulsions qui marquent le début d'un temps de mesure ou d'un temps d'arrêt et qui sont plus courtes.

On peut provoquer manuellement l'effet que produit l'atteinte de la fin de l'intervalle de temps d'arrêt (PSA) quand on actionne R_o (remise à zéro manuelle). L'établissement de ce contact substitue à l'impulsion issue de PSA la première impulsion issue de la base de temps (porte 5).

En fonctionnement "Auto", cette manoeuvre permet d'annuler et de reprendre une mesure si l'opérateur le désire. Elle n'est pas suivie d'impression.

Les portes 15 et 16 retardent de 100 ns les impulsions de la base de temps. Ainsi, en manuel, on ne compte pas l'impulsion qui détermine le début d'une mesure et l'on compte bien celle qui en détermine la fin.

La sortie "Cde CCI" est reliée à l'entrée "Commande de Mesure/Arrêt" du CCI, et la sortie "Comptage" est reliée à l'échelle "Horloge". Les sorties "Porte Echelles" et "R à Z Echelles" existent dans les deux circuits. Quand le CCI est commandé par le CCM, comme c'est le cas dans l'ensemble no. 3, ce sont les sorties du CCM qui sont utilisées. Ceci n'a de l'importance qu'en fonctionnement manuel.

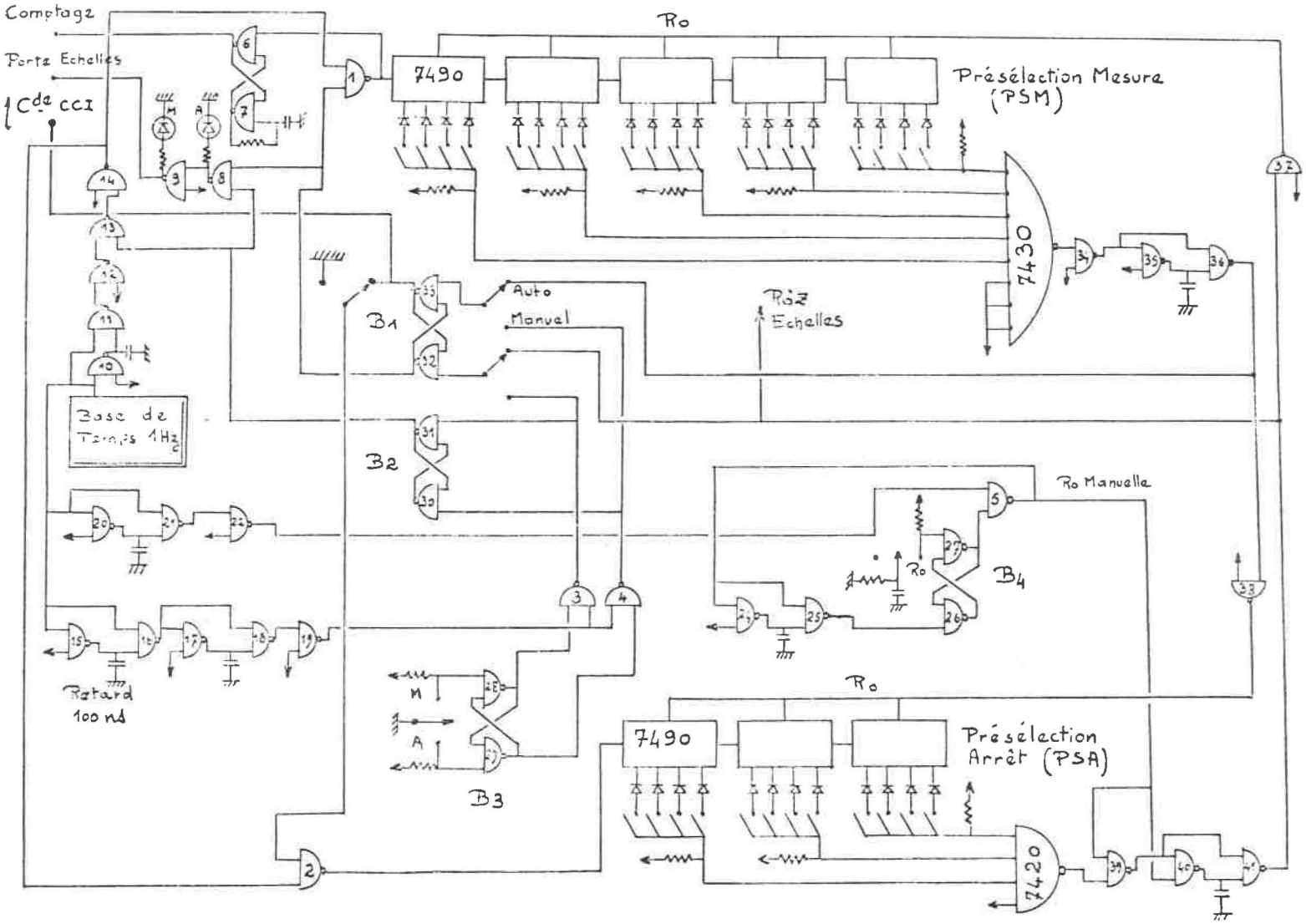


Fig. 17 - Circuit de Commande Mesures (CCM)

- CCI (figure 18) - La fin (t_2) du temps d'arrêt - ou un nouvel ordre "M" - est suivie d'un signal "Commande" qui remet à zéro les éléments de contrôle du CCI, vide les échelles de leur contenu (M8 - R à Z Echelles) et relance la mesure (B1, ayant basculé, ouvre "Porte Echelles").

L'intervalle de mesure commence à l'instant t_2 et dure jusqu'à t_1, défini par le CCM. A l'instant t_1, la mesure est arrêtée par la "Porte Echelles". Un train d'impulsions de l'horloge (M1, $\approx$ 10 kHz) franchit la porte 7420 A, ouverte par B1, fait basculer le bistable B2 et permet à M3 de générer une impulsion "Mode Control" et une seule. Elle fait basculer B2, ce qui empêche les impulsions suivantes d'atteindre M3. En outre, 29 impulsions de l'horloge sont mises en forme (M4) et comptées (C_1, C_2). L'impulsion "Mode Control" et la première formée par M4 sont appliquées à tous les registres à décalage associés aux échelles et permettent leur changement en parallèle. Les 28 impulsions suivantes sont également appliquées aux échelles de comptage; les sept registres du CCI sont alors chargés du contenu d'une échelle. Les 28 sorties parallèles des registres sont reliées aux circuits d'entrée de l'imprimante à sept colonnes. La dernière impulsion ferme les portes 7420B et 7420A, ce qui arrête les impulsions suivantes et donne l'ordre d'impression (IMP) à l'imprimante par l'intermédiaire des monostables M6 et M7. Son travail achevé, l'imprimante fournit un premier signal de fin d'impression (FIM) qui est enregistré (C3) et qui met à zéro les compteurs C_1 et C_2. Une nouvelle séquence de 28 impulsions provoque le transfert du contenu de l'échelle suivante et commande une deuxième impression. Ces cycles se répètent n_2 fois. L'impression se fait en couleur si n_2 est supérieur au nombre n_1 (numéro présélectionné de l'impression couleur). La figure 19 montre un échantillon de sortie d'imprimante. Si le nombre n d'échelles est inférieur à n_2, on aura $n_2 - n$ interlignes. Le nombre n_2 atteint, les impressions s'arrêtent et l'on attend la fin de la période d'arrêt (t_2), définie par le CCM. En "auto" le cycle recommence; en "manuel" l'appareil attend un nouvel ordre.

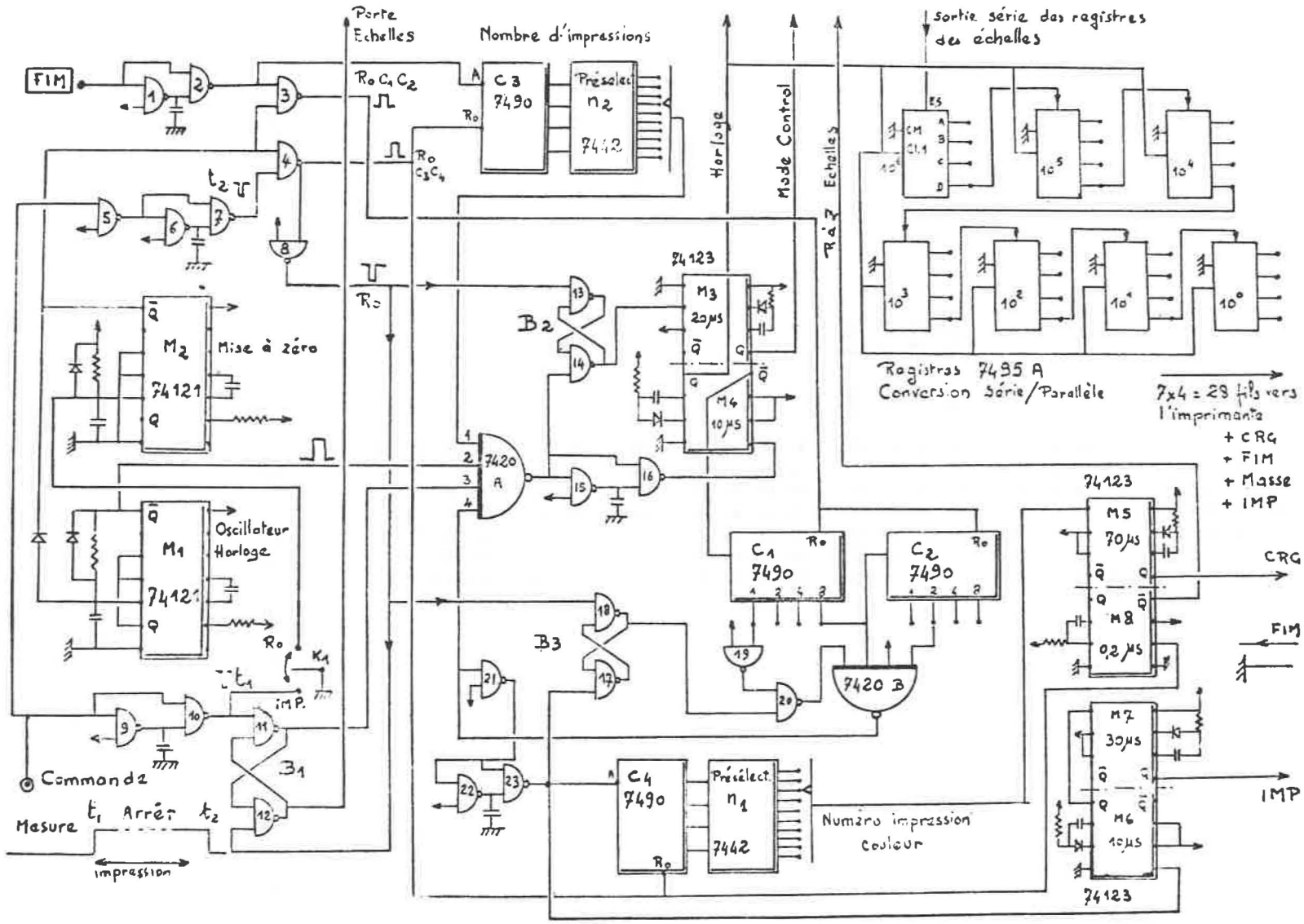


Fig. 18 - Circuit de Commande Impression (CCI)

0153671
0292259
4221402
0001000

0153291
0291465
4219176
0001000

0153746 ← NC
0291991 ← NG
4224535 ← NB
0001000 ← TM

0153547
0291540
4225254
0001000

0153868
0291872
4228046
0001000

0153529
0292065
4234675
0001000

Fig. 19 - Echantillon d'impression des résultats expérimentaux

III - RESULTATS OBTENUS ET MESURES AUXILIAIRES

1. Calcul du taux de désintégration

Pour le calcul de l'activité d'une source à partir des résultats expérimentaux, il n'existe pas de formule rigoureuse pour tenir compte des diverses corrections indispensables. On utilise toujours une des formules approchées dont les plus connues sont dues à Campion (3), à Gandy (4) et à Bryant (5). Les différences entre les résultats calculés selon l'une ou l'autre de ces formules sont considérées comme négligeables, tant que les mesures se font dans des conditions de comptage habituelles.

Les formules rassemblées dans la figure 20 et qui découlent du travail de Campion sont couramment utilisées au B.I.P.M. Les résultats expérimentaux sortis de la machine imprimante (fig. 19) sont transcrits sur cartes perforées et introduits dans l'ordinateur IBM 1130 du B.I.P.M. Un programme en Fortran, mis au point au B.I.P.M., permet de sortir les résultats sous la forme reproduite dans la figure 21 (la légende pour les symboles utilisés est donnée dans la figure 22).

2. Paliers de comptage

Avant d'entamer une série de mesures, il est recommandé de relever la courbe de comptage correspondant au radionucléide considéré (voir aussi référence (6)). La figure 23 montre les courbes obtenues pour plusieurs radionucléides et avec deux compositions différentes du gaz de comptage. La partie rectiligne de ces courbes, due surtout à un accroissement progressif de l'efficacité du compteur proportionnel, s'appelle le palier. Il est caractérisé par sa longueur (en V) et sa pente (en % par 100 V). La remontée au bout supérieur du palier est due à l'apparition d'impulsions secondaires.

Il est normal de choisir comme tension de travail une valeur correspondant au milieu du palier. Cependant, l'exemple du ^{241}Am fait apparaître, surtout pour des sources épaisses, un deuxième palier qui est dû au comptage des électrons de conversion. Il est alors indiqué de choisir une tension inférieure à cette deuxième marche.

Fig. 20 - Formules utilisées pour le calcul de l'activité

$$N_o = \frac{N_\beta N_\gamma \left[1 - \tau_r (N'_\beta + N'_\gamma)\right]}{(N_c - 2\tau_r N'_\beta N'_\gamma)(1 - \tau N'_c)(1 + K_\varepsilon)} \text{ , pour } \tau_c < \tau ,$$

avec

N'_β, N'_γ, N'_c taux de comptage observés sur les voies β, γ et coïncidences, sans aucune correction,

N_β, N_γ, N_c taux de comptage corrigés pour le mouvement propre,

τ_β, τ_γ, τ_c temps morts pour les voies β, γ et coïncidences,

τ valeur la plus faible de τ_β ou τ_γ,

τ_r temps de résolution du circuit de coïncidences,

K_ε correction dépendant du schéma de désintégration:

$$K_\varepsilon = \frac{1 - \varepsilon_\beta}{\varepsilon_\beta} C \left[(\varepsilon_\beta)_\gamma , \varepsilon_\gamma \right] ,$$

$$\varepsilon_\beta = \left[\frac{N_\beta}{(1 - \tau_\beta N'_\beta) N_o} - (\varepsilon_\beta)_\gamma \right] \frac{1}{1 - (\varepsilon_\beta)_\gamma} = \text{efficacité du compteur } 4\pi,$$

$$\varepsilon_\gamma = \frac{N_\gamma}{(1 - \tau_\gamma N'_\gamma) N_o} = \text{efficacité du compteur } \gamma,$$

$(\varepsilon_\beta)_\gamma$ = efficacité γ du compteur β,

C = constante dépendant du schéma de désintégration et du dispositif de comptage,

$$N_{acc} = N_c - \frac{N_c - 2\tau_r N'_\beta N'_\gamma}{1 - \tau_r (N'_\beta + N'_\gamma)} = \text{taux de coïncidences fortuites.}$$

RADIONUCLEIDE COBALT 60 SOURCE NUMERO E9 (08-02-74) TEMPS DE MESURE 24 X 600 SECONDES

DATE DE MESURE(T) 12-09-74 11H DATE DE REFERENCE(TO) 01-09-74 0H TU PERIODE 46222 HEURES

LABORATOIRE DESTINATAIRE PAYS

TZ	TM	TBA	BB	GB	CB	TB	TG	TR	C
276,0	600	8000	8233	31932	2985	0,00000318	0,00000542	0,00000105	0,00350

NB	NG	NC	NACC	KE%	EB%	EG%	ACT(T)	ACT(TO)		SIGMA
7381012	808377	772048	16,608	0,007	97,96	10,36	13065,592	13119,749	+-	5,166
7381341	808198	771499	16,615	0,007	97,92	10,35	13072,733	13126,919	+-	5,177
7381116	808999	772577	16,621	0,007	97,96	10,36	13067,020	13121,183	+-	5,168
7377231	809167	772663	16,616	0,007	97,94	10,37	13061,371	13115,510	+-	5,169
7382819	807993	771562	16,608	0,007	97,95	10,35	13070,997	13125,176	+-	5,170
7380439	809834	773130	16,641	0,007	97,92	10,37	13070,188	13124,364	+-	5,174
7376943	809443	773013	16,618	0,007	97,96	10,37	13059,485	13113,616	+-	5,166
7376832	810742	774344	16,640	0,007	97,97	10,39	13057,873	13111,998	+-	5,163
7381760	810366	773569	16,655	0,007	97,91	10,38	13073,894	13128,085	+-	5,177
7382100	809594	772940	16,639	0,007	97,93	10,37	13072,608	13126,794	+-	5,174
7380107	810273	773782	16,642	0,007	97,95	10,38	13065,779	13119,936	+-	5,167
7379603	810781	773782	16,662	0,008	97,89	10,38	13073,307	13127,496	+-	5,181
7377159	809741	772798	16,636	0,008	97,89	10,37	13068,709	13122,878	+-	5,181
7379053	810577	773932	16,648	0,007	97,93	10,38	13066,426	13120,586	+-	5,171
7378460	811819	775334	16,664	0,007	97,96	10,40	13061,783	13115,924	+-	5,164
7380114	811702	774788	16,677	0,007	97,91	10,39	13072,248	13126,433	+-	5,177
7376489	810726	774054	16,645	0,007	97,93	10,39	13062,278	13116,420	+-	5,171
7380699	812828	776116	16,693	0,007	97,94	10,41	13069,110	13123,281	+-	5,170
7382056	811396	774873	16,667	0,007	97,96	10,39	13069,319	13123,491	+-	5,167
7380555	812194	775224	16,688	0,008	97,90	10,40	13073,793	13127,983	+-	5,178
7380088	812095	775614	16,673	0,007	97,96	10,41	13064,645	13118,798	+-	5,164
7379087	811487	775224	16,655	0,007	97,99	10,40	13059,549	13113,681	+-	5,158
7377875	812640	776025	16,680	0,007	97,95	10,41	13062,662	13116,806	+-	5,166
7379400	812344	775746	16,678	0,007	97,95	10,41	13065,347	13119,502	+-	5,167
12299,468	1350,925	1289,905	16,649	0,007	97,94	10,38	13066,946	13121,099	+-	1,022

Fig. 21 - Exemple d'un résultat de mesure (sortie d'ordinateur). Les symboles sont expliqués dans la figure 22.

Fig. 22 - Légende des symboles utilisés pour les calculs à l'ordinateur

TZ intervalle de temps séparant le début de la première mesure et le temps de référence (en h),

TM temps de comptage pour chaque mesure (s),

TBA temps total de comptage du mouvement propre (s),

BB, GB, CB nombre d'impulsions de mouvement propre enregistrées sur les voies β, γ et coïncidences pendant le temps TBA,

TB, TG temps morts dans les voies β et γ (s),

TR temps de résolution des coïncidences (s),

C constante dépendant du dispositif et du schéma de désintégration,

NB, NG, NC nombre de β, γ et de coïncidences enregistrées pendant le temps TM,

NACC taux de coïncidences fortuites (s^{-1}),

KE correction due au schéma de désintégration (%),

EB, EG efficacités β et γ (%),

ACT(T) activité de la source (s^{-1}) à la date de mesure,

ACT(TO) activité de la source (s^{-1}) à la date de référence,

SIGMA écart-type sur une mesure:

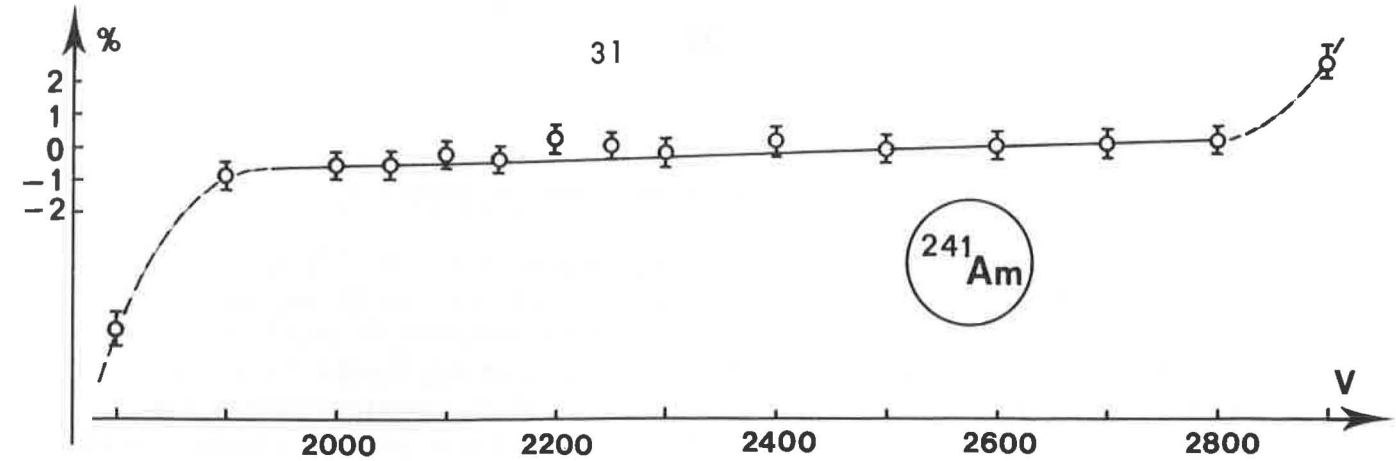
$$N_o \left[(2\, \varepsilon_\beta\, \varepsilon_\gamma - \varepsilon_\beta - \varepsilon_\gamma + 1) / (NC_{total}) \right]^{1/2}, \qquad (s^{-1}).$$

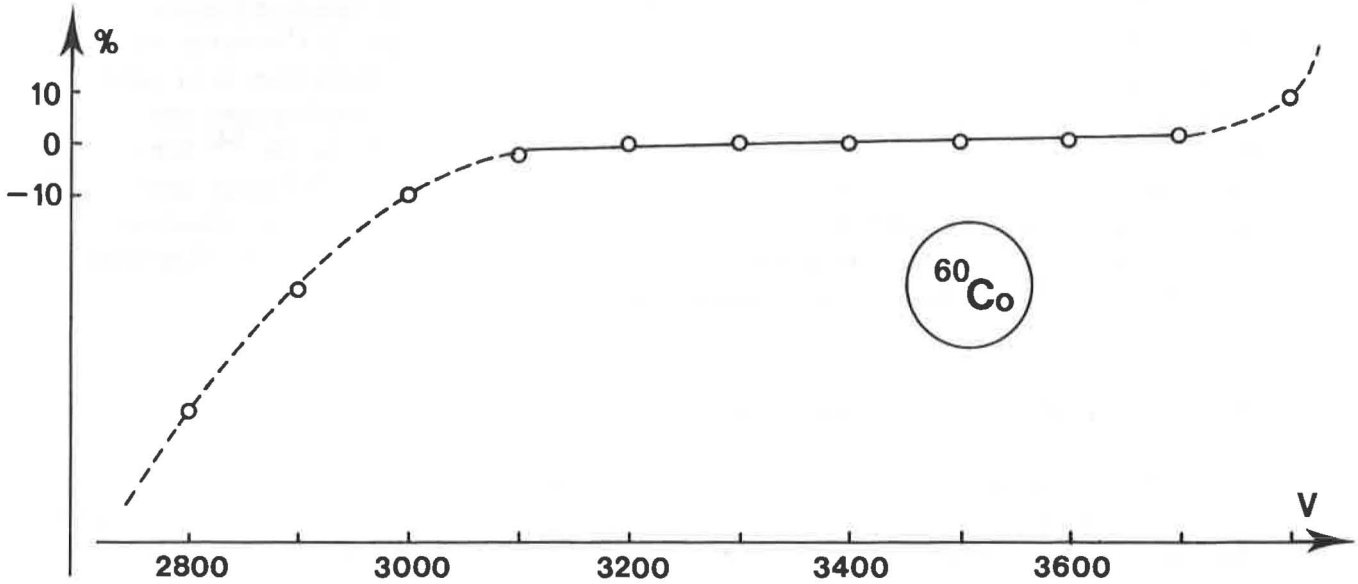
La dernière ligne de chaque série de mesures représente les valeurs moyennes arithmétiques de chaque colonne (par seconde pour les valeurs encadrées), excepté pour la colonne ACT(TO) où il s'agit de la valeur moyenne pondérée (poids $= \dfrac{1}{(SIGMA)^2}$).

L'écart-type sur la moyenne est donné par la formule

$$\sigma_M = \left[\frac{\sum (N_i - \overline{N})^2}{n\,(n-1)} \right]^{1/2},$$

où $\overline{N}$ est la valeur de la moyenne pondérée de la série, N_i la valeur de chacune des mesures et n le nombre de mesures de la série.





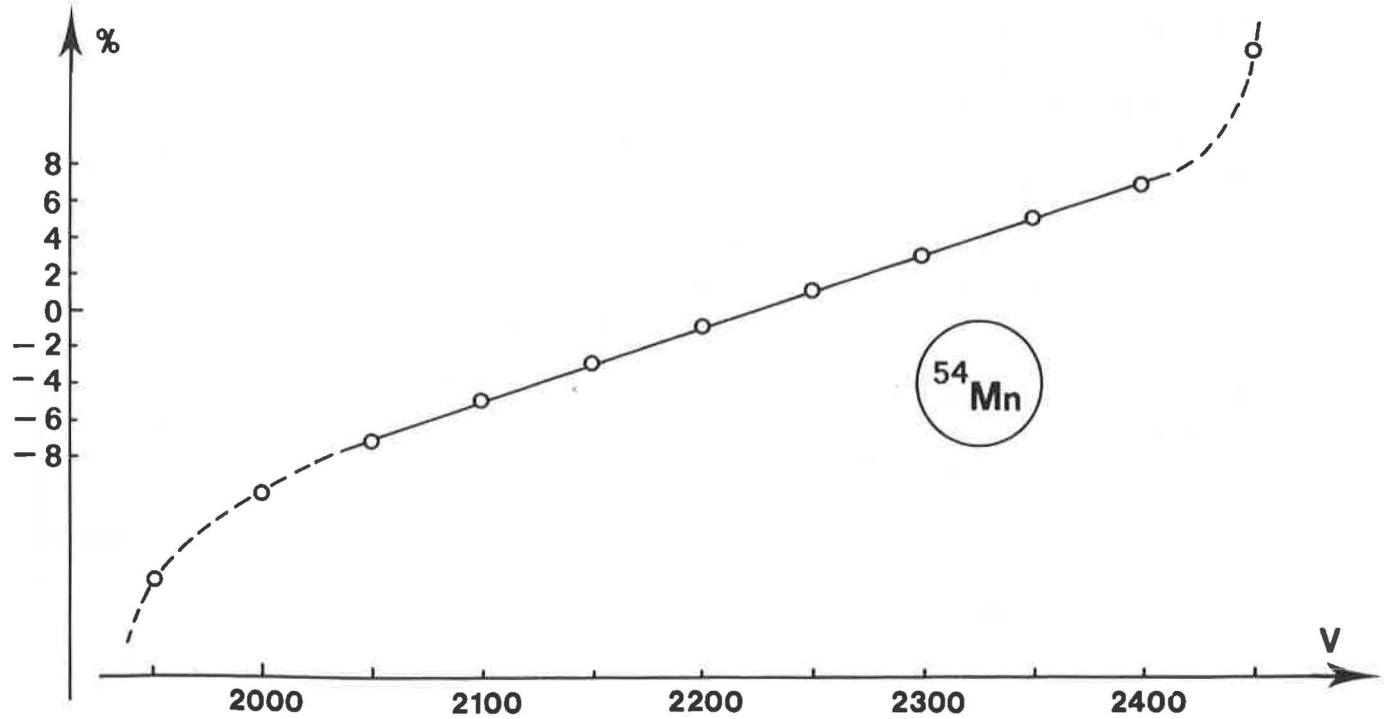


Fig. 23 - Exemples de paliers de comptage. Abscisse: tension anodique du compteur proportionnel. Ordonnée: différence relative du taux de comptage par rapport à la valeur observée au point de travail.

3. Mesure de l'amplification gazeuse du compteur proportionnel

Pour le méthane et pour le mélange argon-méthane, l'amplification gazeuse a été mesurée selon la méthode suivante: on détermine, au moyen d'une source de ^{60}Co, le taux de comptage en fonction du seuil de détection, et cela pour différentes valeurs de la tension appliquée à l'anode. Les résultats sont portés sur un graphique; les points correspondant à une même valeur de tension anodique sont reliés entre eux par une courbe tracée à la main. Or, pour une source donnée, le taux de comptage est une fonction du produit des amplifications électronique et gazeuse. Par conséquent, si un même taux de comptage a été enregistré avec des tensions anodiques différentes, le rapport des amplifications gazeuses est égal à l'inverse du rapport des gains électroniques, donc des seuils de discrimination si le gain électronique n'a pas changé. On poursuit les mesures en appliquant des tensions de plus en plus basses et en utilisant une source forte de ^{241}Am. En admettant que l'amplification gazeuse est voisine de l'unité pour une tension de l'ordre de 300 V, on peut l'exprimer partout en valeur absolue. Les figures 24a et 24b représentent graphiquement les valeurs ainsi obtenues dans le méthane et dans l'argon/méthane.

4. Détermination du seuil de détection du compteur proportionnel

Il est souvent utile de connaître la valeur minimale de l'énergie des électrons détectés par le compteur proportionnel. Ce seuil dépend évidemment des gains électronique et gazeux ainsi que du réglage du discriminateur.

Une source de ^{55}Fe (capture électronique à 100%) se prête particulièrement bien à la détermination du seuil de détection. Elle émet un spectre de rayons X caractéristiques du manganèse et des électrons d'Auger. Ces derniers peuvent facilement être arrêtés par un film mince, métallisé; on observe alors surtout les photoélectrons produits par les photons X_{KL} de 5,9 keV (fig. 25).

On ajuste le gain électronique G et la tension anodique (amplification gazeuse A) pour observer une raie d'électrons d'une énergie E. On substitue à cette raie une raie artificielle obtenue avec un générateur d'impulsions et l'on détermine le réglage minimal D_o du discriminateur qui arrête le comptage de ces impulsions. Le seuil de détection S_x du compteur proportionnel pour un réglage D_x du discriminateur et pour les gains G_x et A_x se calcule alors par

$$S_x = \frac{E\,D_x\,G\,A}{D_o\,G_x\,A_x}\,.$$

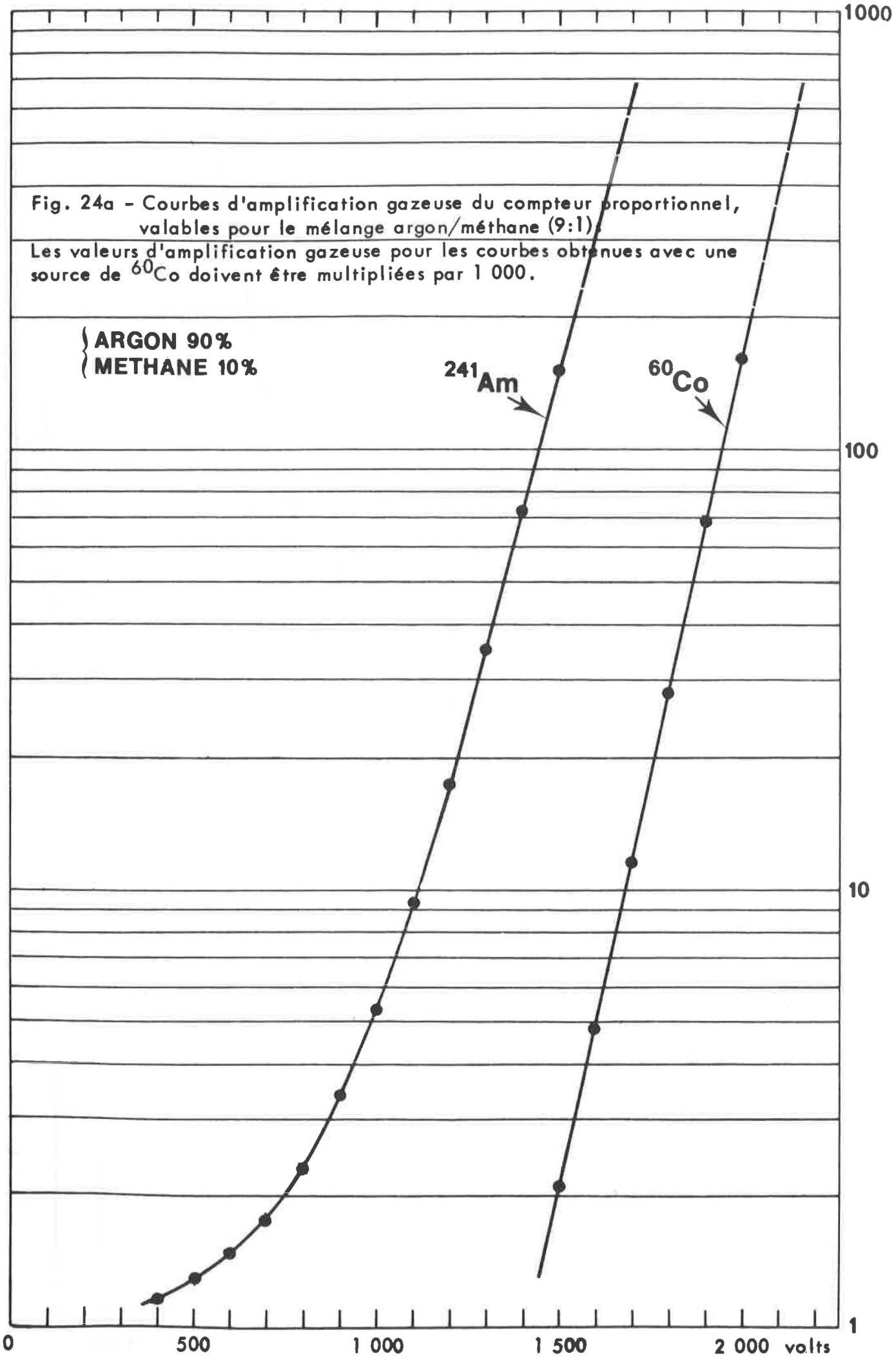


Fig. 24a - Courbes d'amplification gazeuse du compteur proportionnel, valables pour le mélange argon/méthane (9:1).
Les valeurs d'amplification gazeuse pour les courbes obtenues avec une source de ^{60}Co doivent être multipliées par 1 000.

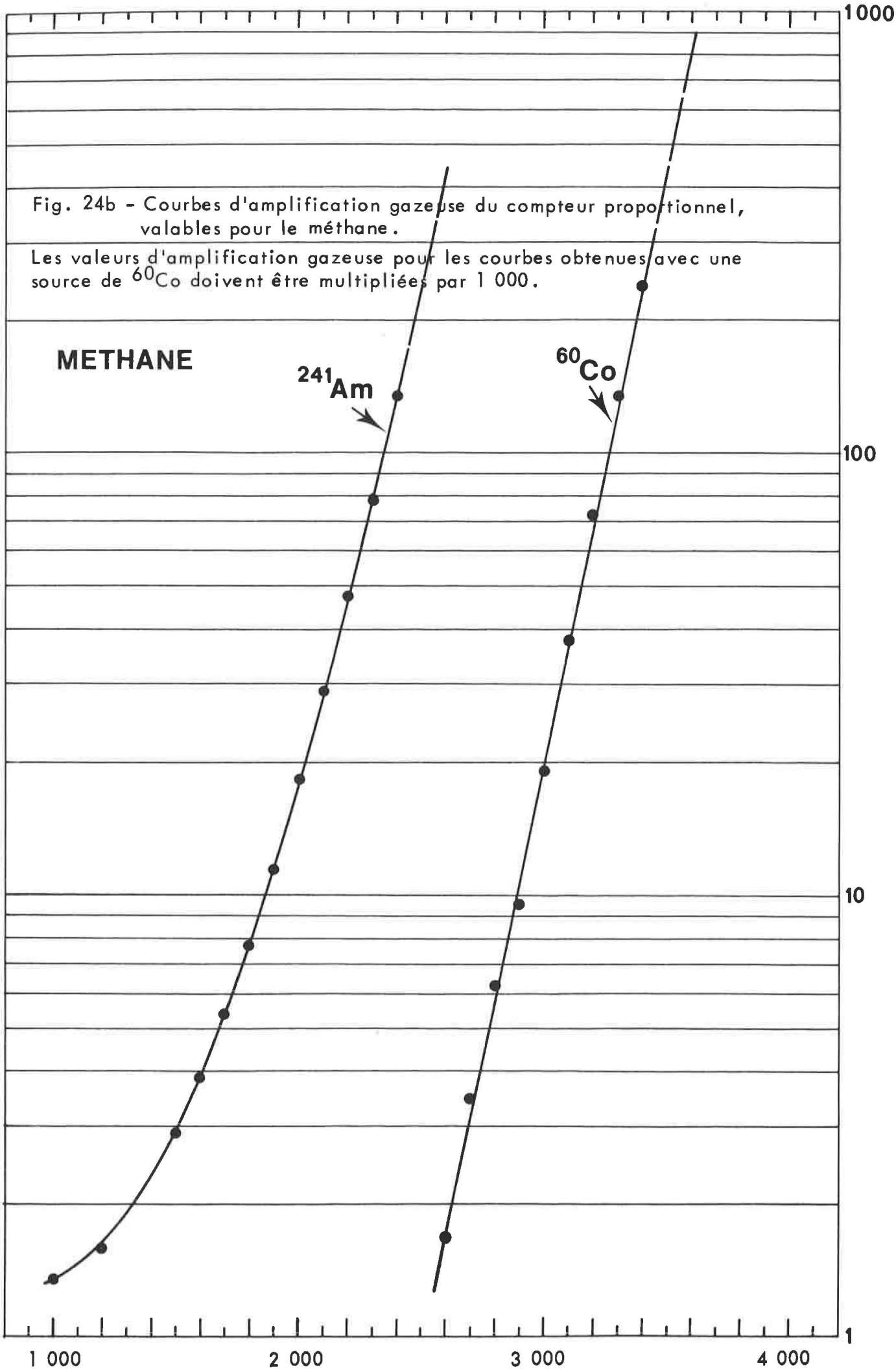


Fig. 24b - Courbes d'amplification gazeuse du compteur proportionnel, valables pour le méthane.

Les valeurs d'amplification gazeuse pour les courbes obtenues avec une source de ^{60}Co doivent être multipliées par 1 000.

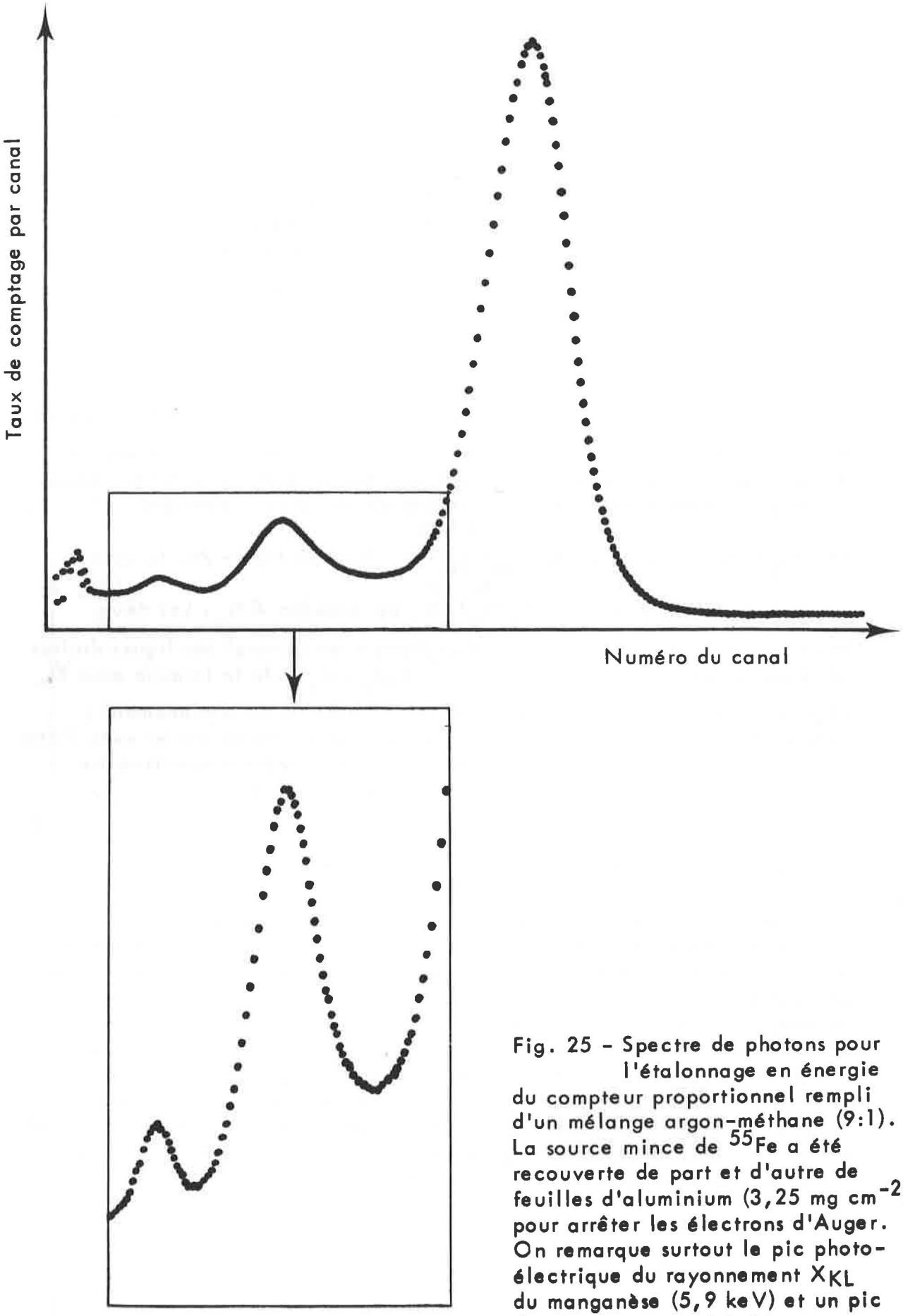


Fig. 25 - Spectre de photons pour l'étalonnage en énergie du compteur proportionnel rempli d'un mélange argon-méthane (9:1). La source mince de ^{55}Fe a été recouverte de part et d'autre de feuilles d'aluminium (3,25 mg cm^{-2}) pour arrêter les électrons d'Auger. On remarque surtout le pic photoélectrique du rayonnement X_{KL} du manganèse (5,9 keV) et un pic d'échappement à 3 keV.

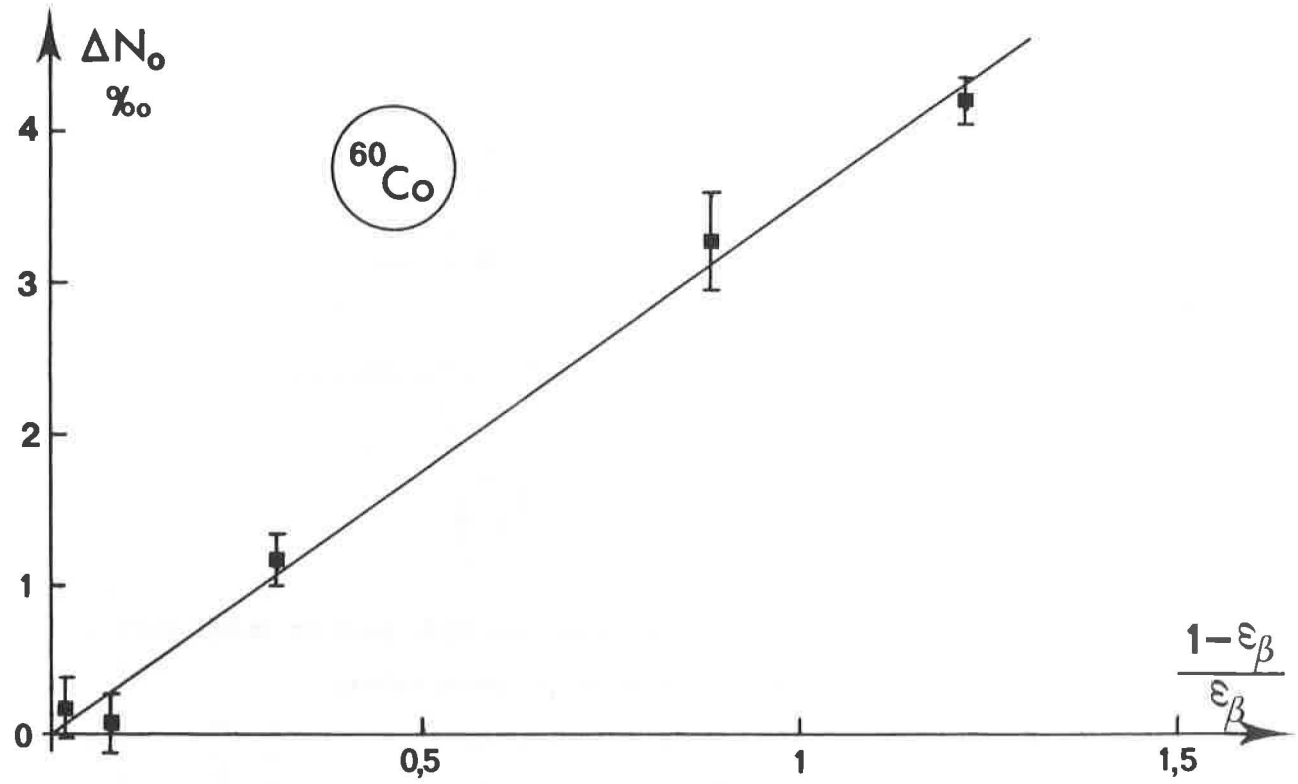
5. La correction K_ε

En général, l'application de la méthode $4\pi\beta$-γ à l'étalonnage d'un émetteur β-γ ne demande pas une connaissance détaillée des paramètres du schéma de désintégration. Il n'est d'ailleurs pas possible d'exprimer l'efficacité des détecteurs par les grandeurs observables de manière rigoureuse. Cependant, quand on fait varier l'efficacité de comptage du canal β, le rapport $(N_\beta N_\gamma)/(N_c N_o)$ - on utilise les symboles de la figure 20 - tend vers l'unité en même temps que N_c/N_γ. La "fonction d'efficacité" $(N_\beta N_\gamma)/N_c$ n'est pas toujours linéaire et dépend aussi des conditions expérimentales (7).

L'expression N_c/N_γ est souvent assimilée à l'efficacité ε_β du canal β, mais elle n'est pas identique à celle-ci. Pour la faire varier, on ajoute des absorbeurs à la source, d'habitude sous forme de films de VYNS dorés. La fonction d'efficacité est alors obtenue en portant par exemple $(N_\beta N_\gamma)/N_c$ en fonction de $\frac{1 - N_c/N_\gamma}{N_c/N_\gamma}$. Dans la figure 26, la valeur relative de la variation de $(N_\beta N_\gamma)/N_c$ est appelée ΔN_o. Les deux exemples représentés (^{60}Co et ^{54}Mn) donnent en général des lignes droites et la pente représente la constante $C\left[(\varepsilon_\beta)_\gamma, \varepsilon_\gamma\right]$ de la formule pour K_ε (fig. 20). Toutefois, il faut noter que plus l'énergie du rayonnement γ considéré est basse, plus la valeur de C est susceptible de varier avec l'état de la source. Il peut en résulter une fonction d'efficacité non-linéaire demandant des procédés d'extrapolation plus compliqués.

6. Influence et suppression d'un retard relatif entre les voies β et γ

Les impulsions aux sorties des voies β et γ qui ont été provoquées par l'enregistrement d'un seul événement β-γ n'arrivent simultanément au sélecteur de coïncidences que lorsqu'on ajuste les retards subis dans l'une et l'autre des voies. A cet effet, on a inséré entre la sortie du dispositif de temps mort de la voie β (fig. 11, borne S) et l'entrée du circuit de coïncidences (fig. 13, borne β) une ligne à retard, variable par bonds de 50 ns. Pour contrôler la simultanéité, on observe l'une des impulsions (fig. 13, "Contrôle") à l'oscilloscope, en déclenchant le balayage par l'autre. Un commutateur permet d'interchanger les sorties. Le retard relatif est nul quand les impulsions apparaissent au même endroit de l'écran de l'oscilloscope quelle que soit la position du commutateur.



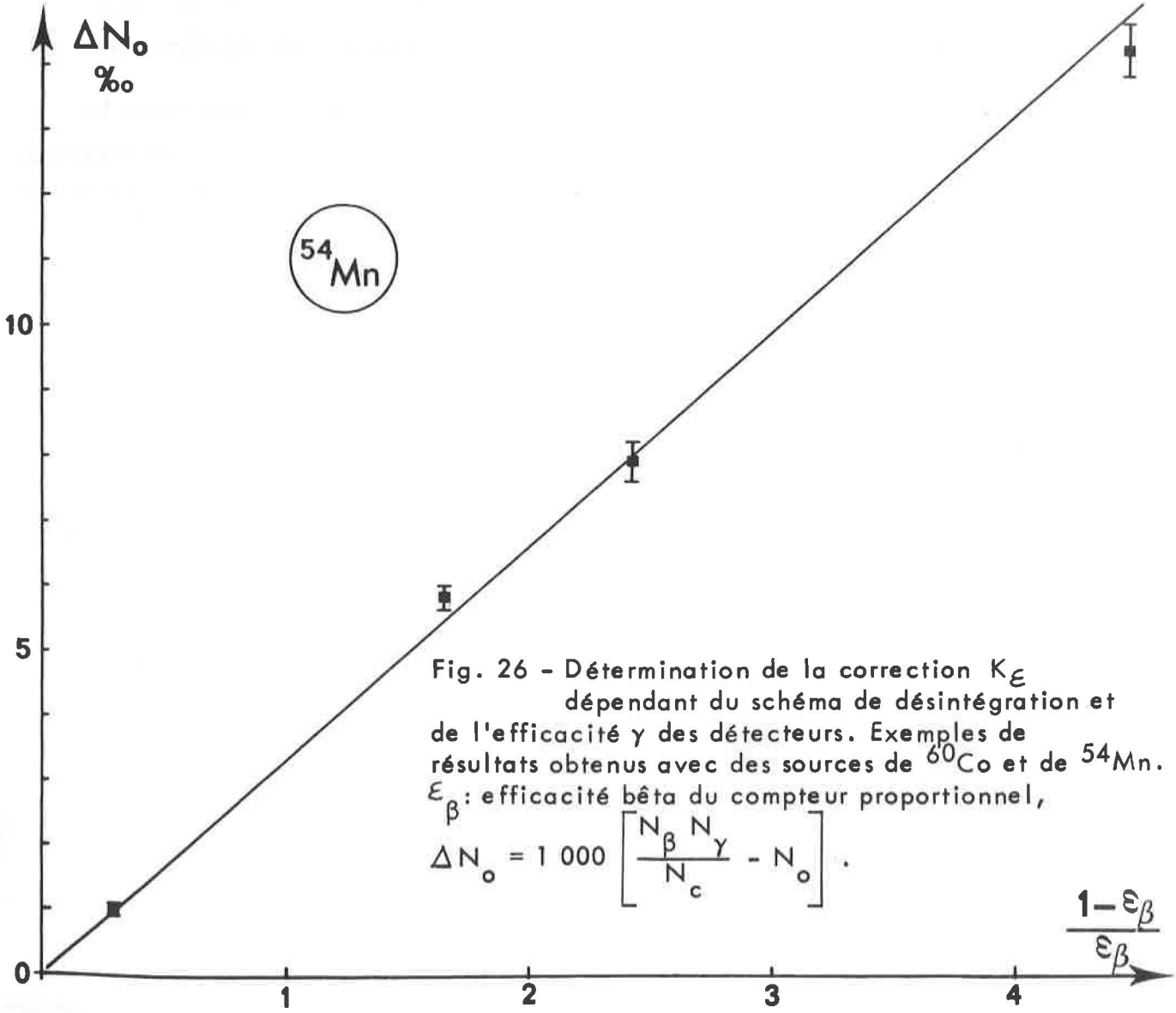


Fig. 26 - Détermination de la correction K_ε dépendant du schéma de désintégration et de l'efficacité γ des détecteurs. Exemples de résultats obtenus avec des sources de ^{60}Co et de ^{54}Mn.
ε_β : efficacité bêta du compteur proportionnel,

$$\Delta N_o = 1\,000 \left[\frac{N_\beta \, N_\gamma}{N_c} - N_o \right].$$

Les formules pour le taux de désintégration N_o (fig. 20) ne sont valables que sans retard relatif entre les voies β et γ. Dans certaines limites, le résultat varie linéairement avec le retard; l'effet est d'autant plus marqué que l'activité de la source est plus élevée. La figure 27 représente quelques résultats obtenus avec plusieurs sources de ^{60}Co, pour différentes valeurs du retard relatif.

L'influence d'un retard δ sur le taux de coïncidences "réelles" C s'exprime, d'après Gandy (4), par

$$C = \frac{N'_c \left[1 + \tau (N_\beta + N_\gamma)\right] - 2\,\tau_r\, N_\beta\, N_\gamma}{1 + \tau N'_c - \tau_r (N_\beta + N_\gamma) + \delta (N_\beta - N_\gamma)} .$$

Ici, N_β et N_γ sont les taux expérimentaux, corrigés pour le temps mort τ qui est supposé de même durée dans les deux voies;

τ_r est le temps de résolution de coïncidences;

N'_c est le taux de coïncidences non corrigé.

Connaissant δ, on peut calculer son influence sur C et donc sur $N_o = \frac{N_\beta N_\gamma}{C}$. Les valeurs calculées sont également représentées dans la figure 27. On constate un accord qualitatif entre les résultats expérimentaux et la formule (approchée) de Gandy. Il faut noter cependant que, les temps morts n'étant pas égaux, la comparaison n'est pas entièrement valable.

7. Validité des corrections dépendant du taux de comptage

Ce contrôle a été effectué en déterminant l'activité massique d'une série de sources de ^{60}Co ayant des activités échelonnées de 2 100 s^{-1} à 34 000 s^{-1}. Ces sources avaient été préparées en pesant des gouttes prélevées d'une même solution. Les résultats sont représentés sur la figure 28. Pour éviter l'effet d'une dérive éventuelle, les mesures suivaient un ordre arbitraire, indiqué par les lettres A à L. La figure montre en outre la moyenne pondérée et son écart-type.

On constate que la dispersion des résultats est inférieure à 0,2%. Les fluctuations ne semblent donc pas avoir une allure systématique. On peut affirmer que les corrections de temps morts sont valables dans toute la gamme d'activité étudiée.

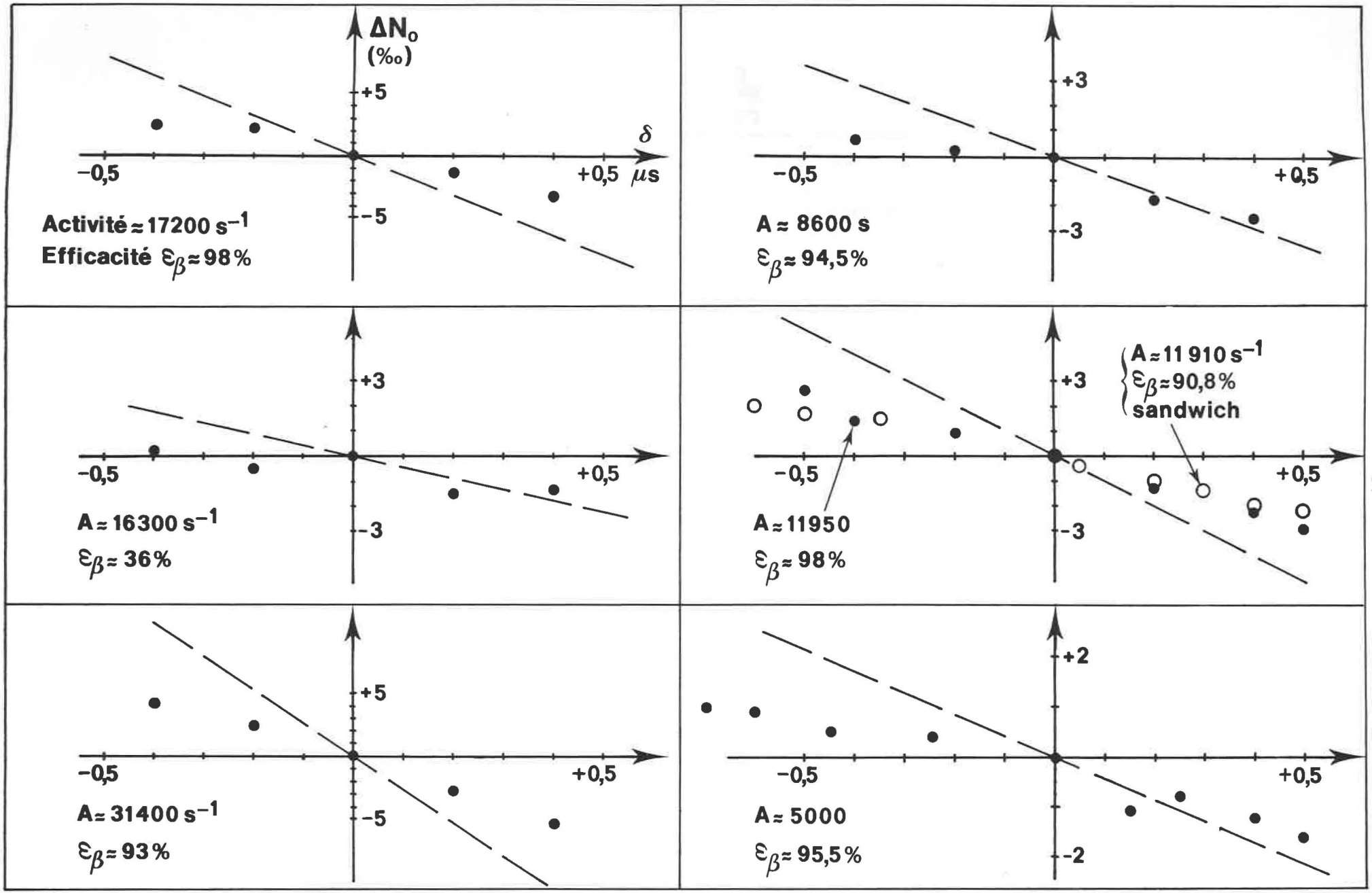


Fig. 27 - Influence du retard relatif δ entre les voies β et γ. Comparaison des résultats expérimentaux (points ou cercles) obtenus avec six sources de ^{60}Co aux résultats calculés (ligne droite en tirets) d'après Gandy (4). Une valeur négative de δ correspond à une avance de l'impulsion β sur l'impulsion γ corrélée. L'ordonnée indique la variation relative du taux de désintégration relatif.

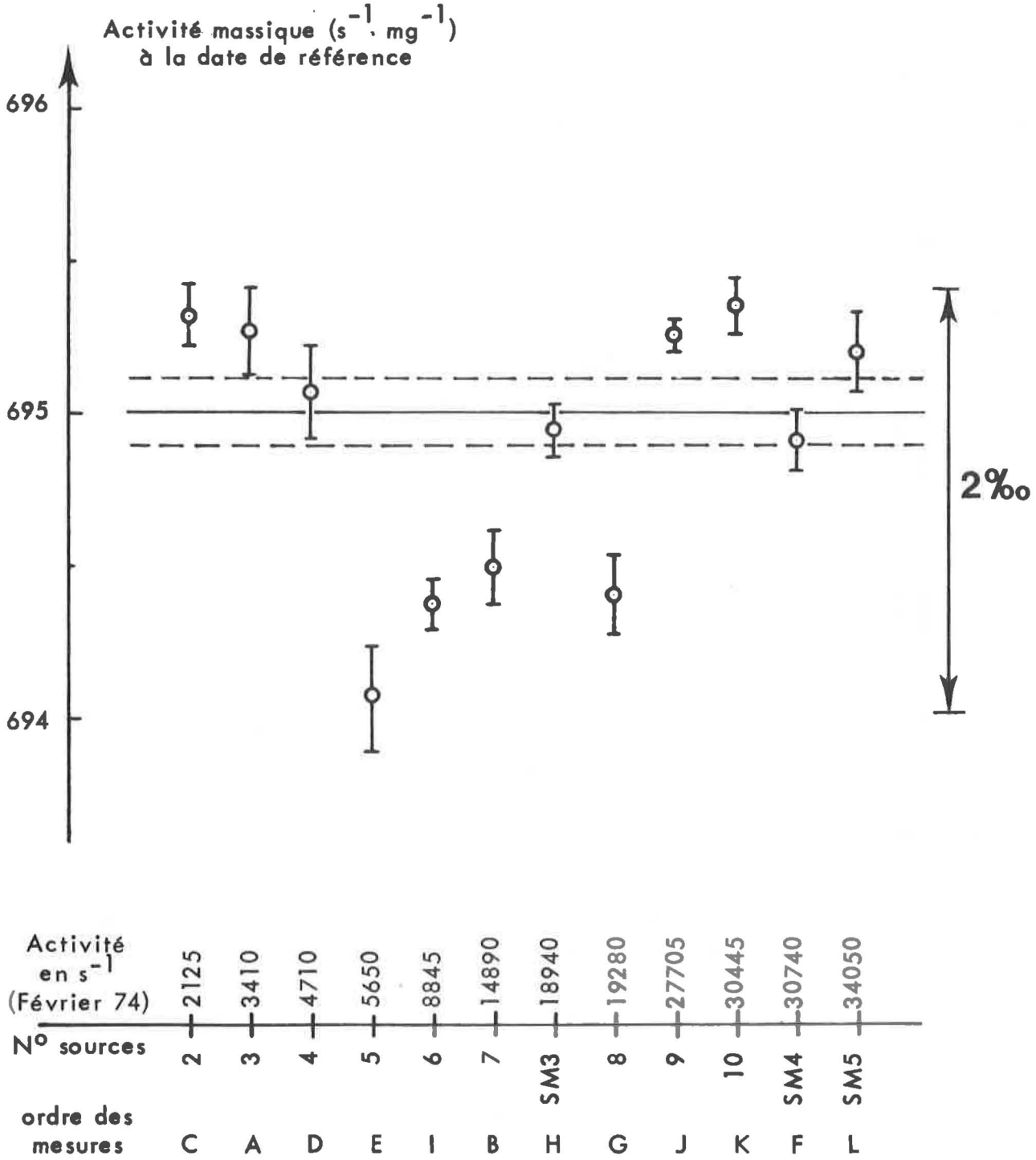


Fig. 28 - Validité des corrections dépendant du taux de comptage.
Douze sources de masses très différentes ont été préparées en pesant des gouttes d'une même solution de ^{60}Co. L'absence d'une dérive systématique indique que les corrections dues au temps mort sont valables dans tout ce domaine d'activité.

8. Fidélité des mesures

Pour contrôler la fidélité de l'ensemble $4\pi\beta$-γ, une source de ^{60}Co a été mesurée 232 fois de suite; chaque mesure durait 1 000 s. Les taux de comptage expérimentaux N'_β, N'_γ, N'_c, ainsi que les taux de désintégration calculés N_o (ces derniers corrigés pour la décroissance), sont représentés dans la figure 29. On a également porté dans ce graphique les écarts-types "internes" des 12 premiers résultats. Pour les taux expérimentaux, il s'agit respectivement des valeurs $\sqrt{N_\beta/t}$, $\sqrt{N_\gamma/t}$ et $\sqrt{N_c/t}$. Pour N_o, l'écart-type interne se calcule (8) d'après la formule

$$s_i = \left[(N_o/t)\,(2\,\varepsilon_\beta\,\varepsilon_\gamma - \varepsilon_\beta - \varepsilon_\gamma + 1)/\varepsilon_\beta\,\varepsilon_\gamma\right]^{1/2},$$

où t est le temps de mesure et ε_β, ε_γ sont les efficacités des détecteurs. Ces écarts-types ne varient guère d'une mesure à l'autre. On a trouvé que les valeurs de s_i sont très voisines de l'écart-type "externe",

$$s_e = \left[\frac{\sum_{j=1}^{n} (N_{oj} - \overline{N}_o)^2}{n-1}\right]^{1/2},$$

où $\overline{N}_o$ est la moyenne arithmétique des N_{oj}. Cela met en évidence que les fluctuations observées sont purement statistiques. La figure 26 montre en outre que les N_{oj} sont répartis très régulièrement autour de $\overline{N}_o$ et que 67% des résultats sont situés entre $\overline{N}_o - s_i$ et $\overline{N}_o + s_i$, en accord avec une distribution normale.

L'ensemble $4\pi\beta$-γ no.3 ayant ainsi fait preuve d'une excellente stabilité pendant 65 heures consécutives, il est permis d'admettre que cet état peut être maintenu pendant des périodes encore beaucoup plus longues.

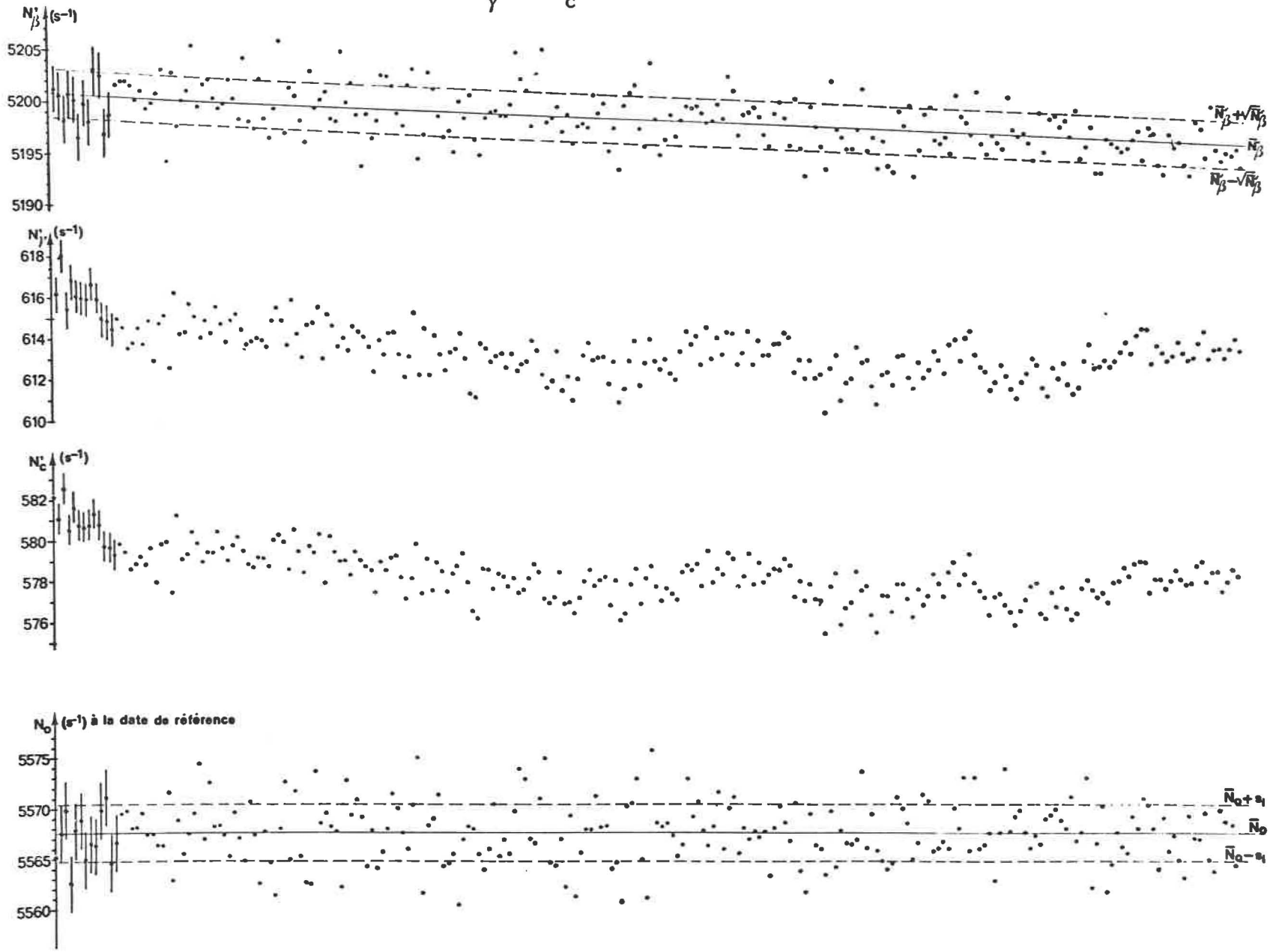



Fig. 29 - Expérience sur la fidélité des mesures. Les 232 valeurs N_o (corrigées pour décroissance) sont réparties normalement. Il faut aussi remarquer la différence d'allure entre N'_β et N'_γ et la ressemblance entre N'_γ et N'_c.