

Coulombmètre

par R. MOREAU
Bordeaux

1. PRINCIPE DE L'APPAREIL

C'est l'ensemble d'une résistance R et d'un intégrateur.

Soit une tension $e(t)$ susceptible de varier à partir de l'instant $t = 0$ et nulle auparavant : un intégrateur fait correspondre à $e(t)$, la tension de sortie :

$$s(t) = \frac{1}{\tau} \int_0^t e(t) dt$$

La résistance R est branchée selon le schéma de la figure 1 :

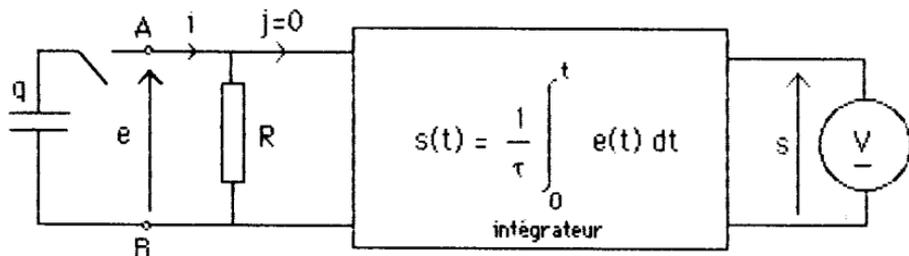


Figure 1

Supposons que l'on branche à l'entrée, à l'instant $t = 0$, un condensateur de capacité C préalablement chargé sous la tension E , et portant donc sur l'armature reliée à A la charge initiale :

$$q(0) = Q = CE.$$

A partir de l'instant initial, en notant $q(t)$ la charge portée à l'instant t par l'armature reliée à A , on a :

$$i = - dq/dt$$

et puisque $e = Ri$, on peut écrire : $e = -R dq/dt$.

En vertu de la relation reliant $s(t)$ et $e(t)$:

$$s(t) = -\frac{R}{\tau} [q(t) - q(0)] = \frac{R}{\tau} [Q - q(t)]$$

Pour t supérieur au temps de décharge du condensateur ($t > 3 RC$), on peut négliger $q(t)$ et prendre $q(t) = 0$, d'où :

$$s(t) = \frac{R}{\tau} Q = Cte$$

Les constantes R et τ font partie de l'appareil, si bien que, après la décharge, la sortie est proportionnelle à la charge Q portée primitivement par l'armature du condensateur reliée à A .

On a bien un coulombmètre.

2. QUELQUES USAGES D'UN COULOMBMÈTRE

2.1. Supposons que notre coulombmètre soit réglé de manière que la tension de sortie augmente de $4,0 \text{ V}$ quand la charge Q vaut $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ C}$ (dans la réalisation pratique que nous proposerons au paragraphe 3, la constante τ est réglable autour de la valeur moyenne de 10^{-2} s), si donc nous prenons pour la résistance R une valeur voisine de 400Ω , nous pouvons bien obtenir :

$$\frac{s}{Q} = \frac{R}{\tau} = 4,0 \cdot 10^4 \text{ V C}^{-1}$$

Munissons nous par exemple de deux condensateurs de $10,0 \mu\text{F}$ chacun, ($C_1 = C_2 = 10,0 \mu\text{F}$) et d'un troisième de capacité $C_3 = 5,0 \mu\text{F}$, puis réglons la tension de sortie E d'une alimentation stabilisée pour qu'elle soit égale à $10,0 \text{ V}$.

En chargeant C_1 et C_2 sous la tension E , on dispose sur leurs armatures, de charges opposées de valeur absolue égale à $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ C}$, tandis que, dans les mêmes conditions, les charges des armatures de C_3 ont une valeur absolue de $5,0 \cdot 10^{-5} \text{ C}$.

Les durées de décharge des condensateurs (de l'ordre de 10^{-2} s), ne sont pas appréciables, aussi, lorsque nous branchons aux bornes de R un condensateur chargé, avons nous l'impression que la tension de sortie de l'intégrateur subit une discontinuité.

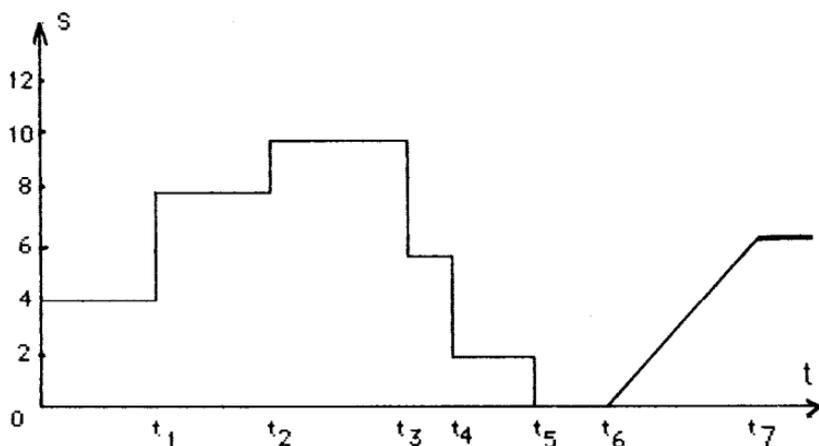


Figure 2

Les variations de la tension $s(t)$ représentées sur la figure 2 peuvent ainsi être obtenues de la manière suivante :

A l'instant $t = 0$, on connecte C_1 , chargé sous E , à la résistance R , sa plaque positive étant reliée à A (figure 1). A la date t_1 , on recommence ; à t_2 , c'est C_3 , toujours chargé sous E que l'on décharge dans le coulombmètre en reliant son armature positive au point A . Aux dates t_3 , t_4 et t_5 , ce sont les armatures négatives de C_1 (ou C_2) puis de C_3 (chargés) que l'on relie à A .

Entre deux décharges, la tension d'entrée e est nulle, et s , la tension de sortie ne varie pas.

De t_6 à t_7 , on envoie dans R un courant d'intensité $50 \mu\text{A}$ (par exemple ; il suffit pour cela de placer, en série avec R et le générateur de tension $E = 10 \text{ V}$ une résistance de $200 \text{ k}\Omega$) : on constate alors que la tension $s(t)$ augmente de 2 V par seconde pendant toute la durée d'application de ce courant (dans la limite de fonctionnement linéaire de l'appareil qui se sature quand la tension de sortie atteint 13 ou 14 V).

On peut aussi remettre le coulombmètre à zéro à un instant quelconque, obtenir des tensions s négatives en créant des intensités $i(t)$ négatives (figure 1), etc.

On a là un bon exemple d'application d'intégrateur électronique, qui, comme un compteur d'énergie électrique, d'eau ou de gaz, ou un compteur kilométrique, etc, donne à tout instant le bilan de la grandeur qu'il est chargé d'appréhender (ici la charge totale Q qui a traversé R entre 0 et t).

2.2. Conservation de la charge

Charger C_1 sous la tension E et mesurer la charge Q correspondante : on trouve $s_Q = 4,0$ V.

Recharger C_1 puis l'isoler quand il est chargé. Brancher C_2 , déchargé, en parallèle sur C_1 , et mesurer la charge Q_1 que C_2 a pris à C_1 dans cette opération : ($Q_1 = Q/2$; $s_{Q1} = 2,0$ V) ; recommencer, c'est-à-dire amener C_2 en contact avec C_1 puis le décharger dans le coulombmètre sans remettre celui-ci à zéro : on a évidemment $s_{Q1} + s_{Q2} = 3,0$ V. Ensuite on trouve $s_{Q1} + s_{Q2} + s_{Q3} = 3,5$ V ; en ajoutant alors la charge résiduelle de C_1 ($Q/8$), on retrouve bien la charge initiale :

$$s_{Q1} + s_{Q2} + s_{Q3} + s_{Q4} = 4,0 \text{ V.}$$

2.3. Propriétés des groupements de condensateurs

Nous n'insistons pas.

2.4. Variations de charge de condensateurs placés en série.

Exemple simple : Placer en série C_1 et C_3 , déchargés. Charger l'ensemble sous la tension $E' = 3E = 30$ V.

On constate sans peine que $|Q_{C1}| = |Q_{C3}| = CE$: Le condensateur de $5,0 \mu\text{F}$ s'est chargé sous $2E = 20$ V, celui de $10,0 \mu\text{F}$ sous $E = 10$ V, l'ensemble se comporte comme un condensateur de capacité $C = C_1/3$.

2.5. Petit problème

Charger C_1 sous la tension $E = 10$ V ($Q_M = 1,0 \cdot 10^{-4}$ C ; $s_{QM} = 4,0$ V), comme l'indique la figure 3a ; le retourner et placer C_2 , déchargé, en série avec C_1 .

Appliquer de nouveau la tension E à l'ensemble (figure 3b). Mesurer ensuite les charges Q_P de C_2 , et Q_N , de C_1 .

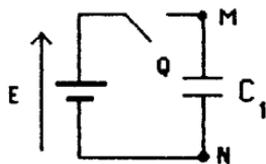


Figure 3a

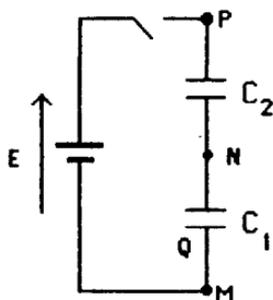


Figure 3b

On trouve $s_{QP} = 4,0 \text{ V}$, ($Q_P = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ C}$), et $Q_N = 0$

Expliquer...

3. RÉALISATION PRATIQUE DE L'INTÉGRATEUR

Le montage suivant (figure 4) a été présenté dans le B.U.P. n° 651 de Février 1983 (corrigé par l'erratum du numéro 652, p. 702), sous le nom de fluxmètre : un fluxmètre peut en effet être simplement constitué d'une bobine siège d'une f.é.m. d'induction $e = -d\varphi/dt$, suivie d'un intégrateur.

Il se compose de deux étages, le premier est effectivement un intégrateur, le second est un amplificateur de tension de gain réglable. Les deux amplificateurs opérationnels doivent obligatoirement posséder un étage d'entrée composé de transistors à effet de champ (exemple TL 081), ce qui exclue les amplificateurs du type 741, dont les courants d'entrée sont trop importants.

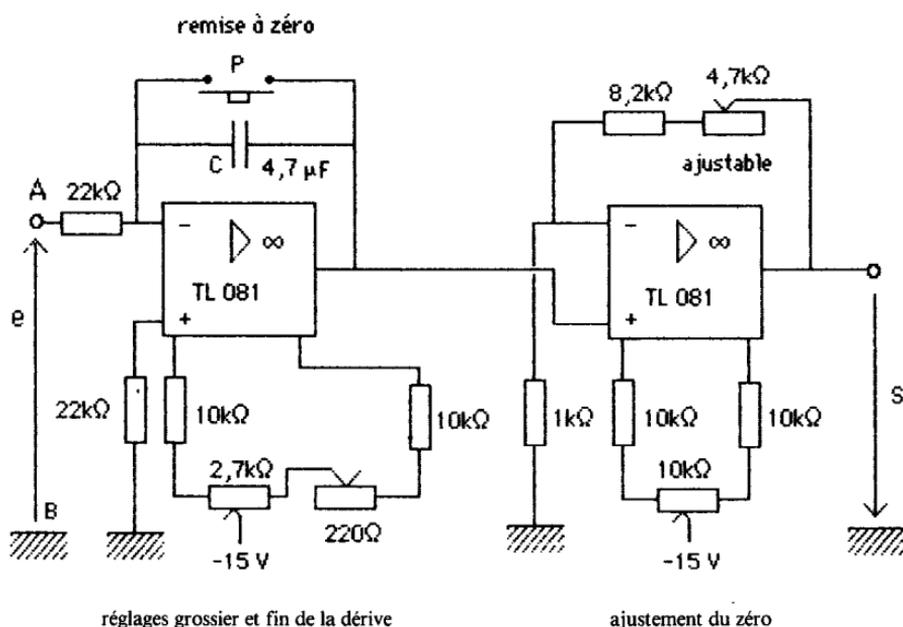


Figure 4

L'appareil doit comporter un bouton poussoir P pour la remise à zéro ; le zéro sera ajusté grâce à un potentiomètre de 10 kΩ placé dans le circuit de réglage de décalage de zéro de l'amplificateur.

Il doit aussi comporter deux potentiomètres de réglages de la dérive (le condensateur a tendance à se charger lentement, même quand la tension e est nulle, à cause de petits défauts de l'amplificateur opérationnel d'entrée).

4. RÉGLAGES

Laisser l'appareil sous tension pendant une vingtaine de minutes avant de procéder aux réglages : les courants de décalages d'entrée des amplificateurs opérationnels sont sensibles aux variations de température.

Décharger le condensateur C par le poussoir P . Placer à la sortie de l'intégrateur un contrôleur analogique de calibre $0,5\text{ V}$ et agir sur le réglage grossier de la dérive pour en stabiliser l'aiguille. Décharger à nouveau le condensateur (action sur P). Placer le contrôleur sur le calibre 150 mV et agir sur le réglage fin de la dérive : l'aiguille ne doit plus se mouvoir que très faiblement (quelques mV par seconde). Décharger de nouveau C et tout en maintenant l'action sur P , ajuster le zéro de la tension s de sortie.

Utiliser ensuite pour les mesures un voltmètre numérique sur un calibre élevé, de manière à ce que les élèves ne soient pas gênés par les dérives inévitables : sur le calibre 200 V d'un voltmètre à 2000 points, par exemple, les indications de l'appareil pour les manipulations correspondant à la figure 2, seront $4,0\text{ V}$; $8,0\text{ V}$; $10,0\text{ V}$; $6,0\text{ V}$ etc. car, tant que la dérive n'a pas atteint 50 mV , elle ne peut être prise en compte (sur le calibre 20 V , on aurait par exemple $4,01\text{ V}$; $8,02\text{ V}$; $10,03\text{ V}$; $6,04\text{ V}$ etc.) ; il ne s'agit pas d'une malhonnêteté intellectuelle, car la dérive, phénomène annexe et aléatoire rend illusoire la précision du multimètre sur un calibre plus faible. De toute manière on peut toujours, après coup, si l'on a des remords, montrer la dérive en revenant à un calibre plus faible.

Le réglage de la constante τ s'effectue de la manière suivante, très simple : Charger $C_1 = 10\ \mu\text{F}$ sous la tension $E = 10,0\text{ V}$. Le décharger dans le coulombmètre préalablement remis à zéro. Régler alors la résistance ajustable de $4,7\text{ k}\Omega$ pour que la tension de sortie soit égale à $4,0\text{ V}$.

5. CONCLUSIONS

Je dispose d'appareils de ce type depuis une dizaine d'années ; ils voyagent beaucoup..., il m'est arrivé d'enlever les amplificateurs opérationnels d'un montage, à certains moments, parce que j'en avais besoin ailleurs, et de les remplacer plus tard par d'autres : ces montages continuent de me donner entièrement satisfaction, comme coulombmètres, fluxmètres etc.