

BRIERE M.

Rapport C.E.A. n° 942

Limite des possibilités de mesure de faibles activités au moyen de chambres d'ionisation.

Sommaire. - Le présent compte rendu, basé sur l'expérience acquise au Service de Biologie dans la mesure de faibles activités de tritium et de carbone-14, est rédigé à l'intention des personnes ayant à effectuer des mesures de très faibles activités au moyen de chambres d'ionisation.

Il donne des précisions sur le comportement et les performances réelles des électromètres à condensateur vibrant, basées sur environ deux ans d'utilisation, et démontre que les possibilités de mesure ne sont pas limitées - comme on le croit généralement - par l'insuffisance de sensibilité et de stabilité de l'appareillage électronique, mais par l'existence de divers phénomènes parasites dont la chambre d'ionisation est le siège et qui rendent très difficiles la mesure de courants d'ionisation inférieurs à 10^{-14} A.

1958

25 pages

BRIERE M.

Rapport C.E.A. n° 942

Limit to the measurement of feeble activities using ionization chambers.

Summary. - The present account based on experience acquired in the Biology Service, in measuring feeble activities of tritium and carbon-14 has been prepared for the benefit of those who have to carry out measurements of feeble activities using ionization chambers.

Precisions are given on the behaviour and actual performance of vibrating condenser electrometers, based on approximately two years operating experience. It is shown that the possibilities of utilisation are not limited as is generally believed by insufficient sensitivity and stability of the electronic equipment, but by the existence of various parasitic phenomena coming from the ionization chamber itself, which make very difficult the measurement of ionization currents which are less than 10^{-14} A.

1958

25 pages

PRÉSIDENCE DU CONSEIL
COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

**LIMITE DES POSSIBILITES DE MESURE
DE FAIBLES ACTIVITES AU MOYEN
DE CHAMBRES D'IONISATION**

par

M. BRIERE

Rapport CEA No 942

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

- Rapport C.E.A. n° 942 -

Service de Biologie

LIMITE DES POSSIBILITES DE MESURE DE FAIBLES ACTIVITES
AU MOYEN DE CHAMBRES D'IONISATION

par

M. BRIERE

R. 58-2727/80

- 1958 -

**LIMITE DES POSSIBILITES DE MESURE DE FAIBLES ACTIVITES
AU MOYEN DE CHAMBRES D'IONISATION**

- PERFORMANCES DE L'ELECTROMETRE A CONDENSATEUR VIBRANT.

L'appareil utilisé est de construction C.E.A. et conforme à la description faite dans l'article publié à ce sujet dans le "Journal de Physique" [1].

J'ai effectué des essais en vue de comparer ses performances à celles du condensateur vibrant américain de l'"Applied Physics Co".

En voici les résultats :

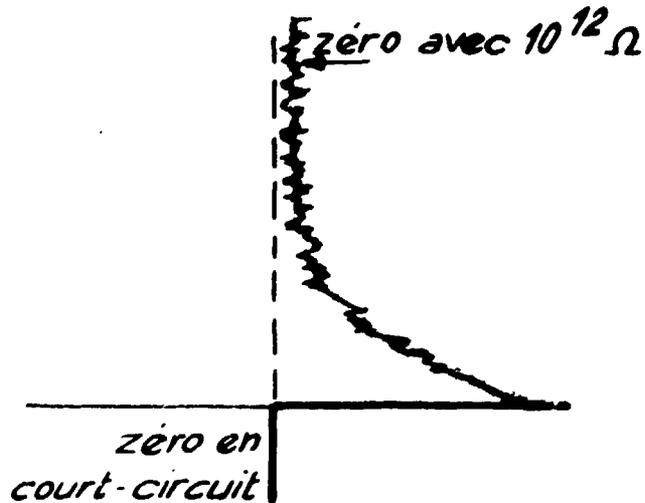
a) Comportement avec bornes d'entrée en court-circuit.

	Condensateur vibrant C.E.A.	Condensateur vibrant américain
Différence de potentiel de contact résiduelle ..	2 mV	5 mV
Dérive	< 0,5 mV en 24 h	< 0,5 mV en 24 h
Fluctuations	< 50 μ V (avec constante de temps minimum)	< 50 μ V
Temps de réponse	1 s (avec constante de temps minimum)	Pratiquement instantané

b) Comportement avec résistance d'entrée de $10^{12} \Omega$.

Les bornes d'entrée étant préalablement court-circuitées pour faire le zéro, au moment où on lâche celui-ci on observe une violente déviation de l'appareil de mesure dans un sens positif ou négatif ; puis cette indication se réduit peu à peu et retourne de façon exponentielle à une valeur différent de 0,2 à 0,3 mV du zéro obtenu en court-circuit.

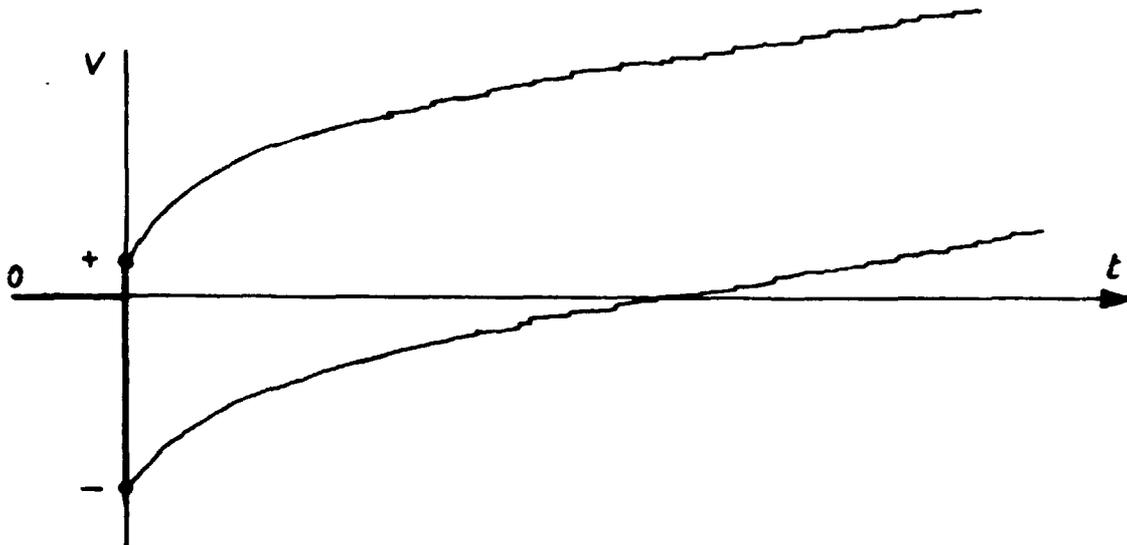
Cet effet se produit de façon identique dans les deux types d'appareils.



	Condensateur vibrant C.E.A.	Condensateur vibrant américain
Amplitude fluctuations	de 0,5 mV à 0,1 mV (selon constante de temps utilisée)	0,3 mV
Temps de réponse	de 5 à 30 s (selon constante de temps utilisée)	10 s

c) Comportement sans résistance d'entrée.

Les bornes d'entrée étant préalablement court-circuitées pour faire le zéro, au moment où on lâche celui-ci l'indication de l'appareil de mesure saute brusquement à une valeur positive ou négative quelconque, puis à partir de cette valeur se met à évoluer dans un sens, toujours le même (positif par exemple), avec une vitesse qui tend à devenir constante, cette variation se faisant de façon discontinue, en "marches d'escalier".



Cet effet se produit de façon identique dans les deux types d'appareils.

	Condensateur vibrant C.E.A.	Condensateur vibrant américain
Régime de montée de la tension à vide	0,3 à 0,7 mV/mn	0,2 à 0,4 mV/mn
Courant résiduel parasite propre correspondant	0,6 à 1,5 x 10 ⁻¹⁶ A	4 à 8 x 10 ⁻¹⁷ A

Pendant assez longtemps il sembla que le condensateur vibrant du C.E.A. avait un courant parasite résiduel beaucoup plus important que le condensateur vibrant américain, des taux de montée de la tension à vide allant jusqu'à 2 et même parfois 3 mV/mn étant observés. Mais la cause de cette valeur anormalement élevée fut trouvée être le rayonnement ambiant relativement intense du laboratoire dans lequel l'appareil était utilisé (la mesure de ce rayonnement faite au moyen d'un compteur à scintillations ayant donné parfois jusqu'à 50 000 coups/mn). Le condensateur vibrant fut alors muni d'un blindage de plomb et aussitôt son régime de montée à vide devint tout à fait comparable à celui du condensateur vibrant américain. De ceci il faut retenir que les rayonnements parasites ambiants peuvent créer directement dans le condensateur vibrant lui-même des courants d'ionisation de quelques 10⁻¹⁶ A.

Les performances du condensateur vibrant de fabrication C.E.A. sont donc tout à fait comparables à celles du condensateur vibrant américain.

Au point de vue sécurité de fonctionnement, il suffira de dire que cet appareil mis en service en septembre 1955 n'est pratiquement jamais tombé en panne.

Il faut dire que maintes fois le condensateur vibrant fut suspecté d'être la cause d'ennuis plus ou moins sérieux, mais à chaque fois la véritable cause de ceux-ci fut trouvée être étrangère à l'appareil.

La vérité est qu'étant donné sa qualité d'électromètre ultra-sensible, l'appareil décèle nombre de phénomènes insolites qui passent inaperçus avec d'autres appareils tels que les amplificateurs ordinaires à courant continu. Les anomalies que l'on peut observer ne sont donc pas des défauts propres à l'appareil, mais la manifestation de perturbations naturelles dont on ne fait que découvrir l'existence.

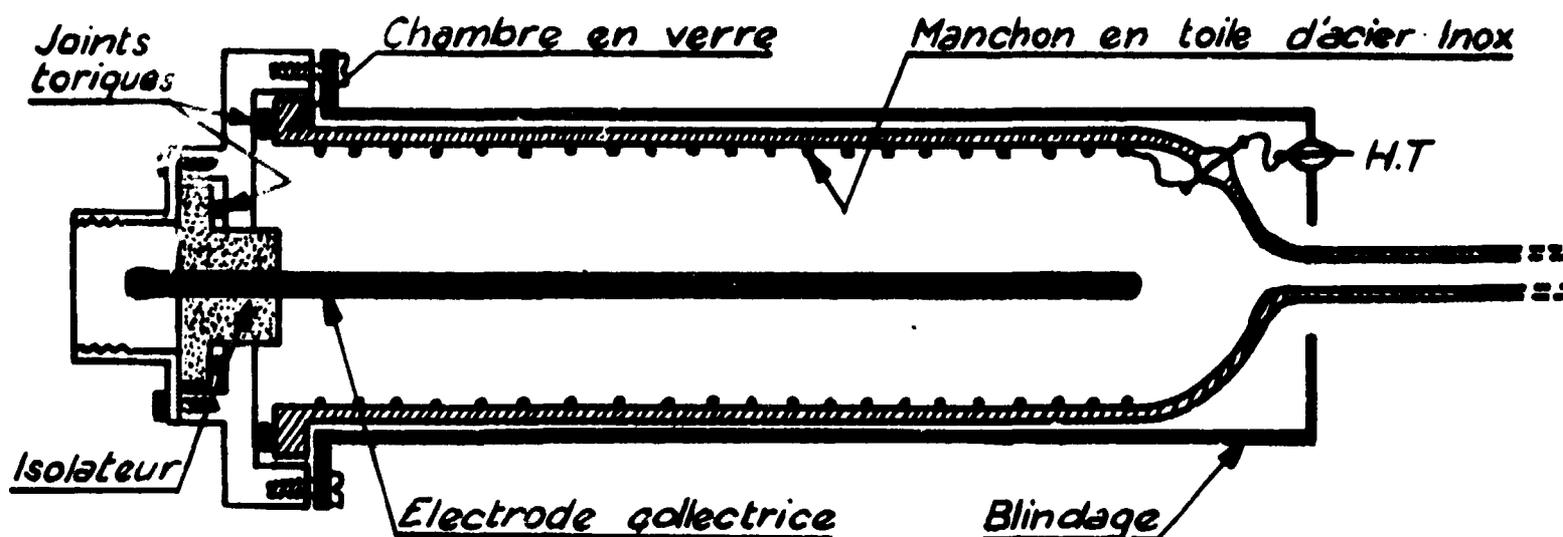
L'objet principal de ce rapport est précisément d'attirer l'attention des personnes intéressées sur la nature et la manifestation de ces divers phénomènes.

II - RESULTATS OBTENUS AVEC CHAMBRE D'IONISATION UNIQUE ET AMPLI A COURANT CONTINU.

Le Service de Biologie utilisait jusqu'ici pour les mesures de tritium une chambre d'ionisation unique de 1 litre associée à un ampli à courant continu. Je fus sollicité de monter un second système analogue, mais avec un électromètre à condensateur vibrant pour tenter de gagner un facteur 10 en sensibilité.

Je procédai donc au montage de cette installation et, pour l'occasion, je fis construire une chambre d'ionisation démontable afin de pouvoir procéder facilement à son nettoyage lorsque celle-ci se trouvait souillée -- comme cela arrivait fréquemment -- par des projections de mercure ou des émanations de vapeurs graisseuses.

Le modèle réalisé est représenté ci-après :



Je fis usage de chambres en verre pour des raisons de commodité : facilité de raccord avec les canalisations d'un banc à vide, et facilité d'isolement de l'anode. Je me demandai toutefois s'il n'aurait pas mieux valu les constituer entièrement en inox pour éviter d'une part les risques de charge électrostatique des parois et, d'autre part, les risques de radioactivité parasite du verre. Nous verrons plus loin qu'en fait le comportement de ces chambres s'est avéré excellent.

La technique adoptée au Service de Biologie [5] pour les mesures de tritium est la suivante : le gaz de remplissage de la chambre est de l'hydrogène obtenu par réaction sur du calcium de l'eau dont il s'agit de mesurer la teneur en tritium.

Le réglage du zéro de l'ampli continu ou du condensateur vibrant est d'abord effectué en mettant la chambre sous vide et en s'abstenant de court-

circuiter la résistance d'entrée de l'appareil. Cette façon de procéder évite les erreurs dues à l'écart existant toujours entre le zéro en court-circuit et le zéro avec forte résistance d'entrée, et évite d'autre part à l'appareillage électronique les perturbations dues à un brutal court-circuit.

La chambre est ensuite remplie de gaz à la pression atmosphérique.

Un bon moment d'attente (de l'ordre de 10 à 20 minutes) est nécessaire pour que les perturbations consécutives au remplissage de la chambre se soient apaisées et que l'indication de l'appareil de mesure soit devenue suffisamment stable.

Dans les conditions actuelles de préparation des échantillons le courant d'ionisation recueilli est d'environ $5 \cdot 10^{-13}$ A par $\mu\text{C}/\text{cm}^3$ d'eau.¹⁾

Dans le cas d'un ampli continu équipé d'une résistance d'entrée de $10^{12} \Omega$, on peut ainsi mesurer une activité spécifique de $0,01 \mu\text{C}/\text{cm}^3$ laquelle donne $5 \cdot 10^{-15}$ A $\times 10^{12} \Omega = 5$ mV.

Etant donné la dérive de l'ampli et les fluctuations, et déduction faite du mouvement propre moyen de la chambre (mesuré préalablement une fois pour toutes à pression atmosphérique d'hydrogène ordinaire non actif), on peut estimer que la mesure est effectuée avec une précision d'environ 20 à 30 pour cent.

III - RESULTATS OBTENUS AVEC ELECTROMETRE A CONDENSATEUR VIBRANT.

Etant donné que la stabilité d'un électromètre à condensateur vibrant est environ 10 fois supérieure à celle du meilleur amplificateur à courant continu, le recours à un tel appareil souleva l'espoir de pouvoir arriver à mesurer facilement des activités 10 fois plus faibles, c'est-à-dire de l'ordre de $0,001 \mu\text{C}/\text{cm}^3$.

En fait, on s'aperçut que l'utilisation d'un condensateur vibrant n'apportait guère d'amélioration : au lieu d'occuper 1 division de l'échelle, les fluctuations et incertitudes diverses en occupaient 10 avec une sensibilité dix fois plus grande et l'on n'était guère plus avancé.

Note¹⁾ - L'activité spécifique dont il est question est l'activité par cm^3 d'eau prélevée dans les tissus vivants.

La préparation des échantillons est telle que 1 cm^3 d'eau tritiée fournit environ 600 cm^3 d'hydrogène et que seulement la moitié du tritium passe à l'état gazeux.

En fin de compte, on retrouve approximativement dans 1 litre de gaz à la P.A. la même activité que dans 1 cm^3 d'eau.

L'activité totale présente dans la chambre d'ionisation se trouve donc pratiquement exprimée par le même chiffre que l'activité spécifique de l'échantillon.

Le comportement du condensateur vibrant, sur sensibilité 10 mV, avec une résistance d'entrée de $10^{12} \Omega$ et associé à une chambre d'ionisation de 1 litre est le suivant : la chambre d'ionisation étant sous vide et la constante de temps de réponse de l'ampli du condensateur vibrant environ 20 secondes, les fluctuations occupent une plage d'environ 0,2 mV ; après une période de stabilisation initiale d'environ une heure, la stabilité de l'enregistrement est remarquable : l'indication se maintient pendant des heures entre des limites ne s'écartant pas de $\pm 0,1$ mV de la valeur initiale.

Si la chambre est remplie d'hydrogène ordinaire non actif à la pression atmosphérique, l'indication moyenne s'écarte d'environ 0,6 à 0,7 mV de la valeur sous vide, et s'accompagne de fluctuations importantes occupant une plage d'environ 1 mV de largeur. La stabilité est en même temps très détériorée, de sorte qu'il devient difficile de déterminer la valeur moyenne de l'indication. Il y a des jours où cela va très mal et où les variations sont telles qu'aucune mesure n'est possible.

Si l'on remet la chambre sous vide, on voit l'enregistrement reprendre sa régularité caractéristique et les fluctuations redevenir insignifiantes.

Si l'on débranche la chambre et que l'on poursuit l'enregistrement avec le condensateur vibrant tout seul, on retrouve pratiquement la même indication et le même comportement qu'avec la chambre sous vide.

De ces constatations résultent deux conclusions indiscutables :

1° Les fluctuations et instabilités importantes susceptibles de compromettre sérieusement les possibilités de mesure ont leur siège exclusivement dans la chambre d'ionisation, lorsque celle-ci contient un gaz quelconque à une pression notable. L'appareillage électronique est donc hors de cause.

2° La même chambre sous vide n'est le siège d'aucun phénomène parasite notable, ce qui permet de dissiper les doutes que l'on pouvait avoir sur la valeur des chambres d'ionisation en verre.

IV - CAUSE D'INSTABILITE D'ORIGINE ELECTRIQUE.

Il peut toutefois arriver que, même avec la chambre sous vide, des variations insolites des indications soient observées. La première idée qui vient à l'esprit est de suspecter le condensateur vibrant d'avoir dérivé ; or, si dans quelques cas on peut effectivement observer, en court-circuitant les bornes d'entrée, que le zéro a dérivé, la plupart du temps il n'en est rien et l'on constate que la dérive est due à l'apparition d'une tension continue parasite qui

n'existe qu'avec une résistance de haute valeur aux bornes d'entrée et seulement lorsque la haute tension est appliquée à la chambre. Il ne peut s'agir d'un courant d'ionisation quelconque, puisque la chambre est sous vide ; il ne peut pas non plus s'agir d'un courant de fuite quelconque dans la chambre, puisque la tension parasite observée peut être négative alors que la tension appliquée à la chambre est positive ; il ne peut pas enfin s'agir d'un retour de courant grille de la lampe d'entrée, puisque la tension parasite disparaît avec la suppression de la haute tension sur la chambre. Aussi, maintes fois je suspectai les résistances de haute valeur d'être le siège de tension de polarisation ; mais le phénomène persistant malgré le changement de ces résistances, la cause devait en être cherchée ailleurs. L'observation fortuite du fait que le phénomène pouvait cesser et même changer de sens avec le remplacement de la batterie de haute tension me fit trouver l'explication du phénomène : la tension collectrice appliquée à la chambre et fournie par des piles se met parfois à varier lentement (par suite de variations de température et peut-être de la pression atmosphérique), et à travers la capacité électrique de la chambre il en résulte un courant de déplacement : $i = C.dE/dt$, d'où l'apparition d'une tension parasite aux bornes de la résistance d'entrée. Si $C = 10 \text{ pF}$, $R = 10^{12} \Omega$, le calcul révèle qu'une variation régulière de ± 1 volt à l'heure de la tension appliquée à la chambre produira aux bornes d'entrée de l'appareillage de mesure une tension continue parasite d'environ $\pm 3 \text{ mV}$.

Une autre cause de déplacement des indications réside dans l'introduction à l'entrée du condensateur vibrant par l'intermédiaire de la capacité de la chambre de 50 p/s parasite collecté par le circuit des piles de haute tension. Pour éviter ce phénomène, l'utilisation de piles à faible résistance interne, le blindage de celles-ci, et éventuellement l'interposition de cellules de filtrage entre piles et chambre est à recommander.

Enfin, on peut se trouver occasionnellement en présence de fluctuations d'énorme amplitude, pouvant couvrir toute l'étendue de l'échelle 10 mV, celles-ci étant dues simplement au mauvais état des piles de haute tension. Leur remplacement par des piles neuves amène la cessation immédiate des fluctuations.

De toutes ces considérations, une conclusion s'impose : c'est que pour ne pas constituer une source de perturbations rendant toute mesure impossible, la tension collectrice appliquée à la chambre doit avoir une très haute stabilité, tant au point de vue absence de fluctuations qu'au point de vue absence de dérive. Ainsi pour pouvoir effectuer la mesure de courants d'ionisation de l'ordre de 10^{-15} A , la source de tension continue doit offrir les garanties suivantes :

- fluctuations $< 1 \text{ mV}$
- dérive $< 2 \text{ à } 3 \text{ mV/mn}$

De telles exigences ne peuvent pratiquement être satisfaites que par des batteries de piles, d'assez forte capacité (c'est-à-dire à faible résistance interne) et de fabrication récente. Les piles à éléments plats, dans lesquelles la liaison entre éléments est assurée par simple contact sont à proscrire, étant le siège de fluctuations importantes et d'une véritable "microphonie". Les petites batteries pour prothèse auditive sont particulièrement mauvaises à ce point de vue. Les alimentations stabilisées obtenues à partir du secteur sont le siège de fluctuations prohibitives et peuvent être sujettes à de petites dérives, limitées et momentanées, mais dépassant toutefois largement le maximum admissible. L'interposition de cellules de filtrage entre piles et chambres peut atténuer dans une certaine mesure les fluctuations de la source ; toutefois, celles-ci consistant en brusques variations se produisant à intervalles de temps assez longs et irréguliers, il ne faut pas espérer pouvoir les atténuer complètement au moyen de filtres, aussi est-il indispensable d'utiliser des sources aussi stables que possible.

Un autre genre de phénomènes parasites, dont il sera d'ailleurs reparlé plus loin, réside dans les effets de polarisation diélectrique dont les isolateurs sont le siège. Toute contrainte électrique ou mécanique infligée à ceux-ci a pour conséquence l'apparition temporaire de tensions électriques de polarisation considérablement plus élevées que les tensions à mesurer, le retour à la neutralité des isolateurs pouvant exiger l'attente d'une période de stabilisation d'énorme durée, hors de proportion avec les constantes de temps électriques en jeu. C'est ainsi que si l'on se trouve obligé d'effectuer une vérification de l'isolement de l'appareillage, le fait d'appliquer aux isolateurs une tension élevée par la pile du mégohmètre crée une polarisation du diélectrique telle que toute mesure est rendue généralement impossible avant un temps de repos de l'appareillage pouvant dépasser une journée. Il en est de même si l'on applique ou si l'on supprime brusquement sans précautions la haute tension sur la chambre d'ionisation : les isolateurs se trouvent soumis à de violentes impulsions électriques ; aussi est-il nécessaire de toujours prendre soin de court-circuiter les bornes d'entrée du condensateur vibrant (ou de l'ampli continu) avant de brancher ou de débrancher la haute tension de la chambre.

De même, tout choc mécanique subi par les isolateurs est suivi de perturbations électriques. C'est ainsi que l'expérience nous a incités à éviter de nous servir du relais de court-circuit des bornes d'entrée pour faire le zéro, le choc mécanique assez brutal du relais provoquant des perturbations importantes, lesquelles ne peuvent être prises pour un simple effet microphonique attendu que les perturbations engendrées exigent pour se dissiper un temps de stabilisation assez long. Malgré cela, il existe une cause de contrainte mécanique des isolateurs que nous ne pouvons supprimer : c'est celle à laquelle ils se trouvent soumis du fait de la pression atmosphérique lors des évacuations et des remplissages successifs de la chambre d'ionisation. Les perturbations dues aux chocs

mécaniques se trouvent heureusement beaucoup moins importantes que celles dues aux chocs électriques.

Dans le cadre des perturbations imputables aux matériaux isolants, il faut également citer l'effet important dû à l'électrisation de ceux-ci par des causes diverses, en particulier par les frottements gazeux. La présence de charges parasites sur les isolants crée dans l'espace environnant un champ électrique intense qui peut varier dans le temps selon le régime d'accumulation ou de dissipation de ces charges. Il en résulte par influence électrostatique des tensions parasites correspondantes sur les électrodes. Cet effet est particulièrement susceptible de se produire avec des chambres d'ionisation en verre, mais on peut facilement y remédier par le blindage des isolateurs et des parois. Certains auteurs [3] ont même préconisé d'interposer des filtres dans les canalisations de remplissage des chambres d'ionisation pour éviter l'apport de charges parasites.

Enfin, il nous est arrivé d'observer des fluctuations intempestives persistant malgré l'élimination de toutes les causes de perturbations précitées, et qui ne cessèrent qu'après l'élimination de quelques traces de mercure qui s'étaient introduites dans la chambre. Cette cause de perturbation est assez difficilement explicable, attendu que le mercure se trouvait contre des parties métalliques reliées à la masse et que les perturbations se manifestaient aussi bien avec la chambre sous vide qu'à la pression atmosphérique. Je n'ai pas d'explication formelle à fournir du phénomène et me bornerai à signaler le fait. Un article paru dans "Nature G.B." [8] signale un phénomène d'émission électronique par de faibles traces de mercure qui pourrait avoir quelque rapport avec le phénomène cité.

V - LIMITE DES POSSIBILITES DE MESURE.

A part ces ennuis couramment rencontrés, mais étrangers à l'appareillage électronique utilisé, les performances atteintes avec un électromètre à condensateur vibrant équipé d'une résistance d'entrée de $10^{12} \Omega$ et d'une chambre d'ionisation de 1 litre semblent se limiter à la possibilité de mesurer une activité spécifique de $0,01 \mu\text{C}/\text{cm}^3$ avec une précision de 5 à 10 pour cent, ce qui représente seulement un facteur 3 de gagné par rapport à ce qu'on obtenait avec un ampli continu.

La raison pour laquelle on n'obtient pas une amélioration plus importante des possibilités de mesure réside dans l'arrivée à la limite du domaine des perturbations naturelles et parasites de toute sorte. Pour donner une idée du domaine dans lequel on se trouve amené à faire des mesures, disons que le courant d'ionisation obtenu à partir d'une activité spécifique de $0,001 \mu\text{C}/\text{cm}^3$ de tritium

est de 4 à $5 \cdot 10^{-16}$ A, alors que le rayonnement cosmique produit à lui seul un courant d'ionisation moyen d'environ 6 à $7 \cdot 10^{-16}$ A et fluctuant considérablement. Remarquons tout de suite en passant que de tels courants sont inférieurs au courant grille résiduel des meilleures lampes électromètres.

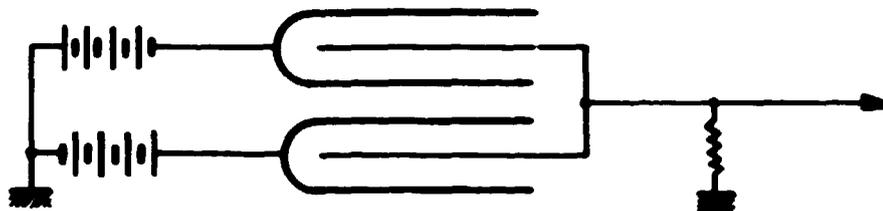
La possibilité de mesure du courant d'ionisation repose donc essentiellement sur la précision avec laquelle on pourra évaluer la valeur moyenne du mouvement propre fluctuant de la chambre. Or, étant donné l'importance des fluctuations statistiques de celui-ci, cette détermination demande au moins une bonne demi heure d'observation, pour une approximation ne dépassant pas 20 à 30 pour cent.

A cela s'ajoute l'effet des rayonnements ambiants parasites et des variations imprévisibles de leur intensité, dues par exemple à des manipulations de produits radioactifs dans des laboratoires plus ou moins voisins. A titre d'indication et pour donner une idée de l'ordre de grandeur de cet effet, disons qu'une source de quelques curies, enfermée dans un château de plomb à deux étages au dessous, et malgré l'interposition supplémentaire par conséquent de deux planchers en béton, doit produire un rayonnement ambiant de l'ordre de 10^{-5} roentgen/heure, c'est-à-dire créer dans la chambre un courant d'ionisation supérieur à ce que donne l'activité du tritium. Que quelqu'un vienne à sortir la source de son château de plomb, et le rayonnement pourra augmenter d'un facteur 10.

Il en résulte que dans ces conditions, il ne peut être question de "mesurer" une activité de 0,001 μC /de tritium, les meilleures performances réalisables se bornant à décélérer seulement une activité de cet ordre, et de nombreuses mesures étant ratées par suite de variations particulièrement irrégulières rendant toute mesure impossible.

VI - UTILISATION DE DEUX CHAMBRES EN MONTAGE DIFFERENTIEL.

La cause de limitation des possibilités de mesure résidant dans les variations du mouvement propre de la chambre, un nouveau dispositif de mesure fut réalisé, comportant deux chambres en montage différentiel : l'une d'elles, la chambre de mesures, étant reliée à une tension collectrice positive et remplie de l'hydrogène actif à mesurer, l'autre, ou chambre de compensation, étant reliée à une tension collectrice négative et remplie d'hydrogène ordinaire non actif :



On pouvait espérer d'un tel dispositif non seulement l'annulation de l'influence des variations du rayonnement cosmique et des rayonnements parasites, mais encore la réduction de certaines perturbations d'origine électrique, en particulier de l'effet des fluctuations des piles et de leurs variations de tension avec la température.

Le résultat au point de vue compensation du rayonnement cosmique s'est effectivement révélé excellent : si l'on effectue un enregistrement avec les chambres sous vide, on observe le tracé caractéristique pratiquement rectiligne et affecté seulement des fluctuations dues au bruit de fond de la résistance d'entrée. Avec les chambres remplies d'hydrogène ordinaire à la pression atmosphérique, on voit le tracé accuser des fluctuations importantes, mais celles-ci s'effectuent de part et d'autre de la valeur indiquée avec les chambres sous vide. En effet, la chute des particules cosmiques donne des impulsions de courant tantôt positives, tantôt négatives selon qu'elle a lieu dans la chambre de mesure ou dans la chambre de compensation, mais il est évident qu'au bout d'un temps plus ou moins long le nombre de particules reçues par chaque chambre tend à s'égaliser statistiquement, de sorte que la valeur moyenne des fluctuations donne une résultante nulle dans le temps.

Le rayonnement provenant de sources extérieures est également sans effet sur les indications, à condition que ces sources se trouvent à une distance suffisamment grande pour que les deux chambres se trouvent sensiblement dans les mêmes conditions de réception du rayonnement, ce qui devient pratiquement le cas pour des sources éloignées d'au moins quelques mètres.

De ce fait, on ne rate plus de mesures à cause de perturbations extérieures.

Par contre, si la valeur moyenne du mouvement propre des chambres est rendue nulle, ses fluctuations statistiques subsistent toujours, et comme ce sont les fluctuations qui limitent la précision des mesures, on ne doit pas s'attendre à voir celle-ci notablement améliorée.

Toutefois, comme la protection acquise contre les perturbations extérieures permet de prolonger les mesures plus longtemps, il en résulte la possibilité d'accroître en conséquence leur précision. En fait, on est assez limité dans cette voie, car la précision n'étant augmentée qu'en fonction de \sqrt{T} , une augmentation notable de la précision exigerait un temps de mesure prohibitif. Il y a donc lieu de se contenter d'un raisonnable compromis à ce sujet.

En conclusion et compte tenu de l'expérience, on peut citer comme résultats acquis par l'utilisation de deux chambres en montage différentiel et d'un électromètre à condensateur vibrant fonctionnant avec résistance d'entrée, la

possibilité de mesurer en une heure une activité spécifique de $0,001 \mu\text{C}/\text{cm}^3$ avec une précision de 20 à 30 pour cent. Le facteur 10 de gain de sensibilité par rapport à ce qu'on obtenait avec un ampli continu et une chambre d'ionisation unique peut donc être considéré comme acquis, un facteur 3 grâce à la stabilité des condensateurs vibrants, et un facteur 3 grâce à la protection acquise contre les perturbations extérieures par l'utilisation d'une chambre de compensation. (Pour supprimer les fluctuations, on pourrait songer à concevoir un dispositif tel que toute particule cosmique crée simultanément dans les deux chambres des impulsions égales et de signe contraire. Mais pour cela il faudrait réaliser une géométrie du système telle que toute particule traversant l'une des chambres soit obligée de traverser également l'autre, et de plus qu'elle y produise des effets d'ionisation égaux, et ceci quelle que soit sa trajectoire. Inutile de dire que l'obtention de telles conditions se heurte à des difficultés insurmontables de réalisation pratique).

VII - UTILISATION DE LA METHODE PAR MESURE DU REGIME DE CHARGE DU CONDENSATEUR VIBRANT.

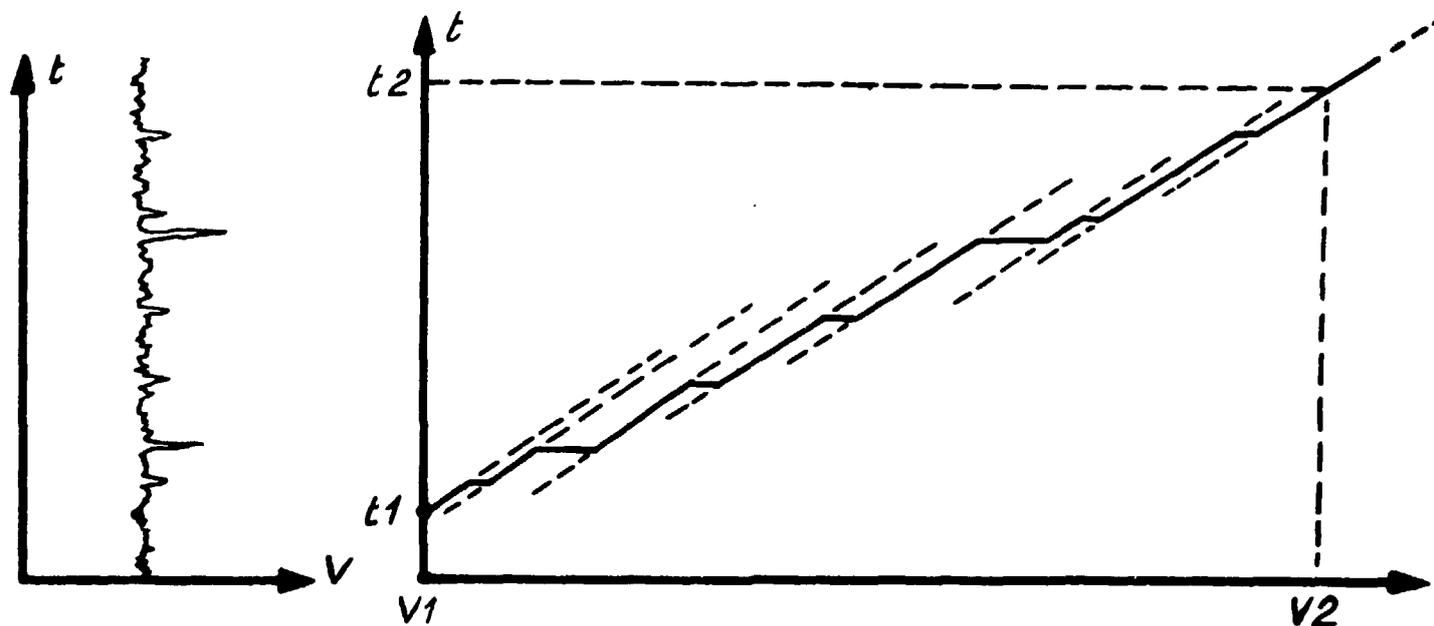
La réputation de cette méthode, dont on parle tant dans les publications américaines, entretient l'espoir de pouvoir mettre en évidence et même mesurer avec précision des courants d'une extrême petitesse qui seraient indécélables par la méthode de mesure en direct avec une résistance de charge de haute valeur.

Cette méthode présente apparemment en effet de sérieux avantages : d'une part elle permet d'éliminer radicalement l'ultime souci constitué par la subsistance d'une faible dérive de l'appareil, celle-ci restant dès lors négligeable à côté des variations de tension créées par les plus faibles courants à mesurer. D'autre part, elle permet d'éliminer les causes d'erreur dues à l'incertitude sur la valeur exacte des résistances de haute valeur et surtout sur la stabilité de cette valeur au cours du temps. Mais en fait il existe tout d'abord une limite à la petitesse des courants que l'on peut mesurer : c'est l'existence d'un courant résiduel parasite propre à l'électromètre, celui-ci étant dû vraisemblablement à trois principales causes :

- ionisation produite par le rayonnement cosmique directement à l'intérieur du condensateur vibrant ;
- radioactivité parasite de ses propres matériaux de construction ;
- ionisation possible due à l'agitation de l'air entre les lames vibrantes.

Nous avons vu que la valeur de ce courant résiduel était de l'ordre de 10^{-17} à 10^{-16} A. On ne doit donc pas espérer pouvoir mesurer des courants inférieurs à cette valeur.

Ensuite, lorsqu'elle est utilisée avec une chambre d'ionisation unique, cette méthode présente un grave inconvénient en ce que les impulsions dues au mouvement propre de la chambre et aux diverses perturbations parasites, au lieu de se traduire par de simples fluctuations du tracé de l'enregistrement, ont un effet cumulatif :



Mesure en direct

Mesure du régime de charge

De sorte qu'il n'est pas possible de déduire la valeur du régime de charge en se bornant à relever les indications de l'appareil de mesure au début et à la fin d'un certain intervalle de temps et en en concluant :

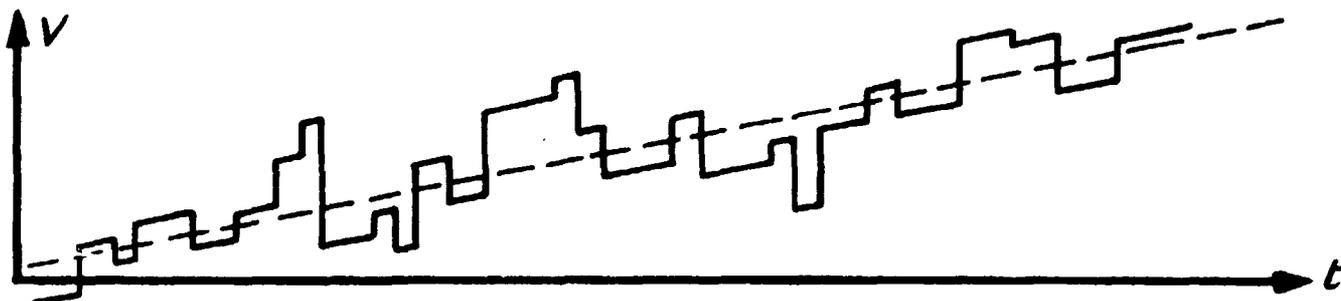
$$\frac{dv}{dt} = \frac{v2 - v1}{t2 - t1}$$

La véritable valeur du régime de charge correspondant au courant constant qu'il s'agit de mesurer, autrement dit la pente prédominante de la courbe (indiquée sur la figure par les lignes en pointillé), doit alors être déterminée en effectuant toute une série de mesures à intervalles très rapprochés, (de minute en minute, par exemple), et en prenant comme taux de montée véritable le chiffre le plus souvent rencontré.

La mesure devient ainsi une véritable opération de comptage qui doit être prolongée aussi longtemps que nécessaire pour obtenir une précision suffisante. L'emploi d'un enregistreur pour faciliter les mesures est illusoire, car la pente de la droite changeant constamment et de façon insensible, il est pratiquement impossible d'en tirer quoi que ce soit.

Cette méthode exige donc l'immobilisation en permanence d'une personne compétente, capable d'interpréter correctement les résultats.

Dans le cas d'un système avec chambre de compensation, cet inconvénient est pratiquement supprimé. En effet, comme le mouvement propre donne lieu à des impulsions tantôt positives, tantôt négatives, il en résulte dans le temps une annulation de l'effet cumulatif :



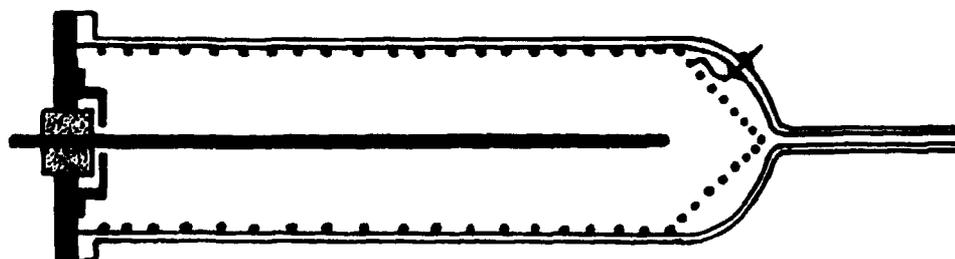
Je pensai alors voir là la solution idéale pour effectuer les mesures de très faibles activités : utilisation de la méthode par mesure du régime de charge du condensateur vibrant, permettant de s'affranchir des dernières causes pouvant limiter les possibilités de mesures et utilisation de deux chambres en montage différentiel permettant d'éviter la production d'un effet cumulatif dans les indications, de sorte qu'il devenait ainsi possible de se contenter d'effectuer deux mesures à un intervalle de temps assez long et d'en déduire la valeur du régime de charge par la formule précédente, devenant alors valable. Cela promettait ainsi une séduisante commodité de manipulation pour l'utilisateur.

Malheureusement, je dus bientôt déchanter : c'est qu'avec l'utilisation de cette méthode on voit surgir un nouveau phénomène parasite : l'existence de mouvements de charges de polarisation et d'hystérésis diélectrique dans les isolateurs lorsque les électrodes qu'ils portent sont laissées "en l'air", c'est-à-dire quand leur potentiel n'est pas stabilisé par une résistance de fuite.

On constate alors que si l'on effectue une série de mesures portant sur des échantillons de même activité spécifique, les résultats obtenus au début de l'opération sont tellement fantaisistes que l'on ne peut même pas trouver un ordre de grandeur commun entre les diverses mesures, une régularité suffisante du régime de charge pour permettre des mesures significatives n'étant atteinte qu'après une période de stabilisation d'énorme durée. Il est ainsi tout à fait courant que le remplissage des chambres ayant été effectué vers 9 heures du matin, on ne commence qu'en fin de soirée à obtenir des mesures reproductibles, alors que la stabilité est atteinte en une dizaine de minutes quand on travaille avec une résistance d'entrée.

L'énormité du temps de stabilisation nécessaire me fit tout d'abord suspecter que le phénomène pouvait être dû à des charges parasites collectées lors du remplissage de la chambre par les frottements gazeux, et séjournant sur les parois en verre et sur les isolateurs. Pour éviter cet effet possible, j'apportai un certain perfectionnement aux chambres d'ionisation, consistant à

munir les isolateurs de blindages électrostatiques et les anodes, constituées jusqu'ici de simples manchons en grillage, d'un cône de protection du côté de la tubulure de remplissage, de façon à former ainsi un écran électrostatique continu entre les électrodes collectrices et les parois de la chambre.



Ce perfectionnement apporta une réduction considérable de l'intensité des perturbations consécutives au remplissage des chambres, mais l'effet espéré sur la réduction du temps de stabilisation fut rigoureusement nul. Il me fallut donc chercher ailleurs la cause de cette lenteur de stabilisation, et je ne trouvai qu'une explication : celle de phénomènes parasites dans les isolateurs, en considérant que la présence d'une résistance de fuite limite à une valeur fixe la différence de potentiel à laquelle sont soumis les isolateurs, tandis que dans la méthode de mesure du régime de charge, celle-ci étant constamment variable il devait en résulter des mouvements de charges de polarisation incessants dans les isolateurs.

Or, récemment, je tombai à la Documentation sur un article [7] signalant également le phénomène, avec des données précises sur ses manifestations et son ordre de grandeur selon les matériaux isolants. Mes hypothèses à ce sujet se trouvant ainsi confirmées, la question me semble désormais réglée et la situation non susceptible d'amélioration.

Aussi, contrairement à ce que peuvent prétendre de nombreuses publications américaines, mon expérience personnelle de l'utilisation de la méthode de mesure du régime de charge m'oblige à conclure que celle-ci :

- ne permet pas de toute façon d'atteindre une sensibilité notablement supérieure à la méthode en direct avec résistance de charge, à cause de l'inévitable courant résiduel parasite de l'électromètre ;

- est dénuée d'intérêt pratique en raison de l'énormité du temps de mesure nécessaire pour obtenir des résultats reproductibles.

Cette méthode présente peut-être de l'intérêt pour certaines recherches fondamentales de physico-chimie, dans lesquelles le facteur "temps de mesure" n'entre pas en considération. Dans ce cas, où les observations peuvent être

prolongées tout le temps nécessaire, il est vraisemblable que cette méthode permette d'atteindre en fin de compte une précision supérieure à celle de la méthode en direct, le gain en précision obtenu ne dépassant certainement pas toutefois un facteur 2 ou 3. Mais du point de vue applications pratiques - en particulier quand il s'agit d'applications médicales - la possibilité de gagner un facteur 2 en précision est dénuée d'intérêt si ce doit être au prix d'un accroissement d'un facteur 10 du temps de mesure.

Aussi en suis-je revenu à la méthode en direct avec résistance de charge. J'essayai toutefois de porter la valeur de celle-ci à $10^{13} \Omega$ en vue d'atteindre le maximum de sensibilité possible. Mais les résultats obtenus avec des résistances de $10^{13} \Omega$ furent décevants, la stabilité devenant précaire et l'augmentation résultante des constantes de temps de réponse et de stabilisation s'avérant indésirable (on tend alors évidemment à retrouver les inconvénients de la méthode sans résistance de fuite). De toute façon, l'importance des divers phénomènes parasites augmentant également avec la valeur de la résistance d'entrée, il n'y a aucun intérêt à augmenter celle-ci au-delà d'une certaine limite. La valeur de $10^{12} \Omega$ semble la limite maximum raisonnable à laquelle se tenir.

L'adjonction d'un enregistreur à l'appareillage est indispensable pour effectuer des mesures précises. En effet, ce n'est que par un enregistrement suffisamment prolongé que l'on peut déterminer avec certitude la valeur moyenne d'un phénomène fluctuant. D'autre part, il permet d'obtenir des résultats de mesure valables en dépit de perturbations pouvant survenir en cours d'opération, grâce à la possibilité d'effectuer des interpolations et des recoupements en négligeant les accidents de tracé qui sont manifestement dûs à des perturbations.

VIII - CONCLUSION.

Après de nombreux mois passés en expérimentation et en tentatives d'amélioration des performances de l'appareillage, le système adopté comme le plus satisfaisant au point de vue utilité pratique pour les mesures de tritium destinées à des applications médicales, est constitué par l'installation suivante :

- une chambre de mesures de 1 litre de volume, reliée à une tension de + 240 volts, et une chambre de compensation de même volume reliée à une tension de - 240 volts ; les électrodes collectrices, reliées ensemble, attaquent un condensateur vibrant équipé d'une résistance de charge de $10^{12} \Omega$;

- chambres et condensateur vibrant sont protégés par un blindage de plomb ;

- la haute tension appliquée aux chambres est fournie par de grosses batteries de piles pour postes de radio, fraîches, et sélectionnées ;

- piles et toutes connexions soigneusement blindées ;
- cellules de filtrage interposées entre piles et chambres ;
- enregistreur branché à la sortie de l'amplificateur du condensateur vibrant.

La chambre de compensation est remplie en permanence d'hydrogène non actif à la pression atmosphérique.

Le processus de mesure est le suivant :

- remplissage de la chambre de mesure d'hydrogène ordinaire à la pression atmosphérique et enregistrement effectué pour déterminer le "zéro" ;

- remplacement de l'hydrogène de la chambre de mesure par l'hydrogène actif provenant de l'échantillon d'eau tritiée à mesurer, et enregistrement poursuivi le temps suffisant pour permettre de déterminer la valeur moyenne de l'indication avec une précision suffisante ;

- évacuation de l'hydrogène actif et remplissage à nouveau de la chambre de mesure par de l'hydrogène ordinaire, et nouvel enregistrement pour vérifier si l'on retrouve bien le zéro précédent.

L'appareillage se retrouve ainsi dans les conditions initiales et prêt pour un second cycle de mesures.

On peut estimer que la valeur moyenne du courant d'ionisation fluctuant peut être déterminée avec une approximation de $\pm 10^{-16}$ A. Cela permet la mesure d'une activité spécifique de tritium de :

- 0,001 $\mu\text{C}/\text{cm}^3$ avec une précision de 20 à 30 pour cent ;
- 0,01 $\mu\text{C}/\text{cm}^3$ " " " " 2 à 3 pour cent. etc.

la durée d'un cycle de mesures étant de 1 h 1/2 à 2 h.

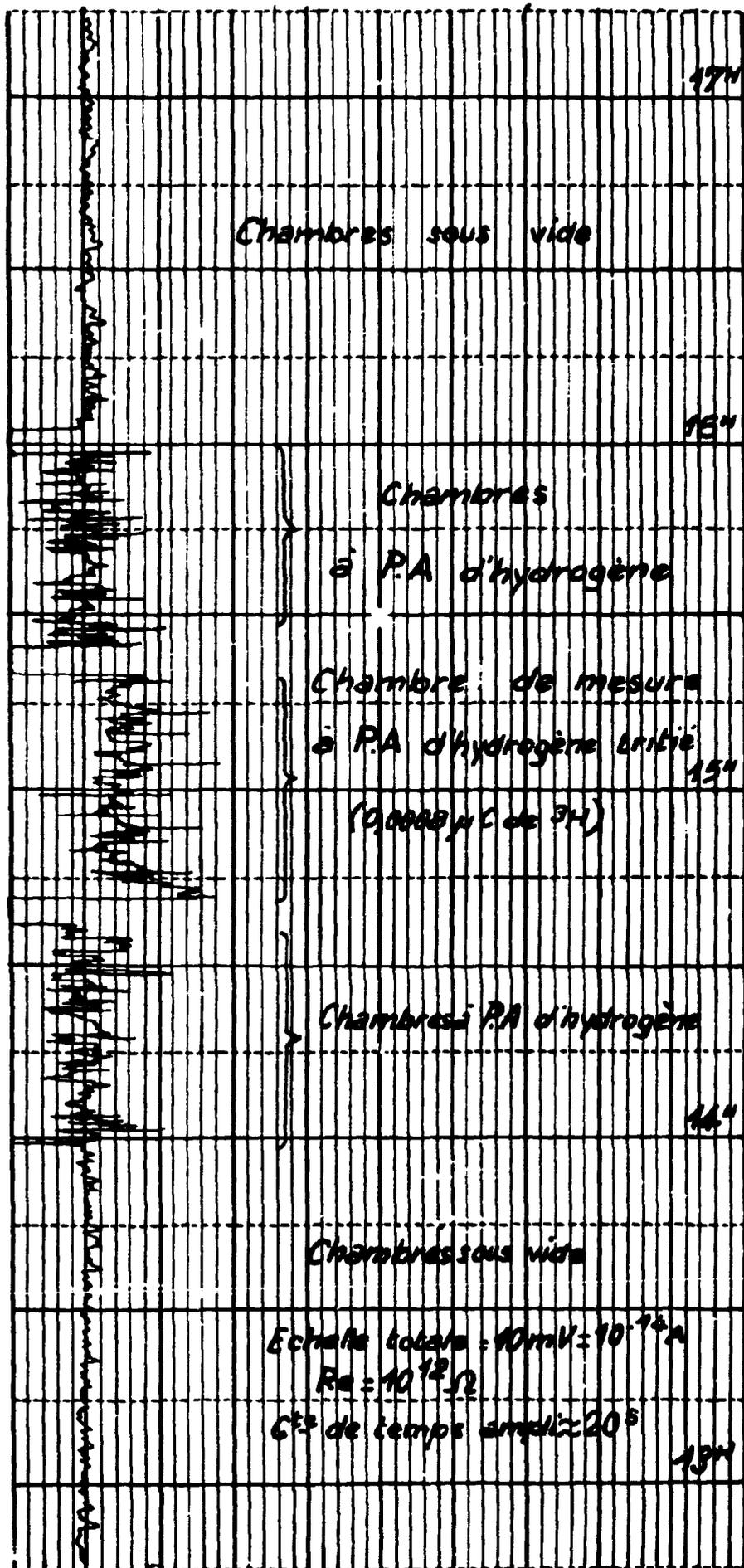
On trouvera ci-après un exemple typique d'enregistrement.

Remarques.

I - Ainsi qu'il a déjà été dit précédemment, nous évitons le plus possible de nous servir du relais de court-circuit des bornes d'entrée pour faire le zéro. A cet effet, le blindage de plomb des chambres a été percé d'un trou, normalement fermé par un bouchon de plomb, au-dessus de chaque chambre. En approchant une

source au-dessus de l'un ou de l'autre de ces orifices, on peut produire à volonté un important courant d'ionisation positif ou négatif permettant de faire évoluer les indications dans le sens désiré, de faire le zéro, ou de hâter la stabilisation du système. Cette façon d'opérer est ainsi extrêmement souple, et évite de "brutaliser" l'appareillage électronique.

II - Afin d'obtenir des enregistrements "propres", l'enregistreur n'est mis en fonctionnement que lorsque l'appareil de mesure de l'ampli du condensateur vibrant indique que le régime de stabilité est atteint.



IX - NOTES TECHNIQUES SUR L'ELECTROMETRE A CONDENSATEUR VIBRANT.

1° Bruit de fond et bande passante.

Dans de nombreuses publications relatives aux procédés de mesure de faibles courants continus consistant à transformer ceux-ci en courants alternatifs, on trouve cité comme avantage du système la possibilité d'utiliser un amplificateur à très faible bande passante, ce qui théoriquement doit permettre une amélioration illimitée du rapport signal/bruit et permettre ainsi de déceler les signaux les plus faibles au milieu d'un bruit de fond important.

Or, je dois dire que ce raisonnement est complètement faux, l'expérience m'ayant prouvé exactement le contraire.

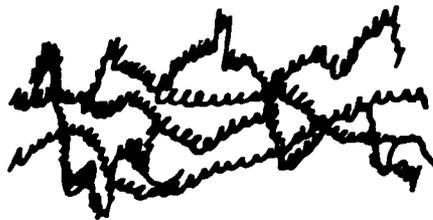
En effet, tout système sélectif à effet de bande passante présente une réponse oscillante propre et une constante de temps à l'établissement et à la suppression d'un signal alternatif à la fréquence passante. Si, de plus, celui-ci se trouve modulé en amplitude, le système sélectif apportera un déphasage de la courbe enveloppe de modulation.

Aussi, dans le cas d'un amplificateur sélectif, le bruit de fond au lieu d'apparaître comme formé d'un grand nombre de composantes de toutes fréquences, se présente sous l'aspect de trains d'oscillations amorties résultant d'une excitation par choc des circuits de l'amplificateur, la fréquence de ces trains d'oscillations étant d'autant plus basse que la sélectivité est plus grande.

Aspect du bruit de fond à l'oscillographe



Ampli non sélectif



Ampli peu sélectif



Ampli très sélectif

Si la fréquence d'accord est F et la bande passante $\pm \Delta F$, les fluctuations de la tension de sortie obtenue après détection ne seront pas comprises dans une bande de $F - \Delta F$ à $F + \Delta F$, mais entre 0 et ΔF , le phénomène étant le même que celui de la détection d'une onde porteuse modulée en amplitude et de la suppression des fréquences aigues de modulation dans un récepteur de radio trop sélectif.

Le fait d'utiliser un amplificateur sélectif a donc en réalité pour effet de transformer le bruit de fond en fluctuations de très basse fréquence. Cela

exige alors l'utilisation de cellules de filtrage à très grande constante de temps pour atténuer ces fluctuations. Or, non seulement cela est fort indésirable pour des questions d'ordre pratique, mais encore, comme la tension de sortie est appliquée en contre-réaction à l'entrée, la présence de filtres à trop grande constante de temps provoque infailliblement l'oscillation à très basse fréquence de l'appareillage.

On trouve par contre que le bruit de fond important, mais formé d'une grande quantité de composantes que l'on obtient avec un ampli non sélectif est facile à éliminer par un filtrage modéré, qui n'introduit pas de risque d'oscillation.

Ces observations d'expérience plaident donc en faveur d'une amplification non sélective. Une certaine sélectivité est toutefois fort utile pour éliminer certaines fréquences gênantes, telles que le 50 p/s en provenance du secteur. La meilleure règle à formuler à cet égard semble donc d'avoir un amplificateur présentant juste la sélectivité nécessaire pour éliminer les fréquences parasites indésirables.

A titre d'exemple, l'électromètre à condensateur vibrant américain de l'"Applied Physics Co" présente une bande passante de ± 50 Hz (à 3 db d'atténuation) autour de la fréquence de travail de 450 Hz.

Dans un nouveau modèle d'électromètre construit au Service de Biologie, le condensateur vibrant, excité à 120 ps fournit un signal à la fréquence double de 240 Hz. La sélectivité de l'amplificateur est réglée de façon à éliminer simplement les fréquences de 120 ps et de 50 ps. La situation au point de vue fluctuations et temps de réponse s'en trouve nettement plus favorable que dans le cas de l'appareil faisant l'objet de la publication déjà citée [1], dans lequel la bande de fréquences passantes est de 100 ± 10 Hz.

2° Atténuation des fluctuations et oscillations parasites.

En dehors de la question des fluctuations dues au bruit de fond thermique, il apparaît hautement désirable d'avoir la possibilité d'augmenter éventuellement la constante de temps d'intégration des fluctuations (au sacrifice bien entendu de la rapidité de réponse de l'appareil). Ceci apparaît particulièrement nécessaire lorsque l'appareil doit être utilisé à la mesure de faibles activités au moyen de chambres d'ionisation, le mouvement propre de ces chambres à la pression atmosphérique de gaz se traduisant comme on l'a vu par des fluctuations considérablement plus grandes que celles dues simplement au bruit de fond électrique que l'on peut observer avec les chambres sous vide. Aussi, pour effectuer des mesures, on se trouve obligé d'intégrer ces fluctuations.

Or, pour les raisons précédemment exposées, il est impossible d'augmenter outre mesure la constante de temps du filtrage, si celui-ci est compris dans le circuit de contre-réaction, car cela provoque à coup sûr l'oscillation à très basse fréquence de l'appareillage. Pour pouvoir atténuer les fluctuations de façon illimitée, on ne dispose guère que des deux moyens suivants :

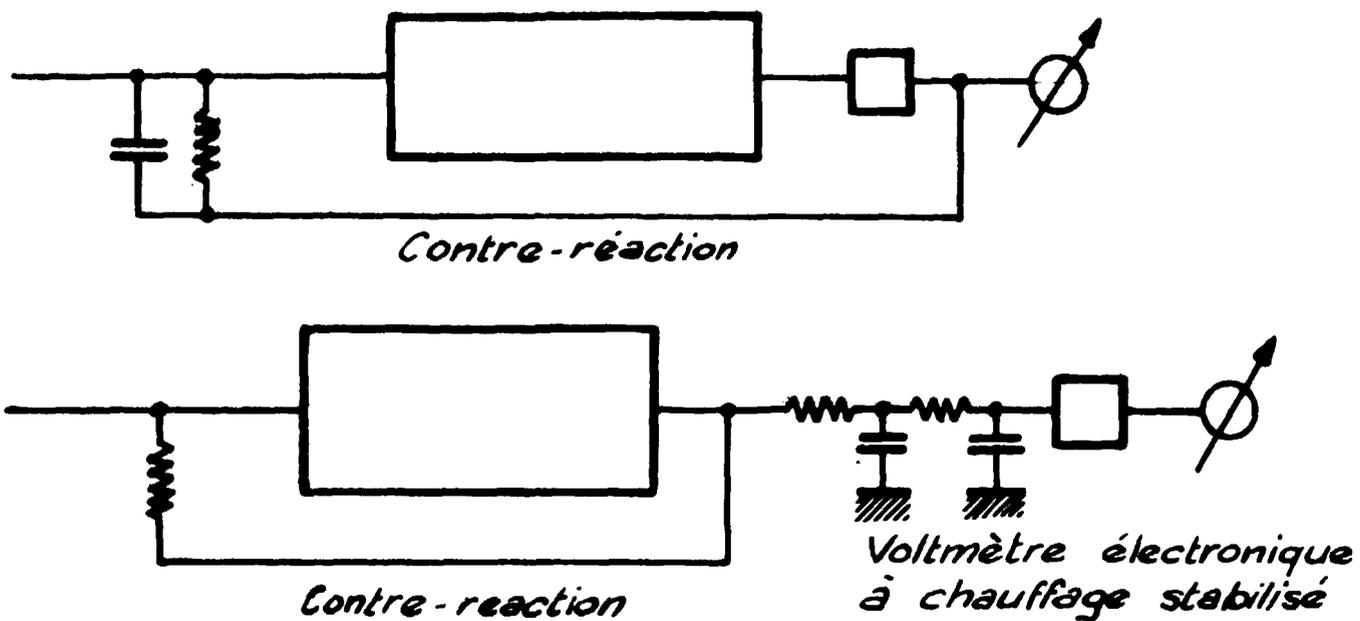
- shunter la résistance d'entrée par un condensateur ;
- prévoir un circuit intégrateur à très grande constante de temps dans le circuit de l'appareil de mesure, celui-ci étant disposé hors du circuit de contre-réaction.

Le premier moyen - qui serait le plus rationnel - a sur le plan pratique l'inconvénient de l'incommodité, et risque de compromettre l'isolement d'entrée.

Le second procédé offre l'avantage de permettre de varier commodément la valeur de la constante de temps en agissant sur les circuits de l'amplificateur, mais l'obligation d'exclure le voltmètre électronique de sortie du circuit de contre-réaction a pour conséquence que la linéarité de réponse de cet étage ne se trouve plus assurée, et sa dérive éventuelle minimisée, par le jeu de la contre-réaction. On pourrait songer à éviter l'étage électronique de sortie et à alimenter directement l'appareil de mesure par la tension fournie par le détecteur de phase, mais la résistance interne de l'appareil de mesure étant toujours faible, l'obtention d'une constante de temps suffisante exigerait des condensateurs de plusieurs milliers de microfarads de capacité, qui ne pourraient alors être que des condensateurs électrochimiques ; mais ceux-ci sont à proscrire en raison de leur courant de fuite. Pour pouvoir utiliser des condensateurs au papier il faut se limiter à des capacités de quelques microfarads, ce qui exige des résistances de filtres se chiffrant en mégohms. Un tel filtre ne peut alors être placé que dans le circuit grille d'une lampe, ce qui implique ainsi dans tous les cas l'obligation d'utiliser un étage de sortie électronique.

Mais alors celui-ci doit assurer par lui-même une excellente linéarité de réponse et une absence pratique de dérive, puisqu'il ne peut plus bénéficier de l'effet stabilisateur de la contre-réaction. En utilisant un montage en cathode-follower symétrique on obtient une excellente linéarité de réponse, mais les variations de chauffage produisent un effet de dérive notable, aussi il est indispensable de stabiliser le chauffage de cette lampe.

En définitive, si l'on veut réaliser un appareil offrant la possibilité d'atténuer les pires fluctuations rencontrées dans l'utilisation pratique, on a le choix entre les deux solutions schématisées ci-après.



Le second système présente pour l'utilisateur l'avantage de la commodité, mais pour le constructeur l'inconvénient de nécessiter un dispositif de stabilisation du chauffage de la lampe de sortie.

Une simple régulatrice fer-hydrogène en série dans le filament assure une stabilisation très suffisante, mais les caractéristiques de régulation de ces lampes étant susceptibles de se modifier dans le temps, ce procédé n'est pas recommandable. Dans le nouvel appareil construit au Service de Biologie, nous utilisons un petit transducteur magnétique pour effectuer cette stabilisation. On pourrait également envisager une stabilisation par transistors, ou d'alimenter l'appareil par l'intermédiaire d'un réguvolt.

Manuscrit reçu le 17 novembre 1958.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BRIERE, WEILL, L'électromètre à condensateur vibrant
Le journal de Physique et le Radium,
16, 695, 1955.
- [2] VICTOREEN, Ionization Chambers,
Proceedings of the I.R.E., 37, 189, 1949.
- [3] JANNEY, MOYER Routine use of ionization chambers method
for C-14 assay,
Review of Scientific Instruments, 19, 667, 1948
- [4] KAPLAN,
VAN DYKEN,
WILZBACH, Determination of tritium by ion-current mea-
surements,
Analytical Chemistry, 26, 884, 1954.
- [5] FALLOT,
AEBERHARDT,
MASSON, Méthode de dosage de l'eau tritiée et ses
applications en clinique humaine,
International Journal of applied radio-iso-
topes 1, 4, 237, 1957.
- [6] GUINN, WAGNER, For low specific activity, use scintillation
counting. Nucleonics, 13, 56, oct. 1955.
- [7] MUNICK, Transient electric currents from plastic
insulators,
Journal of applied Physics, 27, 1114, 1956.
- [8] VON BERTELE, A new phenomenon of electron emission from
thin mercury films,
Nature G.B., 4643, p. 1148, 182, 1958.
- [9] SURDIN, La limite naturelle de la précision des mesures
Automatisme, 6, 201, 1956.
- [10] DURAND, Electrostatique et magnétostatique (Masson,
Editeur).
- [11] SPENKE, Elektronische Halbleiter,
Traduction en anglais chez Mc Graw Hill Books.

TABLE DES MATIERES

I	- Performances de l'électromètre à condensateur vibrant	1
II	- Résultats obtenus avec chambre d'ionisation unique et ampli à courant continu	4
III	- Résultats obtenus avec électromètre à condensateur vibrant	5
IV	- Cause d'instabilité d'origine électrique	6
V	- Limite des possibilités de mesure	9
VI	- Utilisation de deux chambres en montage différentiel	10
VII	- Utilisation de la méthode par mesure du régime de charge du condensateur vibrant	12
VIII	- Conclusion	16
IX	- Exemple d'enregistrement	19
X	- Notes techniques sur l'électromètre à condensateur vibrant	20
	1° Bruit de fond et bande passante	20
	2° Atténuation des fluctuations et oscillations parasites	21
	Bibliographie	24

FIN