

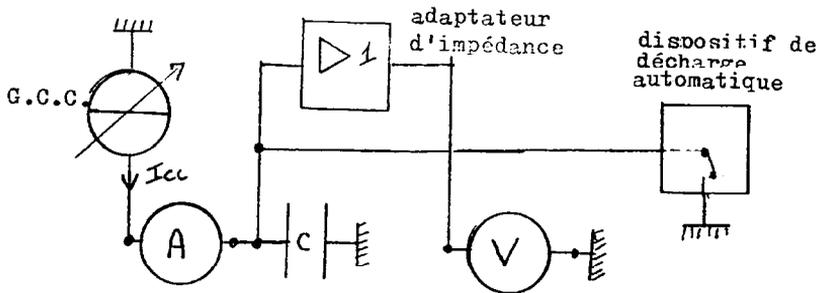
Charge d'un condensateur

par Y. CAULET †
Lycée polyvalent, 07100 Annonay

1. PRINCIPE

La charge d'un condensateur à courant constant a fait l'objet de plusieurs montages, notamment ceux décrits dans le B.U.P. n° 634 (articles de LETZGUS et de VAILLANT) et dans le B.U.P. n° 675 (article de BARBASTE et MOREAU)*.

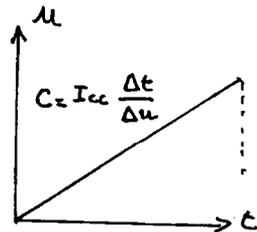
Schéma fonctionnel :



Si t est la durée de charge de C de 0 à u , la charge q de C a deux expressions : $q = I_{cc} \times t$ et $q = C \times u$ on en tire :

$$u = \frac{I_{cc}}{C} \times t$$

La représentation graphique de $u = f(t)$ est donc une droite passant par l'origine. Son tracé expérimental la détermination de son coefficient angulaire permet de déterminer C . (I_{cc} étant donné par l'ampèremètre).



* Voir aussi B.U.P. n° 691 (article de B. ROULET) et B.U.P. n° 711 (article de J.C. FROMONT et J.Y. GANCEL), parus après la rédaction de cet article (N.D.L.R.)

Deux types de manipulations sont possibles :

1) Grosses capacités (plusieurs centaines de microfarads)

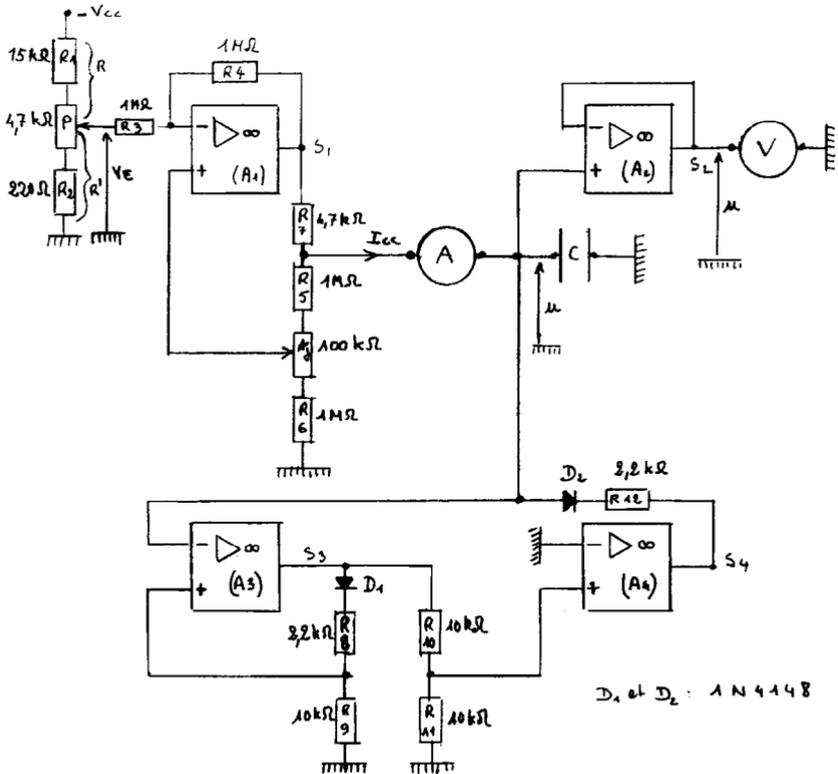
On utilise un ampèremètre, un voltmètre, un chronomètre. Par exemple, avec $I_{cc} = 100 \mu\text{A}$, $C = 2200 \mu\text{F}$, $dt/du = C/I_{cc} = 22 \text{ s/V}$.

2) Faibles capacités (quelques fractions de microfarad)

On utilise un ampèremètre et un oscillographe (charge et décharge répétitive). Par exemple avec $I_{cc} = 100 \mu\text{A}$ et $C = 0,1 \mu\text{F}$, $dt/du = 1 \text{ ms/V}$.

2. SCHÉMA D'UN MONTAGE «TOUT A.Op.»

Ce montage très simple fait intervenir le circuit intégré courant, TL 084, qui est un amplificateur opérationnel quadruple, douze résistances, deux diodes, un ajustable et un potentiomètre de commande de I_{cc} . Une alimentation symétrique est nécessaire ($\pm V_{cc}$).



3. FONCTIONNEMENT

1 - A_1 est un A.Op. autour duquel est construit un générateur de courant constant commandé par la tension V_E . Si A_j est convenablement réglé (démonstration en annexe 1) : $I_{cc} = -V_E / R_7$.

L'impédance de sortie du générateur de Thévenin équivalent au pont diviseur $R_1 - P - R_2$ vaut au maximum

$$R_T = \frac{R'_{\max} \cdot R_{\min}}{R'_{\max} + R_{\min}} \quad 3,7 \text{ k}\Omega.$$

Cette valeur s'accorde bien avec l'impédance d'entrée de V_E qui vaut $1 \text{ M}\Omega$. Dans ces conditions :

$$V_E = -\frac{V_{cc} \cdot R'}{R + R'} \quad \text{et} \quad I_{cc} = \frac{R' \cdot V_{cc}}{(R + R') \cdot R_7} \approx \frac{R' \cdot V_{cc}}{61,7 \cdot 10^6} \quad (\text{A})$$

Donc :

$$35,2 \leq I_{cc} \leq 788 \mu\text{A} \quad \text{si} \quad V_{cc} = 15 \text{ V}$$

$$28,2 \leq I_{cc} \leq 630 \mu\text{A} \quad \text{si} \quad V_{cc} = 12 \text{ V},$$

soit un rapport de 22.

2 - A_2 est un A.Op. monté en suiveur, d'impédance d'entrée égale à 10^{12} ohms, servant d'adaptateur d'impédance pour le voltmètre.

3 - A_3 est un A.Op. monté en comparateur à hystérésis dissymétrique ; il prélève la tension u aux bornes du condensateur (impédance d'entrée 10^{12} ohms) et la compare à deux tensions de référence :

- soit $V_1 = 0$ si S_3 est à la tension $-V_{\text{sat}}$ (car la diode D_1 est bloquée),

- soit $V_2 = (V_{\text{sat}} - V_s) \cdot R_9 / (R_8 + R_9)$ si S_3 est à la tension $+V_{\text{sat}}$.

En prenant comme ordre de grandeur :

- tension de saturation de l'A.Op. $V_{\text{sat}} = V_{cc} - 0,9$ (en volt),

- tension de seuil de la diode D_1 $V_s = 0,7$ volt.

On obtient : $V_2 = 11 \text{ V}$ si $V_{cc} = 15 \text{ V}$ et $V_2 = 8,5 \text{ V}$ si $V_{cc} = 12 \text{ V}$.

Le fonctionnement de A_3 est en résumé le suivant :

- si u atteint V_2 par valeurs croissantes alors S_3 bascule à $-V_{\text{sat}}$,

- si u atteint $V_1 = 0$ par valeurs décroissantes alors S_3 bascule à $+V_{\text{sat}}$.

4 - A_4 est un A.Op. monté en comparateur à zéro, non inverseur. Sa sortie S_4 reproduit les tensions présentes sur S_3 .

Lorsque le condensateur C se charge de $u = 0$ à $u = V_2$ sous courant constant I_{cc} , S_3 et S_4 sont à la tension $+V_{sat}$, la diode D_2 est bloquée et S_4 n'intervient pas dans la charge de C.

Lorsque u atteint V_2 , S_3 et S_4 basculent à la tension $-V_{sat}$, C se décharge alors dans S_4 à travers D_2 et R_{12} qui limite l'intensité maximale de décharge à environ 12 mA. (décharge exponentielle).

Lorsque u atteint $V_1 = 0$ en fin de décharge, S_3 et S_4 basculent à nouveau à la tension $+V_{sat}$, D_2 se bloque et le cycle recommence...

5 - Remarques :

a) On aurait pu faire décharger C directement dans S_3 et économiser ainsi un A.Op., mais des crêtes d'intensité de plus de 12 mA dans S_3 risquaient de perturber le fonctionnement de A_3 .

b) Le pont diviseur $R_{10} - R_{11}$ a pour fonction de ramener la tension différentielle d'entrée de A_4 à $V_{sat}/2$; pour éviter un éventuel phénomène de verrouillage.

c) La décharge de C se fait sous une tension initiale de :

$$V_2 + V_{sat} - V_s = 24,4 \text{ V (pour } V_{cc} = 15 \text{ V).}$$

Dans ces conditions le temps de décharge :

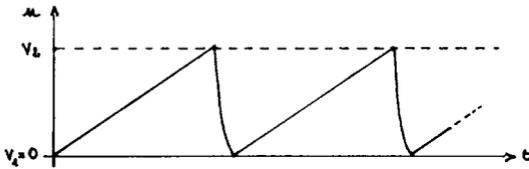
$$t_d = -R_{12} \cdot C \cdot \ln(11/24,4) \approx 0,8 \cdot 8 R_{12} \cdot C.$$

d) Le temps de charge t_c vérifie la relation $t_c = C \cdot V_2 / I_{cc}$.

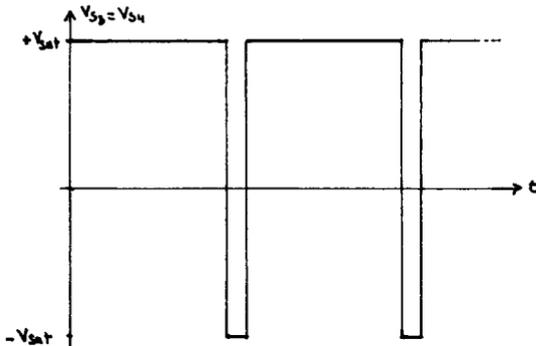
Il est alors facile d'établir : $t_c / t_d = V_2 / (0,8 \cdot R_{12} \cdot I_{cc})$ rapport indépendant de C. Avec $V_{cc} = 15 \text{ V}$, $V_2 = 11 \text{ V}$ ce rapport varie de 8 à 180 suivant le réglage de I_{cc} .

Les diagrammes de fonctionnement sont reproduits ci-après.

4. DIAGRAMMES



Charges linéaires de C suivies de décharges exponentielles.



Tension de sortie des comparateur A_3 , A_4 , permettant la décharge du condensateur.

5. CIRCUIT IMPRIMÉ

Carte au format (80 × 60) mm².

Ordre des opérations :

après réalisation et perçage de la

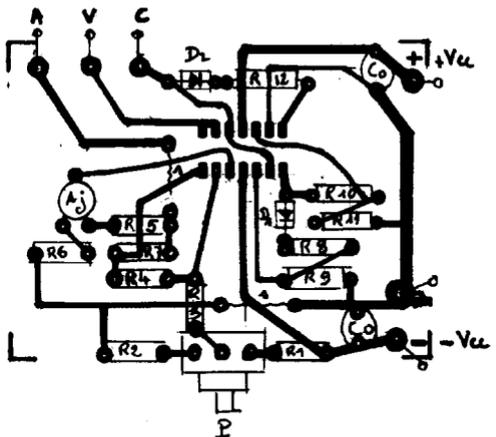
carte, souder dans l'ordre :

straps, résistances, diodes, A_j , support 14 broches, cosses pognard, condensateurs, 12 résistances 1/4 watt : [220 Ω (1) ; 2,2 k Ω (2) ; 4,7 k Ω (1) ; 15 k Ω (1) ; 10 k Ω (3) ; 1 M Ω (4)].

1 ajustable A_j 100 k Ω horizontal.

1 potentiomètre 4,7 k Ω linéaire.

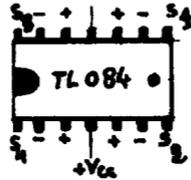
2 diodes 1 N 4148.



2 condensateurs $C_0 = 0,1 \mu\text{F}$ céramique sur l'arrivée de l'alimentation.
 2 straps s (queues de résistances).
 6 cosses poignard (A, V, C, $+V_{cc}$, $-V_{cc}$ et masse).

Composants

TL 084 monté à l'envers. Support 14 broches.

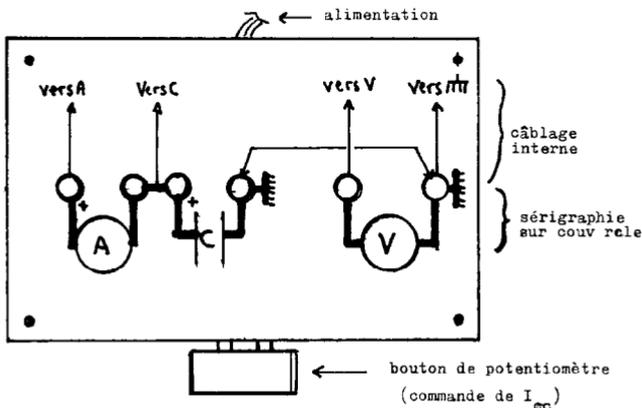


6. CÂBLAGE, MISE EN COFFRET

Un coffret du type «Teko P2» convient ; le potentiomètre, soudé sur le circuit imprimé le maintient à l'intérieur du coffret convenablement percé au centre de sa face avant. Les trois fils d'alimentation peuvent être munis de fiches banane de couleurs différentes pour se connecter sur l'alimentation symétrique (type pH-mètre) ; il est alors prudent de remplacer les deux cosses poignard situées sur le $+V_{cc}$ et le $-V_{cc}$ par deux diodes type 1N 4007 pour protéger le circuit intégré contre d'éventuelles inversions de polarité.

La solution la moins onéreuse, pour du matériel de T.P., consiste à équiper les alimentations symétriques de sortie à socles DIN 3 broches et d'alimenter les montages avec des prises mâles du même type.

Sur le dessus du coffret on installe 6 douilles de diamètre 4 mm avec sérigraphie représentant l'ampèremètre, le condensateur, et le voltmètre à connecter. Le schéma ci-dessous indique une disposition possible et le câblage à réaliser.



7. RÉGLAGE

Le seul réglage à faire est celui de l'ajustable A_j de façon à obtenir un courant I_{cc} le plus rigoureusement possible constant pendant toute la durée de la charge du condensateur, u variant de 0 à V_2 .

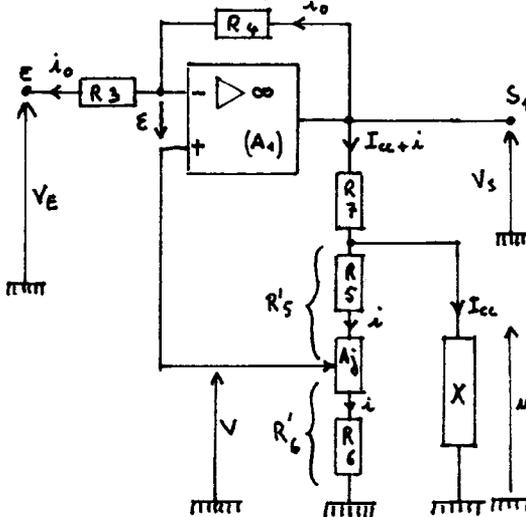
On procède par retouches successives A_j étant initialement au point milieu : monter l'ampèremètre (calibre 0,5 mA) ; $C = 1000 \mu\text{F}$ (ou plus) ; le voltmètre (cal. 15 V) ; régler I_{cc} entre 100 et 200 μA ; retoucher A_j jusqu'à ce que I_{cc} soit le même en début et en fin de charge.

Autre méthode : on procède comme ci-dessus en remplaçant C par une boîte de résistances R pouvant varier de 0 à 100 $\text{k}\Omega$ par bonds de 10 $\text{k}\Omega$; I_{cc} doit rester constant quelque soit R et u ; sous réserve que le produit $R \cdot I_{cc}$ reste inférieur à V_2 .

8. ANNEXE

8.1. Fonctionnement du générateur de courant A_1

(Convertisseur tension - courant)*.



* Voir aussi B.U.P. n° 711, p. 222. Même remarque qu'en note 1 (N.D.L.R.)

L'A.Op. est supposé parfait : $\varepsilon = 0$ (gain infini).

Intensité sur les entrées + et - nulle (impédance d'entrée infinie).

Résistance à 5 %, de valeur nominale :

$$R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 1 \text{ M}\Omega ;$$

$$R_7 = 4,7 \text{ k}\Omega ; A_j = 100 \text{ k}\Omega.$$

x est une charge quelconque ; $0 \leq u \leq V_2 < V_{\text{sat}}$.

Dans les mailles de réaction négative et d'entrée :

$$V_S = R_4 i_o + V \Rightarrow V_S - V = R_4 i_o$$

$$\frac{V_S - V}{V_E - V} = -\frac{R_4}{R_3} \Rightarrow V_S = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) V - \frac{R_4}{R_3} V_E \quad (1)$$

$$V_E = -R_3 i_o + V \Rightarrow V_E - V = -R_3 i_o$$

Dans les mailles de sortie :

$$V_S = R_7 (I_u + i) + (R'_5 + R'_6) i = R_7 I_{\text{cc}} + (R'_5 + R'_6 + R_7) i$$

$$\text{or : } R_7 \ll R'_5 + R'_6$$

(4,7 k Ω négligeable devant 2,1 M Ω)

$$\text{donc : } V_S \approx R_7 I_u + (R'_5 + R'_6) i \quad (2)$$

$$\text{par ailleurs : } V = R'_6 i \Rightarrow i = \frac{V}{R'_6} \quad (3)$$

En combinant (1) et (2) :

$$\left(1 + \frac{R_4}{R'_6}\right) V - \frac{R_4}{R_3} V_E = R_7 I_{\text{cc}} + (R'_5 + R'_6) i$$

Avec (3) :

$$\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) V - \frac{R_4}{R_3} V_E = R_7 I_{\text{cc}} + \left(1 + \frac{R'_5}{R'_6}\right) V$$

Si on règle A_j de telle sorte que :

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R'_5}{R'_6} \text{ alors } I_{\text{cc}} = -\frac{R_4}{R_3} \frac{V_E}{R_7}$$

Et comme :

$$R_3 \approx R_4 \quad I_{cc} = -\frac{V_E}{R_7}$$

La fonction de A_j est de compenser les éventuelles différences de valeur entre les résistances R_3, R_4, R_5, R_6 , de valeur nominale $1 \text{ M}\Omega$ à 5 %.

8.2. Fonctionnement du montage pour les très faibles capacités

L'expérience montre que pour des valeurs de C trop faibles (inférieures à quelques dizaines de nF) la décharge du condensateur ne s'arrête pas à $u = 0$, mais se poursuit pour des valeurs négatives de u (quelques volts).

On peut interpréter ce phénomène de la manière suivante :

– le temps de décharge du condensateur est donné par la relation :
 $t_d \approx 0,8 \cdot R_{12} \cdot C \approx 1760 \cdot C$ (voir § 3.5.c).

Pour des capacités de quelques nF, t_d est de l'ordre de quelques μs ($1,76 \mu\text{s}$ pour 1nF) ; or le temps de basculement des comparateurs A_3 et A_4 est lui aussi de l'ordre de quelques μs (le fabricant indique une vitesse de montée de $13 \text{ V}/\mu\text{s}$).

L'utilisation de capacités inférieures à 100 nF est donc à éviter en TP.

8.3. Autre montage

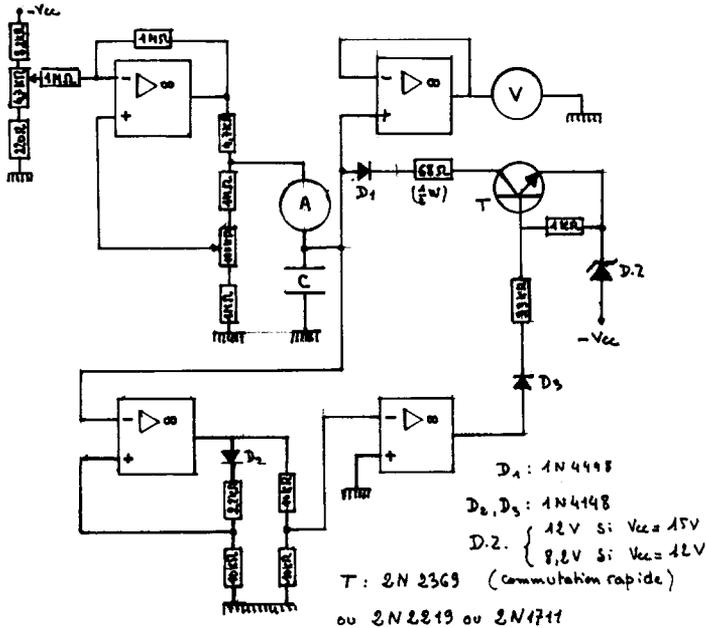
Le montage ci-après constitue une variante du précédent, la décharge de C à travers une résistance de faible valeur et un transistor est quasi instantanée.

8.4 Remarque (valable pour les deux montages)

Le choix du pont diviseur $R_1 - P - R_2$ générant la tension V_E est soumis à deux contraintes :

- l'impédance de sortie de V_E doit être faible devant l'impédance d'entrée du convertisseur tension - courant A_1 (voir §3.1.).
- la condition de linéarité du convertisseur A_1 s'écrit (se reporter au schéma du II) :

$$V_{SL} < V_{sat}$$



or $V_{SI} = R_7 I_{cc} + u = |V_E| + u < V_{sat}$ (V_E est négatif)

$|V_E| = V_{cc} \times R' / (R' + R) \leq V_{cc} \times (R_2 + P) / (R_1 + R_2 + P)$ et $u \leq V_2$

En majorant $|V_E|$ et u : $V_{cc} \times (R_2 + P) / (R_1 + R_2 + P) + V_2 < V_{sat}$

Finalement: $R_1 > [V_{cc} / (V_{sat} - V_2) - 1] \times (R_2 + P)$

Avec les valeurs: $R_2 + P = 4,92 \text{ k}\Omega$;

$V_{cc} = 15 \text{ V}$, $V_{sat} = 14,1 \text{ V}$, $V_2 = 11 \text{ V}$

ou $V_{cc} = 12 \text{ V}$, $V_{sat} = 11,1 \text{ V}$, $V_2 = 8,5 \text{ V}$

La valeur minimale de R_1 est de l'ordre de 18 kΩ. Dans la pratique une valeur de 15 kΩ suffit à rendre la distorsion en fin de charge imperceptible.

On pourrait aussi, pour satisfaire à la condition de linéarité, diminuer V_2 en intervenant sur le pont diviseur $R_8 - R_9$. Il ne faut cependant pas trop diminuer l'amplitude de la variation de tension aux bornes du condensateur; les valeurs choisies constituent donc un compromis possible.