

## Initiation à l'électronique

### Condensateurs

---

L'étude de la charge et de la décharge d'un condensateur est un phénomène intéressant par la richesse des notions qu'il permet d'introduire à différents niveaux du 2<sup>me</sup> cycle.

En classe de Seconde, on peut montrer que la loi d'additivité des tensions s'applique en régime variable, à condition de considérer les tensions au même instant. Il en est de même de la loi d'Ohm pour un dipôle passif linéaire.

En classe terminale, on sera amené à définir la capacité d'un condensateur. La charge d'un condensateur à courant constant permettra d'introduire la notion de capacité sans faire appel au galvanomètre balistique. En déchargeant un condensateur dans une résistance, il sera possible de simuler la désintégration d'une substance radioactive (réf. 1).

Les différentes mesures ne seront pas trop difficiles à effectuer si la tension entre les armatures du condensateur étudié varie lentement en fonction du temps (0,1 V/s par exemple), ce qui suppose un courant de charge ou de décharge de faible intensité et impose l'utilisation de voltmètres électroniques.

Un voltmètre magnétoélectrique de résistance au moins égale à 1 000  $\Omega/V$  précédé d'un amplificateur opérationnel monté en suiveur de tension constitue un voltmètre électronique. Le circuit intégré 741 permet de réaliser un suiveur dont la résistance d'entrée est de l'ordre de  $10^8$  ohms. Avec le Bifet TLO81 de Texas Instruments, on atteint  $10^{12}$   $\Omega$  pour un prix voisin ; ce C.I. a le même brochage que le 741.

#### ETUDE D'UN SUIVEUR DE TENSION.

##### 1. Principe et réalisation.

On pourra consulter les articles du B.U.P. indiqués à la référence 2.

##### 2. Gain.

On peut faire vérifier par les élèves que le gain du suiveur est bien 1 de la manière suivante :

## a) Vérification du zéro.

L'entrée étant à la masse, la tension de sortie doit être nulle. Ceci s'obtient d'ailleurs en réglant le potentiomètre d'offset qui pourra être ensuite collé au vernis à angle.

b) Une pile étant branchée à l'entrée (fig. 1), on mesure avec le même voltmètre les tensions d'entrée et de sortie. On vérifie que  $U_s = U_e$ .

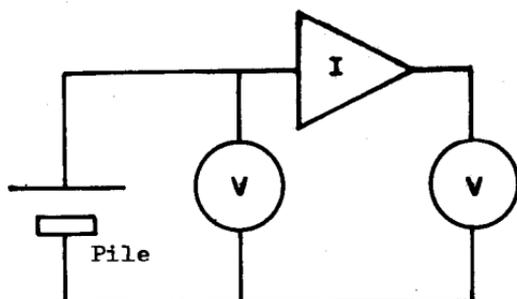


Fig. 1

## 3. Intérêt d'un sulveur.

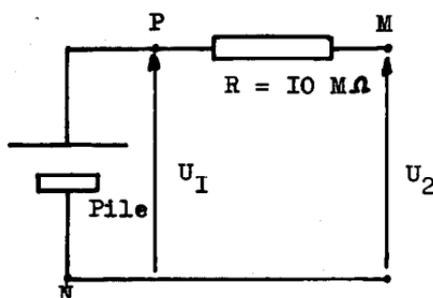


Fig. 2

A l'aide du montage représenté fig. 2, on simule une source de grande résistance interne. Si aucun courant ne parcourt la résistance  $R$ ,  $U_1 = U_2 = E$ , tension à vide de la pile. La mesure effectuée à l'aide d'un voltmètre magnétoélectrique conduit à un résultat totalement différent (fig. 3). La résistance de la pile, inférieure à 1 ohm, est négligeable devant celle du voltmètre ( $R_v$ ). En A, le voltmètre indique  $U_1 = E$ . En B, par contre,  $R$  et  $R_v$  constituent un diviseur de tension et le voltmètre indique une tension :

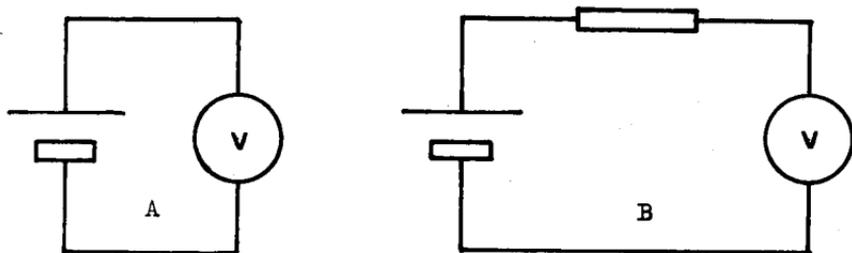


Fig. 3

$$U_2 = E \frac{R_v}{R + R_v} \quad U_2 \neq E \quad (\text{fig. 4}).$$

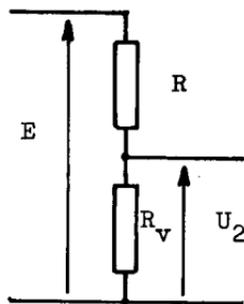


Fig. 4

Interposons maintenant un suiveur de tension en amont du voltmètre.

La situation peut être interprétée à l'aide du modèle suivant (fig. 5) : tout se passe comme si l'on avait remplacé la

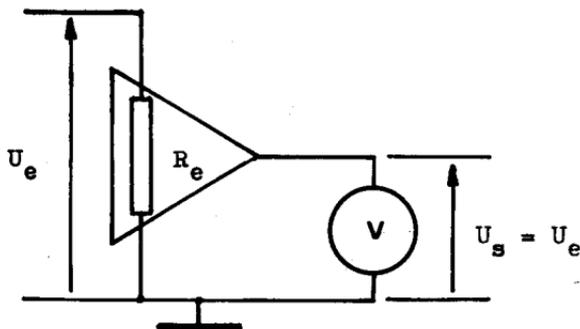


Fig. 5

résistance  $R_v$  du voltmètre par la résistance d'entrée  $R_e$  du suiveur. Reconnaissons les mesures (fig. 6).

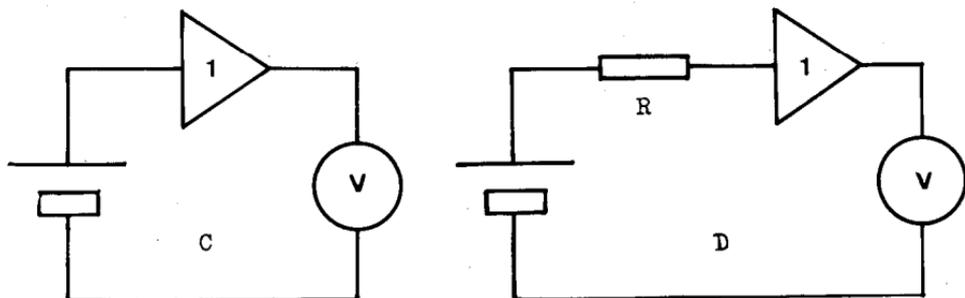


Fig. 6

En C, on trouve  $U_3 = U_1$ . La mesure s'interprète comme en A.

En D, le montage équivaut au circuit de la fig. 7 :

$$U_4 = E \frac{R_e}{R_e + R}$$

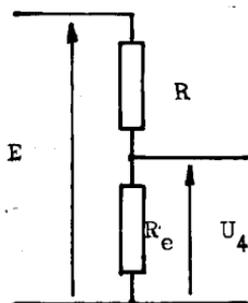


Fig. 7

La mesure conduisant à  $U_4 = U_1 = E$  s'interprète donc par le fait que  $R$  est négligeable devant  $R_e$ . On peut considérer qu'aucun courant n'entre dans un tel voltmètre électronique.

#### 4. Saturation du suiveur.

Soit le montage schématisé fig. 8. En faisant varier la tension d'entrée, on constate que  $U_s = U_e$  aux incertitudes de mesure près, tant que  $U_e$  ne dépasse pas une limite voisine de 14 V (\*).

(\*) Le suiveur étant alimenté sous  $2 \times 15$  V.

La tension de sortie demeure ensuite constante. On prendra soin de n'appliquer à l'entrée du suiveur que des tensions inférieures à la tension de saturation.

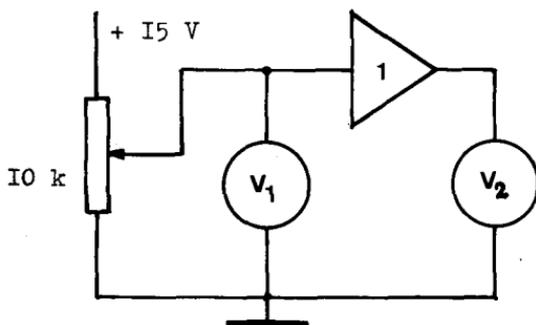


Fig. 8

#### GENERATEUR DE TENSION ET GENERATEUR DE COURANT.

a) L'alimentation  $2 \times 15$  V du C.E.M.S. peut être utilisée pour alimenter les différents dispositifs électroniques décrits dans cet article. Cette alimentation est un générateur de tension dont la caractéristique peut être déterminée à l'aide du montage représenté fig. 9. La tension  $U_0$  est mesurée entre le pôle + et la masse.

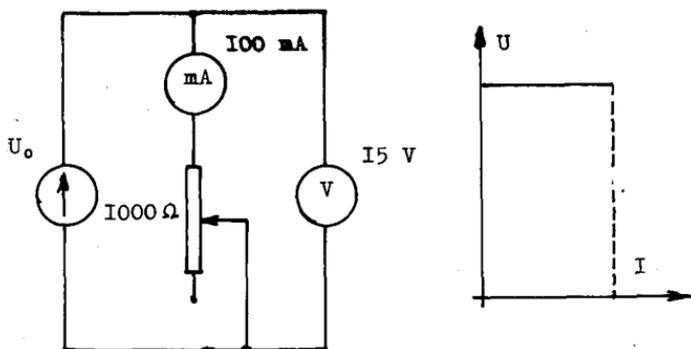


Fig. 9

La chaîne potentiométrique représentée fig. 10 permet d'alimenter un circuit sous une tension constante  $U_1$  ou  $U_2$  inférieure à la tension de saturation des suiveurs de tension pourvu que le débit soit suffisamment faible (limité ici à  $50 \mu\text{A}$ ).

b) Il existe de nombreux schémas de générateurs de courant. Un montage très simple fait appel au C.I. LM 334 Z de Natio-

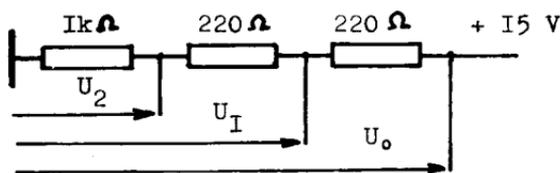


Fig. 10

nal Semiconductor. Ce C.I. est un régulateur d'intensité dans le domaine  $1 \mu\text{A} - 10 \text{ mA}$  (cf. fig. 11).

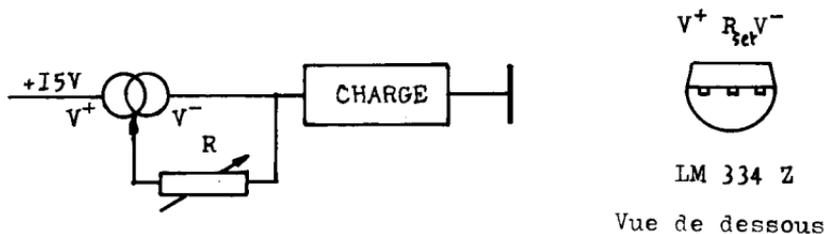


Fig. 11

Il suffit d'ajouter une résistance  $R$  entre les bornes  $R_{set}$  et  $V^-$  pour fixer la valeur de l'intensité du courant à :

$$I = \frac{U_o}{R} \cdot \frac{T}{T_o}$$

où  $U_o = 67,5 \text{ mV}$ ,  $T_o = 298 \text{ K}$ ,  $T$  est la température absolue du C.I.

Ce C.I. peut donc être utilisé comme capteur de température.

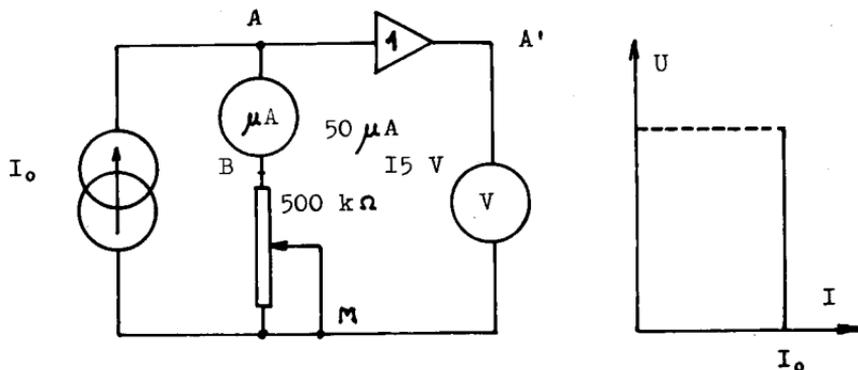


Fig. 12

Si les mesures au cours desquelles on utilise le C.I. sont de courte durée et si l'intensité débitée est faible, aucune variation d'intensité n'est perceptible pendant les mesures.

La résistance  $R$  peut être constituée d'un rhéostat de  $100\text{ k}\Omega$  en série avec une résistance de  $1\text{ k}\Omega$  qui limitera l'intensité maximale à moins de  $70\text{ }\mu\text{A}$ .

Le montage représenté fig. 12 permet de relever la caractéristique d'un générateur de courant. L'intensité  $I_0$  sera fixée à  $50\text{ }\mu\text{A}$ .

### LES LOIS DU COURANT ELECTRIQUE EN REGIME VARIABLE.

Ces lois peuvent être établies en étudiant une charge lente d'un condensateur (fig 13).

$K$  étant fermé, on ajuste le rhéostat pour que  $i = I = 50\text{ }\mu\text{A}$ . Si un condensateur, défini comme l'ensemble de deux armatures

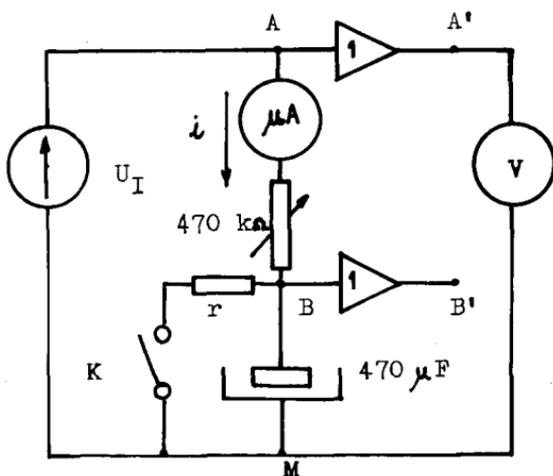


Fig. 13

conductrices séparées par un isolant, est placé en parallèle avec  $K$ , l'ouverture de  $K$  ne s'accompagne pas de l'annulation immédiate du courant dans le circuit, mais on observe une décroissance progressive de l'intensité, la tension  $U_{AM}$  demeurant constante. Le courant de charge est interprété comme un transfert d'électrons. La fermeture de  $K$  entraîne la décharge du condensateur à travers l'interrupteur.

Recommençons l'expérience en mesurant cette fois  $u_{A'B'} = u_{AB}$ . Dès l'ouverture de  $K$ , on note que  $u_{AB}$  et  $i$  décroissent simultanément.

ment. Les élèves travaillent par groupes de 3 : l'un donne un « top » toutes les 30 secondes par exemple, les deux autres relèvent respectivement les valeurs de  $i$  et  $u_{AB}$  à chaque « top ». Le report sur un graphique de  $u_{AB}(t) = f[i(t)]$  montre que la loi d'Ohm établie en courant continu est encore valable en courant variable :  $u_{AB}(t) = R \cdot i(t)$  avec  $R = U_I/I$ .

Etudions maintenant  $u_{BM}(t)$ ; nous vérifions que :

$$U_{AM} = u_{AB}(t) + u_{BM}(t).$$

### CHARGE D'UN CONDENSATEUR A COURANT CONSTANT (fig. 14).

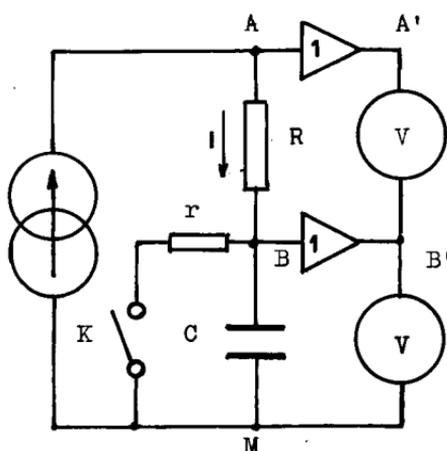


Fig. 14

a) Le débit du générateur de courant est réglé de telle sorte que la tension aux bornes de la résistance  $R = 1 \text{ M}\Omega$  soit voisine de 1 V; l'intensité  $I$  est donc environ  $1 \mu\text{A}$ . Le condensateur C a une capacité de  $10 \mu\text{F}$ . Il faut utiliser un condensateur à très faible fuite (polycarbonate ou polyester) : la capacité d'un condensateur électrochimique dépend en général de la tension appliquée entre les armatures.

La tension  $U_{AB}$  n'est pas modifiée à l'ouverture de K, mais on observe que la tension  $u_{BM}$  croît jusqu'à un maximum à partir duquel  $U_{AB}$  décroît. La fermeture de K entraîne l'annulation de la tension  $u_{BM}$  : le condensateur se décharge. La résistance  $r = 10 \Omega$  limite l'intensité du courant de décharge.

b) En étudiant les variations de  $u_{BM}$  en fonction du temps, on constate que la tension aux bornes du condensateur est fonction linéaire de la durée de la charge, tant que le courant de charge est constant (fig. 15), soit  $u = a \cdot t$ ; la charge

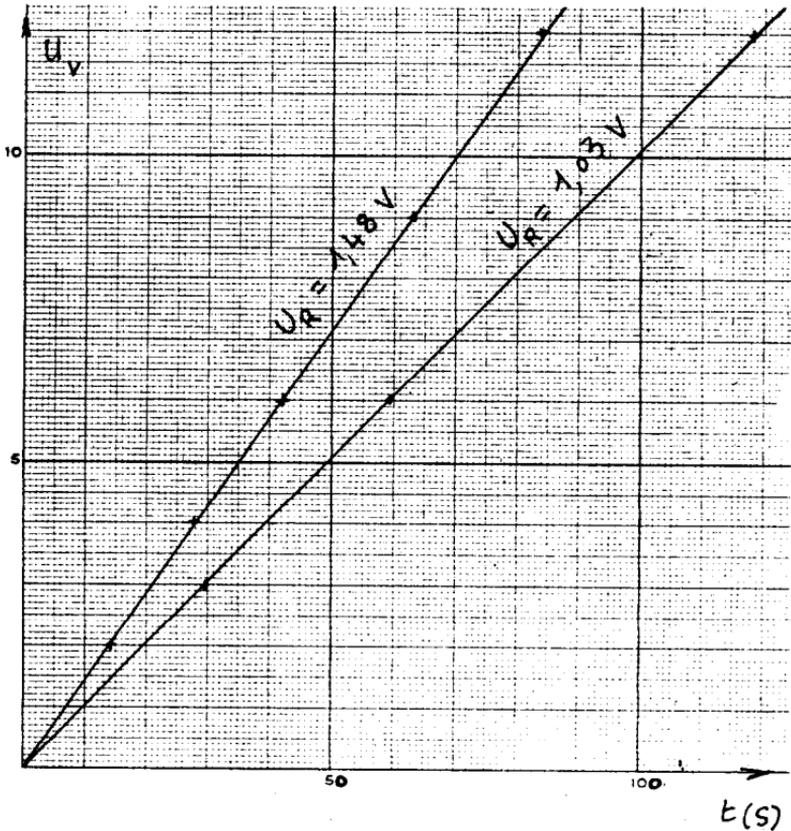


Fig. 15

des armatures étant  $q = I \cdot t$ , le rapport  $q/u$  est donc indépendant du temps.  $q/u = I/a = (U_R \cdot T)/(U_C \cdot R)$  où  $U_R$  est la tension aux bornes de  $R$ , et  $T$  le temps au bout duquel la tension entre les armatures du condensateur atteint une valeur déterminée  $U_C$ . Modifions l'intensité du courant de charge ; nous constatons que le produit  $U_R \cdot T$  est invariant aux incertitudes de mesure près. Le rapport  $q/u$  est donc également indépendant de l'intensité du courant de charge constant. Ce rapport dépend par contre du condensateur. On pose  $q/u = C$ , capacité du condensateur. On admettra que cette relation est encore valable en courant variable.

c) Application : Principe du balayage horizontal d'un oscilloscope électronique.

d) En ajoutant au montage un comparateur de tension, il est possible d'effectuer des mesures de durée à l'aide d'un

chronomètre électronique commandé par le phénomène à étudier. On peut alors réduire la capacité  $C$  à 1 ou  $2,2 \mu\text{F}$ .

### COMPARATEUR DE TENSION.

Le principe d'un comparateur de tension est exposé dans le B.U.P. n° 556, p. 1037.

Nous avons réalisé un comparateur conformément au schéma de la fig. 16. Le C.I. est un TLO81. Un 741 doit pouvoir convenir. La présence de la diode se justifie par la nécessité de n'appliquer à l'entrée du chronomètre (RELAIN) que des tensions positives ou nulles. Le potentiomètre d'offset se règle comme celui d'un suiveur. L'interrupteur à poussoir permet d'arrêter manuellement le chronomètre.

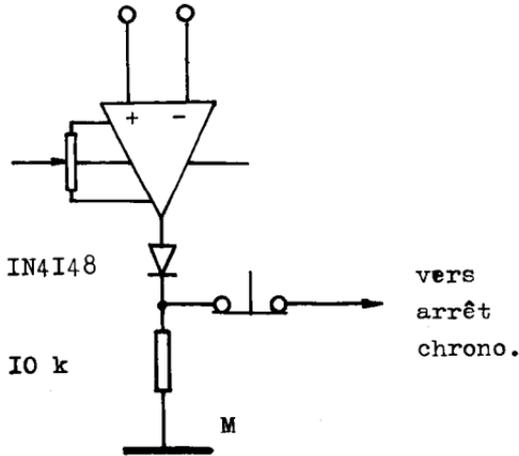


Fig. 16

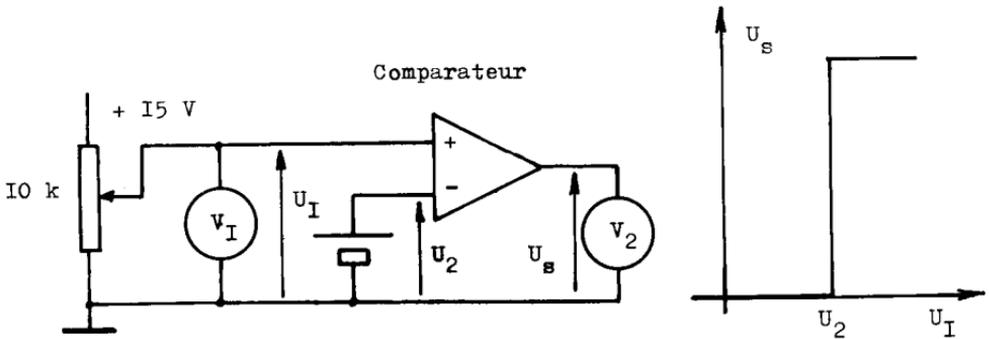


Fig. 17

La fig. 17 représente un montage destiné à illustrer le principe du fonctionnement d'un comparateur.

La tension  $U_2$  aux bornes de la pile (3 V) branchée à l'entrée (—) du comparateur est mesurée à l'aide du voltmètre  $V_1$ .

Si l'une des tensions appliquées à l'entrée du comparateur est constante et si l'autre varie, une brusque variation de la tension de sortie se produit lorsque les tensions appliquées aux deux entrées sont égales (à moins de 1 mV près).

L'étude de la charge d'un condensateur à courant constant peut être réalisée à l'aide du montage représenté fig. 18. A l'ou-

#### COMMANDE DU CHRONOMETRE

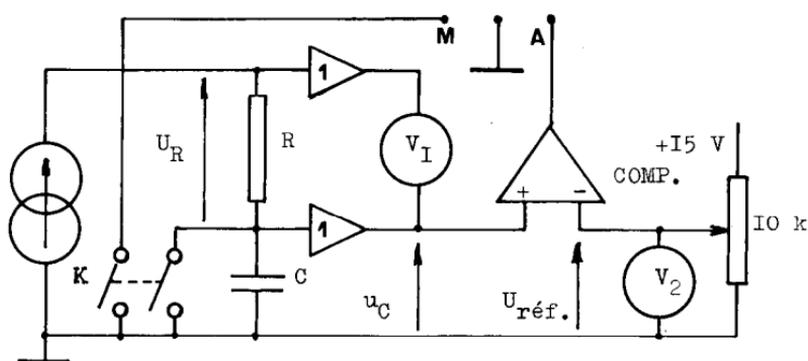


Fig. 18

verture de K, le chronomètre se met en marche. Lorsque  $u_C = U_{ref.}$ , le chronomètre s'arrête. On note le temps  $t$  mesuré à l'aide du chronomètre. En faisant varier  $U_{ref.}$ , on peut tracer  $u_C = f(t)$ . Le voltmètre  $V_1$  permet de s'assurer que le courant de charge est constant.

#### Remarque.

Pour que le dispositif puisse fonctionner correctement (arrêt manuel), il faut que, lors de la mise en marche du chronomètre, la tension à la sortie du comparateur soit nulle. Lors de la comparaison de deux tensions positives par rapport à la masse, l'une variable, l'autre constante, il sera donc nécessaire d'appliquer à l'entrée (—) du comparateur la tension initiale la plus grande.

*Application :* En réglant l'intensité du courant de charge, il est possible de donner à la constante  $a = u_C/t$  la valeur 1 V/s. Branchons alors la pile utilisée précédemment entre l'entrée (—)

du comparateur et la masse, et ouvrons K. Le temps au bout duquel le chronomètre s'arrête est numériquement égal à la f.é.m. de la pile. Le montage fonctionne en voltmètre digital. Il réalise la conversion tension-durée.

### DECHARGE EXPONENTIELLE D'UN CONDENSATEUR (fig. 19).

Le condensateur étant chargé sous la tension  $U_1$ , on ouvre l'interrupteur K. Le condensateur se décharge dans la résistance R. On étudie les variations de  $u_c$  en fonction de la durée  $t$  de la décharge comme précédemment. (Noter l'inversion des connexions aux bornes du comparateur). L'observation de la courbe  $u_c = f(t)$  montre que chaque fois que la tension aux bornes de C est divisée par 2, il s'écoule une même durée  $\phi$  : durée de la demi-décharge.

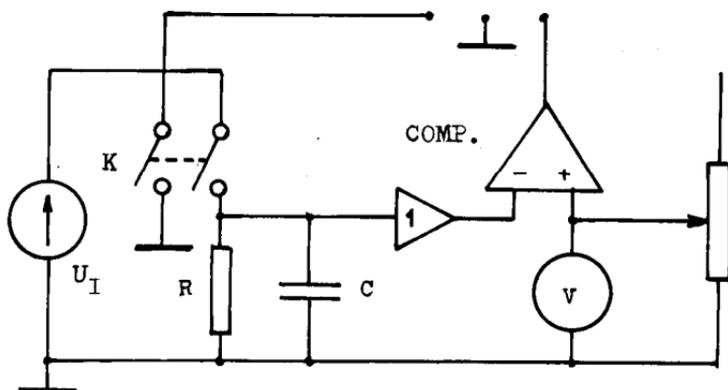


Fig. 19

Cette observation peut être corroborée par des mesures directes. Ainsi pour  $U_1 = 12,6$  V,  $C = 2,2$   $\mu$ F,  $R = 3,9$  M $\Omega$ , on obtient :

$U_{ref.}$ (V)	$t$ (s)	$U' = U_{ref.}/2$ (V)	$t'$ (s)	$t' - t$ (s)
11,8	0,57	5,9	6,58	6,01
10,8	1,33	5,4	7,34	6,01
9,8	2,13	4,9	8,19	6,06
8,8	3,07	4,4	9,09	6,02
7,8	4,11	3,9	10,12	6,01
6,8	5,39	3,4	11,33	5,94
5,8	6,76	2,9	12,59	5,83

L'analogie entre la décharge d'un condensateur et la désintégration d'une substance radioactive est évidente. Ces deux phénomènes obéissent à la même loi exponentielle et sont régis par la même équation différentielle  $ay' + y = 0$  :

$$\begin{aligned} dq/dt = i = -C du/dt = u/R & & RC du/dt + u = 0 \\ dm/dt = -\lambda m & & (1/\lambda) dm/dt + m = 0 \end{aligned}$$

d'où l'idée de simuler la désintégration par la décharge d'un condensateur.

### CIRCUITS ANNEXES.

A) Il est possible de rendre le générateur de courant insensible aux variations de température. Le montage suivant (fig. 20)

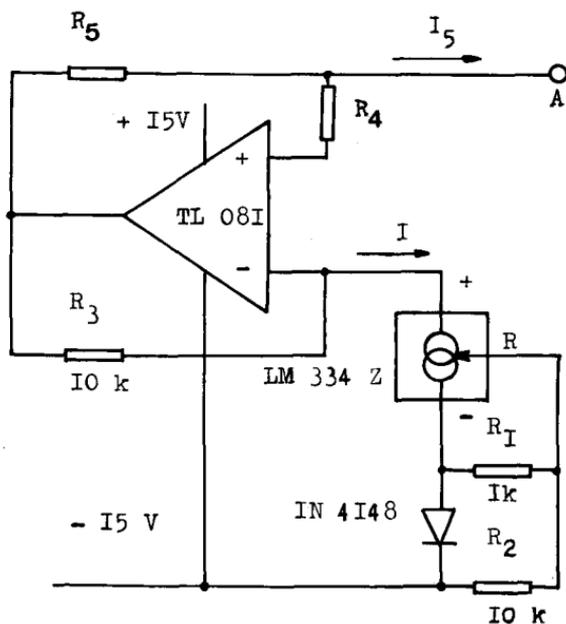


Fig. 20

nous a été inspiré par un article de la revue *Le Haut-Parleur* (Réf. 3). La résistance  $R_1$  fixe la valeur du courant débité par le LM 334. La diode IN4148 et  $R_2$  assurent la compensation en température. Aucun courant n'entrant dans l'amplificateur opérationnel, la tension entre les entrées + et - étant très faible, les tensions aux bornes des résistances  $R_3$  et  $R_5$  sont égales (ici à 1,25 V environ).  $R_4$  (470 kΩ) est une résistance de protection. La valeur de  $R_5$  détermine donc l'intensité du courant  $I_5$ .

Notre montage comporte un générateur susceptible de délivrer 3 tensions (cf. fig. 10) ou 3 courants, suivant la position du sélecteur représenté fig. 21. Les intensités ont respectivement pour valeurs :

$$I_0 \approx 40 \mu\text{A}, \quad I_1 \approx 1,5 \mu\text{A}, \quad I_2 \approx 1 \mu\text{A}.$$

$I_2$  peut être ajustée à l'aide du rhéostat de  $220 \text{ k}\Omega$ .

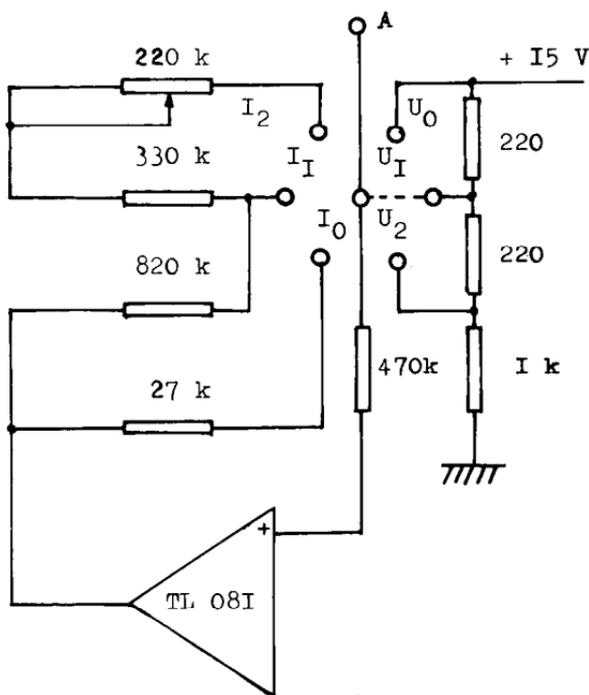


Fig. 21

B) Il peut être intéressant de comparer directement les tensions  $u_R$  et  $u_C$  (fig. 22). Il est alors nécessaire de disposer d'un suiveur différentiel ( $u_{C_M} = u_{AB}$ ). Cet étage est en fait l'association des suiveurs utilisés précédemment et d'un amplificateur différentiel de gain 1 (fig. 23).

Au cours d'une charge à courant constant, l'arrêt du chronomètre se produira au bout d'un temps  $T$  tel que  $u_C = u_R$ , soit :  $I \cdot T/C = R \cdot I$ . On en déduit que  $T = R \cdot C$ .

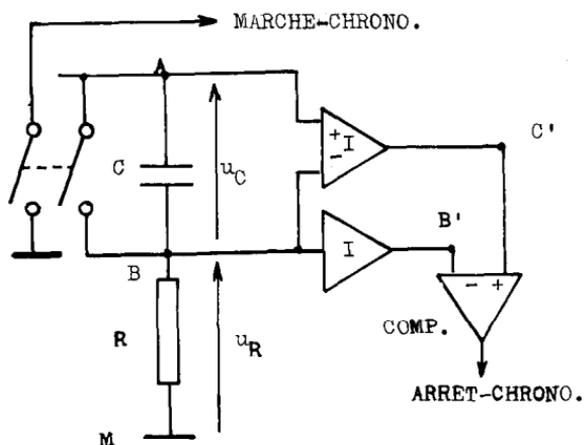


Fig. 22

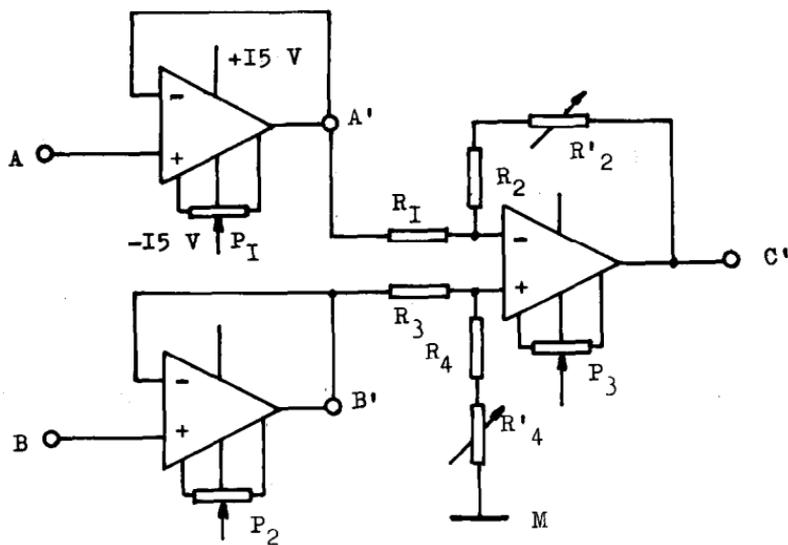


Fig. 23. — C.I. : 3 × TL081.

- $P_1 = P_2 = P_3 = 10 \text{ k}\Omega$
- $R_1 \approx R_2 \approx R_3 \approx R_4 \approx 100 \text{ k}\Omega$
- $R_1 > R_2 ; R_3 > R_4$
- $R'_2 = R'_4 = 4,7 \text{ k}\Omega.$

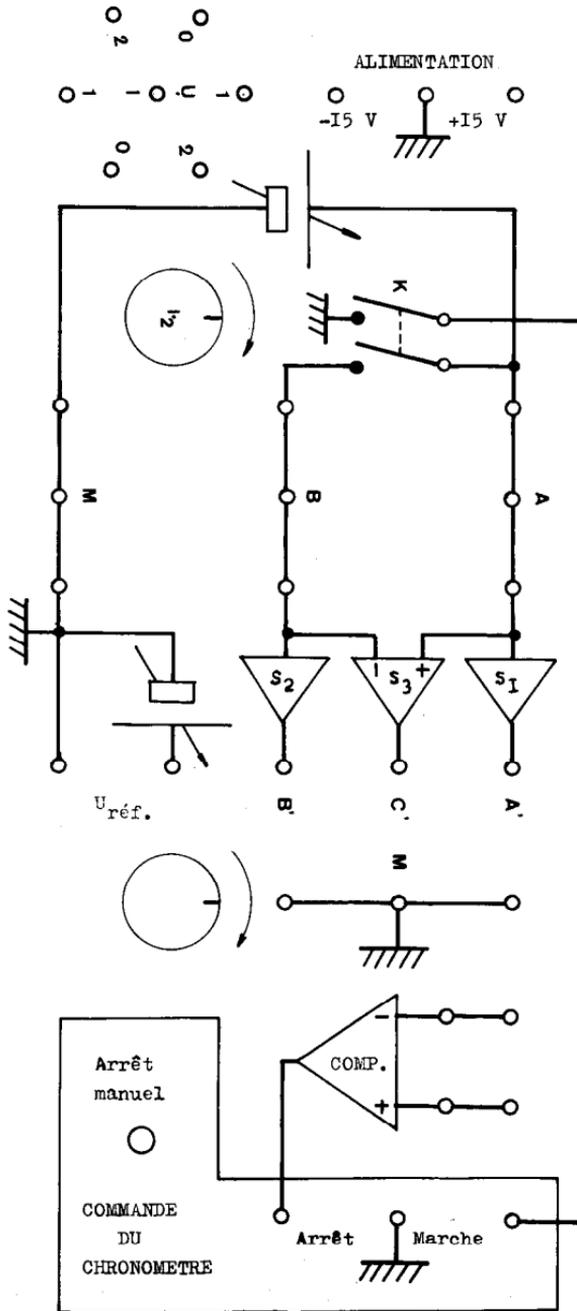
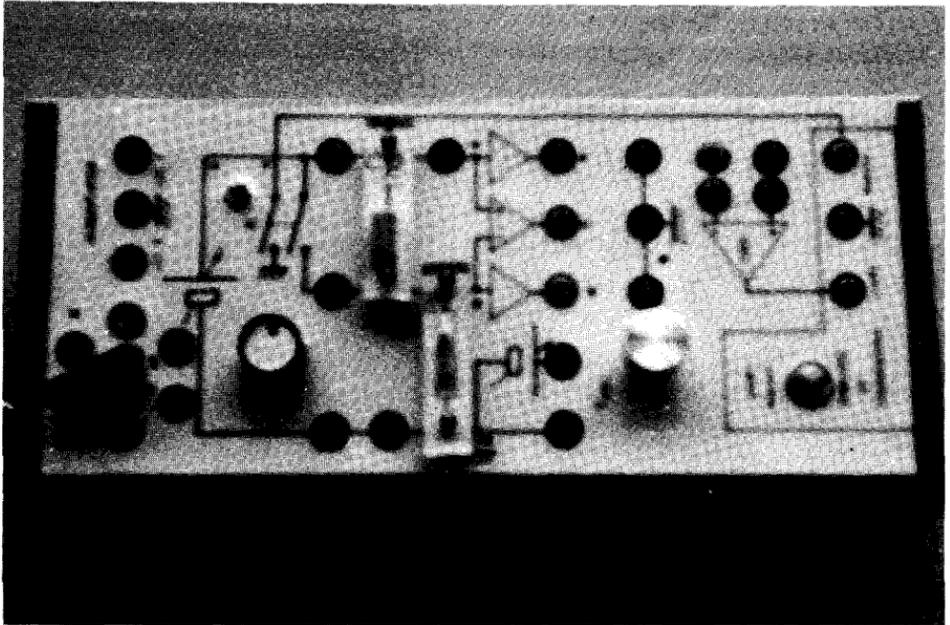
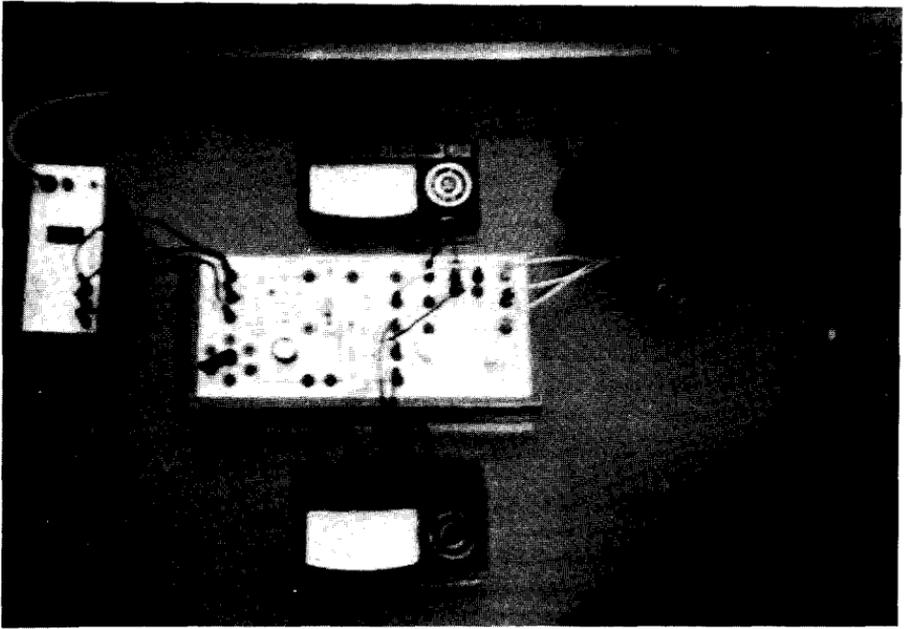


Fig. 24



**Applications.**

A l'aide d'une résistance de  $1\text{ M}\Omega$  étalonnée à 1 % et d'un condensateur de capacité inconnue, on peut déterminer les valeurs d'autres résistances par comparaison. On peut aussi mesurer des capacités de l'ordre du  $\mu\text{F}$  : le chronomètre affiche directement la valeur de la capacité en  $\mu\text{F}$  (capacimètre digital). L'appareil nous a servi à contrôler les boîtes de condensateurs utilisées en T.P.

**UN APPAREIL D'INITIATION A L'ELECTRONIQUE.**

Dans le but de simplifier les différents montages décrits dans cette étude, nous avons regroupé dans un même boîtier tous les circuits nécessaires à leur réalisation.

L'appareil se présente extérieurement sous la forme d'une boîte parallélépipédique réalisée à l'aide de goulotte en matière plastique pour chemins de câbles (TEHALIT  $150 \times 50$ ). Sur le couvercle est collé le plan d'ensemble (fig. 24) protégé par une feuille de plastique adhésif transparent. Des bornes MFOEM sont serties sur le couvercle à l'aide de rondelles métalliques peintes à la bombe en rouge, noir, vert et jaune.

La photographie ci-jointe montre qu'avec un tel appareil, un montage déjà compliqué n'exige que peu de connexions (\*).

Une version simplifiée du montage, comportant le générateur de courant et deux suiveurs, permettra déjà de nombreuses manipulations intéressantes. Il suffira d'y adjoindre une chaîne potentiométrique (fig. 10) et un potentiomètre ( $10\text{ k}\Omega$ ). L'interrupteur pourra être extérieur.

M. BEVILACQUA, aide technique au lycée Jean-Perrin, chargé de la réalisation des appareils, a participé à leur conception.

Serge VAILLANT,

(Lycée Jean-Perrin - Lambersart).

**REFERENCES**

1. Y. GOMAS. — *Méthode de simulation pour l'étude des désintégrations radioactives*. B.U.P. n° 615, p. 1201.
2. Ch. ANDRÉ, R. CASTAGNÉ. — *Les amplificateurs opérationnels*. B.U.P. n° 556, p. 1025 et 1043.  
J.-C. TRIGEASSOU. — *Le calcul analogique à courant continu*. B.U.P. n° 624, p. 1095.
3. F. THOBOIS. — *Multimètres à gogo*. Le Haut-Parleur n° 1642, p. 189.

(\*) Les résistances et condensateurs sont montés sur des cavaliers qui peuvent être disposés entre les nœuds A et B ou B et M du réseau.