

TP-5 *Mesure de résistances*

But du TP

- Savoir mesurer une résistance à l'aide d'un *voltmètre* et d'un *ampèremètre*, en appliquant la *loi d'Ohm*. Tout en apprenant à estimer correctement l'*erreur systématique* dans l'un et l'autre des deux cas.
- Apprendre l'utilisation du *pont de Wheatstone*, qui est un moyen très précis pour mesurer la valeur d'une résistance (et il nous paraît important de comprendre le principe de fonctionnement de ce "pont", car il est souvent utilisé dans l'industrie).

Courte et longue dérivation *Rappels théoriques*

En *TP-1* nous avons vu la *loi d'Ohm* ($U = RI$), et nous l'avons utilisée pour déterminer la valeur d'une résistance R . Pour le faire, nous avons eu besoin d'employer un "voltmètre" et un "ampèremètre".

Toutefois, quand nous abordons l'aspect expérimental, nous nous rendons compte qu'il y a deux montages possibles pour mesurer R : un premier montage que nous appellerons *courte dérivation* et un second montage que nous appellerons *longue dérivation* (voir figures ci-dessous).

Courte Dérivation :

La valeur "vraie" de la résistance est : $R = \frac{U_{CD}}{I}$

La valeur "mesurée" est : $R_m = \frac{U_{CD}}{I_m}$

À partir de la valeur mesurée R_m , on peut déduire la valeur "vraie" R , en effet :

$$R = R_m + \frac{R_m^2}{R_V - R_m}$$

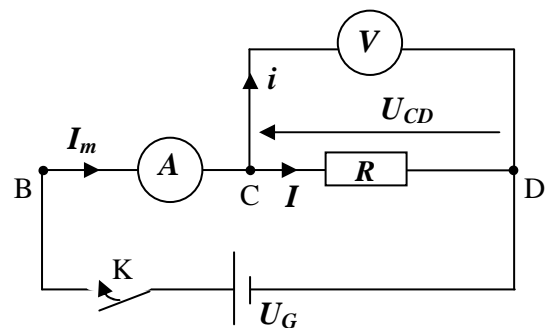


Fig.1 Montage courte dérivation

Un autre calcul permet d'estimer l'*erreur systématique relative* sur la valeur de R :

$$\mathcal{E}_{cd} = \left. \frac{\Delta R_m}{R_m} \right|_{cd} = \frac{R_m}{R_V} \quad (\text{en } \%)$$

R_V étant la résistance interne du voltmètre (**N.B.** R_V , qui dépend du calibre utilisé, est à relever sur la notice du multimètre, disponible dans la salle d'expérimentation).

Longue Dérivation :

La valeur "vraie" de la résistance est : $R = \frac{U_{CD}}{I}$

La valeur mesurée est : $R_m = \frac{U_{BD}}{I}$

À partir de la valeur mesurée R_m , on peut déduire la vraie valeur R , en effet :

$$R = R_m - R_A$$

Un autre calcul permet d'estimer l'*erreur systématique relative* sur la valeur de R :

$$\mathcal{E}_{ld} = \left. \frac{\Delta R_m}{R_m} \right|_{ld} = \frac{R_A}{R_m} \quad (\text{en } \%)$$

R_A étant la résistance interne de l'ampèremètre (N.B. R_A , qui dépend du calibre utilisé, est aussi à relever sur la notice du multimètre).

Conclusion :

De façon générale, et d'après ce qui précède, on choisit une *courte dérivation* pour les *petites résistances* R (quelques dizaines d'Ohms) car, dans ce cas, la résistance R_A de l'ampèremètre n'est pas négligeable devant R . Et on choisit une *longue dérivation* pour les *grandes résistances* R (car alors la résistance R_A de l'ampèremètre est très faible devant R).

Pour des valeurs intermédiaires de R , que faut-il prendre? Dans ce cas, on réalise le montage courte dérivation et on mesure $(R_m)_{cd}$, puis on calcule \mathcal{E}_{cd} (en %). Après cela, on réalise le montage longue dérivation et on mesure $(R_m)_{ld}$, et on calcule \mathcal{E}_{ld} (en %). Entre ces deux montages, on choisira celui qui permettra la plus petite erreur systématique relative \mathcal{E} .

Remarque : Une fois qu'on a choisi le type de montage adéquat, là nous pourrions écrire la valeur "vraie" de R (soit en fonction de R_m et R_V , soit en fonction de R_m et R_A); puis nous pourrions passer à l'estimation de l'incertitude ΔR qui s'écrit en fonction de ΔU , ΔI , et ΔR_A ou ΔR_V (revoir l'estimation d'incertitudes de mesure, présentée en *TP-1*).

Courte et longue dérivation *Manipulation*

Liste du matériel

- Deux résistances inconnues R_{X1} et R_{X2}
- Une alimentation continue (10V)
- Une boîte de connexions
- Un interrupteur K
- Un ampèremètre
- Un voltmètre

Montage courte dérivation

- ✓ Réalisez le montage de la figure-1, interrupteur K ouvert (la résistance R sera R_{X1}).
- ✓ Allumez l'ampèremètre et placez le sélecteur sur le calibre le plus grand.
- ✓ Allumez l'alimentation après autorisation de l'enseignant. La régler sur 10V.
- ✓ Allumez le voltmètre et placez le sélecteur sur le "bon" calibre.

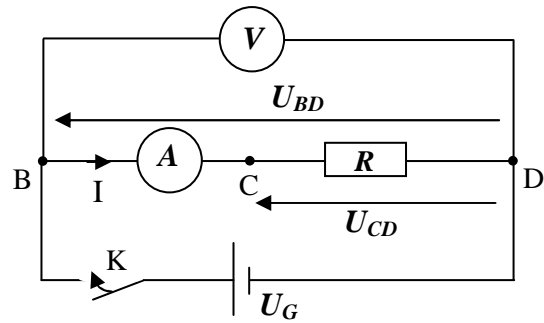


Fig.2 Montage Longue Dérivation

- ✓ Fermez l'interrupteur K.
- ✓ Abaissez le calibre de l'ampèremètre afin d'avoir la meilleure précision sur la mesure.
- ✓ Relevez U_{CD} et I_m ; calculez $R_{X1,m}$.
- ✓ Relevez pour le calibre utilisé du voltmètre, et à partir de la notice de celui-ci, la valeur de R_V .
- ✓ Déduire la valeur "vraie" R_{X1} . Calculez l'erreur systématique $\mathcal{E}_{cd,X1}$.
- ✓ Ouvrez l'interrupteur K.
- ✓ Remettez l'ampèremètre sur le plus grand calibre.
- ✓ Remplacez R_{X1} par R_{X2} .
- ✓ Fermez l'interrupteur K.
- ✓ Placez le sélecteur du voltmètre sur le bon calibre.
- ✓ Abaissez le calibre de l'ampèremètre afin d'avoir la meilleure précision sur la mesure.
- ✓ Relevez pour le calibre utilisé du voltmètre, et à partir de la notice de celui-ci, la valeur de R_V .
- ✓ Déduire la valeur "vraie" R_{X2} . Calculez l'erreur systématique $\mathcal{E}_{cd,X2}$.
- ✓ Ouvrez l'interrupteur K.

Montage longue dérivation

- ✓ Réaliser le montage de la figure-2 et suivre la même procédure que précédemment.
- ✓ Donnez alors : $R_{X1,m}$, la valeur "vraie" R_{X1} , et $\mathcal{E}_{ld,X1}$.
- ✓ Puis donnez : $R_{X2,m}$, la valeur "vraie" R_{X2} , et $\mathcal{E}_{ld,X2}$.

Conclusion :

- ✓ La valeur "vraie" R_{X1} est-elle la même en courte et longue dérivation?
 Comparer les erreurs systématiques relatives $\mathcal{E}_{cd,X1}$ et $\mathcal{E}_{ld,X1}$.
 Lequel des deux montages est plus approprié pour la mesure de R_{X1} .
 Conclure.
- ✓ La valeur "vraie" R_{X2} est-elle la même en courte et longue dérivation?
 Comparer les erreurs systématiques relatives $\mathcal{E}_{cd,X2}$ et $\mathcal{E}_{ld,X2}$.
 Lequel des deux montages est plus approprié pour la mesure de R_{X2} .
 Conclure.

Pont de Wheatstone

Rappels théoriques

Le *pont de Wheatstone* est un "*instrument de mesure*" inventé par *S. H. Christie* en 1833, puis amélioré et démocratisé par *C. Wheatstone* en 1843. Il fut longtemps utilisé pour mesurer avec précision la valeur d'une résistance électrique inconnue (R_X), par "*équilibre*" d'un circuit en *pont*.

Considérons la figure ci-contre. Le *pont de Wheatstone* est constitué d'un voltmètre V sensible (à grande impédance), et de quatre résistances : l'une inconnue, R_X , et les trois autres connues, R_2 , R_3 et R_4 (disposées comme le montre la figure).

Notons que R_2 est une résistance variable de précision (boîte AIOP à décades). Le circuit est alimenté par une tension continue U_G .

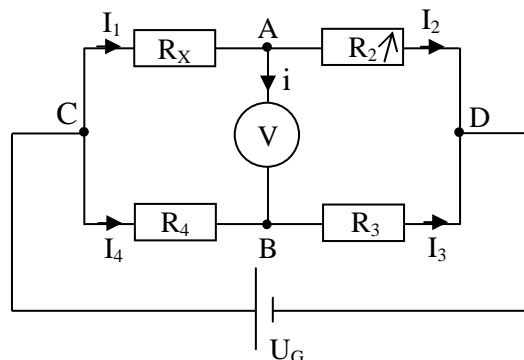


Fig.3 Montage en pont de Wheatstone

Pour des valeurs quelconques de R_X , R_2 , R_3 et R_4 , le courant i traversant le voltmètre n'est pas nul et une tension (U_{AB}) est affichée par celui-ci. Mais si nous ajustons la résistance variable R_2 convenablement, on peut annuler le courant i et alors la tension affichée par le voltmètre sera nulle ($U_{AB} = 0V$) : on dit que le "**pont est équilibré**". Et dans ce cas :

$$\begin{cases} R_X I_1 = R_4 I_4 \\ R_2 I_2 = R_3 I_3 \end{cases} \quad \text{or : } I_1 = I_2 \text{ et } I_4 = I_3 \quad \text{alors} \quad \begin{cases} R_X I_1 = R_4 I_4 \\ R_2 I_1 = R_3 I_4 \end{cases}$$

En faisant le rapport de ces deux égalités on obtient :

$$R_X = R_2 \frac{R_4}{R_3}$$

A l'origine, le *pont de Wheatstone* a été prévu pour la mesure précise de résistances inconnues. De nos jours, il sert surtout à convertir en "tension", la variation de résistance électrique d'un matériau (généralement celui-ci est un *fil* ou un *film* conducteur dont les caractéristiques électriques changent sous l'effet d'un "facteur" extérieur donné, que l'on veut justement mesurer).

C'est pour nous approcher un peu de ces intéressantes applications industrielles, que nous allons étudier l'équilibrage d'un pont de Wheatstone dans lequel les résistances R_3 et R_4 sont remplacées par deux **fils conducteurs**, CB et BD (voir figure ci-dessous).

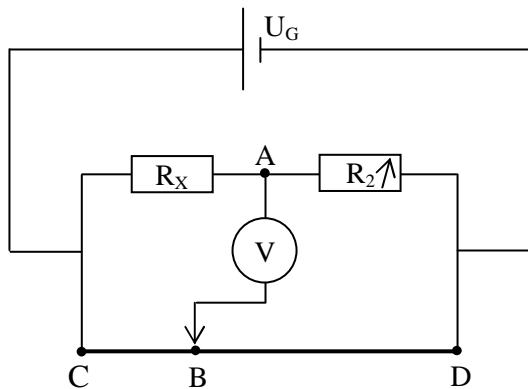


Fig.4 Pont de Wheatstone à résistances filaires

Dans ce cas, les résistances R_4 et R_3 sont remplacées par des portions de fil conducteur CB et BD de longueur respectives L_{CB} et L_{BD} , de même section S et de résistivité ρ . Nous avons :

$$R_X = R_2 \frac{R_{CB}}{R_{BD}}$$

Comme : $R_{CB} = \frac{\rho L_{CB}}{S}$ et $R_{BD} = \frac{\rho L_{BD}}{S}$ avec $S = \pi r^2$



Alors, R_X devient :

$$R_X = R_2 \frac{L_{CB}}{L_{BD}}$$

Pont de Wheatstone Manipulation

Partie A : Mesure d'une résistance de valeur inconnue

Liste du matériel

- Un générateur de tension continue, $U_G = 5V$.
- Quatre résistances :
 R_X (inconnue), R_2 (variable : boîte AIOP), $R_3 = (82\text{ k}\Omega \pm 5\%)$ et $R_4 = (330\Omega \pm 5\%)$
- Un voltmètre sensible
- Une boîte de connexion
- Des fils de connexion.

Travail à effectuer

- ✓ Réaliser le montage de la fig.3.
- ✓ Branchez "correctement" la résistance variable R_2 (l'entrée de R_2 sera la borne 0 de la boîte AIOP, et la sortie sera par la borne du calibre maximum). Vérifier que tous les boutons "calibres" de la boîte sont sur "zéro".
- ✓ Fixer le calibre du voltmètre de façon à ce qu'il corresponde à la tension maximale du circuit (tension d'alimentation utilisée).
- ✓ Allumez l'alimentation après autorisation de l'enseignant. La régler sur 5V.
- ✓ **Variez** la résistance R_2 jusqu'à "**équilibrer**" le pont de Wheatstone. Pour cela : commencer par tourner le bouton sélecteur des grands calibres ($\times 10000\ \Omega$) de la boîte AIOP; si tourner ce bouton d'un seul cran nous fait passer d'une valeur positive à une valeur négative de la tension lue sur le voltmètre, alors on le remet à zéro et on passe au calibre juste inférieur ($\times 1000\ \Omega$). On tourne alors le bouton sélecteur de ce nouveau calibre, ce qui permettra de diminuer la tension lue sur le voltmètre. Pour une position donnée de ce sélecteur, la valeur lue va basculer du + vers le -; dès que c'est le cas, revenez avec le sélecteur à la position d'avant, et passer au bouton à calibre plus bas. Continuez la procédure, jusqu'à obtenir sur le voltmètre la valeur : 0,00V (chaque fois que la tension lue par le voltmètre diminue, n'oubliez pas de passer à des calibres plus bas du voltmètre afin d'augmenter la précision de la valeur affichée). Relevez la valeur de R_2 qui a ainsi permis d'équilibrer le "pont" (relevez également son incertitude ΔR_2).
- ✓ Eteignez l'alimentation.
- ✓ Déduire la valeur de R_X ainsi que son incertitude ΔR_X .

Partie B : Equilibrage du "pont" par des résistances filaires

Liste du matériel

- Un générateur de tension continue, $U_G = 5V$.
- Deux résistances : R_X (maintenant connue), et R_2 (fixée à la valeur trouvée en **partie-A**).
- Un fil conducteur **CBD**, de résistivité ρ .
- Un curseur permettant de déplacer le point B.
- Une boîte à connexion.
- Un voltmètre sensible.
- Des fils de connexion.

Travail à effectuer

- ✓ Réalisez le montage de la fig.4, en remplaçant les résistances R_3 et R_4 par le **fil conducteur CBD**.
- ✓ Allumez l'alimentation après autorisation de l'enseignant. La régler sur 5V.
- ✓ Fixez le calibre du voltmètre de façon à ce qu'il corresponde à la tension maximale du circuit (tension d'alimentation utilisée).

- ✓ Déplacer le curseur **B** doucement afin de chercher l'équilibre du pont. Quand la valeur lue sur le voltmètre diminue de manière significative, baissez le calibre du voltmètre afin d'obtenir une meilleure précision.
- ✓ Quand la valeur affichée par le voltmètre est 0,00V, ne déplacez plus le curseur B; prenez une règle et mesurez L_{CB} et L_{BD} .
- ✓ Vérifiez alors si :

$$\boxed{\frac{R_x}{R_2} = \frac{L_{CB}}{L_{BD}}} \quad \text{pour un pont à l'équilibre}$$

N.B. L_{CB} et L_{BD} peuvent, par exemple, être les "jauges" d'un capteur industriel.

Le saviez-vous?

- ❖ Pour mesurer les **températures de l'eau de mer** à diverses profondeurs, les océanographes utilisent parfois des appareils de *siemens* basés sur l'emploi d'un pont de Wheatstone accouplé à une résistance variant avec la température.
- ❖ Certains **capteurs de pression** sont basés sur une technologie de détection utilisant le pont de Wheatstone. Celui-ci comprend un film métallique mince en acier inoxydable dont la résistivité varie avec la pression du fluide dans lequel il est immergé – c'est ce que nous appelons des jauges piézo-résistives.
(**N.B.** La **piézorésistance** est le changement de "conductibilité" d'un matériau dû à une "contrainte mécanique". Elle a été mise en évidence pour la première fois par Lord Kelvin en 1856; La piézorésistance dans les "semi-conducteurs" a été découverte sur un cristal de silicium en 1954; depuis, l'utilisation des capteurs à base de silicium s'est largement répandue car elle permet une bonne intégration des jauges de contraintes avec les circuits bipolaires ou CMOS. Beaucoup d'appareils commerciaux, comme les **capteurs d'accélération**, utilisent des jauges en silicium).
- ❖ Pour mesurer la **concentration de méthane** dans l'air des mines souterraines, on utilise des capteurs fonctionnant suivant le principe du pont de Wheatstone constitué de quatre résistances en filaments. Deux des filaments sont actifs, les deux autres sont passifs. Les filaments actifs sont enduits d'un catalyseur (de l'oxyde de palladium). Lorsque le circuit est fermé, le courant circulant dans le pont de Wheatstone oxyde le méthane sur les filaments catalytiques ce qui a pour effet d'accroître leur résistance électriques et de "déséquilibrer" le pont. Le pont, ainsi "déséquilibré", sera traversé par un courant électrique proportionnel à la nouvelle résistance des filaments, et, par conséquent, proportionnel à la quantité de méthane présent dans la mine.
- ❖ Certains capteurs de compression, mesurant la **déformation de poutres** soumises à un effort de compression, sont dotés de jauges de contraintes montées en pont de Wheatstone. Ces jauges assurent la conversion de la force en signal électrique.
- ❖ Les anciens **chromatographes en phase gazeuse** utilisaient un pont de Wheatstone au niveau de leur système de détection.
- ❖ Dans l'industrie, la **mesure des températures** est souvent pratiquée à l'aide de "**sondes** de température à résistance". Parfois cette mesure est faite au moyen d'un montage en pont de Wheatstone.

Remarque : Le principe du pont de Wheatstone est aussi employé pour mesurer avec précision la valeur d'une capacité (**pont de Sauty**) ou d'une inductance (**pont de Maxwell**). On remplacera alors la source de tension "*continue*" par une source de tension "*alternative*". À l'équilibre du pont (courant nul traversant le voltmètre), le rapport des impédances dans la branche réactive est égal au rapport des résistances.