

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

22/81

Université des Sciences et de la Technologie d'Alger

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE ET D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

INGENIORAT D'ETAT EN ELECTRONIQUE

Etude et Réalisation d'un poste d'étalonnage
d'appareils de mesures électriques



Proposé et suivi par :

T. STUSZKIEWICZ

Etudié par :

Hocine KANANE

et

Mouloud HALIT

JUIN 81

Sédicaces

A la mémoire de mon père,
A la mémoire de mon frère BÉLAÏD,
A ma mère,
A mes frères et sœur,
A mes amis.

KANANE Hocine.

A la mémoire de mon père.
A la mémoire de mon cousin IDIR.
A ma mère.
A mes frères et sœurs.
A mes amis

HALIT Mouloud.

Remerciements

Nous tenons à remercier M^r ŚŁUSZKIEWICZ Tomasz dont les conseils et les encouragements nous ont été utiles dans l'élaboration de ce modeste travail.

Nos remerciements vont aussi au personnel du centre de documentation SONELGAZ et plus particulièrement à son responsable M^r BENSALI.

Que tous les professeurs de L'ENPA et de L'U.S.T.A qui ont contribué à notre formation veuillent bien trouver ici l'expression de notre sincère gratitude.

Que tous ceux qui ont contribué au tirage du présent ouvrage trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

Kamane Thocine
et Thalit Houloud.

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie d'Alger

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE ET D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

INGENIORAT D'ETAT EN ELECTRONIQUE

**Etude et Réalisation d'un poste d'étalonnage
d'appareils de mesures électriques**

Proposé et suivi par :

T. STUSZKIEWICZ

Étudie par :

Hocine KANANE

et

Mouloud HALIT

JUIN 81

Introduction

Le but du service d'étalonnage est de définir, d'établir et de maintenir la précision de toutes les mesures électriques effectuées au sein d'un établissement en liaison avec les services national et international. Son travail consiste à :

- étalonner tous les appareils de la société.
- recevoir des appareils neufs.
- conseiller pour l'acquisition de nouveaux appareils.

Le laboratoire devra tenir à jour un calendrier comportant :

- l'étalonnage de ses étalons de référence par un laboratoire de niveau supérieur.
- l'étalonnage de ses étalons de travail.
- l'étalonnage des appareils de mesure dont il a la charge.

Notre travail se limite à l'étude de l'étalonnage des voltmètres, ampèremètres, wattmètres et à la réalisation d'un poste d'étalonnage pour appareils étalons par la méthode d'opposition.

Chapitre I

Rappels sur les appareils de mesure électrique.

I.1) Caractéristiques

Classe de précision: La classe de l'appareil est le rapport de l'erreur instrumentale maximum tolérée, dans les conditions de référence, sur le calibre de l'appareil exprimé en %.

$$\text{Classe} = \frac{\Delta i}{\text{Calibre}} \cdot 100$$

Fidélité: Elle est caractérisée par l'insensibilité de l'appareil aux grandeurs autre que celle qui fait l'objet de la mesure. Elle permet d'apprécier l'importance des erreurs accidentelles.

Justesse: Un appareil fidèle peut ne pas être juste, en ce sens que la valeur affichée n'est pas rigoureusement égale à la valeur réelle. Sa justesse caractérise l'influence sur la mesure des erreurs dites systématiques.

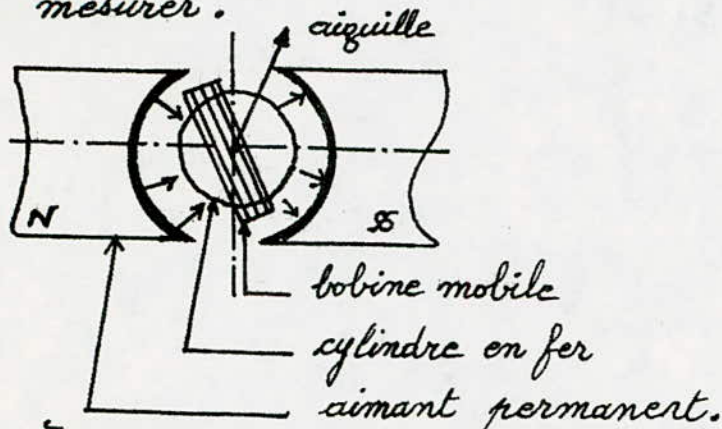
Sensibilité: Elle correspond au rapport de la déviation de l'élément mobile à la grandeur électrique qui produit le couple moteur.

Capacité de surcharge: Elle est le rapport de la grandeur maximale non destructive à la grandeur donnant la lecture maximale. Elle est bonne pour les éléments moteurs ferromagnétiques et moyenne pour les magnéto-électriques.

I.2) Principaux éléments moteurs :

L'élément moteur magnétoélectrique.

Le principe de fonctionnement est basé sur l'interaction d'un champ uniforme sur un cadre parcouru par le courant à mesurer.



À l'équilibre la déviation θ est donnée par :

$$\theta = \frac{n \cdot B \cdot S \cdot I}{C}$$

n : nombre de spires constituant la bobine
 B : induction magnétique dans l'entrefer
 S : section du cadre.

C : constante de torsion.

I : courant à mesurer parcourant la bobine.

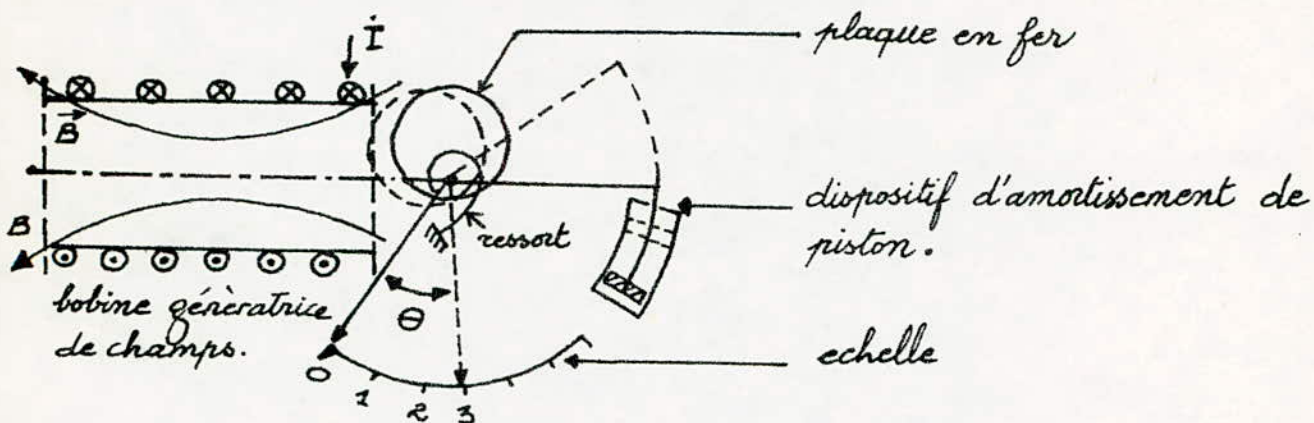
Les caractéristiques principales :

- * La très grande précision.
- * ne subit pas l'influence des champs magnétiques terrestres.
- * propriétés constantes en temps.

L'élément moteur électromagnétique :

Le principe de fonctionnement est basé sur l'action du champ magnétique produit par le courant à mesurer sur une ou plusieurs pièces en fer doux dont certaines sont mobiles.

Appareil à attraction. (ferromagnétique)



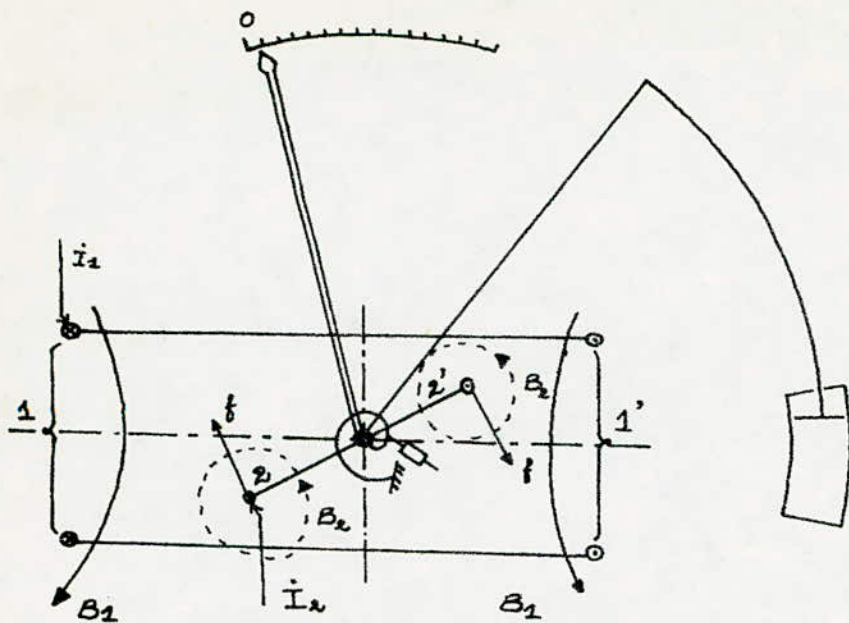
I : Courant à mesurer ; \vec{B} : champ magnétique créé par le courant
Le couple de rappel est assuré par le ressort spiral et l'amortissement est pneumatique.

Les caractéristiques principales.

- * grande simplicité
- * la robustesse
- * permet la mesure de très grands courants et supportent les surcharges électriques.

L'élément moteur électrodynamique

Le principe de fonctionnement est basé sur l'apparition d'une force électrodynamique d'interaction entre deux ou plusieurs systèmes de conducteurs, fixes et mobiles parcourus par des courants. Sous l'effet de l'action de cette force, l'équipage mobile va effectuer un déplacement (rotation) correspondant à la grandeur à mesurer.



11' - bobine fixe.
22' - bobine mobile.

La bobine fixe est réalisée en deux sections pour uniformiser le champ magnétique B_2 produit par le courant I_1 ; la bobine mobile 22' peut tourner autour de l'axe sous l'action du couple moteur M produit par la force électrodynamique f . Le couple résistant est réalisé à l'aide des ressorts en spirale. L'amortissement est pneumatique.

Ses caractéristiques principales :

- Sa robustesse.
- Couple moteur très grand.

Consommation des éléments moteurs :

| éléments moteurs | consommation en watts |
|--|------------------------|
| magnétoélectrique à suspension filaire | 10^{-13} à 10^{-6} |
| ————— " ————— à pivot | 0,5 à 1 |
| ferromagnétique | 0,3 à 2 |
| électrodynamique | 3 à 5 |

I.3 Grandeurs d'influence :

Ses principales grandeurs d'influence sont :

La température : Elle agit sur la résistivité des conducteurs, les différentes capacités, les caractéristiques des semi-conducteurs,

la raideur des ressorts de rappel et enfin sur l'aimant permanent.

Le temps. L'effet se traduit sur le vieillissement des composants tant mécaniques qu'électriques.

L'humidité. Elle ronge les appareils et occasionne des fuites à la surface des isolants.

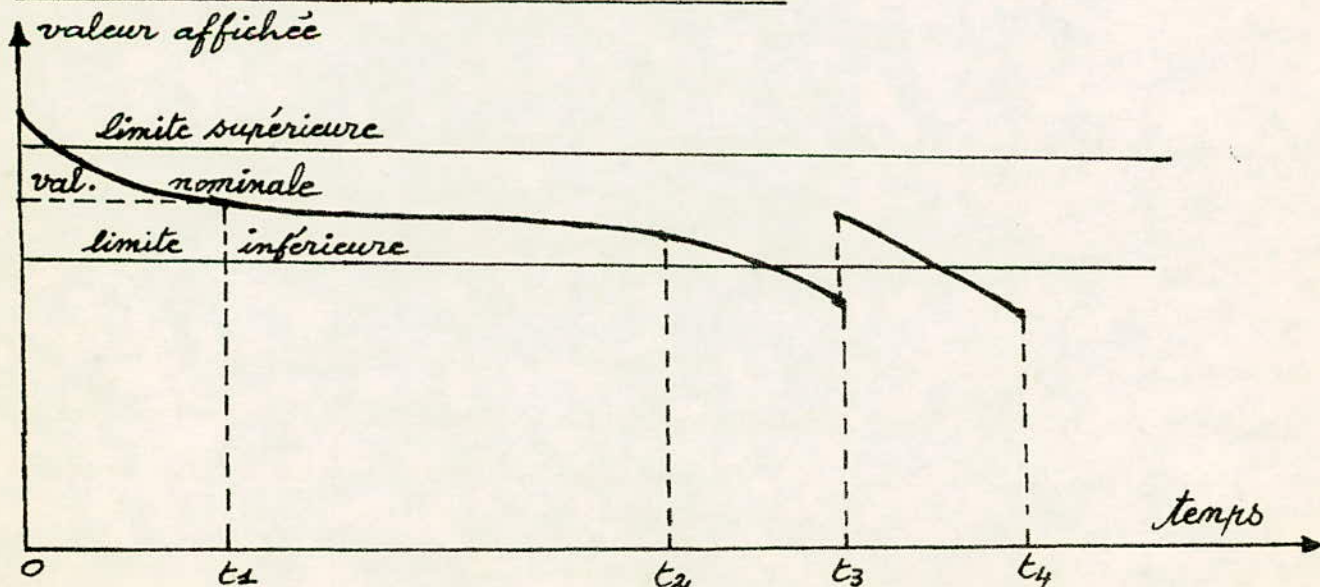
Les champs électrostatiques.

Ils font apparaître tout un ensemble de perturbations liées aux capacités parasites, aux résistances d'isolement. Les charges statiques accumulées sur le boîtier et la vitre exercent des forces sur l'aiguille, provoquant un faux zéro.

Les champs magnétiques.

Les effets perturbateurs se manifestent par des couples parasites, de tensions induites et des courants de Foucault.

I.4) Vie d'un appareil de mesure.



- $t < t_1$ vieillissement naturel ou artificiel
- $t = t_1$ on effectue le premier réglage, c'est le calibrage. Après cette opération l'appareil est utilisable.
- $t_1 < t < t_2$ C'est la période de première utilisation de l'appareil, l'écart est de quelques années.
- $t = t_2$ l'utilisateur doute sur la justesse de l'appareil. Le temps qui s'est écoulé depuis l'achat et les conditions dans lesquelles l'appareil a travaillé, rendent l'étalonnage nécessaire. Donc en t_2 , premier contrôle.

Après une durée ($t_3 - t_2$) plus courte que ($t_2 - t_1$), on effectue un deuxième contrôle, on constate que l'erreur admissible est dépassée. Deux cas peuvent se présenter :

- Le réglage est possible et économique, c'est le cas en t_3 , l'appareil est encore utilisable (en classe).
- Le réglage est impossible, l'appareil n'est plus utilisable, c'est le cas en t_4 .

Remarque:

Il ne peut être fixé de règle générale en ce qui concerne la détermination de la périodicité à laquelle on doit effectuer l'étalonnage d'un appareil. Elle dépend :

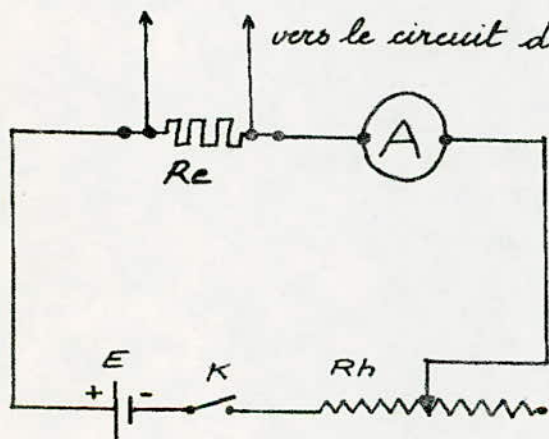
- de la constitution de cet appareil
- du soin des opérateurs
- de ses conditions d'emploi
- de la connaissance antérieure de ce type d'appareil

En conséquence, seul l'utilisateur est à même de fixer cette périodicité. Pour des appareils utilisés avec soin et non soumis à de fréquents déplacements, la périodicité moyenne est d'une année.

Les appareils de contrôle (classe 0,5 et 1) et les appareils industriels (classe 1,5 et 2,5) s'étalonnent par comparaison avec un appareil de classe supérieure. Pour étalonner les appareils de classe supérieure à 0,5 on utilise des appareils étalons (0,1 ou 0,2). L'étalonnage des appareils étalons (0,1 ou 0,2) se fait en courant continu par la méthode d'opposition.

II.1) Principe d'étalonnage des différents appareils :

II.1.1) Etalonnage de l'ampèremètre :



A : ampèremètre à étalonner.
 Re : résistance étalon.
 Rh : rhéostat de réglage.
 E : générateur.

On détermine la valeur la plus probable du courant par la mesure de la d.d.p aux bornes d'une résistance étalon placée en série avec l'ampèremètre à étalonner.

$$I_{pr} = \frac{U_{mes}}{R_e}$$

La comparaison avec la valeur lue sur l'ampèremètre nous permet de déduire la courbe de correction de l'appareil.

Calcul d'erreur.

Méthode directe (lecture sur ampèremètre)

Erreur de lecture

L'erreur est estimée à $\frac{1}{4}$ division près (grâce au réglage fin)

$$\epsilon_{\text{lect}} = \frac{\text{calibre}}{\text{nb de divisions}} \cdot \frac{1}{4}$$

Erreur instrumentale (erreur de construction)

$$\epsilon_{\text{inst}} = \frac{\text{classe}}{100} \cdot \text{calibre}$$

Erreur de méthode (erreur systématique)

Le courant allant vers le potentiomètre est

$$E = (R_e + R_a + R_h + R_i)I \Rightarrow I = \frac{E}{(R_e + R_h + R_a + R_i)}$$

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta E}{E} + \frac{(\Delta R_e + \Delta R_h + \Delta R_a + \Delta R_i)}{(R_e + R_h + R_a + R_i)}$$

d'où

$$\Delta I_{\text{syst}} = I_{\text{lue}} \cdot \frac{\Delta E}{E} + \frac{(\Delta R_e + \Delta R_h + \Delta R_a + \Delta R_i)}{(R_e + R_h + R_a + R_i)}$$

Erreur absolue totale.

Elle est égale à la somme des différentes erreurs.

$$\Delta I = \dot{E}_{\text{elect}} + \dot{E}_{\text{inst}} + \Delta I_{\text{sys}}$$

On présente le résultat sous la forme suivante :

$$I = I_{\text{lue}} \pm \Delta I$$

Méthode indirecte (méthode d'opposition)

$X = R_e \cdot I_d$ avec X : tension appliquée au potentiomètre

$I_d = \frac{X}{R_e}$, On trouve l'incertitude relative du courant.

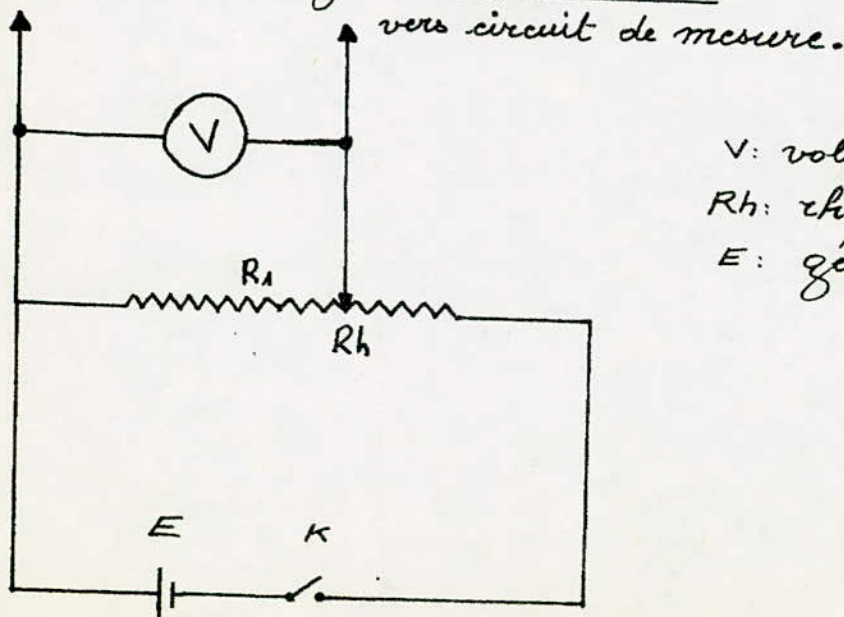
$$\frac{\Delta I_d}{I_d} = \frac{\Delta X}{X} + \frac{\Delta R_e}{R_e} \quad \text{d'où}$$

$$\Delta I_d = \frac{X}{R_e} \cdot \left(\frac{\Delta X}{X} + \frac{\Delta R_e}{R_e} \right)$$

Le résultat est le suivant :

$$I = I_d \pm \Delta I$$

II.1.2) Etalonnage du voltmètre.



V : voltmètre à étalonner
 R_h : rhéostat de réglage
 E : générateur de tension.

La valeur de la tension lue sur le voltmètre est comparée à celle déterminée par le circuit de mesure de grande précision; on en déduit la courbe de correction de l'appareil.

Calcul d'erreur.

Erreur de lecture: même expression que pour l'ampèremètre.

Erreur instrumentale: idem que dans l'ampèremètre.

Erreur systématique:

L'expression de V est donnée par:

$$V = E \cdot \frac{R_1}{R_h}$$

On ne peut pas appliquer directement la règle de la différentielle logarithmique car R_h et R_1 ont une partie commune.

On pose: $R_h = R_1 + (R_h - R_1)$

et $(\Delta R)_h = R_h - R_1$

alors: $V = E \cdot \frac{R_1}{R_1 + (\Delta R)_h}$

$$dV = \frac{R_1}{(R_1 + (\Delta R)_h)} \cdot dE + E \cdot \frac{(\Delta R)_h}{(R_1 + (\Delta R)_h)^2} \cdot dR_1 - \frac{E \cdot R_1 \cdot d(\Delta R)_h}{(R_1 + (\Delta R)_h)^2}$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{dE}{E} + \frac{(\Delta R)_h}{(R_1 + (\Delta R)_h)} \cdot \frac{dR_1}{R_1} - \frac{(\Delta R)_h}{(R_1 + (\Delta R)_h)} \cdot \frac{d(\Delta R)_h}{(\Delta R)_h}$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta E}{E} + \frac{(\Delta R)_h}{(R_1 + (\Delta R)_h)} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{(\Delta R)_h}{(R_1 + (\Delta R)_h)} \cdot \frac{\Delta(\Delta R)_h}{(\Delta R)_h}$$

Comme $\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta (\Delta R)_h}{(\Delta R)_h} = \epsilon_r$; on a :

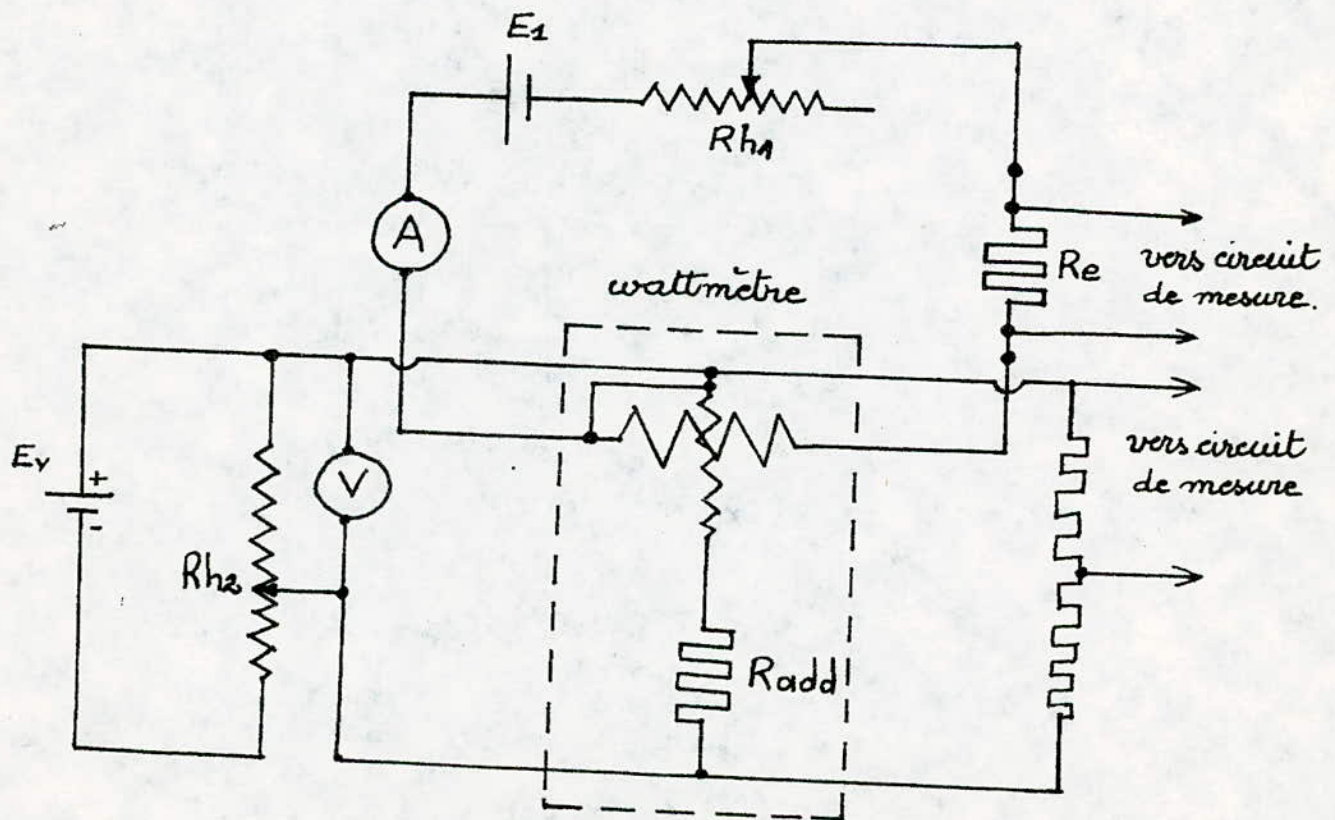
$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta E}{E} + 2 \cdot \frac{(R_h - R_1)}{R_h} \cdot \epsilon_r$$

Erreur absolue totale.

$$\Delta V = \epsilon_{lect} + \epsilon_{inst} + \Delta V_{syst.}$$

$$V = V_{lue} \pm \Delta V.$$

II.1.3) Etalonnage du wattmètre.



On mesure la tension aux bornes du circuit tension. On mesure le courant dans le circuit série. On fait le produit de ces deux valeurs, on obtient alors la valeur la plus probable de la puissance. En comparant cette dernière à celle lue directement sur le wattmètre, on trace la courbe de correction. On alimente les deux circuits séparément pour éviter la consommation inutile d'une grande puissance. C'est ce qu'on appelle "le montage en puissance fictive". Ce montage nous permet aussi d'avoir un réglage fin.

Calcul d'erreur:

Méthode directe: (lecture sur wattmètre.)

Erreur de lecture:

grâce au réglage fin, on estime que la lecture est vraie à $\frac{1}{4}$ de division près.

$$\Delta P = \frac{\text{Calibre}}{\text{nb de divisions}} \cdot \frac{1}{4}$$

Erreur instrumentale:

$$\Delta P = \frac{\text{classe}}{100} \cdot \text{Calibre}$$

Méthode indirecte: (méthode d'opposition)

soit: X_1 la tension mesurée aux bornes de l'étalon de résistance et X_2 la tension aux bornes de la bobine tension. La puissance est égale à:

$$P = X_2 \cdot I = X_2 \cdot \frac{X_1}{R_c}$$

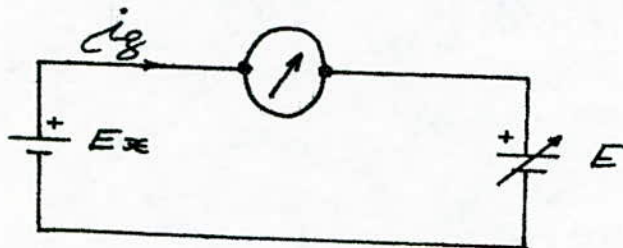
$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta X_2}{X_2} + \frac{\Delta X_1}{X_1} + \frac{\Delta R_c}{R_c}$$

$$\Delta P = P \cdot \left\{ \frac{\Delta X_2}{X_2} + \frac{\Delta X_1}{X_1} + \frac{\Delta R_c}{R_c} \right\}$$

II 2.) Mesure d'une f.e.m par la méthode d'opposition :

II 2.1) Principe de la méthode :

La méthode d'opposition est essentiellement une méthode de mesure de d.d.p. L'idée de départ de cette méthode est simple. Puisqu'on veut mesurer une d.d.p. inconnue E_x , on lui oppose une d.d.p. connue et variable E et lorsque le courant i_g dans le galvanomètre sensible s'annulera, on aura évidemment $E_x = E$



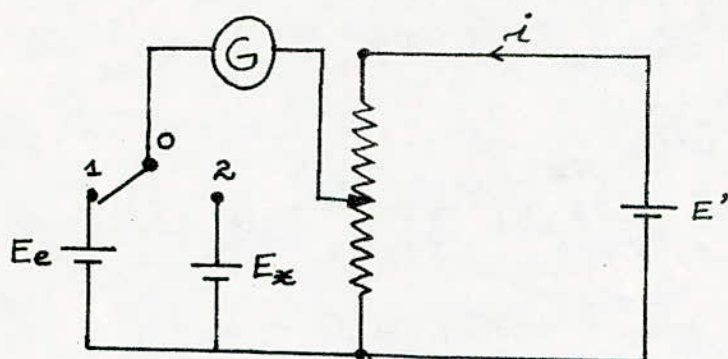
On aura donc ainsi une mesure de la d.d.p. dont la précision dépendra de celle de E , mais la caractéristique la plus intéressante de cette mesure réside dans le fait que la d.d.p. E_x est mesurée sans débit. Cette caractéristique de mesure est importante car elle ne demande qu'une très faible énergie au système étudié.

En fait il n'est pas possible de réaliser simplement une d.d.p. à la fois variable et parfaitement connue. On est donc obligé d'avoir recours :

• D'une part à un rhéostat potentiométrique étalonné (afin d'obtenir une variation quasi continue de la d.d.p.) alimenté à partir d'une source E' approximativement connue dont la seule qualité sera la stabilité.

• D'autre part à une pile étalon qui permettra d'augmenter la précision de la mesure en étalonnant le courant potentiométrique.

se schéma de principe devient donc :



et la mesure de la d.d.p E_x s'effectue en deux étapes :

1°) On étalonne le potentiomètre en connectant 0 et 1, à l'équilibre :

$$E_e = R_1 \cdot i = \frac{R_1 \cdot E'}{(R_1 + R_2)}$$

2°) On branche la source dont la d.d.p est inconnue. On établit l'équilibre du galvanomètre et on a :

$$E_x = R'_1 \cdot i = R'_1 \cdot \frac{E'}{(R'_1 + R'_2)} ; (i = \text{cst})$$

Si on prend la précaution indispensable de garder constant la résistance du circuit potentiométrique :

$$R_1 + R_2 = R'_1 + R'_2$$

On en déduit :

$$E_x = E_e \cdot \frac{R'_1}{R_1}$$

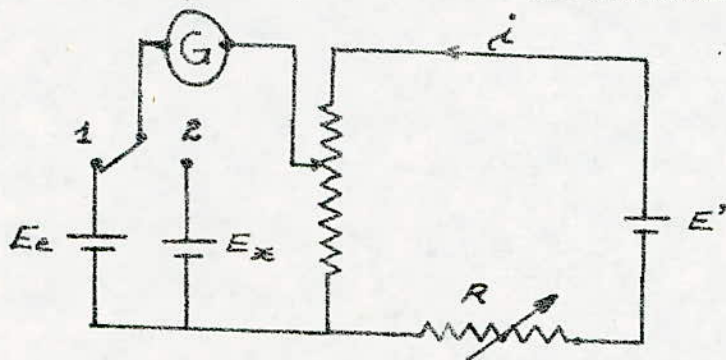
La f.e.m E' n'intervient donc pas directement dans la mesure. En fait, il ne faut pas oublier qu'elle s'est éliminée parce qu'on la suppose constante et que la

qualité de la mesure dépendra directement de son invariabilité entre les deux étapes.

Dans l'application pratique, on devra diviser ces deux valeurs de la résistance et la précision, avec laquelle on conduit le calcul, interviendra bien sûr dans le calcul de la précision de la méthode.

Or il est possible de simplifier ce calcul en choisissant pour R_2 non une valeur quelconque, mais une valeur telle que le courant i de la maille principale ait une valeur ronde: i de la forme $i = 10^{-n} \text{ A}$

Ceci nécessite l'introduction d'une résistance de "tarage" dans la maille principale. D'où le schéma transformé:



On a ainsi $E_x = R_2' \cdot 10^{-n}$

La valeur de R_2' à l'équilibre donne directement les chiffres significatifs de la f.e.m. inconnue. La mesure se conduit de la manière suivante:

1°) On donne à la résistance R_2 une valeur telle que:

$$R_2 = \frac{E_e}{10^{-n}}$$

2°) Dans le but de régler à cette valeur de R_2 , on met le cavalier

en 1 et on règle l'équilibre en agissant sur la résistance de tarage r (r est prédéterminée grossièrement puisqu'on connaît approximativement E' et que l'on a :

$$E' = (r + R_1 + R_2)i \quad ; \quad R_1 + R_2 = \text{cte} \quad ; \quad i = 10^{-n}$$

3°) On mesure E_x en passant le cavalier en 2 et sans retoucher à la résistance de tarage, on rééquilibre le système en agissant sur R'_1 et R'_2 .

Le choix de l'exposant n n'est pas arbitraire. En effet, il doit remplir plusieurs conditions.

• Il faut que $R_1 = \frac{E_c}{i}$ et $R'_2 = \frac{E_x}{i}$ soient inférieurs à la somme constante $R_1 + R_2 = \text{cte}$.

• Le courant i doit être faible de manière à rendre la mesure suffisamment fine (la finesse de réglage des résistances est généralement de $0,1 \Omega$ et il ne faut pas que le spot du galvanomètre sorte de l'échelle lorsque R_1 varie de cette quantité).

• Le courant i doit être suffisamment grand de manière à éviter de prendre des résistances $R_1 + R_2$ trop élevées car celles-ci sont chères (il est difficile de les perfectionner).

En pratique, une valeur de $n=3$ convient parfaitement.

II.2.2) Sensibilité de la méthode :

Elle est définie par le rapport de la variation du courant dans le galvanomètre à la variation relative initiale $\frac{dR}{R_1}$ de la résistance de réglage.

$$\sigma = R_1 \cdot \frac{dI_2}{dR} = \frac{e}{\mathcal{G} + \frac{R_1 \cdot R_2}{(R_1 + R_2)}}$$

Choix de la valeur de la résistance totale potentiométrique:

E_x : d.d.p à mesurer; on a : $E_x = \frac{E'}{(R_1 + R_2)} \cdot R_1$

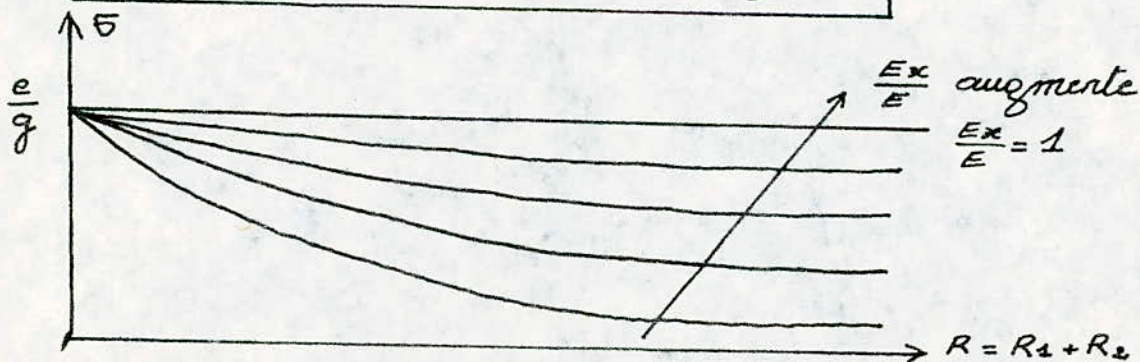
$$E_x = \frac{E'}{R} \cdot R_1 \Rightarrow \frac{R_1}{R} = \frac{E_x}{E'} ; (R_1 + R_2 = R)$$

du point de vue sensibilité :

$$\sigma = \frac{E_x}{\left(\mathcal{G} + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}\right)} = \frac{E_x}{\left(\mathcal{G} + \frac{E_x \cdot R_2}{E'}\right)}$$

$$R_2 = R - R_1 = R - R \cdot \frac{E_x}{E'} = R \left(1 - \frac{E_x}{E'}\right)$$

$$\sigma = \frac{E_x}{\left\{ \mathcal{G} + \frac{E_x}{E'} \left(1 - \frac{E_x}{E'}\right) R \right\}}$$



L'allure des courbes $\sigma = f(R)$ nous montre que la sensibilité est maximale pour $R=0$ et qu'elle sera d'autant meilleure que la résistance sera plus faible.

Choix de la source auxiliaire :

Les courbes $\Theta = f(R)$ nous montrent aussi qu'il y'a toujours intérêt du point de vue de la sensibilité à prendre E' le plus voisin possible de E_x . En d'autres termes, la source E' doit être légèrement supérieure à la plus grande des d.d.p à mesurer. Il faut d'autre part que cette d.d.p soit la plus stable possible.

En pratique, on peut dire que l'inconstance est négligeable pour une batterie d'accumulateurs au plomb de quelques dizaines d'ampères heure (Ah) débitant moins du $\frac{1}{10}$ de son courant nominal à condition qu'elle soit chargée à plus de 70% de sa charge totale et que la mesure ne soit faite qu'au bout de 20 mn de débit ininterrompu.

Interpolation :

En cherchant l'équilibre, on s'aperçoit que le spot du galvanomètre dévie dans un sens pour une certaine valeur de R_1 et dans l'autre sens pour la valeur immédiatement voisine.

$$\begin{array}{l} R_{1g} \longrightarrow \theta_g \\ R_{1d} \longrightarrow \theta_d \end{array}$$

on a :

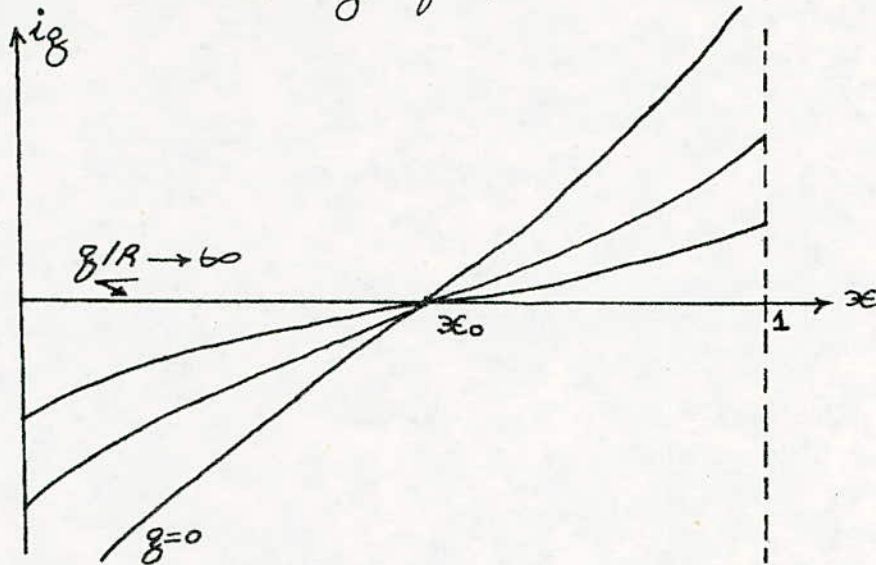
$$\Delta i_g = \frac{E' \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} - E_x}{\left\{ \mathcal{G} + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \right\}}$$

Poseons $R = R_1 + R_2$; $R_1 = x \cdot R$ et $E_x = x_0 \cdot E'$

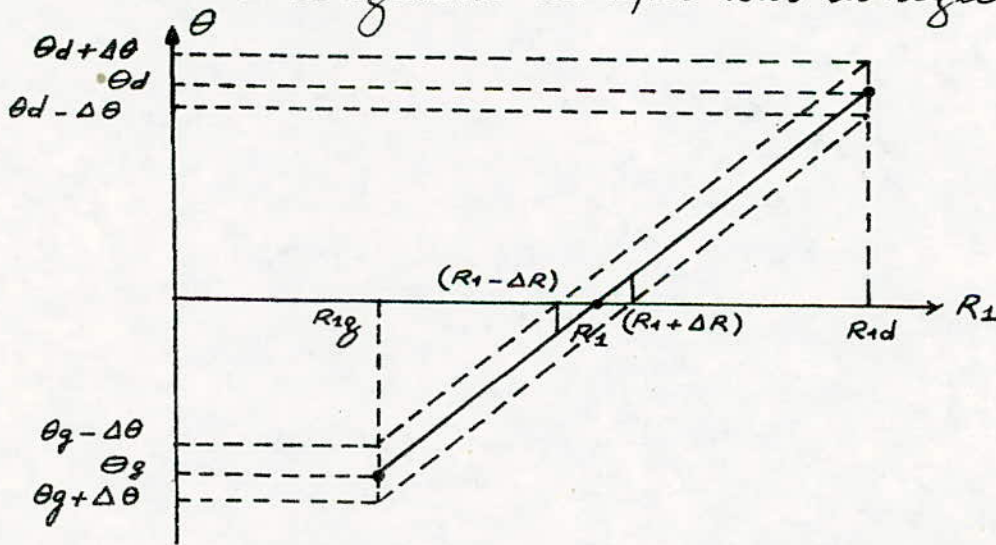
alors :

$$\Delta i_g = \frac{E' \cdot (x - x_0)}{\left\{ \mathcal{G} + R \cdot x \cdot (1-x) \right\}}$$

On trace la courbe $i_g = f(x)$



Au voisinage de x_0 (équilibre), les variations de i_g peuvent être considérées comme pratiquement linéaires. Il en sera de même des elongations du spot sur la règle puisque



$$\tan \alpha = \frac{(\theta_d + \theta_g)}{(R_{1d} - R_{1g})} = \frac{\theta_g}{(R_1 - R_{1g})} \implies R_1 = R_{1g} + \frac{\theta_g \cdot (R_{1d} - R_{1g})}{(\theta_d + \theta_g)}$$

Calcul de l'erreur de détermination: L'erreur de lecture $\Delta\theta$ donne lieu à l'erreur de détermination sur R , ΔR dont

la valeur est :

$$\frac{\Delta R}{\Delta \theta} = \frac{(R_{1d} - R_{1g})}{(\theta_d + \theta_g)}$$

et finalement :

$$(E_r)_d = \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_d = \frac{(R_{1d} - R_{1g})}{R_1} \cdot \frac{\Delta \theta}{(\theta_d + \theta_g)}$$

En remplaçant R_1 par son expression en fonction de θ_g ; θ_d ; R_g etc... On trouve :

$$(E_r)_d = \frac{\Delta \theta}{\left\{ \theta_g + \frac{R_{1g}(\theta_d + \theta_g)}{(R_{1d} - R_{1g})} \right\}}$$

La sensibilité est aussi donnée par l'interpolation :

$$s = \frac{\Delta \theta}{(E_r)_d} = \frac{R_1 \cdot (\theta_d + \theta_g)}{(R_{1d} - R_{1g})}$$

Si $\Delta \theta = \frac{1}{n}$ division s : la sensibilité

nous pouvons alors écrire : $(E_r)_d = \frac{1/n}{s}$

Calcul d'erreur :

On a $E_x = E \cdot \frac{R_2}{R_1}$

Il ne suffit pas ici d'appliquer la règle de la différentielle logarithmique car les résistances R_1 et R_2 ont une partie commune R_0 qui peut être égale à la plus petite d'entre elles.

$$R_0 \leq R_1 \quad \text{si } R_2 \geq R_1$$

$$R_0 \leq R_2 \quad \text{si } R_1 \geq R_2$$

On écrit :

$$R_1 = R_0 + (R_1 - R_0) \quad ; \quad R_2 = R_0 + (R_2 - R_0)$$

On obtient :

$$E_x = E_0 \cdot \frac{\{R_0 + (R_2 - R_0)\}}{\{R_0 + (R_1 - R_0)\}}$$

Posons. $x = \frac{R_2}{R_1} = \frac{\{R_0 + (R_2 - R_0)\}}{\{R_0 + (R_1 - R_0)\}}$

Nous aurons.

$$d_x = \frac{\partial x}{\partial R_0} \cdot dR_0 + \frac{\partial x}{\partial (R_2 - R_0)} \cdot d(R_2 - R_0) + \frac{\partial x}{\partial (R_1 - R_0)} \cdot d(R_1 - R_0)$$

Posons $(\Delta R)_1 = R_1 - R_0$ et $(\Delta R)_2 = R_2 - R_0$

Nous aurons.

$$d_x = \frac{\partial x}{\partial R_0} \cdot dR_0 + \frac{\partial x}{\partial (\Delta R)_1} \cdot d(\Delta R)_1 + \frac{\partial x}{\partial (\Delta R)_2} \cdot d(\Delta R)_2$$

$$\frac{\partial x}{\partial R_0} = \frac{\{R_0 + (\Delta R)_1\} - \{R_0 + (\Delta R)_2\}}{\{R_0 + (\Delta R)_1\}^2} = \frac{(\Delta R)_1 - (\Delta R)_2}{\{R_0 + (\Delta R)_1\}^2}$$

$$\frac{\partial x}{\partial (\Delta R)_1} = - \frac{\{R_0 + (\Delta R)_2\}}{\{R_0 + (\Delta R)_1\}^2}$$

$$\frac{\partial x}{\partial (\Delta R)_2} = \frac{1}{\{R_0 + (\Delta R)_1\}}$$

Donc :

$$d_x = \frac{\{(\Delta R)_1 - (\Delta R)_2\} \cdot dR_0}{\{R_0 + (\Delta R)_1\}^2} - \frac{\{R_0 + (\Delta R)_2\} d(\Delta R)_1}{\{R_0 + (\Delta R)_1\}^2} + \frac{d(\Delta R)_2}{\{R_0 + (\Delta R)_1\}}$$

$$\frac{d\mathcal{E}}{\mathcal{E}} = \left[\frac{R_0 + (\Delta R)_1}{R_0 + (\Delta R)_2} \right] \left[\frac{(\Delta R)_1 - (\Delta R)_2}{\{R_0 + (\Delta R)_1\}^2} \cdot dR_0 - \frac{\{R_0 + (\Delta R)_2\}}{\{R_0 + (\Delta R)_1\}^2} \cdot d(\Delta R)_1 + \frac{d(\Delta R)_2}{\{R_0 + (\Delta R)_2\}} \right]$$

$$\frac{d\mathcal{E}}{\mathcal{E}} = \frac{\{(\Delta R)_1 - (\Delta R)_2\}}{\{R_0 + (\Delta R)_2\} \{R_0 + (\Delta R)_1\}} \cdot dR_0 - \frac{d(\Delta R)_1}{\{R_0 + (\Delta R)_1\}} + \frac{d(\Delta R)_2}{\{R_0 + (\Delta R)_2\}}$$

$$\frac{d\mathcal{E}}{\mathcal{E}} = \frac{R_0 \{(\Delta R)_1 - (\Delta R)_2\}}{\{R_0 + (\Delta R)_2\} \{R_0 + (\Delta R)_1\}} \cdot \frac{dR_0}{R_0} - \frac{(\Delta R)_1}{\{R_0 + (\Delta R)_1\}} \cdot \frac{d(\Delta R)_1}{(\Delta R)_1} + \frac{(\Delta R)_2}{\{R_0 + (\Delta R)_2\}} \cdot \frac{d(\Delta R)_2}{(\Delta R)_2}$$

où :

$$\frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}} = \frac{R_0 / (\Delta R)_1 - (\Delta R)_2 / \{R_0 + (\Delta R)_2\}}{\{R_0 + (\Delta R)_2\} \{R_0 + (\Delta R)_1\}} \cdot \mathcal{E}_R + \frac{(\Delta R)_1}{\{R_0 + (\Delta R)_1\}} \cdot \mathcal{E}_R + \frac{(\Delta R)_2}{\{R_0 + (\Delta R)_2\}} \cdot \mathcal{E}_R$$

$$\frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}} = \mathcal{E}_R \cdot \left[\frac{R_0 / (\Delta R)_1 - (\Delta R)_2 / \{R_0 + (\Delta R)_2\} + (\Delta R)_1 \{R_0 + (\Delta R)_2\} + (\Delta R)_2 \{R_0 + (\Delta R)_1\}}{\{R_0 + (\Delta R)_2\} \cdot \{R_0 + (\Delta R)_1\}} \right]$$

On a deux cas :

$$\textcircled{1} R_2 \geq R_1 \Rightarrow (\Delta R)_2 > (\Delta R)_1 \text{ et } |(\Delta R)_1 - (\Delta R)_2| = (\Delta R)_2 - (\Delta R)_1$$

$$\frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}} = \mathcal{E}_R \cdot \left[\frac{R_0 \{(\Delta R)_2 - (\Delta R)_1\} + (\Delta R)_1 \{R_0 + (\Delta R)_2\} + (\Delta R)_2 \{R_0 + (\Delta R)_1\}}{\{R_0 + (\Delta R)_2\} \cdot \{R_0 + (\Delta R)_1\}} \right]$$

$$\frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}} = \mathcal{E}_R \cdot \left[\frac{R_0 \cdot (\Delta R)_2 - R_0 \cdot (\Delta R)_1 + R_0 (\Delta R)_1 + (\Delta R)_1 (\Delta R)_2 + R_0 (\Delta R)_2 + (\Delta R)_2 (\Delta R)_1}{\{R_0 + (\Delta R)_2\} \cdot \{R_0 + (\Delta R)_1\}} \right]$$

$$\frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}} = \mathcal{E}_R \cdot \left[\frac{2 \cdot R_0 \cdot (\Delta R)_2 + 2 \cdot (\Delta R)_1 \cdot (\Delta R)_2}{\{R_0 + (\Delta R)_2\} \{R_0 + (\Delta R)_1\}} \right]$$

$$\frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}} = \left[\frac{2 \cdot (\Delta R)_2 \cdot \{R_0 + (\Delta R)_1\}}{\{R_0 + (\Delta R)_2\} \{R_0 + (\Delta R)_1\}} \right] \cdot \mathcal{E}_R = \frac{2 \cdot (\Delta R)_2}{\{R_0 + (\Delta R)_2\}} \cdot \mathcal{E}_R$$

$$\frac{\Delta X}{X} = \epsilon_R \cdot \frac{2 \cdot (R_2 - R_0)}{R_2}$$

3° $R_1 > R_2 \Rightarrow (\Delta R)_1 > (\Delta R)_2$ et $|(\Delta R)_1 - (\Delta R)_2| = (\Delta R)_1 - (\Delta R)_2$

$$\frac{\Delta X}{X} = \epsilon_R \cdot \left[\frac{R_0 \cdot \{(\Delta R)_1 - (\Delta R)_2\} + (\Delta R)_1 \cdot \{R_0 + (\Delta R)_2\} + (\Delta R)_2 \cdot \{R_0 + (\Delta R)_1\}}{\{R_0 + (\Delta R)_2\} \cdot \{R_0 + (\Delta R)_1\}} \right]$$

$$\frac{\Delta X}{X} = \epsilon_R \cdot \left[\frac{R_0 \cdot (\Delta R)_1 - R_0 \cdot (\Delta R)_2 + R_0 \cdot (\Delta R)_1 + (\Delta R)_1 \cdot (\Delta R)_2 + R_0 \cdot (\Delta R)_2 + (\Delta R)_1 \cdot (\Delta R)_2}{\{R_0 + (\Delta R)_2\} \cdot \{R_0 + (\Delta R)_1\}} \right]$$

$$\frac{\Delta X}{X} = \epsilon_R \cdot \left[\frac{2 \cdot R_0 \cdot (\Delta R)_1 + 2 \cdot (\Delta R)_1 \cdot (\Delta R)_2}{\{R_0 + (\Delta R)_2\} \cdot \{R_0 + (\Delta R)_1\}} \right]$$

$$\frac{\Delta X}{X} = \epsilon_R \cdot \left[\frac{2(\Delta R)_1 \cdot \{R_0 + (\Delta R)_2\}}{\{R_0 + (\Delta R)_2\} \cdot \{R_0 + (\Delta R)_1\}} \right] = \epsilon_R \cdot \frac{2 \cdot (\Delta R)_1}{\{R_0 + (\Delta R)_1\}}$$

$$\frac{\Delta X}{X} = \epsilon_R \cdot \frac{2 \cdot (R_1 - R_0)}{R_1}$$

Nous devons ajouter deux termes.

* terme relatif à l'erreur de détermination lors du tarage.

* terme relatif à l'erreur de détermination lors de la mesure. (voir la partie interpolation).

nous avons donc :

$$\epsilon_X = \epsilon_e + 2 \cdot \frac{(R_2 - R_0)}{R_2} \cdot \epsilon_R + \frac{1/n}{s_1} + \frac{1/n}{s_2} \quad (R_2 \geq R_1)$$

$$\epsilon_X = \epsilon_e + 2 \cdot \frac{(R_1 - R_0)}{R_1} \cdot \epsilon_R + \frac{1/n}{s_1} + \frac{1/n}{s_2} \quad (R_1 \geq R_2)$$

Remarques:

- Dans le calcul d'erreur ci dessus, les erreurs systématiques sont éliminées.
- Nous avons supposé que le courant i est constant. Pour négliger l'influence des facteurs compromettant la constance du courant, il faut après chaque mesure, vérifier que le tarage est bon. Sinon, il faut réajuster le rhéostat de tarage et recommencer la mesure.

III.1) Introduction :

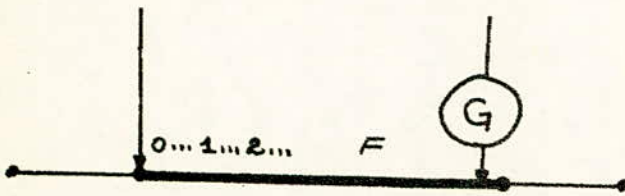
Basés sur la méthode d'opposition, les potentiomètres permettent d'obtenir des précisions élevées (de l'ordre 10^{-4} à 10^{-8}) dans la comparaison des tensions.

Ses potentiomètres pour laboratoires, réalisés industriellement, se distinguent les uns des autres essentiellement par la chaîne potentiométrique.

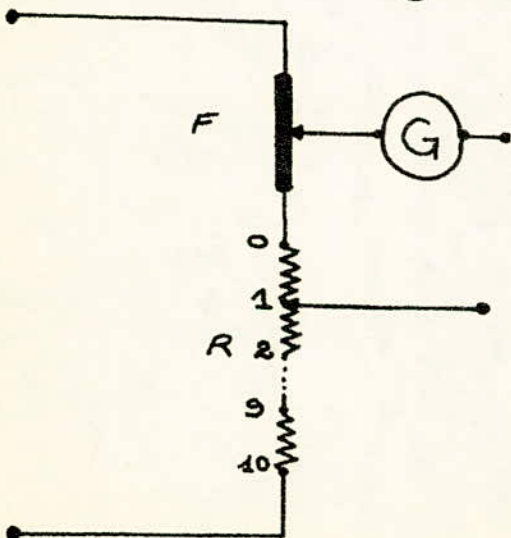
III.2) Chaînes potentiométriques :

III.2.1) Fil calibré :

C'est la plus simple des chaînes. La précision est au plus 0,5%.



III.2.2) Montage de Bouty :

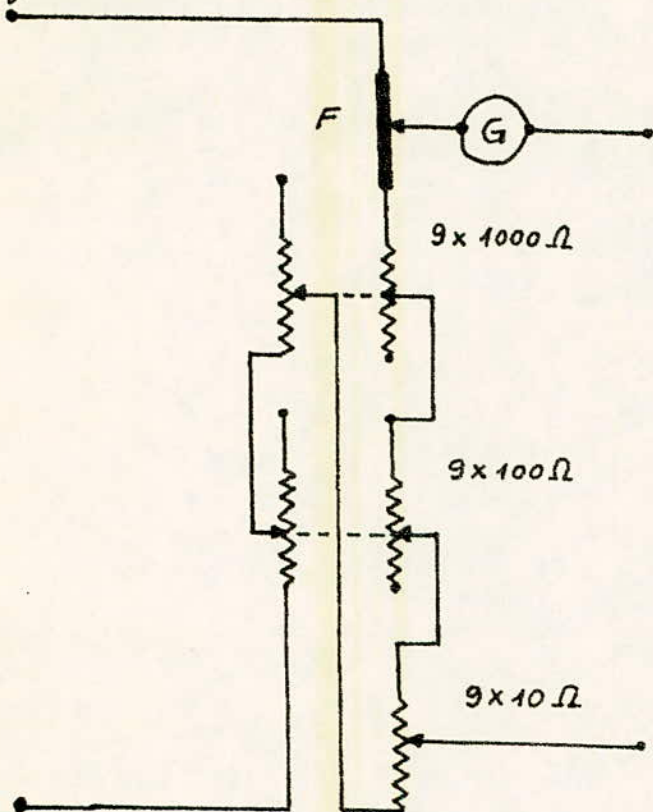


F : fil calibré

Une décade R de résistances en série donne le premier chiffre de la lecture. Une résistance de cette décade est égale à la résistance totale du fil calibré. La précision des résistances fixes peut atteindre facilement 0,01%.

III.2.3) Montage de Feussner:

Pour obtenir un nombre de chiffres plus important dans la mesure de U , on emploie plusieurs décades. Comme il ne peut y avoir plus de points de contact et que la résistance de la chaîne doit être constante, les décades supplémentaires sont jumelées 2 à 2.



Inconvénient:

Les résistances résiduelles des contacts sont dans la chaîne potentiométrique et ce montage n'est possible que pour des décades relativement élevées 100 Ω et 1000 Ω par exemple pour lesquelles la résistance résiduelle est négligeable.

Note:

Au lieu de F (fil calibré) on peut utiliser une autre décade.

III.2.4) Procédé Waidner - Wolff:

Il permet de réaliser des variations relatives faibles d'une résistance fixe en lui adjoignant en parallèle une résistance R variable de valeur plus élevée. Si l'on désire faire varier S par bonds de $10^{-n} S$ on lui adjoindra en parallèle, pour la $p^{\text{ème}}$ position du commutateur:

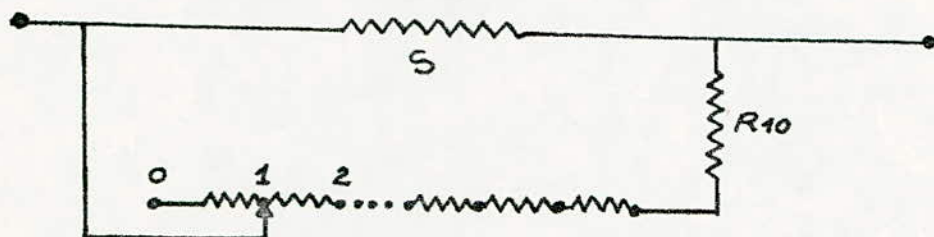
$$R_p = \left(\frac{10^n}{p} - 1 \right) \cdot S$$

La résistance comprise entre le plot $(p-1)$ et le plot p ayant pour valeur:

$$R_{p-1} - R_p = \frac{10^n \cdot S}{P(P-1)}$$

Ses décades présentent le double avantage de reporter les résistances de contact dans des branches parallèles de valeurs élevées et de limiter l'effet des couples thermoélectriques associés aux contacts glissants à une fraction de leur valeur. En effet une f.e.m. E prenant naissance dans la branche R crée dans la branche S une d.d.p. parasite de valeur réduite.

$$\frac{E \cdot S}{(R_p + S)}$$



III.3) Potentiomètre AOIP P12 :

PB est constitué d'un circuit de tarage et d'un circuit de mesure. Le circuit de tarage comprend :

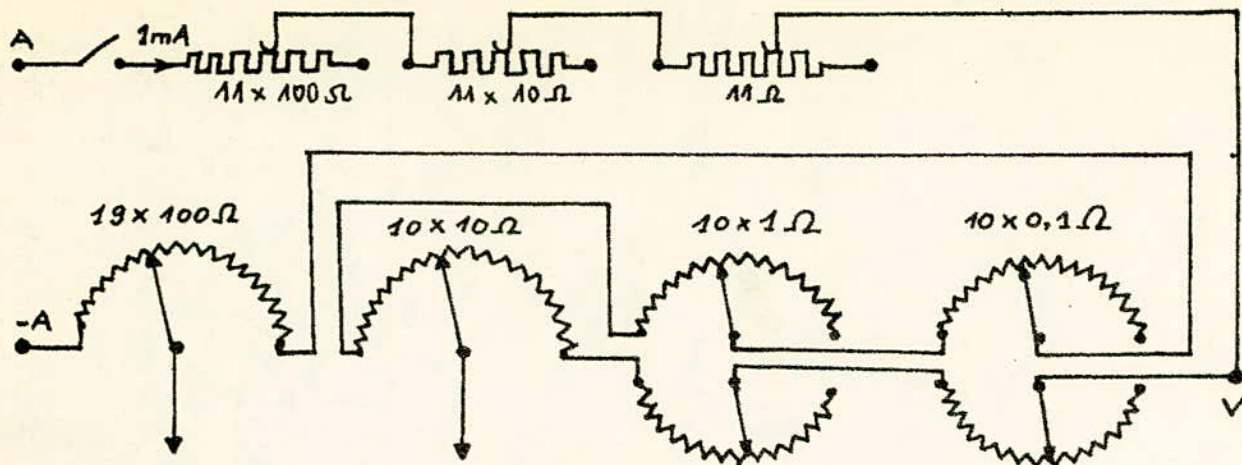
3 rhéostats $11 \times 100 \Omega$; $11 \times 10 \Omega$; 11Ω

Le circuit de mesure est constitué par :

- 1 rhéostat $19 \times 100 \Omega$.
- 1 rhéostat $10 \times 10 \Omega$.
- 2 rhéostats jumelés sur 10Ω .
- 2 rhéostats jumelés sur 1Ω .

Le courant de tarage est fixé à $10^{-3} A$ (1mA). On a la résistance totale potentiométrique qui est constante et égale à 2011Ω . Le potentiomètre AOIP P12 possède 3 calibres distincts.

Calibre 2V : Le courant traversant la résistance potentiométrique est de 1mA. Le montage se réduit au schéma suivant :



Ses boîtes jumelées sont utilisées pour élargir l'étendue de mesure (augmenter la finesse) tout en gardant la résistance potentiométrique constante. Avec ce calibre, la mesure est faite à 10^{-4} V près car la plus petite résistance est de $0,1 \Omega$, comme elle est traversée par 1 mA , on a bien 10^{-4} V.

Calibre 0,2 V: Le courant traversant la résistance potentiométrique est cette fois de $0,1 \text{ mA}$. Comme le courant principal est toujours gardé à 1 mA , on est amené à dériver $0,9 \text{ mA}$ dans une branche auxiliaire tout en gardant la résistance entre les points -A et V égale à 2011Ω . La mesure est faite à 10^{-5} V près. Sa résistance R_2 se calcule facilement :

$$R_2 = \frac{0,2011}{9 \cdot 10^{-4}} = 223,44 \Omega$$

$$R_2 = 223,44 \Omega$$

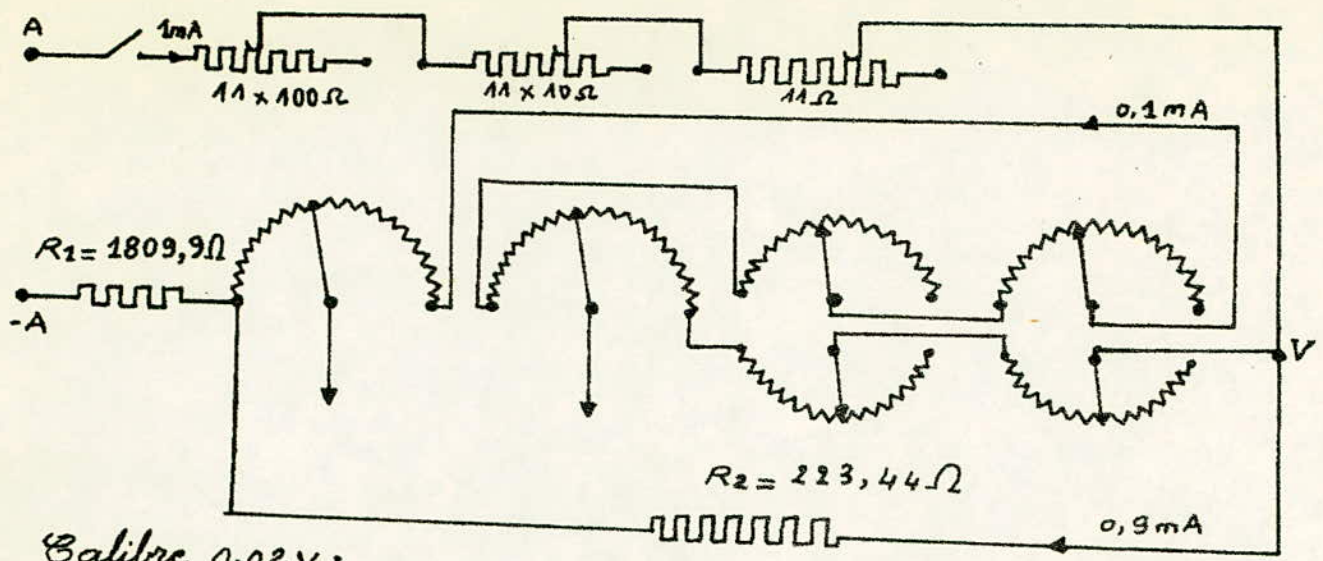
La résistance équivalente aux deux circuits est de :

$$R_{eq} = \frac{2011 \times 223,44}{(2011 + 223,44)} = 201,1 \Omega$$

Et pour satisfaire la condition précédente, on place en série une résistance R_1 égale à : $R_1 = 2011 - 201,1 = 1809,9 \Omega$

$$R_1 = 1809,9 \Omega$$

Le schéma de montage utilisé devient :



Calibre 0,02V :

Le calcul se fait de la même manière que dans le cas du calibre 0,2V. On trouve.

$R'_2 = 20,313 \Omega$; $R'_1 = 1990,89 \Omega$

Puisque dans le cas du calibre 0,2V on a utilisé une résistance en série de 1809,9Ω, il suffit de lui insérer en série, par un jeu de commutateurs, une résistance égale à :

$R''_1 = 1990,89 - 1809,9 = 180,99 \Omega$

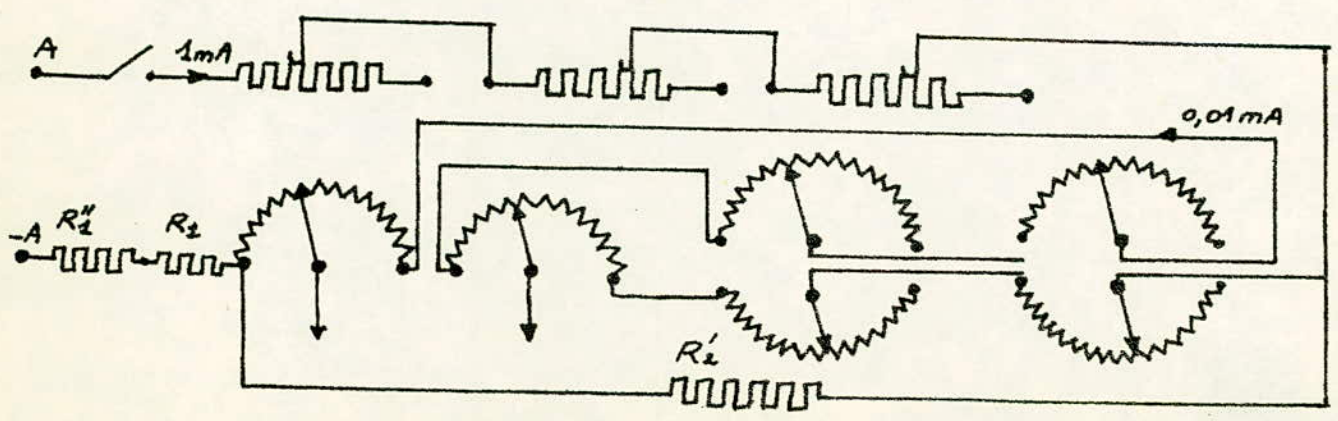
$R''_1 = 180,99 \Omega$

pour obtenir R'_1 .

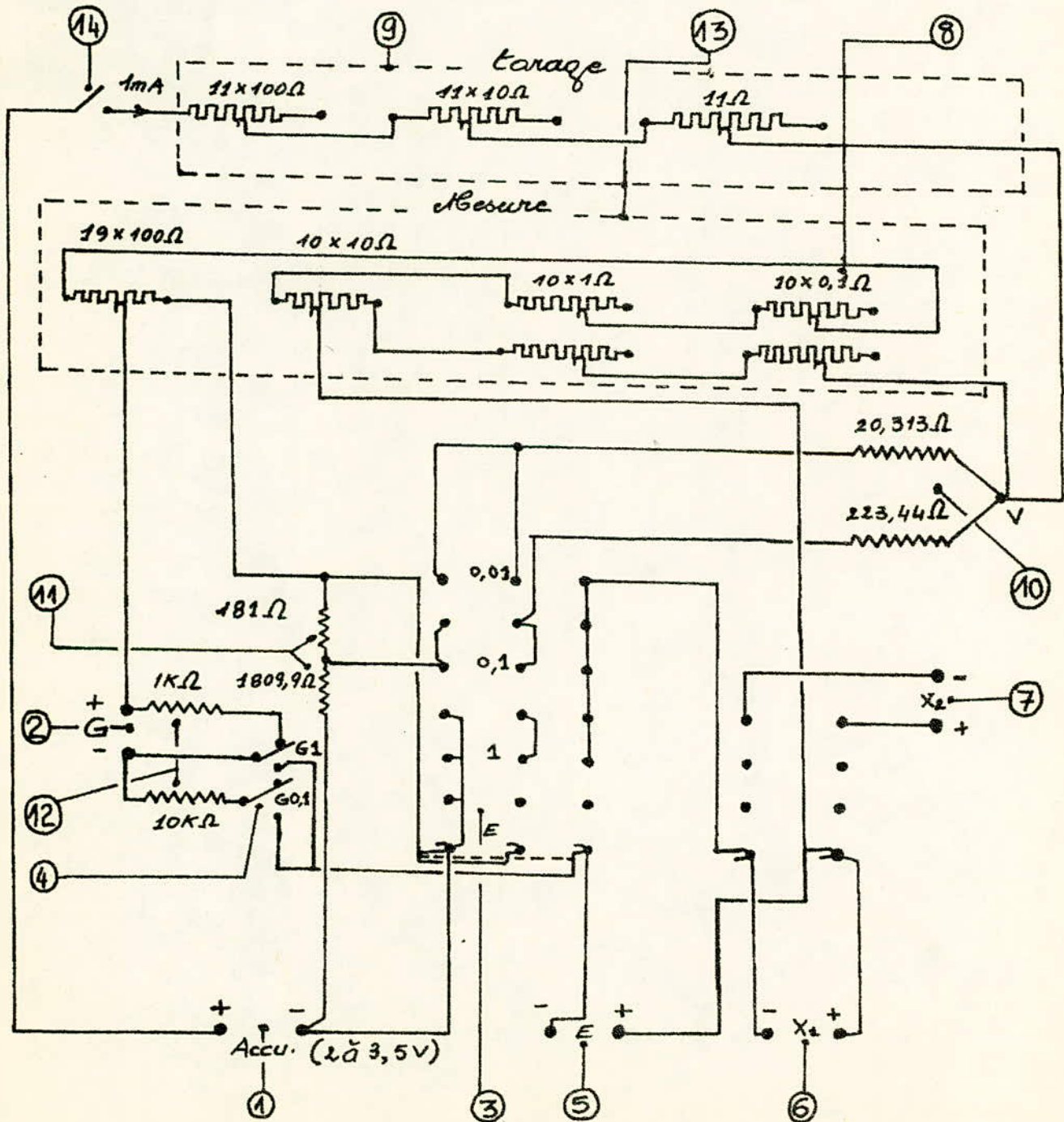
Le courant traversant la résistance potentiométrique est de $10^{-5} A$ (0,01mA). La mesure est faite à $10^{-6} V$ près.

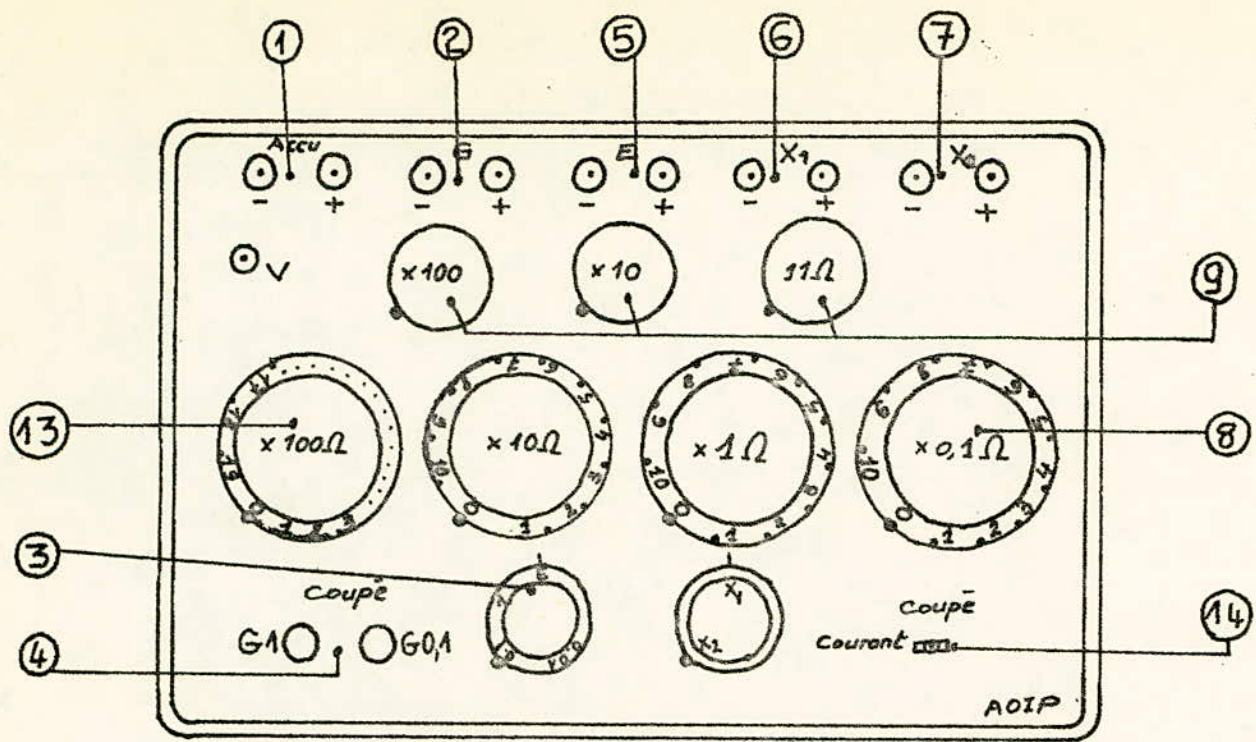
L'étendue de mesure de ce potentiomètre est de 1μV à 2V.

La précision est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-5}$.



Remarque: Les résistances de $1\text{K}\Omega$ et de $10\text{K}\Omega$ (voir schéma ci-dessous) servent de protection du galvanomètre et de la pile étalon. En position G1, la résistance de $1\text{K}\Omega$ est en parallèle avec le galvanomètre, celle de $10\text{K}\Omega$ en série. Sur G0,1 les deux résistances sont déconnectées, le galvanomètre et la pile étalon ne sont pas protégés. Donc, on travaille d'abord en position G1 ensuite on passera sur G0,1.

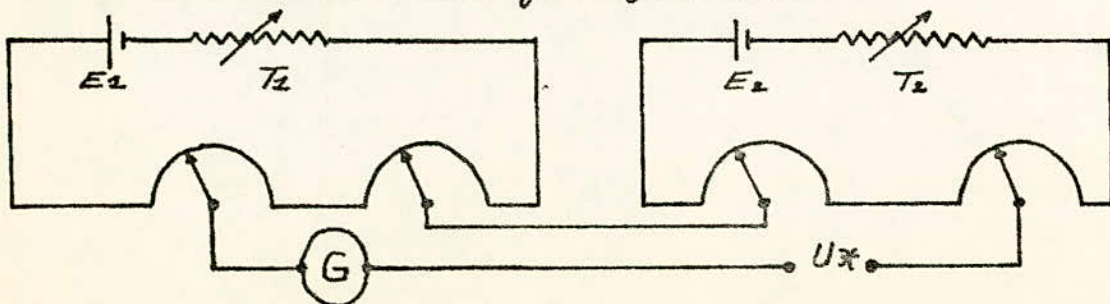




- | | |
|--|---|
| ① Bornes: Accu 2 à 3V | ⑩ shunts |
| ② Bornes: Galvanomètre | ⑪ Résistances série |
| ③ Commutateur fonctionnel | ⑫ Résistances de protection de G et E |
| ④ Boutons de mise en service de G . | ⑬ Décades de mesure |
| ⑤ Bornes: Pile étalon marquées E | ⑭ Interrupteur |
| ⑥ Bornes de mesure pour la d.d.p. inconnue (X_1) | |
| ⑦ Bornes de mesure pour la d.d.p. inconnue (X_2) | |
| ⑧ Décades $10 \times 0,1 \Omega$ jumelées. | |
| ⑨ Résistances de tarage | |

III.4) Autres potentiomètres :

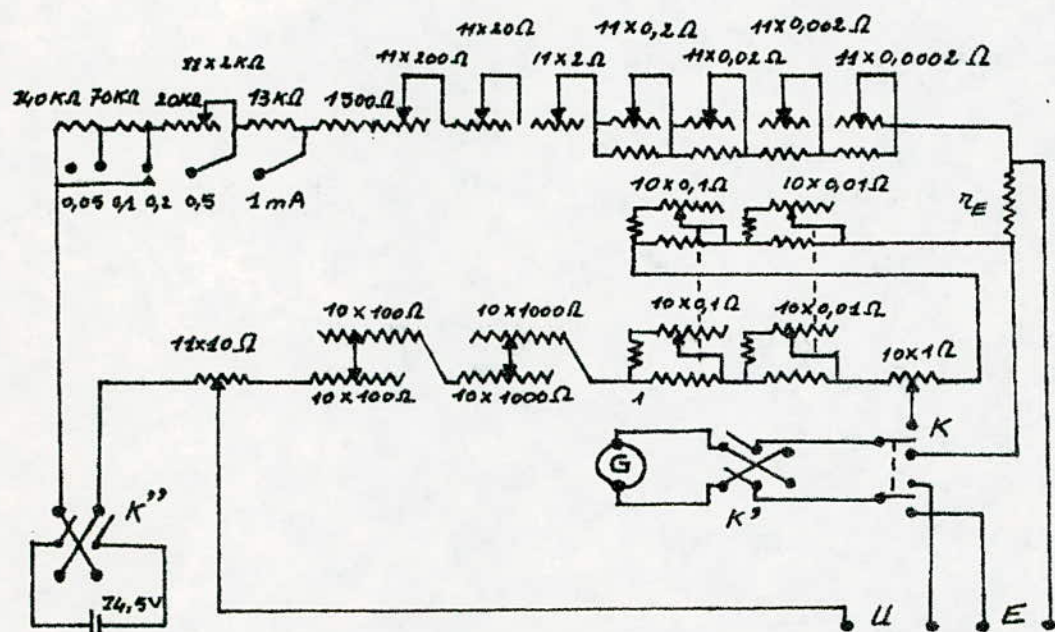
III.4.1) Potentiomètre Tinsley (type 5205).



Description du potentiomètre. Il est constitué de deux potentiomètres dont les tensions de sortie s'ajoutent. Chaque circuit est taré séparément. On remarque qu'aucun contact ne se trouve dans le circuit potentiométrique, ils sont tous ramenés dans la branche du détecteur. Cet appareil permet une discrimination de $0,1 \mu V$.

III.4.2) Réalisations spéciales:

De nombreux montages permettent d'atteindre de meilleures précisions que celles des fronts couramment utilisés. Ils sont utilisés dans la comparaison des étalons. Nous exposerons sommairement et à titre d'exemple, le potentiomètre AOIP Gosselin.



La chaîne potentiométrique est à 6 décades. Ses résistances de contact ont moins d'influence sur les résistances élevées de 1000Ω et 100Ω que sur les résistances 10Ω et 1Ω . On utilise le montage Feussner pour les décades $10 \times 10 \Omega$ et $10 \times 1 \Omega$, le montage de Bouty pour les décades $10 \times 1000 \Omega$ et $10 \times 100 \Omega$, le montage de Waidner-Wolff pour les décades de $0,1 \Omega$ et $0,01 \Omega$.

Le courant de tarage est obtenu avec une précision de l'ordre de 10^{-7} , il est possible de comparer des f.e.m à 10^{-6} près. Le courant de tarage prendra les valeurs : 1 mA , $500 \mu A$; $200 \mu A$;

100 μ A et 50 μ A. Ses tensions mesurables sont de 0,05 à 10V en branchage direct et au dessus avec réducteur.

Conclusions:

La précision des mesures effectuées à l'aide de potentiomètres peut être très élevée. Des améliorations ont été apportées à leur utilisation grâce à l'emploi de détecteurs de zéro à amplification électronique ou optique et de sources stabilisées en courant pour leur alimentation.

III.5) Causes d'erreur dans les mesures potentiométriques:

III.5.1 Valeur de la f.e.m de la pile étalon:

À température constante, la valeur de la f.e.m de la pile est bien connue. Parfois la connaissance de la température ne suffit pas à cause de l'hystérésis que présente la pile. On doit éviter tout débit supérieur à 1 μ A.

III.5.2) Instabilité de la tension d'alimentation:

Ses potentiomètres (inférieur ou égal à 10mA) sont généralement alimentés par des accumulateurs au plomb d'assez forte capacité (10Ah ou plus). Ceux-ci atteignent leur plus grande stabilité entre $\frac{1}{4}$ et $\frac{3}{4}$ de leur capacité à la décharge. Ses meilleures conditions seront obtenues lorsque la batterie débitera sans interruption dans le potentiomètre. Sa dérive de courant sera faible et régulière et pourra être rattrapée par une répétition de l'opération de tarage, à intervalles d'une heure ou plus. Se débit permanent a d'autre part l'avantage de maintenir le potentiomètre à sa température de fonctionnement et d'éviter les erreurs provoquées par l'inégalité des constantes de temps thermiques affectant les éléments de la chaîne de résistances.

III.5.3) Opération de tarage.

L'erreur de sensibilité lors de cette opération résulte d'une mauvaise appréciation du zéro de l'appareil de détection. Ces appareils ont effectivement une sensibilité suffisante pour que ce type d'erreur n'intervienne que dans les mesures les plus précises. Pour les détecteurs à amplification, on s'assurera qu'ils ne présentent pas un faux zéro en les court-circuitant à l'aide d'un fil de cuivre.

III.5.4) Erreurs dues aux résistances.

Elles sont ajustées par le constructeur avec la tolérance que justifie la précision attribuée au potentiomètre dans les limites des températures de fonctionnement garanties.

Leur stabilité dans le temps doit être l'objet de vérifications soit dans un laboratoire spécialisé, soit à partir de réducteurs étalonnés (type Kelvin-Vorley par exemple) eux-mêmes contrôlés.

III.5.5) Couples thermoélectriques.

L'existence dans le circuit potentiométrique de métaux ou alliages de nature différentes est à l'origine des f.c.m parasites, dites thermoélectriques. Elles-ci se produisent principalement aux soudures du câblage et entre les éléments mobiles et fixes des commutateurs. De très faibles différences de températures, comme celles dues à l'échauffement par frottement du curseur d'une décade, risquent ainsi d'introduire des erreurs significatives dans les mesures.

L'erreur la plus fréquente paraît résulter de la chaleur transmise par les mains de l'opérateur aux bornes de liaison entre le potentiomètre et le circuit en essai. Ces bornes seront donc choisies en cuivre massif. L'immersion dans un même bain d'huile (paraffine ou pétrole), de tous les éléments d'un montage réduit considérablement les erreurs d'origine thermique.

III.5.6) Existence de mauvais contacts aux commutateurs.

Dans le cas de fonctionnement normal, l'erreur de construction due aux résistances de contacts glissants est généralement faible ($10^{-3} \Omega$ par contact). La corrosion et l'accumulation de poussière peuvent modifier considérablement ces données. Il est bon, avant de commencer une mesure, de manoeuvrer une ou deux fois chaque commutateur. Cette opération est dite de dégommage.

III.5.7) Autres causes d'erreur: L'erreur de jumelage existe dans tous les potentiomètres à courant constant, les résistances ajoutées et soustraites par une même manoeuvre du commutateur étant légèrement différentes. Les défauts d'isolement entre circuit de source et de mesure, entre piles étalons et masses créent des courants de fuite susceptibles de fausser la mesure. Un mauvais isolement ou simplement une capacité importante entre le secteur alternatif et le potentiomètre est à redouter lorsqu'on utilise des alimentations obtenues à partir de la tension du réseau redressée. Le passage d'un courant alternatif à travers un détecteur de zéro à amplification électronique risque d'en fausser l'indication ou même de le détériorer.

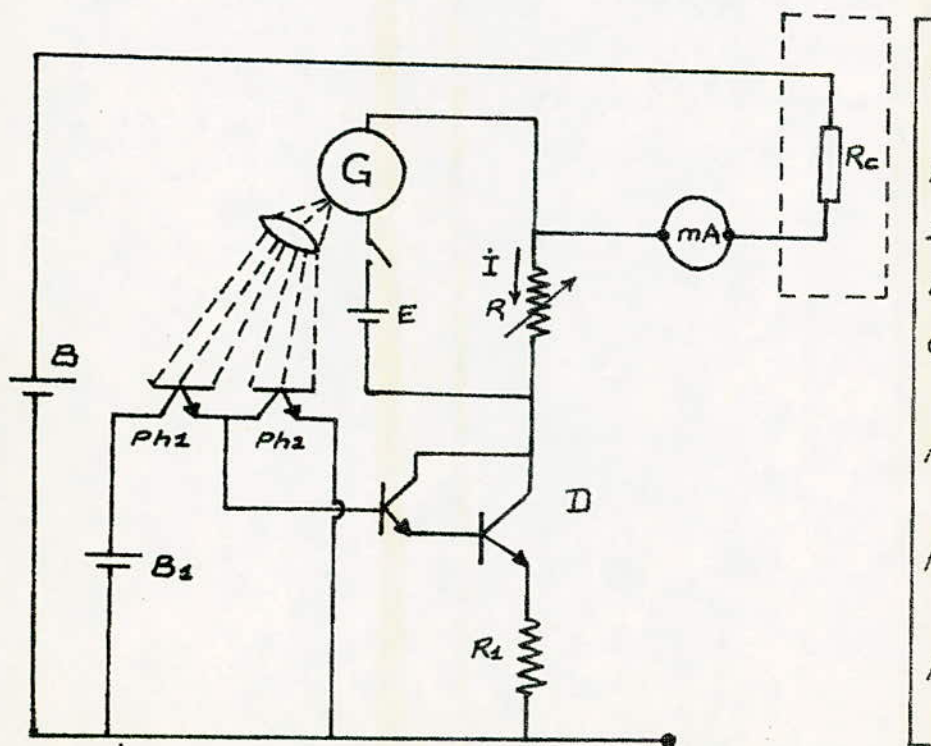
IV.1) Alimentations:

L'opération de tarage doit être renouvelée fréquemment lorsqu'on utilise pour l'alimentation du potentiomètre une batterie ou une pile. En plus part des alimentations stabilisées du commerce ne conviennent pas pour cet usage:

- Soit que leur taux de régulation soit insuffisant.
- Soit qu'elles introduisent une composante alternative de courant, résidu d'un mauvais filtrage pour les alimentations obtenues par redressement de la tension du secteur.
- Soit enfin que la liaison qui introduisent les transformateurs utilisés avec le secteur perturbe la mesure.

On construit des alimentations spécialement pour le potentiomètre. L'alimentation 9770B de Guildline en est un exemple.

Son schéma de principe est le suivant:



- R: résistance variable de précision.
- B: batterie 40Ah; 40V.
- D: Darlington
- E: pile étalon
- G: galvanomètre
- mA: milliampèremètre
- Ph1; Ph2: Phototransistors
- Rc: Charge.

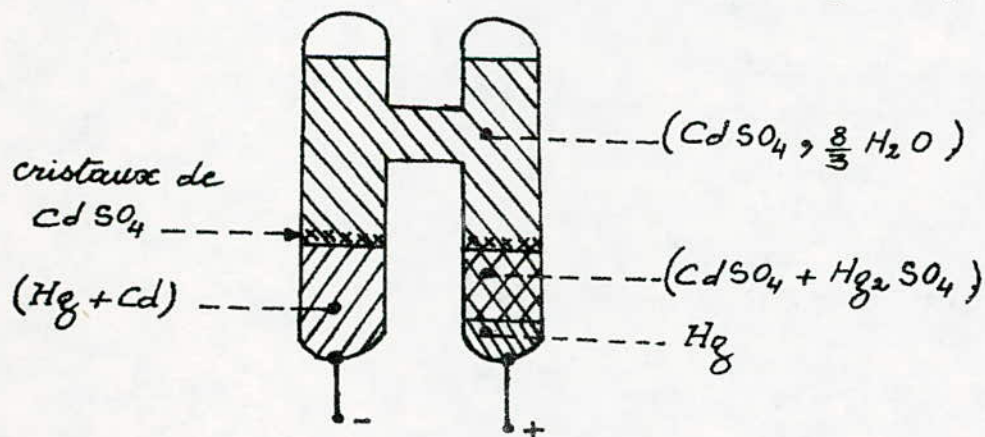
Le courant réglé a pour valeur $i = \frac{E}{R}$. Toute fluctuation de cette valeur entraîne le passage R d'un courant à travers G . La déviation du faisceau qui en résulte déséquilibre les tensions émetteur - collecteur de Ph_1 et Ph_2 et modifie la résistance émetteur - collecteur de D dans un sens tel que l'écart entre la valeur réelle de i et sa valeur de consigne $\frac{E}{R}$ s'en trouve réduit.

À l'équilibre du galvanomètre, le courant $i = \frac{E}{R}$. Le gain du système d'amplification est tel que l'impédance apparente de sortie soit très élevée, ($> 10^9 \Omega$) autorisant une variation importante de la résistance de charge R_c sans modification appréciable de i . Le taux de régulation vis à vis des fluctuations de la source de courant est très élevé.

V.2) Étalons de tension.

V.2.1) La pile Weston.

On donne ici le schéma d'une pile Weston saturée. Sa saturation est assurée par un excès de cristaux hydratés de sulfate de cadmium ($CdSO_4 \cdot \frac{8}{3} H_2O$).



L'électrode positive a un coefficient de température de $310 \mu V/^\circ C$, l'électrode négative de $350 \mu V/^\circ C$ (à $20^\circ C$), ce qui fait que le coefficient de température global de la pile Weston

saturée n'est que de $-40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ à 20°C . Il est important d'éviter toute différence de température entre les deux électrodes.

Sa f.e.m qui est fonction du pH de la solution, est voisine de $1,01865$ volt. Sa stabilité est de l'ordre du μV par an.

Sa f.e.m à la température t est donnée par la formule de Wolff.

$$E_t = E_{20} - \{ 40,6 (t - 20) + 0,95 (t - 20)^2 - 0,01 (t - 20)^3 \} 10^{-6}$$

La pile Weston présentant toujours une hystérésis appréciable, la f.e.m ne suit la variation de température qu'avec un certain retard et l'emploi de la formule est donc délicat.

Un autre type d'hystérésis sera constaté lorsque la pile a débité un courant même faible. Durant le débit, la chute de tension est partiellement due à la résistance interne de la pile et partiellement aux modifications internes, de nature chimique, dont elle est le siège. Ces modifications sont réversibles tant que la charge écoulée reste très faible (par exemple $< 1 \text{ mC}$). Le rétablissement de la tension est loin d'être instantané.

L'écart u entre la valeur instantanée et sa valeur avant débit, après un temps t suivant l'arrêt du débit, suit une loi de la forme:

$$u = \sqrt[m]{\frac{K}{t}}$$

m et K sont des constantes caractérisant la pile essayée.

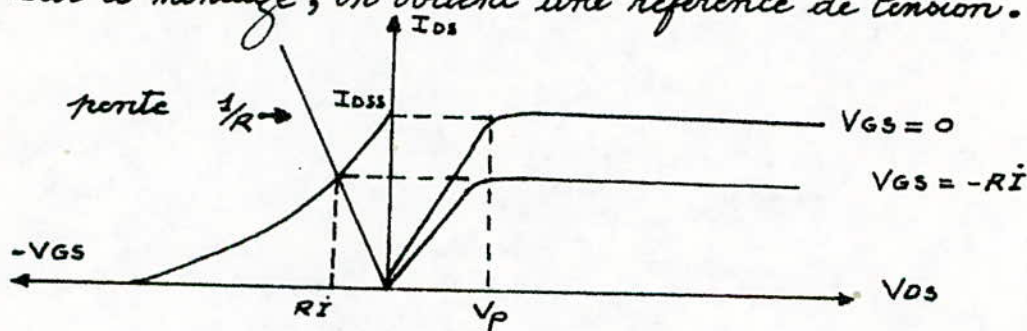
En règle générale:

On fera suivre un débit de $1 \mu\text{A}$ pendant une minute par un repos de 24h et un débit de $10 \mu\text{A}$ pendant 10 mn par un repos de 8 jours au moins, si l'on désire retrouver

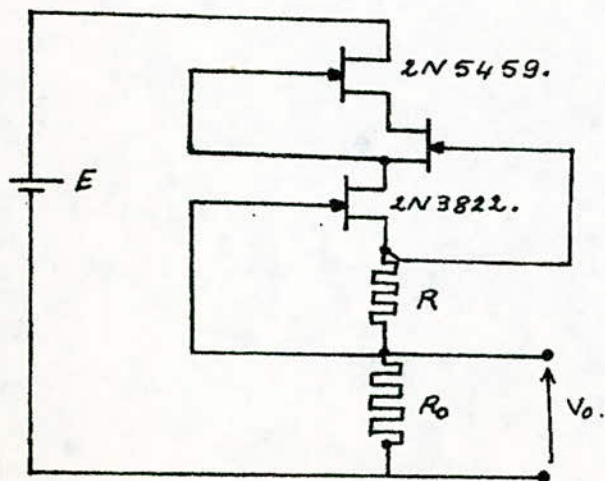
la f.e.m de la pile à 1 ou 2 μV près. Les piles Weston non saturées (electrolyte ne contenant pas de cristaux de sulfate de cadmium) sont également utilisées. Elles ont l'avantage d'avoir un coefficient de température global plus faible ($-3\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ en moyenne) mais leur f.e.m est moins reproductible d'un élément à l'autre et leur stabilité à long terme moins bonne (dérive de $10\mu\text{V}$ par an)

V.2.2) Référence de tension à F.E.T :

Principe : La résistance dynamique très élevée ($R_d \approx M\Omega$) de la caractéristique courant - tension d'un F.E.T à jonction, pour une tension V_{DS} supérieure à la tension de pincement V_P , permet d'obtenir un courant drain-source variant très peu en fonction de V_{DS} . Si ce courant traverse une résistance très stable, comme indiqué sur le montage, on obtient une référence de tension.



Montage :



R_0 : résistance de référence.
 V_0 : tension de référence.
 R : résistance de polarisation automatique fixant la valeur du courant débité.
 $2 \times 2N5459$: transistors de pré-régulation.
 $2N3822$: transistor de régulation.
 E : Source (15 à 25V).

Les variations du courant i en fonction de la température.

$$\frac{di}{dt} = a \cdot g_m(t) - b \cdot i$$

$a = \text{cte} = 2,2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$; variation de la tension de pincement avec la température.

$b = \text{cte} = 0,65\% / ^\circ\text{C}$; variation de la résistivité avec la température.

$g_m(t)$: pente du transistor au point de fonctionnement et à la température $t^\circ\text{C}$.

À une température donnée t_0 , il existe donc une valeur particulière I_0 de I (obtenue par le réglage de la résistance R) pour laquelle la dérive $\left(\frac{di}{dt}\right)_{t=t_0}$ s'annule:

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{t=t_0} = a \cdot g_m(t) - b \cdot I_0 = 0 \implies I_0 = \frac{a}{b} \cdot g_m(t_0)$$

La variation de I_0 ne dépasse pas $2 \cdot 10^{-5}$ en valeur relative entre $(t_0 - 5^\circ\text{C})$ et $(t_0 + 5^\circ\text{C})$.

V.2.3) Référence utilisant l'effet Josephson:

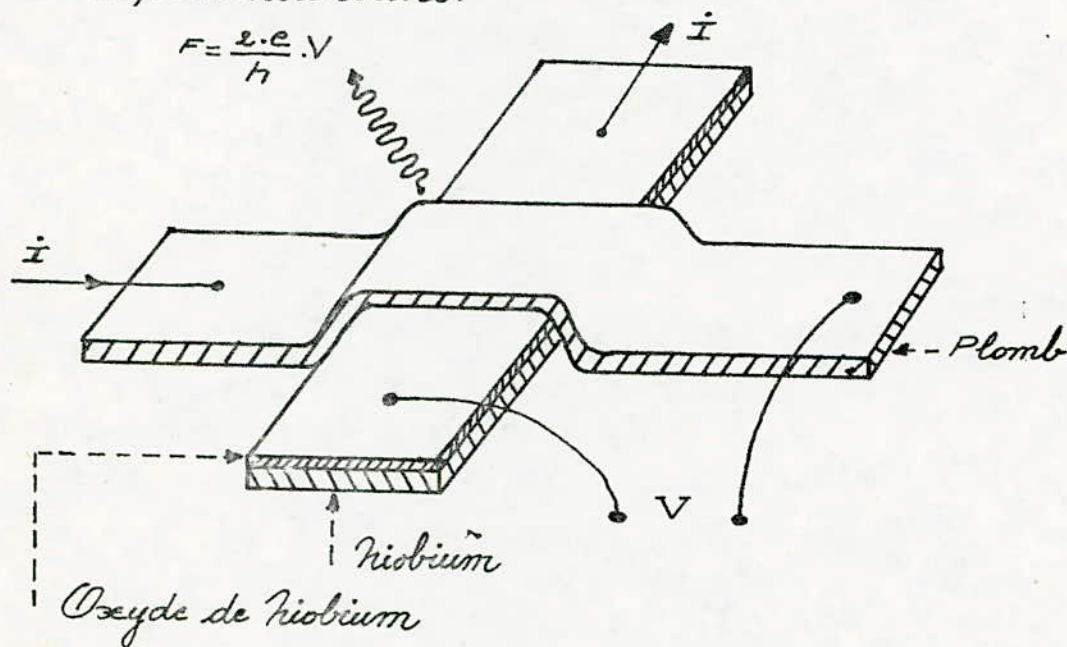
Comme nous l'avons vu, les piles étalons Weston ne permettent de conserver le volt qu'avec une stabilité de l'ordre de $1 \mu\text{V}$ par an. L'effet Josephson alternatif permet de disposer d'une référence de tension ne dépendant que d'une fréquence par l'intermédiaire d'une constante fondamentale et donc parfaitement reproductible.

Considérons une jonction Josephson à couches minces constituée par deux supraconducteurs (par exemple du niobium et du plomb.) en couches minces (épaisseur de quelques centaines de

nanomètres.) séparées par une mince couche isolante (oxyde de Niobium d'épaisseur de 3 nm environ). Josephson a montré, en utilisant des hypothèses tout à fait générales sur la cohérence de phase à l'état supraconducteur, que si une d.d.p V (créée par le passage d'un courant I) apparaissait aux bornes de la jonction, celle-ci émettait un rayonnement hyperfréquence de fréquence :

$$F = \frac{2 \cdot e \cdot V}{h}$$

Ce phénomène n'a lieu que quand les deux métaux (Pb; Nb) sont supraconducteurs.



Pour utiliser cet effet Josephson, la jonction est irradiée avec un rayonnement extérieur de fréquence f . La caractéristique courant-tension de la jonction présente alors une succession de marches de courant à tension constante. La tension V_N de la $N^{\text{ième}}$ marche est telle que la fréquence Josephson associée $F_N = \frac{2 \cdot e}{h} \cdot V_N$ soit égale à N fois la fréquence d'irradiation f .

$$\frac{2e}{h} \cdot V_N = N \cdot f \implies$$

$$V_N = N \cdot \frac{h}{2e} \cdot f$$

On a confirmé, par l'expérience que le rapport tension sur la fréquence est bien égal à une constante fondamentale. Dans l'application à la conservation du volt, la fréquence d'irradiation f est stabilisée et mesurée avec grande précision (quelques 10^{-9}), ce qui permet d'obtenir une tension de référence V_N reproductible avec la même précision. Le contrôle à intervalles de temps réguliers de la stabilité de la f.e.m. d'une pile étalon est donc possible en la comparant dans un dispositif potentiométrique à la tension V_N .

IV.3) Galvanomètre: L'élément moteur du galvanomètre est magnéto électrique (voir chapitre I). Le cadre est enroulé sur une carcasse. Un miroir solidaire du cadre mesure sa rotation par déplacement angulaire d'un faisceau lumineux.

IV.3.1) Mouvements et équilibre de l'équipage mobile:

Equation du mouvement: Le mouvement du cadre est régi par l'équation différentielle suivante.

$$K \frac{d^2\theta}{dt^2} + A \cdot \frac{d\theta}{dt} + C \cdot \theta = \Phi_0 \cdot \frac{E}{R}$$

K : moment d'inertie du cadre.

C : constante de torsion

θ : déviation du spot

R : résistance du circuit

Φ_0 : cste du flux du galvanomètre

$A = \left(a + \frac{\Phi_0^2}{R} \right)$ = amortissement mécanique + amort^{is} électromagnétique

Nous supposons pour étudier les différents cas que K et C restent constants et que A varie par variation de la résistance R du circuit. D'autre part on admettra qu'au temps $t=0$ le cadre est écarté de sa position d'équilibre et qu'il est abandonné sans vitesse initiale depuis cette position.

$$\theta(t=0) = \theta_0 \quad ; \quad \frac{d\theta}{dt} \Big|_{t=0} = 0$$

1° Cas) Régime oscillatoire non amorti :

La résistance R est infini (cadre en circuit ouvert) et nous admettrons que la constante d'amortissement mécanique est nulle. Le mouvement du cadre est sinusoïdal non amorti.

$$\theta = \theta_0 \cdot \cos \omega_0 t$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{K}}$$

d'où

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{K}{C}}$$

2° Cas) Régime oscillatoire amorti :

La résistance du circuit est supérieure à une valeur R_c résistance critique qui annule le discriminant de l'équation caractéristique. Compte tenu des conditions initiales l'expression du mouvement est :

$$\theta = \theta_0 \cdot \frac{\omega_0}{\omega} \cdot e^{-\lambda t} \cdot \cos(\omega t - \varphi)$$

$$\lambda = \frac{A}{2K} \quad ; \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \lambda^2}$$

3° Cas) Régime aperiodique critique :

La résistance des circuit est telle que le discriminant est nul. L'équation du mouvement est donnée par :

$$\theta = \theta_0 \cdot e^{-\omega_0 t} \cdot (1 + \omega_0 t)$$

Le mouvement cesse d'être accéléré au temps $t = \frac{1}{\omega_0}$ et le cadre revient à sa position d'équilibre sans la dépasser.

$$\left\{ \frac{d^2\theta}{dt^2} \Big|_{t=\frac{1}{\omega_0}} = 0 \right\}$$

4° Cas) Régime aperiodique hypercritique :

Le discriminant de l'équation caractéristique est positif. Les racines sont réelles et négatives et les mêmes conditions initiales donnent :

$$\theta = \frac{\theta_0}{2m} \cdot e^{-\lambda t} \cdot \left\{ (m-\lambda) \cdot e^{-mt} + (m+\lambda) e^{mt} \right\}$$

Pour ce régime le cadre revient lentement à sa position d'équilibre sans la dépasser.

IV.3.2) Emploi du galvanomètre comme détecteur de zéro :

On utilise presque exclusivement le galvanomètre à suspension. On recherche des appareils sensibles en volts, ayant des périodes comprises entre 1 et 3 s et de zéro stable. Deux conditions interviennent dans le choix d'un galvanomètre.

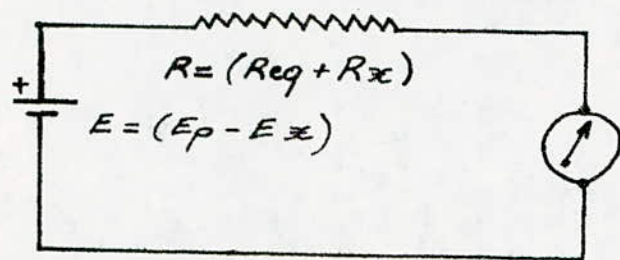
- Sa sensibilité en tension doit être suffisante pour déceler tout écart supérieur à la limite autorisée entre la tension à mesurer et la tension du potentiomètre.

- On doit avoir un temps de réponse aussi court que possible.

Notons que le temps de réponse d'un galvanomètre est optimal lorsque la résistance vue depuis le galvanomètre est voisine de la résistance critique de celui-ci.

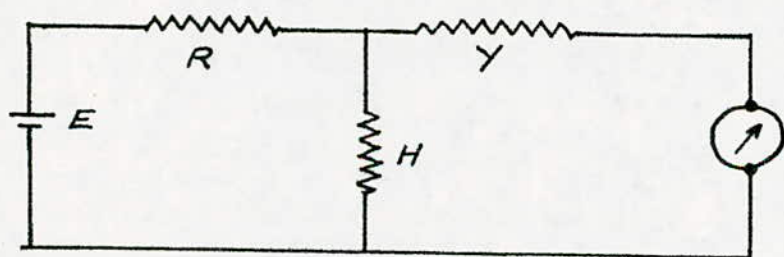
IV.3.3) Schéma équivalent de l'ensemble du circuit vue depuis le galvanomètre.

La tension d'écart E est en série avec une résistance R qui est égale à la résistance équivalente R_{eq} du circuit potentiométrique à laquelle vient s'ajouter la résistance interne R_x de la tension inconnue.



IV.3.4) Adaptation du galvanomètre:

La solution générale consiste à insérer une résistance H en parallèle sur le galvanomètre pour adapter les sensibilités et une résistance série Y pour réaliser l'amortissement critique.



IV.3.5) Choix du galvanomètre.

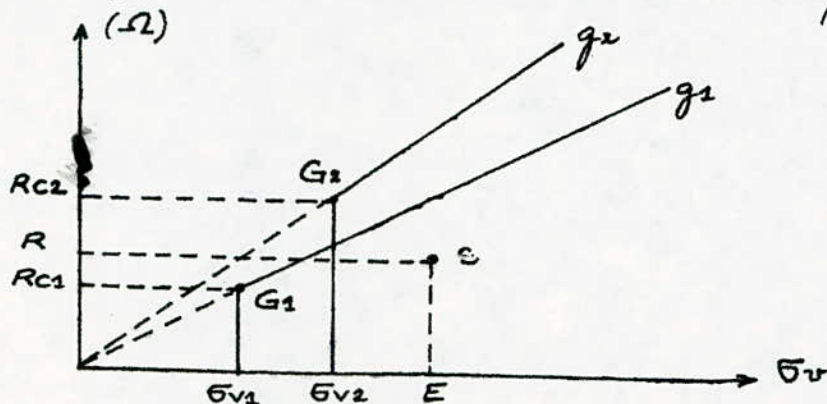
Le problème est le suivant:

On connaît la tension E correspondant à l'écart minimal tolérable et sa résistance R . On dispose d'un certain nombre n de galvanomètres de période satisfaisante, mais différents par la sensibilité en ampères I_A , la résistance du cadre g et la résistance critique extérieure R_c . Quel galvanomètre choisir ?

Solution Graphique:

Portons sur deux axes de coordonnées pour chaque galvanomètre.

- en abscisse, la sensibilité en $\mu\text{V}/\text{mm}$ $\mathcal{E}_v_1, \mathcal{E}_v_2, \dots, \mathcal{E}_v_n$ avec $\mathcal{E}_v = \mathcal{E}_A (g + R_c)$
- en ordonnée, la résistance extérieure critique R_{c1}, \dots, R_{cn}

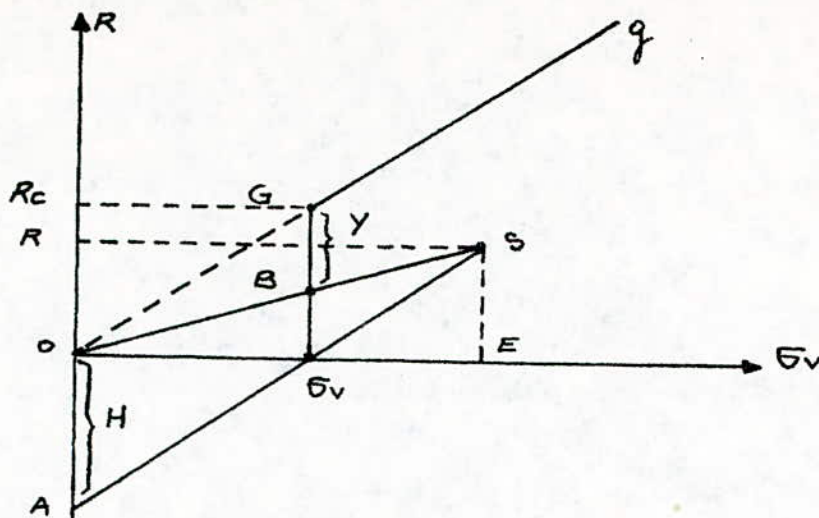


Chaque couple de coordonnées définit un point G_1, G_2, \dots, G_n correspondant aux galvanomètres disponibles. Reportons sur le même graphique la source caractérisée par E et R ; soit S le point figuratif. Pour chaque galvanomètre G_i , la région du plan délimitée par la demi-droite $G_i g_i$, le segment $\mathcal{E}_v_i G_i$ et la partie droite de l'axe des abscisses bornée par \mathcal{E}_v , englobe les valeurs des tensions E et des résistances R des sources susceptibles d'être détectées par ce galvanomètre G_i . Si plusieurs galvanomètres conviennent, on choisit celui dont le point figuratif G_i est le plus proche de S .

IV. 3.6) Détermination des résistances H et γ :

• Détermination de H : On mène $S\mathcal{E}_v$ jusqu'à l'intersection en A avec l'axe des ordonnées. Le segment OA , lu sur l'échelle des résistances donne H on a: $OA = H$

• Détermination de γ : Menons SO , cette droite coupe le segment vertical $G\mathcal{E}_v$ en B , GB lu sur l'échelle des ordonnées donne γ , on a $GB = \gamma$



Remarque: On utilise, en général, le galvanomètre pour des mesures n'exigeant pas la détection de d.d.p inférieurs au microvolt (μV). Pour des détections plus faibles (de l'ordre du nanovolt) on utilise une amplification du courant galvanométrique à l'aide d'un système photoélectrique. L'ampli spot de Sefram est une des meilleurs réalisations

Cette partie traite de nos manipulations pratiques. En effet, nous avons à étalonner divers appareils de mesure de classe 0,5. La liste est la suivante :

- 1 ampèremètre AOIP 2H411
- 1 ampèremètre 2212
- 1 voltmètre AOIP 2H410
- 1 voltmètre 8034 H3
- 1 wattmètre 44968 17/25

Pour chacun de ces appareils et pour chaque calibre nous avons à établir les courbes de correction moyennes.

V.1) Local de mesure :

Ses caractéristiques métrologiques d'un appareil de mesure sont fonction de l'environnement dans lequel il est placé. D'après la norme NFC 42 100, il faut que chaque grandeur ayant une influence sur le fonctionnement de l'appareil soit fixée, pour que les opérations d'étalonnage soient effectivement reproductibles. Ses conditions de référence relatives aux grandeurs d'influences fixées par la norme précédente sont données par le tableau suivant :

| grandeur d'influence | Température | orientation / au champ magnétique terrestre | Induction magnétique d'origine extérieure | champ électrique extérieur |
|---|-------------|---|---|----------------------------|
| condition de référence en l'absence d'indication | 20°C | quelconque | Nulle | Nul |
| Tolérances admises pour des essais ds le cas où une valeur de référence est fixée | ± 1°C | ± 5° | valeur de l'indication magnétique Terrestre | 1KV/m |

Pour notre travail, nous avons manipulé dans le laboratoire de mesures électriques à atmosphère ambiante (température environ 23°C).

V.2) Mesure de tension en courant continu :

Équipements de mesure (références)

- 2 enceintes thermorégularisées de 4 piles Weston.
- 1 diviseur de tension du type Kelvin Varley.
- 1 diviseur de tension à prises fixes.

Équipements complémentaires.

- Détecteurs de zéro.
- Références électroniques de tension continue.

Modalités de raccordement à la chaîne d'étalonnage :

Étalonnage annuel d'une enceinte thermorégularisée avec une précision de 3×10^{-6} (la 2^e enceinte étant vérifiée périodiquement par rapport à celle-ci)

V.3) Consignes pour la réalisation d'un bon étalonnage :

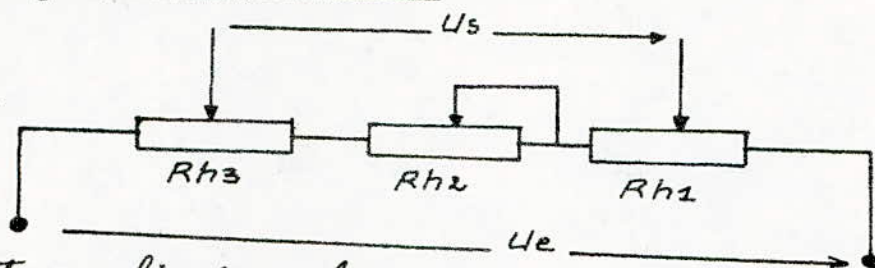
- Le réglage du zéro (fixé par les normes). La finesse du réglage doit être appropriée à l'indice de classe de l'appareil. L'erreur de positionnement du zéro ne doit pas dépasser le $\frac{1}{5}$ de l'indice de classe.
- Au cours d'un étalonnage, il est bon de vérifier le zéro et le courant de tarage après chaque mesure.
- Avec un appareil susceptible d'être influencé par un champ magnétique extérieur, il convient de prendre la moyenne des mesures faites avant et après inversion de la tension ou du courant.

V.4) Éléments de réglage :

Les appareils de mesures électriques, pour les étalonner,

nécessitent des éléments de réglage. Le réglage doit être fin lors de l'étalonnage, on satisfait cette condition en combinant 3 rhéostats comme suit :

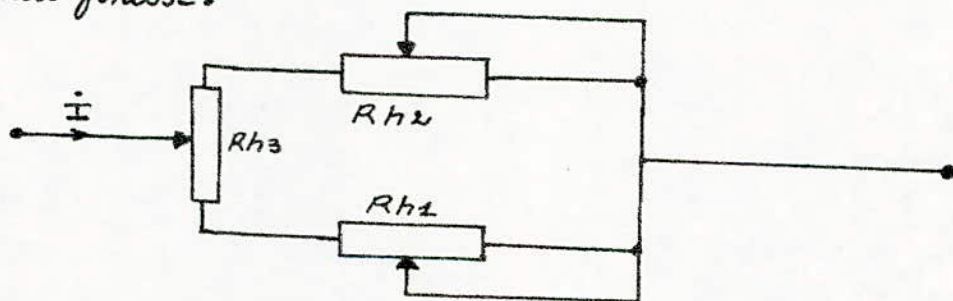
réglage fin en tension :



Avec cette combinaison la tension prélevée U_s peut prendre des valeurs comprises entre 0 et U_e d'une façon quasi continue.

réglage fin en courant :

Les 3 rhéostats sont, dans ce cas, montés en parallèle et la valeur du courant i s'obtient aussi avec une assez grande finesse.



Remarque :

Pour ces deux combinaisons on a : $R_{h3} > R_{h2} > R_{h1}$.

avec $R_{h3} \# 10 R_{h2}$ et $R_{h2} \# 10 R_{h1}$

R_{h3} : pour des réglages grossiers.

R_{h2} : pour des réglages moyens.

R_{h1} : pour des réglages fins.

V.5) Alimentations :

Pour nos manipulations, nous utilisons les accumulateurs au plomb d'assez forte capacité (40 AH). Ceux-ci atteignent leur plus grande stabilité entre le $\frac{1}{4}$ et

les $\frac{3}{4}$ de leur capacité à la décharge. Pendant ces manipulations nous laissons les batteries débiter sans interruption dans les circuits et dans le potentiomètre. Sa dérive de courant est faible et régulière. Ce débit permanent a d'autre part l'avantage de maintenir le potentiomètre à sa température de fonctionnement.

V.6) Courbes de correction :

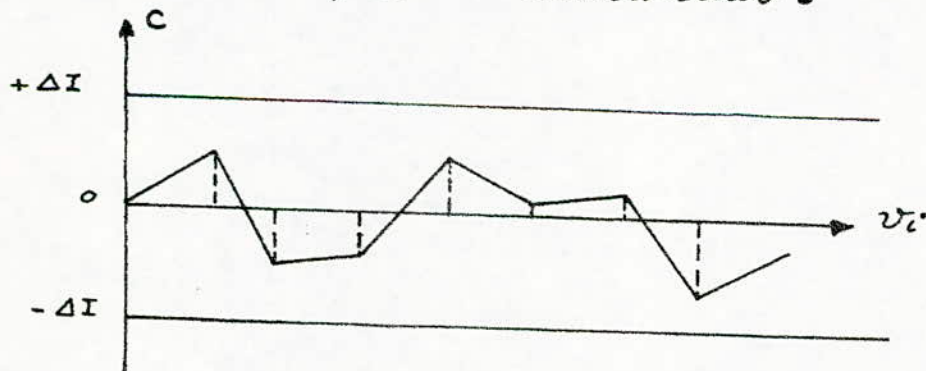
Soit V_i la mesure indiquée par l'appareil à étalonner.

V_m la valeur mesurée à l'aide du potentiomètre.

La correction est, par définition, la valeur qu'il faut ajouter à la valeur indiquée par l'appareil à étalonner pour obtenir celle mesurée à l'aide du potentiomètre. On la désigne par "C".

$$V_i + C = V_m \implies \boxed{C = V_m - V_i}$$

D'où la courbe de correction ; cette courbe nous permet de vérifier si l'appareil appartient toujours à sa classe de précision donnée par le constructeur.



V.7) Comparaison des erreurs :

Erreur de construction de l'appareil.

Elle est ce qu'elle est, on n'y peut rien. Elle est donnée par :

$$\boxed{(\Delta I)_{\text{const}} \leq \frac{\text{Classe}}{100} \cdot \text{Calibre}}$$

Erreur de lecture.

Elle s'exprime de la façon suivante :

$$(\Delta I)_{\text{lect}} = \frac{\text{calibre}}{\text{nb de divisions}} \cdot \frac{1}{n}$$

$$n \geq 10$$

Sous de la mesure, il est obligatoire de la rendre la plus faible possible. On utilisera un réglage très fin. Elle ne doit, en aucun cas, être de l'ordre de l'erreur de construction. On déduit que, pratiquement, on doit la négliger.

Erreur due aux éléments de montage.

On exige à ce qu'ils soient très stables, au moins pendant la durée de la mesure. Cette erreur doit être négligeable devant l'erreur de construction de l'appareil.

V 8) Etalonnage de l'ampèremètre :

Cette manipulation nécessite l'usage des étalons de résistances, il y'a donc lieu de les étudier.

Étalons de résistances :

Une résistance étalon doit posséder les qualités assurant sa stabilité dans le temps et permettant son utilisation de façon précise. Pour cela, le choix de l'alliage résistant utilisé est essentiel. Cet alliage doit présenter :

- Une constitution chimique stable et un état physique amélioré, après fabrication de la résistance, par un recuit.
- Un faible coefficient de température (quelque $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ à la température) d'utilisation).
- Un pouvoir thermoélectrique faible par rapport au cuivre (quelques $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$).
- Une résistivité suffisamment élevée (40 à $150 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) pour limiter l'encombrement des étalons.

Ses alliages les plus utilisés sont donnés dans le tableau suivant :

| alliages | Composition | résistivité | utilisation |
|-----------|--------------------------------------|---|--|
| Manganine | 84% Cu ; 12% manganèse 4% de Ni | $\approx 40 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ | faibles resist. $\leq 100 \Omega$ |
| Evamohm | 75% Ni ; 20% Cr 2,5% Al ; 2,5% Cu | $\approx 130 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ | resistances élevées $> 100 \Omega$ |
| Karma | 75% Ni ; 20% Cr 2,5% Al ; 2,5% Fe | $\approx 130 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ | idem. |

Les étalons de résistances de faible valeur ($\leq 100 \Omega$) doivent comporter 4 bornes (2 bornes d'amenée de courant et 2 bornes de prise de potentiel) pour être parfaitement définis dans leur circuit d'utilisation (sinon la résistance de serrage des bornes courant introduit une incertitude non négligeable). On conserve les étalons de résistances à une température t_0 comprise entre 20° et 25°C mesurée à $0,01\% \text{ } ^\circ\text{C}$ près. En première approximation la loi de variation de la résistance avec la température est parabolique.

$$R_t = R_{t_0} \left\{ 1 + \alpha_{t_0} (t - t_0) + \beta_{t_0} (t - t_0)^2 \right\}$$

R_t : résistance à la température t

R_{t_0} : ————— // ————— t_0

α_{t_0} ; β_{t_0} : Coefficients de température du 1^{er} et du 2^{ème} degré relatifs à la température de référence t_0 .

α_{t_0} s'annule en général pour $t_0 \in [20; 25^\circ \text{C}]$

exemple:

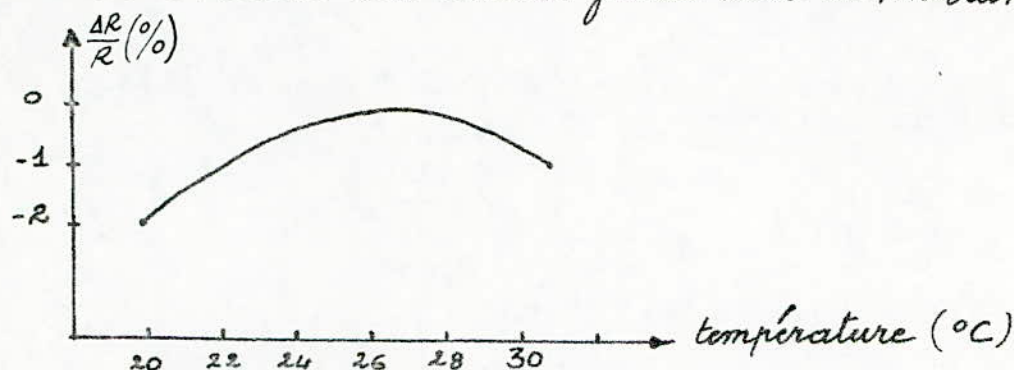
$$t_0 = 20^\circ \text{C} \quad \alpha_{t_0} \approx 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad ; \quad \beta_{t_0} = 10^{-7} / ^\circ\text{C}$$

Utilisation des étalons de résistance :

valeurs caractéristiques

- valeur nominale de la résistance $R_e [\Omega_{abs}]$ à $20^\circ C$.
- le courant limite admissible $I_{max} [A]$ à $20^\circ C$.
- la précision qui est déterminée par l'erreur de construction.

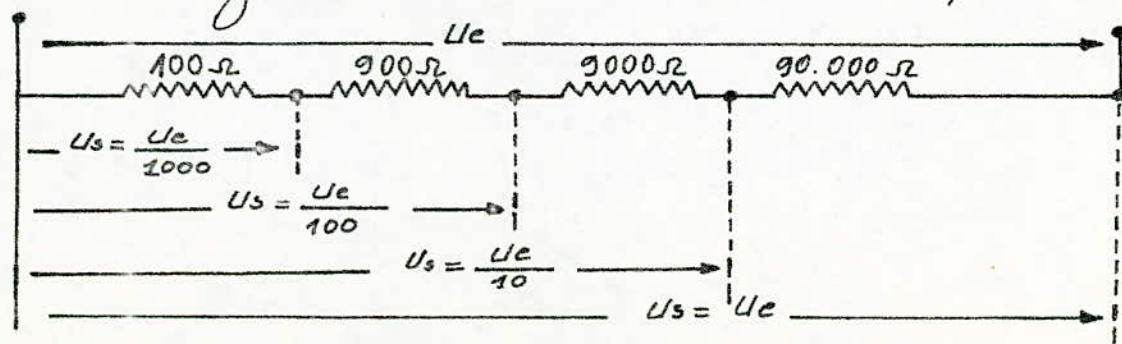
Quand on utilise un étalon de résistance, on veillera à éviter toute surcharge même très brève car elle peut l'endommager ou bien fausser définitivement sa précision. La précision d'un étalon doit être contrôlée périodiquement. Ses résultats de la vérification sont inscrits dans un carnet spécial, ce qui permet d'effectuer la correction des lectures faites sur les instruments.



V.9) Etalonnage du voltmètre :

Diviseur de tension pour l'étalonnage des grands calibres :

Pour agrandir la gamme de mesure du potentiomètre, on utilise un diviseur de tension. Il est constitué d'un ensemble de résistances montées en série et étalonnées à 0,03% près, de manière que l'erreur de rapport n'excède pas 0,06%. On obtient les rapports suivants : $\frac{1}{10}$; $\frac{1}{100}$; $\frac{1}{1000}$; donc une nouvelle gamme de mesure allant de $1\mu V$ à $2000V$



Par manque de résistances étalonnées, nous avons utilisé un diviseur de tension formé de boîtes AOIP.

V.10) Étalonnage du wattmètre :

Le montage étant la combinaison des précédents, nous n'avons pas de remarques particulières à faire. Cependant, nous avons manipulé à tension constante et courant variable.

V.11) Galvanomètres susceptibles d'être utilisés :

D'après la notice d'utilisation du potentiomètre AOIP P12, les galvanomètres susceptibles d'être utilisés sont les suivants :

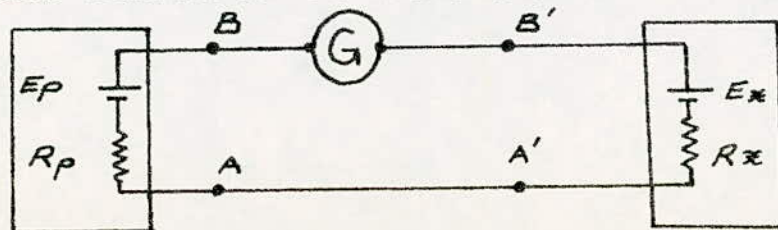
G221 ; G223 ; GM13 ; GM26

Leurs caractéristiques sont données par le tableau qui suit :

| Désignation | résistance interne (Ω) | résist. ext. critique (Ω) | sensibilité en tension E_v ($\mu V/mm$) |
|-------------|---------------------------------|------------------------------------|---|
| G221 | 20 | 200 | 6 |
| G223 | 100 | 1800 | 19 |
| GM13 | 35 | 100 | 0,4 |
| GM26 | 70 | 1000 | 3,5 |

Ses écarts minimums tolérables sont calculés dans le chapitre III. Ils sont de $100\mu V$, $10\mu V$, $1\mu V$ respectivement pour les calibres $2V$; $0,2V$ et $0,02V$.

Calcul de la résistance totale vue des bornes du galvanomètre $R_{BB'}$: Le calcul de R_p et R_x (voir schéma qui suit) s'obtient aisément en utilisant le théorème de Thévenin.



Calcul de R_{pmax} pour la gamme $0 \div 2011mV$:

Hypothèse: $E = 3V$; $i = 1mA$; $R_{pot} = 2011\Omega$.

La valeur de la résistance de tarage R_{ht} est donc égale à:

$$R_{ht} = \frac{E - R_{pot} \cdot i}{i} = 989\Omega.$$

R_p est la résistance équivalente de R_2 en parallèle avec $R_{ht} + (R_p - R_2)$ d'où:

$$R_p = \frac{R_2 (R_{ht} + (R_p - R_2))}{R_2 + R_{ht} + (R_p - R_2)} = \frac{R_2 (R_{ht} + (R_p - R_2))}{R_{ht} + R_p}$$

$$R_p = \frac{R_2 (3000 - R_2)}{3000} \Rightarrow \boxed{R_{pmax} = 750\Omega.}$$

Détermination de R_x : Considérons les 2 cas suivant.

1) Étalonnage de l'ampèremètre: On prélève la tension, inconnue aux bornes d'étalons de résistances (1Ω ; $0,01\Omega$). La résistance R_x étant égale à $R_e // R_h$ sera toujours inférieur à 1Ω , elle est donc négligeable devant R_{pmax} .

$$\boxed{R_{A'B'} \ll R_{pmax}}$$

Pratiquement la résistance $R_{BB'_{max}}$ est égale à:

$$\boxed{R_{BB'_{max}} = 750\Omega.}$$

2) Étalonnage du voltmètre:

R_x est de l'ordre de 100Ω pour les tensions inférieures à $2V$.

Quand on utilise le diviseur de tension, le rapport de réduction qu'on prend est: $K = \frac{1}{100}$, d'où R_x est égale à:

$$R_x = \frac{1000 \times 99000}{1000 + 99000} = 990\Omega$$

Pratiquement: $\boxed{R_x = 1000\Omega.}$

La résistance $R_{BB'_{max}}$ sera dans ce cas:

$$R_{BB'_{max}} = R_{pmax} + R_x = 750 + 1000 = 1750\Omega.$$

$$\boxed{R_{BB'_{max}} = 1750\Omega}$$

Calcul de $R_{BB'max}$ pour la gamme $0 \div 201,1 mV$:

Cette gamme n'est utilisée que pour l'étalonnage de l'ampèremètre. R_x est faible et $R_{pmax} = 560 \Omega$; calculée par la méthode (théorème de Thévenin). $R_{BB'max} = 560 \Omega$

Calcul de $R_{BB'max}$ pour la gamme $0 \div 20,11 mV$:

utilisée dans le cas de l'étalonnage de l'ampèremètre, on a donc R_x faible; $R_{pmax} = 200 \Omega$ (Thévenin). d'où $R_{BB'max} = 200 \Omega$

Solution Graphique: → voir page 60 →

Nous remarquons que:

G223 convient mieux pour le calibre 2V.

GM26 convient mieux pour le calibre 0,2V.

GM13 " " " " " 0,02V.

Nous déduisons aussi les différentes résistances H_i et Y_i adaptant ces galvanomètres:

* cas de l'étalonnage de l'ampèremètre:

| galvanomètre | H | Y |
|--------------|--------------|---------------|
| G223 | 180 Ω | 1660 Ω |
| GM26 | 320 Ω | 800 Ω |
| GM13 | 160 Ω | 100 Ω |

* cas de l'étalonnage du voltmètre:

C'est le galvanomètre G223 qui convient $H=420 \Omega$ et $Y=1460 \Omega$

* cas de l'étalonnage du wattmètre:

C'est la combinaison des 2 cas. Pour le circuit tension nous utilisons le G223 et pour le circuit courant il faudra G223; GM26; GM13 respectivement pour les calibres 2V; 0,2V et 0,02V

V.12) Incertitude d'étalonnage :

V.12.1) Gamme 0 ÷ 2011 mV : On sait que

$$\frac{\Delta E_x}{E_x} = \frac{\Delta E}{E} + 2 \left(\frac{R_i - R_0}{R_i} \right) \cdot \frac{\Delta R}{R} + \frac{1/n}{s_2} + \frac{1/n}{s_2}$$

Évaluation des différents termes :

$\frac{\Delta E}{E} = 0,01\%$; $\frac{\Delta R}{R} = 0,03\%$. Ces deux termes sont donnés par le constructeur .

Soit R_1 la valeur de la résistance de mesure correspondant à la pile Weston (tarage) . $R_1 = 1019 \Omega$ dans notre cas .

Soit R_x la valeur de la résistance de mesure correspondant à la tension inconnue E_x . On définit alors, R_i comme étant la plus grande entre elles et R_0 leur partie commune .

$\frac{1/n}{s_1}$: erreur de réglage du zéro lors du tarage . Elle est négligeable à cause de la variation quasi-continue du résistat de tarage .

$\frac{1/n}{s_2}$: erreur de réglage du zéro lors de la mesure .

$$\frac{1/n}{s_2} = 0,25 ;$$

s_2 sensibilité du potentiomètre déterminée par interpolation .

$$s_2 = R \cdot \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{(R_d - R_g)} \quad \text{avec } R = R_g + \frac{\alpha_2 (R_d - R_g)}{(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (\text{voir chapitre II})$$

Pour cette gamme, le galvanomètre G223 convient le mieux .
Nous avons estimé les déviations suivantes :

$\alpha_1 = 5$ divisions (déviations du spot à gauche)

$\alpha_2 = 5$ divisions (déviations du spot à droite)

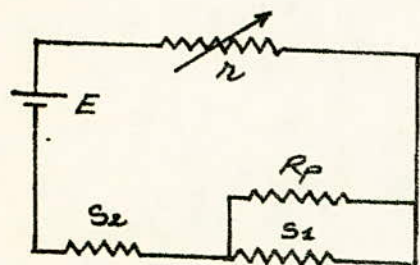
La différence $(R_d - R_g)$ est fixée par le potentiomètre utilisé ; dans notre cas, elle est égale à $0,1 \Omega$.

$$\text{d'où } \frac{1/n}{S_2} = \frac{0,25}{10 \cdot R \cdot 10} = \frac{0,25}{R} \%$$

$$\frac{1/n}{S_2} = \frac{0,25}{R} \%$$

V.12.2) Gamme 0 ÷ 201,1 mV.

Ses erreurs de construction sont légèrement plus fortes que pour la gamme 0 ÷ 2011 mV en raison de la présence du shunt et de la résistance en série. Par construction elles sont réglées à 0,03% près. Cherchons l'erreur supplémentaire due aux résistances additionnelles. Nous avons le schéma suivant :



nous avons les égalités suivantes :

$$E = R_2 \cdot i \quad (\text{tarage})$$

$$E_x = R_2 \cdot \frac{i}{N} \quad (\text{mesure})$$

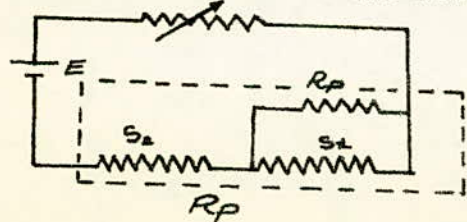
Influence des résistances additionnelles sur la variation relative du courant donc sur la mesure :

Dans le cas de la gamme 0 ÷ 2011 mV on a

$$E = (R_p + r) i \quad \text{et } i = \frac{E}{(R_p + r)}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta i}{i} = \frac{\Delta E}{E} + \frac{\Delta R_p}{R_p} \cdot \frac{R_p}{(R_p + r)} + \frac{\Delta r}{r} \cdot \frac{r}{(R_p + r)}$$

Dans le cas de la gamme 0 ÷ 201,1 mV, la résistance R_p est obtenue par un ensemble de 3 résistances (S_1 , S_2 , R_p) montées comme le montre la figure suivante :



$$R_p = \frac{R_p \cdot S_1}{R_p + S_1} + S_2$$

avec $S_1 = \frac{R_p}{N-1}$ et $S_2 = R_p \left(1 - \frac{1}{N}\right)$

$$\frac{\Delta R_p}{R_p} = \frac{\Delta \left(\frac{R_p \cdot S_1}{R_p + S_1} \right) + \Delta S_2}{\left(\frac{R_p \cdot S_1}{R_p + S_1} + S_2 \right)} = \frac{\Delta \left(\frac{R_p \cdot S_1}{R_p + S_1} \right)}{\left(\frac{R_p \cdot S_1}{R_p + S_1} \right) \left(1 + \frac{S_2 \cdot (R_p + S_1)}{R_p \cdot S_1} \right)} + \frac{\Delta S_2}{S_2} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{R_p \cdot S_1}{S_2 \cdot (R_p + S_1)} \right)}$$

$$\frac{\Delta R_p}{R_p} = \frac{\Delta \left(\frac{R_p \cdot S_1}{R_p + S_1} \right)}{\left(\frac{R_p \cdot S_1}{R_p + S_1} \right) \left(1 + \frac{S_2 \cdot (R_p + S_1)}{R_p \cdot S_1} \right)} + \frac{\Delta S_2}{S_2} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{R_p \cdot S_1}{S_2 \cdot (R_p + S_1)} \right)}$$

Posons $X = \frac{R_p \cdot S_1}{(R_p + S_1)} \Rightarrow \frac{\Delta X}{X} = \frac{\Delta R_p}{R_p} + \frac{\Delta S_1}{S_1} + \frac{\Delta(R_p + S_1)}{(R_p + S_1)}$

$$\frac{\Delta X}{X} = \frac{\Delta R_p}{R_p} + \frac{\Delta S_1}{S_1} + \frac{\Delta R_p}{R_p} \cdot \frac{R_p}{(R_p + S_1)} + \frac{\Delta S_1}{S_1} \cdot \frac{S_1}{(R_p + S_1)}$$

$$\frac{R_p}{R_p + S_1} = \frac{R_p}{R_p + \frac{R_p}{N-1}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{N-1}} = \frac{N-1}{N}$$

$$\frac{S_1}{(R_p + S_1)} = \frac{\frac{R_p}{N-1}}{R_p + \frac{R_p}{N-1}} = \frac{1}{N}$$

Revenons à $\frac{\Delta X}{X}$:

$$\frac{\Delta X}{X} = \left(2 + \frac{N-1}{N} + \frac{1}{N} \right) \cdot \frac{\Delta R_p}{R_p} ;$$

$$\frac{\Delta X}{X} = 3 \cdot \frac{\Delta R_p}{R_p}$$

voyons à quoi est égale le terme $\frac{1}{\left(1 + \frac{S_2 \cdot (R_p + S_1)}{R_p \cdot S_1} \right)}$:

$$\frac{1}{\left(1 + \frac{S_2 \cdot (R_p + S_1)}{R_p \cdot S_1} \right)} = \frac{1}{1 + \frac{R_p \cdot \left(\frac{N-1}{N} \right) \cdot \left(R_p + \frac{R_p}{N-1} \right)}{R_p \cdot \frac{R_p}{N-1}}} = \frac{1}{N}$$

voyons aussi à quoi est égale le terme: $\frac{1}{1 + \frac{R_p \cdot S_2}{S_2 \cdot (R_p + S_2)}}$

$$\frac{1}{1 + \frac{R_p \cdot S_2}{S_2 \cdot (R_p + S_2)}} = \frac{1}{1 + \frac{R_p \cdot \left(\frac{R_p}{N-1}\right)}{R_p \cdot \left(\frac{N-1}{N}\right) \left(R_p + \frac{R_p}{N-1}\right)}} = \frac{N-1}{N}$$

$\frac{\Delta R_p}{R_p}$ est égale à :

$$\frac{\Delta R_p}{R_p} = \frac{3}{N} \cdot \frac{\Delta R_p}{R_p} + \frac{\Delta R_p}{R_p} \cdot \left(\frac{N-1}{N}\right) = \frac{\Delta R_p}{R_p} \left(\frac{3}{N} + \frac{N-1}{N}\right)$$

$$\boxed{\frac{\Delta R_p}{R_p} = \left(\frac{N+2}{N}\right) \cdot \frac{\Delta R_p}{R_p}}$$

Revenons à l'expression de $\frac{\Delta i}{i}$:

$$\frac{\Delta i}{i} = \frac{(N+2)}{N} \cdot \frac{\Delta R_p}{R_p} \cdot \frac{R_p}{(R_p + R)} + \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{R}{(R_p + R)} + \frac{\Delta E}{E}$$

$$\frac{\Delta i}{i} = \left(1 + \frac{2}{N}\right) \cdot \frac{\Delta R_p}{R_p} \cdot \frac{R_p}{(R_p + R)} + \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{R}{(R_p + R)} + \frac{\Delta E}{E}$$

$$\frac{\Delta i}{i} = \frac{2}{N} \cdot \frac{\Delta R_p}{R_p} \cdot \frac{R_p}{(R_p + R)} + \frac{\Delta R_p}{R_p} \cdot \frac{R_p}{(R_p + R)} + \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{R}{(R_p + R)} + \frac{\Delta E}{E}$$

L'erreur supplémentaire est alors égale à :

$$E_{\text{sup}} = \frac{2}{N} \cdot \frac{\Delta R_p}{R_p} \cdot \frac{R_p}{(R_p + R)} ; \quad \boxed{E_{\text{sup}} = \frac{2}{N} \cdot \frac{R_p}{(R_p + R)} \cdot \frac{\Delta R}{R}}$$

Finalement nous obtenons :

$$\boxed{\frac{\Delta E_x}{E_x} = \frac{\Delta E}{E} + \left[2 \left(\frac{R_i - R_0}{R_i}\right) + \frac{2}{N} \cdot \frac{R_p}{(R_p + R)} \right] \cdot \frac{\Delta R}{R} + \frac{1/n}{S_2}} \quad (N=10)$$

Évaluation de $\frac{1/n}{b_2}$:

Le galvanomètre qui convient le mieux est le GM26. Avec H et Y convenables nous avons estimé les déviations suivantes :

$$\begin{cases} \alpha_1 = 30 \text{ divisions} \\ \alpha_2 = 30 \text{ divisions} \end{cases}$$

$$\frac{1/n}{b_2} = \frac{0,25}{10 \cdot R \cdot 60} = \frac{0,25}{6R} \%$$

$$\frac{1/n}{b_2} = \frac{0,25}{6R} \%$$

Le rapport $\frac{R_p}{R_p + R}$, nous l'évaluons comme suit :

$$\frac{R_p}{(R_p + R)} = \frac{R_p \cdot i}{(R_p + R) i} = \frac{2,011}{E} = \frac{2,011}{3} = \underline{0,67}$$

V.12.3) Gamme 0 ÷ 20,11 mV

L'erreur de construction est la même que précédemment à part que N est égal cette fois à 100 $\underline{\underline{N=100}}$.

Évaluation de $\frac{1/n}{b_2}$:

Le galvanomètre qui convient pour ce calibre est le GM13. Nous avons estimé les déviations suivantes :

$$\alpha_1 = 20 \text{ divisions.}$$

$$\alpha_2 = 20 \text{ divisions.}$$

$$\frac{1/n}{b_2} = \frac{0,25}{10 \cdot R \cdot 40} = \frac{0,25}{4R} \% ;$$

$$\frac{1/n}{b_2} = \frac{0,25}{4R} \%$$

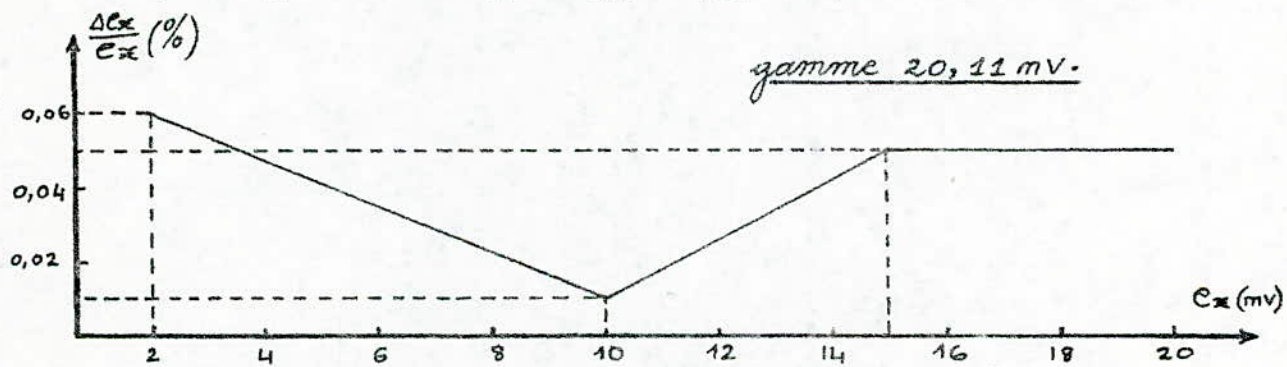
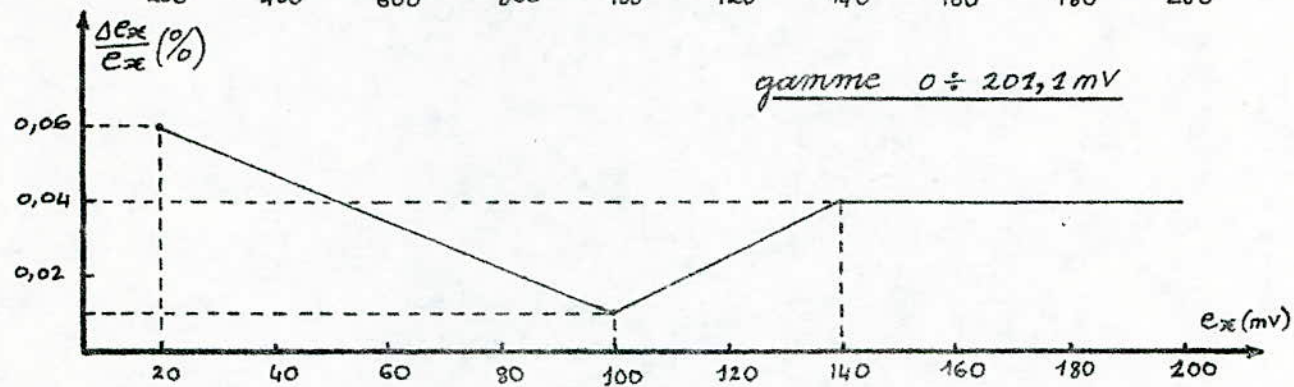
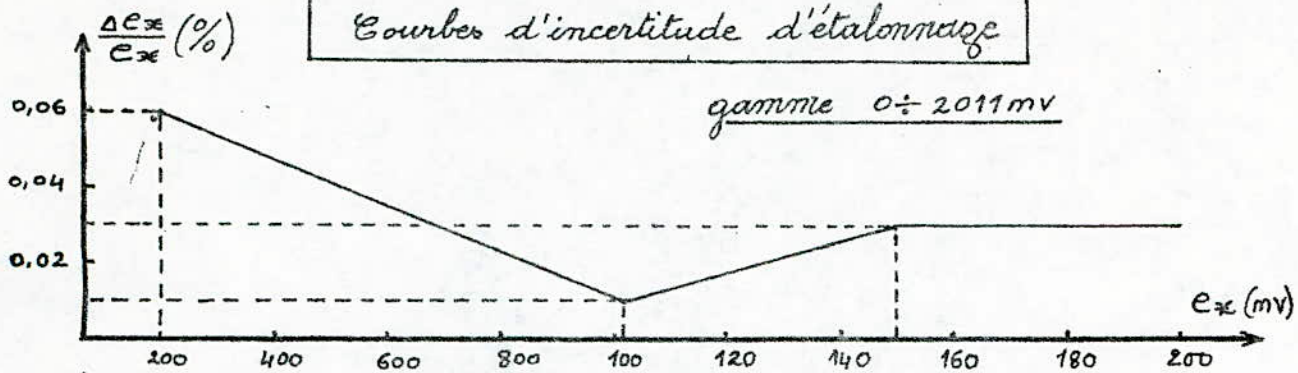
V.12.4) Incertitude pour des tensions supérieures à 2011 mV:

$$U_x = K \cdot E_{\Sigma} \Rightarrow \frac{\Delta U_x}{U_x} = \frac{\Delta K}{K} + \frac{\Delta E_{\Sigma}}{E_{\Sigma}}$$

$$\frac{\Delta E_{\Sigma}}{E_{\Sigma}} = \text{incertitude calculés pour la gamme } 0 \div 2011 \text{ mV.}$$

$$\frac{\Delta K}{K} = \text{incertitude sur le rapport donné par le diviseur de tension (0,03\%).}$$

Courbes d'incertitude d'étalonnage



L'erreur moyenne est de :

0,03% pour la gamme 0 ÷ 2011 mV.

0,04% pour la gamme 0 ÷ 201,1 mV.

0,05% pour la gamme 0 ÷ 20,11 mV.

Nous remarquons que l'erreur de mesure est plus faible quand on utilise la gamme 0 ÷ 2011 mV. On tentera alors, en pratique, à effectuer les mesures dans cette gamme. Pour les tensions supérieures à 2011 mV, on ajoute à cette dernière l'erreur due au diviseur de tension utilisé.

V.13) Tableaux des Valeurs

Amperemètre AOIP 2H411

Calibre 3A

| Valeur Lue (A) | 3A | 2,5 | 2 | 1,5 | 1 | 0,5 |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| Valeur mesurée (1) | 2,971 | 2,491 | 1,982 | 1,480 | 0,9860 | 0,4815 |
| Valeur mesurée (2) | 2,975 | 2,475 | 1,997 | 1,497 | 0,9960 | 0,5100 |
| Valeur mesurée (3) | 3,041 | 2,534 | 2,020 | 1,533 | 1,0215 | 0,5079 |
| Valeur mesurée (4) | 2,960 | 2,483 | 1,986 | 1,487 | 0,9780 | 0,4931 |
| Moyenne | 2,987 | 2,498 | 1,996 | 1,499 | 0,9954 | 0,4981 |
| Correction (A) | -0,013 | -0,002 | -0,004 | -0,001 | -0,0046 | -0,0019 |

Calibre 1A

| lecture (A) | 1 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| mesure (1) | 0,9957 | 0,9066 | 0,7992 | 0,7032 | 0,6031 | 0,5041 | 0,4010 | 0,3026 | 0,2006 | 0,0985 |
| mesure (2) | 1,0000 | 0,9000 | 0,7935 | 0,6966 | 0,5962 | 0,4963 | 0,4025 | 0,3061 | 0,2006 | 0,0984 |
| mesure (3) | 1,0001 | 0,9014 | 0,7963 | 0,7040 | 0,6021 | 0,4972 | 0,3950 | 0,2997 | 0,2034 | 0,0995 |
| mesure (4) | 0,9957 | 0,9058 | 0,7964 | 0,7024 | 0,5973 | 0,5028 | 0,3986 | 0,3034 | 0,1982 | 0,0975 |
| Moyenne | 0,9979 | 0,9036 | 0,7964 | 0,7016 | 0,5997 | 0,5001 | 0,3993 | 0,3030 | 0,2007 | 0,0985 |
| Correction (A) | -0,0022 | +0,0036 | -0,0036 | +0,0016 | -0,0003 | +0,0001 | -0,0007 | +0,0030 | +0,0007 | -0,0015 |

Calibre 0,3 A (300 mA)

| | | | | | | |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valeur Luc (mA) | 300 | 250 | 200 | 150 | 100 | 50 |
| mesure (1) | 298,6 | 251,3 | 201,2 | 151,4 | 101,4 | 50,3 |
| mesure (2) | 301,2 | 248,7 | 200,8 | 149,1 | 99,6 | 48,5 |
| mesure (3) | 299,1 | 250,9 | 200,3 | 151,7 | 101,0 | 51,0 |
| mesure (4) | 300,8 | 251,4 | 201,4 | 149,0 | 99,1 | 50,9 |
| Moyenne | 299,9 | 250,6 | 200,9 | 150,3 | 100,3 | 50,2 |
| Correction (mA) | - 0,1 | + 0,6 | + 0,9 | + 0,3 | + 0,3 | + 0,2 |

Calibre 0,1 A (100 mA)

| | | | | | | | | | | |
|--------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| lecture (mA) | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 |
| mesure (1) | 100,20 | 90,16 | 79,98 | 70,31 | 60,50 | 49,96 | 40,33 | 30,13 | 20,94 | 10,442 |
| mesure (2) | 99,47 | 89,50 | 79,50 | 69,93 | 59,58 | 50,36 | 39,51 | 29,98 | 20,01 | 10,089 |
| mesure (3) | 100,99 | 90,40 | 80,40 | 70,50 | 60,10 | 49,63 | 40,50 | 30,11 | 19,54 | 9,768 |
| mesure (4) | 98,91 | 89,80 | 80,30 | 70,38 | 59,50 | 50,47 | 39,84 | 29,58 | 19,73 | 10,364 |
| Moyenne | 99,89 | 89,96 | 80,05 | 70,28 | 59,92 | 50,11 | 40,05 | 29,95 | 20,06 | 10,158 |
| Correction (mA) | -0,11 | -0,04 | +0,05 | +0,28 | +0,08 | +0,11 | +0,05 | -0,05 | +0,06 | +0,158 |

Calibre 0,01 A (10 mA).

| Valeur lue (mA) | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| mesure (1) | 10,012 | 9,014 | 7,979 | 6,960 | 5,958 | 4,994 | 3,969 | 2,963 | 1,954 | 1,040 |
| mesure (2) | 10,010 | 8,959 | 7,968 | 6,975 | 6,042 | 4,965 | 4,045 | 2,980 | 1,954 | 1,022 |
| mesure (3) | 9,957 | 8,964 | 8,023 | 7,034 | 6,038 | 5,024 | 3,980 | 2,950 | 1,967 | 0,982 |
| mesure (4) | 9,956 | 9,048 | 7,956 | 7,018 | 6,014 | 5,036 | 3,991 | 3,045 | 1,973 | 0,998 |
| Moyenne | 9,984 | 8,996 | 7,982 | 6,997 | 6,013 | 5,005 | 3,996 | 2,985 | 1,962 | 1,011 |
| Correction (mA) | -0,016 | -0,004 | -0,018 | -0,003 | +0,013 | +0,005 | +0,004 | -0,015 | -0,038 | +0,011 |

Tableaux des Valeurs

Amperemètre n° 2212

Calibre 3 A

| Valeur lue (A) | 3 | 2,5 | 2 | 1,5 | 1 | 0,5 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| mesure (1) | 2,983 | 2,472 | 1,982 | 1,498 | 0,9990 | 0,4953 |
| mesure (2) | 2,959 | 2,486 | 1,979 | 1,489 | 0,9844 | 0,4915 |
| mesure (3) | 2,987 | 2,516 | 1,981 | 1,493 | 0,9810 | 0,5031 |
| mesure (4) | 2,981 | 2,478 | 1,988 | 1,491 | 1,0010 | 0,4974 |
| Moyenne | 2,985 | 2,488 | 1,985 | 1,493 | 0,9914 | 0,4968 |
| Correction | -0,015 | -0,012 | -0,015 | -0,007 | -0,0086 | -0,0032 |

Calibre 1A

| Valeur lue (A) | 1 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
|----------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| mesure (1) | 1,055 | 0,9525 | 0,8480 | 0,7449 | 0,6371 | 0,5292 | 0,4246 | 0,3178 | 0,2137 | 0,1035 |
| mesure (2) | 1,059 | 0,9580 | 0,8490 | 0,7441 | 0,6375 | 0,5305 | 0,4226 | 0,3179 | 0,2100 | 0,1041 |
| mesure (3) | 1,053 | 0,9551 | 0,8475 | 0,7421 | 0,6363 | 0,5316 | 0,4226 | 0,3193 | 0,2118 | 0,1029 |
| mesure (4) | 1,068 | 0,9573 | 0,8430 | 0,7442 | 0,6323 | 0,5387 | 0,4255 | 0,3200 | 0,2132 | 0,1038 |
| Moyenne | 1,057 | 0,9557 | 0,8469 | 0,7423 | 0,6358 | 0,5325 | 0,4238 | 0,3188 | 0,2122 | 0,1036 |
| Correction (A) | +0,057 | +0,0557 | +0,0469 | +0,0423 | +0,0358 | +0,0325 | +0,0238 | +0,0188 | +0,0122 | +0,0036 |

Calibre 0,3A (300 mA)

| Valeur lue (mA) | 300 | 250 | 200 | 150 | 100 | 50 |
|-----------------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|
| mesure (1) | 310,8 | 260,1 | 207,75 | 156,91 | 104,27 | 51,75 |
| mesure (2) | 311,1 | 259,9 | 207,8 | 156,10 | 103,40 | 51,51 |
| mesure (3) | 310,0 | 260,3 | 208,1 | 156,60 | 104,42 | 52,41 |
| mesure (4) | 314,0 | 264,9 | 209,8 | 155,86 | 103,48 | 50,13 |
| Moyenne | 311,5 | 261,3 | 208,4 | 156,37 | 103,89 | 51,45 |
| Correction (mA) | +11,5 | +11,3 | +8,4 | +6,37 | +3,89 | +1,45 |

Calibre 100 mA

| Valeur Lue (mA) | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| mesure (1) | 103,63 | 93,47 | 83,05 | 72,55 | 61,81 | 51,44 | 41,06 | 30,81 | 20,48 | 10,30 |
| mesure (2) | 103,60 | 93,30 | 82,90 | 72,40 | 62,10 | 51,90 | 41,30 | 31,00 | 20,60 | 10,00 |
| mesure (3) | 103,64 | 93,42 | 83,03 | 72,81 | 62,33 | 52,16 | 41,43 | 31,22 | 20,76 | 10,23 |
| mesure (4) | 103,14 | 92,94 | 82,92 | 71,16 | 61,63 | 51,96 | 40,91 | 30,69 | 20,21 | 10,05 |
| Moyenne | 103,50 | 93,28 | 82,98 | 72,23 | 61,97 | 51,87 | 41,18 | 30,93 | 20,51 | 10,15 |
| Correction (mA) | +3,50 | +3,28 | +2,98 | +2,23 | +1,97 | +1,87 | +1,18 | +0,93 | +0,51 | +0,15 |

Calibre 10 mA

| Valeur Lue (mA) | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| mesure (1) | 10,382 | 9,346 | 8,293 | 7,270 | 6,230 | 5,187 | 4,152 | 3,110 | 2,080 | 1,023 |
| mesure (2) | 10,355 | 9,325 | 8,255 | 7,218 | 6,174 | 5,164 | 4,107 | 3,073 | 2,027 | 0,980 |
| mesure (3) | 10,383 | 9,354 | 8,254 | 7,212 | 6,174 | 5,150 | 4,155 | 3,126 | 2,083 | 1,021 |
| mesure (4) | 10,363 | 9,181 | 8,255 | 7,260 | 6,171 | 5,134 | 4,061 | 3,072 | 2,034 | 0,990 |
| Moyenne | 10,371 | 9,304 | 8,264 | 7,240 | 6,187 | 5,159 | 4,119 | 3,095 | 2,056 | 1,004 |
| Correction (mA) | +0,371 | +0,304 | +0,264 | +0,240 | +0,187 | +0,159 | +0,119 | +0,095 | +0,056 | +0,004 |

Tableaux des Valeurs

Voltmètre AOIP 2H410

Calibre 15 V

| Valeur Lue (V) | 15 | 14 | 12 | 10 | 8 | 6 | 4 | 2 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| mesure (1) | 14,865 | 13,900 | 11,931 | 9,934 | 7,943 | 5,928 | 3,902 | 1,913 |
| mesure (2) | 14,988 | 14,013 | 12,022 | 9,993 | 8,002 | 5,983 | 3,957 | 1,954 |
| mesure (3) | 14,910 | 13,922 | 11,963 | 9,988 | 7,959 | 5,939 | 3,926 | 1,905 |
| mesure (4) | 15,014 | 13,984 | 12,024 | 10,006 | 7,993 | 5,977 | 3,928 | 1,930 |
| Moyenne | 14,944 | 13,955 | 11,985 | 9,980 | 7,974 | 5,957 | 3,928 | 1,926 |
| Correction (V) | -0,056 | -0,045 | -0,015 | -0,020 | -0,026 | -0,043 | -0,072 | -0,074 |

Calibre 5 V

| Valeur Lue (V) | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| mesure (1) | 4,973 | 3,963 | 2,994 | 1,973 | 0,973 |
| mesure (2) | 4,991 | 3,986 | 3,004 | 1,983 | 0,975 |
| mesure (3) | 4,969 | 3,974 | 2,993 | 1,969 | 0,987 |
| mesure (4) | 4,988 | 4,004 | 3,011 | 1,983 | 0,967 |
| Moyenne | 4,980 | 3,982 | 3,001 | 1,977 | 0,976 |
| Correction (V) | -0,020 | -0,018 | +0,001 | -0,023 | -0,024 |

Calibre 1,5 V

| Valeur lue (V) | 1,5 | 1,4 | 1,2 | 1 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 0,2 |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| mesure (1) | 1,4890 | 1,3974 | 1,1986 | 0,9995 | 0,7983 | 0,5998 | 0,3959 | 0,1963 |
| mesure (2) | 1,4897 | 1,3990 | 1,1899 | 0,9975 | 0,7972 | 0,5963 | 0,3957 | 0,1949 |
| mesure (3) | 1,4997 | 1,3895 | 1,1939 | 0,9964 | 0,7979 | 0,5947 | 0,3933 | 0,1935 |
| mesure (4) | 1,4951 | 1,3967 | 1,1986 | 1,0006 | 0,8005 | 0,5971 | 0,3952 | 0,1961 |
| mesure Moyenne | 1,4934 | 1,3957 | 1,1953 | 0,9985 | 0,7985 | 0,5970 | 0,3950 | 0,1952 |
| Correction (V) | -0,0066 | -0,0043 | -0,0047 | -0,0015 | -0,0015 | -0,0030 | -0,0050 | -0,0048 |

Tableaux des Valeurs

Voltmètre 8034 H3

Calibre 30 V

| Valeur lue (V) | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 | 5 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| mesure (1) | 28,28 | 23,49 | 18,87 | 14,13 | 9,450 | 4,964 |
| mesure (2) | 28,24 | 23,82 | 18,89 | 14,41 | 9,625 | 4,952 |
| mesure (3) | 28,47 | 23,53 | 18,83 | 14,14 | 9,451 | 4,946 |
| mesure (4) | 28,41 | 23,75 | 18,88 | 14,39 | 9,431 | 4,965 |
| Moyenne | 28,28 | 23,65 | 18,86 | 14,27 | 9,489 | 4,957 |
| Correction (V) | -1,72 | -1,35 | -1,14 | -0,73 | -0,511 | -0,043 |

Calibre 7,5 V

| Valeur Lue (V) | 7,5 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| mesure (1) | 7,474 | 6,984 | 5,976 | 4,977 | 3,984 | 2,988 | 1,981 | 0,9879 |
| mesure (2) | 7,456 | 6,984 | 5,991 | 4,983 | 3,985 | 2,979 | 1,978 | 0,9785 |
| mesure (3) | 7,477 | 6,995 | 5,969 | 4,952 | 3,983 | 2,975 | 1,980 | 0,9780 |
| mesure (4) | 7,482 | 6,981 | 5,981 | 4,995 | 3,987 | 2,976 | 1,978 | 0,9875 |
| Moyenne | 7,472 | 6,986 | 5,979 | 4,977 | 3,985 | 2,980 | 1,979 | 0,9832 |
| Correction (V) | -0,028 | -0,014 | -0,021 | -0,023 | -0,015 | -0,020 | -0,021 | -0,0168 |

Calibre 3 V

| Valeur Lue (V) | 3 | 2,5 | 2 | 1,5 | 1 | 0,5 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| mesure (1) | 2,994 | 2,476 | 1,987 | 1,479 | 0,9930 | 0,4810 |
| mesure (2) | 2,943 | 2,439 | 1,989 | 1,495 | 0,9950 | 0,4784 |
| mesure (3) | 2,943 | 2,494 | 1,964 | 1,485 | 0,9860 | 0,4789 |
| mesure (4) | 2,916 | 2,477 | 1,946 | 1,465 | 0,9860 | 0,4812 |
| Moyenne | 2,949 | 2,471 | 1,972 | 1,481 | 0,9900 | 0,4799 |
| Correction (V) | -0,051 | -0,029 | -0,028 | -0,019 | -0,0100 | -0,0201 |

Calibre 15V; 2,5A

Etalonnage du Wattmètre

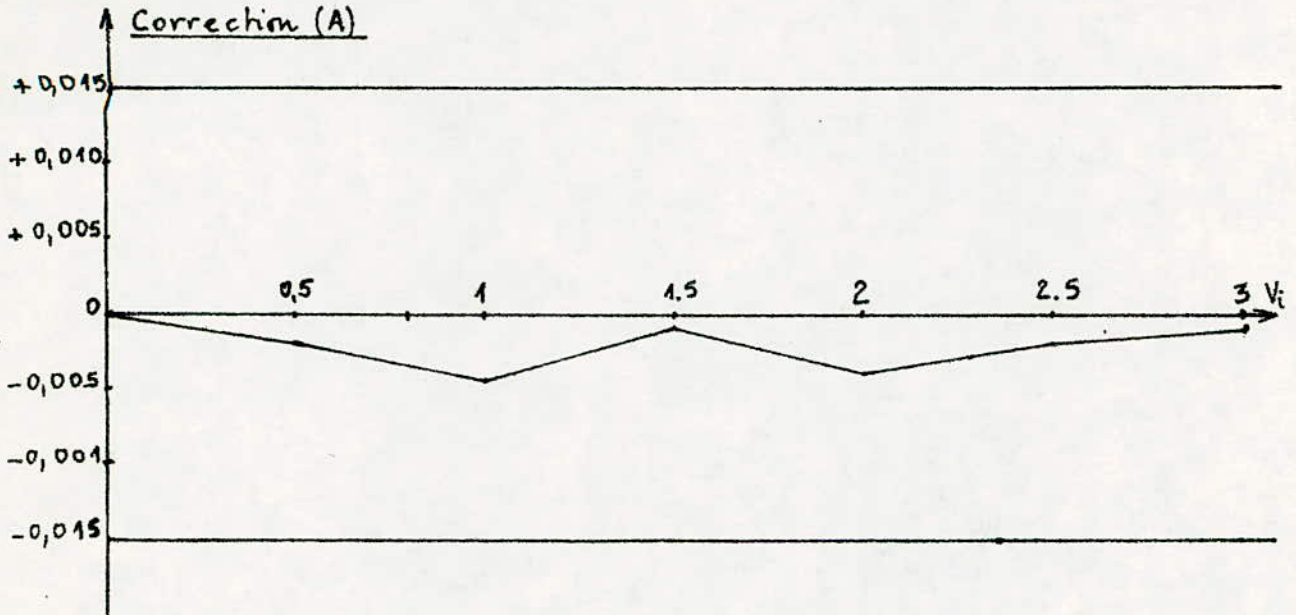
| Valeur lue (W) | 37,5 | 35 | 32,5 | 30 | 27,5 | 25 | 22,5 | 20 | 17,5 | 15 | 12,5 | 10 | 7,5 | 5 |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Tension (V) (1) | 14,897 | 14,786 | 14,867 | 14,800 | 14,883 | 14,878 | 14,768 | 14,762 | 14,761 | 14,854 | 14,751 | 14,747 | 14,741 | 14,737 |
| Courant (A) (2) | 2,507 | 2,361 | 2,178 | 2,028 | 1,843 | 1,672 | 1,514 | 1,347 | 1,178 | 0,999 | 0,835 | 0,672 | 0,500 | 0,334 |
| Puissance mesurée (1) | 37,347 | 34,910 | 32,380 | 30,014 | 27,429 | 24,876 | 22,359 | 19,884 | 17,388 | 14,839 | 12,317 | 9,910 | 7,371 | 4,922 |
| Tension (V) (2) | 14,822 | 14,820 | 14,724 | 14,757 | 14,842 | 14,848 | 14,803 | 14,822 | 14,780 | 14,760 | 14,723 | 14,725 | 14,729 | 14,732 |
| Courant (A) (2) | 2,528 | 2,352 | 2,195 | 2,025 | 1,841 | 1,678 | 1,516 | 1,338 | 1,110 | 1,023 | 0,852 | 0,668 | 0,499 | 0,338 |
| Puissance mesurée (2) | 37,470 | 34,857 | 32,319 | 29,893 | 27,324 | 24,915 | 22,441 | 19,832 | 17,440 | 15,099 | 12,544 | 9,836 | 7,350 | 4,979 |
| Tension (V) (3) | 14,867 | 14,860 | 14,804 | 14,809 | 14,870 | 14,865 | 14,782 | 14,804 | 14,772 | 14,941 | 14,742 | 14,738 | 14,735 | 14,742 |
| Courant (A) (3) | 2,514 | 2,361 | 2,183 | 2,031 | 1,853 | 1,682 | 1,520 | 1,353 | 1,173 | 0,997 | 0,843 | 0,693 | 0,503 | 0,329 |
| Puissance mesurée (3) | 37,376 | 35,084 | 32,317 | 30,077 | 27,554 | 25,003 | 22,469 | 20,030 | 17,327 | 14,896 | 12,427 | 10,066 | 7,412 | 4,850 |
| Tension (V) (4) | 14,873 | 14,790 | 14,788 | 14,772 | 14,861 | 14,854 | 14,800 | 14,773 | 14,774 | 14,732 | 14,738 | 14,731 | 14,724 | 14,732 |
| Courant (A) (4) | 2,530 | 2,374 | 2,179 | 2,031 | 1,845 | 1,680 | 1,531 | 1,351 | 1,177 | 1,014 | 0,849 | 0,679 | 0,508 | 0,341 |
| Puissance mesurée (4) | 37,629 | 35,111 | 32,371 | 30,002 | 27,418 | 24,956 | 22,659 | 19,958 | 17,537 | 14,938 | 12,513 | 10,002 | 7,480 | 5,024 |
| Moyenne (W) | 37,456 | 34,991 | 32,368 | 29,994 | 27,431 | 24,937 | 22,482 | 19,926 | 17,423 | 14,923 | 12,450 | 9,954 | 7,403 | 4,944 |
| Correction (W) | -0,044 | -0,009 | -0,040 | -0,006 | -0,069 | -0,063 | -0,018 | -0,074 | -0,077 | -0,077 | -0,050 | -0,046 | -0,097 | -0,056 |

V.14) Courbes de Correction.

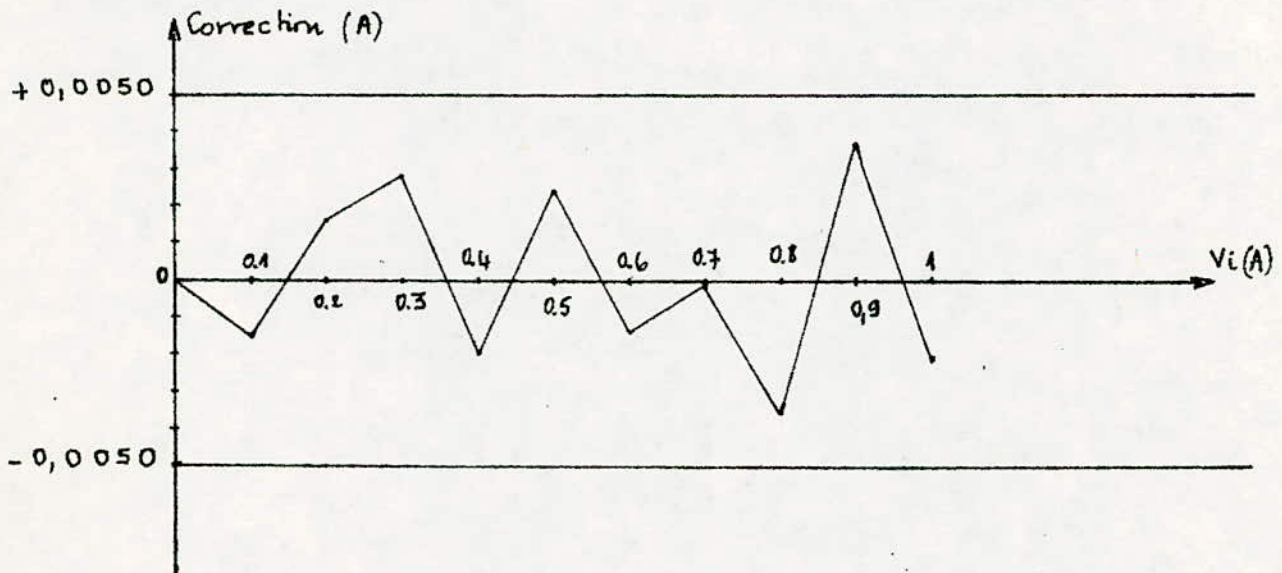
Amperemètre AOIP 2H411

Etalonné le 16/05/81

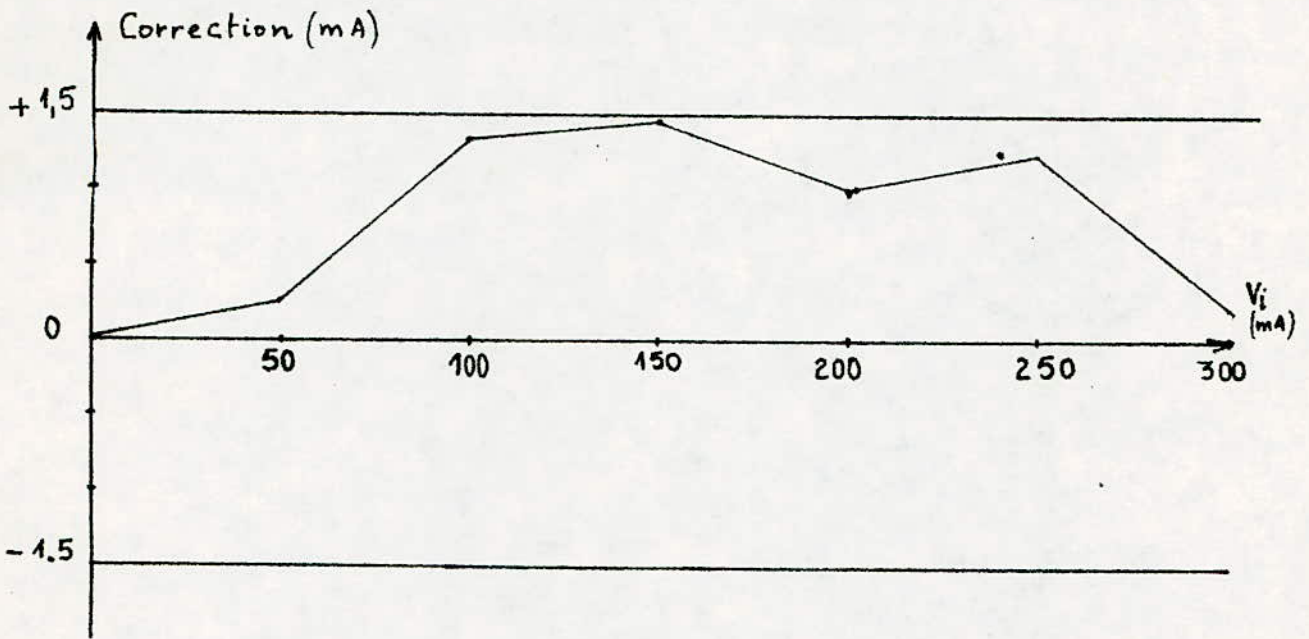
Calibre 3A.



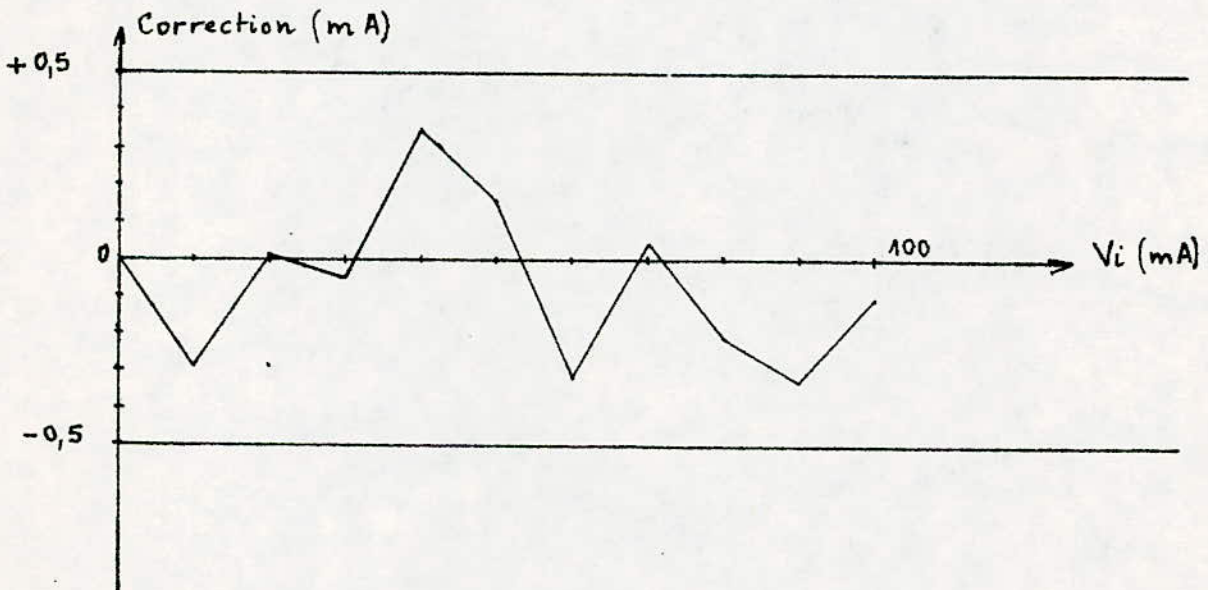
Calibre 1A



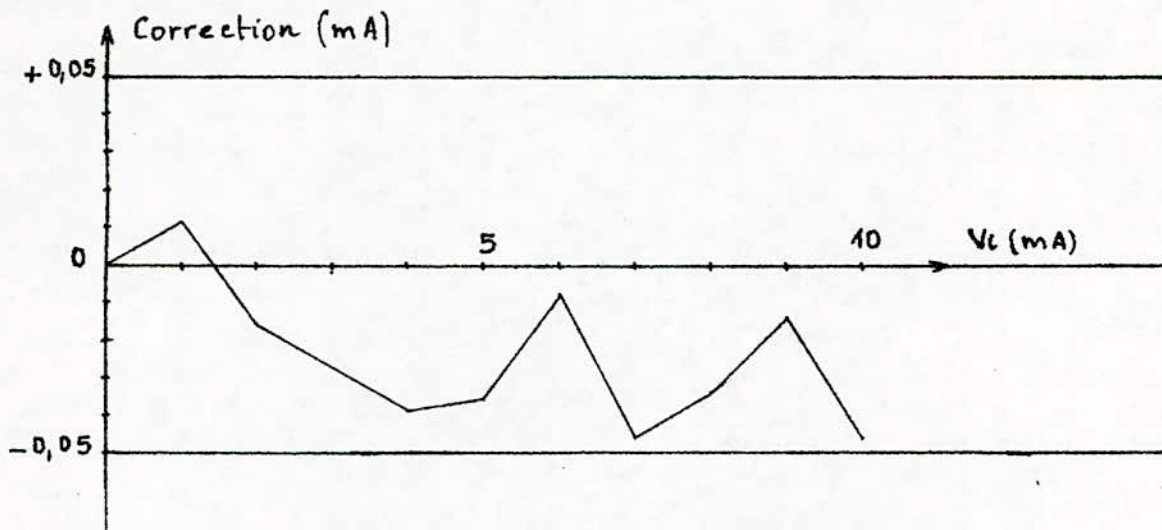
Calibre 0,3 A



Calibre 0,1 A



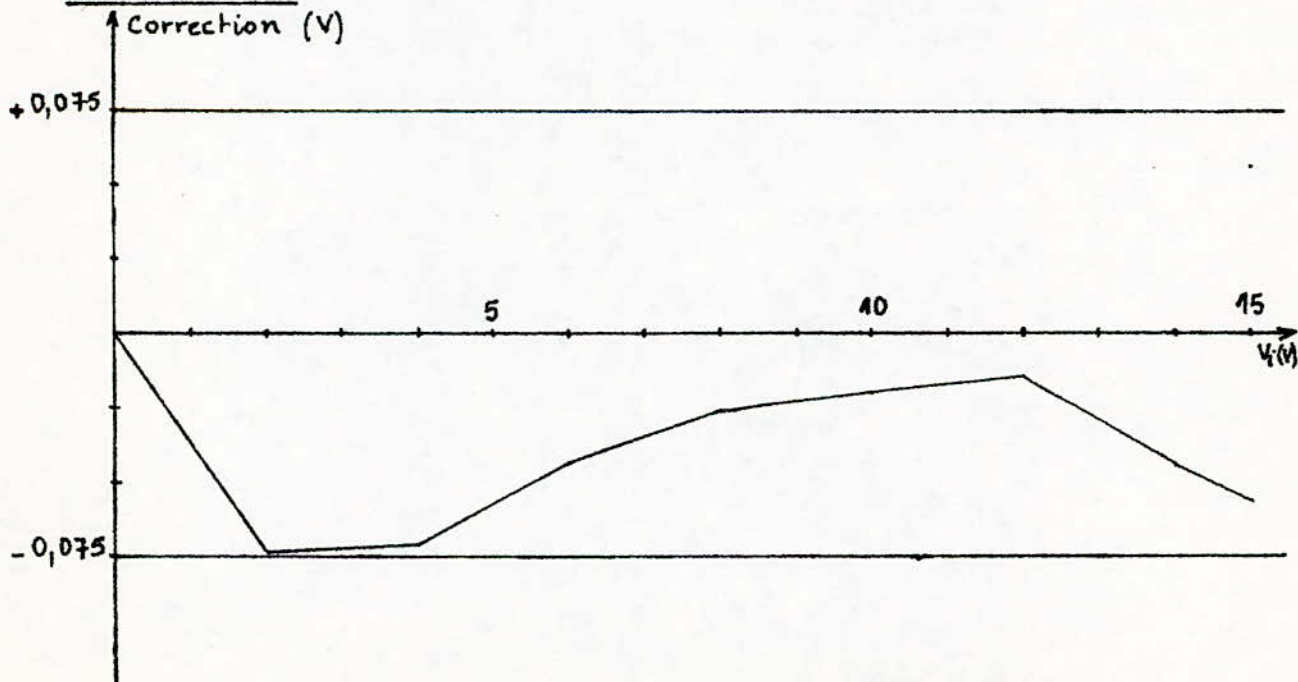
Calibre 0,01 A



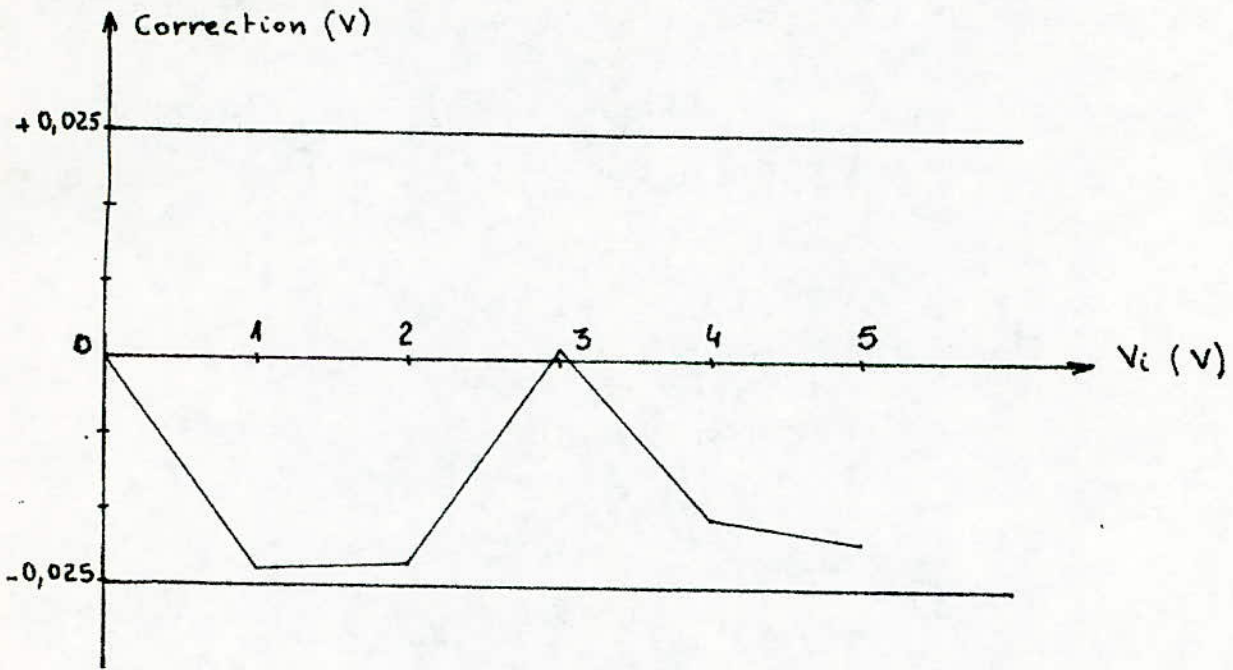
Voltmètre AOIP 2H410

Etalonné le 20/05/1981

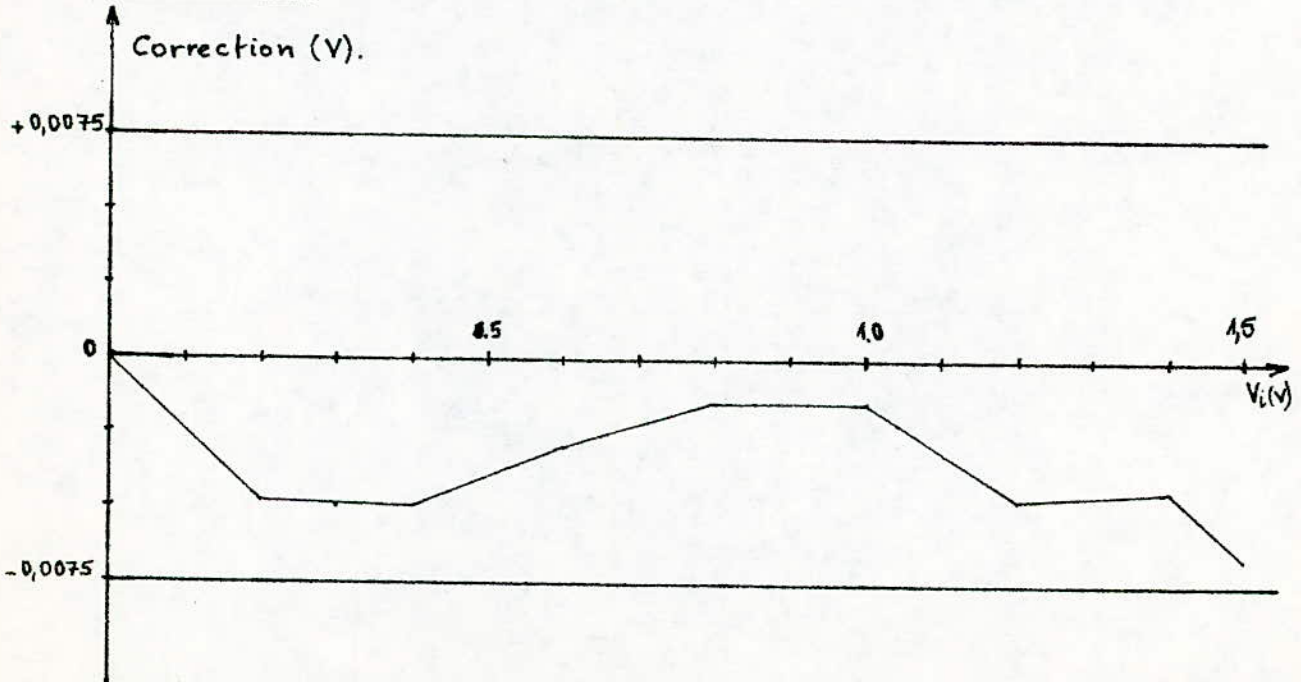
Calibre 15 V



Calibre 5 V



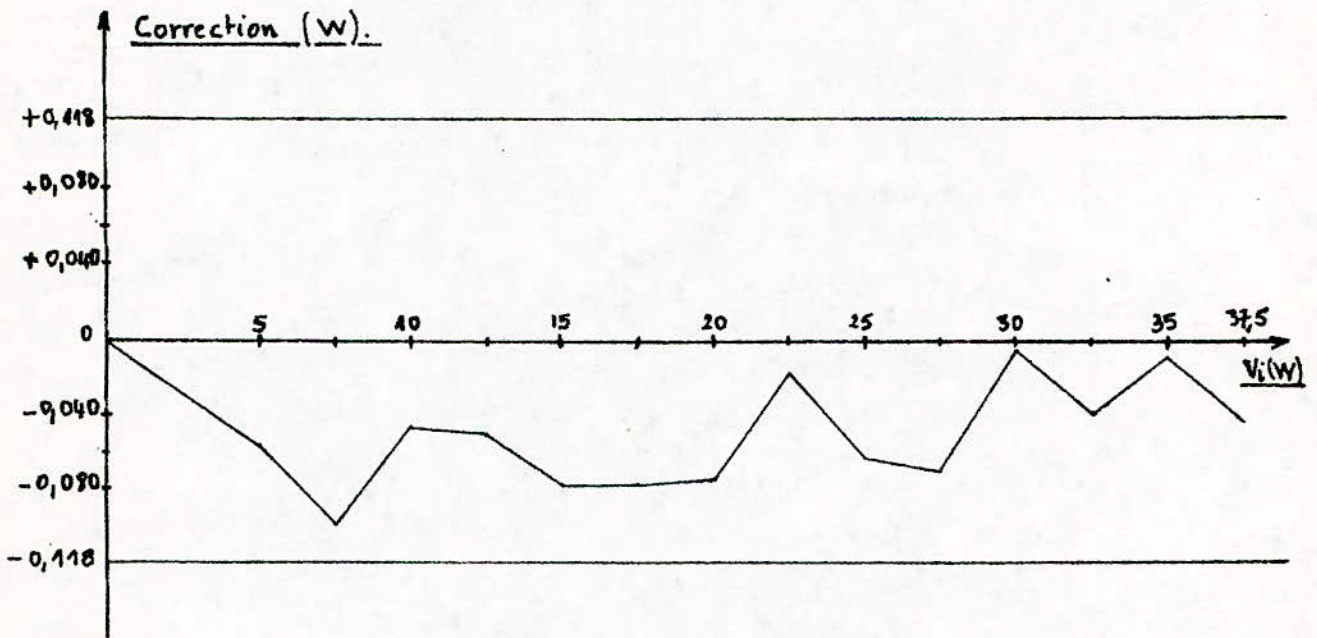
Calibre 1,5 V



Wattmètre n° 44968 17/25

Calibre 15V, 2,5A.

Étalonné le 24/05/1981



V.15) Interprétations des tableaux de valeurs :

L'ampèremètre 2H411, le voltmètre 2H410 et le wattmètre N° 44968 17/25, leurs corrections ne dépassent pas l'erreur de classe (voir courbes de correction). Ils sont encore utilisables.

Pour l'ampèremètre N° 2212 et le voltmètre 8034 H3, leurs corrections dépassent l'erreur de construction. Ces appareils n'appartiennent plus à leur classe de précision. On doit chercher les véritables causes de ce dépassement. On regarde le signe de la correction.

1°) La correction est négative :

La déviation est plus grande que celle correspondant à la grandeur traversant l'appareil. La panne la plus probable est que la constante de torsion a faibli à cause du vieillissement ou d'un choc dépassant le point de réversibilité.

2°) La correction est positive :

La déviation est plus petite que celle correspondant à la grandeur traversant l'appareil. Ses pannes probables sont les suivantes :

- Affaiblissement de l'organe créant le champ magnétique (aimant permanent).
- Ses frottements en général
 - * Usure des pivots.
 - * poussières.

Conclusion.

Nous proposons au chef de département et au responsable du laboratoire de mesures électriques de conserver et d'améliorer le matériel que nous avons utilisé pour le montage de ce poste d'étalonnage.

Nous souhaitons que d'autres projets de fin d'études sur l'étalonnage soient réalisés pour compléter ce poste et ainsi pouvoir étalonner n'importe quel appareil électrique.

La précision des mesures au niveau de l'école sera plus élevée et permettra à l'étudiant de confirmer la théorie par la pratique.

Bibliographie.

- 1) J. BAURAND Mesures électriques tome 1 et 2
édition Masson.
- 2) P. JACOB et V. JADIN Mesures électriques
édition Dunod.
- 3) G. NEY Techniques de l'ingénieur D.2
- 4) J. THURIN Mesures électroniques
édition Eyrolles.

Table des matières

Titres:

La page:

Introduction 2

Chapitre I : Appareils sur les appareils de mesure

| | | |
|------------|----------------------------------|---|
| <u>I.1</u> | Caractéristiques..... | 3 |
| <u>I.2</u> | Principaux éléments moteurs..... | 4 |
| <u>I.3</u> | Grandeurs d'influence..... | 6 |
| <u>I.4</u> | Vie d'un appareil de mesure..... | 7 |

Chapitre II : Etalonnage des appareils.

| | | |
|---------------|--|----|
| <u>II.1</u> | Principe d'étalonnage des différents appareils..... | 9 |
| <u>II.1.1</u> | Etalonnage de l'ampèremètre..... | 9 |
| <u>II.1.2</u> | Etalonnage du voltmètre..... | 11 |
| <u>II.1.3</u> | Etalonnage du wattmètre..... | 13 |
| <u>II.2</u> | Mesure d'une f.e.m par la méthode d'opposition..... | 15 |
| <u>II.2.1</u> | Principe de la méthode..... | 15 |
| <u>II.2.2</u> | Sensibilité de la méthode..... | 18 |
| <u>II.2.3</u> | Valeur de la résistance totale potentiométrique..... | 19 |
| <u>II.2.4</u> | Choix de la source auxiliaire..... | 20 |
| <u>II.2.5</u> | Calcul de l'erreur de détermination..... | 21 |
| <u>II.2.6</u> | Calcul d'erreur..... | 22 |

Chapitre III : Les potentiomètres

| | | |
|--------------|--------------------------------|----|
| <u>III.1</u> | Introduction..... | 27 |
| <u>III.2</u> | Chaînes potentiométriques..... | 27 |

| | | |
|----------------|--|----|
| <u>III.2.1</u> | Fil calibre | 27 |
| <u>III.2.2</u> | Montage de Feussner | 27 |
| <u>III.2.3</u> | Montage de Bouty | 28 |
| <u>III.2.4</u> | Procédé Waidner Wolff | 28 |
| <u>III.3</u> | Potentiomètre AOIP P1R | 29 |
| <u>III.4</u> | Autres potentiomètres | 33 |
| <u>III.4.1</u> | Potentiomètre Tinsley type 5205 | 33 |
| <u>III.4.2</u> | Réalisations spéciales | 34 |
| <u>III.5</u> | Causes d'erreur dans les mesures potentiométriques | 35 |
| <u>III.5.1</u> | Valeur de la f.e.m. de la pile étalon | 35 |
| <u>III.5.2</u> | Instabilité de la tension d'alimentation | 35 |
| <u>III.5.3</u> | Opération de tarage | 36 |
| <u>III.5.4</u> | Erreurs dues aux résistances | 36 |
| <u>III.5.5</u> | Couples thermoélectriques | 36 |
| <u>III.5.6</u> | Existence de mauvais contacts aux commutateurs | 37 |
| <u>III.5.7</u> | Autres causes d'erreur | 37 |

Chapitre IV : Accessoires du potentiomètre ----- 38

| | | |
|---------------|---|----|
| <u>IV.1</u> | Alimentations | 38 |
| <u>IV.2</u> | Étalons de tension | 39 |
| <u>IV.2.1</u> | Pile Weston | 39 |
| <u>IV.2.2</u> | Référence de tension à F.E.T. | 41 |
| <u>IV.2.3</u> | Référence utilisant l'effet Josephson | 42 |
| <u>IV.3</u> | Galvanomètre | 44 |
| <u>IV.3.1</u> | Mouvements et équilibre de l'équipage mobile | 44 |
| <u>IV.3.2</u> | Emploi du galvanomètre comme détecteur de zéro | 46 |
| <u>IV.3.3</u> | Schéma équivalent du circuit vu du galvanomètre | 47 |
| <u>IV.3.4</u> | Adaptation du galvanomètre | 47 |
| <u>IV.3.5</u> | Choix du galvanomètre | 47 |
| <u>IV.3.6</u> | Détermination des résistances H et Y | 48 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| <u>Chapitre V:</u> | <i>Partie expérimentale</i> | 50 |
| <u>V.1</u> | <i>Local de mesure</i> | 50 |
| <u>V.2</u> | <i>Mesure de tension en courant continu</i> | 51 |
| <u>V.3</u> | <i>Consignes pour la réalisation d'un bon étalonnage</i> | 51 |
| <u>V.4</u> | <i>Éléments de réglage</i> | 51 |
| <u>V.5</u> | <i>Alimentations</i> | 52 |
| <u>V.6</u> | <i>Courbes de correction</i> | 53 |
| <u>V.7</u> | <i>Comparaison des erreurs</i> | " |
| <u>V.8</u> | <i>Étalonnage de l'ampèremètre</i> | 54 |
| <u>V.9</u> | <i>Étalonnage du voltmètre</i> | 56 |
| <u>V.10</u> | <i>Étalonnage du wattmètre</i> | 57 |
| <u>V.11</u> | <i>Galvanomètres susceptibles d'être utilisés</i> | 57 |
| <u>V.12</u> | <i>Incertitude d'étalonnage</i> | 61 |
| <u>V.13</u> | <i>Tableaux des valeurs</i> | 67 |
| <u>V.14</u> | <i>Courbes de correction moyennes</i> | 76 |
| <u>V.15</u> | <i>Interprétations des tableaux de valeurs</i> | 81 |
| | <i>Conclusion générale</i> | 82 |
| | <i>Bibliographie</i> | 83 |