

5/67
123

UNIVERSITE D'ALGER
ELECTRONIQUE
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
المكتبة

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

Département Télécommunications
المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية

المكتبة

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

MILLIVOLTMETRE
A TRANSISTORS
A IMPEDANCE
D'ENTREE ELEVEE

Proposé par :

Réalisé par :

MR J. SLOSIAR

CETTEIH M.

Année 1966-67

PF 67-9

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

PROPOSE PAR M. V. SLOSIAR

Recu le 15/6/67
Slosiar

Département Télécommunications

MILLIVOLTMETRE à TRANSISTORS

à IMPEDANCE d'ENTREE ELEVEE

Elève Ingénieur : CHETTEIH Moussa

Année 1966-67

TABLE DE MATIERE

- AVANT PROPOS
- INTRODUCTION

1^{ière} PARTIE

PRINCIPES GENERAUX DES MILLIVOLTMETRES

- 1.-	DEFINITION.....	1
- 2.-	MESURE DES FAIBLES TENSIONS.....	3
	2.1. Millivoltmètres pour courant continu.....	3
	2.1.1. Appareils utilisant la methode d'opposition.....	3
	2.1.2. Methode des ponts ou du zéro..	5
	2.1.3. Utilisation d'un amplificateur	6
	2.1.4. Voltmètres à affichage numérique.....	10
	2.2. Millivoltmètres pour courant alternatif.....	16
	2.2.1. Utilisation de la methode d'opposition en alternatif....	16
	2.2.2. Voltmètres à ponts.....	17
	2.2.3. Millivoltmètres de la première catégorie.....	17
	2.2.4. Millivoltmètres de la deuxième catégorie.....	21
	2.2.5. Millivoltmètres de crête.....	23
	2.2.6. Millivoltmètres de creux.....	24
- 3.-	CONCLUSION.....	25

2^{ème} PARTIE
ETUDE THEORIQUE DU
MILLIVOLTMETRE

- 1. -	CHOIX D'UN MILLIVOLTMETRE	
1.1.	Les données du problème.....	26
1.2.	Choix d'un principe.....	26
1.3.	Choix définitif du montage.....	27
1.4.	Les gammes du millivoltmètre.....	31
- 2. -	CALCUL DES ELEMENTS DU MILLIVOLTMETRE	
2.1.	Choix des transistors.....	32
2.2.	Dtermination de l'alimentation.....	32
2.3.	Point de fonctionnement - calcul des resistances de polarisation.....	32
2.4.	Choix des capacités de liaison.....	35
2.5.	Calcul de la contre-réaction.....	35
2.6.	Compensatio du gain aux basses frequences.	41
2.7.	Circuit deredressement.....	41
- 3. -	PERFORMANCES	
3.1.	Impédance d'entrée de l'appareil.....	42
3.2.	Capacité d'entrée du millivoltmètre.....	42
3.3.	Bande passante.....	45
3.4.	Prècision de l'appareil.....	47
3.5.	Consommation - rendement des étages.....	48
3.6.	Distorsion - Bruit.....	49

3^{ième} PARTIE
REALISATION PRATIQUE
ESSAIS

-1.-	REALISATION PRATIQUE DE L'APPAREIL	
1.1.	Circuit de l'appareil.....	51
1.2.	Réglages de l'appareil.....	52
1.2.1.	Vérification en regime station	52

1.2.2. Vérification en régime dynamique...	52
1.2.3. Vérification du redresseur.....	52
1.2.4. Réglage du gain.....	53
1.2.5. Etalonnage.....	53

- 2.- ESSAIS.

2.1. Impédance d'entrée du millivoltmètre.....	55
2.1.1. En fonction de la tension à mesurer.....	55
2.1.2. En fonction de la fréquence.....	56
2.2. Essais en fréquence.....	56
2.3. Autres essais.....	57

- 3.- PLANCHES.

- Implantation des étages amplificateurs et redresseur sur plaque C.E.A.
- Caractéristiques des transistors - droites de charge statiques et dynamiques
- Circuit général du millivoltmètre.

- CONCLUSION.

- BIBLIOGRAPHIE.

oooooooooooo

AVANT PROPOS

L'emploi de matériaux semi-conducteurs connu depuis longtemps (galène) n'a suscité un réel intérêt qu'à partir de 1948 date de la première apparition du transistor inventé par les ingénieurs de la société américaine BELL.

Très rapidement ce nouveau venu prit les rôles de l'électronique et fit reculer encore plus loin les horizons découverts par le tube à vide.

La sécurité de fonctionnement, le faible prix, l'encombrement et surtout la consommation minuscule, les rendements élevés et les hautes performances en fréquences des transistors actuels sont autant de raisons qui rendent systématique l'application du semi-conducteur dans la majorité des réalisations pratiques et en particulier dans les appareils de mesure.

La connaissance approfondie du transistor et de ses applications apparaît donc comme impérative pour tout ingénieur. J'avais donc souhaité étudier un appareil à transistors ce qui aurait l'avantage de compléter ma formation.

Le millivoltmètre à transistors à impédance d'entrée élevée proposé par M. J. SLOSIAR était tout indiqué pour satisfaire mes vœux. J'espère qu'à la fin du projet j'aurai sinon maîtrisé l'étude du transistor connu les lois fondamentales de son application.

INTRODUCTION

La mesure d'une tension se pose :

- lorsqu'on veut connaître une différence de potentiel en tant que grandeur électrique.
- lorsqu'on veut connaître une grandeur physique à laquelle un traducteur fait correspondre une tension par exemple une température, un déplacement un PH, un volume sonore (vu-mètre ou volumètre utilisé dans les chaînes de transmission électro-acoustique).

Nous sommes donc amenés à mesurer des tensions de valeurs extrêmement variées leur gamme s'étend depuis quelques microvolts jusqu'à plusieurs milliers ou dizaines de milliers de volts, leur gamme de fréquence s'étend également de zéro jusqu'aux hyperfréquences se chiffrant par dizaine de milliers de megahertz. De ce fait on rencontre en électronique un nombre très élevé de types de voltmètres aussi différents les uns des autres par les valeurs à mesurer que par la gamme de fréquence et par la forme des tensions.

Il serait aberrant et d'ailleurs impossible de vouloir mentionner ici tous les types de voltmètres existant actuellement aussi nous limitons nous au domaine qui nous intéresse c'est à dire la mesure de faibles tensions à des fréquences assez basses. nous nous attacherons plus aux principes généraux qui interviennent dans la conception des millivoltmètres qu'à donner une liste de divers appareils.

1 i è r e P a r t i e

PRINCIPES GÉNÉRAUX DES MILLIVOLTMÈTRES

o o o C o o o

1 - DEFINITIONS

Un voltmètre est un appareil qui à une tension fait correspondre la déviation d'une aiguille. Il est constitué par un traducteur qui à partir de la tension à mesurer, donne un courant ou une tension (appareils électroniques) une chaleur (appareils thermiques), et d'un équipement moteur.

On utilise tel ou tel traducteur selon le moteur ainsi pour un moteur qui ne fonctionne qu'en continu on prend un traducteur qui fasse correspondre une grandeur continue à une grandeur alternative (cellule redresseuse, diode à crête....)

Pour un moteur qui travaille en alternatif, le traducteur devra conserver la fréquence de la grandeur électrique (résistances additionnelles, diviseurs de tension, transformateurs de tension etc...)

Le traducteur sera également fonction de la nature de la tension à vouloir mesurer, cette tension peut être continue, si elle est alternative on peut vouloir mesurer la valeur efficace, la valeur moyenne ou la valeur de crête

Pour illustrer cela prenons l'exemple de la mesure de la valeur efficace d'une tension sinusoïdale et supposons que l'on dispose d'un galvanomètre qui fonctionne donc en courant continu.

Ceci nous montre que le traducteur devra satisfaire deux conditions :

- Son entrée étant alternative il doit délivrer un courant continu.

- Ce courant continu devra être proportionnel à la valeur efficace de la tension injectée.

On pourra prendre par exemple pour traducteur un redresseur à diodes.

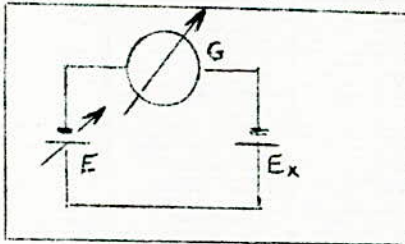
2 - Mesures des faibles tensions - millivoltmètres :

Les méthodes sont nombreuses mais on s'intéressera uniquement aux méthodes applicables dans les voltmètres.

2.1. Millivoltmètres pour courant continu :

2.1.1 Appareils utilisant la méthode d'opposition.

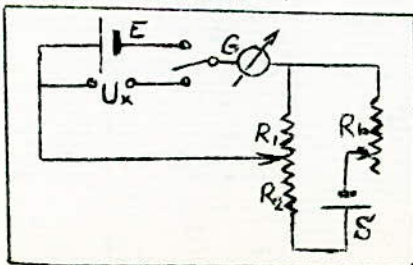
a) Principes : Cette méthode consiste à opposer la tension inconnue à une tension bien connue et variable à travers un galvanomètre, lorsque celui-ci ne devie pas les deux tensions sont égales.



La tension réglable est obtenue en faisant circuler un courant produit par une source auxiliaire sur une résistance connue. Il apparaît donc deux possibilités de réglage de la tension E :

On peut soit garder la résistance constante et faire varier le courant, l'affichage se fera donc sur un ampèremètre ; soit garder le courant constant (multiple de 10 par exemple 0,1 : 1 ; 10 100 mA) et faire varier la résistance, il faut que la résistance totale du circuit auxiliaire reste constante. L'affichage dans ce cas là se fera sur les résistances. La première méthode est moins précise que la dernière puisqu'il s'y ajoute l'erreur due à l'ampèremètre.

b) Appareil : Une réalisation possible de cette méthode est la suivante :



Le commutateur étant dans la position 1 on règle le courant i à une valeur donnée $\frac{1}{1000}$ A par exemple pour cela on donne à R_1 la valeur $1000 E$ (pour

une pile étalon weston $1,0185 \pm 0,01\%$ à 20°C on réglera donc R_1 à $1018,5$ ohms) et on agit sur le rhéostat R_h , de façon qu'aucun courant ne traverse le galvanomètre.

On a alors :

$$E = R_1 i \text{ ou } E = 1000 E_i$$

$$\text{C'est-à-dire } i = \frac{1}{1000} \text{ A.}$$

Le courant ainsi réglé ne devra plus bouger donc on ne touchera plus à R_h .

Le commutateur en position 2 on agit sur R_1 (on maintenant toujours $R_1 + R_2 = C^{k\Omega}$) de façon qu'il ne passe aucun courant dans le galvanomètre G si R_1 est la résistance correspondant à ce réglage $R_1 i = U_x$ ou $V = \frac{R_1}{1000}$

Ainsi on peut effectuer une lecture directe sur les résistances.

c) Précision : Avec un galvanomètre très sensible et au besoin l'utilisation d'un amplificateur on peut deceler des écarts de tension extrêmement faibles. Cependant n'oublions pas que cette précision n'a de sens que si l'étalon lui même possède une précision suffisante.

Notons que cette méthode d'opposition permet la mesure sans consommation d'énergie car à l'équilibre la source à évaluer ne débite pas ; cela correspond en quelque sorte à utiliser un voltmètre de résistance interne infinie.

Cette méthode est certainement une des plus précise sinon la plus précise de toutes les méthodes de mesure des tensions continues, cependant la manipulation est assez longue et délicate, le galvanomètre est sensible et fragile l'équipement est

coûteux.

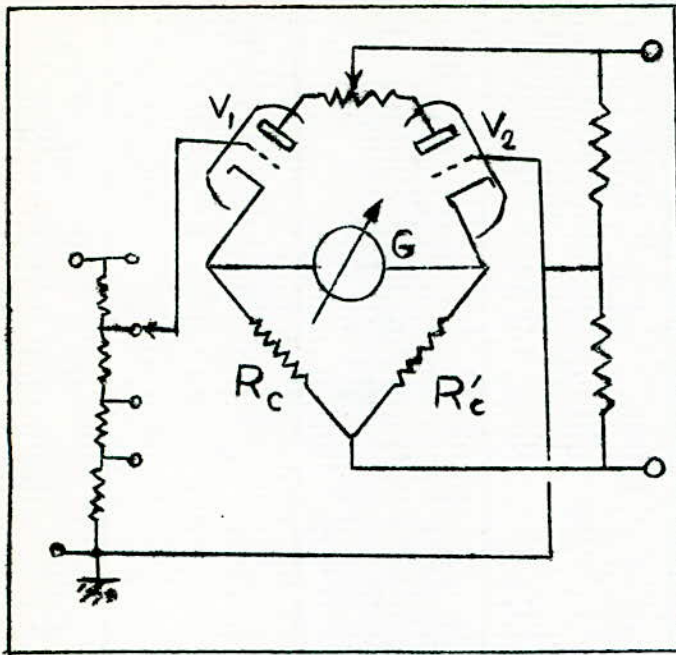
Dans toute mesure les résultats sont entâchés de certaines erreurs ; pour la méthode d'opposition on peut les grouper comme suit :

- l'erreur sur la connaissance de la f.e.m. de l'étalon (0,01 % en général) ainsi que l'instabilité en cours d'expérience due surtout à la température.
- l'erreur sur la connaissance des résistances (de bons potentiomètres offrent 0, 03 %).
- les erreurs dues aux différences de potentiel de contact et aux f.e.m. thermoélectriques elles sont éliminées par une seconde mesure après avoir inversé toutes les f.e.m. et en prenant la moyenne des deux mesures.
- l'erreur de jumelage des résistances R1 et R2 pour que leur somme reste constante , cette erreur peut rester très faible.
- l'instabilité de la source d'alimentation.
- les erreurs de réglage au moment du tarage (réglage du courant i) et au moment de l'opposition de la tension inconnue.

Le zéro du galvanomètre n'est apprécié qu'avec une certaine approximation qui est due aux erreurs de lecture, de fidélité ... à ceci correspond une incertitude ΔR dans le réglage des résistances d'où erreur dans le résultat final.

2.12 - METHODE DES PONTS OU DU ZERO :

La tension à mesurer est appliquée à la grille d'une triode montée sur un pont à 4 branches.



Comme pour la méthode d'opposition la lecture se fera à la déviation nulle du galvanom.

Le tube V1 sert d'adaptateur d'impédance entre la résistance d'entrée du voltmètre de la résistance formant une branche du pont.

Il est monté en amplificateur cathodique, le tube V2 n'est pas actif il sert uniquement à réaliser la symétrie du montage.

Le pont pourra s'équilibrer au repos par le potentiomètre

2.13 - UTILISATION D'UN AMPLIFICATEUR :

Ces méthodes sont les plus couramment employées en raison de la possibilité qu'elles offrent de mesurer les faibles tensions. L'amplificateur permet l'amélioration des performances des voltmètres, en réduisant la consommation, en augmentant l'impédance d'entrée sans pour cela diminuer sa sensibilité.

a) Voltmètres à amplificateur continu :

La tension continue à mesurer est amplifiée ce qui permettra d'actionner avec une grande sensibilité l'équilibre moteur c'est à dire le galvanomètre.

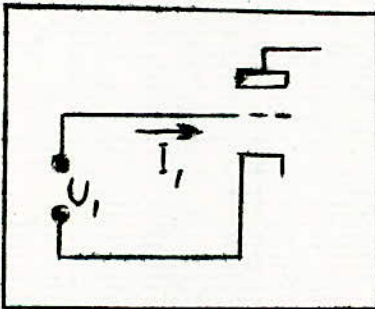
On demande à l'amplificateur deux qualités : la grande sensibilité et la grande résistance. Il n'est pas possible d'avoir les deux simultanément de la réalisation du voltmètre est différente selon que l'on cherche l'une ou l'autre qualité.

Pour avoir un appareil très sensible c'est à dire de très faible calibre, il faut une grande amplification. On est limité dans cette voie avec les moyens classiques car il n'est guère possible de réaliser des amplificateurs à courant continu comportant de nombreux étages.

Toute fois les voltmètres utilisant l'amplificateur à courant continu présentent l'avantage d'offrir une impédance d'entrée extrêmement élevée.

En effet si l'entrée se fait sur la grille d'un tube il sera aisé de compenser et rendre nul le courant de fuite de cette grille puisque l'impédance d'entrée s'écrit $Z_1 = \frac{U_1}{I_1}$

On voit que lorsque I_1 tend vers zéro Z_1 tend vers l'infini.

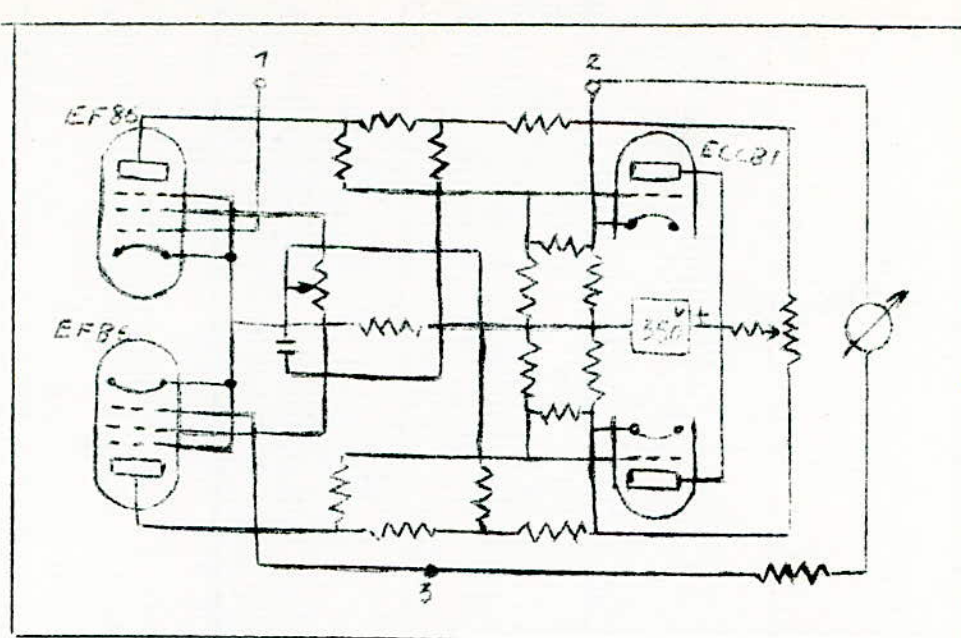


est très grande 10^{14} .

On atteint des résistances d'entrée de passage 10^{12} .

Nous avons choisi comme exemple d'appareil utilisant ce principe le voltmètre

Le mouzy dont la résistance d'entrée



Cependant les amplificateurs à courant continu présentent un certain nombre d'inconvénients inacceptables dans un appareil de mesure.

- la sortie est soumise aux variations de la tension d'alimentation.

- le bruit propre de l'appareil assez important si l'on ne prend pas des mesures spéciales il est gênant pour la mesure de très faibles tensions.

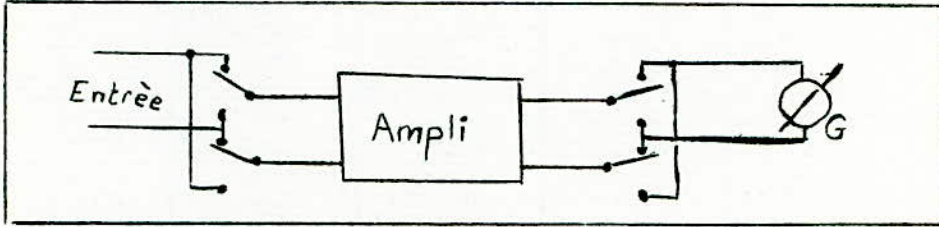
Ce sont là des raisons suffisantes qui ont poussé les chercheurs à utiliser des amplificateurs à courant alternatif pour la mesure des tensions continues.

b) Voltmètre à amplificateur alternatif :

Le procédé consisté à hacher la tension continue à me-

dresser. Avec un discriminateur on peut alors restituer à la tension de sortie sa polarité initiale qui serait perdue avec un simple redressement.

En général on découpe la tension à l'aide d'un vibreur après amplification un autre vibreur fonctionnant en synchronisme redresse le courant obtenu.



Les procédés modernes remplacent les vibreurs par des transistors jouant le même rôle.

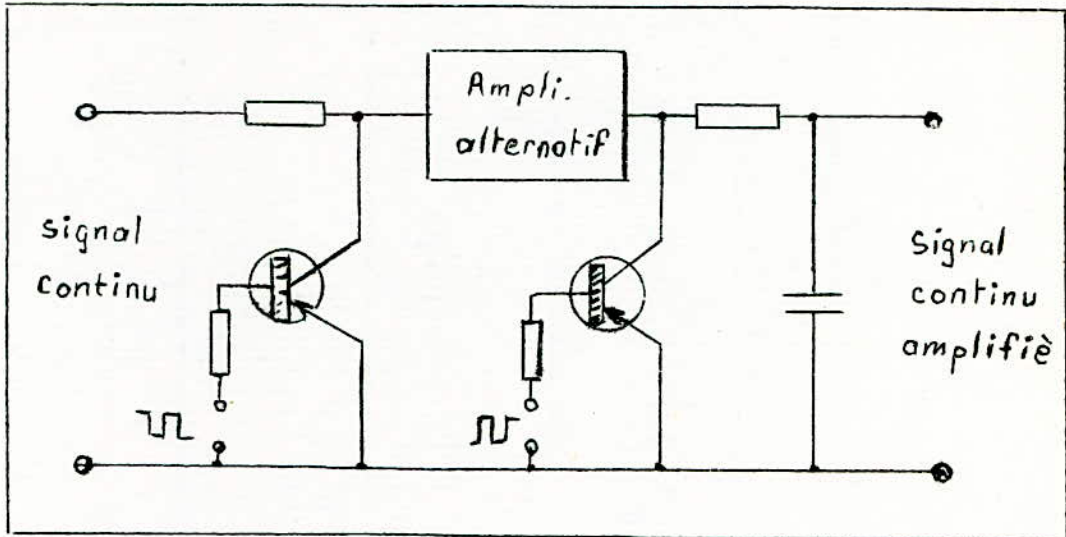
Ce que ces voltmètres perdent en résistance d'entrée ils le gagnent en précision et stabilité.

Pour illustrer ce principe nous avons coisi "le multi-voltmètre amplificateur Millivac" dans lequel la tension continue à mesurer est transformée en une tension périodique à l'aide d'un vibreur alimenté par un courant à la fréquence du secteur, la tension obtenue est amplifié par un amplificateur du type alternatif.

Le premier étage amplificateur sous-alimenté à un gain supérieur à 1000 le second normalement alimenté à un gain de 200.

Aux bornes de l'impédance d'entrée de $11\text{ M}\Omega$ la tension de bruit est inférieure à $10\ \mu\text{V}$ le taux de contre réaction réduit en effet cette tension de bruit à une valeur négligeable.

L'utilisation du transistor est encore plus aisée que le tube électronique le schéma complet d'un amplificateur continu (ci-dessous) utilise un transistor en vibreur, la detection synchrone se fait à l'aide d'un second transistor.



2.14 - VOLTMETRES A AFFICHAGE NUMERIQUE :

Ces voltmètres sont actuellement de plus en plus répandus en raison de leur précision et de leur qualité de lecture.

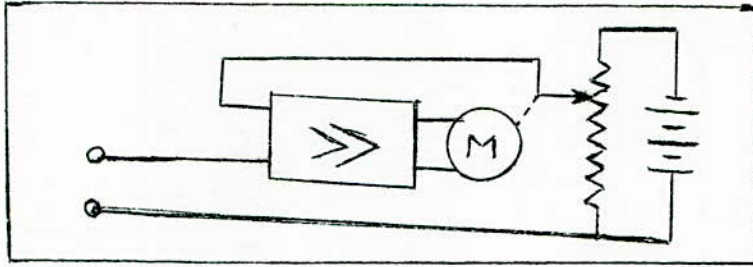
On les utilise dans certaines applications de contrôle où il est nécessaire que les mesures se fassent automatiquement avec une certaine périodicité. On cherche alors à avoir un affichage numérique du résultat.

1° Appareils électromagnétiques :

Ils sont constitués par un servomécanisme qui à la tension à mesurer oppose la tension aux bornes d'un potentiomètre. Lorsque ces deux tensions ne sont pas les mêmes leur différence est appliquée à l'entrée d'un amplificateur qui commande la rotation d'un moteur de manoeuvre du curseur du potentiomètre.

Les différents types de voltmètres à affichage numé-

rique différent par la nature du servomécanisme et par le système d'affichage.

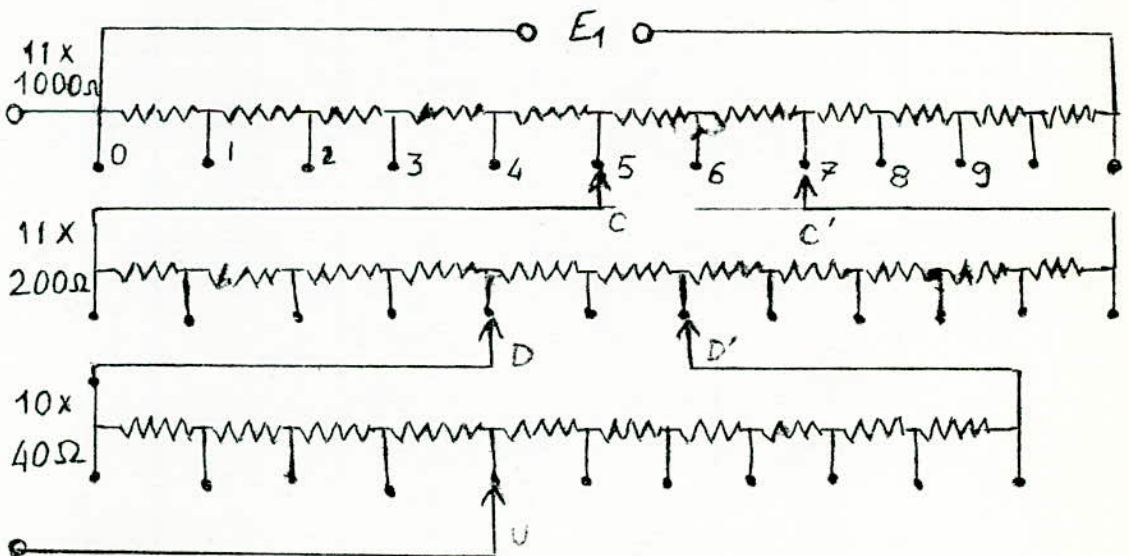


En particulier nous avons :

a) Voltmètre à relais pas à pas.

Le temps de réponse du système est inférieur à 1 seconde ; la précision est de 0,1 % dans le cas d'un nombre à 3 chiffres.

Certains voltmètres peuvent fournir 4 ou 5 chiffres.



U - unités
D - Dizaines
C - Centaines

b) Voltmètres à codeur :

Contrairement au précédent le potentiomètre varie de façon continue. Leur vitesse est notablement plus élevée que les appareils à relais pas à pas 10 mesures par seconde précises 0,15 %.

2° Appareils électroniques :

Le principe général est le même que pour les appareils électromécaniques. La différence est que la comparaison de la tension à mesurer V_1 à la tension étalon V_2 se fasse par des procédés électroniques.

Le voltmètre comprend :

- a) un organe générateur de la tension réglable de comparaison V_2 .
- b) un comparateur qui permet d'apprécier l'égalité des deux tensions.
- c) un codeur qui fait correspondre à la tension V_2 soit une suite d'impulsions soit une répartition de tensions (convertisseur analogique numérique.)
- d) un système d'affichage qui opère à partir des impulsions (compteur) ou de la répartition des tensions.

Il faut de plus,

- un reducteur qui permet de ramener la tension à mesurer dans un intervalle bien défini (0,10 V par exemple). Cet organe fixe la position de la virgule.
- une tension de référence (pile étalon ou diode Zener) qui permet de vérifier l'étalonnage de l'appareil.
- un organe de déclenchement qui permet la répétition auto-

matique de la mesure à une fréquence réglable.

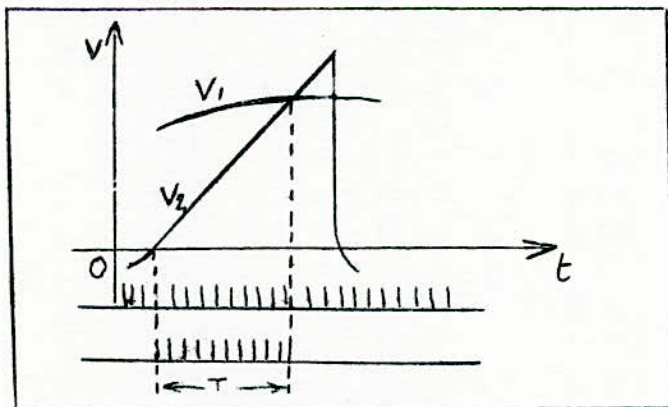
La différence essentielle entre les différents voltmètres à affichages numérique tiennent à la nature du codeur et au système de conversion analogique-numérique (**binaire** ou décimal).

a) Appareils à codeurs par comptage direct :

Dans ces appareils le générateur de tension de comparaison V_2 fournit une tension croissant (ou de croissant) linéairement avec le temps (dent de scie) entre une valeur inférieure au potentiel zéro et une valeur supérieure à la tension à mesurer (qui sera éventuellement réduite par un diviseur de tension).

L'appareil produira l'impulsion lorsque la dent de scie atteindra le potentiel zéro et une autre dès qu'elle atteint V_1 le temps T qui s'écoule entre les deux est proportionnel à V_1 .

On peut utiliser un circuit porte commandé par ces deux tops et qui laisse passer des impulsions issues d'un générateur à fréquence très stable. Elles seront alors comptées et les résultats affichés.



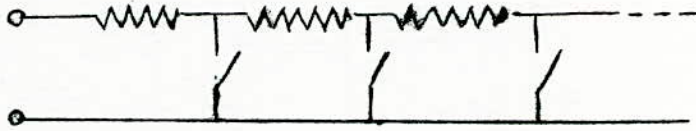
La précision est de l'ordre de 0,1 % le taux de répétition de la mesure est de l'ordre de quelques centaines par seconde.

b) Appareils à codeur par retraction :

Le procédé consiste à rendre variable la tension V_2 par fermeture d'interrupteurs l'affichage étant lié à la distribution

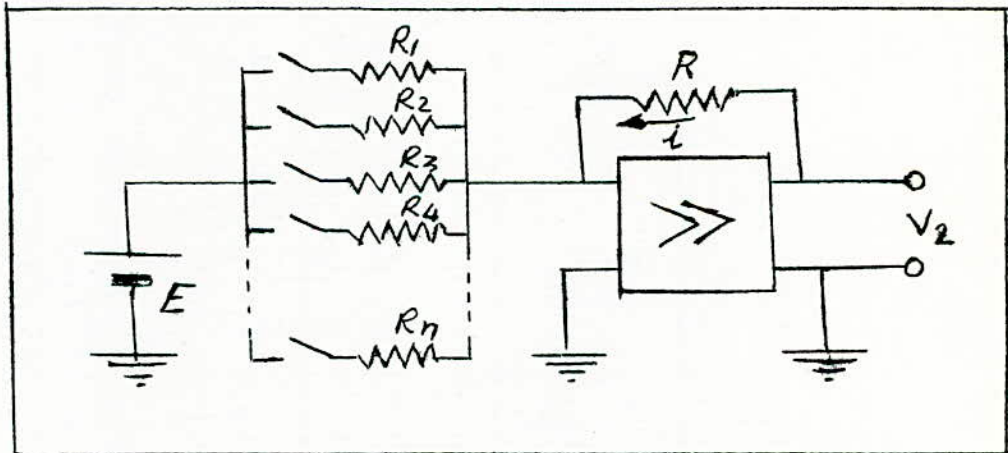
des interrupteurs fermés.

On dispose d'une suite de résistances parcourues par un courant constant.



En guise d'interrupteur on aura des transistors et les résistances seront distribuées comme les valeurs d'une boîte de poids.

Un autre procédé utilise un amplificateur opérationnel. Pour agir sur la tension V_2 on insère à l'entrée d'un amplificateur à très grande résistance d'entrée R un plus ou moins grand nombre de résistances $R_1 R_2 \dots$ alimentées par une tension E de référence.



Le courant à l'entrées de l'amplificateur est :

$$i = i_1 + i_2 + \dots + i'$$

$$\text{avec } i_1 = \frac{E}{R_1} \quad i_2 = \frac{E}{R_2} \quad \dots$$

$$i' = \frac{V_2 - V_1}{R} = \frac{V_2}{R} \left(1 - \frac{1}{G} \right)$$

L'impédance d'entrés et le gain étant très grand
 $i \approx 0$ $\frac{1}{G} \approx 0$

on en tire $V_2 = - ER \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \right)$

Les appareils à codeur par rétroaction sont actuellement les plus répandus .

Ils sont précis ordre 0,1 % à 0,01 % (spécialement ceux qui ont des interrupteurs à relais).

Ils sont rapides : taux de répétition 1000 par seconde (spécialement ceux à relais électronique) inconvénients : assez coûteux.

Conclusion :

Nous venons de donner les principes généraux utilisés dans les millivoltmètres actuels, cependant le nombre de versions d'appareils est extrêmement élevé utilisant le même principe. Ils diffèrent par leur gamme de mesure par leur sensibilité etc....

Actuellement ce sont les appareils à affichage numérique et utilisant les techniques d'impulsions, qui se développent de plus en plus et le jour n'est pas loin où l'on disposera d'appareils numériques de très petites dimensions à faible prix de revient capable de remplacer avantageusement les "appareils de poche" actuels tels que le Métris.

2.2 - Millivoltmètres pour courant alternatif :

Le développement des radiocommunications et des techniques de transmissions necessitent la mesure de tension à des fréquences très variées aussi les appareils de mesures possèdent-ils des particularités spécifiques à leur comaine d'application.

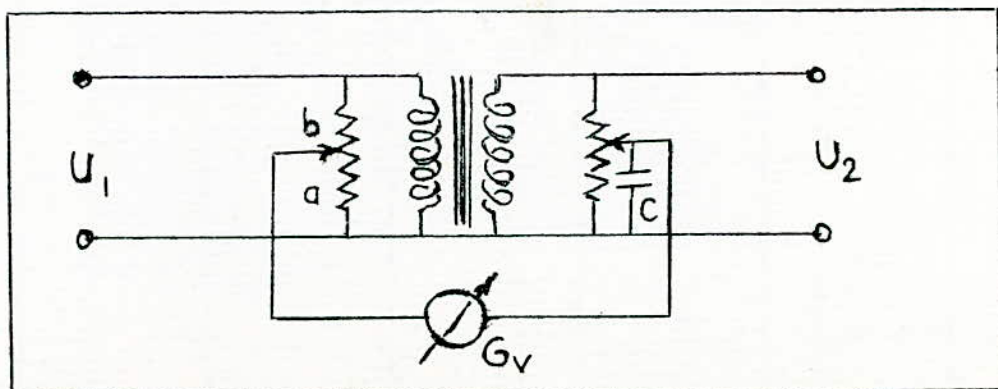
Nous citerons dans ce qui suit quelques réalisations et surtout des principes généraux, seuls susceptibles de mesurer la grande multitude de miltivoltmètres.

2.21 - UTILISATION DE LA METHODE D'OPPOSITION EN ALTERNATIF.

Le problème de la mesure de tension altéernative par la méthode d'opposition est complexe car il est necessaire que les deux tensions à comparer aient la même fréquence ce qui impose pratiquement qu'elles proviennent de la même source. De plus il faut égaler à la fois les grandeurs efficaces et les phases des tensions, ce qui necessite l'usage d'un déphaseur pour la tension réglable.

L'utilisation de la méthode d'opposition ne se fait en consequence que dans des cas particuliers.

Nous donnerons comme exemple la mesure du rapport de transformation d'un transformateur de mesure.



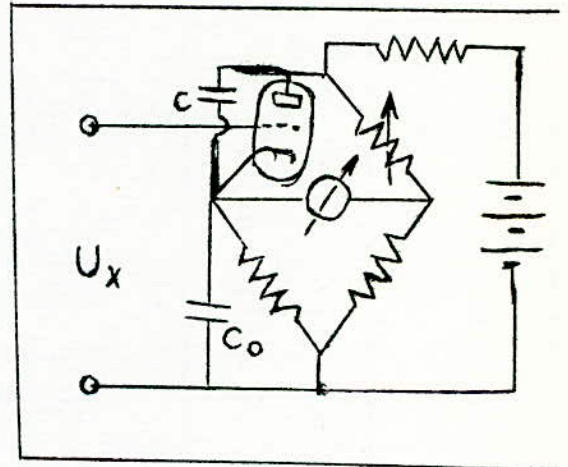
C : Condensateur de rattrapage du déphasage introduit par le transformateur.

GV : Appareil de zéro (galvanomètre à vibrations).

2.22 - VOLTMETRE A PONT :

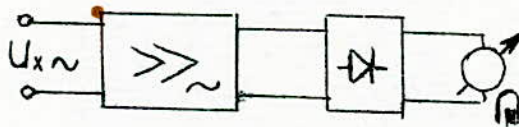
Le voltmètre se caractérise par sa précision. La résistance interne du tube forme la 4^{ème} branche du pont.

Pour pouvoir l'utiliser en alternatif il faut placer les condensateurs C et Co.



2.23 - MILLIVOLTMETRES DE LA PREMIERE CATEGORIE

Ce sont des appareils qui consistent à amplifier d'abord la faible tension à mesurer ensuite la redresser pour pouvoir attaquer un galvanomètre à cadre mobil.



Ces millivoltmètres peuvent ainsi mesurer de très faibles tensions il peuvent avoir des impédances d'entrée élevées et leur capacité d'entrée faibles qui lui permet des mesures en hautes fréquences.

L'amplification en alternatif étant chose bien connue ces appareils peuvent atteindre des performances très intéressantes surtout dans le domaine de la sensibilité.

1° Voltmètre à détection par la plaque :

Il est constitué essentiellement par un tube triode ou pentode sur la plaque duquel on connecte un milliampèremètre à courant continu court circuité pour les courants à haute fréquence par la capacité C et mesurant le courant moyen de plaque.

La polarisation se fait au cut-off grâce à une résistance potentiométrique réglable. Dans ce schéma le même tube sert à l'amplification et à la détection.

Le courant de grille se retrouvant sur la plaque on a une amplification, quant au redressement il résulte de la polarisation de grille (polarisation au cut-off correspond à l'utilisation d'une diode redresseuse.)

La tension alternative à mesurer est appliquée à la grille en a b.

Supposons que l'on applique à la grille une tension sinusoidale.

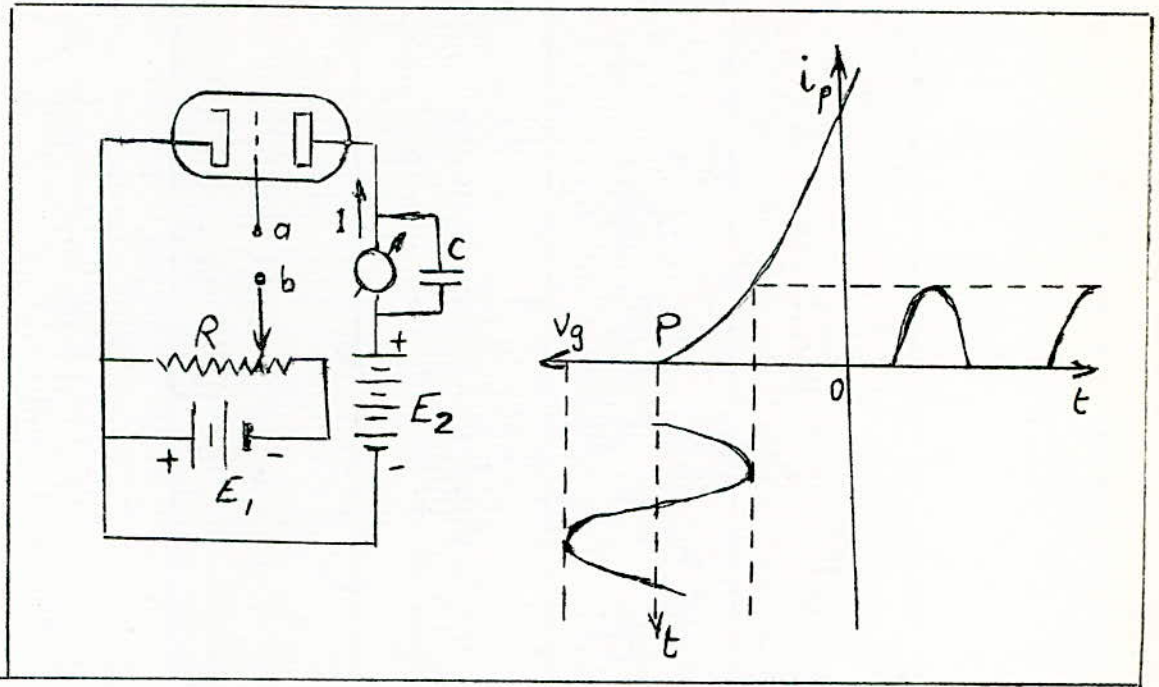
$$u = U \sin \omega t$$

Si l'on suppose que la courbe $i_p = f(V_g)$ est assimilable à une parabôle le courant plaque sera : $i_p = k U^2$

Le courant moyen indiqué par le milliampèremètre est

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T i \, dt = \frac{1}{T} \frac{k}{2} \int_0^T U^2 \, dt = \frac{k}{2} U_{\text{eff}}^2$$

L'appareil est donc à échelle quadratique et mesure la tension efficace.



Ce résultat est général quelle que soit la forme du signal appliqué sur la grille en ab pourvu que les deux alternances soient symétriques pour que l'on puisse écrire :

$$\int_0^{\frac{T}{2}} u^2 dt = \int_{\frac{T}{2}}^T u^2 dt = \frac{1}{2} \int_0^T u^2 dt$$

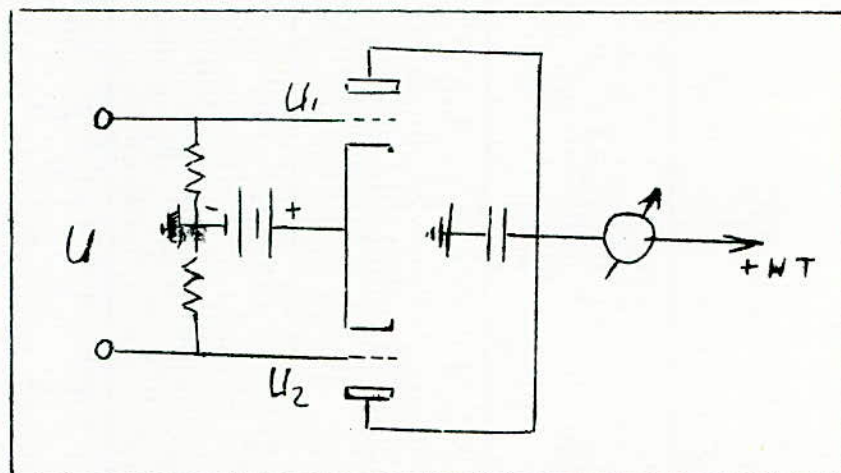
Dans le cas où les deux alternances ne sont pas identiques on utilise un circuit symétrique donnant la valeur efficace de la tension à mesurer.

Chaque grille reçoit : $u_1 = \frac{u}{2}$ $u_2 = -\frac{u}{2}$
le courant qui au galvanomètre est :

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i_1 dt + \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^T i_2 dt = \frac{k}{T} \left[\int_0^{\frac{T}{2}} u_1^2 dt + \int_{\frac{T}{2}}^T u_2^2 dt \right] \\ &= \frac{k}{T} \int_0^T u^2 dt \end{aligned}$$

et l'on a rigoureusement quel que soit le signal

$$I = k U_{\text{eff}}^2$$



Ce pendant avec de tels appareils on est limité dans la gamme de mesure.

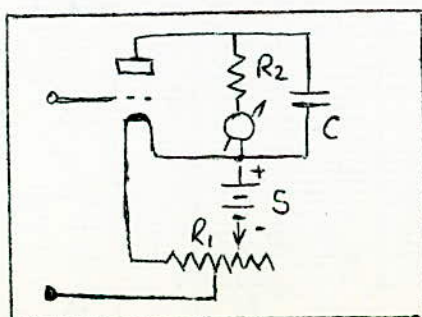
- En effet il faut que la tension à mesurer possède une amplitude inférieure à la tension de cut off sinon la grille deviendrait positive et la résistance d'entrée du voltmètre chuterait rapidement.

- Deuxièmement le point P du cut off est mal défini et est soumis à des fluctuations les mesures des faibles tensions (donc au voisinage du point P) s'en trouveraient faussées.

Pour l'utiliser en millivoltmètre assez précis il conviendrait donc de précéder l'étage par un amplificateur de tension.

Une réalisation pratique de ce principe est :

Le voltmètre de Moullin



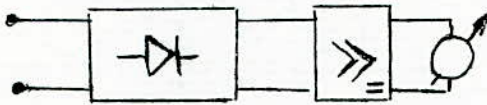
C'est un appareil portatif qui nécessite une tension S faible.

La source de chauffage sert en temps de polarisation. Cependant il faut des tubes spéciaux.

2° Les millivoltmètres appartenant au premier groupe sont très nombreux et couramment utilisés, l'ampli alternatif comporte en général un montage cathodique qui donne une résistance d'entrée très élevée il devra alors être suivi d'étages amplificateurs de tension. (schéma à transistor)

2.24 - MILLIVOLTMETRES DE LA DEUXIEME CATEGORIE :

Cette catégorie regroupe tous les millivoltmètres où la détection se fait avant l'amplification.



On voit qu'ils necessitent un amplificateur à courant continu ce qui restreint déjà la gamme des mesures, en effet il est difficile de faire des amplificateur continus à plusieurs étages.

Cependant si leur sensibilité est plus faible que pour les appareils de la première catégorie, leur bande de fréquence, par contre, est beaucoup plus large.

1° Appareils à detection par la grille :

L'appareil le plus simple de la 2ème catégorie comporte un seul tube triode ou penthode monté suivant le schéma 1 ou le schéma 2.

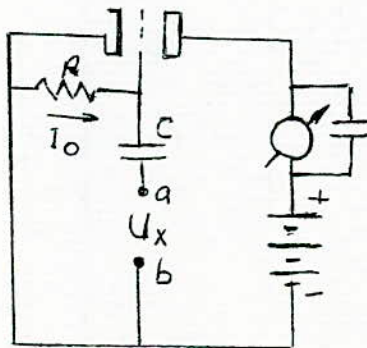


fig 1

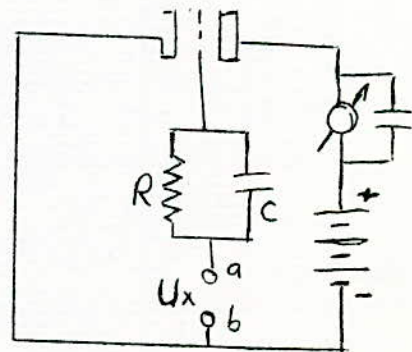
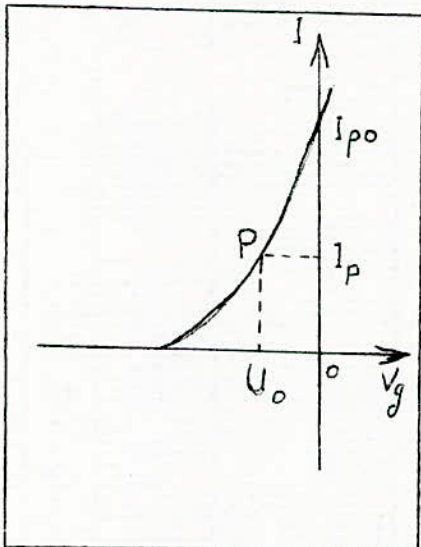


fig. 2

fonctionnement :

a) au repos c'est-à-dire en l'absence de tension appliquée le point de fonctionnement du tube est en P_0 correspondant à une polarisation de grille nulle et à un courant I_{p0}



b) si l'on connecte en ab une tension alternative la détection de l'espace grille-cathode fonctionnant en diode, provoque une chute de la tension moyenne de grille :

$$U_0 = -R I_{p0} = -U$$

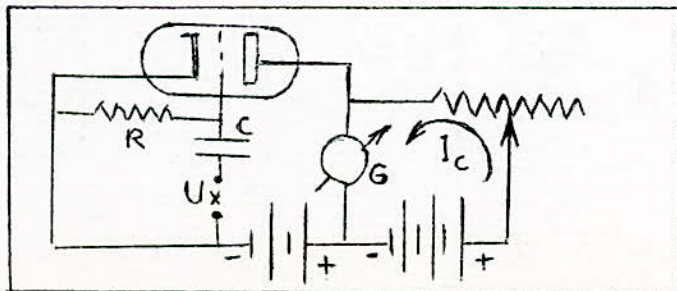
et le point de fonctionnement glisse sur la caractéristique de P_0 en P. - Simultanément le courant moyen de plaque diminue de I_{p0} en I_p

c) la composante utile mesurée par l'appareil G est la diminution du courant plaque :

$$\Delta I = I_{p0} - I_p$$

Les appareils utilisant la détection grille sont à déviation linéaire puisque pour des tensions à mesurer faibles, on reste sur la partie linéaire de la courbe $i_p = f(V_g)$

Le gros inconvénient est que en l'absence de tensions l'appareil G est traversé par le courant I_{p0} courant de repos. Ainsi le repos électrique de l'appareil ne correspond pas à son repos mécanique. On résout le problème par une compensation du courant.



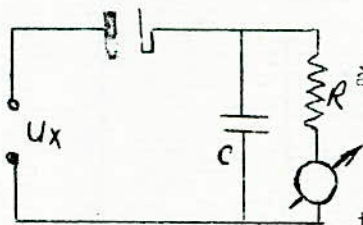
2.25 - MILLIVOLTMETRES DE CRETE :

Ce sont des dispositifs où la constante de temps reste très grande devant l'intervalle de temps qui sépare deux crêtes consécutives (Ces crêtes étant périodiques)

On est amené à utiliser des dispositifs à faible capacité et à très grande résistance (plusieurs dizaines de mégohms) mais on aura ainsi un courant si faible que même un microampèremètre ne le détecterait peut-être pas.

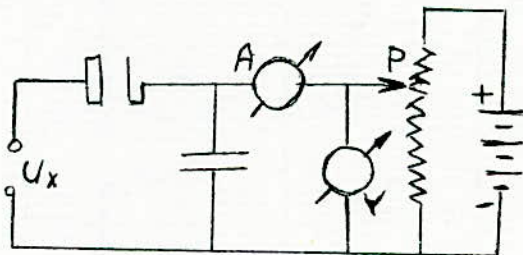
On peut alors utiliser comme paramètre de mesure la tension aux bornes de R et non plus le courant.

Le montage utilisé comporte une diode.



Ces dispositifs ont l'avantage d'être à lecture directe.

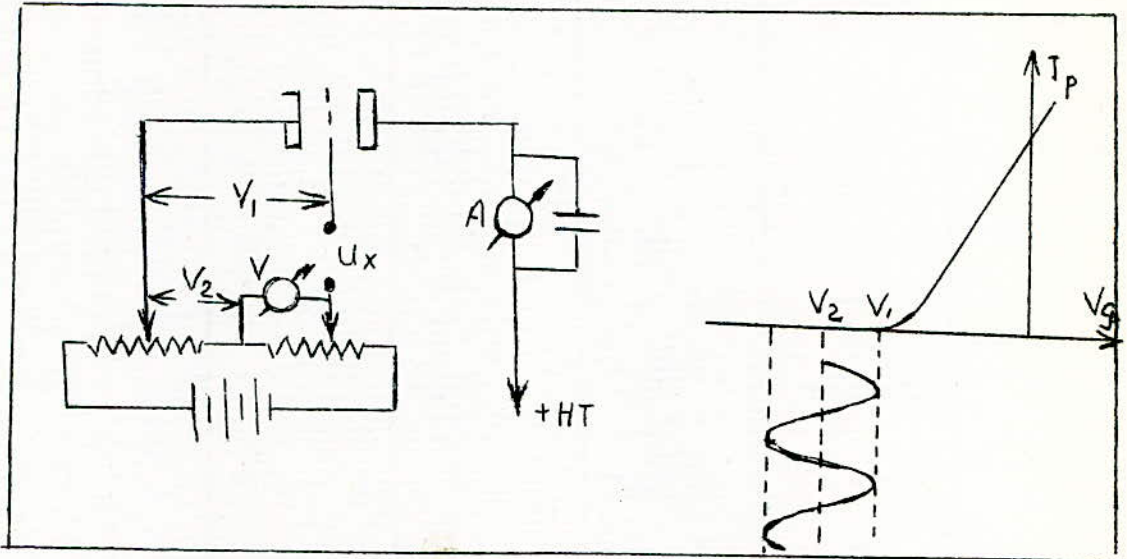
Cependant dès que les crêtes sont trop espacées et à pointes brèves leurs indications s'en trouvent complètement faussées, on trouve la difficulté en utilisant le montage suivant :



Tant que la tension de polarisation reste supérieure à la valeur maximale de la pointe à mesurer, aucun courant ne traverse le microampèremètre. Au contraire si elle devient inférieure la tension U ne débite dans la diode pendant les points de tension supérieure à V et le μA devie.

On peut donc régler à U_{max} valeur de crête et lire

sa valeur au voltmètre V, une variante de ce principe est obtenue avec une triode.



fonctionnement :

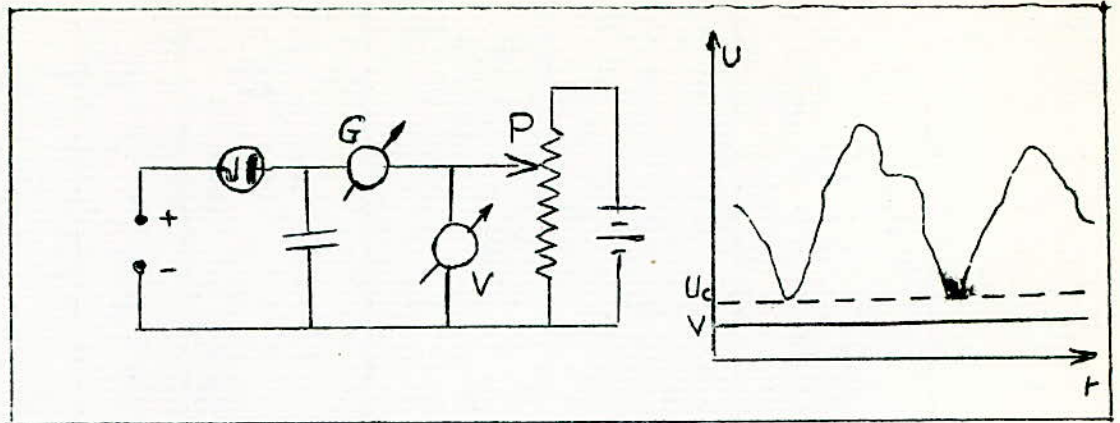
1° on ab en court-circuit on règle par P1 la polarisation à V_1 qui amène l'ampéremètre à un repère voisin du point de naissance de la caractéristique de plaque.

2° on place en ab la tension à mesurer et on règle par P2 la tension V_2 qui amène l'ampéremètre à sa déviation précédente.

La différence $V_2 - V_1$ donne U_{max} le voltmètre V nous donne directement $V_2 - V_1$.

2.26 - VOLTMETRE DE CREUX :

Ces voltmètres servent à mesurer la tension de creux U_c ou tension minimale d'un signal ondulé quelconque mais toujours de même signe il comporte les mêmes éléments que le voltmètre à crête à cette différence puisque la polarité de la diode (et par suite celle du galvanomètre) est inversée.



3 - CONCLUSIONS :

Dans ce qui précède nous n'avons pas eu pour prétention de citer tous les millivoltmètres en application en électronique ni même épuiser les différentes méthodes de mesure de faibles tensions mais seulement de donner les principes généraux les plus important utilisés en métrologie en les classant par la nature de la tension à mesurer.

2ième P a r t i e

ETUDE THEORIQUE DU MILLIVOLTMETRE



1 - CHOIX D'UN MILLIVOLTMETRE

1.1 - Les données du problème :

Le titre "millivoltmètre à transistor et à impédance d'entrée élevée" contient déjà trois exigences :

la première est que l'appareil pourra mesurer les faibles tensions.

la seconde est qu'il devra être complètement transistorisé.

enfin son impédance d'entrée sera assez élevée par rapport aux voltmètres classiques.

Le millivoltmètre sera réalisé pour courant alternatif. Sa sensibilité maximum sera de 10 mV à la déviation totale.

Il sera utilisé pour la mesure de tension basses fréquences d'une dizaine de hertz jusqu'à quelques 200 kHz.

1.2 - Choix d'un principe :

Nous disposons de deux schémas globaux : amplificateur alternatif plus redresseur ou redresseur + amplificateur continu.

Les redresseurs à diodes semi-conductrices n'offrent pas une résistance d'entrée très élevée, le second schéma est donc impropre. Nous prendrons donc le schéma : amplificateur-redresseur d'autant plus que la bande de fréquence escomptée n'est pas très élevée.

La contre réaction sera un élément de base du projet en effet elle contribue à élever l'impédance d'entrée, à réaliser la compensation de température et à augmenter la linéarité et la stabilité de l'amplification.

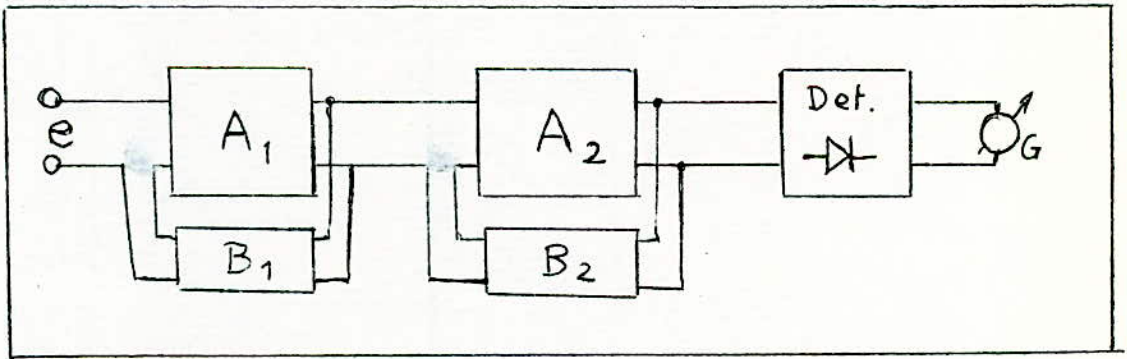
L'étage redresseur doit-être attaqué par une tension d'amplitude assez élevée pour un bon fonctionnement et pour qu'il travaille linéairement aussi l'amplification doit - elle être élevée pour la mesur de faibles tensions.

Un amplificateur à transistor ne pourra pas avoir une très grande résistance d'entrée si son amplification est grande. Les deux fonctions ne peuvent pas être réalisées par le même amplificateur, nous sommes donc amenée à les séparer.

Nous utilisons un premier amplificateur dont le rôle sera de fournir une impédance d'entrée élevée (utilisation d'une contre réaction).

Son gain étant insuffisant on prévoit un second amplificateur qui permettra alors d'augmenter la sensibilité de l'appareil.

Le redressement doit se faire par un étage à détection linéaire qui attaquera un galvanomètre à cadre mobile.



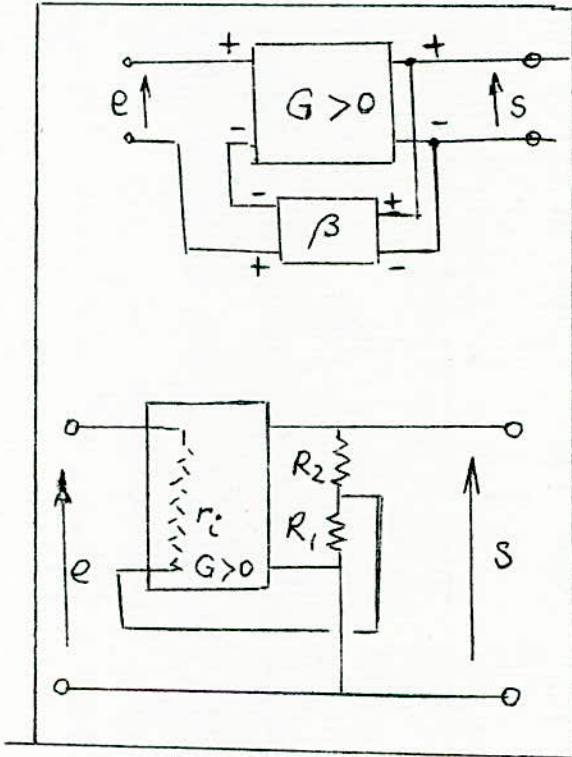
1.2 - CHOIX DEFINITIF DU MONTAGE :

Pour obtenir une contre-réaction dans un amplificateur il suffit de ramener la tension de sortie ou une fraction de celle-ci en opposition de phase avec entrée.

Si l'on suppose que le gain est indépendant de la fréquence, deux cas sont possibles.

a) signal de sortie en phase avec le signal d'entrée.

Le gain de l'amplificateur est supposé réel et positif le quadripole de contre-réaction doit alors introduire un phasage de 180° .



Si le quadripole est un diviseur de tension par résistances, on a la figure ci-après.

Le gain avec contre-réaction est :

$$e = V_o - V_r$$

$$V_r = -\beta S = -\beta G V_o$$

$$= V_o (1 + \beta G)$$

le gain avec contre-réaction est :

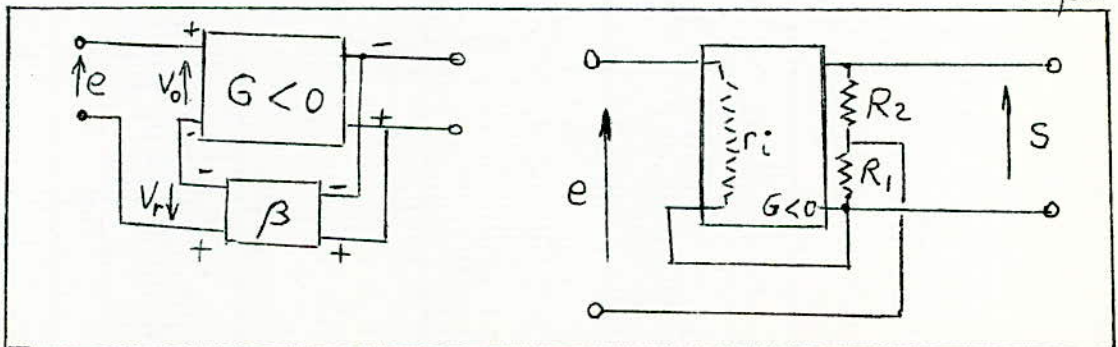
$$G' = \frac{S}{e} = \frac{G V_o}{V_o (1 + \beta G)}$$

Dans l'exemple prit ci-dessus :

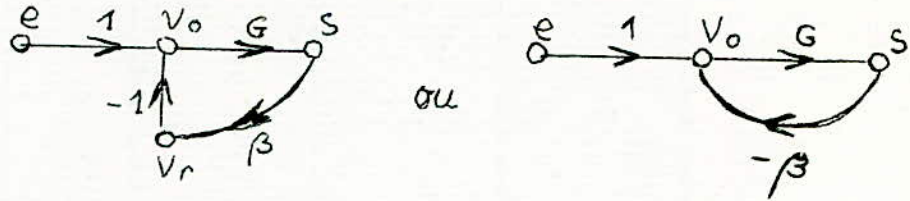
$$G' = \frac{G}{1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} G}$$

b) Signal de sortie déphasé de 180° degrés par rapport au signal d'entrée.

le gain d'écrit $G' = -\frac{G}{1 + \beta G}$



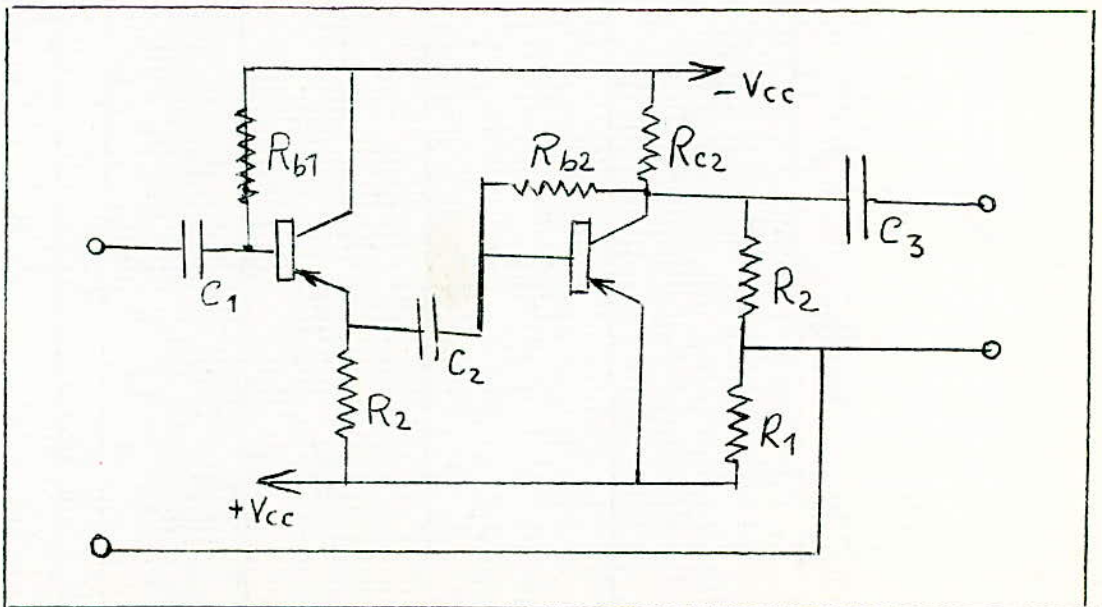
Le graphe de transfert des deux contre-réactions est le suivant :



A l'entrée du millivoltmètre nous prenons un amplificateur à deux étages le premier étant émetteur follower pour que la résistance d'entrée soit très grande, la contre-réaction la rendra encore plus élevée. Ce premier étage qu'on appelle aussi collecteur commun n'introduit aucun déphasage entre la sortie et l'entrée.

Le second étage est un émetteur commun donc sa sortie est déphasée par rapport à son entrée de 180 degrés par conséquent l'amplificateur total possède un déphasage de 180 degrés entre son entrée et sa sortie, il faudra donc prendre une contre-réaction du type 2.

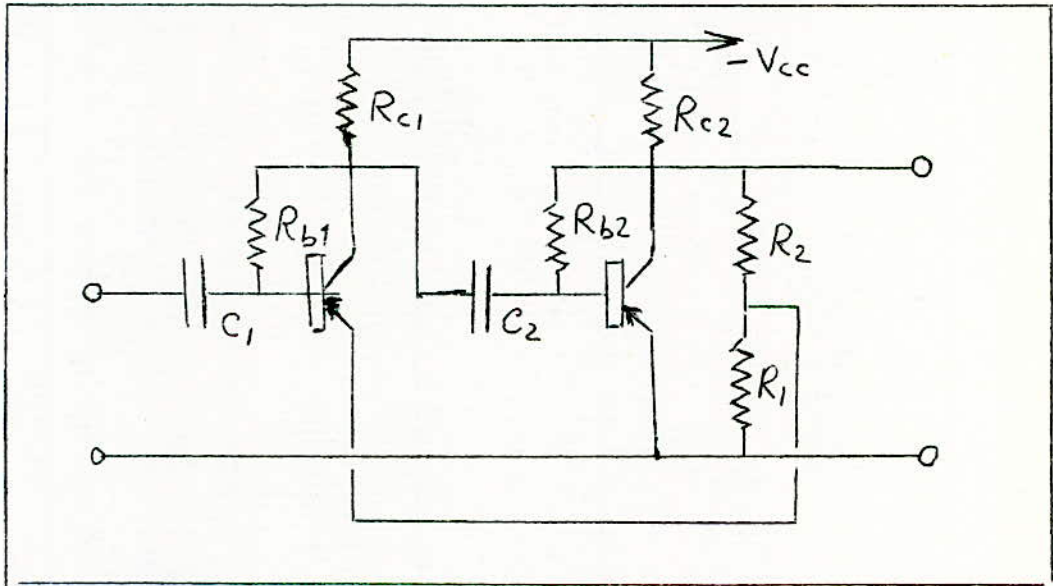
Pour compléter le schéma, la compensation de température se fera par contre-réaction parallèle.



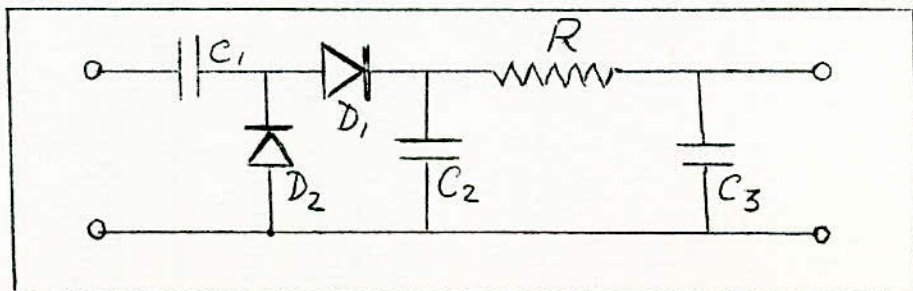
Le second amplificateur comporte également deux étages. Une contre-réaction assurera la stabilité et sa linéarité.

Les deux étages étant émetteur commun le déphasage total est 2×180 degrés = 360 par conséquent l'entrée et la sortie sont en phase, il conviendrait alors d'appliquer une contre-réaction du type 1.

Le schéma du second ampli est le suivant :



Après l'amplification à courant alternatif vient le redressement. Pour cela on utilise un redresseur à deux diodes monté en doubleur de tension. Ceci permettra d'avoir la linéarité de la détection, il sera suivi d'une cellule de filtrage RC permettant au galvanomètre de recevoir uniquement du courant continu.



1.4 - LES GAMMES DU MILLIVOLTMETRE :

L'appareil comportera cinq gammes de mesure :
10 mV , 25 mV , 100 mV , 250 mV , et 1000 mV.

Pour chaque position du commutateur nous devons avoir une amplification qui en tension permettent une déviation maximale du galvanomètre lorsque la tension à mesurer soit égale à la gamme affichée (10 mV, 25 mV, ...)

Il convient donc de choisir avec soin l'élément à faire varier.

Nos deux amplificateurs doivent comporter une forte contre réaction les gains en tension s'écrivent :

$$G1 = \frac{G_0}{1 + \beta G_0}$$

G_0 = gain sans contre-réaction

β = taux de contre-réaction

nous avons $\beta G_0 \gg 1$ d'où

$$G1 \approx \frac{G_0}{\beta G_0} = \frac{1}{\beta}$$

Le gain en tension ne dépend que de la contre-réaction,
et c'est elle par conséquent qui sera modifiée pour chaque gamme.

Pour les deux amplificateurs la contre-réaction se fait sur diviseur à résistances R2 et R1 le gain est alors :

$$G1, 2 = \frac{R1 + R2}{R1}$$

On peut donc garder R2 constant et donner à R1 une valeur à chaque gamme.

Nous pouvons donc dresser le schéma complet du millivoltmètre (fig 1) il ne restera plus qu'à calculer ses différents éléments et le compléter par quelques modifications ayant trait à sa bande passante.

2. - CALCUL DES ELEMENTS DU MILLIVOLTMETRE

2.1 CHOIX DES TRANSISTORS :

Les OC 44 semblent les mieux adaptés au projet. En effet par leur gain statique β_0 élevé (β_0 nominal = 100) ils permettent à l'entrée un courant très faible par conséquent, une résistance d'entrée très grande.

D'autres parts ils sont prévus pour les hautes fréquences (f_β élevé) et procurent avec des circuits appropriés une large bande passante.

2.2 - DETERMINATION DE L'ALIMENTATION :

Le dernier étage devra fournir une tension efficace de l'ordre de 4 volts ce qui correspond à une valeur crête $V_c = \sqrt{2} \times 4 = 5,6$ volts c'est-à-dire crête à crête = $2 \times 5,6 = 11,2$ volts.

L'amplification devant être très linéaire il conviendrait d'adopter une source d'alimentation de 22,5 volts.

2.3. - POINT DE FONCTIONNEMENT - DETERMINATION DES RESISTANCES DE POLARISATION :

2.3.1 - Etage T₄ :

Etant le dernier étage de l'amplificateur il aura à fournir un courant assez élevé. Le maximum étant 6,2 mA crête à crête nous choisirons comme point de fonctionnement :

$$I_e = 3,5 \text{ mA}$$

$$V_{ec} = 6 \text{ volts}$$

Les caractéristiques de l'OC 44 nous donnent :

$$I_b = 30 \mu\text{A}$$

$$V_{eb} = 0,12 \text{ volts}$$

En régime statique nous avons :

$$(1) \quad E = R_c (I_c + I_b) + V_{ec}$$

$$(2) \quad E = R_c (I_c + I_b) + R_{cb} I_b + V_{cb}$$

de là on calcule les valeurs à donner à R_c et R_b

$$R_c = 4,7 \text{ K } \Omega$$

$$R_b = 180 \text{ K } \Omega$$

La stabilisation du températeur est réalisée grace à R_b qui provoque une contre-réaction parallèle.

facteur de stabilité :

$$S = \frac{R_c + R_b}{R_c + R_b (1 - \alpha)} = 27$$

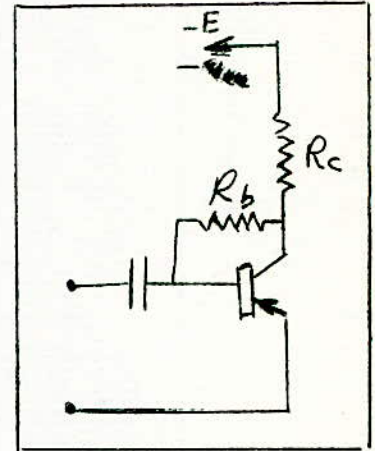
2.3.2- Etage T3 :

Monté de la même façon que T4 en émetteur commun.

Polarisation adoptée :

$$I_c = 0,9 \text{ mA}$$

$$V_{ec} = 6 \text{ volts.}$$



Les caractéristiques donnent :

$$V_{eb} = 0,1 \text{ volts}$$

$$I_b = 12 \mu\text{A}$$

On trouve

$$R_b = 490 \text{ K}$$

$$R_c = 18 \text{ K}$$

facteur de stabilité

$$S = \frac{R_c + R_b}{R_c + R_b (1 - \alpha)}$$

2.3.3 - Etage T2 :

C'est encore un émetteur commun point de fonctionnement.

$$I_c = 0,9 \text{ mA} \quad V_{eb} = 0,10 \text{ v}$$

$$V_{ec} = 6 \text{ volts} \quad I_b = 12 \mu\text{A}$$

même polarisation que T3 donc

$$R_b = 490 \text{ K } \Omega$$

$$R_c = 18 \text{ K } \Omega$$

$$S = 20$$

2.3.4 - Etage T1 :

C'est un étage monté en collection commun le point de repos choisi est :

$$I_e = 1 \text{ mA}$$

$$V_{ec} = 6 \text{ volts}$$

On relève sur les caractéristiques :

$$V_{eb} = 0,1 \text{ volt}$$

$$I_c = 1 \text{ mA}$$

$$I_b = 10 \mu\text{A}$$

Les equations du circuit en regime statique s'ecrivent :

$$E = R_b I_b + V_{eb} + R_e I_e$$

$$E = V_{ec} + R_e I_e$$

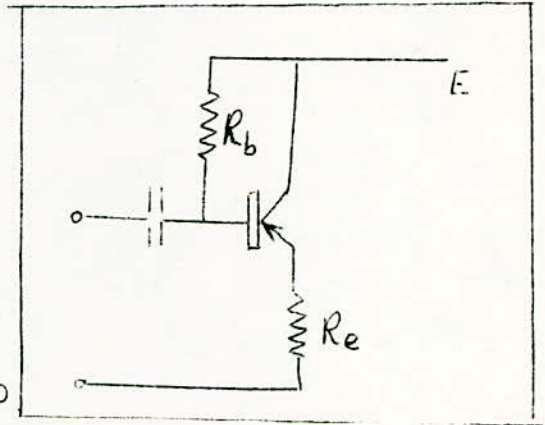
Ce qui nous donne :

$$R_b = 570 \text{ K}$$

$$R_c = 22 \text{ K}$$

Facteur de stabilité :

$$S = \frac{R_e + R_c}{R_e + R_b(1 - \alpha_0)} = 20$$



2.4. - CHOIX DES CAPACITES DE LIAISON:

Les capacités de liaison servent à séparer les polarisations des différents étages en ce sens que les signaux continus ne le traversent pas mais les signaux alternatifs si.

Il faut donc que ces capacités présentent une impédance négligeable pour la gamme de fréquences envisagée.

En basses fréquences nous désirons une coupure au voisinage du cycle par seconde cela exige des capacités de liaison de valeur élevée.

Nous prenons :

$$C_1 = 50 \text{ microfarads}$$

Plus loin nous verrons que cela donne une fréquence de coupure basse :

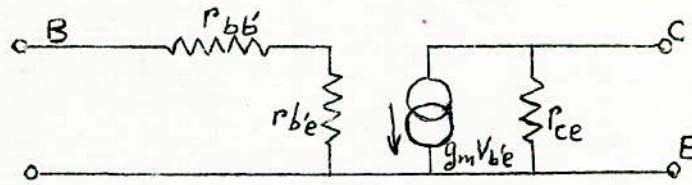
$$f_b = 0,45 \text{ KHz}$$

2.5. CALCUL DE LA CONTRE - REACTION:

2.5.1. Gain en tension sans contre réaction:

1° Premier amplificateur :

Le circuit équivalent simplifié de l'OC 44 est suivant :

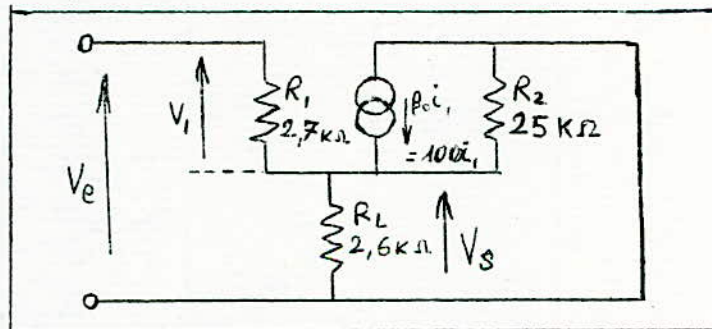


Le premier étage est un collecteur commun il est chargé par la résistance d'émetteur $R_e = 22 \text{ K}\Omega$ en régime alternatif il vient en parallèle sur cette résistance la résistance d'entrée de l'étage suivant : soit $2,6 \text{ K}\Omega$ on peut donc négliger R_e .

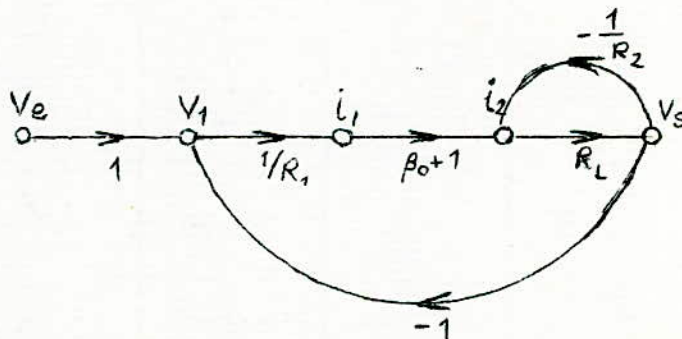
La charge R_L du premier étage T1 est donc :

$$R_L \approx 2,6 \text{ K}$$

Circuit équivalent :



Son graphe de transfert est le suivant :



Le gain en tension s'écrit :

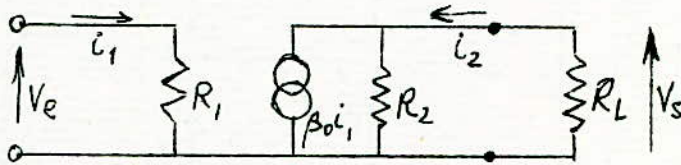
$$G_{v1} = \frac{V_s}{V_e} = \frac{(\beta_0 + 1) R_L}{(\beta_0 + 1) R_L + R_1 \left(1 + \frac{R_L}{R_2}\right)} = 0,99$$

sachant que $\beta_0 = 100$ (valeur nominale)

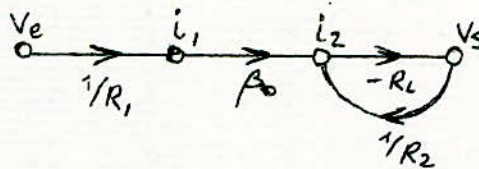
On voit que $G_v \neq 1$

Le second étage est un émetteur commun.

Circuit équivalent :



graphe de transfert :



Le gain en tension est :

$$G_v = \frac{V_s}{V_e} = -\beta_0 \frac{R_2 R_L}{R_1 (R_2 + R_L)}$$

La charge de l'ampli en dynamique est la mise en parallèle de la résistance $2,2 \text{ K}\Omega$ de la résistance au collecteur $18 \text{ K}\Omega$ et de la résistance d'entrée de l'étage suivant :
(soit $2,7 \text{ K}\Omega$) donc $R_L = 1,3 \text{ K}\Omega$

on trouve : $G = -45,7$

gain total de l'amplificateur 1

$$\begin{aligned} G_v &= G_{v1} \times G_{v2} \\ &= -1 \times 45,7 \end{aligned}$$

$$G_v = -45,7$$

2° Deuxième amplificateur :

Les deux étages qui le composent sont identiques au deuxième étage du premier amplificateur, par conséquent le schéma équivalent le graphe de transfert ainsi que les calculs sont les mêmes seuls changent les valeurs de résistances RL changeant le transistor en régime dynamique.

gain du troisième étage.

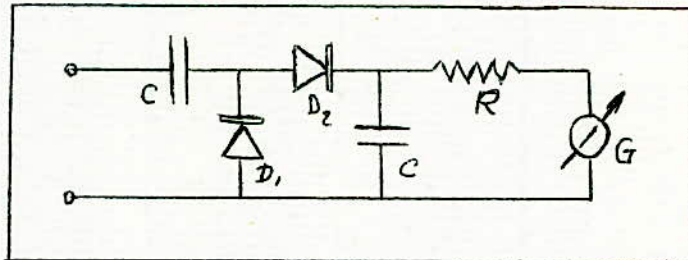
$$R_L = 2,7 \text{ K}\Omega // 18 \text{ K}\Omega = 2,4 \text{ K}\Omega$$

$$G_3 = - \beta^0 \frac{R_2 R_L}{R_1 (R_2 + R_L)} = 81$$

gain du quatrième étage.

R_L = résistance d'entrée du redresseur en parallèle avec la résistance au collecteur soit $5 \text{ K}\Omega$.

Nous verrons plus loin que le redresseur possède une résistance d'entrée R_i égale à environ $R/4$



Comme $R \approx 130 \text{ K}\Omega$ $R_i = 32,5 \text{ K}\Omega$

$$R_L = 4,4 \text{ K}\Omega$$

$$G_4 = - 100 \frac{25 \times 4,4}{2,7 (25 + 4,4)} = 140$$

gain total de l'amplificateur 2

$$G^1 = G_3 \times G_4 = 140 \times 81 = 11340$$

$$G^1 = 11\ 340$$

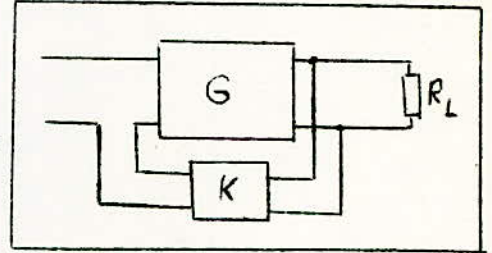
2.5.2. GAIN AVEC CONTRE-REACTION :

Nous avons adopté une contre-réaction, série sur chacun des deux amplificateurs le gain avec contre-réaction est alors :

$$G^{\uparrow} = \frac{G}{1 + KG}$$

G étant le gain sans contre-réaction

K le gain de contre-réaction



Nous avons vu que le gain

G des deux circuits amplificateur est très supérieur à 1 d'autre part $K = \frac{R1}{R1+RL}$ sera réglé pour qu'il ne soit pas très faible de sorte que KG très supérieur devant 1.

suivi

$$G^{\uparrow} = \frac{G}{KG} = \frac{1}{K} = \frac{R1+RL}{R1}$$

Nous voyons donc qu'avec une assez bonne approximation le gain de l'amplificateur ne dépend que des deux contre-réactions.

Au maximum de chaque gamme la tension de sortie de l'amplificateur donc celle qui attaque le redresseur devra être de 3,6 volts.

De là nous ferons correspondre une amplification pour chaque gamme.

1° Sensibilité 10 mV :

Le gain que doit fournir l'amplificateur est :

$$\frac{3,6}{10 \cdot 10^{-3}} = 360 \quad \text{soit} \quad 51,2 \text{ dB}$$

Le premier amplifi fourni 9,6 dB soit un gain $g=3$

$$\frac{R8 + R7}{R8} = 3$$

$$\begin{aligned} R7 &= 2,2 \text{ K}\Omega \\ R8 &= 640 \Omega \end{aligned}$$

Le second amplificateur doit alors donner 41,6 dB
soit un gain de 120.

$$\frac{R18 + R17}{R18} = 120$$

$$\begin{aligned} R17 &= 22 \text{ K}\Omega \\ R18 &= 183 \Omega \end{aligned}$$

2° Sensibilité 25 mV :

$$\text{Gain à fournir } \frac{3600}{25} = 144 \quad \text{soit } 43,2 \text{ dB}$$

$$\text{premier amplificateur } G1 = 4,28 \text{ soit } 12,64 \text{ dB}$$

$$\frac{R9 + R7}{R5} = 4,28$$

$$R9 = 670 \Omega$$

$$\text{second ampli. } G2 = 33,6 \quad \text{soit } 30,56 \text{ dB}$$

$$\frac{R15 + R17}{R15} = 33,6$$

$$R15 = 625 \Omega$$

3° Sensibilité 100 mV :

$$\text{Gain total } \frac{3600}{100} = 36 \quad \text{ou } 31,2 \text{ dB}$$

$$\text{premier amplificateur } G1 = 2,05 \quad \text{ou } 6,36 \text{ dB}$$

$$\text{ce qui donne } R10 = 2,03 \text{ K}\Omega$$

$$\text{second ampli } G2 = 17,3 \quad \text{soit } 24,84 \text{ dB}$$

$$R20 = 1,35 \text{ K}\Omega$$

4° Sensibilité 250 mV:

$$\text{Gain total } 14,4 \quad \text{soit } 23,2 \text{ dB}$$

$$\text{ampli 1 : } G1 = 1,35 \quad \text{soit } 2,6 \text{ dB}$$

$$R11 = 6,2 \text{ K}\Omega$$

$$\text{ampli 2 : } G2 = 10,65 \quad \text{soit } 20,6 \text{ dB}$$

$$R21 = 2,28 \text{ K}\Omega$$

5° Sensibilité 1000 mV :

$$\text{Gain total : } 3,6 \quad \text{soit } 11,2 \text{ dB}$$

$$\text{ampli 1 } G1 = 1,34 \quad \text{soit } 2,54 \text{ dB}$$

$$R12 = 6,5 \text{ K}\Omega$$

$$\text{ampli } 2 \text{ } \mathcal{G} = 2,69$$

soit 8,66 dB

$$R_{22} = 13 \text{ K } \Omega$$

Remarque :

Les valeurs de résistances calculées théoriquement peuvent être **légèrement** différentes des valeurs adoptées pratiquement. En raison de leur influence sur les gains et donc sur la déviation de l'aiguille il conviendrait de prendre des résistances variables et les ajuster avec précision une fois le montage général réalisé.

2.6. - COMPENSATION DU GAIN AUX BASSES FREQUENCES :

Des capacités en série avec R7 R8 R9 R10 R11 et R12 permettront d'augmenter l'impédance donc le gain aux basses fréquences.

Pour avoir une *Courbe* du gain aussi plate* avec leurs capacités respectives doivent être du même ordre. On prendra :

$$C_2 = 16 \mu\text{F}$$

$$C_5 = 16 \mu\text{F}$$

$$C_3 = 50 \mu\text{F}$$

$$C_6 = 16 \mu\text{F}$$

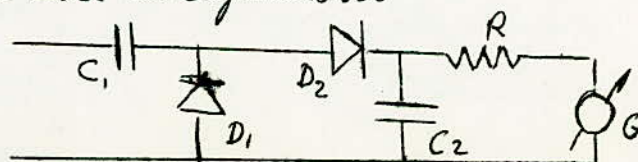
$$C_4 = 16 \mu\text{F}$$

En prenant des capacités de mêmes valeurs on les monte comme l'indique le schéma, de sorte que lorsque la résistance augmente la capacité diminue et la constante de temps reste à peu près la même.

2.7.- CIRCUIT DE REDRESSEMENT :

Le dispositif adopté doit fournir une bonne linéarité un tel montage peut être le suivant :

* aussi plates que possibles les constantes de temps des résistances avec les capacités...



montage redresseur

Les deux diodes constituent un doubleur de tension mesurant les tensions crête à crête et non pas l'amplitude d'une seule alternance.

La résistance équivalente de ce montage est environ:

$$R_e = \frac{R}{4}$$

On choisira $C_1 = C_2$ la constante de temps RC doit être très grande devant la durée de la période à la fréquence la plus basse à mesurer.

On prend comme diodes des OA85

$$C_1 = C_2 = 50 \mu F$$

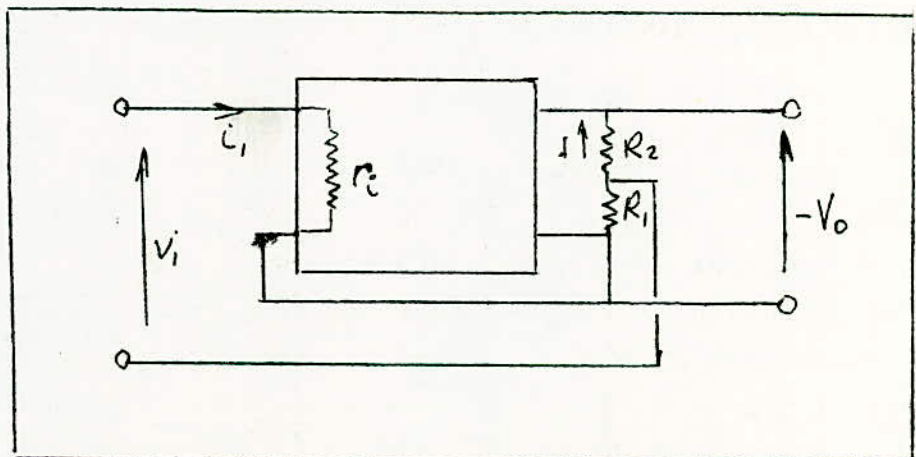
$R = 135 K\Omega$ déterminée en fonction du galvanomètre utilisé pour une tension d'entrée correspondante au maximum d'une gamme par exemple 10 mV le galvanomètre doit devier à exactement son maximum R servira à régler le courant qui alimente G.

3. - PERFORMANCES

DU MILLIVOLTMETRE

3.1. - IMPEDANCE D'ENTREE DE L'APPAREIL :

L'impédance d'entrés du millivoltmètre est fournie par le premier amplificateur.



3.1.1. - Impédance d'entrée sans contre-réaction (ri) :

Elle est égale à l'impédance d'entrée de l'émetteur follower. En considérant son circuit équivalent on trouve :

$$r_i = R_1 + (\beta_o + 1) R_L$$

$$r_i = 265 \text{ K } \Omega$$

3.1.2. - Impédance de transfert avec contre réaction :

Elle est défini par le rapport de la tension de sortie sur le courant d'entrée soit :

$$Z_t = \frac{V_o}{I_1}$$

On peut transformer l'expression :

$$Z_t = \frac{V_o}{I_1} = \frac{V_o}{I} \cdot \frac{I}{I_1} = R \cdot G_i$$

$$R = R_1 + R_2$$

G_i étant le gain en courant de l'amplificateur. Le gain en courant du premier étage est environ :

$$G_{i1} = \frac{i_L}{i_1} = \frac{\beta_o}{1 + \frac{R_L}{R_2} + \frac{R_L}{R_1}} \approx 40$$

Le gain en courant du second étage est environ :

$$G_{i2} = \frac{i_L}{i_1} = \frac{\beta_o R_2}{R_2 + R_L} \approx 50$$

Ainsi le gain en courant de l'amplificateur est à peu près :

$$G_i = G_{i2} \times G_{i1} = 2000$$

3.1.3. - Impédance d'entrée :

Considérons la figure ci-dessus :

$$V_1 = r_i I_1 + R_1 (I_1 + I) = R_1 I + I_1 (r_i + R_1)$$

$$V_o = I_1 R_1 + I (R_1 + R_2) = Z_t I_1$$

$$V_1 = R_1 \left[\frac{(Z_t - R_1)}{R_1 + R_2} + r_i + R_1 \right] i_1$$

$$Z \text{ entrée} = r_i + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + Z_t \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Nous voyons que grâce à la contre-réaction l'impédance d'entrée est augmentée de :

$$\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + Z_t \frac{R_1}{R_1 + R_2} \approx Z_t K$$

$$K = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \text{taux de contre-réaction.}$$

L'application numérique donne les résultats suivants :

: sensibilité	10 mV	$Z_e = 1,28 \text{ M}\Omega$:
: sensibilité	25 mV	$Z_e = 1,34 \text{ M}\Omega$:
: sensibilité	100 mV	$Z_e = 4,06 \text{ M}\Omega$:
: sensibilité	250 mV	$Z_e = 12,4 \text{ M}\Omega$:
: sensibilité	1000 mV	$Z_e = 13 \text{ M}\Omega$:

3.2.- CAPACITE DU MILLIVOLTMETRE :

Elle a une très grande importance pour un millivoltmètre car en haute fréquence son impédance diminue entraînant avec elle l'impédance d'entrée du millivoltmètre.

La capacité due au transistor est négligeable car déjà très faible à cause du montage en collecteur commun, elle est encore fortement abaissée par la contre-réaction.

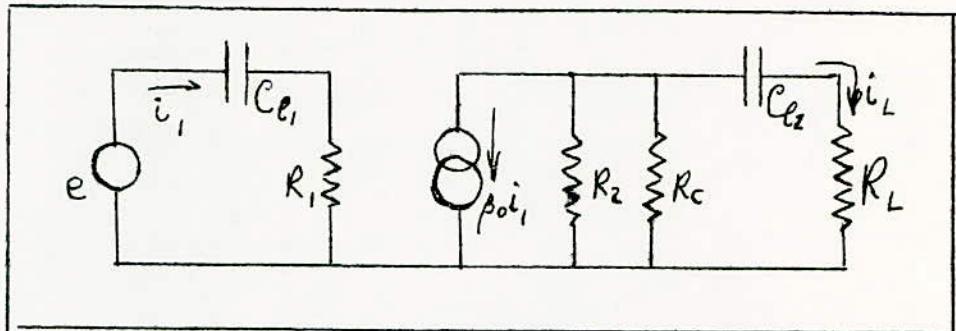
La capacité parasite à l'entrée du millivoltmètre

est essentiellement due à aux capacités de cablage, cette capacité est inférieure à une centaine de picofarads et diminue avec le facteur d'amplification.

3.3.- BANDE PASSANTE.

3.3.1. - fréquence de coupure basse :

Aux basses fréquences le schéma équivalent d'un ampli émetteur commun est suivant :



C_{e1} et C_{e2} les capacités de liaison.

Le gain en courant s'écrit :

$$A = \frac{\beta_0 R_c^I}{R_c^I + R_L + 1} \quad \text{avec } R_c^I = \frac{R_c R_2}{R_c + R_2}$$

$$A = \frac{A_0}{\sqrt{1 + \left[\frac{1}{\omega C_{e2} (R_c^I + R_L)} \right]^2}}$$

$$\omega_b = \frac{1}{C_{e2} (R_c^I + R_L)}$$

Des 4 amplificateurs, il faut considérer celui dont la fréquence de coupure est la plus haute donc celle où R_c est le plus faible.

c'est le 4^è étage avec $R_c = 5 \text{ K}\Omega$

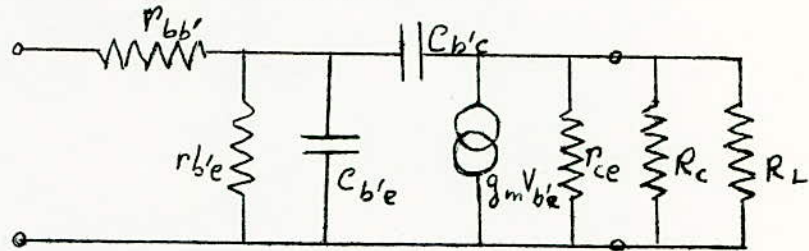
on tire

$$f_b = 0,45 \text{ Hz}$$

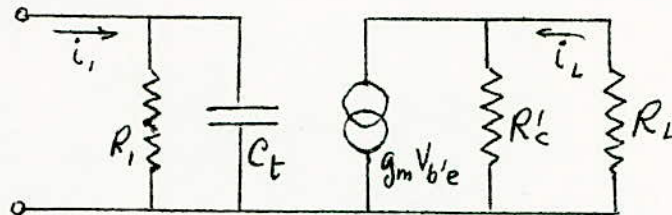
3.3.2 Fréquence de coupure haute :

En haute fréquence seules les capacités propres du transistor interviennent.

Schéma du transistor en HF



équivalent à



$$\text{avec } C_t = C_{b'e} + C_{b'c} (1 + g_m R'_L)$$

$$R'_L = \frac{R_L R'_c}{R_L + R'_c} \qquad R'_c = \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L}$$

Ce qui donne $C_t \approx 1300 \text{ pF}$

Le gain en courant s'écrit :

$$A = \frac{g_m R_L R'_c}{(R_L + R'_c) (1 + j\omega C_t R_1)}$$

$$|A| = \frac{A_0}{\sqrt{1 + \omega^2 C_t^2 R_1^2}}$$

fréquence de coupure :

$$\omega_c = \frac{1}{C_t R_1} \text{ on trouve}$$

$$\omega_2 = 285 \cdot 10^3 \text{ rad/s}$$

$$f_2 = 45 \text{ KHz}$$

La bande passante d'un étage amplificateur en émetteur commun est donc :

$$B = 45 \text{ KHz}$$

Avec contre-réaction cette bande est élargie et devient :

$$B^I = B (1 + K G_0)$$

L'amplificateur total du millivoltmètre possède une bande passante supérieure à :

$$B^I = 200 \text{ KHz}$$

3.4.-Précision de l'appareil :

L'impédance d'entrée du second amplificateur avec contre-réaction est :

$$Z_e = \frac{Z_{t2}}{G_2}$$

Z_{t2} impédance de transfert
 G_2 gain en tension.

Pour la gamme 10 mV nous avons :

$$Z_{t2} = 40 \times 50 \times 3000 = 6 \text{ M}\Omega$$

$$Z_e = \frac{6 \cdot 10^6}{120} = 50 \text{ K}\Omega$$

Cette impédance se trouve en parallèle sur R_2 chargeant le premier amplificateur dont le gain est :

$$G_1 = \frac{R_1 + R_2^1}{R_1}$$

$$R_2^1 = \frac{R_2 Z_e}{R_2 + Z_e} = 2,11 \text{ K}\Omega$$

Si Z_e varie de 50 % de sa valeur

$$R_2 = 2,14 \text{ K}\Omega$$

Ainsi R_2 varie de $\frac{2,14 - 2,11}{2,11} = 1,42 \%$
 et le gain G_1 varie
 de $1,42 \%$

$$\frac{\Delta G_1}{G_1} \neq 2 \%$$

Ainsi la précision de l'appareil est de 2% .

3.5.- Consommation - rendement des étages :

Pour chaque gamme de mesures correspond une certaine consommation de puissance. Nous ne considérons que la consommation maximale qui est en fait la plus importante. Elle est obtenue pour la gamme 1000 mV.

3.5.1. - Premier étage :

Puissance maximale dans la charge :

$$P_m = \frac{V_e^2}{2R_L} = 0,193 \text{ mW}$$

Puissance fournie par la source d'alimentation :

$$P_f = E V_e \cdot \frac{R_e + R_L}{R_e R_L} = 9,8 \text{ mW}$$

Rendement :

$$\eta = \frac{0,193}{9,8} \times 100 \approx 2 \%$$

3.5.2. - Deuxième étage :

Puissance maximale dans la charge :

$$P_m = \frac{F^2}{2R_L \left(2 + \frac{R_c}{R_L}\right)^2} = 1,3 \text{ mW}$$

Puissance fournie par la source :

$$P_f = E V_p \frac{R_c + R_L}{R_o} = 12,8 \text{ mW}$$

$$\text{Rendement : } \eta = 10,2 \%$$

3.5.3. - Troisième étage :

Les 3^e et 4^e étages ont les mêmes formules que pour le 2^e étage.

$$P_m = 1,3 \text{ mW}$$

$$P_f = 22 \text{ mW}$$

$$\eta = 6 \%$$

3.5.4. - Quatrième étage :

$$P_m = 3,22 \text{ mW}$$

$$P_f = 18,8 \text{ mW}$$

$$\eta = 17 \%$$

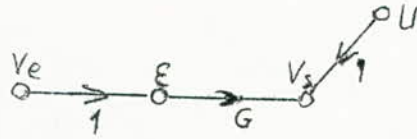
En courant rapelons que le premier amplificateur consomme environ 1,5 mA et le second 3,5 mA.

3.6. - DISTORSION - BRUIT :

Les étages amplificateurs introduisent des distorsions du signal de sortie et l'apparition d'harmoniques. Soit U_s la tension de sortie et U l'amplitude d'un des harmoniques du signal de sortie.

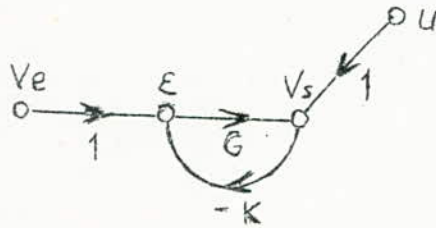
On peut considérer qu'on a introduit localement dans le dernier étage de l'amplificateur une source de tension U supposons que l'on applique une contre-réaction.

En boucle ouverte nous avons :



$$V_s = G V_e + U$$

on boucle fermée :



$$V_s = \frac{G V_e}{1+KG} + \frac{U}{1+KG}$$

d'où

$$U^r = \frac{U}{1+KG}$$

On voit donc que l'amplitude des harmoniques est réduite dans la même

proportion que le gain

3ième P a r t i e

REALISATION PRATIQUE - ESSAIS -



1. - REALISATION PRATIQUE DU MILLIVOLTMETRE

1.1° Circuit de l'appareil:

Le circuit sera exécuté sur circuit imprimé : pour régler avec précision les différents gain, on prendra des résistances variable (potentiomètres au carbone).

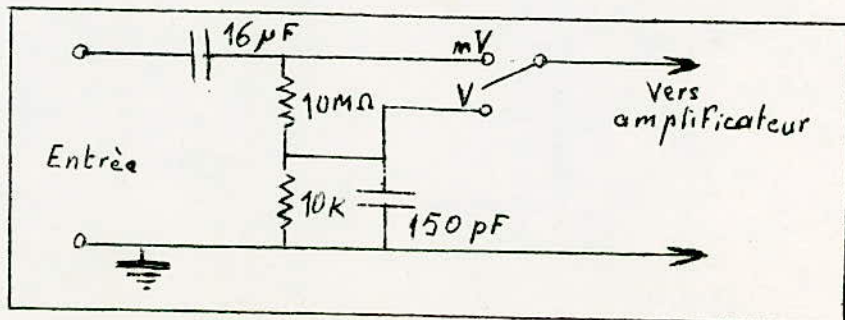
Les capacités seront des modèles *miniatures* à faible voltage (12 volts) polarisés.

Nous utilisons une plaque CEA le schéma de câblage est ci joint. Cette plaque recevra les éléments des 4 étages amplificateurs et du redresseur.

Les résistances variables R_8 R_9 R_{10} R_{11} R_{12} et leurs capacités respectives, également les résistances R_{18} R_{19} R_{20} R_{21} et R_{22} seront soudées sur des cosses à part et disposées de façon à être facilement atteints lors d'éventuels réglages.

Moyenant un diviseur de tension placé à l'entrée, nous pouvons élargir la gamme de mesure du millivoltmètre vers les tensions plus élevées.

Un diviseur par 1000 formé par deux résistances de précision l'une de $10\text{ K}\Omega$ l'autre de $10\text{ M}\Omega$ permet de passer grâce à un simple inverseur des millivolts aux volts.



Nous obtenons de la sorte les gammes suivantes :
10 V, 25 V, 100 V, 250 V, et 1000 V, ceci sans modifications
supplémentaires, la résistance d'entrée de l'appareil sera
alors $10\text{ M}\Omega$ pour toutes les gammes.

1.2° - Réglages de l'appareil :

12.1° Vérifications en régime statique :

On met en marche l'appareil c'est à dire les sources
d'alimentation se trouvent aux bornes des circuits et on vé-
rifie au voltmètre les différentes tensions de polarisation
sur l'émetteur le collecteur ~~et~~ la base de chaque transistor.

On doit retrouver les valeurs prévues théoriquement
~~si~~ sinon on doit vérifier ~~entre autre~~ les valeurs des résistances
de polarisation.

1.2.2. - Vérification en régime dynamique :

Se fera de préférence à l'aide d'un oscilloscope de
sensibilité suffisante. Cette vérification doit se faire ri-
goureusement pour chaque gamme. On observera les formes et les
amplitudes des signaux reçus.

1.2.3 - Vérification du redresseur :

En premier lieu on vérifiera la forme d'onde à l'os-
cilloscope l'entrée étant alternative on doit observer à la
sortie un signal continu de taux d'ondulation pratiquement
nul.

On vérifiera ensuite que l'amplitude de la tension
continue est environ le double de la tension alternative.

On doit vérifier que pour une entrée nulle, la tension aux bornes du galvanomètre est nulle.

12.4 - Réglage du gain :

Une fois le fonctionnement de l'appareil parfoi^s il convient de faire le réglage précis du gain des amplificateurs.

Ce réglage se fera pour chaque position du commutateur. Il faut à cet effet un générateur de tension alternative très stable en amplitude et un millivoltmètre de grande impédance d'entrée et de grande précision.

Le commutateur étant sur la position 10 mV on place entre les bornes d'entrée du millivoltmètre une tension exactement égale à 10 mV. A la sortie du premier amplificateur on fixe alors précisément 30 mV en faisant varier R8, on ne touchera plus à cette résistance et on place le millivoltmètre de contrôle à la sortie du deuxième amplificateur. En faisant alors varier R18 on fixe la tension à exactement 3,6 volts précise.

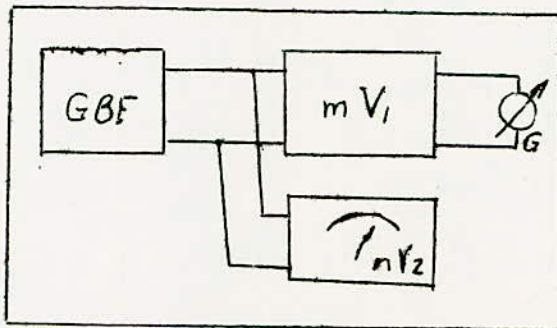
R23 sera choisie pour que à ce moment là, le potentiomètre P étant vers son milieu le galvanomètre sera à déviation maximum.

Les mêmes opérations doivent se faire pour les autres gammes en mettant chaque fois à l'entrée une tension correspondante à l'affichage du commutateur.

Ce réglage étant de première importance, il s'agira de l'effectuer avec le plus grand soin.

12.5 - Etalonnage :

On réalisera le montage suivant :



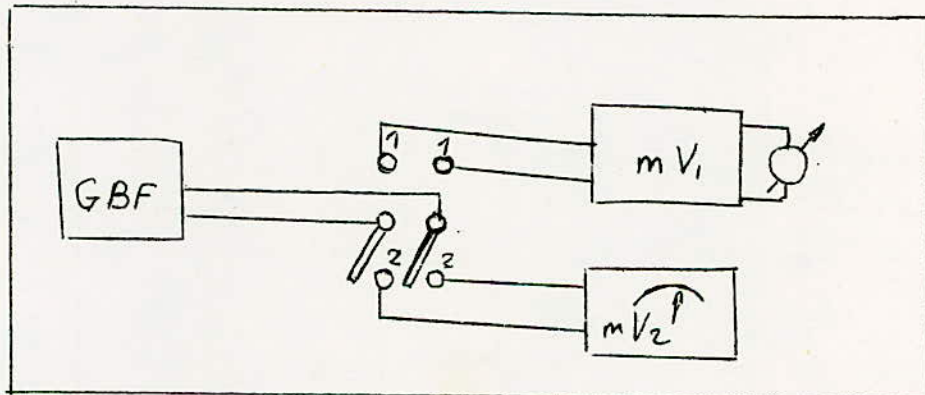
GBF - générateur basse fréquence de grande stabilité d'amplitude et apte à fournir de faibles niveaux.

mV1 - millivoltmètre étudié

mV2 - millivoltmètre de très grande impédance d'entrée $> 50M\Omega$

et de très bonne précision.

Si l'on ne dispose pas d'un tel millivoltmètre, il faut que la mesure de la tension de sortie du GBF se fasse séparément par les deux millivoltmètres afin que l'un ne perturbe la mesure de l'autre, il suffit à cet effet de placer un inverseur.



L'étalonnage se fera comme suit :

Avant tout l'entrée étant ouverte et en court-circuit on doit toujours être à la position zéro on marque 0.

Le commutateur étant sur la position 10 mV on place l'inverseur sur 22 on règle le niveau du GBF pour avoir 1 mV exacte, on place l'inverseur sur 11 l'aiguille ~~devie~~ on marquera 1 devant elle, on remet l'inverseur en 22 et on règle 2 mV, On le remet sur la position 11 et on marque 2 et ainsi de suite jusqu'à 10 mV qui doit correspondre à la déviation maximale.

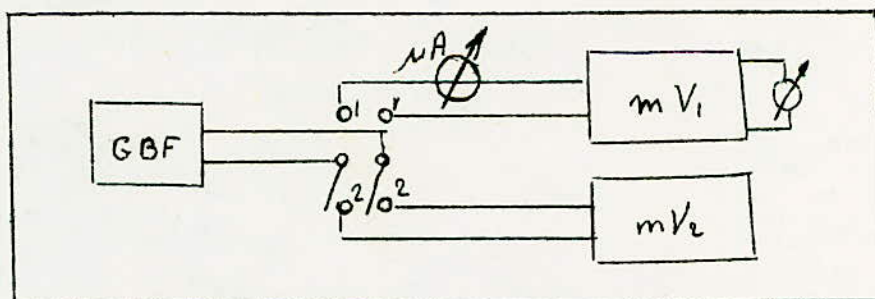
Il faut faire un autre étalonnage pour la position 25 mV car la graduation se fera sur une échelle différente de la précédente et allant de 0 à 25.

Pour les autres positions du commutateur 100 250 et 1000 mV les déviations de l'aiguille doivent correspondre aux indications du millivoltmètre étalon ce que l'on vérifiera si on trouve une différence trop importante il convient de vérifier le réglage du gain (position des résistances R10, R11, R12, R20, R21, R22).

2. - E S S A I S

2.1. - Impédance d'entrée du millivoltmètre :

On mesurera l'impédance d'entrée par le rapport de la tension à l'entrée sur le courant.



μA = microampère-mètre.

2.1.1. - Impédance en fonction de la tension à mesurer :

Pour chaque gamme on trace une courbe donnant l'impédance d'entrée de mV_1 en fonction de la tension à l'entrée V_1 .

Cette impédance se mesure par le rapport de la tension V_1 sur le courant indiqué par le microampéremètre (lequel devra être de grande sensibilité).

Cela donnera 5 courbes.

2.1.2. - Impédance d'entrée en fonction de la fréquence :

Pour une tension V_1 fixée à une valeur moyenne pour chaque gamme on fait varier la fréquence et on relève le courant I_1 on représente alors les courbes :

$$Z_e = \frac{V_1}{I_1} = g(f)$$

5 courbes.

2.2. - ESSAIS EN FREQUENCE :

Cet essais consiste à vérifier la bande passante du millivoltmètre.

L'inverseur étant en 11 on règle le niveau du GBF à une déviation moyenne pour chaque gamme.

La tension à l'entrée du millivoltmètre doit être strictement la même pour toute la mesure on vérifiera cela par l'étalon mVe qui devra être à très large bande.

On fait alors varier la fréquence et on note la déviation de l'aiguille du millivoltmètre.

On trace alors les courbes :

$$d = h(f)$$

On en déduira les bandes passantes pour chaque gamme.

5 courbes.

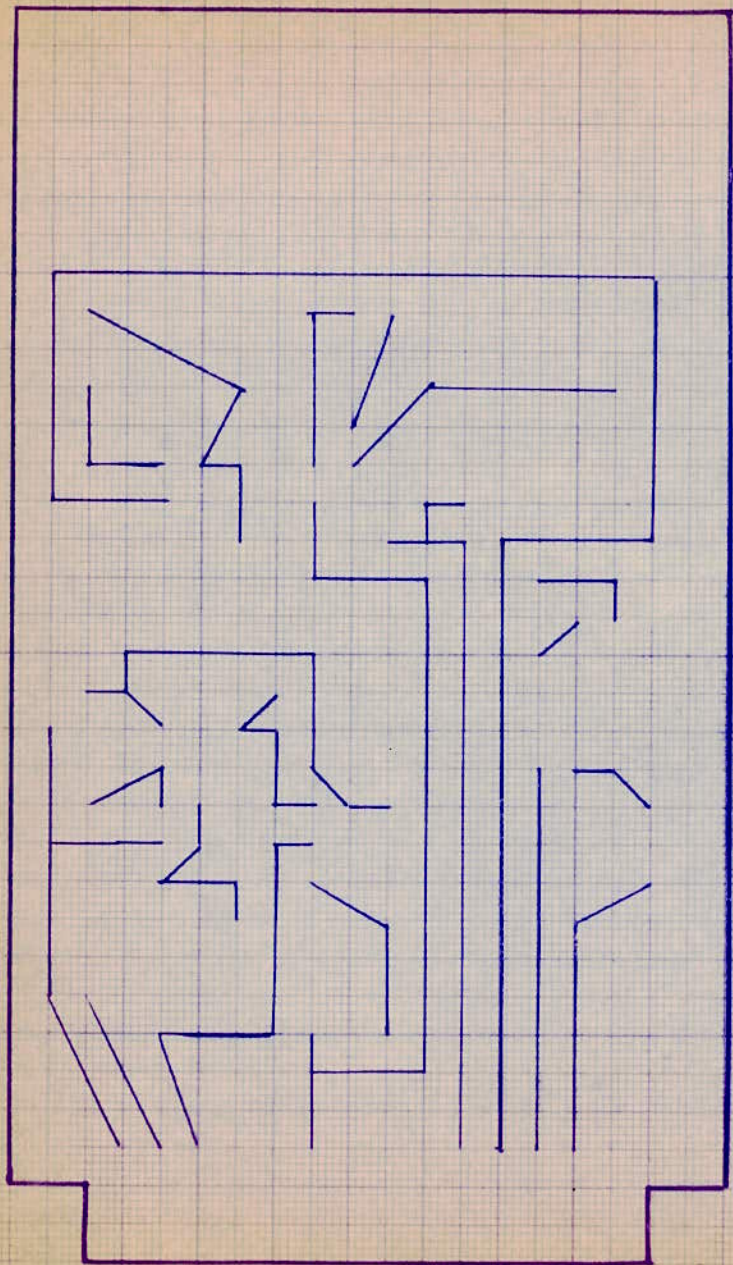
2.3. - AUTRES ESSAIS :

Pour un travail complet on peut encore faire un essai de fidélité, à intervalles de temps assez grand on relèvera la déviation pour toujours une même tension à mesurer.

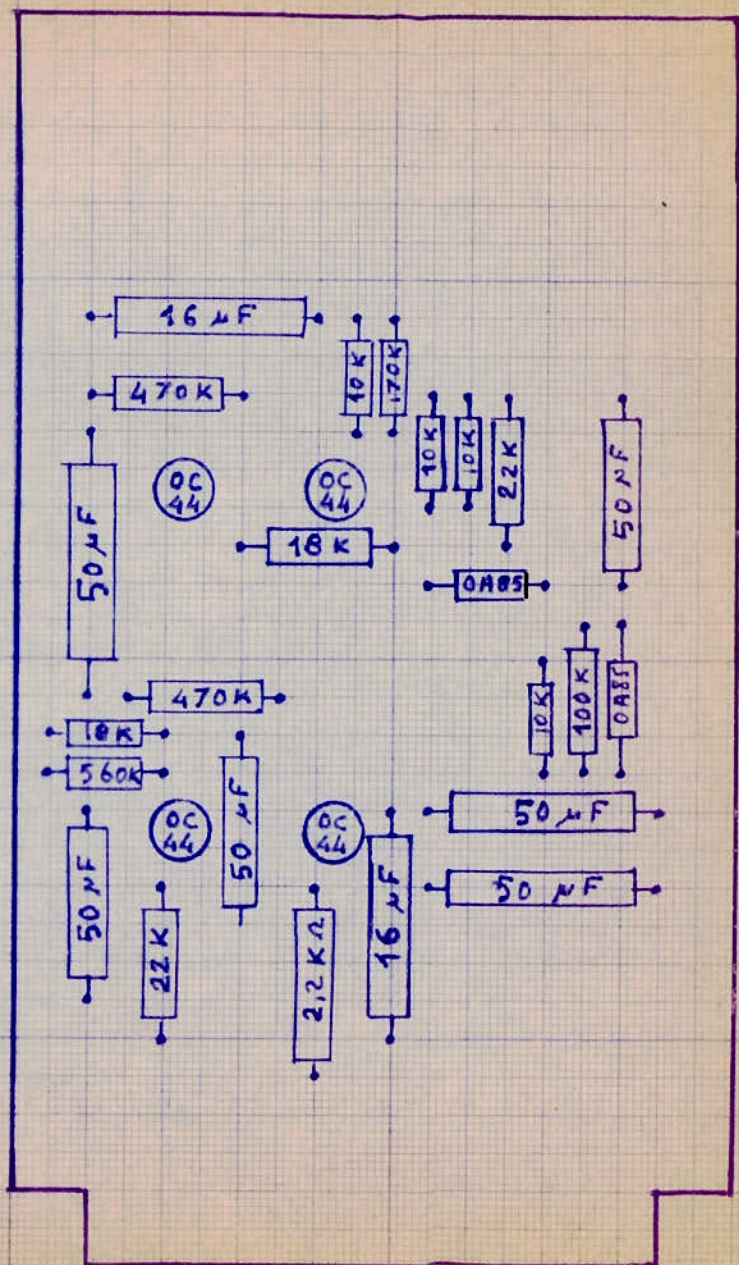
On peut également envisager un essai de précision on fera à cet effet varier l'alimentation et on relèvera la déviation d pour une tension d'entrée constante portée en paramètre.

$$d = f(a) \quad a = \text{tension d'alimentation}$$

l'appareil étant transistorisé il existe également un essai en température que nous n'envisageons pas.



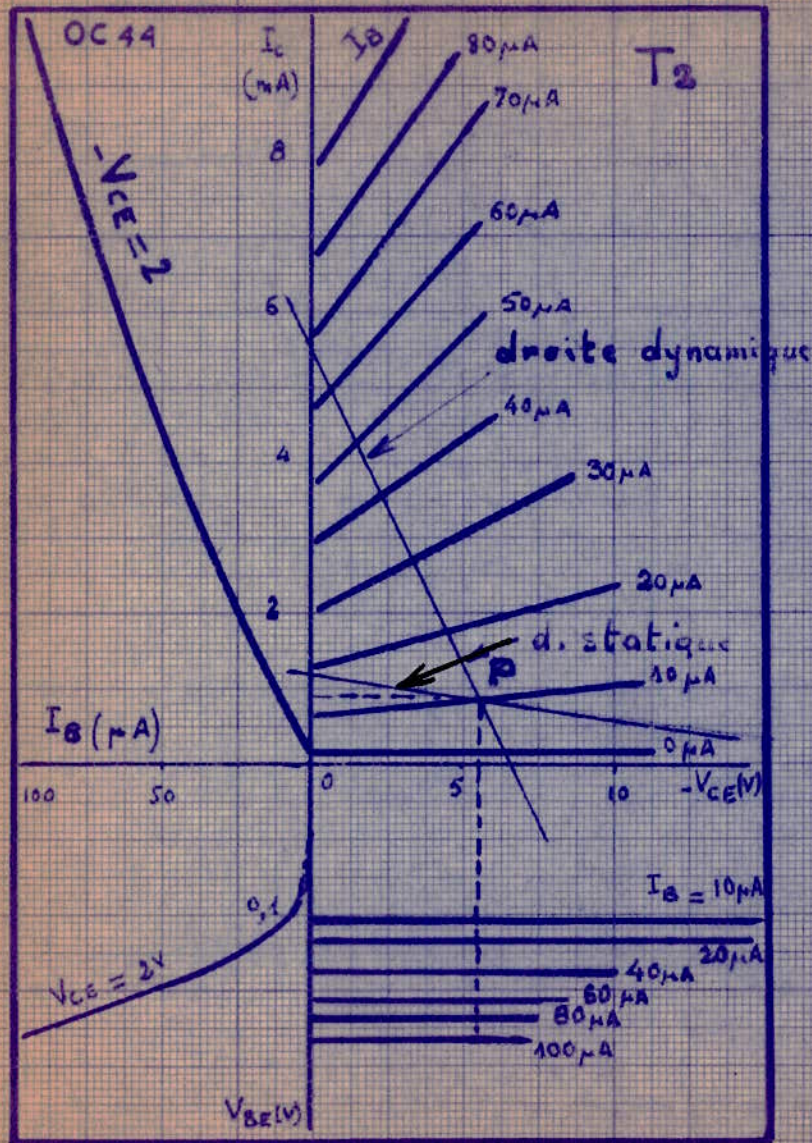
Face connections



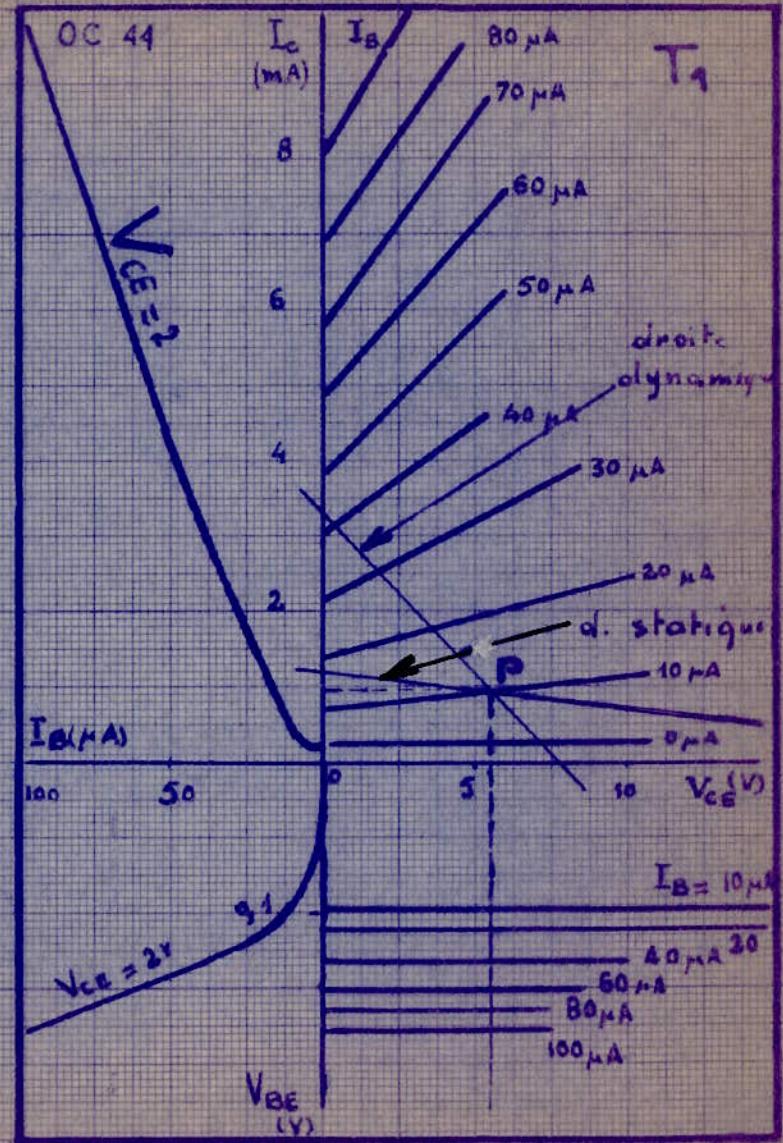
Echelle : 1

Face elements

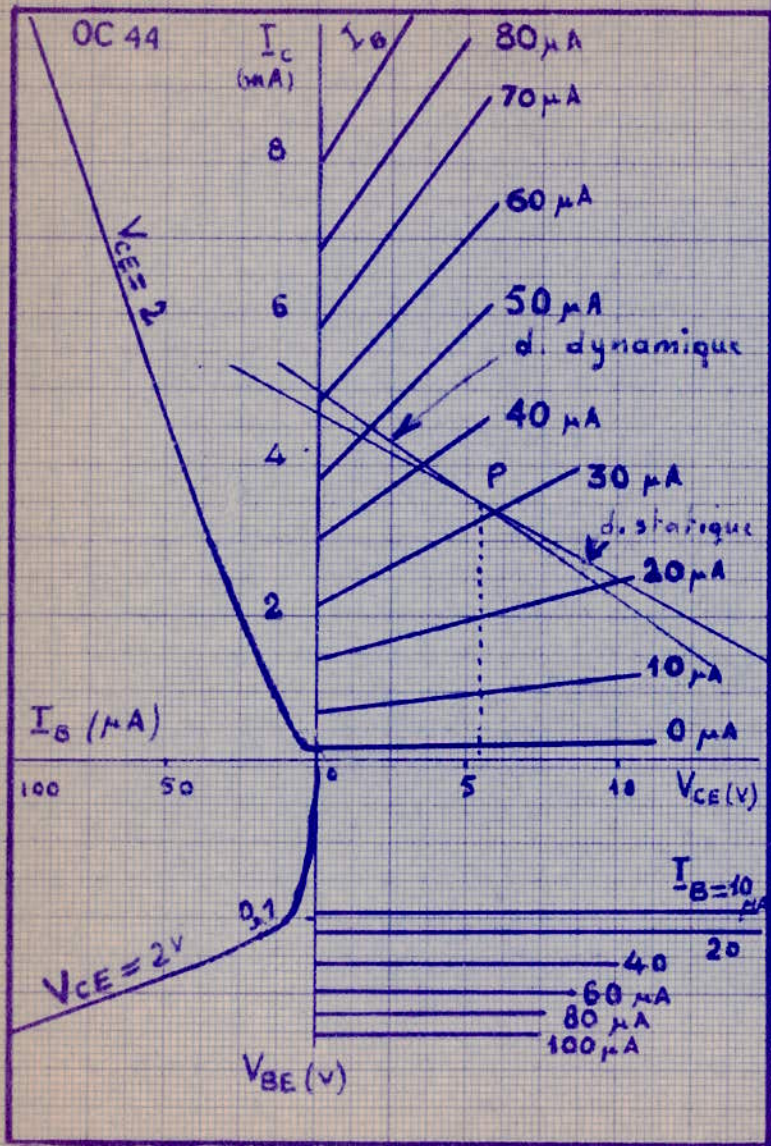
T 2



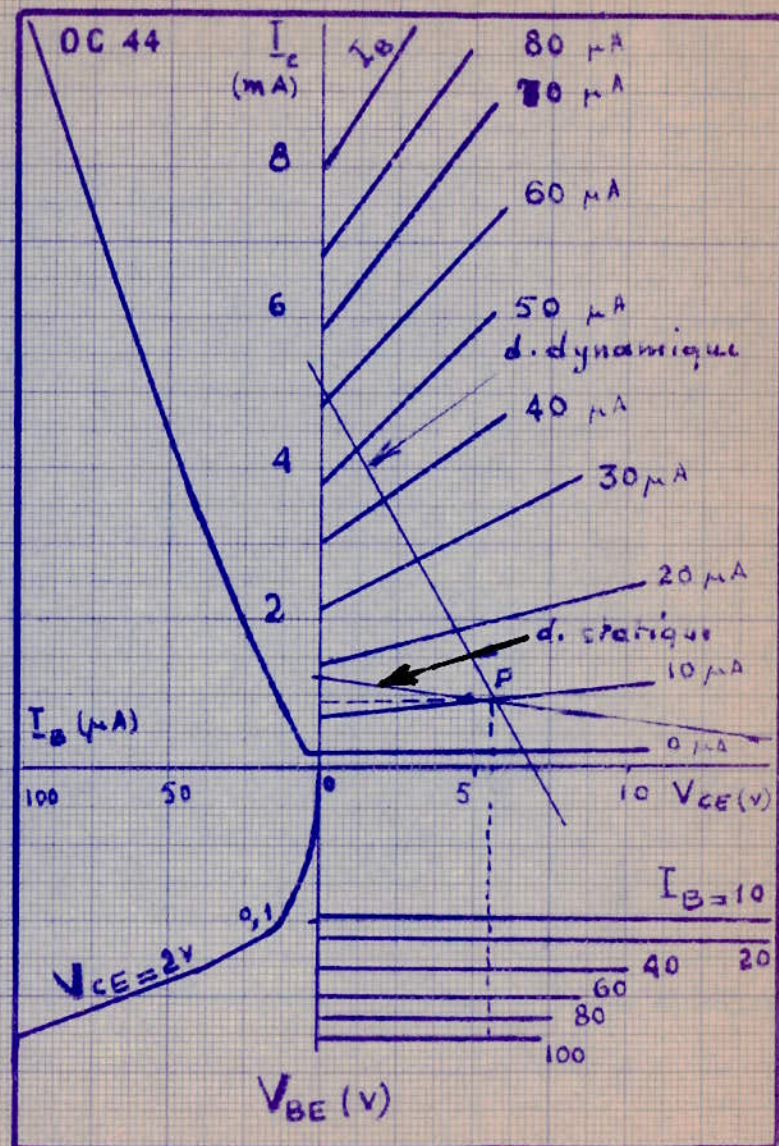
T 1



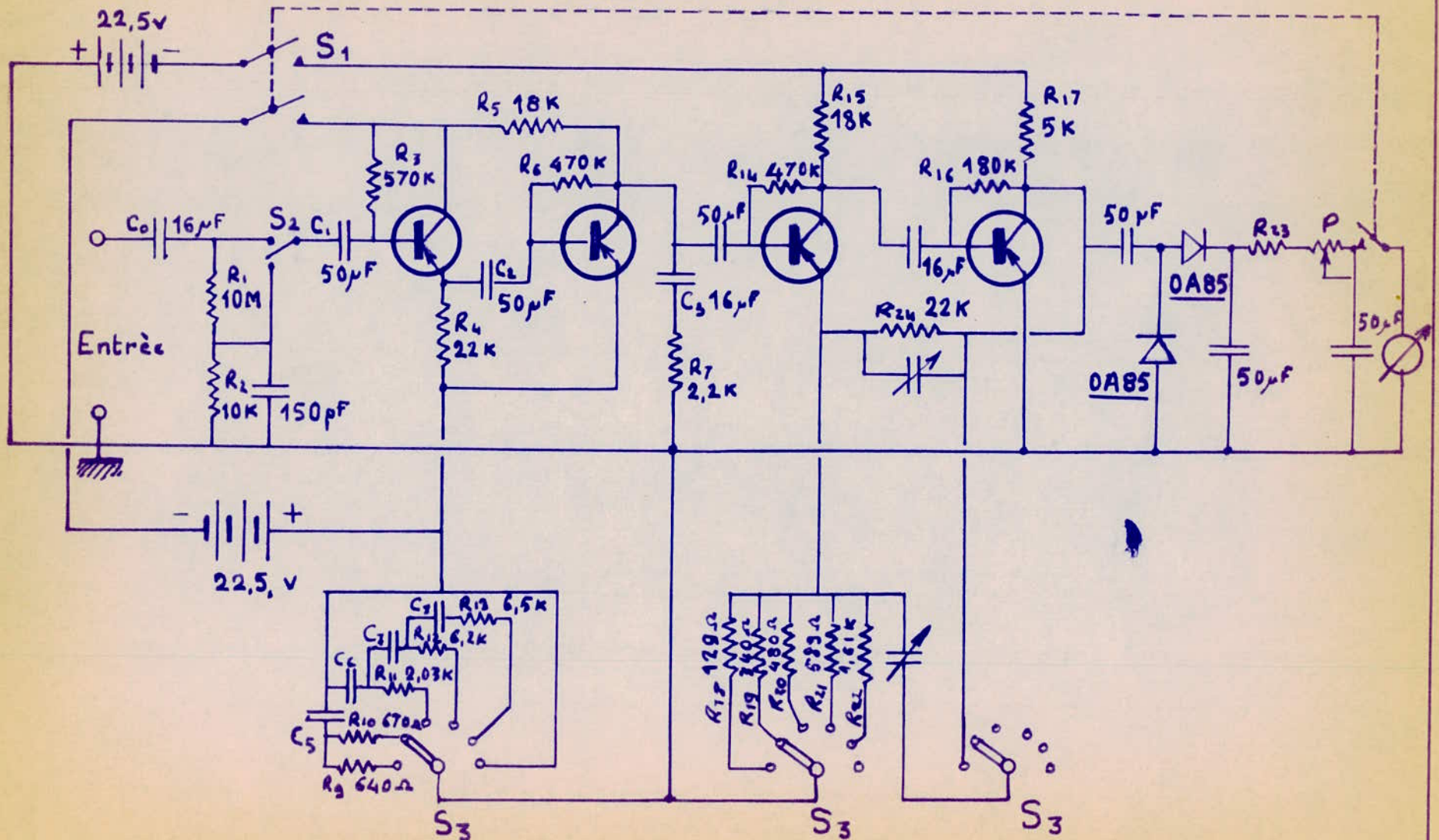
T 4



T 3



Circuit du Millivoltmetre



CONCLUSION

Un instrument de mesure électronique de n'importe quelle nature ne doit en aucune façon perturber la grandeur à mesurer ni engendrer des effets parasites sur les circuits dans lesquels nous sommes obligés de l'intercaler lors de d'une mesure. Aussi l'ingénieur qui s'attache à ce problème doit-il avoir cet élément de base toujours à l'esprit; mais de nos jours un autre élément qui devient de plus en plus impératif s'ajoute au premier. Cet élément est le prix de revient et nul n'ignore que le champ de bataille idéal pour les ingénieurs et les bureaux d'études de différentes entreprises est ce fameux prix de revient qui, reconnaissons le est un stimulant pour le développement de la technique et de la technologie du vingtième siècle.

Le rôle de l'ingénieur est de préciser le compromis à prendre entre d'une part la qualité et les performances de l'appareil, et d'autre part son prix de revient.

Le millivoltmètre que j'ai espéré réaliser est de prix de revient relativement bas et de qualités moyennes.

Les difficultés d'ordre matérielles et le manque de connaissances pratiques ne m'ont pas permis la complète réalisation de l'appareil et, par conséquent, le relevé des diverses courbes mais j'espère que l'étude théorique soit assez complète.

Précisons au passage que la réalisation est profondément inspirée du millivoltmètre de M.R.VIERHOUT.

decrit dans le numéro de Juillet 1960 de la revue
"Electroniq Ingeneering".

Je tiens à remercier M.J.SLOSIAR. Directeur de mon
projet, tous mes professeurs, les assistants ainsi que les
techniciens pour leur collaboration bienveillante et
leur conseils sans reserve.

CHETTEIH.Moussa

B I B L I O G R A P H I E

Les Voltmètres :

- Mesures électriques et électroniques JACQUES THURIN
Ed. Eyrolles
- Mesures en Radiotechnique E. FROMY
Ed Dunod

Le Transistor :

- Technique du transistor F. PIETERMAAT
Dunod
- Cours d'Electronique T2 FRANCIS. MILSANT
Eyrolles
- Emploi rationnel des transistors J.P. CEHMICHEN
Ed. Radio
- Théorie et pratique des circuits
à semiconducteurs T1 E.V. CASSIGNOL
Bibliothèque technique Philips
- Technique des circuits à transistors R.F. SHEA
Dunod
- Théorie des circuits T3 M.J. SLOSIAR
(cours de l'Ecole Polytechnique d'Alger)
- Théorie des systèmes M.P. SZULKIN
(cours de l'ENPA)

