

**MESURE DES COURANTS FAIBLES
AU LABORATOIRE DE METROLOGIE
DES RAYONNEMENTS IONISANTS
APPLICATION A LA MESURE DE L'EXPOSITION**

par

*Jean-Paul GUIHO, Aimé OSTROWSKY,
Jean-Pierre SIMOEN, Philippe HILLION*

DIVISION DE CHIMIE

Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay

Rapport CEA-R-4637

PLAN DE CLASSIFICATION DES RAPPORTS ET BIBLIOGRAPHIES CEA

(Classification du système international de documentation nucléaire SIDON/INIS)

A 11	Physique théorique	C 30	Utilisation des traceurs dans les sciences de la vie
A 12	Physique atomique et moléculaire	C 40	Sciences de la vie : autres études
A 13	Physique de l'état condensé	C 50	Radioprotection et environnement
A 14	Physique des plasmas et réactions thermonucléaires		
A 15	Astrophysique, cosmologie et rayonnements cosmiques	D 10	Isotopes et sources de rayonnements
A 16	Conversion directe d'énergie	D 20	Applications des isotopes et des rayonnements
A 17	Physique des basses températures		
A 20	Physique des hautes énergies	E 11	Thermodynamique et mécanique des fluides
A 30	Physique neutronique et physique nucléaire	E 12	Cryogénie
		E 13	Installations pilotes et laboratoires
B 11	Analyse chimique et isotopique	E 14	Explosions nucléaires
B 12	Chimie minérale, chimie organique et physico-chimie	E 15	Installations pour manipulation de matériaux radioactifs
B 13	Radiochimie et chimie nucléaire	E 16	Accélérateurs
B 14	Chimie sous rayonnement	E 17	Essais des matériaux
B 15	Corrosion	E 20	Réacteurs nucléaires (en général)
B 16	Traitement du combustible	E 30	Réacteurs nucléaires (types)
B 21	Métaux et alliages (production et fabrication)	E 40	Instrumentation
B 22	Métaux et alliages (structure et propriétés physiques)	E 50	Effluents et déchets radioactifs
B 23	Céramiques et cermets		
B 24	Matériaux plastiques et autres matériaux	F 10	Economie
B 25	Effets des rayonnements sur les propriétés physiques des matériaux	F 20	Législation nucléaire
B 30	Sciences de la terre	F 30	Documentation nucléaire
		F 40	Sauvegarde et contrôle
C 10	Action de l'irradiation externe en biologie	F 50	Méthodes mathématiques et codes de calcul
C 20	Action des radioisotopes et leur cinétique	F 60	Divers

Rapport CEA-R-4637

Cote-matière de ce rapport : E.41

DESCRIPTION-MATIERE (mots clefs extraits du thesaurus SIDON/INIS)

en français

en anglais

COURANTS ELECTRIQUES

ELECTRIC CURRENTS

METHODES DE MESURE

MEASURING METHODS

PRECISION

ACCURACY

CONDENSATEURS

CAPACITORS

CHAMBRES D'IONISATION DE BRAGG-GRAY

BRAGG GRAY CHAMBERS

DOSIMETRIE

DOSIMETRY

INTENSITES DE L'ORDRE DU PICOAMPERE

PICO AMP BEAM CURRENTS

- Rapport CEA-R-4637 -

Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay
Division de Chimie
Laboratoire de Métrologie des Rayonnements Ionisants

MESURE DES COURANTS FAIBLES
AU LABORATOIRE DE METROLOGIE DES RAYONNEMENTS IONISANTS
APPLICATION A LA MESURE DE L'EXPOSITION

par

Jean-Paul GUIHO, Aimé OSTROWSKY,
Jean-Pierre SIMOEN, Philippe HILLION

- Décembre 1974 -

CEA-R-4637 - GUIHO Jean-Paul, OSTROWSKY Aimé, SIMOEN Jean-Pierre,
HILLION Philippe

MESURE DES COURANTS FAIBLES AU LABORATOIRE DE METROLOGIE DES RAYONNEMENTS IONISANTS - APPLICATION A LA MESURE DE L'EXPOSITION

Sommaire. - En métrologie des rayonnements ionisants, la détermination expérimentale de certaines grandeurs, à l'aide de la technique ionométrique, implique la mesure de courants d'intensité aussi faible que 10^{-14} A. Après examen et analyse critique des méthodes précises de mesure, tant du point de vue théorique que de celui de leur mise en oeuvre, les auteurs justifient le choix de la méthode "à taux de dérive", décrivent l'instrumentation utilisée, son automatisation, le principe du dépouillement et de l'exploitation des résultats. La méthode choisie permet, avec l'instrumentation décrite, la mesure de courants d'ionisation d'intensité $\geq 10^{-14}$ A avec une incertitude relative inférieure ou égale à quelques millièmes.

1974

26 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

CEA-R-4637 - GUIHO Jean-Paul, OSTROWSKY Aimé, SIMOEN Jean-Pierre,
HILLION Philippe

LOW CURRENT INTENSITIES MEASUREMENTS AT THE LABORATOIRE DE METROLOGIE DES RAYONNEMENTS IONISANTS - APPLICATION TO EXPOSURE DETERMINATION

Summary. - In the field of ionizing radiation metrology, the determination of certain quantities by means of ionometric technique necessitates the measurement of current intensities as low as 10^{-14} A. After a theoretical and practical examination of the possible accurate measurement techniques, the choice of the "rate of drift" method is justified. Then are described the electronic device, its automation and the data analysis and treatment. With this device, the selected method allows measurements of ionization current intensities $\geq 10^{-14}$ A with an overall uncertainty less or equal to some 10^{-4} .

1974

26 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

**MESURE DES COURANTS FAIBLES
AU LABORATOIRE DE METROLOGIE DES RAYONNEMENTS IONISANTS**

APPLICATION A LA MESURE DE L'EXPOSITION

I - INTRODUCTION -

La nécessité de plus en plus marquée d'une mesure précise de l'exposition nous a amenés, en 1968, à mettre au point un ensemble de mesures des courants faibles.

Cet ensemble associé, dès l'origine, à nos chambres d'ionisation à cavité ou à parois d'air a, par la suite, été automatisé et complété par un système d'acquisitions de données nous permettant un dépouillement et un traitement statistique des résultats sur ordinateur.

Ce rapport a pour but d'expliciter les motivations qui nous ont guidées dans le choix de la méthode, de décrire l'instrumentation utilisée, d'en donner les caractéristiques et performances et enfin, sur un plan expérimental, de faire le bilan de six années ininterrompues d'utilisation.

Dans le cadre particulier qui est le nôtre, il convient, afin de pouvoir définir à priori la précision qui doit-être recherchée sur la mesure des courants, d'examiner avec soin le nombre et l'importance des diverses erreurs affectant la mesure de l'exposition.

Il semble raisonnable d'estimer que l'on doit rechercher une précision d'environ 1 % sur cette grandeur. Sans revenir sur le principe même de la mesure, outre l'incertitude sur les courants, on peut recenser quatre causes principales d'erreurs. Celles-ci sont à peu près d'importance égale et de l'ordre de 0,2 %. On peut donc estimer qu'il faille rechercher, pour la mesure du courant, une erreur du même ordre.

Outre le critère de précision, d'autres éléments doivent être pris en considération dans le choix de la méthode. Ceux-ci résultent des conditions particulières d'utilisation : dynamique, limite inférieure de mesure. Dans notre cas, pour des débits d'exposition compris entre quelques 10^{-3} et 10^3 R.h⁻¹ correspondant respectivement à des courants d'ionisation de 10^{-14} et 10^{-8} A, la dynamique est de 10^6 .

La méthode retenue sera donc adaptée à nos besoins si :

- pour une probabilité de 0,997, l'incertitude sur le courant d'ionisation est de l'ordre de 0,2 % ;
- le seuil de mesure est de 10^{-16} A, soit deux ordres de grandeur inférieure à la valeur minimale choisie du courant d'ionisation ;
- la dynamique est égale à 10^6 .

II - EXAMEN DES DIFFERENTES POSSIBILITES -

Les appareils destinés à la mesure des faibles intensités de courant ont tous pour principe la détermination d'une différence de potentiel aux bornes d'un élément de valeur connue, parcouru par le courant. Selon la nature de cet élément, l'appareil est un mesureur instantané (cas d'une résistance) ou un intégrateur (cas d'un condensateur). Le montage optimal est obtenu en branchant l'élément en contre-réaction sur un amplificateur de courant continu de gain très élevé et de très grande impédance d'entrée.

Il est clair que, dans notre cas, les intensités à mesurer et l'exactitude recherchée éliminent l'emploi d'une résistance en raison des inconvénients propres à cet élément (bruit électronique, vieillissement, variations avec la température et avec le courant, exactitude sur l'étalonnage égale au mieux à 1 %).

Restent donc les méthodes qui mettent en oeuvre un condensateur ; elles sont de deux types :

- méthode d'intégration dite "à taux de dérive",
- méthode de compensation dite "de la balance de Townsend".

Toutes deux aboutissent - sous certaines conditions - à la même expression de l'intensité I du courant mesuré :

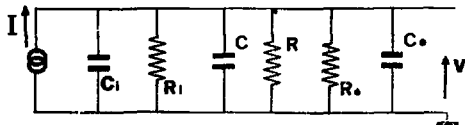
$$I = C \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2-1)$$

où ΔV est, pendant l'intervalle de temps Δt , la variation de tension sur le condensateur de mesure de capacité C .

Ce condensateur devra posséder des qualités particulières : résistance R d'isolement très élevée, faible coefficient de température, grande stabilité dans le temps, et se prêter à un étalonnage très précis.

II.1. - Méthode à taux de dérive -

La chambre d'ionisation constitue un générateur de courant continu de résistance interne R_1 élevée ($> 10^{14} \Omega$) et de capacité interne C_1 faible (quelques $10^{-12} F$). Le courant I débité charge la capacité C aux bornes de laquelle la tension V est mesurée par l'électromètre de grande impédance d'entrée (résistance $R_e > 10^{15} \Omega$, capacité $C_e \sim 10^{-10} F$ compte tenu du câble et des connexions), selon le schéma suivant :



La réponse de ce dispositif à un échelon de courant est :

$$i(t) = I \cdot f(t) \longrightarrow v(t) = R' \cdot I \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R' \cdot C'}})$$

avec :

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_e} + \frac{1}{R} \quad \text{et} \quad C' = C_1 + C_e + C$$

Pour que cette réponse se réduise à l'expression pratique indépendante de R' :

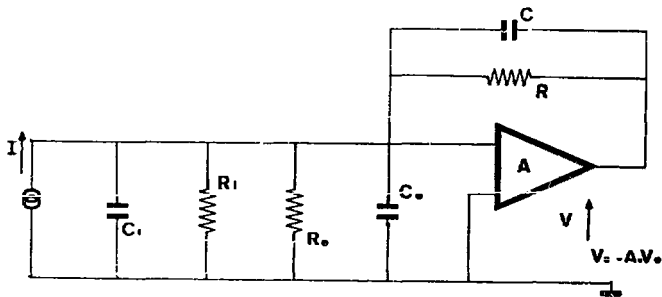
$$v(t) = \frac{I \cdot t}{C'}$$

qui permet l'utilisation de la relation fondamentale (2-1), il est nécessaire que la constante de temps $R'.C'$ soit très grande, ce qui implique des résistances R_i , R_e , R très élevées et une capacité C de grande valeur.

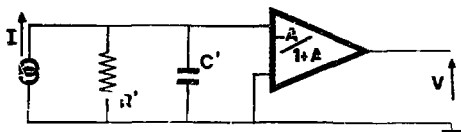
Mais un tel dispositif présente les graves inconvénients suivants :

- l'intégration est effectuée sur la capacité équivalente C' , égale à la capacité C augmentée d'une capacité parasite $C_1 + C_e$ qui, en général, n'est pas du tout négligeable devant les capacités C utilisables (quelques 10^{-11} à quelques 10^{-8} F), d'où une incertitude systématique due à l'imprécision sur la détermination de la capacité parasite ;
- l'électrode de mesure de la chambre d'ionisation étant portée au potentiel $V(t)$, le champ électrique à l'intérieur de la chambre est modifié quantitativement et géométriquement ; il en résulte une modification de l'efficacité de collection des ions et du volume de mesure, dont l'importance peut-être particulièrement marquée pour certains types de chambres - chambre à paroi d'air, chambre à extrapolation -.

Le montage ci-dessous, dans lequel le condensateur C est branché en contre-réaction sur un amplificateur de tension, réduit considérablement les inconvénients précités :



Ce montage a pour schéma équivalent :



$$\text{où : } \frac{1}{R'} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_1(1+A)} + \frac{1}{R_e(1+A)} = \frac{1}{R} \left[1 + \frac{R}{1+A} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_e} \right) \right]$$

$$C' = C + \frac{C_1 + C_e}{1+A} = C \left[1 + \frac{C_1 + C_e}{C(1+A)} \right]$$

On voit que pour un gain A de très grande valeur :

- les résistances R_1 et R_e sont considérablement augmentées,
- les capacités C_1 et C_e sont considérablement réduites,
- la tension d'entrée V_e - c'est-à-dire celle de l'électrode de mesure - est très faible car égale à la tension de sortie V divisée par le gain.

La réponse de ce dispositif à un échelon de courant est :

$$V(t) = - \frac{A}{1+A} \cdot R' \cdot I \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R'C'}})$$

soit, en développant l'exponentielle jusqu'au second ordre :

$$V(t) = - \frac{I \cdot t}{C'} \cdot (1 + \frac{1}{A}) \cdot (1 - \frac{t}{2 \cdot R' \cdot C'})$$

d'où, compte-tenu des expressions de R' et C' et d'une valeur très élevée du gain A :

$$V(t) = - \frac{I \cdot t}{C} \cdot (1 - \frac{C_1 + C_e}{A \cdot C}) \cdot (1 - \frac{t}{2 \cdot R \cdot C}) \quad (2-2)$$

Les quantités entre parenthèses représentent les corrections de capacité parasite et de non linéarité en fonction du temps. Aux termes correctifs près la relation ci-dessus se réduit à l'expression fondamentale (2-1) du courant :

$$I = C \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

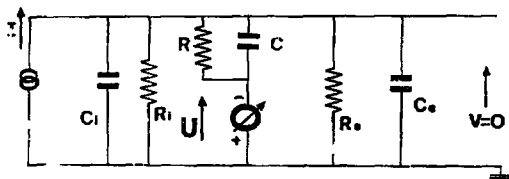
Pour fixer les idées, avec les valeurs pratiques :
 $(C_1 + C_e) \ll 10^{-10} \text{ F}$, $C \geq 10^{-10} \text{ F}$, $R > 10^{16} \Omega$, $A > 10^4$ et $t \ll 10^{-3} \text{ s}$,
 les termes correctifs sont :

$$\frac{C_1 + C_e}{A.C} \ll 10^{-4} \quad \text{et} \quad \frac{t}{2 R.C} \ll 5.10^{-4}$$

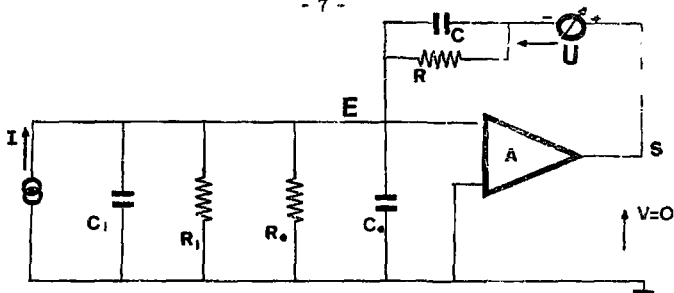
Outre la nécessité - que l'on retrouvera dans la méthode de Townsend - d'utiliser un condensateur de très grande résistance d'isolement, la condition indispensable pour que la méthode à taux de dérive soit applicable est d'utiliser un amplificateur de gain très élevé (supérieur à 10^4 pour satisfaire aux conditions mentionnées en introduction).

II.2. - Méthode de Townsend -

Le courant I débité par la chambre d'ionisation produit une charge de la capacité C qui est annulée par l'envoi d'un courant opposé débité par un générateur de tension :



La tension de sortie V est donc maintenue nulle, l'électromètre fonctionne alors en détecteur de zéro. Les fuites par C_1 , R_1 et C_0 , R_0 sont théoriquement inexistantes ; toutefois, la compensation n'étant jamais rigoureusement continue, il est souhaitable que les conditions relatives à ces éléments, mentionnées au paragraphe précédent, soient respectées. D'où l'intérêt du branchement de l'ensemble condensateur-tension de compensation en contre-réaction sur un amplificateur de tension selon le schéma :



La tension de compensation est appliquée par l'intermédiaire d'un potentiomètre de précision alimenté en courant constant par un générateur étalon. La valeur U de cette tension étant par principe telle que $V = 0$, la différence de potentiel entre E et S est nulle. L'équation du système est équivalente à celle de la charge de l'ensemble C, R en parallèle par un échelon de courant :

$$U(t) = R \cdot I \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}})$$

soit en développant l'exponentielle jusqu'au second ordre :

$$U(t) = \frac{I \cdot t}{C} \cdot (1 - \frac{t}{2R \cdot C}) \quad (2-3)$$

Cette relation est analogue à la relation (2-2) relative à la méthode à taux de dérive, mais elle ne contient pas de correction due aux capacités parasites C_1, C_0 . Au terme correctif près, elle conduit à la relation fondamentale (2-1) :

$$I = C \cdot \frac{\Delta U}{\Delta t}$$

La méthode de Townsend a donc pour intérêt essentiel l'indépendance de la capacité de mesure de toute capacité parasite. D'autre part, la tension d'entrée, donc celle de l'électrode de mesure de la chambre, est pratiquement maintenue nulle par rapport à la masse.

Comme dans la méthode à taux de dérive, on retrouve une correction de non-linéarité en fonction du temps (terme $t/2R \cdot C$), donc la nécessité d'utiliser un condensateur de très grande résistance d'isolement afin de rendre cette correction négligeable.

L'inconvénient de cette méthode consiste en l'obligation de compenser, de façon continue, la charge du condensateur ; cette opération est fastidieuse quand elle est manuelle et de réalisation délicate lorsqu'on veut l'automatiser.

III - METHODE RETENUE ET DESCRIPTION DE L'INSTRUMENTATION -

Bien que la méthode à taux de dérivé présente, par rapport à celle de Townsend, les inconvénients suivants :

- potentiel de l'électrode de mesure par rapport à la masse différent le zéro,
- corrections dues aux capacités parasites ;

nous l'avons préférée à cette dernière :

- 1°) - en raison de la possibilité de rendre négligeable l'influence de ces défauts par l'utilisation d'un amplificateur à gain très élevé - $A > 10^4$ - (voir chapitre II.1.) ;
- 2°) - parceque, outre le problème de la détection du zéro rendu délicat en raison des fluctuations, la méthode de Townsend nécessite, pour l'automatisation du système de mesure, un "pilotage" de la tension de sortie. Celle-ci varie alors d'une façon discrète, par bonds successifs dont l'amplitude peut atteindre quelques centaines de mV, risquant ainsi, en raison des déséquilibres brutaux des tensions de boucle, d'augmenter l'incertitude aléatoire de la mesure.

III.1. - Choix de la variable -

Dans les conditions énoncées au paragraphe (2-1), la tension V à la sortie de l'amplificateur est une fonction linéaire du temps t : l'intensité I du courant est alors exprimée par la relation fondamentale :

$$I = C \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} = C \cdot \frac{V_2 - V_1}{\Delta t}$$

Deux choix sont possibles :

- $\Delta V = C \frac{I}{\Delta t}$, Δt est alors la variable, égale à l'intervalle de temps qui sépare les passages de la tension de sortie à deux seuils V_1 et V_2 prédéterminés ; la valeur de Δt dépend de l'intensité I du courant mesuré et de la capacité C du condensateur d'intégration ;
- $\Delta t = C \frac{\Delta V}{I}$, ΔV est, pour I et C données, la variable égale à la différence de tension correspondant à Δt , obtenue en relevant au vol, à l'aide d'un voltmètre numérique, les tensions V_1 et V_2 à la sortie de l'amplificateur.

La première solution ($\Delta V = C \frac{I}{\Delta t}$) n'a pas été retenue. En effet, outre l'évolution possible des seuils en raison de l'influence de la température et du temps sur les éléments constitutifs des circuits, les fluctuations de la tension de sortie entraînent une incertitude sur les valeurs effectives des seuils V_1 et V_2 , donc sur ΔV . Par ailleurs, l'inconvénient majeur de cette solution résulte de l'impossibilité d'effectuer de façon simple plusieurs mesures sur une même droite de charge ; on se prive ainsi de la possibilité de vérifier la linéarité de la charge et donc de déceler une cause d'erreur systématique résultant d'une éventuelle fuite du condensateur de mesure.

Cette dernière et importante objection ne s'applique évidemment pas à la solution adoptée ($\Delta t = C \frac{\Delta V}{I}$) qui présente en outre les avantages suivants :

- meilleure définition et plus grande stabilité de Δt par rapport à celles du ΔV précédemment considéré, en raison d'un pilotage par quartz,
- minimisation de l'influence des fluctuations de la tension de sortie car chaque mesure au vol de la tension V par le voltmètre numérique a pour résultat une valeur moyenne obtenue par intégration sur un temps de 20 ms.

Notons enfin que, pour une valeur donnée du courant, le temps d'intégration Δt et la capacité C doivent être choisis tels que l'accroissement de tension ΔV soit obtenu avec le nombre maximal de chiffres significatifs.

III.2. - Description de la chaîne de mesure -

La chaîne de mesure réalisée est constituée du mesureur de courant proprement dit et d'un système automatisé d'acquisition et de transfert de données (voir schéma synoptique fig. 1).

III.2.1. - Caractéristiques principales des éléments de la chaîne -

. Electromètre à condensateur vibrant :

- impédance d'entrée $> 10^{16} \Omega$
- dérive du zéro $< 20 \mu\text{V}/24\text{h}$. et $+ 20 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- bruit de fond $\sim 10^{-17}\text{A}$ (valeur mesurée)
- gain $A \sim 4.10^4$ (valeur mesurée voir annexe 1)

. Voltmètre numérique, gamme utilisée, 10 V :

- impédance d'entrée : $2.10^{10} \Omega$
- sensibilité : 100 μV
- incertitude de la lecture : $\pm 100 \mu\text{V}$
- incertitude de la mesure : $\pm 2.10^{-5}$

. Base de temps pilotée par quartz :

- sorties : 10 μs , 100 μs , 1 ms , 10 ms , 100 ms , 1 s .
- incertitude : $< 10^{-4}$

. Commutateur de voies :

- bruit de commutation des relais : 1 μV

. Source d'alimentation de la chambre d'ionisation : par piles

. Sondes de relevé de la pression atmosphérique, de la température et de l'humidité relative :

- incertitudes sur les mesures de ces paramètres :
respectivement : $\pm 20 \text{ Pa}$ (0,2 mm Hg), $\pm 0,1^\circ\text{C}$, $\pm 3 \%$.

. Interface de sortie et perforatrice.

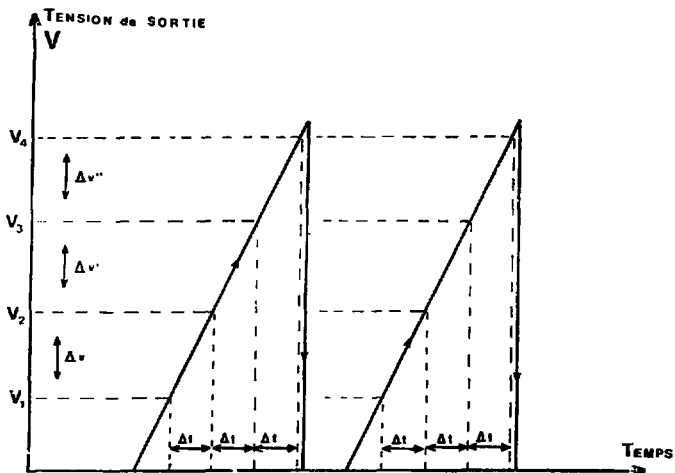
III.2.2. - Détails particuliers -

Le câble de liaison chambre-amplificateur est du type "anti-signal". Il est constitué d'une âme conductrice, d'un diélectrique de très grande impédance, graphité extérieurement, d'une tresse conductrice à fort coefficient de recouvrement et d'une gaine isolante externe. Sa capacité linéique vaut 3.10^{-11} F.m⁻¹ ; pour la longueur utilisée, qui est de 3 m, et compte-tenu du gain, la capacité parasite qui en résulte est d'environ $2,5.10^{-15}$ F.

Le condensateur d'intégration doit être protégé, d'une part contre les rayonnements, d'autre part contre toute influence électrostatique. Son branchement doit respecter rigoureusement la continuité des masses afin de ne pas introduire de capacité parasite en contre-réaction sur l'amplificateur (voir annexe 2).

III.3. - Mode opératoire -

Le programme de commande des automatismes de la chaîne contient les diverses instructions relatives aux mises en intégration, temps d'attente, relevés de tension V, de pression p, de température θ , d'humidité H, remises à zéro, etc., nécessaires à l'obtention d'un ensemble de q séries de n groupes de valeurs V_1 , p_1 , θ_1 , H_1 . Cet ensemble correspond à q "droites" d'intégration comportant chacune n points de mesure (voir diagramme ci-après, où $q = 2$, $n = 4$).



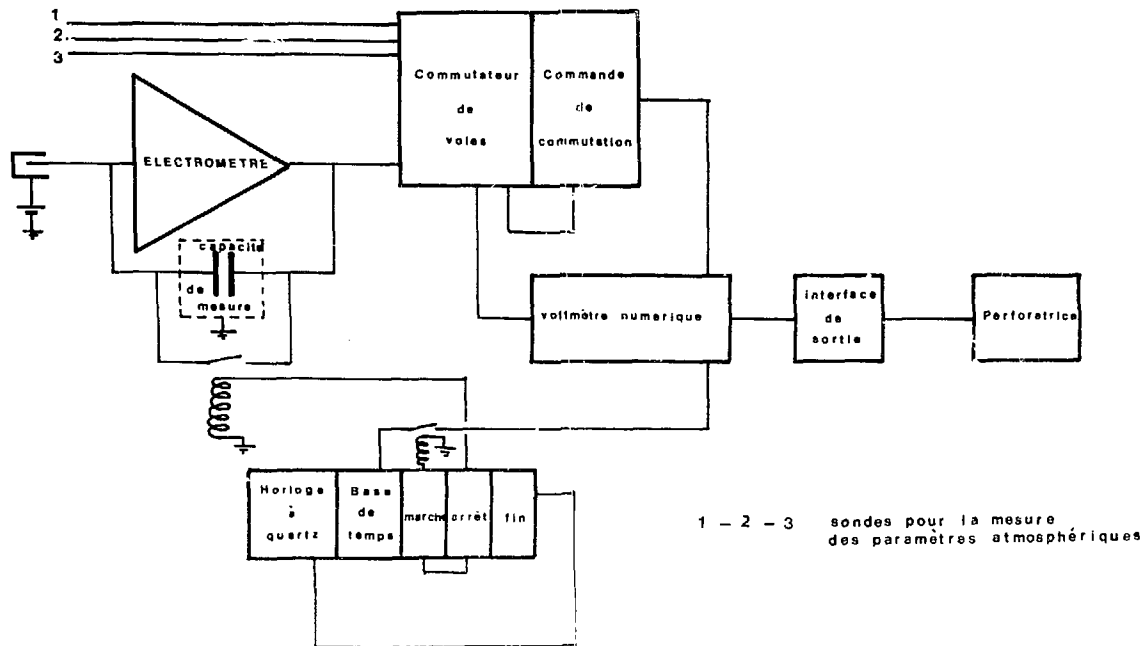
Après avoir corrigé ces mesures de l'influence des paramètres atmosphériques, le programme de dépouillement permet d'effectuer un contrôle de la linéarité de chaque intégration². Toute série de mesures présentant - en raison d'une fuite du condensateur d'intégration - un défaut de linéarité significatif en terme de probabilité est alors éliminée.

A partir des mesures retenues, on obtient la valeur moyenne du courant et la variance caractérisant la distribution aléatoire des résultats.

² Ce contrôle n'est pas propre à la méthode à taux de dérive, il doit bien évidemment être effectué lorsqu'on utilise la méthode de Townsend.

Fig.1

SCHEMA SYNOPTIQUE DE L'ELECTROMETRIE



IV - PERFORMANCES ET LIMITES DE L'INSTRUMENTATION -

L'étude des performances et des limites de la chaîne de mesure se résume à la recherche et à l'estimation de deux types d'incertitudes pouvant entacher les résultats :

- 1°) - les incertitudes aléatoires, caractéristiques de la réétabilité de l'instrumentation, qui ont pour origine la nature même des phénomènes physiques se produisant tant au niveau de la chambre d'ionisation qu'à celui du mesureur de courant ;
- 2°) - les incertitudes systématiques caractéristiques de la justesse des mesures. Elles proviennent :
 - . de l'étalonnage de la capacité de mesure C,
 - . de l'étalonnage du voltmètre numérique servant à la mesure de V,
 - . de l'étalonnage de la base de temps,
 - . de l'étalonnage des sondes destinées à la mesure des paramètres atmosphériques,
 - . d'erreurs sur les corrections éventuelles résultant de capacités parasites.

IV.1. - Incertitudes aléatoires -

Pour un intervalle de confiance correspondant à une probabilité de 99,7 % ($\approx 3\sigma$ en raison du nombre de mesures qui est de l'ordre de 200), le tableau ci-après donne les incertitudes aléatoires absolues et relatives sur des intensités de courant comprises entre 10^{-10} et 10^{-16} A.

Valeur de \bar{I}	Incertitude aléatoire absolue sur \bar{I}	Incertitude aléatoire relative sur \bar{I} en %
$1\ 3426 \cdot 10^{-10}$ A	$\pm 0,0001 \cdot 10^{-10}$ A	$\pm 0,007$
$1\ 1480 \cdot 10^{-11}$	$\pm 0,0001 \cdot 10^{-11}$ A	$\pm 0,009$
$3\ 8095 \cdot 10^{-13}$	$\pm 0,0006 \cdot 10^{-13}$ A	$\pm 0,022$
$2\ 849 \cdot 10^{-14}$	$\pm 0,005 \cdot 10^{-14}$ A	$\pm 0,16$
$1\ 184 \cdot 10^{-15}$	$\pm 0,021 \cdot 10^{-15}$ A	$\pm 1,8$
$6,8 \cdot 10^{-16}$	$\pm 0,8 \cdot 10^{-16}$ A	$\pm 11,7$

Notons que ces résultats ont été obtenus pour les conditions expérimentales qui sont celles de nos mesures de routine.

Lorsqu'on mesure l'exposition, il convient de minorer le courant \bar{I} d'un courant \tilde{I} résultant de phénomènes parasites - bruit de fond électronique, rayonnement diffusé... - donc de tenir compte des incertitudes relatives à ces deux courants. Pour nos conditions expérimentales habituelles, ce courant \tilde{I} est de l'ordre de 10^{-16} A.

Pour des courants d'ionisation compris entre 10^{-16} et 10^{-9} A, le graphe de la figure n° 2 donne :

- 1°) - l'incertitude aléatoire relative sur \bar{I} (en trait plein),
- 2°) - l'incertitude aléatoire relative sur $\bar{I} - \tilde{I}$ qui est le courant à prendre en considération pour la mesure de l'exposition (en trait pointillé).

IV.2. - Incertitudes systématiques -

Les erreurs de prélèvements des tensions et des temps sont implicitement contenues dans l'incertitude aléatoire de la mesure. Ne restent donc que les incertitudes systématiques sur les termes figurant dans l'équation (2-1) : $I = C \frac{\Delta V}{\Delta t}$ soit, pour les éléments sélectionnés de notre chaîne de mesure :

- a - erreur d'étalonnage de la base de temps : 0,01 %
- b - erreur d'étalonnage du voltmètre numérique : 0,0025 %
- c - erreur sur la valeur effective de la capacité de mesure qui comprend :
 - l'erreur d'étalonnage : 0,05 %
 - l'erreur de capacité parasite : 0,0025 %

L'incertitude systématique globale est donc égale à 0,065 %.

Ces résultats montrent que la méthode choisie permet, avec l'instrumentation utilisée, d'obtenir des performances compatibles avec les besoins exposés en introduction.

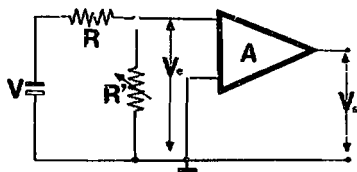
En particulier :

- la dynamique de mesure est de 10^6 ,
- l'incertitude totale sur la mesure de courants compris entre 10^{-14} et 10^{-10} A varie respectivement de 0,4 % à 0,07 %.

ANNEXE 1

- MESURE DU GAIN DE L'AMPLIFICATEUR -

Le gain A , en boucle ouverte de l'amplificateur, a été mesuré selon le schéma de principe :



V = tensor d'une file au mercure

R = résistance fixe (500 Ω)

R' = résistance variable (0 - 500 Ω)

$$A = V_s / V_e$$

Les tensions V_s et V_e ont été mesurées avec un voltmètre numérique d'impédance d'entrée égale à $2 \cdot 10^{10} \Omega$ et de sensibilité 10 μV .

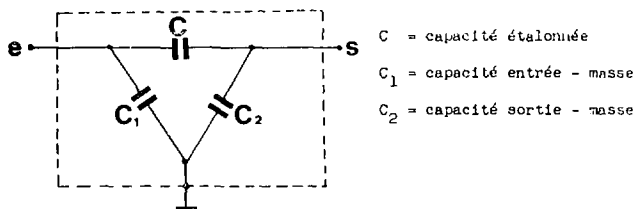
Pour diverses valeurs de R' , pour lesquelles la tension d'entrée V_e variait de 300 à 860 μV , nous avons obtenu la valeur moyenne :

$$A = 4 \cdot 10^4$$

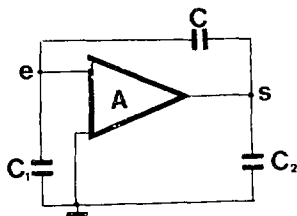
ANNEXE 2

- BRANCHEMENT DU CONDENSATEUR D'INTEGRATION -

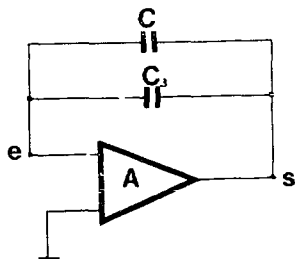
Le condensateur étalonné est monté dans un boîtier selon le schéma suivant :



Si le branchement en contre-réaction sur l'amplificateur est correct (masse du boîtier reliée à celle de l'amplificateur), le schéma du circuit est :



si les masses ne sont pas reliées, le schéma du circuit est :



où C_3 est la capacité équivalente aux capacités C_1 et C_2 montées en parallèle sur C : $1/C_3 = 1/C_1 + 1/C_2$ et qui s'ajoute donc à la capacité C d'intégration.

Par exemple, avec $C_1 = C_2 \sim 3.10^{-11}$ F, $C_3 \sim 1,5.10^{-11}$ F

Manuscrit reçu le 15 octobre 1974

Achévé d'imprimer
par
le CEA, Service de Documentation, Saclay
Novembre 1974

DEPOT LEGAL
4ème trimestre 1974

La diffusion, à titre d'échange, des rapports et bibliographies du Commissariat à l'Energie Atomique est assurée par le Service de Documentation, CEN-Saclay, B.P. n° 2, 91 190 - Gif-sur-Yvette (France).

Ces rapports et bibliographies sont également en vente à l'unité auprès de la Documentation Française, 31, quai Voltaire, 75007 - PARIS.

Reports and bibliographies of the Commissariat à l'Energie Atomique are available, on an exchange basis, from the Service de Documentation, CEN-Saclay, B.P. n° 2, 91 190 - Gif-sur-Yvette (France).

Individual reports and bibliographies are sold by the Documentation Française, 31, quai Voltaire, 75007 - PARIS.

Edité par

le Service de Documentation

Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay

Boîte Postale n° 2

91190 Gif-sur-YVETTE (France)