

Un diviseur de tension résistif pour la mesure de la sortie 10 V
des références de tension électroniques à diodes de Zener

par François Delahaye

Résumé

Un diviseur de tension résistif, utilisant un double diviseur série-parallèle a été construit. Il permet l'étalonnage, par rapport à une pile étalon, des sorties 10 V des références de tension à diode de Zener avec une incertitude estimée à $3,1 \times 10^{-8}$ en valeur relative.

Introduction

L'utilisation de références de tension de 10 V, au lieu de la valeur traditionnelle d'environ 1,018 V correspondant à la force électromotrice d'une pile étalon Weston saturée, résulte de l'apparition sur le marché de références de tension à diodes de Zener de haute stabilité. Ces appareils sont équipés généralement non seulement d'une sortie 1,018 V mais aussi d'une sortie 10 V. Un niveau de tension élevé (10 V) permet de réduire la valeur relative de la tension de bruit des composants électroniques (en particulier les amplificateurs) utilisés dans ces références de tension. De plus l'incertitude due aux forces thermo-électromotrices est sensiblement réduite lorsque les comparaisons s'effectuent à un niveau de tension de 10 V.

Pour ces raisons, ainsi que pour répondre à la demande croissante d'étalonnages au niveau 10 V formulée par les laboratoires nationaux, un diviseur de tension résistif permettant le raccordement direct d'une tension voisine de 10 V à la fem d'une pile étalon a été conçu et réalisé au BIPM.

Principe du diviseur de tension résistif (figure 1)

Dans le but de simplifier la procédure de mesure, le diviseur a été conçu de façon à pouvoir être raccordé directement aux bornes de la référence de tension de 10 V (\underline{E}) à étalonner. Afin de rendre négligeable l'effet de charge de la référence par le diviseur, celui-ci est alimenté par une source de courant auxiliaire ajustable, \underline{i} . Le courant est ajusté de façon à ce que la chute de tension $\underline{R}_T \times \underline{i}$ (\underline{R}_T est la résistance totale du diviseur) soit proche de \underline{E} . La résistance interne de la référence de 10 V, \underline{R}_i , dépend du type d'appareil utilisé mais est dans tous les cas actuellement connus inférieure ou égale à 100 Ω . Dans le cas où $\underline{R}_i = 100 \Omega$ et compte tenu du fait que $\underline{R}_T \approx 100\,000 \Omega$, l'ajustage du courant \underline{i} doit être fait à 1×10^{-5} près en valeur relative si l'on souhaite limiter à 1×10^{-8} l'erreur due à la charge. Ce réglage s'effectue en observant la différence de potentiel entre les bornes C et C' : elle doit être ajustée à une valeur inférieure à 100 μV . On peut alors court-circuiter les bornes C et C' : l'incertitude due à la charge sera inférieure à 1×10^{-8} en valeur relative.

Le diviseur résistif proprement dit est constitué d'un assemblage en série de trois éléments : un diviseur série-parallèle de type Hamon de rapport 9 réalisé à partir de 3 résistances de 30 000 Ω , constituées chacune de trois résistances de 10 000 Ω afin de diminuer l'effet du coefficient de puissance (la valeur parallèle du Hamon est $\underline{R}_A = 10\,000 \Omega$, sa valeur série est $9 \underline{R}_A = 90\,000 \Omega$), une résistance fixe $\underline{r} = 202 \Omega$ et un deuxième dispositif Hamon semblable au premier ($\underline{R}_B = 10\,000 \Omega$, $9 \underline{R}_B = 90\,000 \Omega$). Ces trois éléments sont supposés former une chaîne additive de résistance, AB, avec deux points intermédiaires disponibles : A' et B'. Sur la figure 1 on a supposé que le Hamon "A" est en parallèle (résistance \underline{R}_A) et que le Hamon "B" est en série (résistance $9 \underline{R}_B$). La différence de potentiel apparaissant entre les bornes A' et A est donc :

$$\underline{e}_A = \frac{\underline{r} + \underline{R}_A}{\underline{R}_A + 9 \underline{R}_B + \underline{r}} \underline{E}.$$

Si dans un deuxième temps on place le Hamon "A" en série et le Hamon "B" en parallèle, la différence de potentiel entre les bornes B et B' sera

$$e_B = \frac{r + R_B}{R_B + 9 \frac{R_A}{r}} E.$$

Il est facile de montrer que, en négligeant devant 1 un terme du second ordre de la forme $\frac{9 \frac{r^2}{R_A}}{100}$ où $\frac{r}{R_A} = \varepsilon - 1$, le produit $e_A \times e_B$ peut s'écrire :

$$e_A \times e_B = \frac{E^2}{100} \times \frac{\left(1 + \frac{r}{R_A}\right) \left(1 + \frac{r}{R_B}\right)}{\left(1 + \frac{r}{10 R_A}\right) \left(1 + \frac{r}{10 R_B}\right)}.$$

La valeur de la tension E peut donc se déduire de la mesure de e_A et e_B (proches de 1,018 V) et de la connaissance des rapports de résistance $\frac{r}{R_A}$ et $\frac{r}{R_B}$. On notera que, compte tenu du fait que $\frac{r}{R_A} \approx \frac{r}{R_B} \approx 2 \times 10^{-2}$, il suffit de connaître ces deux rapports à 5×10^{-7} près pour que l'incertitude correspondante sur la valeur de E ne dépasse pas 1×10^{-8} .

Réalisation du diviseur de tension résistif (figure 2)

Le schéma de réalisation du diviseur est représenté sur la figure 2. La principale difficulté consiste à réaliser les connexions en série ou en parallèle des deux Hamon tout en respectant la condition d'additivité des trois éléments du diviseur. Pour cela on utilise un jeu de quatre tiges coniques en cuivre doré (deux pour chaque Hamon)

enfichables dans des plots constitués chacun de deux demi-pièces en cuivre doré isolées et délimitant une cavité conique adaptée à la taille des tiges. Les plots, ainsi que les tiges, sont suffisamment massifs, et les résistances de contact entre plots et tiges enfichés suffisamment faibles ($0,1 \text{ m}\Omega$) pour que l'on puisse considérer les points de jonction ainsi définis comme sensiblement équipotentiels (ces points correspondent aux bornes B, A', B' et A du schéma de principe de la figure 1). On a pu évaluer, par des mesures à quatre bornes, la résistance résiduelle des plots enfichés : environ $0,05 \text{ m}\Omega$. En supposant cette résistance résiduelle localisée entre les deux demi-plots, eux-mêmes considérés comme ayant une résistance nulle, on trouve que la résistance du Hamon en parallèle excède la valeur idéale de 5×10^{-9} environ en valeur relative. On peut d'ailleurs appliquer cette correction ($5 \times 10^{-9} \pm 5 \times 10^{-9}$) à la valeur nominale du rapport du diviseur.

Procédure d'utilisation du diviseur résistif

Le diviseur est utilisé suivant deux configurations : en configuration "A" le Hamon "A" est en parallèle et le Hamon "B" en série, en configuration "B" le Hamon "A" est en série et le Hamon "B" en parallèle. Chaque configuration peut-être utilisée avec le courant i traversant le diviseur suivant l'une ou l'autre des polarités (il convient évidemment d'adapter le raccordement de la tension à mesurer \underline{E} et de la pile étalon de référence à la polarité choisie). Afin d'éliminer les dérives linéaires des fem thermiques, les mesures sont faites suivant les configurations successives A^+ , A^- , B^- , B^+ , B^- , A^- , A^+ . Pour chaque configuration on note la valeur affichée sur le potentiomètre (POT, voir détail en figure 3) utilisé pour équilibrer le détecteur de zéro (DZ), ainsi que la déviation résiduelle de ce dernier. Ces données permettent d'évaluer la valeur des tensions de sortie \underline{e}_A et \underline{e}_B du diviseur à partir de la valeur de la pile étalon de référence et par conséquent de calculer la tension \underline{E} , dans la mesure où les rapports $\frac{r}{R_A}$ et $\frac{r}{R_B}$ sont connus.

Procédure pour la mesure des rapports $\frac{r}{R_A}$ et $\frac{r}{R_B}$

Remarquons tout d'abord qu'il suffit de mesurer $\frac{r}{R_A}$ (ou $\frac{r}{R_B}$), car il est possible de calculer le rapport $\frac{R_A}{R_B} = 1 + \underline{\varepsilon}$ avec une incertitude convenable (inférieure à 1×10^{-7}), pourvu que $\underline{\varepsilon}$ soit inférieur à 1×10^{-4} , en utilisant les valeurs mesurées de \underline{e}_A et \underline{e}_B et la relation :

$$\frac{\underline{e}_A}{\underline{e}_B} \approx 1 + \left(\frac{9}{5} - 1,08 \frac{r}{R_A} \right) \underline{\varepsilon}$$

que l'on peut établir facilement à partir des expressions de \underline{e}_A et de \underline{e}_B .

La mesure de $\frac{r}{R_A}$ se fait à partir de deux étalons \underline{R}_O et \underline{r}_O , de résistance $\underline{R}_O = 10\ 000\ \Omega$ et $\underline{r}_O = 200\ \Omega$, dont on suppose le rapport connu à mieux que 5×10^{-7} près. Un pont de Warshawsky*, aux bras auxiliaires fixes, (figure 4) permet de comparer directement au rapport $\frac{\underline{r}_O}{\underline{R}_O}$ le rapport $\frac{\underline{r}'}{\underline{R}_A}$ où $\underline{r}' \approx 200\ \Omega$ représente la valeur de la résistance \underline{r} en parallèle avec une résistance auxiliaire de $20\ k\Omega$ (constituée de la résistance \underline{R}_B en série avec un étalon de $10\ k\Omega$). Connaissant approximativement (à 10^{-5} près) la valeur de la résistance auxiliaire, on en déduit facilement le rapport $\frac{r}{R_A}$.

Une autre méthode de mesure de ce rapport consiste à comparer, par une méthode de substitution, les résistances \underline{r}' et \underline{r}_O d'une part et les résistances \underline{R}_A et \underline{R}_O d'autre part. Un ohmmètre numérique à 4 bornes, affichant sept chiffres significatifs, peut-être utilisé pour ces comparaisons.

* I. Warshawsky : Multiple bridge circuits for measurement of small changes in resistance. Review of scientific instruments, vol. 26, n° 7, 711-715 (1955).

Estimation des incertitudes

Le tableau suivant donne l'estimation des incertitudes (correspondant à un écart-type) sur l'étalonnage d'une tension de 10 V :

- incertitude de type A	: 15×10^{-9}
- résistance résiduelle des plots	: 5×10^{-9}
- coefficient de puissance des "Hamon"	: 2×10^{-9}
- résistances de fuite	: 10×10^{-9}
- effet de charge (pour $R_i = 100 \Omega$)	: 10×10^{-9}
- évaluation des rapports $\frac{r}{R_A}$ et $\frac{r}{R_B}$: 10×10^{-9}
- étalonnage de la pile étalon de référence	: 20×10^{-9}
<hr/>	
TOTAL	: 31×10^{-9}

Conclusion

Le diviseur de tension résistif construit au BIPM permet l'étalonnage des sorties 10 V des références de tension à diodes de Zener avec une incertitude totale estimée à $3,1 \times 10^{-8}$ en valeur relative. Cette incertitude est comparable à la reproductibilité à court terme (sur quelques jours) des meilleurs étalons de tension de 10 V actuellement disponibles. Elle est donc suffisamment faible pour satisfaire les demandes actuelles d'étalonnage.

Légende des figures

Figure 1 : Schéma de principe du diviseur de tension.

Figure 2 : Schéma de réalisation du diviseur.

Figure 3 : Le potentiomètre utilisé pour l'équilibrage du détecteur de zéro.

Figure 4 : Pont de Warshawsky pour l'étalonnage du rapport $\frac{r}{R_A}$.

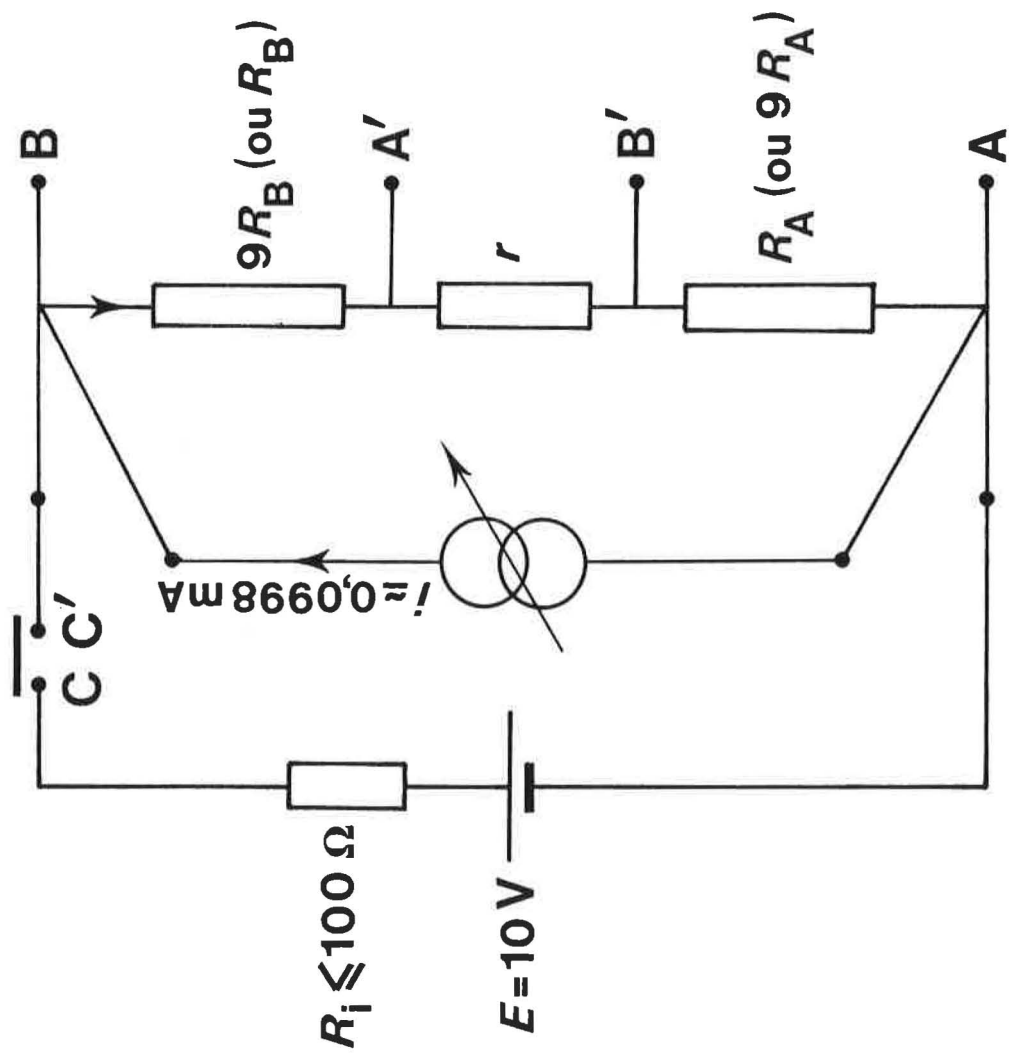


Figure 1

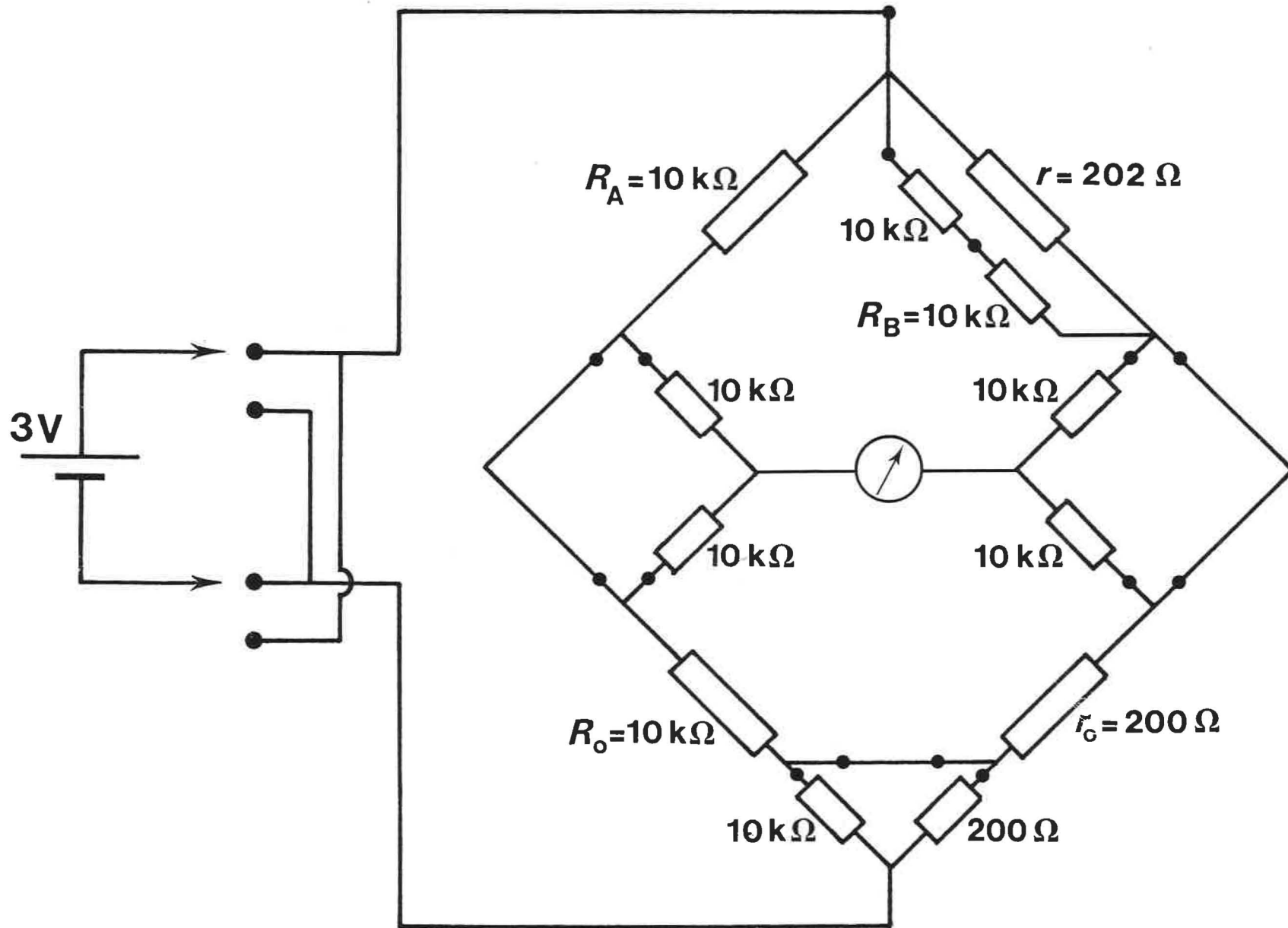


Figure 4

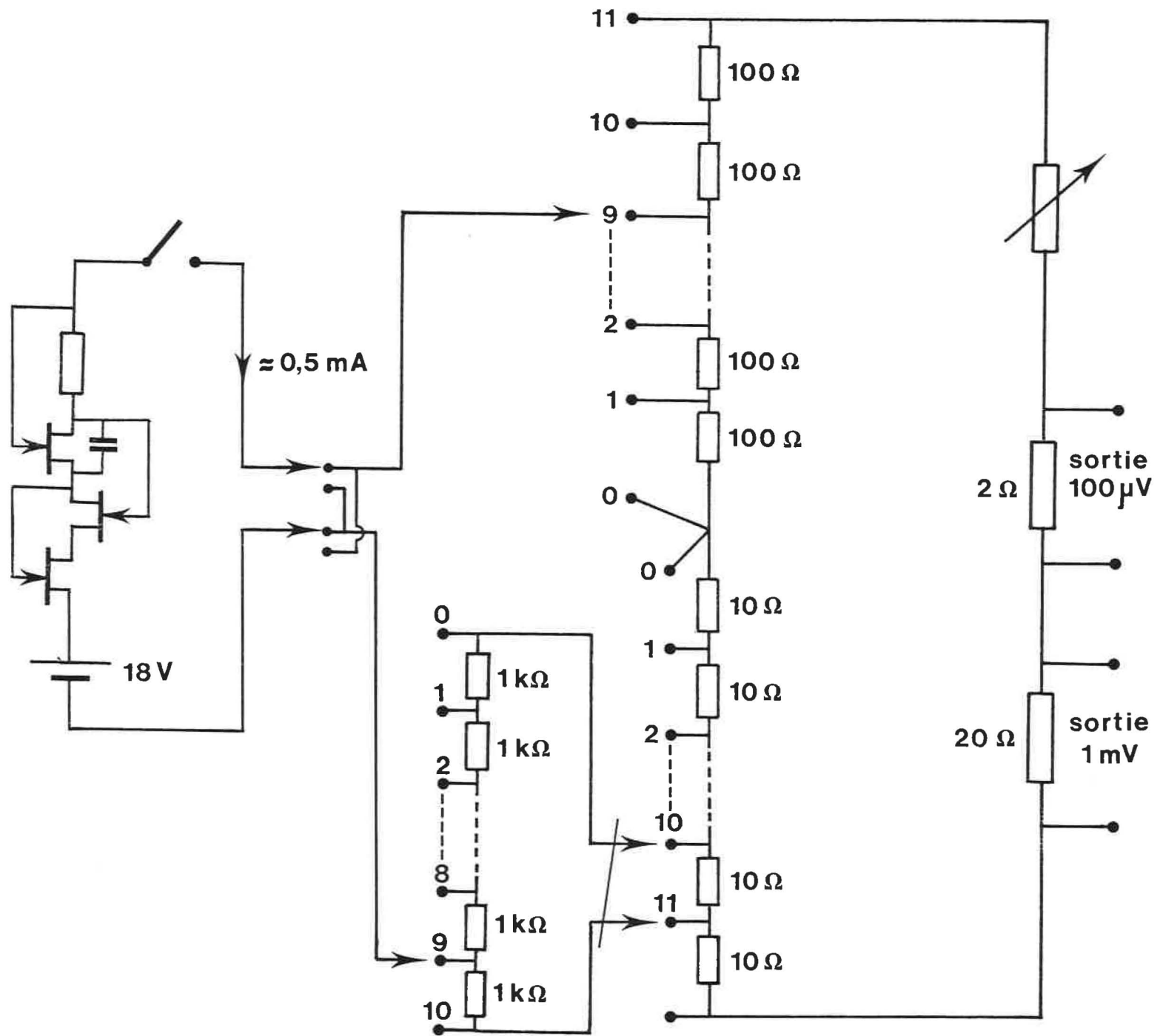


Figure 3

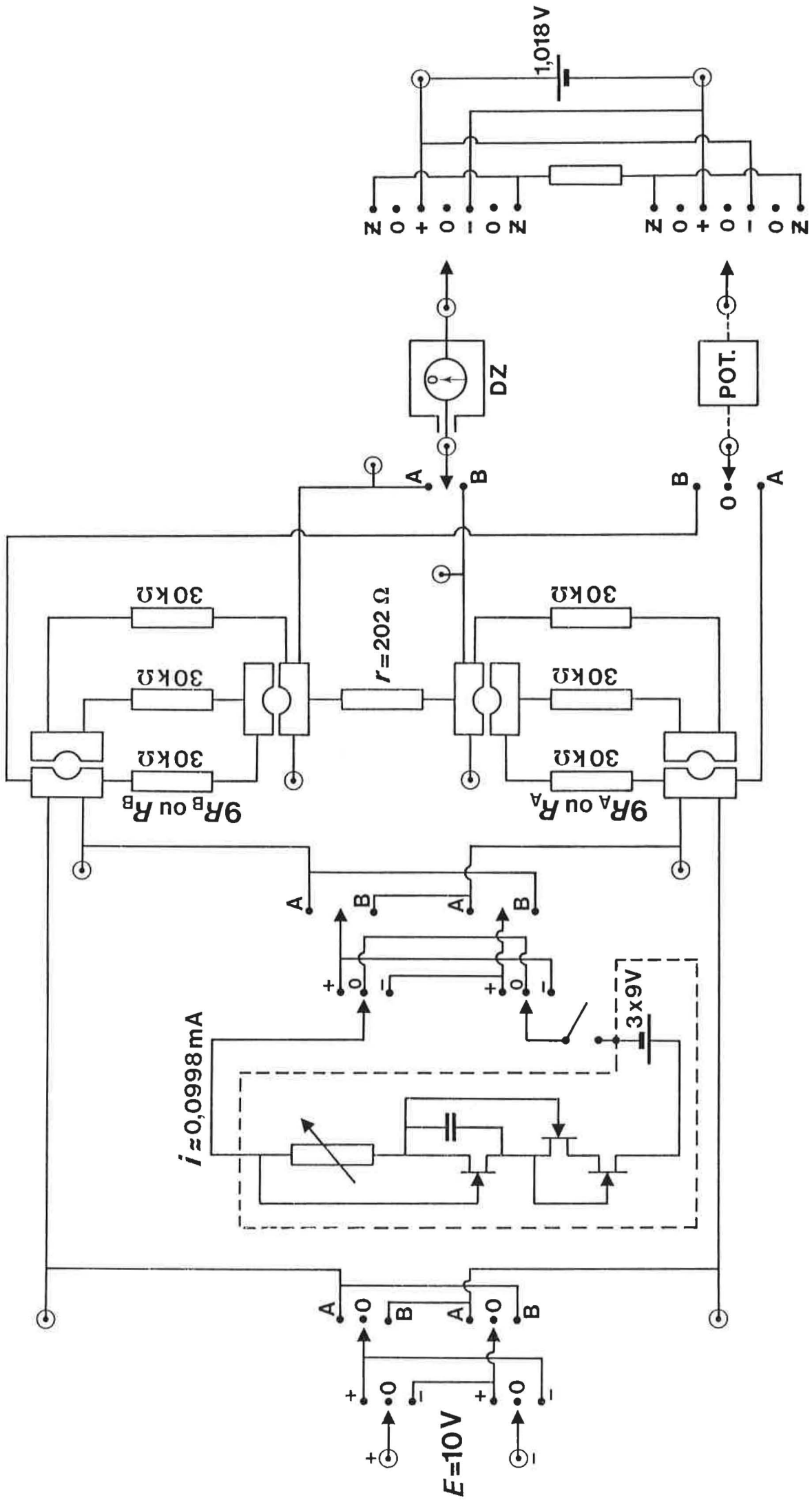


Figure 2