

Le contrôleur universel

par Annie LAVAL,

Lycée Limosin - 87000 Limoges.

Le défunt C.E.M.S. a distribué généreusement des contrôleurs universels dans les lycées et collèges ; ainsi tous les établissements, y compris ceux de la France profonde, ont vu arriver ces énigmatiques petites boîtes. Les notices qui les accompagnaient n'apportaient pas en général toutes les informations souhaitables. C'est pourquoi l'Union des Physiciens a suscité la rédaction d'un article dans lequel serait exposé le principe de ces appareils. Il ne sera donc pas question ici de discuter de leur opportunité pédagogique ni d'aborder les problèmes technologiques, mais tout simplement de décrypter, avec les seuls lois élémentaires de l'électricité, les divers circuits juxtaposés ou imbriqués qui permettent de remplir toutes les fonctions. On pourra par ailleurs y trouver des exercices d'application simples pour les élèves du second cycle.

I. LA PARTIE COMMUNE A TOUTES LES FONCTIONS.

A. Un galvanomètre à cadre mobile, à ruban tendu.

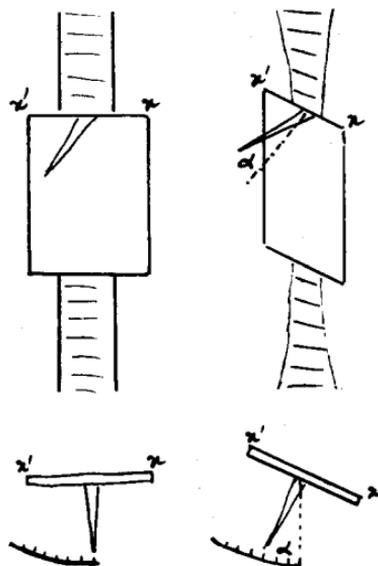


Fig. 1

Toutes les fonctions de l'appareil reposent sur une mesure d'intensité.

Le courant à mesurer circule dans une bobine plate enroulée sur un cadre rectangulaire. Le cadre est placé dans un champ magnétique, et suspendu à un ruban métallique tendu verticalement. Les 2 forces électromagnétiques appliquées à la bobine forment un couple dont le moment est proportionnel à l'intensité du courant. Sous l'action de ce couple, le cadre tourne. En tournant, il tord le ruban métallique auquel il est suspendu. Ce ruban développe alors un couple antagoniste proportionnel à l'angle de torsion. Le cadre s'immobilise lorsque les 2 moments sont égaux en valeur absolue. On observe alors une déviation α par rapport à la position initiale (fig. 1). Cet angle est mesuré par une aiguille qui se déplace devant une graduation. Il est proportionnel à l'intensité qui traverse la bobine. Pour les appareils qui nous intéressent, l'angle maximum correspond à une intensité de $50 \mu\text{A}$. Quelle que soit l'utilisation, l'appareil ne mesure que des intensités, et la déviation maximum est toujours provoquée par un courant de $50 \mu\text{A}$.

B. Deux diodes de protection.

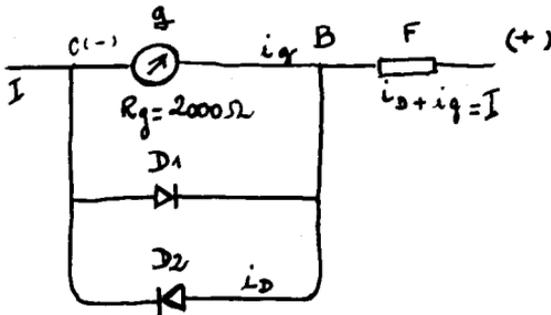


Fig. 2

Deux diodes de polarités inversées sont branchées en dérivation aux bornes B et C du galvanomètre pour le protéger des surtensions accidentelles (fig. 2).

Le rôle de ces diodes se déduit de la forme de leur courbe caractéristique représentée sur la fig. 3. Lorsque la tension U_{BC} aux bornes de la diode est faible, l'intensité i_D qui la traverse est pratiquement nulle. Puis, lorsque la tension croît, l'intensité i_D croît brusquement.

Ceci est mis à profit dans le montage de la fig. 2. En régime normal, la tension U_{BC} aux bornes du galvanomètre et de la diode

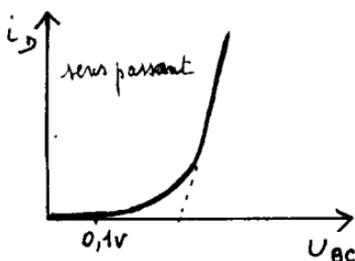


Fig. 3

est de la forme $U_{BC} = R_g i_g$ avec $R_g = 2\,000\ \Omega$. Sa valeur maximum atteinte pour $i_g = 50\ \mu\text{A}$ est donc :

$$U_{BC} = 2\,000 \times 50 \cdot 10^{-6} = 10^{-1}\ \text{V}.$$

On remarque sur la fig. 3 que lorsque $U_{BC} < 0,1\ \text{V}$, l'intensité dans la diode est négligeable, elle ne joue donc aucun rôle. Mais lorsque U_{BC} dépasse $0,1\ \text{V}$, l'intensité i_D croît très vite. Cette intensité qui s'ajoute à i_g dans le fusible F fait fondre celui-ci alors que i_g n'a pas encore détérioré le galvanomètre.

La deuxième diode agit de la même façon lorsque le branchement de l'appareil est fait en sens inverse.

II. MESURE DES INTENSITES DES COURANTS CONTINUS.

L'appareil décrit précédemment, et qui sera dorénavant noté \mathcal{A} , mesure directement les intensités comprises entre 0 et $50\ \mu\text{A}$. Lorsque les intensités sont plus grandes, on dérive une fraction connue du courant dans une résistance appelée shunt (fig. 4).

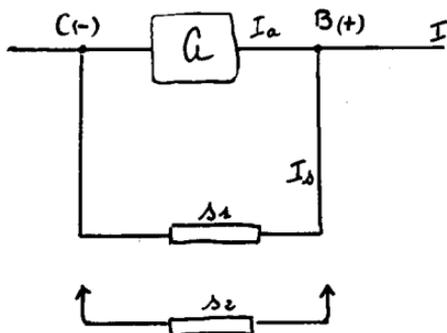


Fig. 4

Supposons que nous voulions mesurer les intensités I comprises entre 0 et $500\ \mu\text{A}$. Comme l'intensité I_a ne doit pas

dépasser $50 \mu\text{A}$ — c'est-à-dire $\frac{I}{10}$ — nous devons dériver dans le shunt une intensité $I_s = \frac{9I}{10}$.

Les lois des courants dérivés nous permettent de calculer la valeur de la résistance R_{s_1} qui réalisera ces conditions.

$$U_{BC} = R_a I_a$$

$$U_{BC} = R_{s_1} I_s$$

$$R_{s_1} = R_a \frac{I_a}{I_s} \quad (\text{avec } R_a = 2000 \Omega).$$

Dans le cas étudié,

$$\frac{I_a}{I_s} = \frac{1}{9} \quad \text{donc} \quad R_{s_1} = \frac{R_a}{9}.$$

Si l'on remplace s_1 par s_2 de résistance $R_{s_1} = \frac{R_a}{99}$, un centième de l'intensité du circuit principal passera dans \mathcal{E} , on pourra donc mesurer une intensité maximum :

$$I = 50 \cdot 10^{-6} \times 100 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ A},$$

et ainsi de suite...

Dans tous les cas, la tension maximum aux bornes de l'ampère-mètre sera $U_{mBC} = R_a I_{m_a}$ avec $R_a = 2000 \Omega$, or dans tous les cas, $I_{m_a} = 50 \mu\text{A}$, donc $U_{mBC} = 2000 \times 50 \cdot 10^{-6} = 10^{-1} \text{ V}$. Cette chute de tension n'est pas toujours négligeable devant les autres tensions du circuit.

Dans la pratique, il est plus facile, pour changer de calibre, de conserver la borne commune C et de modifier seulement l'autre borne. D'où le montage de la fig. 5, où un ensemble de conducteurs en série de résistance R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 sont placés en dérivation aux bornes de \mathcal{E} .

Si le calibre choisi est $500 \mu\text{A}$, on branche entre D et C. Un dixième de l'intensité I du circuit principal passe dans \mathcal{E} et le conducteur de résistance R_1 , et l'intensité $I' = \frac{9I}{10}$ passe dans les conducteurs de résistance R_2, R_3, R_4, R_5 .

D'où la relation :

$$R_2 + R_3 + R_4 + R_5 = \frac{R_1 + R_a}{9}.$$

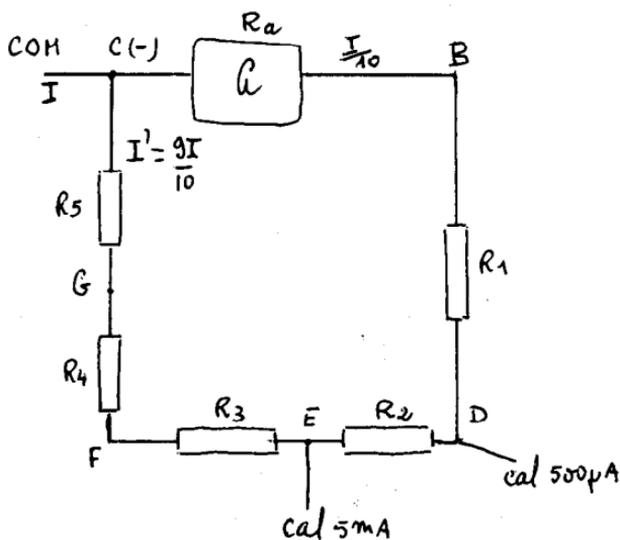


Fig. 5

Les bornes E et C correspondent au calibre 5 mA avec la relation :

$$R_3 + R_4 + R_5 = \frac{R_1 + R_2 + R_a}{99} \quad (\text{fig. 6}).$$

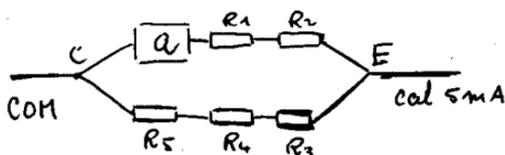


Fig. 6

Le commutateur prend ainsi les positions D, E, F, G au fur et à mesure que l'on change de calibre.

III. MESURE DES TENSIONS CONTINUES.

L'appareil \mathcal{A} de résistance $R_a = 2000 \Omega$ branché en dérivation aux bornes PQ d'une portion de circuit χ permet de mesurer directement les tensions comprises entre 0 et 10^{-1} volt. En effet, \mathcal{A} est traversé par l'intensité i_a comprise entre 0 et 50 microampères, la tension U_{BC} entre ses bornes est égale à U_{PQ} .

$$\begin{aligned} U_{BC} &= R_a i_a \\ U_{BC} &= 2000 i_a \\ 0 &\leq U_{BC} \leq 10^{-1} \text{ V.} \end{aligned}$$

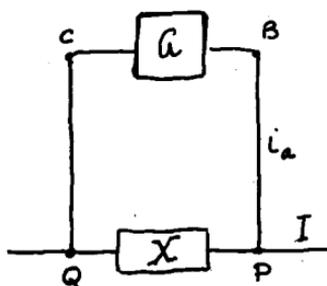


Fig. 7

Pour mesurer des tensions plus élevées, on ajoute en série avec a des résistances adaptées au calibre recherché.

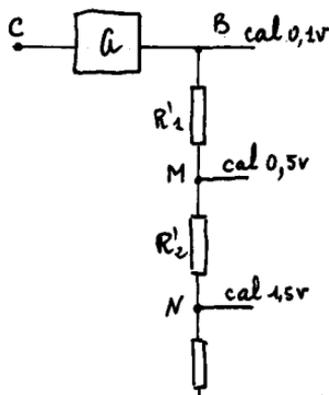


Fig. 8

Ainsi, pour le calibre 0,5 volt, on utilise les bornes M et C (fig. 8). Calculons la résistance R'_1 ajoutée.

$$U_{MC} = R_{MC} i_a \quad R_{MC} = \frac{U_{MC \max}}{i_a \max}$$

$$R_{MC} = \frac{0,5}{50 \cdot 10^{-6}} = 10^4 \Omega \quad R_{MC} = R_a + R'_1$$

$$R'_1 = 10\,000 - 2\,000 = 8\,000 \Omega.$$

De même, pour le calibre 1,5 V, on calcule :

$$R_{NC} = \frac{1,5}{50 \cdot 10^{-6}} = 3 \cdot 10^4 \Omega \quad R'_2 = 2 \cdot 10^4 \Omega.$$

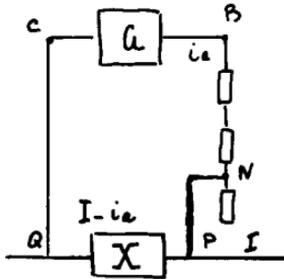


Fig. 9

Le commutateur prend ainsi les positions B, M, N... au fur et à mesure que l'on change de calibre.

Pour tous les calibres, l'intensité i_a dérivée dans le voltmètre est inférieure à 50 microampères, ce qui est le plus souvent négligeable devant l'intensité I du circuit principal.

Pour tous les calibres, on a la relation :

$$U_{max} = R \times 50 \cdot 10^{-6} \quad \text{d'où} \quad \frac{R}{U} = 20\,000 \, \Omega/V$$

qui est une grandeur caractéristique du voltmètre.

IV. MESURE DES TENSIONS ET DES INTENSITES EN REGIME ALTERNATIF.

L'appareil \mathcal{A} est utilisé dans les mêmes conditions que précédemment mais grâce à un ensemble de diodes, le courant le traverse toujours dans le même sens.

Deux montages sont possibles.

Redressement d'une alternance :

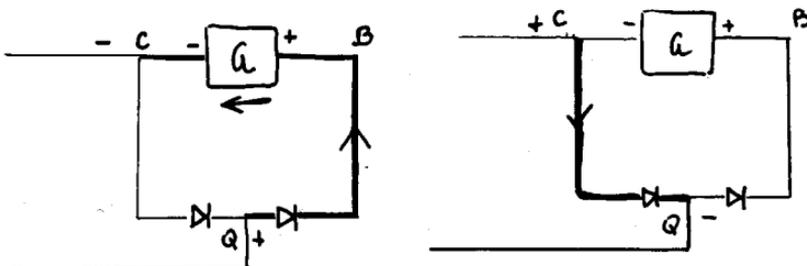


Fig. 10

La mesure utilise les bornes Q et C. Si $V_Q > V_C$, le courant passe dans \mathcal{E} (donc pendant la moitié du temps). Si $V_Q < V_C$, le courant ne traverse pas \mathcal{E} .

Redressement de deux alternances :

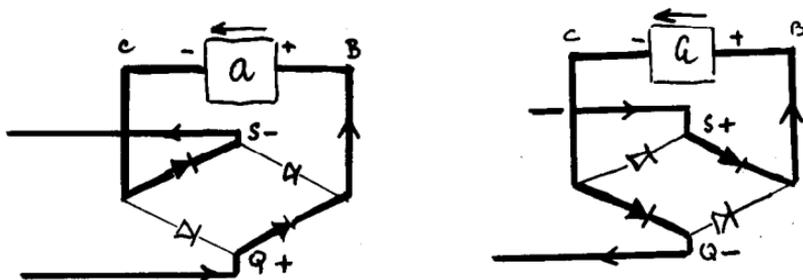


Fig. 11

La mesure utilise les bornes Q et S, le courant traverse \mathcal{E} dans le sens BC quel que soit U_{QS} .

Dans les 2 cas, le courant est redressé mais son intensité varie (fig. 12). Pour atténuer les fluctuations, on monte un condensateur et une résistance en dérivation entre les bornes B et

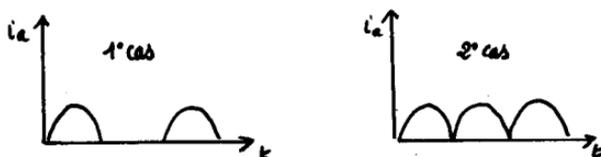


Fig. 12

C (fig. 13). Le condensateur accumule l'énergie lorsque la tension est élevée et la restitue lorsque la tension baisse, ce qui régularise l'intensité dans \mathcal{E} .

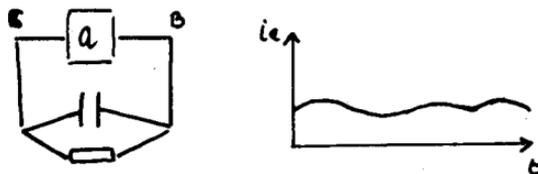


Fig. 13

V. OHM-METRE.

A. Mesure des grandes résistances, calibre 10^6 ohms.

L'appareil \mathcal{E} est mis en série avec une pile de force électromotrice 3 volts, une grande résistance variable R_v , et la résistance x à mesurer (fig. 14).

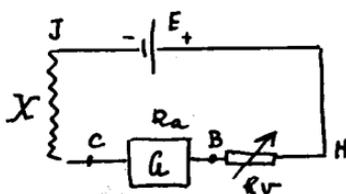


Fig. 14

On mesure l'intensité du circuit ainsi formé.

$$I = \frac{E}{X + R_a + R_v} \quad (1)$$

Dans un premier temps, on met C et J en court-circuit, c'est-à-dire $\chi = 0$. On règle R_v de façon à ce que $I = 50 \mu\text{A}$ (ce réglage sert à compenser les variations de la force électromotrice de la pile).

$$R_v \gg R_a \quad \text{donc} \quad R_v \approx \frac{E}{I}$$

$$\text{si } E = 3 \text{ V} \quad R_v = \frac{3}{50 \cdot 10^{-6}} = 60\,000 \Omega.$$

Lorsqu'on introduit la résistance χ , d'après la formule (1), l'intensité I décroît quand χ croît — à condition que χ ne soit pas négligeable devant R_v . C'est pourquoi la graduation en ohm est inversée par rapport à la graduation en ampère. La correspondance se fait grâce à la formule (1).

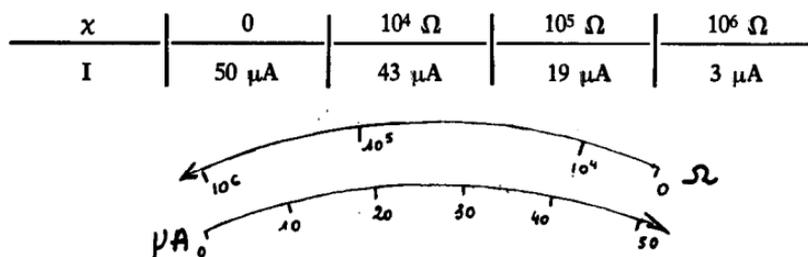


Fig. 15

B. Mesure des résistances sur le calibre 10^5 ohms.

Si l'on place une résistance χ inférieure à $10^4 \Omega$ en série avec R_v , χ est négligeable devant R_v et l'intensité I est à peu près égale à $50 \mu\text{A}$, quel que soit χ . Il faut alors shunter l'ensemble \mathcal{E} et R_v avec une résistance R_s (fig. 16). Si nous prenons un shunt de

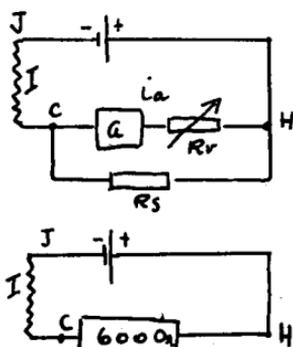


Fig. 16

résistance $R_s = 6700 \Omega$, 9 fois plus faible que R_v , la résistance équivalente aux deux conducteurs en dérivation est égale à $\frac{R_v}{10}$.

Donc : $R_{HC} = 6000 \Omega$.

La résistance x n'est plus négligeable devant la nouvelle valeur de R_{HC} . Donc, lorsque x prendra des valeurs différentes, I variera.

$$\text{Pour : } x = 0 \quad I = \frac{3}{6000} = 510^{-4} \text{ A} = 500 \mu\text{A}$$

$$x = 10^3 \Omega \quad I = \frac{3}{7000} = 4,310^{-4} \text{ A} = 430 \mu\text{A}.$$

Le dixième de cette intensité traverse a qui mesure I à un facteur 10 près. La graduation en ohm établie précédemment sert à mesurer x à un facteur 10 près.

VI. CLASSE DES APPAREILS, PRECISION DES MESURES.

La classe d'un appareil permet de définir la précision des mesures que l'on effectue avec celui-ci.

Les contrôleurs Métrix 011 A et CDA 102 n'affichent pas de classe, leur précision n'est donc pas garantie.

Le CDA 25 possède la classe 1,5 en régime continu et 2 en régime alternatif. Ceci signifie que si l'on utilise le calibre C,

l'incertitude absolue sur la mesure est égale à $\frac{1,5 C}{100}$ en continu

et $\frac{2 C}{100}$ en alternatif.

Par exemple,

soit $x = 6$ volts continu mesurée sur le calibre 15 volts

$$\Delta x = \frac{1,5 \times 15}{100} = 0,22 \text{ volt}$$

$$x = 6 \pm 0,22 \text{ volts}$$

ou $x' = 14$ volts mesurée sur le même calibre

$$x' = 14 \pm 0,22 \text{ volt.}$$

Cette valeur d'incertitude est importante : sur l'échelle comportant 150 divisions, elle représente $\frac{150 \times 1,5}{100} = 2,25$ divisions.

Ainsi, si l'aiguille couvrait le domaine d'incertitude, elle aurait une largeur de 4,5 divisions ! Or, l'aiguille est bien plus fine, d'abord pour ne pas ajouter une erreur de lecture aux autres

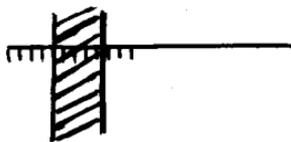


Fig. 17

causes d'erreur mais aussi parce que la mesure est en général meilleure que ne l'indique le calcul précédent. En effet, l'incertitude absolue est le maximum de l'erreur absolue c'est-à-dire l'erreur dans le cas où toutes les causes d'erreur s'ajoutent. Or, ces causes sont indépendantes : température, position de l'appareil, mesure antérieure à la mesure actuelle...

Il y a donc peu de chance pour qu'elles agissent toutes en même temps dans le même sens.

Je ne voudrais pas décourager les lecteurs persévérants qui sont arrivés jusque-là... Pourtant, je dois leur avouer que le contrôleur est encore beaucoup plus complexe ! Enfin, s'il leur reste de l'énergie, ils pourront trouver en annexe des schémas se rapprochant un peu plus de la réalité...

ANNEXE 1

« L'appareil \mathcal{A} » existe-t-il ?

• Si vous cherchez l'appareil \mathcal{A} dans les schémas des constructeurs, il se peut que vous ne le trouviez pas ! Pourtant il existe, je l'ai rencontré pour les calibres 50 μA et 100 mV du contrôleur Métrix 011 A (fig. 18).

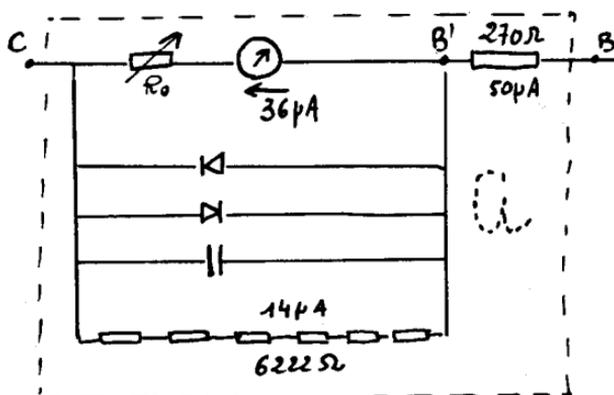


Fig. 18

Appareil \mathcal{A} : résistance : 2 000 Ω ,

intensité maximum : 50 μA ,

tension maximum : $50 \cdot 10^{-6} \times 2\,000 = 10^{-1}$ V.

(La résistance variable R_0 permet d'ajuster la résistance totale de la branche B'C comprenant le galvanomètre, et ainsi de corriger les écarts de résistance des cadres fabriqués en série).

• Les autres calibres du voltmètre utilisent un appareil \mathcal{A}' très voisin, c'est la partie comprise entre B' et C (fig. 19).

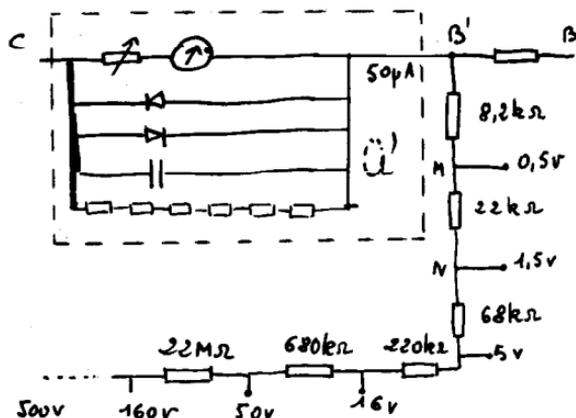


Fig. 19

$$R_{B'C} = 2\,000 - 270 = 1\,730 \, \Omega,$$

$$R_{MC} = 8\,200 + 1\,730 = 9\,930 \, \Omega,$$

$$U_{MC \max} = 9\,930 \times 50 \cdot 10^{-6} \approx 0,5 \, \text{V}.$$

• Pour les ampèremètres, l'appareil \mathcal{A} tend à s'évanouir. La partie commune se limite au galvanomètre, traversé par $36 \, \mu\text{A}$ au maximum : \mathcal{A}' (fig. 20).

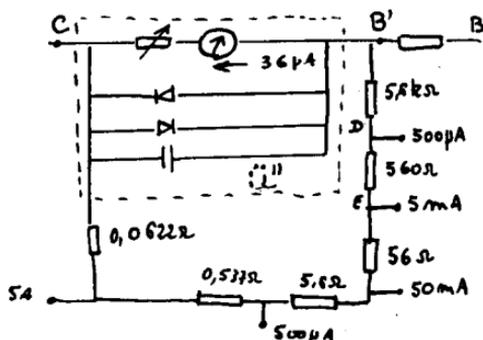


Fig. 20

Considérons le calibre $500 \, \mu\text{A}$ entre les bornes D et C. Deux portions de circuit aboutissent à ces points. Celle qui contient le galvanomètre a une résistance :

$$R_1 = 2\,400 + 5\,600 = 8\,000 \, \Omega.$$

L'autre qui joue le rôle de shunt a une résistance :

$$R_2 = 622 \, \Omega.$$

$$U_{DC} = R_1 I_1 = R_2 I_2 \quad \text{avec} \quad I_1 = 36 \, \mu\text{A} \quad \text{donc} \quad I_2 = 463 \, \mu\text{A}.$$

$$\text{Donc :} \quad I = I_1 + I_2 = 499 \, \mu\text{A} \approx 500 \, \mu\text{A}.$$

• Pour l'ohm-mètre, on retrouve l'appareil \mathcal{A}' .

ANNEXE 2

Contrôleur CDA 102

Schéma général :

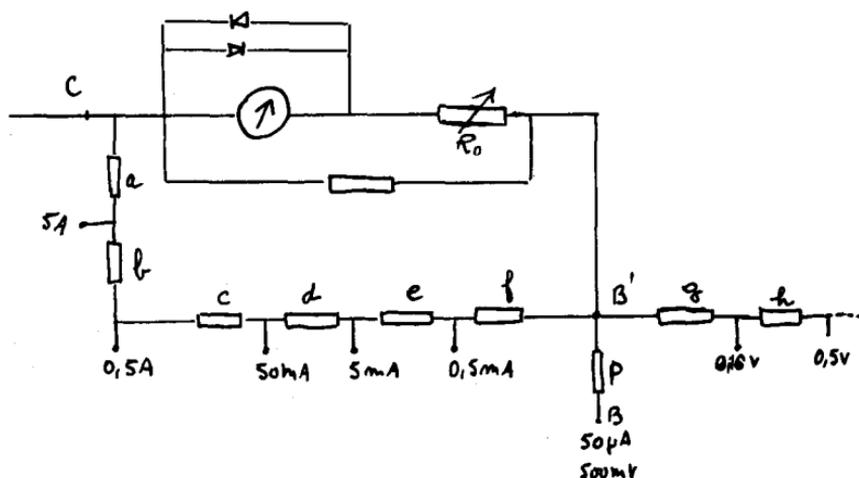


Fig. 21

L'appareil \mathcal{A} compris entre les bornes B et C a ici une résistance de 1000Ω , l'intensité maximale qui le traverse est $50 \mu\text{A}$, la tension maximale $U_{BC} = 1000 \times 50 \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ V}$.

L'appareil \mathcal{A}' (le même en supprimant la résistance p) compris entre les points B' et C, est mis en série avec les résistances g, h, \dots etc. pour obtenir les différents calibres du voltmètre.

L'appareil \mathcal{A}'' — branche supérieure comprise entre B' et C — est shunté par un ensemble de résistances $a + b + c + d + e + f$.

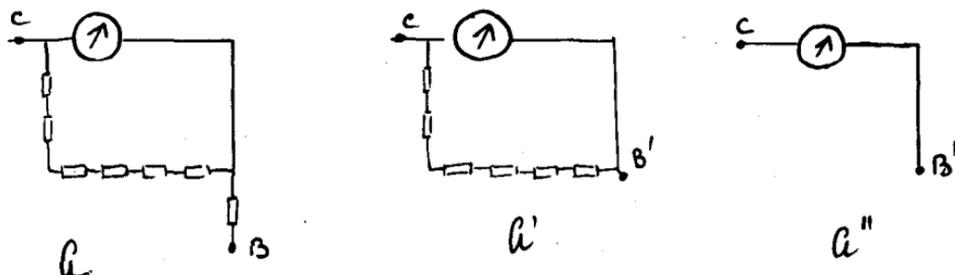


Fig. 22