

À L'
ÉNERGIE ATOMIQUE

R A P P O R T C . E . A

N° 226

1953

Service de Documentation
CENTRE D'ÉTUDES NUCLÉAIRES

SACLAY (SEINE & OISE)

Un procédé de mesure rapide des courants faibles

J Taïeb

Commissariat à l'Energie
Atomique, Paris, France

Le procédé de mesure rapide des courants faibles que nous allons brièvement décrire s'applique à la mesure des courants fournis par les sources à résistance interne de valeur élevée, comme c'est le cas pour les chambres d'ionisation, les photocellules, les tubes de spectrographe de masse. On mesure d'ordinaire ces courants avec un amplificateur muni d'un appareil de mesure à sa sortie. On peut choisir judicieusement ce dernier pour qu'il ne limite pas la rapidité de la mesure (enregistreur rapide, oscillographe). Ce sont alors l'amplificateur et son circuit d'entrée qui déterminent la précision et la rapidité de la mesure: les diverses fluctuations qui limitent la précision de la mesure sont engendrées dans le circuit d'entrée et les premiers étages de l'amplificateur, et la constante de temps la plus difficile à éliminer est celle du circuit d'entrée. Aussi, un problème de mesure de courants faibles est-il essentiellement un problème d'amplificateur et de circuit d'entrée.

Nous nous sommes proposés de réaliser un ensemble amplificateur et circuit d'entrée à performances poussées, c'est à dire que pour une même rapidité de mesure nous désirions avoir un rapport signal/bruit plus important que dans les systèmes classiques et pour un même rapport signal/bruit une mesure effectuée plus rapidement. Nous avons pensé qu'il suffisait pour cela d'utiliser un amplificateur à réaction négative, mais il est apparu au cours des mesures que le fonctionnement théorique de cet amplificateur était faussé par l'existence de certaines capacités parasites du circuit d'entrée, et nous avons été conduits à modifier celui-ci. C'est donc l'ensemble de l'amplificateur et du circuit d'entrée que nous allons décrire.

Rappelons d'abord brièvement quelles sont les causes qui limitent la rapidité de mesure et le rapport signal/bruit d'un amplificateur de courant.

1°) *Limitation de la rapidité de mesure*

Si la capacité parasite entre l'entrée de l'amplificateur et la masse est C , si la résistance d'entrée de l'amplificateur est R , dans un amplificateur classique la rapidité de mesure est limitée par la constante de temps RC (la bande passante est telle que les fréquences supérieures à $\frac{1}{2\pi RC}$ sont atténuées de 6 db par octave). Cette limitation oblige à choisir une faible valeur pour R si l'on veut faire une mesure rapide.

2°) *Les divers bruits de fond*

a) Le bruit de fond thermique de la résistance R — Pour une bande passante donnée, si on l'exprime en tension aux bornes de la résistance R , il est proportionnel à \sqrt{R} . Le signal exprimé en tension, si l'on mesure un courant i , est Ri . Le rapport signal/bruit a la dimension de \sqrt{R} , c'est à dire qu'une condition favorable à la réduction des effets du bruit thermique est le choix d'une forte valeur pour R .

b) Le bruit de fond dû au passage du courant de grille de la première lampe dans la résistance R . Ce courant de grille se mêle au courant à mesurer et ses fluctuations gênent la mesure. Cet effet est indépendant de la valeur de R , si la bande passante est fixée à l'avance. Il faut utiliser pour l'éliminer une lampe d'entrée à courant grille le plus réduit possible.

c) Les bruits dûs à l'effet de grenaille et à l'effet de scintillation, celui-ci étant prépondérant aux très basses fréquences (bruits internes des lampes). Ces bruits sont indépendants de R ; par conséquent, on a intérêt pour augmenter le rapport signal/bruit à introduire dans l'amplificateur un signal de niveau élevé en choisissant R grand.

Tous ces bruits, sauf l'effet de scintillation sont proportionnels à $\sqrt{\Delta f}$ (Δf : largeur de bande). Nous classerons à part:

d) Les fluctuations dûes à la microphonie qu'on

peut réduire par des précautions spéciales dans le choix des lampes; leur effet est aussi diminué si l'on élève le niveau du signal en utilisant une forte résistance d'entrée R .

e) Les fluctuations à très basses fréquences et les dérives, qui sont d'autant moins gênantes que la mesure est rapide. Leur élimination s'accorde d'une bande même large, à condition que cette bande commence au delà d'une dizaine de cycles. Certaines d'entre elles peuvent être éliminées par l'utilisation d'un système de modulation (dérives d'amplificateur).

En résumé, d'une part l'augmentation de R a un effet favorable sur presque tous les types de bruits, d'autre part il est impossible avec un amplificateur classique d'augmenter R sans augmenter aussi le temps nécessaire à la mesure.

Pour tourner la difficulté, nous avons utilisé un amplificateur à réaction négative.

Utilisation d'un amplificateur à réaction négative

Rappelons brièvement certaines propriétés de ce type d'amplificateur. Il s'agit d'un amplificateur à réaction négative appliquée à l'extrémité de la résistance d'entrée. Celle-ci est disposée entre la grille d'entrée et la sortie d'un réseau de réaction négative, au lieu d'être disposée entre la grille d'entrée et la masse. Nous raisonnerons sur l'exemple d'un amplificateur à réaction négative totale, bien que l'expérience nous ait montré qu'en pratique l'introduction de réseaux était utile.

1) Temps de mesure

On peut montrer que la constante de temps du circuit d'entrée d'un amplificateur à réaction négative totale, de gain A est:

$$\tau = \frac{RC}{A}$$

Il faut pour cela que l'amplificateur considéré isolément conserve le gain A pour toutes les fréquences inférieures à $\frac{A}{2\pi RC}$, c'est à dire que l'on doit choisir un amplificateur dont la bande est large par rapport à la bande passante utile à la mesure.

Dans ces conditions, le circuit d'entrée se comporte comme s'il était formé par la mise en parallèle d'une résistance R et d'une capacité $\frac{C}{A}$.

On peut encore énoncer:

Pour une même capacité C , un circuit d'entrée classique de résistance d'entrée R et le circuit à réaction négative totale avec une résistance AR ont même bande passante.

2) Rapport signal/bruit

Nous supposons qu'on utilise, entre la sortie de l'amplificateur et l'appareil de mesure, un filtre passe bas de bande passante égale à celle qui est définie par l'ensemble amplificateur et circuit d'entrée en chaîne fermée. Ce filtre est destiné à éliminer les bruits de fonds engendrés dans l'amplificateur à des fréquences supérieures à celles de la bande passante utile à la mesure.

Etudions le comportement, en ce qui concerne les bruits de fond, de deux systèmes amplificateurs de même bande donnant le même signal de sortie:

1. — Un amplificateur classique de gain A , avec une résistance d'entrée R et une capacité d'entrée C .

2. — Un montage à réaction négative totale, avec un amplificateur de gain A , une résistance d'entrée AR et une capacité d'entrée C .

Le circuit classique de résistance R suivi d'un amplificateur de gain A fournit à sa sortie un signal ARi .

Le circuit d'entrée comprenant une résistance AR et un amplificateur à réaction négative totale fournit à sa sortie le même signal ARi .

a) Diminution de l'effet du bruit d'agitation thermique.

Si on exprime le bruit de la résistance R en tension par la grandeur v_b , le bruit de la résistance AR est $v_b\sqrt{A}$. Le bruit en tension à la sortie, dans le cas du montage classique est v_bA . Dans le cas du montage à réaction négative totale, ce bruit est $v_b\sqrt{A}$. Ces relations sont vraies dans toute la bande passante.

b) Egalité des effets du bruit du courant grille.

Le courant grille i' se comporte pour les deux circuits exactement comme le signal i . Les deux circuits donnant la même réponse pour le même courant i , ils donneront la même réponse pour le même courant i' .

c) Diminution de l'effet du bruit des lampes aux basses fréquences.

Le bruit dû aux lampes (effet de grenaille et de scintillation) peut être considéré comme produit par une source de bruit appliquée à la grille d'entrée de l'amplificateur.

Considérons le cas de l'amplificateur à réaction négative. On peut remarquer que le signal injecté sur la grille d'entrée est la somme de la tension de cette source de bruit et d'une tension appliquée par la réaction négative. Etant donné la structure de la chaîne de réaction, l'effet de la réaction négative diminue lorsque la fréquence augmente. En tenant compte de ce fait, on peut calculer le bruit du montage à réaction, pour chaque fréquence, et le comparer au bruit du montage classique. On démontre que, pour les fréquences de la bande passante, le bruit dans le montage à réaction est réduit proportionnellement à l'inverse de la fréquence; les composantes

de bruit sont égales pour les deux montages au voisinage de la fréquence de coupure $\frac{1}{2\pi RC}$.

On peut en conclure:

- (a) que le montage à réaction ne permet qu'une correction partielle des effets du bruit de grenaille,
- (b) que le montage à réaction est tout indiqué pour réduire le bruit de scintillation qui est très grossièrement proportionnel à l'inverse de la fréquence.

En résumé:

1°) Si pour une bande passante donnée, on veut augmenter le rapport signal/bruit, dans le cas où le bruit d'agitation thermique de la résistance, le bruit de scintillation, accessoirement la microphonie, sont les bruits prépondérants, on peut employer un tel montage.

2°) Si pour un rapport signal/bruit donné, on veut augmenter la rapidité de la mesure, le problème pourra dans certains cas être résolu à l'aide d'un montage de ce type. On peut démontrer par exemple, dans le cas où le bruit d'agitation thermique de la résistance est prépondérant, que si l'on veut accroître A fois la rapidité d'une mesure sans changer le rapport signal/bruit, il suffit d'utiliser ce montage avec une résistance AR et un amplificateur de gain A^2 .

Limitations des performances des amplificateurs à réaction négative

En fait, des capacités parasites autres que C limitent les performances d'un tel circuit. Ce sont:

- la capacité C_0 entre extrémités de R ,
- la capacité répartie Γ entre le corps de R et la masse,

La première diminue la bande; la constante de temps s'écrit en effet

$$\tau = R \left(C_0 + \frac{C}{A} \right)$$

La deuxième déforme complètement la bande passante. En effet, si la fréquence est suffisamment élevée, R se comporte pratiquement comme une ligne à constantes réparties. Il y a un affaiblissement considérable et une rotation de phase le long de cette ligne. La réaction négative cesse de parvenir à la grille, ou y parvient avec

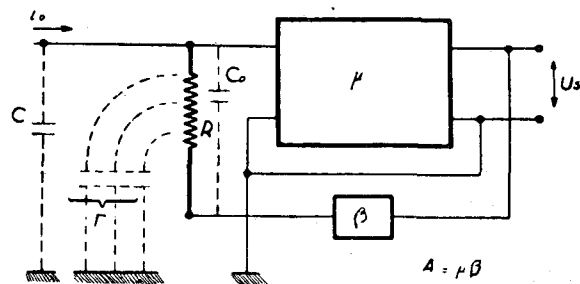


Fig. 1. Capacités parasites du circuit d'entrée.

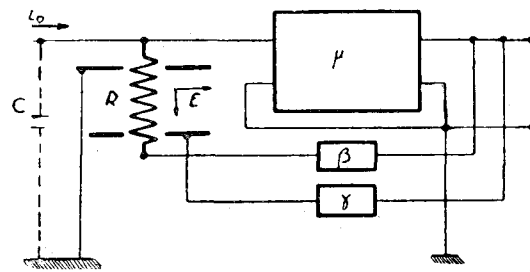


Fig. 2. Dispositif correcteur des capacités parasites.

une phase incorrecte, ce qui provoque l'instabilité du montage.

Elimination de ces difficultés

Pour éliminer l'effet des capacités parasites, nous utilisons le principe suivant. Si la résistance R est disposée suivant l'axe d'une résistance r en forme de cylindre creux, parcourue par un courant I tel que tout point de R soit au même potentiel que les points de r qui l'environnent, les capacités parasites élémentaires entre r et R ne seront pas chargées et l'on aura obtenu un effet analogue à l'annulation de Γ . Dans les mêmes conditions, l'effet de blindage de la résistance r réduit à une valeur extrêmement faible la capacité C_0 entre extrémités de la résistance R . Ce résultat peut être obtenu sans matérialiser r , par l'établissement dans l'espace environnant la résistance R d'un champ électrique E de configuration telle que tout point de la résistance R , sous l'effet du courant i à mesurer et le point infiniment voisin de l'espace environnant, sous l'effet de ce champ E , soient à tout instant à des potentiels aussi voisins que possible.

On supprime de la sorte les échanges d'énergie de la résistance R avec l'espace qui l'entoure. En pratique, l'énergie emmagasinée dans cet espace est fournie par la sortie à basse impédance de l'amplificateur, par l'intermédiaire d'un circuit de réaction négative (et non plus par la source à haute impédance, par l'intermédiaire de la résistance R), ce qui diminue dans une très grande mesure le temps nécessaire à l'établissement de la tension aux bornes de la résistance R .

Le dispositif pratique expérimenté, consiste à insérer la résistance R entre deux plateaux qu'elle traverse et qui lui sont perpendiculaires. Un des plateaux est relié à la masse et l'autre à la sortie de l'amplificateur ou en pratique à un circuit de réaction négative. La position des deux plateaux est réglable.

L'ensemble constitué par ce circuit d'entrée et l'amplificateur à réaction négative se comporte comme un amplificateur à réaction négative et un circuit d'entrée sans capacités parasites pour le signal et pour le bruit de courant grille. On peut donc lui appliquer les résultats généraux que nous avons énumérés plus haut.

Pour le bruit d'agitation thermique, le comportement du circuit d'entrée est légèrement différent. Nous donnerons seulement une explication qualitative. La résistance R se comporte approximativement comme une ligne à constantes réparties formée de résistances et de capacités élémentaires; chaque résistance élémentaire est traversée par le courant d'un générateur de bruit. Dans le montage réalisé, la distribution du potentiel due aux écrans est linéaire, tandis que la distribution de potentiel de bruit le long de la résistance n'est pas: l'annulation de l'effet de capacité répartie n'est donc pas réalisée pour les courants fluctuant le long de la résistance. En première approximation, le circuit se comporte, en ce qui concerne la tension aux bornes produite par l'agitation thermique, comme une ligne à constantes réparties, et en ce qui concerne la transmission du signal de contre réaction, comme la simple résistance R du système théorique. En pratique, pour les valeurs R , I' et C du montage utilisé, les mesures nous ont permis de vérifier que le bruit thermique n'est pas d'un ordre de grandeur supérieur au bruit thermique calculé d'après le schéma théorique.

Le bruit des lampes provient de l'amplificateur; il est transmis à la résistance R par l'intermédiaire du circuit de réaction négative. Du fait de la capacité d'entrée C , d'admittance très grande devant celle de R , pour les fréquences où I' intervient, le potentiel de l'extrémité de R reliée à la grille est très faible. La répartition de potentiel coïncide donc sur R et dans l'espace environnant. Le montage réel se comporte comme le système théorique en ce qui concerne le bruit des lampes.

Autres particularités du système pratique

1) La correction des capacités parasites ne peut être totale. D'autre part, vers l'extrémité de la bande passante la capacité C joue un rôle important pour déterminer la phase du courant qui parcourt R . Pour compenser ces effets de capacité, on peut insérer un réseau correcteur entre les écrans producteurs du champ extérieur et la sortie de l'amplificateur. On trouve expérimentalement qu'un tel réseau permet d'améliorer la bande passante. Dans la mesure où ce réseau

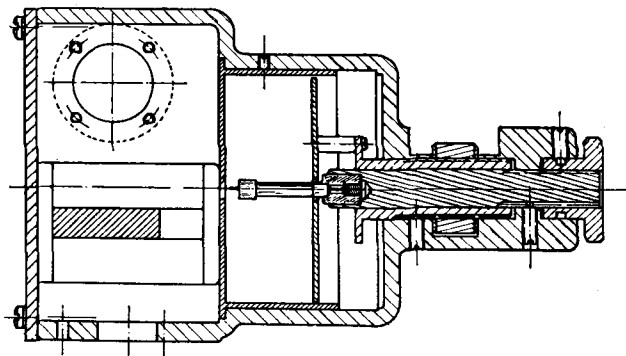


Fig. 3. Circuit d'entrée: réalisation pratique.

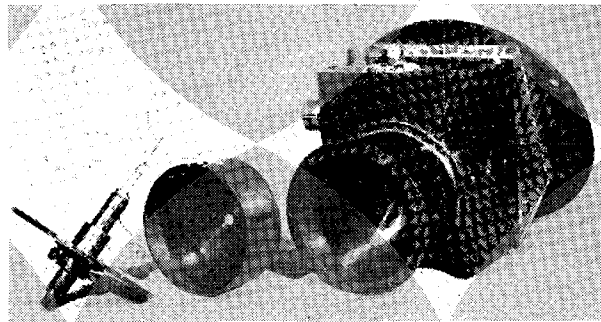


Fig. 4. Préamplificateur d'un spectrographe de masse réalisé au C.E.A.

n'augmente pas les bruits, on a donc intérêt à l'utiliser.

2) Les résistances d'entrée utilisées ne se présentent pas sous une forme géométrique parfaitement définie. Il faut donc disposer d'un moyen de réglage pour faire coïncider le champ le long de la résistance et le champ extérieur. Ce moyen de réglage consiste dans le montage utilisé à faire varier la position des plateaux par rapport au corps de la résistance. On opère en faisant arriver un courant carré à l'entrée du système et en faisant varier la position des plateaux jusqu'à l'obtention d'un signal de sortie de forme carrée. On distingue très bien sur un oscillographe branché à la sortie de l'amplificateur, les signaux correspondant à des plateaux mal placés, car on observe alors soit une mauvaise reproduction des fronts raides, soit un effet de rebondissement.

3) L'expérience nous a montré que malgré le manque d'homogénéité des résistances réelles, la répartition le long de la résistance et la répartition extérieure coïncident suffisamment pour que la valeur de la bande passante soit extrêmement voisine des prévisions théoriques.

Nous avons tenté d'utiliser des résistances sous enveloppe de verre, dont les propriétés sont plus constantes. Mais l'enveloppe de verre déforme le champ électrique et les bandes passantes obtenues étaient insuffisantes. Nous avons obtenu de meilleurs résultats avec des résistances sans enveloppe de verre.

Voici un tableau de quelques résultats obtenus:

$R (\Omega)$	$6 \cdot 10^8$	10^{10}	10^{11}	10^{12}
$C (\mu F)$	10	50	25	10
A	10 000	12 000	12 000	15 000
$\Delta f (c : s)$	20 000	1 700	500	150
$i_b (A)$	—	—	$3 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-16}$

Nous commenterons les résultats obtenus avec la résistance de $10^{11} \Omega$. Le montage est celui du préamplificateur de spectrographe de masse construit au C.E.A.

La bande passante du montage classique utilisant la même résistance avec la même capacité d'entrée est de 0,06 cycles/seconde.

La bande passante du montage à réaction négative, si l'on n'utilise pas le dispositif d'entrée décrit plus haut, a pu être rendu, en éloignant le plus possible la résistance des masses métalliques, de l'ordre de 50 cycles/seconde. Mais elle varie dans une mesure importante avec la disposition des connexions reliées aux extrémités de R . D'autre part, la bande a une forme arbitraire, fonction des capacités parasites.

L'utilisation des plateaux et des circuits correcteurs reliés à l'un des plateaux a permis d'obtenir une bande de 500 cycles/seconde à quelques % près. Le bruit de fond mesuré est de l'ordre de $3 \cdot 10^{-14}$ ampères, sans que de grandes précautions aient été prises pour trier la lampe électromètre d'entrée.

Nous pensons que ce procédé peut être poussé et que de meilleurs résultats peuvent être obtenus, notamment par l'élimination du courant de grille. Le procédé n'est pas seulement appli-

cable aux amplificateurs dont l'élément d'entrée est une lampe électromètre. On peut probablement l'étendre aux électromètres à électrode vibrante.

Nous terminerons par une comparaison entre les méthodes de mesure lente et les méthodes de mesure rapide. En général, avec un type de montage déterminé, étant donné la nature statistique des bruits de fond, une mesure est d'autant plus précise qu'elle est plus lente.

Mais il n'est pas certain qu'on ne trouve pas un avantage à faire certaines mesures par un procédé rapide: d'une part, on peut, en effet, grâce à la méthode de mesure choisie, garder la même précision ou perdre moins de précision qu'avec un montage classique — et d'autre part, si l'on tient compte du fait que les dérives constituent une cause importante d'erreur, on peut même parfois avoir un intérêt capital à les éliminer par la réduction du temps de mesure.