

Afin de profiter au mieux des 4 heures de la séance de manipulations, il vous est vivement recommandé de préparer soigneusement ce TP. Les enseignants sont à votre service, n'hésitez pas à les contacter pour vous aider dans cette préparation.

MESURES DE RESISTANCES I : VOLTMETRE & AMPEREMETRE

Exemple de comparaison des erreurs systématiques avec les incertitudes de mesures.

La valeur d'une résistance, est liée à la nature et à la géométrie du matériau qui la constitue. Elle dépend aussi de paramètres extérieurs comme la température ou la pression. La mesure d'une résistance est sujette d'une part à des **erreurs systématiques**, liées à la méthode de mesure et qui peuvent être corrigées, d'autre part à des **incertitudes** qui dépendent des appareils utilisés.

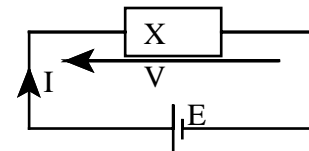


Figure 1

I PRINCIPLE

C'est une application directe de la loi d'Ohm (figure 1). Aux bornes d'un élément linéaire X (une résistance) parcouru par un courant I continu, la différence de potentiel (ddp) V du circuit est proportionnelle à I : $V = X I$. La valeur de X peut donc être déterminée par la mesure de V à l'aide d'un voltmètre et de I à l'aide d'un ampèremètre. Cependant, l'énergie consommée par chaque appareil de mesure est à l'origine d'erreurs systématiques, qu'il faut souvent corriger car elles ne sont pas toujours négligeables devant l'incertitude sur X résultant des incertitudes sur I et sur V.

1) Montage "amont"

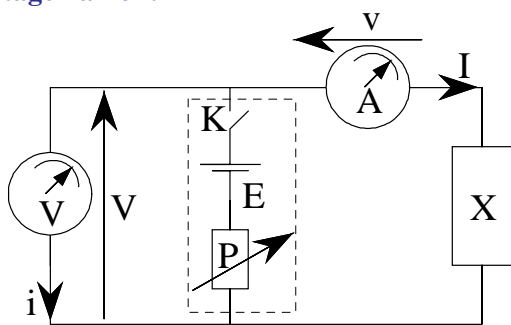


Figure 2 : Montage amont.

Le nom de ce montage vient de ce que l'alimentation est la "source" du courant, donc "l'amont" du circuit. Ici le voltmètre est aux bornes de la source, donc en amont (figure 2). La résistance variable P sert de protection et à obtenir les conditions optimales de mesure. Elle sera considérée comme un élément de la source, avec l'interrupteur-contacteur K, qui permet couper le circuit tout en gardant l'alimentation allumée, ce qui stabilise la température et les caractéristiques de celle-ci.

Une valeur approchée de X est $X_a = V/I$.

$X \approx X_a$ si la tension v, aux bornes de l'ampèremètre est négligeable devant V, la tension mesurée : $v \ll V$.

2) Montage "aval"

Si l'alimentation est "l'amont" du circuit, fort logiquement la résistance X, la charge du circuit, est "l'aval". Ici le voltmètre est aux bornes de X, donc à l'aval du montage (figure 3). Les rôles de P et K sont les mêmes que pour le montage amont.

Une valeur approchée de X est $X_a = V/I$.

$X \approx X_a$ si le courant i dans le voltmètre est négligeable devant I, le courant mesuré : $i \ll I$.

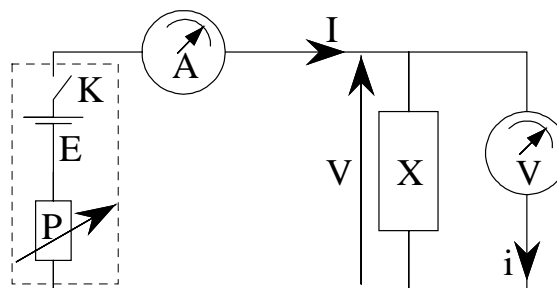


Figure 3 : Montage aval.

3) Voltmètre

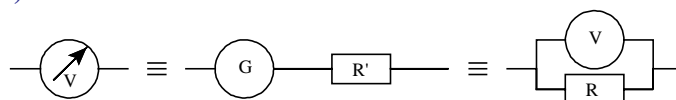


Figure 4 : Circuit constituant d'un voltmètre.

Il est constitué d'un galvanomètre G, de résistance interne g, en série avec une résistance R'. La résistance du voltmètre est $R = g + R'$. Les tensions qu'il peut mesurer dépendent de la **dynamique** (intervalle des valeurs qu'il peut mesurer) de G et de la valeur de R', qui varie avec le calibre Cal_V . Le voltmètre réel équivaut à l'association en parallèle d'un voltmètre parfait (résistance interne infinie) et de la résistance R (figure 4).

a) Le calibre du voltmètre : Cal_V

C'est la valeur de la tension correspondant à la déviation totale de l'aiguille. C'est le plus souvent un multiple de 10 ou de 3.

b) La résistance interne du voltmètre ramenée au volt : R_V

Exemple : $R_V = 10 \text{ K}\Omega/\text{V}$. La résistance interne est alors le produit de R_V par Cal_V . Par exemple, pour $\text{Cal}_V = 30 \text{ V}$, la résistance interne est alors $R = R_V \text{ Cal}_V = 300 \text{ K}\Omega$.

c) La classe du voltmètre : ϵ_V

C'est l'incertitude absolue maximale de la mesure, exprimée en pourcentage du calibre utilisé. Par exemple, pour un appareil de classe 2 sur le calibre 30 V, l'incertitude absolue de la mesure est $\Delta V = \epsilon_V \text{ Cal}_V = 30 * 0.02 = 0.6 \text{ V}$. Les appareils utilisés ici sont de classe 1 (§ IV).

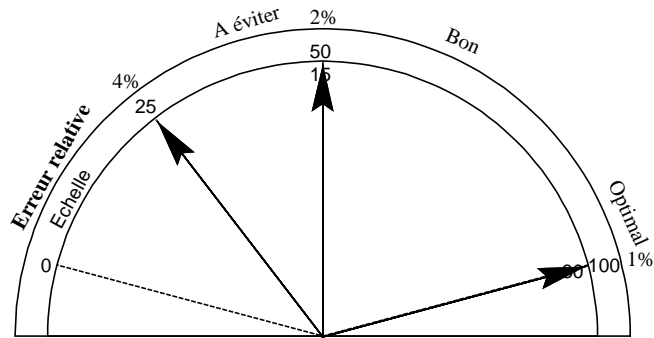


Figure 5 : L'erreur relative de mesure est minimale lorsque la déviation de l'aiguille est maximale (Appareil de classe 1 ici)

Cette incertitude absolue est constante pour toutes les mesures sur un calibre. L'incertitude relative $\Delta V/V$ varie donc inversement à V . Nous avons intérêt à choisir le calibre de telle sorte que l'aiguille dévie le plus possible (figure 5). La classe tient compte des incertitudes liées aux composants de l'appareil.

Attention : La classe apparaît sur les appareils comme un chiffre isolé ou souligné. Le chiffre dans une étoile est la tension maximale que supporte l'appareil, exprimée en kilo-Volts (kV).

4) Ampèremètre

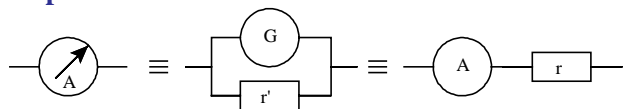


Figure 6 : Circuit constituant d'un ampèremètre.

Il est constitué d'un galvanomètre G , de résistance interne g , court-circuité (shunté) par une résistance r' . L'ampèremètre a une résistance interne $r = gr'/(g+r')$. Les courants qu'il peut mesurer dépendent de la dynamique de G et de la valeur de r' , qui varie avec le calibre Cal_I . L'ampèremètre équivaut à l'association en série d'un ampèremètre parfait (résistance interne nulle) et de la résistance r (figure 6).

a) Le calibre Cal_I et la classe ϵ_I de l'ampèremètre

Elles ont les mêmes significations que pour le voltmètre.

b) La chute de tension nominale de l'ampèremètre : V_I

C'est la ddp aux bornes de l'ampèremètre lorsqu'il est traversé par un courant égal au calibre utilisé. La résistance interne r de l'appareil s'en déduit par la relation : $r = V_I / \text{Cal}_I$.

Par exemple, pour un appareil de chute de tension nominale $V_N = 100 \text{ mV}$, utilisé sur le calibre $\text{Cal}_I = 200 \text{ mA}$ a une résistance interne : $r = V_N / \text{Cal}_I = 100 / 200 = 0.5 \Omega$.

II PREPARATION

1) Montage "amont"

a) Calcul de l'erreur systématique due au circuit

Si nous prenons la valeur approchée $X_a = V/I$, nous faisons une erreur systématique absolue $\Delta X_a = |X_a - X|$, due à la forme du circuit. Si v n'est pas négligeable, montrez que $X = X_a - r$. Montrez ensuite que l'erreur relative est : $\frac{\Delta X_a}{X} = \frac{r}{X} = \frac{r}{X_a - r}$.

A quelle condition celle-ci est-elle minimale ?

b) Calcul de l'incertitude des mesures

Les incertitudes de mesures sont dues aux appareils. Leurs incertitudes relatives $\Delta V/V$ (voltmètre) et $\Delta I/I$ (ampèremètre) dépendent des classes des appareils (§ I 3&4). Celles-ci tiennent compte des l'incertitudes sur les résistances internes.

Calculez V en fonction de I , X et r et montrez que la différentielle de V est : $dV = (X+r)dI + Idr + IdX$.

Comme l'incertitude éventuelle due à r est prise en compte dans l'incertitude de mesure du courant $\Delta I/I$, vous prendrez $dr = 0$. Vérifiez que : $XI = \frac{XV}{X+r}$. A partir de l'expression de dV ,

montrez que l'incertitude relative due aux mesures vérifie :

$$\left(\frac{\Delta X_M}{X}\right) = \left(1 + \frac{r}{X}\right) \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2}$$

c) Minimisation de l'incertitude due aux mesures

Cette incertitude relative sera minimale si :

1. Les incertitudes relatives des mesures $\Delta V/V$ et $\Delta I/I$ sont minimales. En pratique, vous choisirez les calibres de telle sorte qu'en réglant la résistance P au moins l'un des deux appareils dévie totalement. Vous ferez en sorte que l'autre appareil dévie de plus de la moitié de son cadran (§I3c).
2. Le facteur $(1+r/X)$ est minimal. C'est le cas lorsque $r \ll X$, ce qui sera supposé vrai si $X > r/\epsilon_I$.

2) Montage "aval"

a) Calcul de l'erreur systématique due au circuit

Si nous prenons la valeur approchée $X_a = V/I$, nous faisons une erreur systématique, due à la forme du circuit. Si le courant i (figure 3) n'est pas négligeable, montrez que $X = \frac{V}{I - \frac{V}{R}} = \frac{RX_a}{R - X_a}$.

Montrez ensuite que l'erreur relative est : $\frac{\Delta X_a}{X} = \frac{V}{RI} = \frac{X_a}{R}$

A quelle condition cette erreur est-elle minimale ?

b) Calcul de l'incertitude des mesures

Procédez de même que pour le montage amont. La différentielle de I est : $dI = ((X+R)/RX)dV - VdR/R^2 - VdX/X^2$ et ici $dR = 0$. Vous avez besoin de la relation $\frac{X}{V} = \frac{X+R}{RI}$ et l'erreur relative sur X due aux mesures doit vérifier :

$$\left(\frac{\Delta X_M}{X}\right) = \left(1 + \frac{X}{R}\right) \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2}$$

c) Minimisation de l'incertitude due aux mesures

Cette erreur relative sera minimale si :

1. (Voir le montage amont § II.1.c).
2. Le facteur $(1+X/R)$ est minimal. C'est le cas lorsque $X \ll R$, ce qui sera supposé vrai si $X < R \cdot \epsilon_V$.

3) Montage "en quatre points", pour les résistances de très faible valeur ($X < 1\Omega$)

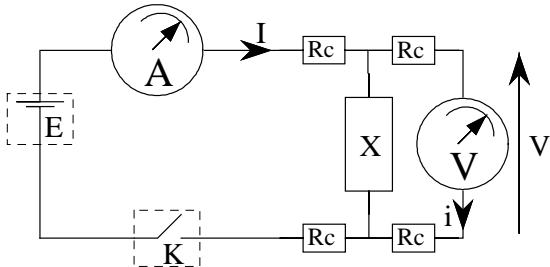


Figure 7 : Schéma d'une mesure "en quatre points". Les résistances R_c sont les résistance de contact, non négligeables ici, car un fort courant circule dans la branche de la source.

Lorsqu'une résistance est faible, il faut y faire circuler un fort courant pour obtenir une tension mesurable à ses bornes. Dans ce cas les résistances de contact (figure 7), qui ici sont du même ordre de grandeur que X , produisent une tension mesurable. Pour ne pas mesurer $X+2R_c$, la tension est mesurée à travers deux bornes qui ne voient pas passer I , mais seulement i (figure 7). Ce montage est-il un montage amont ou aval ?

4) Puissance dissipée dans les éléments du montage.

Le courant qui circule dans le circuit y dissipe de l'énergie par effet joule. Il faut s'assurer que chaque élément ne chauffe pas au delà de ce qu'il peut supporter. Ici la résistance à mesurer est l'élément le moins capable de dissiper l'énergie. Les résistances ordinaires à bagues de couleur supportent le plus souvent 0.25 W au maximum (résistance "quart de watt" ou W/4). Connaissant la valeur d'une résistance, il est possible de calculer le courant et la tension maximales : $P = VI = RI^2 = V^2/R$.

5) Ohmmètres

Ces appareils permettent de mesurer très rapidement les résistances. La valeur est lue directement sur le cadran d'un galvanomètre à aiguille gradué en Ohm (échelle non linéaire) ou sur l'afficheur à cristaux liquides du multimètre numérique. L'appareil contient sa propre source de tension. C'est le plus souvent une pile ou une batterie rechargeable, dont la force électromotrice dépend de l'âge ou de la charge.

a) Appareils à aiguilles

Parmi leurs constituants se trouve une source interne, une résistance (qui dépend du calibre choisi) et un galvanomètre gradué en ohms. En raison des variations de la source interne, il est nécessaire de réaliser un tarage de l'appareil lors de chaque changement de calibre. Les ohmmètres sont conçus de telle sorte que 0Ω corresponde à la déviation maximale de l'aiguille. Le tarage s'effectue donc en court-circuitant l'appareil et en agissant sur la molette pour amener l'aiguille au zéro. La précision de ces appareils est souvent médiocre et délicate à calculer, parce que les fabricants fournissent rarement les paramètres nécessaires. **Ici, vous ne calculerez pas l'incertitude de mesure, le but est de savoir manipuler ces appareils en voie de disparition.**

b) Appareils numériques

Le tarage de la source est réalisé automatiquement. La précision de la mesure s'établit à partir de la précision annoncée par le fabricant additionnée d'un certain nombre de fois la valeur de l'unité du dernier chiffre (voir §IV "Matériel nécessaire").

III MANIPULATION

1) Lecture des bagues et puissance maximale.

1. Lisez les valeurs des résistances avec le code des couleurs
2. Sachant qu'il s'agit de résistance quart de watt, déterminez le courant I_{max} et la tension maximales V_{max} que chaque résistance peut supporter. **Vous vous assurerez que I et V**

ne dépassent ces valeurs à aucun moment, en utilisant les limiteurs de tension et de courant de l'alimentation.

3. Lisez l'erreur relative de chaque valeur de résistance déterminée par les bagues de couleur.
4. Calculez l'erreur absolue sur chaque résistance.
5. Présentez chaque valeur sous la forme $X \pm \Delta X$, comme vous avez appris à le faire en travaux dirigés de mesure
6. Rassemblez les valeurs obtenues dans un tableau.

2) Montage amont

Réalisez le montage de la figure 2. faites-le vérifier par l'enseignant avant de fermer l'interrupteur-clef.

1. Réglez l'alimentation à la tension maximale V_{opt} qui permette de ne pas abîmer la résistance.
2. Par précaution, réglez P sur sa valeur maximale, ainsi que les calibres du Voltmètre et de l'ampèremètre.
3. Alimentez le circuit en fermant l'interrupteur K.
4. Choisissez les calibres des appareils de mesure pour être dans les conditions optimales de mesure (voir §II.1.c).
5. Ajustez la position des aiguilles avec le potentiomètre P.
6. Mesurez I et V et calculez X_a la valeur approchée de X.
7. Déterminez R et r les résistance internes des voltmètre et ampèremètre (voir § "matériel nécessaire").
8. Calculez la valeur corrigée de X.
9. Calculez $(\Delta X_a/X)$ l'erreur relative due au montage .
10. Calculez $(\Delta X_M/X)$ l'incertitude relative due aux mesures. Si les conditions de mesures sont optimales, $(\Delta X_M/X) \leq 2.5 \%$ (Si vous trouvez plus, appelez l'enseignant).
11. Présentez le résultat sous la forme $X \pm \Delta X$ (ici $\Delta X = \Delta X_M$).
12. Rassemblez les valeurs obtenues dans un tableau comme ci-dessous où vous ferez apparaître $(\Delta X_a/X)$ et $(\Delta X_M/X)$:
Pour la plus forte des résistances, mesurez à environ $V_{opt}/2$.

3) Montage aval

Réalisez le montage de la figure 3 et suivez la même procédure.

4) Montage en quatre points

Réalisez le montage de la figure 7. Sur la plaquette, vous choisirez les bornes qui verront le courant de mesure en fonction de leur largeur. Expliquez pourquoi. Faites vérifier le montage par l'enseignant avant de fermer l'interrupteur-clef.

Attention : ici la résistance de protection P est absente, car le courant I sera voisin de 1 A. La seule sécurité dont vous

disposez est donc le limiteur de courant de l'alimentation. Avant de fermer l'interrupteur, placez ce limiteur au minimum.

Placez ensuite le voltmètre sur son calibre minimal. Fermez K et choisissez les conditions optimales de mesure en augmentant progressivement le courant.

En fonction du type auquel rattacher ce montage, complétez le tableau réalisé aux paragraphes 3 et 4 ci-dessus avec les valeurs du montage en quatre points.

5) Ohmmètres et multimètres

Le tarage des appareils à aiguille s'effectue en court-circuitant les bornes. Pour chaque résistance, y compris X_4 , la résistance en quatre points, mesurez X. Pour le multimètre numérique, calculez ΔX et $\Delta X/X$. Rassemblez les valeurs dans un tableau.

6) Synthèse

Rassemblez dans un tableau les erreurs relatives dues au montage $(\Delta X_a/X)$ et les incertitudes relatives $(\Delta X_M/X)$, pour les montages aval et amont. Dans quel cas le montage amont (aval) est-il préférable ?

IV MATERIEL NECESSAIRE

1. Voltmètre multicalibre continu (Metrix 482)
Voltmètre multicalibre à cadre mobile. Résistance interne ramenée au volt : $20 \text{ K}\Omega/\text{V}$. Classe 1.
2. Ampèremètre multicalibre continu (Metrix 493)
Ampèremètre Multicalibre à cadre mobile. Chute de tension nominale : 200 mV. Classe 1.
3. Multimètre ou Ohmmètre à aiguille (Metrix 494 A).
4. Multimètre numérique (Beckman T 110B). Précisions en ohmmètre (% de l'affichage + $n \times (\text{unité du dernier chiffre})$) :

Gamme	200 Ω	2K Ω à 2M Ω	20M Ω
Précision	0.5%aff+4Ch	0.5%aff+1Ch	1.5%aff+5ch

5. Alimentation stabilisée à points fixes (Ch-Arnoux LA200)
Caractéristique rectangulaire. V réglable de 0 à 32 V. I réglable de 0 à 1.8 A
6. Potentiomètre étalonné 1200 Ω (A.O.I.P.*)
7. Potentiomètre étalonné 120 Ω (A.O.I.P.*)
8. Clef-interrupteur K1 (A.O.I.P.*)
9. Plaquettes de résistances
10. Plaquette de résistance à 4 bornes

(* Association des Ouvriers en Instruments de Précision.)