

« Raconte-moi et j'oublierai.

Montre-moi et je me souviendrai

Laisse-moi faire et je comprendrai »

(Confucius, 551-479 av. J.C.)

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pas vu le jour sans la coopération précieuses de Mrs Nemouchi salah, Tayer Elhadi et Meziani Abdelhakim alors je tiens à les remercier pour la vérification des montages, la réalisation des mesures pour un emploi optimal du matériels, et suggestions des solutions possibles aux problèmes rencontrés lors de l'installation des T.P.

AVANT-PROPOS

Ce fascicule de travaux pratiques est destiné aux étudiants de deuxième année du système LMD Sciences et Technologie, option Electrique et électrotechnique. Son objectif est mettre à leur disposition un document de travail, leur permettant de s'imprégner de la théorie exposée en cours et de faciliter sa mise en pratique pendant les manipulations expérimentales.

Dans l'enseignement d'électronique, les activités expérimentales et donc les mesures, occupent une place importante. Aussi, est-il essentiel, non seulement d'acquérir les savoir faire indispensables à une bonne utilisation du matériel et des différents appareils de mesures employées, mais également d'aboutir à une bonne compréhension des méthodes mises en œuvre. C'est la raison pour laquelle la préparation des travaux pratiques doit être considérée avec sérieux et attention par les étudiants, afin d'en tirer le maximum de profit sans détériorer le matériel mis à leur disposition.

Le présent fascicule est organisé de la manière suivante :

Au début, des recommandations générales relatives à la rédaction des comptes rendus sont données, puis des informations concernant les étapes à respecter lors de l'élaboration d'un montage électrique. Ensuite, un exposé général sur les mesures est développé, en insistant particulièrement sur le vocabulaire employé en métrologie, les méthodes de mesures et sur les erreurs et incertitudes ainsi que leurs causes.

Puis quatre activités expérimentales sont proposées, chacune d'elles comportant :

- un complément théorique et un questionnaire de travaux pratiques, ayant pour but d'exposer les aspects essentiels et suffisants à la bonne réalisation des manipulations proposées ; l'étudiant devra, obligatoirement, en prendre connaissance, et éventuellement approfondir certaines questions lui paraissent importantes ; un questionnaire de travaux pratiques comprenant les objectifs du TP, un travail de préparation à effectuer avant la séance programmée au laboratoire ; un document comportant les réponses aux questions proposées, les tableaux de mesures nécessaires aux différents relevés, devra être obligatoirement montré en début de séance à l'enseignant, qui en tiendra compte dans son évaluation; le matériel nécessaire, sous forme d'une liste des composants et appareils requit ; les manipulations proposées, complétées d'un schéma de montage et d'un mode opératoire détaillé. En annexe, l'Etudiant trouvera un rappel sur les principales grandeurs électriques et une document basé sur le principe des boites à décades AOIP, le principe d'utilisation d'un oscilloscope.

Déroulement des séances de travaux pratiques

Les manipulations seront effectuées en binôme ou trinôme, selon le cycle des permutations définis en début de semestre.

La présence des étudiants est obligatoire et contrôlée. Toute absence non justifiée ou un compte-rendu non remis entraîneront la note de *00/20* qui sera prise en compte dans le calcul de la moyenne.

En cas d'absence, une copie du justificatif doit être remise à l'enseignant au début de la séance suivante, l'original devra être déposé au bureau du département concerné.

Il est strictement interdit de déplacer du matériel d'un poste vers un autre, en cas de panne ou en présence d'appareil défectueux, faire appeler l'enseignant.

Recommandations relatives à la rédaction des comptes rendus

Travail de préparation

Les travaux pratiques d'électrotechnique doivent être considérés avec sérieux et attention.

Dans ce but le travail de préparation, avant la séance de TP, est essentiel. Il permet de se préparer, avant les manipulations, afin de garantir un bon déroulement des activités prévues, permet de récolter et d'utiliser les informations pour ne pas être handicapé lorsqu'il faut interpréter un résultat. Chaque étudiant devra donc impérativement prendre connaissance du complément théorique et du document concernant le TP à réaliser, puis utiliser la documentation disponible (cours d'électrotechnique, ouvrage spécialisés, sites internet, etc.. .) afin de répondre aux questions de préparation. Un document comportant les réponses aux questions proposées pour le TP considéré, les tableaux de mesures nécessaires aux différents relevés, devra être obligatoirement montré par les membres du binôme en début de séance à l'enseignant (qui l'emmagasera), ce dernier sera pris en compte dans l'évaluation finale du TP. Deux comptes rendu identiques seront considérés comme fraude passible d'un conseil de discipline.

Compte-rendu

- Il sera remis au début de la séance suivante, à l'enseignant ayant encadré le TP.
- Aucun retard ne sera toléré, tout retard non justifié entraînera une pénalité sur la note du compte-rendu.
- Le compte-rendu sera rédigé sur feuilles A4 et sera restreint à quelques, les graphiques étant inclus.
- Le compte-rendu comportera impérativement les rubriques suivantes :
 - **une page de garde (pas de photocopie)** sur laquelle sera mentionné :
 - le titre de la manipulation,
 - la date de la séance du TP,
 - la section d'appartenance et le numéro du binôme (ou du trinôme),
 - le nom et prénom du rédacteur principal,
 - les noms et prénoms des participants au TP.

➤ **Une introduction**

Elle doit être personnelle et présenter brièvement de manière claire tous les objectifs du TP ainsi que le contexte expérimental, sans recopier le fascicule.

➤ **Un document de préparation**

Il devra comporter toutes les réponses aux questions proposées pour le TP considéré, ainsi que les tableaux de mesures relatifs aux différentes manipulations. Les réponses devront être brèves et tendant à l'essentiel. Il est inutile de recopier intégralement la partie théorique fournie dans le fascicule.

➤ **Manipulation**

Pour chaque manipulation, il sera nécessaire de rappeler les schémas de montage, les démarches et méthodologies suivies, les hypothèses, ainsi que les principales équations utilisées dans le cadre du TP.

➤ **Résultats et exploitation**

Les résultats expérimentaux seront présentés dans des tableaux, les procédures de calcul utilisé pour vos applications numériques devront être présentées brièvement.

Les résultats obtenus seront discutés clairement, en essayant de rechercher leur sens physique et de voir si les valeurs mesurées ou calculées sont cohérentes. Un résultat inattendu n'est pas forcément un mauvais résultat, surtout s'il est reproductible. Les commentaires doivent être scientifiquement pertinents. Lorsque l'on compare un résultat de mesure à un résultat de calcul, la différence ne s'appelle pas une erreur mais un *écart*. Une estimation des erreurs de mesures sera systématiquement accomplie et leurs conséquences sur les grandeurs calculées discutées.

➤ **Les graphes et courbes caractéristiques**

Ils seront traités par un tableur ou un logiciel adéquat pour les tracer (Excel ou autres). Aucun graphe ne sera accepté sur feuille de papier millimétré, à l'exception de ceux relevés sur oscilloscope. Ne pas oublier de préciser les noms et les unités des grandeurs représentées sur les axes et les échelles. Lorsque plusieurs courbes sont tracées sur une même figure, donner une légende claire pour chacune d'elles (par des couleurs par exemple). Sous chaque figure, indiquer explicitement sa légende complète ainsi que son numéro par ordre d'apparition dans le compte-rendu.

➤ **Conclusion générale**

Il s'agit de discuter les objectifs préalablement fixes, ont-ils été atteints ou pas, et commenter la qualité ces résultats. Elle devra comporter une conclusion par manipulation et une récapitulée l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus.

Evaluation des travaux pratiques

Les travaux pratiques seront évalués en cours de semestre, cette évaluation tiendra compte de l'**assiduité** (document de préparation non remis ou négligé, retards, départ avant la fin de la séance sans accord de l'enseignant, poste de travail non range en fin de séance, etc..), la **prestation des étudiants** le jour du TP (au sein d'un binôme, si l'un des deux étudiants effectué 80% du travail, il est évident que la note attribuée à chaque étudiants sera différente), le **comportement des Etudiants** (discipline, sérieux) pendant la séance de TP, la **rédaction des comptes rendus** (présence abusive de fautes d'orthographe, de syntaxe ou de grammaire, qualité de la présentation, clarté de la rédaction, calculs d'erreurs, clarté des courbes et des résultats, pertinence des discussions et des conclusions, etc..).

Recommandations relatives à L'Elaboration des montages Electriques

Les étapes suivantes sont à respecter impérativement lors de l'élaboration d'un montage :

- **Phase préparatoire**

- placer le schéma complet (propre et précis) du montage sur le plan de travail, qui doit être propre et range,
- choisir les différents éléments constitutifs du montage et les disposer en respectant pour chacun la disposition qu'indique le schéma pratique,
- les réglés (fonction et calibres.),
- s'assurer que tous les appareils sont sur la position « arrêt »,
- vérifier que la (ou les) tension(s) d'alimentation sont réglées sur zéro,
- l'oscilloscope est réglé et reste constamment sous tension.

- **Réalisation du câblage** (fonction par fonction)

- un seul étudiant prend en charge la totalité du montage, un deuxième le vérifie et en sera responsable,
- réaliser le câblage maille par maille, fonction par fonction, un seul conducteur à la fois en partant du générateur et allant vers le récepteur ; la longueur des conducteurs doit être appropriées et leur section compatible avec les intensités mises en jeu.
- brancher en dernier lieu l'oscilloscope et les voltmètres,
- pré-régler les alimentations et ajuster les calibres des appareils de mesure,
- faire vérifier le montage par chaque étudiant du binôme ou trinôme,
- avant la mise sous tension, faire vérifier le montage par le professeur.

- **Mise sous tension**

- respecter le protocole de mise sous tension des sources d'alimentation.

- **Modification du montage et arrêt**

- éteindre les sources de tension dans l'ordre inverse de la mise sous tension, si le fonctionnement n'est pas satisfaisant ou si une modification est nécessaire,
- effectuer la modification,
- faire vérifier le montage avant la mise sous tension

- **Règles de sécurité**

- vérifier que les normes de mise à la terre des appareils sont respectées.
- débrancher un voltmètre ou un oscilloscope du montage et non au niveau de l'appareil de mesure.

- **Ne pas oublier à la fin des manipulations**

- d'éteindre les appareils (alimentations, oscilloscopes, etc. . . .),
- de débrancher et de ranger le matériel correctement,
- de remettre les conducteurs à leur place,
- de remettre en ordre le poste de travail et de ranger les chaises correctement.

(Pour vos brouillons, papiers, etc., une corbeille est à votre disposition dans le laboratoire)

POUR TOUTES LES MANIPULATIONS, LES MONTAGES SERONT VERIFIES PAR L'ENSEIGNANT AVANT LA MISE SOUS TENSION.

Généralités sur les mesures

1. Vocabulaire et notations en métrologie

La grandeur que l'on veut mesurer est appelée la *mesurande*.

- On appelle *mesurage*, ou mesure, l'ensemble des opérations permettant de déterminer expérimentalement une ou plusieurs valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à une grandeur.

Quand on mesure la valeur de la résistance R d'un dipôle passif linéaire, la mesurande est la résistance R de ce dipôle et le mesurage est effectué, par exemple, avec un ohmmètre.

- **La valeur vraie (M_{vrai})** du mesurande est la valeur que l'on obtiendrait si le mesurage était parfait. Un mesurage n'étant jamais parfait, cette valeur est toujours inconnue.
- **Le résultat du mesurage**, ou le résultat de la mesure, est un ensemble de valeurs attribuées à une mesurande complété par toute information pertinente disponible. Une expression complète du résultat du mesurage comprend des informations sur l'incertitude de mesure qui permet d'indiquer quel est l'intervalle des valeurs probables du mesurande. En métrologie, on appelle souvent **m , la mesure** de la valeur de la grandeur (un nombre), et **M , le résultat** de la mesure, c'est à dire l'expression complète du résultat (un intervalle de valeurs).
- Un mesurage n'étant jamais parfait, il y a toujours une **erreur de mesure**, définie comme la différence entre la valeur mesurée d'une grandeur et une valeur de référence. Si la valeur de référence est la valeur vraie du mesurande l'erreur est inconnue. L'erreur de mesure ne peut être donc qu'estimée, cependant une conception rigoureuse de la chaîne de mesure et du choix des instruments de mesure permet de déduire l'erreur de mesure et donc **l'incertitude** sur la valeur vraie.
- **L'incertitude d'une mesure** est un paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées à la mesurande.
- **Un étalon de mesure** est un dispositif auquel on doit se fier pour contrôler l'exactitude du résultat fournis par un appareil de mesure. Les seuls mesurandes dont la valeur est parfaitement connue sont les grandeurs étalons puisque leur valeur est fixée par convention.
- **Une unité de mesure** est une grandeur particulière, définie et adoptée par convention, à laquelle on compare les autres grandeurs de même nature pour les exprimer quantitativement, c'est-à-dire par une valeur, par rapport à cette grandeur.

Remarque : Le mot *mesure* dans la langue française courante plusieurs significations. C'est la raison pour laquelle le mot mesurage a été introduit pour qualifier l'action de mesurer.

2. Méthodes de mesure

On distingue les **méthodes de laboratoire** où l'on prend des précautions appropriées pour réduire les influences parasites et auxquelles on demande souvent une grande précision, des **méthodes industrielles** qui permettent d'obtenir des résultats rapidement et par des moyens simples.

Les principales méthodes de mesure sont :

- **Les méthodes directes**

On détermine la valeur de la grandeur mesurée directement de l'appareil de mesure.

Exemple : L'intensité d'un courant mesuré par un ampèremètre

- **Les méthodes indirectes**

Les déviations de plusieurs appareils de mesure permettent de déterminer la valeur inconnue. En effet, on mesure les grandeurs inconnues par l'application de certaines lois physiques.

Exemple : On peut déterminer la valeur d'une résistance, en application la loi d'Ohm, par la mesure de la tension et du courant qui la traverse.

Selon les procédés employés on considère encore :

- **Les méthodes de déviation** : on lit la déviation de l'appareil de mesure et cette valeur intervient dans les calculs, comme par exemple la détermination d'une résistance au moyen d'un ohmmètre.
- **Les méthodes de zéro** : lorsque le réglage est terminé, aucun courant ne circule dans l'appareil de mesure, et l'on peut alors déterminer la grandeur mesurée par une relation adéquate (l'exemple typique en est la mesure de résistance à l'aide d'un pont de Wheatstone).
- **Les méthodes de faux zéro** : lorsque le réglage est terminé, un même courant circule dans l'appareil de mesure lorsque l'on ouvre ou ferme le circuit d'une branche du circuit. On se limite à constater que la déviation de l'appareil de mesure ne varie pas et cela sans en faire la mesure.
- **Les méthodes d'opposition** : on oppose une f.é.m. ou une d.d.p à celle existant aux bornes d'une résistance réglable traversée par un courant (mesure précise de tensions).
- **les méthodes potentiométriques** : ce sont des méthodes d'opposition pour lesquelles la valeur numérique de la résistance réglable est un multiple de la tension à mesurer.

3. Causes d'erreurs

Le résultat d'une mesure est toujours entaché d'une imprécision due à des erreurs d'origine diverses. On constate par exemple que :

- la mesure d'une grandeur dépend de l'appareil utilisé ;
- la lecture sur un appareil de mesure exige certaines précautions pour éviter, en outre une erreur de parallaxe ;
- le branchement d'un appareil de mesure modifie la grandeur que l'on désire mesurer.

Ces quelques considérations suffisent à montrer que toute mesure d'une grandeur est nécessairement imparfaite et comporte une certaine erreur.

3.1 Nature des erreurs de mesure

L'erreur commise lors d'une mesure n'est évidemment jamais connue, sinon on aurait **accès** à la valeur vraie. Mais il est important de rechercher les causes d'erreur pour essayer de les réduire ou encore estimer la **confiance** que l'on peut accorder au résultat d'une mesure.

Aussi, on distingue les erreurs en les classant selon leurs natures, on définit alors :

- **Les erreurs systématiques** : ce sont des erreurs reproductibles reliées à leur cause par une loi physique, donc susceptible d'être éliminées par des corrections convenables. Elles se produisent systématiquement lorsque l'on utilise un instrument de mesure et qui est due par exemple à un mauvais réglage du zéro ou à un étalonnage imparfait.
- **Les erreurs accidentelles** ou aléatoires : elles obéissent à des lois statistiques car ce sont des erreurs non reproductibles et se produisent de façon imprévisible. Elles résultent d'une fausse manœuvre, d'un mauvais emploi ou d'un dysfonctionnement de l'appareil. Elles ne sont pas prises en compte dans la détermination de la mesure.

3.2 Causes des erreurs de mesure

Plusieurs causes d'erreur peuvent intervenir dans le résultat d'une mesure, parmi elles trois grandes causes sont prises en considération. Ce sont les erreurs dues :

- aux appareils de mesures employés ;
- à l'opérateur effectuant la mesure ;
- à la méthode de mesure.

3.2.1 Erreurs dues à l'instrument de mesure

Un appareil de mesure n'est jamais parfait, il présente suivant sa qualité et par suite son **prix**, des défauts plus ou moins importants. Ces défauts peuvent avoir pour cause la présence de frottement dans les pivots, un défaut d'équilibrage, l'influence des mesures antérieures ou de grandeurs extérieures telles que la température, un champ magnétique. Il en résulte que l'indication donnée par l'instrument est plus ou moins éloignée de la valeur vraie.

3.2.2 Erreurs dues à l'opérateur

L'opérateur effectuant une mesure, n'est pas plus parfait que l'appareil de mesure qu'il utilise.

Il peut, par exemple, serrer insuffisamment une borne assurant une connexion, ou choisir un appareil ou un calibre peu favorable à la mesure.

Mais ces erreurs étant grossières et par suite pouvant être évitées, l'erreur essentielle que commet l'opérateur se situe au niveau de la lecture. En effet pour un appareil à déviation, la lecture se fait en repérant la position d'une aiguille devant une graduation, or l'aiguille s'immobilise en général entre deux traits de la graduation. Il en résulte forcément une erreur, l'opérateur étant obligé à estimer une fraction de division.

Mais, l'opérateur peut également commettre une erreur supplémentaire, s'il ne se place pas à la verticale de l'aiguille pour un appareil placé horizontalement. Cette erreur, de nature accidentelle, est dite **erreur de parallaxe**.

A l'ensemble de ces causes correspond l'erreur de lecture de nature accidentelle, mais il est à noter qu'il peut se produire une erreur systématique, il suffira que l'opérateur occupe une mauvaise position **pour** effectuer toutes les lectures.

Remarquons également que théoriquement, un appareil à affichage numérique n'entraîne aucune erreur de lecture.

3.2.3 Erreurs dues à la méthode de mesure

L'introduction d'un appareil de mesure dans un circuit électrique en perturbe nécessairement le fonctionnement et ainsi il apparaît une erreur sur la grandeur que l'on désire connaître.

Par exemple :

- l'utilisation d'un ampèremètre, en série dans un circuit, modifie l'intensité du courant;
- le branchement d'un voltmètre, en parallèle avec un élément, modifie la tension entre ses bornes.

De nombreuses méthodes de mesure entraînent ainsi une erreur qui se produit nécessairement quelle que soit l'habileté de l'opérateur et les qualités des instruments. Il s'agit d'une erreur systématique qu'il est possible de calculer.

On remarque qu'avec des appareils suffisamment performants, la plupart des méthodes entraîne une erreur négligeable devant les autres erreurs.

4. Caractéristiques des instruments de mesure

4.1 Justesse ou précision

On dit qu'un appareil est d'autant plus juste que l'erreur qu'il commet est plus faible, ainsi la **justesse** est une qualité essentielle d'un instrument de mesure.

4.2 Fidélité

Un appareil de mesure est d'autant plus **fidèle** qu'il fournit des indications plus voisines lorsque l'on effectue plusieurs mesures de la même grandeur immuable, même si ces mesures sont éloignées dans le temps.

4.3 Gamme de mesure

La gamme de mesure, ou étendue de mesure, est l'ensemble des valeurs du mesurande pour les quelles un instrument de mesure est supposé fournir une mesure correcte.

Pour les appareils à gamme de mesure réglable, la valeur maximale de l'étendue de mesure est appelée pleine échelle.

4.4 Rapidité, temps de réponse

C'est l'aptitude d'un instrument de mesure à suivre les variations de la grandeur à mesurer.

Dans le cas d'un échelon de la grandeur entraînant la croissance de la mesure, on définit le temps de réponse à 10% : c'est le temps nécessaire pour que la mesure croisse, à partir de sa valeur initiale jusqu'à rester entre 90 % et 110 % de la variation totale.

4.5 Bande passante

La bande passante est de la bande de fréquence pour laquelle le gain de l'instrument de mesure est compris entre deux valeurs.

4.6 Grandeur d'influence et compensation

On appelle grandeur d'influence, toutes les grandeurs physiques autres que la grandeur à mesurer, susceptibles de perturber la mesure. Généralement, la température est la grandeur d'influence qui est le plus souvent rencontrée.

4.7 Classe de précision

La classe de précision est donnée par le constructeur de l'appareil, elle exprime l'imperfection des appareils de mesure.

La classe de précision d'un appareil de mesure correspond à la valeur en % du rapport entre la plus grande erreur possible sur l'étendue de mesure :

$$\text{Classe (\%)} = 100 \cdot \frac{\text{plus grande erreur possible}}{\text{étendue de mesure}}$$

Cette indication se trouve, en général, sur l'appareil ou dans le catalogue, les valeurs usuelles sont en général : 0.1 ; 0.2 ; 0.5 ; 1 ; 2 ou 2.5

Ainsi, connaissant la classe de précision d'un appareil, qui est la même pour tous ses calibres, il est possible de calculer l'incertitude ΔX sur une mesure effectuée avec cet appareil :

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

Pour les appareils numériques, les constructeurs définissent la résolution par la formule suivante :

$$\text{Resolution} = \frac{\text{Gamme de mesure}}{\text{nombre de points de la mesure}}$$

5. Les incertitudes de mesures

On appelle **incertitude de mesure** ΔX , la limite supérieure de la valeur absolue de l'écart entre la valeur mesurée et la valeur exacte du mesurande. En pratique, on ne peut qu'estimer cette incertitude.

On distingue deux types d'incertitudes :

- l'**incertitude absolue** ΔX , exprimée dans la même unité que la grandeur mesurée
- l'**incertitude relative** ($\delta X = \Delta X / X$), exprimée généralement en pourcentage (%).

5.1 Incertitude absolue instrumentale

L'incertitude instrumentale est l'incertitude due à l'appareil de mesure. Elle est fonction de la précision de l'appareil et elle est présentée de la manière suivante :

Pour un appareil à déviation

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

L'incertitude relative peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{\Delta X_{inst}}{X} = \frac{\text{Classe}}{100} \cdot \frac{\text{Calibre}}{X}$$

Or le rapport (Calibre / X) est égal au quotient du nombre total de divisions de la graduation par le nombre de division correspondant à la lecture, d'où l'expression :

$$\frac{\Delta X_{inst}}{X} = \frac{Classe \ Echelle}{100 \cdot Lecture}$$

Exemple : Une mesure de tension est réalisée à l'aide d'un voltmètre de classe 0.5%. La mesure est faite avec le calibre 30 Volts avec une déviation de 120 divisions sur l'échelle comportant 150 divisions. La valeur mesurée est donc :

$$U = \frac{Calibre}{Echelle} \cdot Lecture = \frac{30}{150} \cdot 120 = 24 \text{ Volts}$$

Le calcul de l'incertitude absolue due à l'appareil de mesure donne :

$$\Delta U_{inst} = \frac{0,5}{100} \cdot 30 = 0,15 \text{ Volts}$$

La valeur de l'incertitude relative correspondante est donc :

$$\delta U_{inst} = \frac{\Delta U}{U} = \frac{0,15}{24} \approx 0,006 = 0,6\% \text{ ou encore } \delta U = \frac{0,5}{100} \cdot \frac{150}{120} \approx 0,006 = 0,6\%$$

L'expression de l'incertitude relative, calculée à partir de la lecture et du nombre total de déviation, montre que la courbe $(\delta X_{inst}) = f(n)$, n représentant le nombre de division correspondant à la lecture en divisions, est une hyperbole équilatérale identique pour tous les calibres (figure 1.), il en résulte que :

- dans la première moitié de la graduation l'incertitude relative prend une valeur élevée et souvent inadmissible ;
- pour utiliser au mieux un appareil de mesure, il faut le brancher sur le calibre correspondant à la plus grande déviation possible.

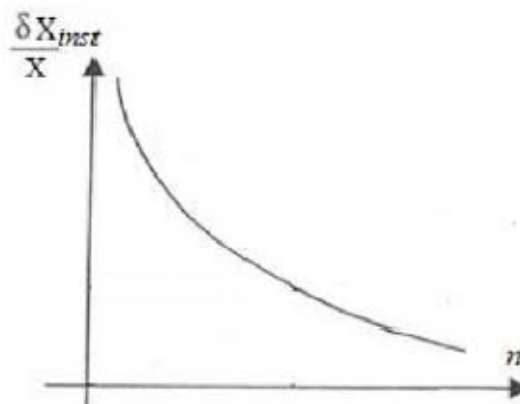


Figure 1. Courbe de l'erreur relative instrumentale en fonction de la lecture

Pour les appareils à affichage numérique, la notion de classe n'est pas définie, mais les constructeurs fournissent une indication sur la précision qui nous permet de calculer l'incertitude totale sur la mesure. L'incertitude est très souvent donnée en % de la lecture plus ou moins une constante exprimée en unités ou en digits de la manière suivante :

$$\Delta X = y\% + z \text{ unités}$$

y % représentant un premier terme proportionnel à la lecture X

Le coefficient z représente le second terme constant et égal à :

$$z \cdot \frac{Gamme \text{ utilisée}}{\text{nombre de points de l'appareil}}$$

En général z a pour valeur : 0.5 ; 1 ou quelques unités.

Exemple : Soit une mesure de tension est mesurée à l'aide d'un voltmètre numérique à trois afficheurs et possédant 300 points et présentant une précision de $(0.2\% \pm 1 \text{ unité})$. La mesure est faite dans la gamme 30 Volts, la lecture relevée est de 24 Volts.

Sur la gamme 30 Volts, on a la résolution : $1 \text{ unité} \Rightarrow 300/30 = 0.1 \text{ Volt}$

L'incertitude absolue ΔU due à l'erreur de l'appareil comporte deux termes :

Le premier terme étant égal à :

$$\left(\frac{y}{100}\right) \cdot U = \left(\frac{0,2}{100}\right) \cdot 24 = 0,048 \text{ Volt}$$

Alors que le second est lui égal à :

$$z \cdot \frac{\text{Gamme utilisée}}{\text{nombre de points}} \cdot U = 1 \cdot \left(\frac{30}{300}\right) = 0,1 \text{ Volt}$$

D'où

$$\Delta U = 0,048 + 0,1 \text{ unités} = 0,148 \approx 0,15 \text{ Volt}$$

et l'incertitude relative correspondante est donc :

$$\delta U = \frac{\Delta U}{U} = \frac{0,15}{24} \approx 0,006 = 0,6\%$$

Dans l'expression de l'incertitude absolue, le second terme est en général le plus important et comme il est de la forme (Gamme / Nombre de points) on a intérêt, pour faire une mesure, à choisir la plus petite gamme possible.

Remarque : Pour les appareils à affichage numérique, il n'est pas tenu de calculer

L'incertitude sur la lecture due à l'opérateur, cette incertitude est déjà prise en considération dans la précision de l'appareil.

5.2 Incertitude absolue due la lecture

Cette incertitude est due à la lecture de l'opérateur, notée $\Delta X_{\text{opérat}}$, elle est calculée en admettant que le quart de division est estimable, ce qui est relativement aisé, on a donc :

$$\Delta X_{\text{opérat}} = \frac{1}{4} \cdot \text{division}$$

Soit en utilisant la même unité que la grandeur mesurée :

$$\Delta X_{\text{opérat}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\text{Calibre}}{\text{Echelle}}$$

Quant à l'incertitude relative, elle peut s'écrire :

$$\delta X_{\text{opérat}} = \frac{\Delta X_{\text{opérat}}}{X} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\text{Calibre}}{\text{Echelle} \cdot X} \quad \text{or} \quad \frac{\text{Calibre}}{X} = \frac{\text{Echelle}}{\text{Lecture}}$$

Donc :

$$\delta X_{\text{opérat}} = \frac{\Delta X_{\text{opérat}}}{X} = \frac{1}{4 \cdot \text{Lecture}}$$

Elle est inversement proportionnelle à la lecture en divisions, si bien, que la encore, on a intérêt à choisir le calibre correspondant à la plus grande déviation possible.

5.3 Incertitude absolue totale

Cette incertitude, notée ΔX_{totale} , est la somme des incertitudes instrumentale, due à l'opérateur et à la méthode employée :

- pour les appareils à déviation :

$$\Delta X_{\text{totale}} = \Delta X_{\text{inst}} + \Delta X_{\text{opérat}} + \Delta X_{\text{méth}}$$

- pour les appareils à affichage numérique:

$$\Delta X_{\text{totale}} = \Delta X_{\text{inst}} + \Delta X_{\text{méth}}$$

6. Approche statistique élémentaire

Si on répète plusieurs fois, dans les mêmes conditions, la mesure d'une grandeur X , les nombres X_i , que l'on obtient sont, en général, légèrement différents. On adopte couramment pour la valeur approchée X_m la **moyenne arithmétique** des différents nombres X_i :

$$X_m = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}$$

Où n est le nombre de mesures effectuées.

L'incertitude absolue est alors, en première approximation : $\Delta X = \max |X_i - X_m|$

7. Règles de calcul générales des incertitudes

Supposons que des mesures ont données des valeurs x , y et z avec des incertitudes absolues instrumentales Δx , Δy et Δz . Considérons la fonction $f(x, y, z)$ dont on veut calculer Δf

1ère étape : Exprimer la différentielle :

$$df = \frac{\delta f}{\delta x} \cdot dx + \frac{\delta f}{\delta y} \cdot dy + \frac{\delta f}{\delta z} \cdot dz$$

2ème étape : Calcule Δf en faisant une majoration de la différentielle df :

$$\Delta f = \left| \frac{\delta f}{\delta x} \right| \cdot \Delta x + \left| \frac{\delta f}{\delta y} \right| \cdot \Delta y + \left| \frac{\delta f}{\delta z} \right| \cdot \Delta z$$

Lorsque la fonction f se présente sous forme d'un produit ou d'un quotient, on est conduit à des calculs un peu plus simples en utilisant la différentielle logarithmique.

Exemple :

$$f(x, y) = \frac{x + y}{x \cdot y}$$

1ère étape : Expression de la différentielle :

$$df = \frac{\delta f}{\delta x} \cdot dx + \frac{\delta f}{\delta y} \cdot dy = \frac{y^2}{(x + y)^2} \cdot dx + \frac{x^2}{(x + y)^2} \cdot dy$$

2ème étape : on calcule Δf :

$$\Delta f = \left| \frac{\delta f}{\delta x} \right| \cdot \Delta x + \left| \frac{\delta f}{\delta y} \right| \cdot \Delta y = \frac{y^2}{(x + y)^2} \cdot \Delta x + \frac{x^2}{(x + y)^2} \cdot \Delta y$$

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{y}{(x + y)} \cdot \frac{\Delta x}{x} + \frac{x}{(x + y)} \cdot \frac{\Delta y}{y}$$

- **Règles de calcul particulières**

- **Somme:**

$$f(x, y) = x + y \Rightarrow df = dx + dy \Rightarrow \Delta f = \Delta x + \Delta y \Rightarrow \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta x + \Delta y}{x + y}$$

- **Différence :**

$$f(x, y) = x - y \Rightarrow df = dx - dy \Rightarrow \Delta f = \Delta x + \Delta y \Rightarrow \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta x + \Delta y}{x - y}$$

Dans le cas d'une somme ou une différence, les incertitudes absolues s'ajoutent.

- **Produit :**

$$f(x, y) = x \cdot y \Rightarrow df = y \cdot dx + x \cdot dy \Rightarrow \Delta f = y \cdot \Delta x + x \cdot \Delta y \Rightarrow \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$$

- **Quotient :**

$$f(x,y) = \frac{x}{y} \quad df = \frac{1}{y} \cdot dx + \frac{x}{y^2} \cdot dy \Rightarrow \Delta f = \frac{1}{y} \cdot \Delta x + \frac{x}{y^2} \cdot \Delta y$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$$

Dans le cas d'un produit ou d'un quotient les incertitudes relatives s'ajoutent,

Exemple :

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad \Rightarrow \quad \Delta I = \Delta I_1 + \Delta I_2 + \Delta I_3$$

$$P = R \cdot I^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta R}{R} + 2 \cdot \frac{\Delta I}{I}$$

8. Chiffres significatifs et présentation d'un résultat de mesure

8.1 Chiffres significatifs

Dans un nombre les chiffres qui veulent vraiment dire quelques choses sont dits significatifs, au-delà de ces chiffres, la précision qu'apporteraient d'autres chiffres serait illusoire.

On rappelle que tous les zéros à gauche d'un nombre ne sont pas significatifs, par contre les zéros à droite d'un nombre sont significatifs.

Il est nécessaire d'arrondir le résultat obtenu par un calcul afin de l'exprimer avec une précision égale à celle de la donnée utilisée la moins précise.

Pour une addition ou une soustraction, le résultat ne doit pas avoir plus de décimales que la donnée qui en a le moins. Pour une multiplication ou une division, le résultat ne doit pas avoir plus de chiffres significatifs que la donnée qui en a le moins.

Exemples :

$25,42 \times 72,5 = 1,84 \cdot 10^3$		
25,42	72,5	1,84.10 ³
4 chiffres significatifs	3 chiffres significatifs	3 chiffres significatifs

L'arrondi d'un nombre est une valeur approchée de ce nombre obtenue, à partir de son développement décimal, en réduisant le nombre de chiffres significatifs. Par exemple, le nombre 73 peut être arrondi la dizaine la plus proche en 70, parce que 73 est plus proche de 70 que de 80.

Plusieurs méthodes peuvent être employées pour arrondir un nombre.

- **Arrondi** au plus proche (ou arrondi arithmétique)

Cette méthode est la plus courante, elle consiste à :

- choisir le dernier chiffre (à droite) à conserver,
- augmenter ce chiffre d'une unité si le chiffre suivant vaut au moins 5,
- conserver ce chiffre si le suivant est strictement inférieur à 5.

Exemples :

3,046	arrondi au centième vaut :	3,05
1,349	arrondi au dixième devient :	1,3
1,350	arrondi au dixième devient :	1,4

:En pratique la méthode consiste à séparer les dix chiffres décimaux (0, 1.. .9) en deux parties :

- les cinq premiers : 0, 1, 2,3 et 4, pour lesquels on passe à la valeur inférieure ;
- les cinq suivants : 5,6, 7, 8 et 9, pour lesquels on passe à la valeur supérieure.

Cette méthode limite l'accumulation d'erreurs lors de calculs successifs.

- **Arrondi au pair le plus proche** (ou arrondi au chiffre pair)

Si quatre (ou un chiffre inférieur) est le chiffre qui suit la décimale à laquelle le nombre doit être arrondi, alors la décimale reste inchangée. Alors que si le chiffre suivant la décimale est six ou plus, la décimale est augmentée d'une unité. Enfin si le chiffre suivant est le chiffre cinq lui-même suivi par des chiffres différents de zéro, alors la décimale sera augmentée d'une unité, tandis que si cinq n'est suivi d'aucun chiffre (ou que par des zéros) alors la décimale est augmentée d'une unité lorsqu'elle est impaire et reste inchangée sinon.

Cette méthode est employée afin délimiter le biais qui surviendrait en arrondissant à chaque fois par excès les nombres dont le dernier chiffre est cinq.

Exemples:

3,046 arrondis aux centièmes devient : 3,05 (6 est supérieur ou égal à 6)

3,043 arrondis aux centièmes devient : 3,04 (3 est inférieur ou égal à 4)

3,045 arrondis aux centièmes devient : 3,04 (le dernier chiffre est 5 et 4 est pair)

3,015 arrondis aux centièmes devient : 3,02 (le dernier chiffre est 5 et 1 est impair)

Attention : lors de conversions d'unités ou de passage d'unités à leurs multiples ou sous multiples, il faut veiller à la conservation du nombre de chiffres significatifs.

Exemples :

$$m = 11,6 \text{ kg} = 11,6 \cdot 10^3 \text{ g (3 chiffres significatifs)}$$

mais pas 11600 g (5 chiffres significatifs) ;

$$v = 2,75 \text{ m}^3 = 2,75 \cdot 10^6 \text{ mL (3 chiffres significatifs)}$$

mais pas 2 750 000 L (7 chiffres significatifs).

Dans la grande majorité des cas, on limite à un le nombre de chiffres significatifs de l'incertitude. Alors que pour l'estimation de la grandeur mesurée, on prend comme dernier chiffre significatif, celui ayant la même position (au sens numération) que celui de l'incertitude.

En général, un résultat de mesure donne avec 3 chiffres significatifs suffit pour les mesures ordinaires. Il est conseillé d'effectuer les calculs intermédiaires avec un nombre de chiffres significatifs plus élevés pour éviter les arrondis de calcul, par contre, il faut arrondir le résultat final au même nombre de chiffres significatifs que celui adopté lors de la mesure initiale.

8.2 Ecriture d'un résultat

L'écriture du résultat d'un mesurage doit intégrer l'incertitude et s'écrire avec les unités appropriées. Un résultat de mesure peut être exprimé de plusieurs manières différentes, en utilisant l'incertitude absolue ou l'incertitude relative, tout en respectant le nombre de chiffres significatifs.

Ecriture

$$X = (x \pm \Delta x) \text{ unité}$$

$$(x - \Delta x) \text{ unité} \leq X \leq (x + \Delta x) \text{ unité}$$

$$X = x \text{ unité avec } \delta X \text{ en } \%$$

Exemple

$$R = (89,4 \pm 0,9) \Omega$$

$$88,5 \Omega \leq R \leq 90,3 \Omega$$

$$R = 89,4 \Omega \text{ avec } 1 \%$$

TP No 01

MESURE DE RESISTANCES

Complément théorique

La résistance peut être mesurée directement par un ohmmètre ou indirectement par un montage voltampèremétrique. Elle peut être mesurée avec précision à l'aide d'un pont de Weatstone.

1. Les différents types de résistances

Il est possible de classer les résistances en trois catégories :

- les résistances des conducteurs passifs, dites résistances mortes, par exemple les fils de connexions, les éléments chauffants des appareils électroménagers, les résistances étalons, les résistances variables telles que les rhéostats . . . ;
- les résistances des dipôles actifs, celles des générateurs et des récepteurs : moteurs électriques, batterie d'accumulateurs ;
- , les résistances parasites, comme les résistances d'isolement, les résistances des prises de terre, ce sont des résistances mortes, mais ni localisées, ni isolables.

2. Classification des résistances

La méthode de mesure d'une résistance dépend de la précision avec laquelle on veut la connaître, mais surtout de son ordre de grandeur. Il en découle un classement approximatif mais pratique partageant les résistances en trois catégories selon leur valeur: les résistances faibles, les résistances moyennes et les résistances grandes (figure 1).

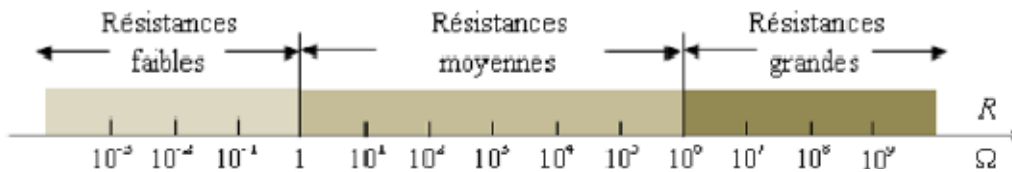


Figure 1. Classification des résistances selon leur ordre de grandeur

3. Marquage des résistances au carbone ou à couche de métal

Les résistances au carbone sont constituées d'une poudre de carbone et de résine synthétique, leur valeur est peu stable, mais elles présentent l'avantage d'être bon marché. Quant aux résistances à couche de métal, elles sont réalisées par un dépôt de métal ou de carbone sur un bâtonnet de stéatite, l'ensemble étant enrobé d'email. Ces dernières sont très stables, mais plus onéreuses que les résistances au carbone. La valeur et la précision de ces types de résistances est habituellement indiquée sur le composant sous forme d'anneaux de couleurs (figure 2).

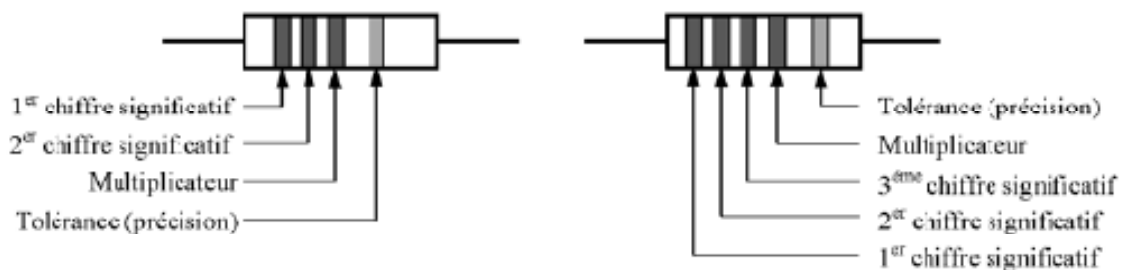


Figure 2. Identification des résistances avec le code des couleurs

Le codage peut être réalisé avec quatre ou cinq anneaux. A chaque couleur d'anneau correspond un chiffre, selon une table de correspondance normalisée (figure 3). Certains anneaux de couleur permettent de définir la valeur de base du composant, un anneau définit le facteur de multiplication à appliquer à la valeur de base, un autre peut définir sa tolérance (précision).

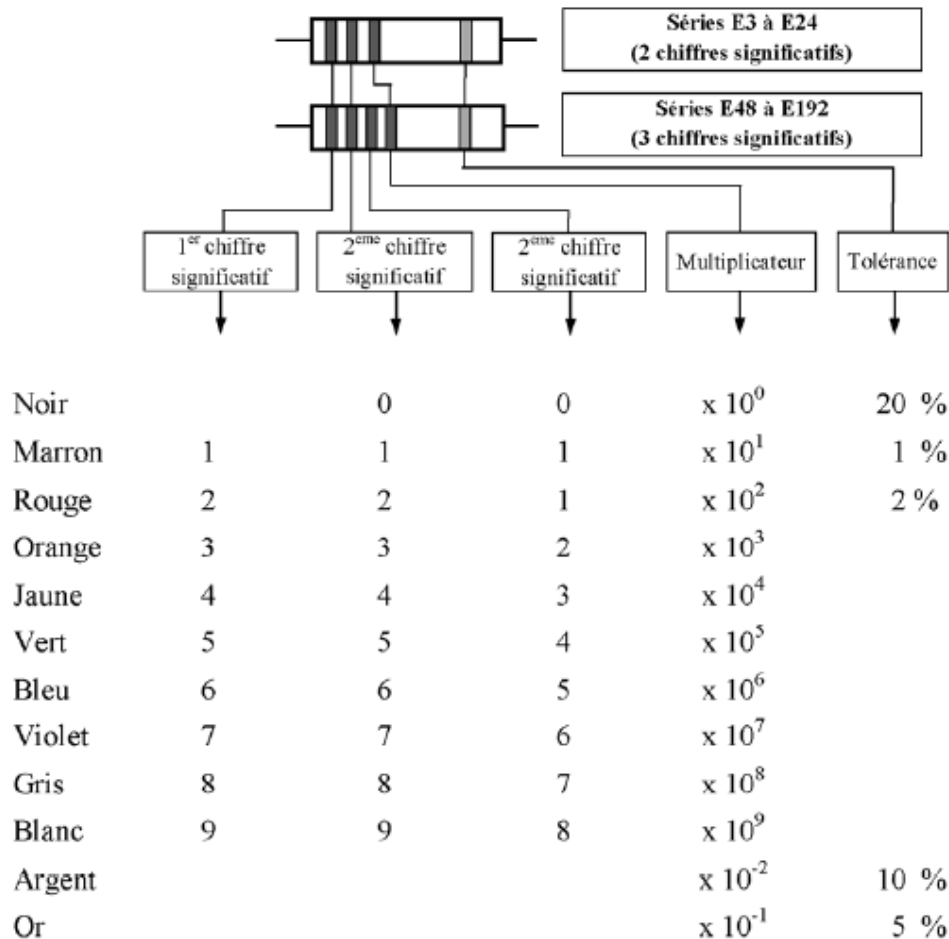


Figure 3. Marquage des résistances avec le code des couleurs

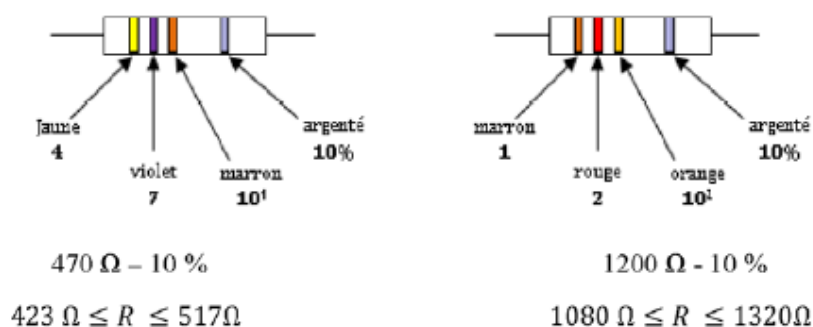


Figure 4. Exemple d'identification de la valeur d'une résistance avec le code des couleurs

Les résistances sont disponibles pour des puissances maximales de 1/8ème de Watt, jusqu'à quelques dizaines de watts. Les puissances les plus couramment employées étant 1/4W, 1/2W, 1W, 5W et 10W.

4. Mesure directe à l'ohmmètre

C'est une mesure directe, utilisant un instrument gradué en ohms qui nécessitent une alimentation par piles. Cette fonction est offerte par un appareil de mesure particulier, le multimètre, également appelé *contrôleur universel*. Il est utilisé pour faire différentes mesures électriques, tels que les mesures de tensions et courants continus, alternatifs et de résistances.

Il combine donc, en un seul instrument, les fonctions d'un voltmètre, d'un ampèremètre et d'un ohmmètre, mais peut également avoir d'autres fonctions telles que :

- le test de continuité ;
- la mesure de la capacité d'un condensateur ou d'un circuit capacitif ;
- la mesure de l'inductance d'une bobine ou d'un circuit inductif (self) ;
- la mesure de température, avec l'aide d'une sonde extérieure ;
- le test de diodes et la mesure de gain des transistors (h_{fe}) .

Ils sont de types : analogique (à aiguille) ou numérique (affichage à cristaux liquides), quelques modèles combinant les deux types d'affichage. La figure 5 montre les deux modèles de multimètre, on y reconnaît les commutateurs rotatifs de sélection de fonction (voltmètre, ampèremètre, ohmmètre..), les différents calibres et les bornes de raccordement des cordons.

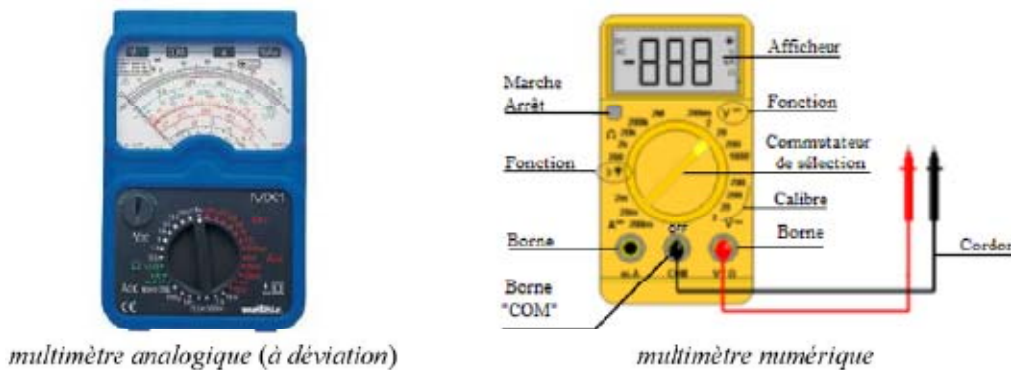


Figure 5. Présentation modèles de multimètres

Pour l'utiliser en ohmmètre, il faut débrancher la charge, dont on désire mesurer la résistance du circuit électrique dans laquelle elle est connectée, et placer l'ohmmètre à ses bornes.

L'appareil, grâce à sa pile interne, va fait circuler un très faible courant dans la charge et mesurera la tension obtenue pour en déduire la résistance.

➤ Mesure à l'ohmmètre à déviation

La figure 6 montre les différentes graduations d'un ohmmètre à déviation, on y constate que :

- le zéro de la graduation en ohms correspond à la déviation maximale,
- la déviation nulle correspond à une résistance nulle (circuit ouvert),
- plus la déviation est importante, plus les divisions sont serrées.



Figure 6. Graduations d'un ohmmètre à déviation

Ce type d'appareil comporte un commutateur de gamme (calibre) par exemple : (x1), (x10) et (X100), pour permettre la mesure de résistance dans une large plage. En effet, on montre pour un appareil à déviation, que seule la région centrale est utilisable, si l'on désire que le résultat ne soit pas trop erroné. La précision d'une mesure de résistance avec l'ohmmètre à aiguille est de l'ordre de 5 à 10 %, et par conséquent en pratique, elle ne permet que l'évaluation de l'ordre de grandeur de la résistance mesurée, afin d'orienter par exemple le choix d'une méthode plus précise.

Cependant, cet appareil est encore très fréquemment employé lorsque l'on désire vérifier la continuité d'un conducteur ou d'un circuit, s'assurer de l'absence de court-circuit ou la coupure accidentelle dans un montage.

Avant chaque mesure, il est nécessaire de **tarer** l'appareil de la manière suivante :

- mettre en court-circuit les bornes, ce qui implique ($R_x = 0$),
- régler la valeur du potentiomètre destiné à cet usage, de telle sorte que l'aiguille coïncide avec le zéro de l'échelle des résistances.

Afin d'effectuer une mesure correcte, les différentes étapes à respecter sont :

- placer le commutateur sur la position « ohmmètre » et sélectionner la plus petite gamme de mesure,
- brancher la résistance à mesurer entre les bornes de l'appareil, généralement notées [COM] et [Ω] (en prenant garde de ne pas la shunter avec les doigts, ce qui fausserait la mesure) et réaliser une première mesure,
- choisir, compte tenu de cette première lecture, la gamme pour laquelle la position de l'aiguille est proche de la moitié de la déviation maximale, puis faire la mesure définitive.
- Après usage, ne pas oublier d'éteindre l'appareil en plaçant le commutateur central sur la position OFF.

➤ Mesure à l'ohmmètre numérique

Ce sont désormais les modèles les plus répandus, tant pour un usage professionnel que grand public, ce qui ne signifie pas que leurs homologues analogiques, à aiguille, soient tous obsolètes. Leur précision, de l'ordre de 1 %, est meilleure que celle des appareils analogiques.

Certains appareils sont marqués **autorange**, ou **auto ranging**, c'est-à-dire qu'ils choisissent automatiquement le calibre approprié à la mesure.

Le tarage n'est pas nécessaire, aussi lors d'une mesure les différentes étapes à respecter sont :

- placer le commutateur sur la position (ohmmètre) et sélectionner la plus petite gamme de mesure,
- brancher la résistance à mesurer entre les bornes de l'appareil et réaliser une première mesure, changer de gamme s'il y a dépassement (dans ce cas l'appareil indique « 1 »),
- choisir, compte tenu de cette première lecture, la gamme appropriée à la valeur de la résistance, puis faire la mesure définitive.
- après usage, ne pas oublier d'éteindre l'appareil.

5. Mesure par la méthode voltampéremétrique

Il s'agit d'évaluer rapidement et avec des moyens simples, la valeur d'une résistance passive, par l'application de la loi d'Ohm en courant continu. Son principe repose sur les mesures du courant traversant la résistance à déterminer et celle de la tension entre ces bornes.

Deux montages sont envisageables suivant la position du voltmètre par rapport à celle de l'ampèremètre, le montage amont (*longue dérivation*) et le montage aval (*courte dérivation*).

➤ **Montage amont** (ou longue dérivation du voltmètre)

Le voltmètre est placé aux bornes de l'alimentation (figure 7) et ne mesure pas la tension aux bornes de la résistance R_x , mais la d.d.p aux bornes de l'ampèremètre en série avec la résistance inconnue. De ce fait, la perturbation est introduite par la résistance interne de l'ampèremètre R_A .

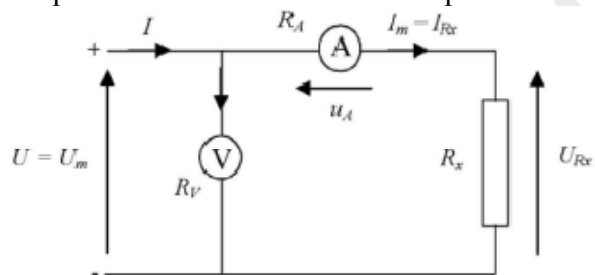


Figure 7. Montage amont

La résistance mesurée R_m est donc :

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U_{Rx} + u_A}{I_{Rx}} = \frac{R_x \cdot I_{Rx} + R_A \cdot I_{Rx}}{I_{Rx}} = R_x + R_A \quad \text{soit: } R_m > R_x$$

L'expression de l'incertitude absolue, si on conserve R_m comme résultat, est :

$$\Delta R_x = R_m - R_x = R_A$$

Et donc l'incertitude relative due à la méthode a pour expression :

$$\delta R_x = \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{R_A}{R_x} = \frac{R_A}{R_m - R_A}$$

Cette expression montre que l'erreur relative de méthode est d'autant plus faible que la résistance de l'ampèremètre est plus petite devant celle de la résistance à mesurer.

➤ **Montage aval** (ou courte dérivation du voltmètre)

Le voltmètre est placé aux bornes de la résistance à déterminer (figure 8), par conséquent l'ampèremètre ne mesure pas seulement le courant traversant la résistance R_x mais tient compte également de celui parcourant le voltmètre. La perturbation est donc introduite par la résistance interne du voltmètre R_v .

La résistance mesurée R , est donnée par la relation :

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U_{Rx}}{I_m} = \frac{R_v \cdot R_x}{R_v + R_x} \quad \text{soit: } R_m < R_x$$

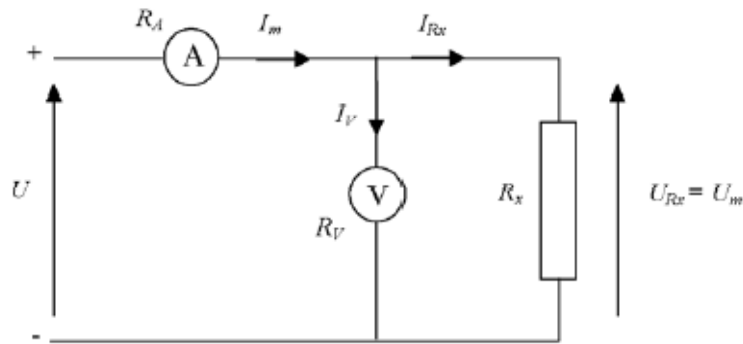


Figure 8. Montage aval

La valeur exacte de la résistance R_x en fonction de la valeur mesurée R_m est donnée par :

$$R_m \cdot (R_V + R_x) = R_V \cdot R_x \quad \Rightarrow \quad R_m \cdot R_V = R_x \cdot (R_V - R_m)$$

$$R_x = \frac{R_m \cdot R_V}{(R_V - R_m)}$$

L'expression de l'incertitude absolue est alors :

$$\Delta R_x = R_m - R_x = R_m - \frac{R_m \cdot R_V}{(R_V - R_m)} = -\frac{R_m^2}{(R_V - R_m)}$$

et donc l'incertitude relative due à la méthode a pour expression :

$$\delta R_x = \frac{\Delta R_x}{R_x} = -\frac{\frac{R_m^2}{(R_V - R_m)}}{\frac{R_m \cdot R_V}{(R_V - R_m)}} = -\frac{R_m}{R_V}$$

En conclusion, l'erreur relative de méthode est d'autant plus faible que la résistance du voltmètre est plus grande devant celle de la résistance à mesurer.

➤ **Choix du montage en fonction de l'importance de la résistance à déterminer**

Le choix du montage dépend de la valeur de la résistance inconnue R_x , et des appareils de mesure disponibles. Il est donc nécessaire d'avoir une idée sur la valeur de la résistance à mesurer (en général, obtenue par la mesure de la valeur approchée à l'aide d'un ohmmètre).

L'observation des variations des erreurs relatives en fonction de la valeur de la résistance R_x à déterminer (figure 9) montre les domaines d'emploi pour chacun des deux montages.

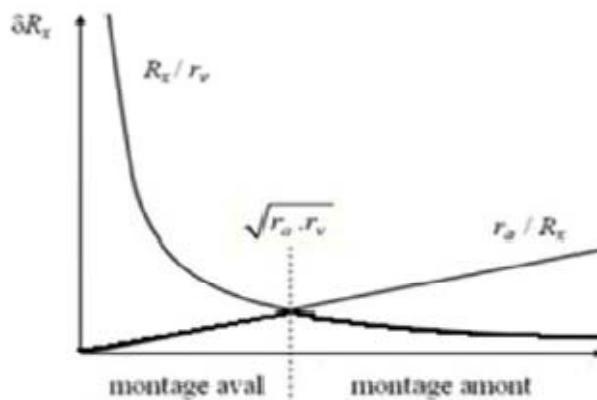


Figure 9. Variations des erreurs relatives en fonction de la valeur de la résistance à mesurer

Le choix du montage sera fait selon la règle suivante :

- si $R_x \text{ approché} \leq \sqrt{R_A \cdot R_V}$ (résistances de faibles valeurs) on privilégie le montage aval ;
- si $R_x \text{ approché} \geq \sqrt{R_A \cdot R_V}$ (résistances de fortes valeurs) on privilégie le montage amont.

Le choix de l'appareillage doit donc tenir compte des incertitudes introduites et de la précision recherchée. En électrotechnique (domaine des courants fort) les perturbations introduites par les appareils sont pratiquement négligeables, mais il convient d'être plus prudent en électronique (domaine des courants faibles).

➤ Incertitude totale sur le résultat de la mesure

La précision de la mesure, quel que soit le montage utilisé, est donnée par l'incertitude relative en tenant compte des erreurs instrumentales et dues à l'opérateur :

$$\delta R_x = \frac{\Delta R_x}{R_x} = \left(\frac{\Delta U_{\text{mesurée}}}{U_{\text{mesurée}}} \right)_{\text{totale}} + \left(\frac{\Delta I_{\text{mesurée}}}{I_{\text{mesurée}}} \right)_{\text{totale}} + \left(\frac{\Delta R_x}{R_x} \right)_{\text{méthode}}$$

Les incertitudes sur les mesures de tension et de courant étant données par les relations suivantes :

$$\left(\frac{\Delta U_{\text{mesurée}}}{U_{\text{mesurée}}} \right)_{\text{totale}} = \left(\frac{\Delta U_{\text{mesurée}}}{U_{\text{mesurée}}} \right)_{\text{inst}} + \left(\frac{\Delta U_{\text{mesurée}}}{U_{\text{mesurée}}} \right)_{\text{opérateur}}$$

$$\left(\frac{\Delta I_{\text{mesurée}}}{I_{\text{mesurée}}} \right)_{\text{totale}} = \left(\frac{\Delta I_{\text{mesurée}}}{I_{\text{mesurée}}} \right)_{\text{inst}} + \left(\frac{\Delta I_{\text{mesurée}}}{I_{\text{mesurée}}} \right)_{\text{opérateur}}$$

➤ Limite de la méthode

La méthode voltampéremétrique conduit à des résultats suffisamment précis dans de nombreux cas et n'exige que de deux appareils de mesure très répandus dans l'industrie. Elle couvre la gamme des résistances moyennes (de quelques Ω à quelques $k\Omega$), pour les résistances faibles ($< 1\Omega$) et les grandes résistances ($> 1M\Omega$), on utilise des méthodes spécifiques. Elle s'avère beaucoup plus longue à mettre en œuvre par rapport à l'emploi d'un ohmmètre, mais plus précise s'il s'agit d'un appareil à déviation. Toutefois une mesure à l'aide d'un ohmmètre à affichage numérique sera toujours plus précise. L'intérêt de la méthode dépendra donc du matériel dont on dispose.

6. Mesure par la méthode de comparaison

➤ Mesure des résistances de faibles valeurs

Les méthodes employées pour la mesure des résistances moyennes, la méthode voltampéremétrique particulièrement, ne sont pas adaptées aux mesurages des résistances de faibles valeurs. En effet, les connexions et parfois les mauvais contacts introduisent dans le montage des résistances supplémentaires, souvent plus importantes que la résistance à mesurer, et que par conséquent l'on ne peut pas négliger. La méthode de comparaison de par sa simplicité et sa bonne précision, est une alternative intéressante à l'insuffisance de ces méthodes.

➤ Principe de la méthode

La méthode étudiée consiste à comparer la résistance inconnue R_x à une résistance étalon R_e faible et parfaitement connue, en mesurant au voltmètre les tensions entre leurs bornes.

Les deux résistances sont placées en série dans un même circuit, alimenté par une source de tension continue, et donc parcourue par un même courant I (figure 10).

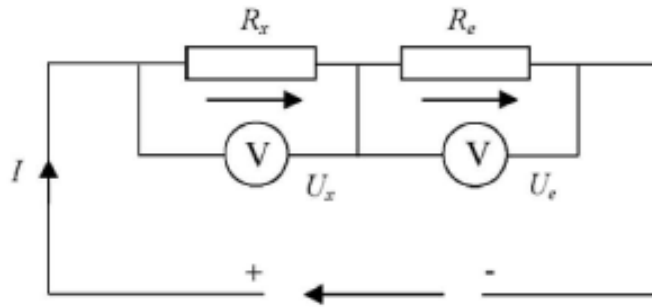


Figure 10. Schéma de principe pour la méthode de comparaison

Les tensions mesurées par les voltmètres ont alors pour expression :

$$\begin{cases} U_e = R_e \cdot I \\ U_x = R_x \cdot I \end{cases}$$

d'où :

$$R_x = R_e \cdot \frac{U_x}{U_e}$$

Si l'on admet que la tension d'alimentation est la même au cours des deux mesures, R_e étant connue, il suffit de déterminer expérimentalement la valeur du rapport (U_x/U_e) pour obtenir la valeur R_x de la résistance à mesurer.

En utilisant le même voltmètre pour les deux mesures, les erreurs instrumentales disparaissent pratiquement si bien que seules les erreurs de lecture subsistent.

Les déviations du voltmètre sont alors :

- n_e pour la mesure de la chute de tension U_e
- n_x pour la mesure de la chute de tension U_x

On peut donc écrire :

$$R_x = R_e \cdot \frac{n_x}{n_e}$$

➤ **Précision de la mesure**

L'incertitude relative a pour expression :

$$\delta R_x = \frac{\Delta R_e}{R_e} + \frac{\Delta n_x}{n_x} + \frac{\Delta n_e}{n_e}$$

Les mesures étant effectuées avec le même appareil et en ne tenant compte que de l'erreur introduite par l'opérateur, il en résulte que :

$\Delta n_x = \Delta n_e$, que l'on note Δn , d'où :

$$\delta R_x = \frac{\Delta R_e}{R_e} + \Delta n \cdot \left(\frac{1}{n_x} + \frac{1}{n_e} \right)$$

Certaines précautions doivent être respectées pour obtenir une faible incertitude :

- utiliser une résistance étalon de bonne précision ;
- utiliser un voltmètre a grande résistance interne, pour que son influence soit négligeable lorsque l'on branche le voltmètre aux bornes de R_e , puis de R_x , dans ce cas (R_x et R_e très inférieurs à R_V) la méthode n'est alors applicable qu'aux faibles.
- utiliser une alimentation électronique dont la tension est stabilisée, c'est-à-dire que la tension d'alimentation reste constante quel que soit le courant débité, la méthode est alors théoriquement applicable à toute résistance.
- il est nécessaire que les déviations n_e et n_x , soient proches du nombre total de division

N de la graduation, cela exige que les tensions U_e et U_x soient presque égales au calibre C_v employé, et donc il faut que :

- les valeurs des résistances R_e et R_x soient peu différentes,
- la tension d'alimentation soit voisine de deux fois le calibre choisi pour le voltmètre.
- il est conseillé d'adopter pour le courant une valeur la plus proche possible du courant maximal admissible par les résistances.

En conclusion, la méthode de comparaison est intéressante pour la mesure de résistance. Elle n'exige qu'un matériel classique et très répandus, son mode opératoire est simple et rapide, sa précision satisfaisante et elle est particulièrement bien adaptée aux faibles résistances.

7. Pont de Wheatstone

Le pont de Wheatstone consiste en un circuit électrique comportant trois résistances connues et une quatrième à déterminer, alimentées par un générateur de courant continu E . Considérons alors le circuit de la figure 11, où R_1 et R_2 sont des résistances de rapport connu, R_v est une résistance réglable connue et R_x est une résistance inconnue. Les deux points C et D sont reliés à un galvanomètre qui mesure la différence de potentiel ou l'intensité du courant entre ces deux points formant ainsi un pont.

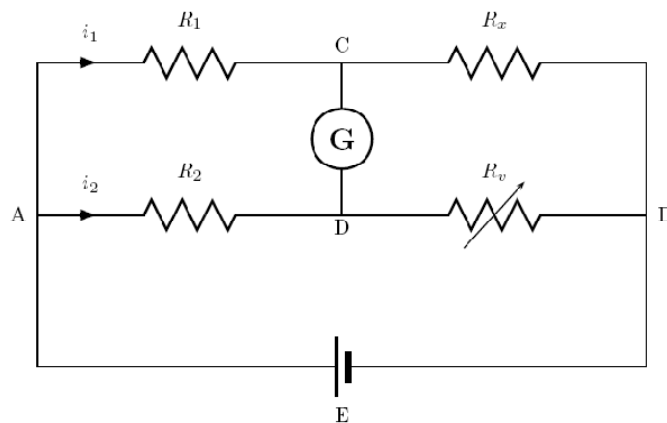


Figure 11. Schéma de principe pour la méthode pont de wheatstone

Pour déterminer la valeur de la résistance inconnue R_x , il faut ajuster la résistance variable R_v dans le pont jusqu'à ce qu'on annule l'intensité du courant entre les deux branches du pont. Donc, en agissant sur les résistances R_1 , R_2 et R_v , il est possible d'annuler le courant dans le galvanomètre. On dit alors que le pont est équilibré.

Dans ce cas on peut écrire :

$$V_C - V_D = 0 \quad \Rightarrow \quad V_C = V_D$$

Cela permet d'appliquer la loi d'Ohm aux bornes de R_1 et R_2 :

$$V_A - V_C = R_1 I_1 \quad \text{et} \quad V_A - V_D = R_2 I_2$$

D'où:

$$R_1 I_1 = R_2 I_2 \quad \Rightarrow \quad I_2 = \frac{R_1}{R_2} I_1$$

D'autre part :

$$V_C - V_B = R_x I_1 \quad \text{et} \quad V_D - V_B = R_v I_2$$

Donc

$$R_x I_1 = R_v I_2 \quad \Rightarrow \quad I_2 = \frac{R_x}{R_v} I_1$$

A l'équilibre du pont, les quatre résistances sont donc telles que :

$$\frac{R_x}{R_v} = \frac{R_1}{R_2} \quad \Rightarrow \quad R_x = R_v \frac{R_1}{R_2}$$



MISE EN GARDE : Pour toutes les manipulations, les montages seront réalisés hors tension et vérifiés par le professeur avant mise sous tension.

TP N°1 : MESURE DE RESISTANCES

1. Objectifs

Mesurer par différentes méthodes la résistance de dipôles passifs: ohmmètre, voltampèremètre, pont de Wheatstone.

Evaluer la précision relative pour chacune des méthodes.

2. Travail de préparation

Q1- Donner une méthode de marquage des résistances, autre que celle basée sur le code des couleurs, illustrer votre réponse par un exemple numérique concret.

Q 2- Comment calcule-t-on l'incertitude liée à la mesure d'une résistance faite à l'aide d'un ohmmètre numérique, illustrer votre réponse par un exemple numérique concret.

Q 3- Donner le principe de la mesure des résistances par la méthode du Pont de Wheatstone.

Q4- En appliquant les lois de Kirchhoff, montrer que le courant dans le galvanomètre est donné par:

A l'équilibre $I_g=0$, on tire $R_x = R_1 \cdot \frac{R_3}{R_2}$.

Matériels utilisés

Vous disposez du matériel suivant :

01 Alimentation stabilisée	DC : 2x (0/15V-1A)
01 Résistances (inconnue)	R_x - 17 W (sur la table)
02 Résistances : R1 et R2	$\times 10^2 \Omega$; $\times 10^3 \Omega$
01 Résistances étalons - (RBOX 418)	$R_e=100 \Omega$ - 1 W - 1 %
01 Résistance variable - (RBOX 418)	$R_H=11 \Omega$ - 1 w - 1 %

Résistances à décades	x 10 x100 x1000 Ω, : (RV)
01 Galvanomètre	Magnétoélectrique
0 1 Multimètre	à déviation
0 1 Multimètre	Numérique
01 Voltmètre	Magnétoélectrique
0 1 Ampèremètre	Magnétoélectrique
04 Fil rouge	
0 3 Fil noir	
01 Fil bleu	

NB : Ne pas oublier de relever les caractéristiques des appareils de mesure utilisés et les informations concernant leur résistance interne (la chute de tension pour l'ampèremètre et la résistance spécifique pour le voltmètre).

Tableau des Caractéristiques des appareils

Appareil → Caractéristiques ↓	Alimentation	Ohmmètre Analogique	Ohmmètre Numérique	Ampèremètre	Voltmètre	Galvanomètre
Classe						
Résolution						
Echelle						
.						
.						

3. Manipulation N° 1 : Mesures directes (Code des couleurs et ohmmètres)

Il s'agit de déterminer les valeurs d'une résistance inconnue R_x à l'aide du code des couleurs, puis par des mesures à l'ohmmètre numérique et à déviation, enfin de comparer entre elles les précisions obtenues dans chaque cas.

Mode opératoire

- Relever les couleurs de la résistance de gauche vers la droite (la tolérance est toujours à droite)
- Mesurer la résistance R_x avec l'ohmmètre analogique après avoir ajusté son zéro puis avec l'ohmmètre numérique.

Avec un ohmmètre à déviation, la valeur est indiquée sur un cadran d'un élément moteur magnétoélectrique gradué de droite à gauche de 0 à l'∞.

$R_{mes} = \text{indication} \times \text{calibre}$.

Avec l'ohmmètre numérique la valeur de la résistance est directement affichée. Le calibre, ou plutôt la gamme, correspond à la résistance maximale mesurable.

Tableau de mesure 1: Mesures directes

Complétez le tableau suivant pour la résistance R_x .

Résistance: R_x	Code des couleurs	Ohmmètre numérique	Ohmmètre a déviation
R_x Ω			
$\Delta R_x / R_x$ %			
ΔR_x Ω			

$R_x \pm \Delta R_x$	Ω		
----------------------	----------	--	--

(*) Détailler le calcul d'incertitudes.

4. Manipulation N° 2 : Mesures par la méthode voltampéremétrique

Choix du montage approprié

Il s'agit de faire le choix du montage approprié, aval ou amont, pour la mesure de la résistance R_x , les appareils de mesure étant imposés. Puis, après avoir effectué les mesures, déterminer la valeur de la résistance et son incertitude pour le montage choisi

La résistance est déduite par le rapport de la tension à ses bornes sur le courant qui la traverse.

Schéma de montage

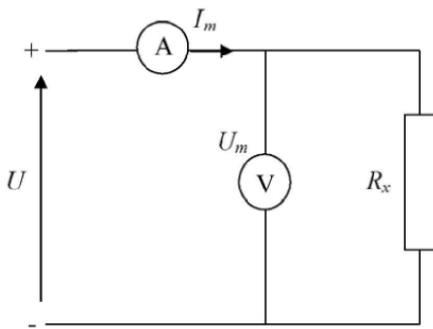


Figure 1.a montage aval

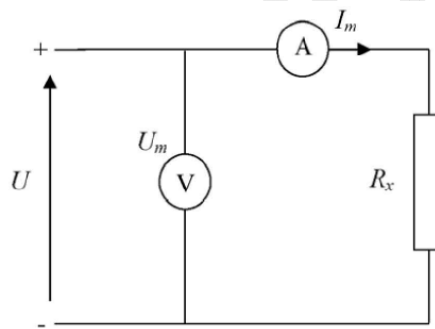


Figure 1.b Montage amont

Mode opératoire

- choisir une valeur pour la tension d'alimentation du générateur et estimer les calibres du voltmètre et de l'ampèremètre ; ce choix doit permettre d'obtenir des déviations des appareils de mesure dans le troisième tiers de leurs échelles ;
- réaliser les montages correspondants ;
- alimenter le montage ;
- ajuster les calibres des appareils de mesure conformément aux valeurs estimées antérieurement ;
- relever les indications du voltmètre et de l'ampèremètre.
- Refaire la même opération pour l'autre montage.
- calculer les erreurs de mesure dues aux résistances internes de l'ampèremètre et du voltmètre dans les 2 montages amont et aval.

Tableau de mesure 2 : Mesures par la méthode voltampéremétrique

Complétez le tableau suivant pour la résistances R_x

Résistance: R_x ...

Montage adopté:

$U =$ Volts

	$U_m = (C_v/N_v).L_v$	$I_m = (C_A/N_A).L_A$	$R_m = (U_m/I_m)$	R_{Amp}	R_{Volt}	R_r
Montage	V	A	Ω	Ω	Ω	Ω
Amont						
Aval						

$R_r = R_m - R_{Amp}$ pour un montage amont
 $R_r = R_m + (R_m^2 / R_{Volt})$ pour un montage aval

Calcul d'incertitudes

$\frac{\Delta U_m}{U_m}$ Inst.	$\frac{\Delta U_m}{U_m}$ opérat.	$\frac{\Delta U_m}{U_m}$ Inst.+opérat.	$(\frac{\Delta I_m}{I_m})$ Inst	$(\frac{\Delta I_m}{I_m})$ opérat.	$(\frac{\Delta I_m}{I_m})$ Inst.+opérat.	$(\frac{\Delta R_m}{R_m})$ Inst.+opérat	$(\frac{\Delta R_m}{R_m})$ méthode	$(\frac{\Delta R_m}{R_m})$ totale	ΔR_x
%	%	%	%	%	%	%	%	%	Ω
$R_{précision} =$		$R_r \pm \Delta R_x =$						Ω	

(*) Détailler le calcul d'incertitudes.
 Avec CV (CA) le calibre , Nv (NA) l'échelle maximale , LV (LA) la lecture

5. Manipulation N° 3 : Mesures par la méthode de comparaison

Il s'agit de déterminer les valeurs d'une résistance inconnue R_x à l'aide de la méthode de comparaison puis de déterminer son incertitude.

Schéma de montage

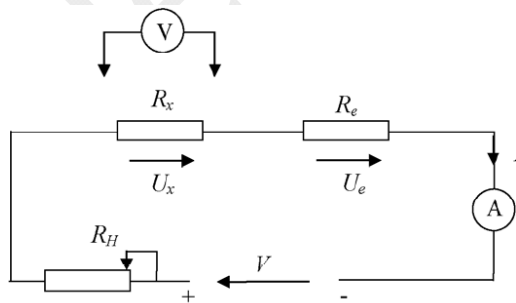


Figure 2. Schéma de montage pour la méthode de comparaison

Mode opératoire

Pour une résistance R_x :

- réaliser le montage et faire le vérifier ;
- régler la tension d'alimentation V sur zéro ;
- régler le rhéostat RH de protection sur sa valeur maximale ;
- alimenter le montage et régler la tension V délivrée par l'alimentation de façon que le courant traversant le circuit soit juste inférieur au courant maximal admissible par la résistance ;
- choisir le calibre approprié pour le voltmètre et brancher le aux bornes de la résistance ;
- ajuster le rhéostat pour obtenir une déviation correspondant a une graduation du troisième tiers de son échelle;
- relever la déviation n, de l'appareil;

- brancher le voltmètre aux bornes de la résistance étalon R_e
- avec le même calibre du voltmètre, relever la nouvelle déviation,

Tableau de mesure 3: Mesures par la méthode de comparaison

Complétez le tableau suivant pour la résistance R_x

Résistance: R_x $U =$ Volts $\delta R_e =$ %
 $\Delta n =$ div.

n_e		Div	Calibre : C_V		V
n_x		Div	Echelle : N_V		Div
$\Delta R_x / R_x$		%	ΔR_x		Ω
$R_x \pm \Delta R_x$					Ω

(*) Détailler le calcul d'incertitudes.

5. Manipulation N° 4 : Pont de Wheatstone

Schéma de montage

Il est constitué de 4 résistances d'une source continue et d'un galvanomètre comme indicateur de zéro.

Pour mesurer de faibles variations de R_x autour de l'équilibre, on mesure le courant de déséquilibre $I_g = \sigma \Delta R$

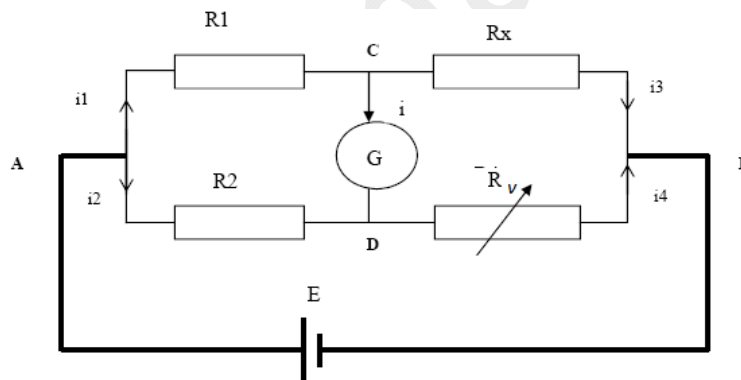


Figure 3. Schéma de principe pour la méthode pont de Wheatstone

Mode opératoire

- Réaliser le pont de Wheatstone de la figure 3 avec: $E= 5 \text{ V}$, $R_2=1000 \Omega$, $R_1=100 \Omega$, $R_V= 3$ résistances AOIP en série (x1000;x100; x10; RH Ω) et G galvanomètre $C=0,5$.
- La résistance R_V doit être en premier au maximum (toutes les décades au maximum)
- En variant R_V , chercher l'équilibre du pont d'abord avec le calibre 3 mA puis 30 μA du galvanomètre. Relever R_V et calculer R_x .
- Faire varier la résistance R_2 puis équilibrer le pont de nouveau à l'aide de R_V .
- Détailler les calculs des incertitudes ΔR_1 , ΔR_2 , ΔR_V et $\Delta(R_2/ R_1)$ et remplir le tableau suivant.

Tableau de mesure 5: mesure de R_x par la méthode du pont de Wheatstone

$K = \frac{R_1}{R_2}$	1/10	1/20	1/30	1/40	1/50	1/60
-----------------------	------	------	------	------	------	------

R_1 (Ω)						
ΔR_1 (Ω)						
R_2 (Ω)						
ΔR_2 (Ω)						
R_V (Ω)						
ΔR_V (Ω)						
$\frac{1}{K}$						
$\Delta \frac{1}{K}$						

(*) Détailler le calcul d'incertitudes.

- Tracer le graphe $R_V = f(1/K)$.
- A partir de cette courbe, déterminer R_x ainsi que ΔR_x , puis écrire le résultat sous la forme :

$$R_{eq} = \pm \text{(unité)}.$$

6. Conclusions

- Comparer les valeurs de R_x mesurées par les 2 ohmmètres, le montage voltampèremétrique, la méthode de comparaison et le pont de Wheatstone (Discuter sur la base des incertitudes).
- Discuter et commenter les résultats obtenus.

TP No 02

MESURE D'UN CONDENSATEUR

Complément théorique

1. Modèles équivalents des capacités en régime sinusoïdal

Les dipôles sont essentiellement modélisés, en régime linéaire, par des associations d'éléments parfaits tels que les *résistances pures* et les *capacités*. Les modèles équivalents sont, selon le besoin, de type série ou parallèle. Toutefois la pratique montre que leurs performances dépendent de la fréquence de la tension d'alimentation.

2. Dipôle capacitif

Modèle parallèle d'un condensateur

On observe, en pratique, qu'un condensateur chargé, c'est-à-dire présentant une tension non nulle à ses bornes, et qui n'est parcouru par aucun courant (circuit ouvert), se décharge lentement (baisse de la tension à ses bornes). Ce phénomène de décharge est dû au faible courant de fuite qui traverse le diélectrique placé entre les deux armatures conductrices du condensateur.

Ce fait ne peut être expliqué en utilisant le modèle d'un condensateur parfait caractérisé par sa seule capacité. On modélise donc un condensateur réel par la mise en parallèle d'une capacité C et d'une résistance de grande valeur R_f . Le courant qui circule dans la résistance modélise le phénomène de décharge du condensateur (figure 1).

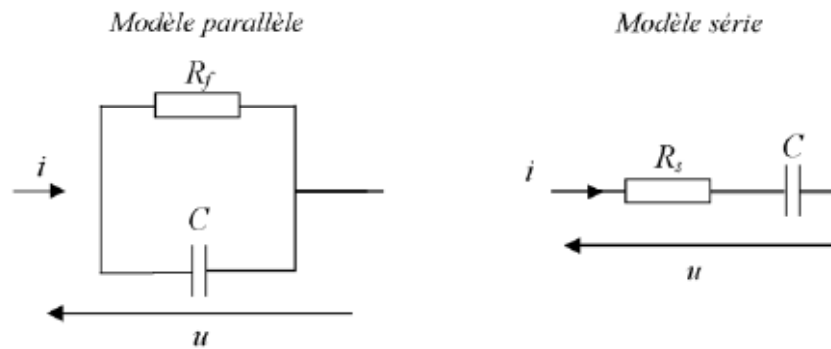


Figure 1. Modèles d'un condensateur réel

Modèle série d'un condensateur réel

Il est constitué de l'association en série de la capacité C du condensateur en série avec une résistance R_s matérialisant les pertes par effet joule produites par le passage du courant dans le diélectrique placé entre les armatures (figure 1).

Représentation vectorielle

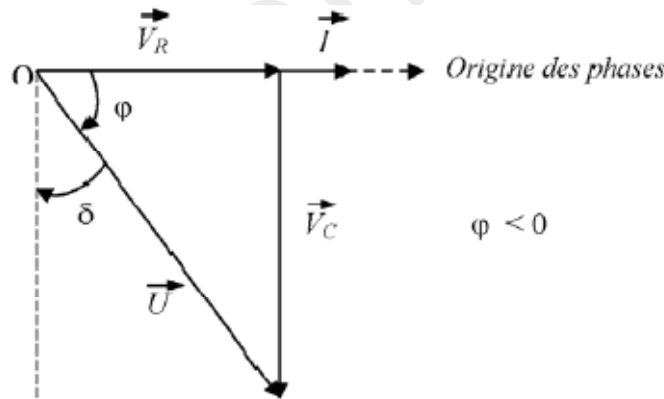


Figure 2. Diagramme de Fresnel pour le modèle série d'un dipôle capacitif

L'angle δ , tel que : $\varphi = (90^\circ - \delta)$ est appelé angle de pertes, il informe sur la qualité du diélectrique.

- Intendance complexe:

$$\bar{Z} = R_s + \frac{1}{j \cdot C \cdot \omega} = Z \cdot e^{j\varphi}$$

- Module et argument (déphasage) :

$$Z = \sqrt{R_s^2 + \left(\frac{1}{C \cdot \omega}\right)^2} \qquad \varphi = -\arctan\left(\frac{1}{R_s \cdot C \cdot \omega}\right)$$

Le courant est en avance sur la tension d'où un angle de déphasage négatif. La résistance R_s étant très faible, et donc l'angle de fuite également, le condensateur est fortement capacitif, l'angle de déphasage est très proche de -90° (quadrature avant).

Les modèles présentes ci-dessus ne sont que des exemples parmi les plus courants, ils permettent d'expliquer les principaux phénomènes. Des situations particulières nécessitant une plus grande précision des résultats, peuvent supposer l'utilisation de modèles plus élaborés.

3. Détermination de l'impédance d'un condensateur par la méthode VA

Cette méthode ne permet que de déterminer l'impédance d'un condensateur en basses fréquence et la valeur de sa capacité. L'angle de perte, très faible aux fréquences industrielles, ne peut être mesuré, par conséquent elle ne nécessite qu'une seule mesure en alternatif.

Mesure en sinusoïdal

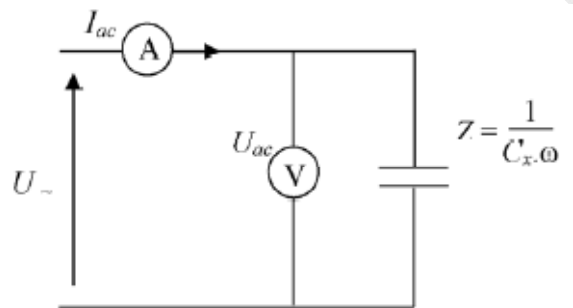


Figure 6. Mesure de l'impédance d'un condensateur en BF

Les différents paramètres sont déterminés par les relations suivantes :

- Impédance réelle :

$$Z = \frac{U_{ac}}{I_{ac}}$$

- Réactance :

$$X_s = Z$$

- Capacité :

$$C_s = \frac{1}{Z \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}$$

- Déphasage :

$$\varphi = -90^\circ$$

Performance de la méthode

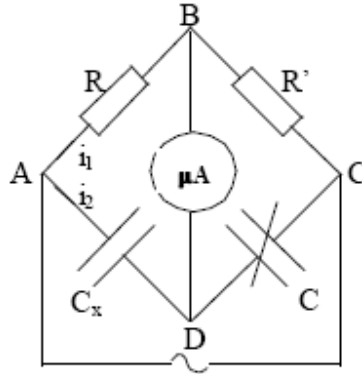
Cette méthode est utilisée, dans le domaine des basses fréquences, pour sa rapidité et sa facilité de mise en œuvre. La précision des résultats est environ de 1%, mais elle n'est pas applicable aux condensateurs polarisés.

4. Mesure de capacités par la méthode du pont de SAUTY

Le circuit de base utilisé pour la mesure des capacités est le pont de Sauty. Il comprend essentiellement une tête de pont constituée par deux résistances R et R' et deux capacités pures C et C_x . R , R' , C et C_x sont disposées en série suivant le parallélogramme ABCD.

Dans l'une des diagonales du pont, AC par exemple, se trouve une source de courant sinusoïdal de fréquence f . Dans l'autre diagonale se place un détecteur de zéro, dans le cas présent un ampèremètre

sensible aux courants de fréquence f et susceptible de déceler l'extinction du courant dans la diagonale correspondante. Lorsqu'il y a extinction du courant, on dit que le pont est équilibré. A l'équilibre, il ne passe donc aucun courant dans la branche BD, on a : $V_B - V_D = 0$



Soient i_1 et i_2 les valeurs instantanées des intensités dans les branches ABC et ADC, q et q_x les charges, au même instant, des condensateurs C et C_x :

$$\begin{aligned}
 V_A - V_B &= R i_1 & V_A - V_D &= \frac{q_x}{C_x} \\
 V_B - V_C &= R' i_1 & V_D - V_C &= \frac{q}{C} \\
 \Rightarrow V_B - V_D &= \frac{q_x}{C_x} - R i_1 = 0 & \text{et } V_B - V_D &= R' i_1 - \frac{q}{C} = 0 \\
 \Rightarrow R i_1 &= \frac{q_x}{C_x} & \text{et } R' i_1 &= \frac{q}{C}
 \end{aligned}$$

Dérivons ces relations par rapport au temps :

$$R \frac{di_1}{dt} = \frac{1}{C_x} \frac{dq_x}{dt} \quad (1)$$

$$R' \frac{di_1}{dt} = \frac{1}{C} \frac{dq}{dt} \quad (2)$$

or, par définition :

$$i_2 = \frac{dq}{dt} = \frac{dq_x}{dt}$$

En faisant le rapport des relations (1) et (2), on obtient :

$$\frac{R}{R'} = \frac{C}{C_x} \quad \text{Donc } C_x = \frac{R'}{R} C$$



MISE EN GARDE : Pour toutes les manipulations, les montages seront réalisés hors tension et vérifiés par le professeur avant mise sous tension.

TP N°2: MESURE DES DIPOLES CAPACITES

1. Objectifs

Mesurer, par différentes méthodes, l'impédance et les paramètres de dipôles capacitifs.
, Evaluer la précision relative pour chacune des méthodes.

2. Travail de préparation

Q1- Donner une méthode de marquage des condensateurs basée sur le code des couleurs, illustrer votre réponse par un exemple numérique concret.

Q2- Comment calcule-t-on l'incertitude liée à la mesure par la méthode voltampèremétrique de la capacité d'un condensateur, illustrer votre réponse par un exemple numérique concret.

Q3- Donner le principe de la *méthode des trois ampèremètres* pour la mesure de l'impédance d'un dipôle capacitif, citer un mode opératoire, faire une étude des incertitudes et énumérer les précautions à respecter pour obtenir une précision satisfaisante.

Q5- Le pont de Sot t y est un montage dérivé du pont de Wheatstone, il est employé pour les mesures précises d'impédances capacitives. Donner sa constitution, son principe, citer un mode opératoire et faire une étude des incertitudes.

Q 6- pour le schéma proposé dans la partie manipulation pont de sauty , montrer que

$$C_x = \frac{R_v}{R_1} C_v$$

Matériels utilisés

Vous disposez du matériel suivant :

0 1 Alimentation continue et sinusoïdale	DC:0/10V AC: 0/10Vss- fréquence variable
01 Alimentation courant sinusoïdal	AC : 0...10V fréquence variable
0 1 Capacité étalon - (x 1µF)	U_{max} = 350 V _{eff}
01 Capacité C _x	
01 Boite de capacités variables C _v -(AOIP)	0,5 5 µF ; 10 %
01 Resistances : R ₁	x10 ³ Ω
01 Résistances à décades R _v - (AOIP)	x 1 x10 x100 Ω, : (RV)
01 Multimètre	Numérique
01 Voltmètre	Magnétoélectrique ou numérique
0 1 Ampèremètre	Magnétoélectrique ou numérique
01 Oscilloscope	
01 chronomètre digital	
04 Fil rouge	
03 Fil noir	

NB : Ne pas oublier de relever les caractéristiques des appareils de mesure utilisés et les informations concernant leur résistance interne (la chute de tension pour l'ampèremètre et la résistance spécifique pour le voltmètre).

Tableau des Caractéristiques des appareils

Appareil → Caractéristiques ↓	Alimentation	Ohmmètre Analog	Ohmmètre Numérique	Ampèremètre	Voltmètre	Galvanomètre
Classe Résolution Etendue . .						

3. Manipulation NO1 : Mesure de la capacité d'un condensateur par la méthode voltampèremétrique

Il s'agit de mesurer la capacité C_x d'un condensateur à l'aide de la méthode voltampèremétrique, puis de déterminer son incertitude.

Mode opératoire

- réaliser le montage correspondant à la méthode voltampèremétrique (sans rhéostat) ;

- s'assurer que la tension d'alimentation est réglée sur zéro et choisir la position AC, DC doit être égale à 0 (mesurée avec un voltmètre);
- alimenter le montage et régler la tension d'alimentation sur environ 2 Volts, 5 KHz;
- puis ajuster la valeur de la tension pour obtenir la déviation maximale de l'ampèremètre;
- choisir le calibre approprié pour le voltmètre et brancher le aux bornes de la capacité C_x ;
- relever la déviation n , de l'appareil;
- brancher le voltmètre aux bornes de la résistance étalon $C_e = 4 \mu F$.
- relever la nouvelle déviation,

Tableau de mesure 2: Mesures par la méthode de comparaison
 Complétez le tableau suivant pour la capacité C_x

Résistance: C_x $U =$ Volts 5 KHz $\delta C_e =$ %
 $\Delta n =$ div.

n_e		Div	Calibre : C_V	V
n_x		Div	Echelle : N_V	Div
δC_x		%	ΔC_x	Ω
$C_x \pm \Delta C_x$				Ω

(*) Détailler le calcul d'incertitudes.

5. Manipulation N° 3 : Pont de Sauty

Schéma de montage

Il est constitué de 2 résistances, 2 capacités et d'un tweeters comme indicateur de zéro.
 Pour mesurer des variations de C_x autour de l'équilibre, on varie la valeur de C_v afin d'obtenir une diminution de son de tweeters puis on varie R_v jusqu'à obtention du silence total

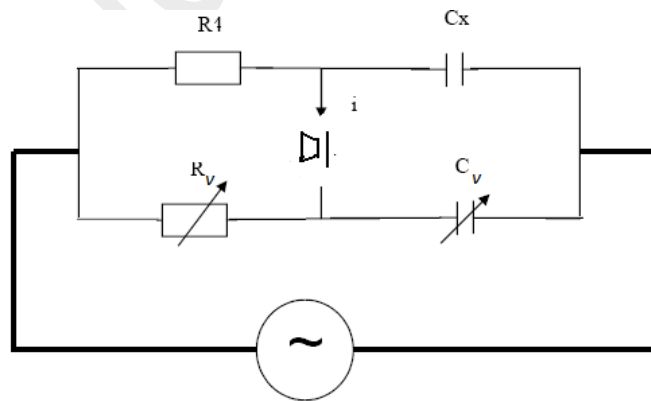


Figure 3. Schéma de principe pour la méthode pont de Sauty

Mode opératoire

- Le pont de Sauty peut être réalisé de deux façons différentes en utilisant :
 - un montage "capacité variable",

- un montage "résistance variable".
- La capacité inconnue est C_x . Dans le montage utilisé, qui est un montage à la fois à "capacité variable" et à "résistance variable", on place en série avec C_V une résistance variable R_V .
- Il est astucieux de choisir un rapport R_V / R plus petit ($R=2\text{ K}\Omega$) pour permettre d'obtenir une meilleure précision sur la mesure de C_x .
- Le générateur de fréquence sinusoïdale est régler sur environ 5 V et une fréquence de 5 KHz.
- Premièrement on fait varier la capacité C_V de manière à obtenir un bruit faible du tweeter. Dans le cas où la capacité étudiée présente un courant de fuite appréciable, on n'obtient qu'un minimum, en fait on n'obtient l'équilibre que si les capacités comparées ont des diélectriques de même nature.
- Puis on fait varier la résistance R_V jusqu'à l'obtention d'un silence complet.
- En variant R_V , chercher l'équilibre du jusqu'à l'obtention d'un silence complet. Relever R_V et calculer C_x . Indiquer les approximations faites : C_x .
- Faire varier la capacité C_V puis équilibrer le pont de nouveau à l'aide de R_V .
- Détailler les calculs des incertitudes ΔR_1 , ΔC_V , ΔR_V et $\Delta(C_V / R_1)$ et remplir le tableau suivant.

Tableau de mesure 3: mesure de C_x par la méthode du pont de sauty

C_V (μF)	1	2	4	5	6	7
ΔC_V (μF)						
R_1 (Ω)						
ΔR_1 (Ω)						
$K = \frac{R_1}{C_V}$						
ΔK						
R_V (Ω)						
ΔR_V (Ω)						

(*) Détailler le calcul d'incertitudes.

- Tracer le graphe $R_V = f(K)$.
- A partir de cette courbe, déterminer C_x ainsi que ΔC_x , puis écrire le résultat sous la forme :

$$C_{eq} = \quad \pm \quad (\text{unité}).$$

6. Conclusions

- Comparer les valeurs de C_x mesurées par le montage voltampèremétrique , la méthode de comparaison et le pont de Sauty (Discuter sur la base des incertitudes).
- Discuter et commenter les résultats obtenus.

TP N°03

MESURE D'INDUCTANCE

Complément théorique

1. Modèles équivalents des inductances en régime sinusoïdal

Les dipôles sont essentiellement modélisés, en régime linéaire, par des associations d'éléments parfaits tels que les *résistances pures* et les *inductances*. Les modèles équivalents sont, selon le besoin, de type série ou parallèle. Toutefois la pratique montre que leurs performances dépendent de la fréquence de la tension d'alimentation.

2. Modèles du dipôle inductif

Modèle série d'une bobine réelle

Sous fréquence industrielle, donc faible, il est d'usage de modéliser en régime linéaire une bobine réelle par une résistance R_s et d'une bobine idéale d'inductance L_s en série (figure 1).



Figure 1. Modèle série d'une bobine réelle

Représentation vectorielle

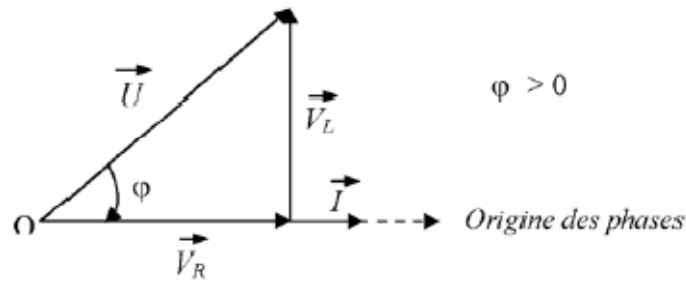


Figure 2. Diagramme de Fresnel pour le modèle série d'une bobine

- Impédance complexe :

$$\bar{Z} = R_s + j \cdot L_s \cdot \omega = Z \cdot e^{j\varphi}$$

- Module et argument (déphasage)

$$Z = \sqrt{R_s^2 + (L_s \cdot \omega)^2} \qquad \varphi = \arctan\left(\frac{L_s \cdot \omega}{R_s}\right)$$

Le courant est en retard sur la tension d'où un angle de déphasage positif, plus la résistance sera faible, et donc plus la bobine est inductive, plus le déphasage tendra vers 90°(quadrature arrière). Ce modèle est considéré comme valide pour les régimes de fonctionnement en basses fréquences inférieures à 1 kHz.

Modèle parallèle d'une bobine réelle

Il est constitué de l'association en parallèle d'une résistance R_p et d'une bobine idéale d'inductance L_p (figure 3).

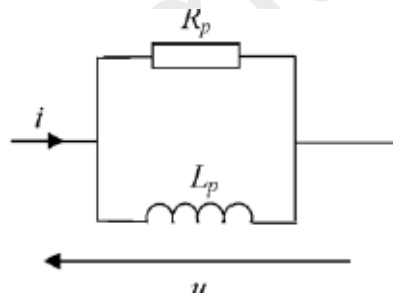


Figure 3 . Modèle parallèle d'une bobine réelle

Equivalence entre les deux modèles

En régime sinusoïdal de fréquence f et de pulsation ω, les deux modèles précédents sont équivalents et interchangeables à condition de poser ;

$$R_p = R_s \cdot (1 + Q^2) \qquad L_p \cdot \omega = L_s \cdot \omega \cdot \left(\frac{1 + Q^2}{Q^2}\right)$$

$$Q = \frac{L_s \cdot \omega}{R_s} = \frac{R_p}{L_p \cdot \omega}$$

Q étant le facteur de qualité de la bobine

Aux modèles précédents, il est parfois nécessaire d'ajouter un condensateur en parallèle avec l'ensemble afin de rendre compte des effets capacitifs apparaissant entre les spires de la bobine. Cette valeur de capacité est très faible mais elle devient prédominante à très grande fréquence.

Lorsque la bobine est réalisée autour d'un noyau ferromagnétique, les phénomènes de saturation magnétique et l'hystérésis entraînent des non-linéarités dans le comportement de la bobine. Et donc, lorsque le dipôle est soumis à une tension sinusoïdale, l'intensité du courant qui la traverse n'est pas

purement sinusoïdale. Ces non linéarités sont très difficiles à prendre en compte et sont souvent négligés en première approximation.

4. Détermination de l'impédance d'une bobine par la méthode VA

Cette méthode est employée pour déterminer l'impédance d'un dipôle et les valeurs de ses paramètres, résistance et réactance ou impédance réelle et déphasage. Son principe repose sur la mesure de la tension aux bornes du dipôle et du courant la traversant, en appliquant une tension sinusoïdale, puis une tension continue.

Mesure de l'impédance d'une bobine (Méthode de Joubert)

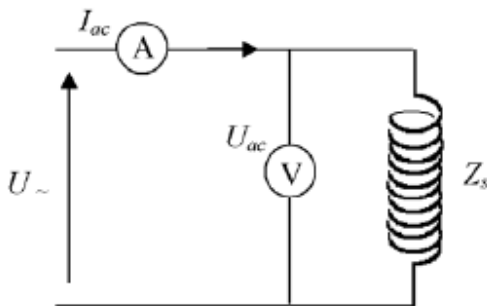


Figure 4.a Mesure en sinusoïdal

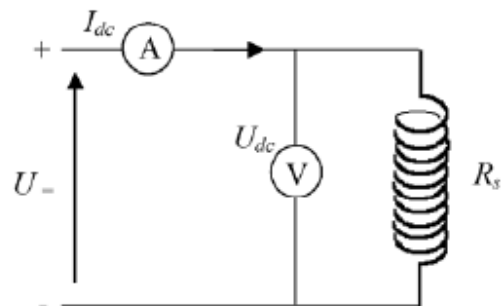


Figure 4. b. Mesure en continu

Deux mesures sont nécessaires, l'une en alternatif sinusoïdale pour déterminer l'impédance de la bobine, l'autre en courant continu afin d'évaluer sa résistance (figures 4).

Les différents paramètres sont déterminés par les relations suivantes :

- Impédance réelle :

$$Z = \frac{U_{ac}}{I_{ac}}$$

- Résistance :

$$R_s = \frac{U_{dc}}{I_{dc}}$$

- Réactance :

$$X_s = \sqrt{Z^2 - R_s^2}$$

- Inductance:

$$L_s = \frac{X_s}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

- Déphasage :

$$\cos \varphi = \frac{R_s}{Z} \qquad \varphi = \arctan \frac{X_s}{R_s}$$

Performance de la méthode

Cette méthode est très couramment utilisée dans l'industrie car elle ne nécessite que des instruments de mesure très répandus et son mode opératoire simple et rapide à mettre œuvre.

Elle conduit à des résultats suffisamment précis dans de nombreux cas (précision de 4 à 5%).

Toutefois, elle ne peut être employée pour des bobines a noyaux de fer en régime sature.

6. Mesure de l'impédance d'une bobine par la méthode de comparaison

Cette méthode, également appelée méthode des trois voltmètres, consiste à comparer l'impédance du dipôle, dont désire déterminer les paramètres, à une résistance étalon R_e parfaitement connue, en faisant trois mesures de tension.

La bobine et la résistance sont mises en série puis alimentées sous tension sinusoïdale, les valeurs efficaces des tensions U , U_{Re} , U_B sont mesurées à l'aide de trois voltmètres (figure 5).

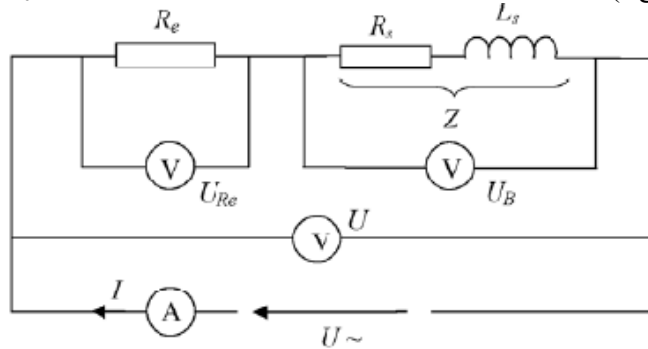


Figure 5. Schéma de principe pour la méthode des trois voltmètres

Détermination de l'impédance de la bobine

Le courant peut être exprimé par les relations suivantes

$$I = \frac{U_{Re}}{R_e} \qquad I = \frac{U_B}{Z}$$

D'où :

$$Z = R_e \frac{U_B}{U_{Re}}$$

Si la tension d'alimentation est la même au cours des deux mesures, R_e étant connue, il suffit de déterminer expérimentalement la valeur du rapport (U_B/U_{Re}) pour obtenir l'impédance Z de la bobine. En utilisant le même voltmètre pour les deux mesures, les erreurs instrumentales disparaissent pratiquement si bien que seules les erreurs de lecture subsistent.

Les déviations du voltmètre sont alors :

- n pour la mesure de la chute de tension U ,
- n_{Re} , pour la mesure de la chute de tension U_{Re} ,
- n_B pour la mesure de la chute de tension U_B .

L'impédance de la bobine est donc déterminée par la relation :

$$Z = R_e \frac{n_B}{n_{Re}}$$

- Diagramme vectoriel

En prenant le vecteur courant à l'origine des phases, il est possible de tracer le vecteur U_{Re} .

Le point B est obtenu en traçant les arcs de cercles respectivement, de centre O et A, et de rayons U et U_B , connaissant le point B, on déduit les vecteurs U_{Re} , U_B , U_L .

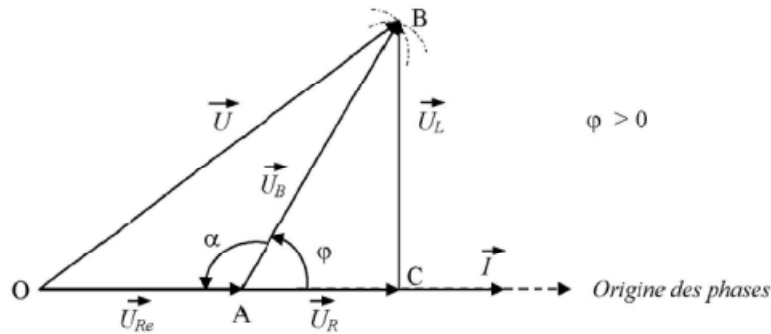


Figure 6. Diagramme de Fresnel pour le modèle série d'un dipôle inductif

Expression de $\cos \varphi$

Dans le triangle **OAB**, il vient :

$$U^2 = U_{Re}^2 + U_B^2 - 2 \cdot U_{Re} \cdot U_B \cdot \cos \alpha$$

Or :

$$\cos \alpha = \cos(\pi - \varphi) = -\cos \varphi$$

Donc :

$$\cos \varphi = \frac{U^2 - U_{Re}^2 - U_B^2}{2 \cdot U_{Re} \cdot U_B}$$

La résistance et l'inductance de la bobine sont alors calculées avec les relations suivantes :

$$R_s = Z \cdot \cos \varphi \quad X_s = L_s \cdot \omega = Z \cdot \sin \varphi$$

Enfin la valeur de l'inductance est donnée par :

$$L_s = \frac{X_s}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

Précision de la mesure

Les mesures étant effectuées avec le même appareil et si R_e est du même ordre de grandeur que Z , alors les tensions U_{Re} et U_B sont peu différentes, il est alors possible de choisir le calibre du voltmètre et la valeur de la tension U de manière à ce que les erreurs de lecture soient aussi réduites que possibles.

L'incertitude relative sur la valeur de l'impédance a pour expression :

$$\delta Z = \frac{\Delta R_e}{R_e} + \frac{\Delta n_B}{n_B} + \frac{\Delta n_{Re}}{n_{Re}}$$

Les mesures étant effectuées avec le même appareil, il en résulte que : $\Delta n_B = \Delta n_{Re}$, que l'on note Δn , d'où :

$$\delta Z = \frac{\Delta R_e}{R_e} + \Delta n \left(\frac{1}{n_B} + \frac{1}{n_{Re}} \right)$$

Si les conditions de mesures ont été respectées, l'incertitude sur la valeur de l'impédance est généralement de l'ordre de 1 à 2 %.

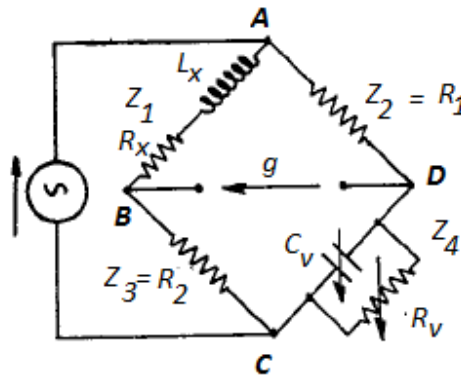
En conclusion, la méthode des trois voltmètres est intéressante pour la mesure des impédances, elle n'exige qu'un matériel classique et présente une précision satisfaisante. Elle est applicable, non seulement aux dipôles inductifs, mais également capacitifs, toutefois elle ne permet pas de déterminer le

signe du déphasage donc la nature du dipôle. D'autre part, tout comme pour la méthode voltampèremetrique, elle n'est pas appropriée à la mesure d'impédance des condensateurs polarisés.

6. Mesure de capacités par la méthode du pont de MAXWELL

Le circuit de base utilisé pour la mesure des inductances est le pont de Maxwell.

Dans l'une des diagonales du pont, AC par exemple, se trouve une source de courant sinusoïdal de fréquence f . Dans l'autre diagonale se place un détecteur de zéro, dans le cas présent un tweeter sensible aux courants de fréquence f et susceptible de déceler l'extinction du courant dans la diagonale correspondante. Lorsqu'il y a extinction du courant, on dit que le pont est équilibré. A l'équilibre, il ne passe donc aucun courant dans la branche BD, on a : $V_B - V_D = 0$



Soient i_1 et i_2 les valeurs instantanées des intensités dans les branches ABC et ADC:

$$\begin{aligned}
 V_A - V_B &= Z_1 i_1 & V_A - V_D &= Z_2 i_2 \\
 V_B - V_C &= Z_3 i_1 & V_D - V_C &= Z_4 i_2 \\
 \Rightarrow V_B - V_D &= Z_2 i_2 - Z_1 i_1 = 0 & \text{et } V_B - V_D &= Z_3 i_1 - Z_4 i_2 = 0 \\
 \Rightarrow Z_2 i_2 &= Z_1 i_1 & \text{et } Z_3 i_1 &= Z_4 i_2 \\
 \Rightarrow i_2 &= \frac{Z_1}{Z_2} i_1 & \text{et } i_2 &= \frac{Z_3}{Z_4} i_1 \\
 \Rightarrow \frac{Z_1}{Z_2} &= \frac{Z_3}{Z_4}
 \end{aligned}$$

Avec

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= R_x + j L_x \omega \\
 \frac{1}{Z_4} &= \frac{1}{R_v} + j C_v \omega
 \end{aligned}$$

et $Z_2 = R_1 ; Z_3 = R_2$

D'où

$$\frac{R_x + j L_x \omega}{R_1} = R_2 \left(\frac{1}{R_V} + j C_V \omega \right)$$

Donc par égalité des parties réelles et des parties imaginaires entre eux

$$\frac{R_x}{R_1} = \frac{R_2}{R_V} \Rightarrow R_x = \frac{R_1 R_2}{R_V} \quad \frac{L_x \omega}{R_1} = R_2 C_V \omega \Rightarrow L_x = R_1 R_2 C_V$$



MISE EN GARDE : Pour toutes les manipulations, les montages seront réalisés hors tension et vérifiés par le professeur avant mise sous tension.

TP N°3 : MESURE D'INDUCTANCE

1. Objectifs

Mesurer, par différentes méthodes, l'impédance et les paramètres de dipôles inductifs.
, Evaluer la précision relative pour chacune des méthodes.

2. Travail de préparation

Q1- Montrer que l'intensité du courant absorbe par une bobine alimentée par une source continue est plus important que celui qui la traverserait en courant sinusoïdal. Enduire les précautions à respecter lors de la mesure de l'impédance d'une bobine par la méthode voltampèremétrique ?

Q2-Le pont de *maxwell* est un montage dérivé du pont de Wheatstone, il est employé pour les mesures précises d'impédances inductives. Donner sa constitution, son principe, citer un mode opératoire et faire une étude des incertitudes.

Matériel nécessaire

0 1 Alimentation continue et sinusoïdale	DC:0/10V AC: 0/10Vss- fréquence variable
0 1 Bobine (Leybold 562 13)	Z [Rx Lx] ; I _{max} = 5 A ; 500 spires
0 1 résistance étalon	Re = 10 Ω
02 Boite de capacités variables Cv -(AOIP)	x0,1 ; x1μF
01 Résistances à décades Rv - (AOIP)	x 1 x10 x100 Ω, : (RV)
01 Resistances : R1	X100 Ω
01 Resistances : R2	X 100 Ω
01 Multimètre	Numérique
01 Voltmètre	Magnétoélectrique ou numérique
0 1 Ampèremètre	Magnétoélectrique ou numérique
01Oscilloscope	
01 chronomètre digital	
04 Fil rouge	
0 3 Fil noir	
01 Fil bleu	

NB : Ne pas oublier de relever les caractéristiques des appareils de mesure utilisés et les informations concernant leur résistance interne (la chute de tension pour l'ampèremètre et la résistance spécifique pour le voltmètre).

Tableau des Caractéristiques des appareils

Appareil → Caractéristiques ↓	Alimentation	Ohmmètre Analog	Ohmmètre Numérique	Ampèremètre	Voltmètre	Galvanomètre
Classe						
Résolution						
Etendue						
.						
.						

3. Manipulation NO1 : Mesures de l'impédance d'une bobine par la méthode voltampèremétrique

Il s'agit de mesurer les paramètres (Z, φ) et (R_s, L_s) d'une bobine sans noyau de fer par la méthode voltampéremétrique, dite de Joubert, puis de déterminer leurs incertitudes.

Schéma de montage

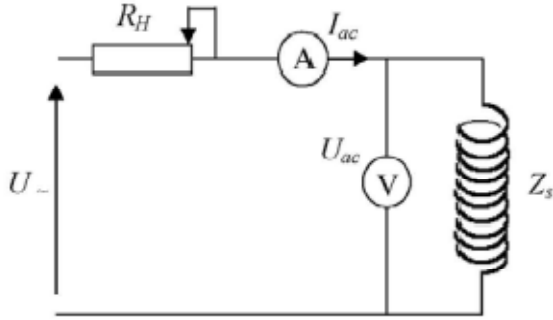


Figure 1.a *Mesure en sinusoïdal*

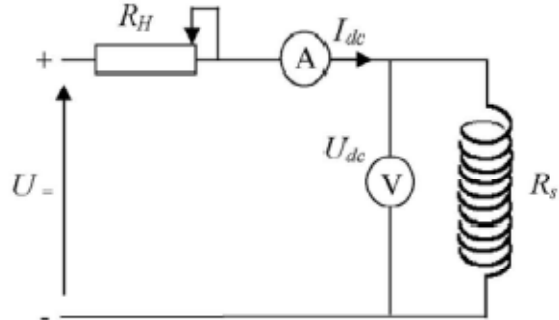


Figure 1.b *Mesure en continu*

Mode opératoire

Mesure sous tension alimentation continue :

- réaliser le montage et faite le vérifier ;
- s'assurer que la tension d'alimentation est réglée sur zéro et choisir la position DC ;
- régler la résistance R_H du rhéostat de protection sur sa valeur maximale ;
- alimenter le montage et régler la tension d'alimentation sur 5 Volts ;
- ajuster la résistance R_H du rhéostat pour obtenir, si possible, des déviations correspondantes à des graduations du troisième tiers des échelles ;
- relever les indications des appareils de mesure.

Mesure sous tension alimentation sinusoïdale :

- réaliser le montage et faite le vérifier ;
- s'assurer que la tension d'alimentation est réglée sur zéro et choisir la position AC ;
- régler, à nouveau, la résistance R_H du rhéostat de protection sur sa valeur maximale ;
- alimenter le montage et régler la tension d'alimentation sur 5 Volts ;
- ajuster la résistance R_H du rhéostat de la même manière que précédemment ;
- relever les indications des appareils de mesure.

Tableau de mesure :

Complétez les tableaux suivants.

Alimentation continue

$U = \dots\dots\dots$ Volts

$U_m = (C_v/N_v).L_v$	$I_m = (C_A/N_A).L_A$	$R_m = (U_m/I_m)$
V	A	Ω

Alimentation sinusoïdale

$U = \dots\dots\dots$ Volts

$U_m = (C_v/N_v).L_v$	$I_m = (C_A/N_A).L_A$	Z_m	X_s	L_s	$\cos \varphi$
V	A	Ω	Ω	H	

Calcul d'incertitudes

$\frac{\Delta Z}{Z}$	ΔZ	$\frac{\Delta R_s}{R_s}$	ΔR_s	$\delta(\cos\phi)$	$\frac{\Delta X_s}{X_s}$	ΔX_s	$\frac{\Delta L_s}{L_s}$	ΔL_s
%	Ω	%	Ω		%	Ω	%	H

4. Manipulation NO2 : Mesure de l'impédance d'une bobine par la méthode des trois voltmètres

Il s'agit de mesurer les paramètres (Z, ϕ) et (R_s, L_s) d'une bobine sans noyau de fer par la méthode des trois voltmètres, puis de déterminer leurs incertitudes.

Schéma de montage

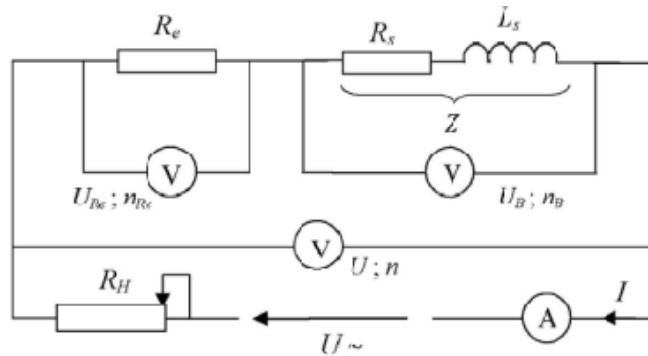


Figure 2. Schéma de montage pour la méthode des trois voltmètres

Mode opératoire

Afin de comparer les résultats obtenus avec ceux de la méthode précédente, la même bobine sera utilisée, la bobine étalon sera telle que $L_e = 0,1 \text{ mH}$.

- Réaliser le montage et faite le vérifier ;
- s'assurer que la tension d'alimentation est réglée sur Zéro et choisir la position AC ;
- régler la résistance RH du rhéostat de protection sur sa valeur maximale ;
- alimenter le montage et régler la tension d'alimentation sur environ 5 Volts ;
- ajuster la résistance RH du rhéostat pour obtenir pour obtenir des lectures de tension sur le même calibre et des déviations maximales ;
- relever les indications nB, nRe et n des appareils de mesure.

Tableau de mesure :

Complétez les tableaux suivants.

Alimentation sinusoïdale $U = \dots\dots\dots$ Volts $Re = \dots\dots \Omega$

n	n_{Re}	n_B	Z	$\cos \phi$	R_s	X_s	L_s
div	div	div	Ω		Ω	Ω	H

Calcul d'incertitudes

$\frac{\Delta Z}{Z}$	ΔZ	$\frac{\Delta R_s}{R_s}$	ΔR_s	$\delta(\cos\phi)$	$\frac{\Delta X_s}{X_s}$	ΔX_s	$\frac{\Delta L_s}{L_s}$	ΔL_s
%	Ω	%	Ω	%	%	Ω	%	H

5. Manipulation N° 3 : Pont de Maxwell

Schéma de montage

Le pont de Maxwell est constitué de deux résistances R1 et R2, ceux sont deux résistances à décades $\times 10^2 \Omega$, d'un condensateur variable Cv en parallèle avec une résistance variable Rv et d'une inductance inconnue modélisée par une inductance pure Lx en série avec une résistance Rx.

e(t) est un générateur à tension continu et sinusoïdal de fréquence $f = 10 \text{ KHz}$ et de valeur efficace 3 V.

Le détecteur de zéro est un oscilloscope.

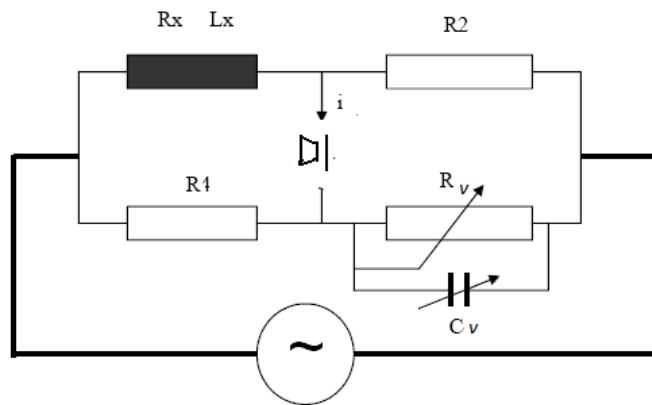


Figure 3. Schéma de principe pour la méthode pont de Maxwell

En régime sinusoïdal, l'expression de la tension complexe aux bornes du détecteur est :

$$V = E \cdot \left[\frac{(jLx\omega + Rx)}{(R2 + Rx + jL\omega)} - \frac{(R1 + jRv.R1.Cv.\omega)}{(R1 + Rv + jRv.R1.Cv.\omega)} \right]$$

En écrivant que cette tension est nulle à l'équilibre, on tire :

$$Rx = \frac{R1.R2}{Rv} \text{ et } Lx = R1.R2.Cv$$

Remarques :

- 1-) Ce montage n'est utilisable que pour des mesures en basse fréquence. En haute fréquence les capacités parasites introduites par le câblage faussent les mesures. De plus en haute fréquence la capacité entre les fils du bobinage doit être prise en compte dans la modélisation de l'inductance.
- 2-) La réalisation pratique de ce montage nécessite certaines précautions. Pour des raisons de sécurité la masse des appareils est reliée à la terre. Si on utilise un oscilloscope et un générateur BF classiques, une borne du générateur est reliée à une borne de l'oscilloscope. Il faut utiliser soit un oscilloscope différentiel qui permet d'isoler les bornes d'entrée de la masse soit un générateur BF à double isolation dont les sorties sont isolées de la terre.

Mode opératoire

Effectuer le montage en prenant $R_v = \text{infini}$ (ne pas mettre R_v)
 On commence par équilibrer le pont en continu (il a alors la structure d'un Pont de Wheatstone).
 Puis sans modifier R_v , on modifie C_v pour obtenir l'équilibre en régime sinusoïdal.

En continu :

- Mettre le générateur en tension continu 3 V (vérifiée à l'oscilloscope)
- les résistances R_1 et R_2 égales à 100 Ω
- Avec les boîtes à décades R_v rechercher l'équilibre du pont en continu.
- Quand la tension aux bornes de l'oscilloscope devient trop faible, changer la sensibilité de celui-ci jusqu'à l'obtention d'une valeur de tension continue nulle.
- En déduire la valeur de R_x . Ne toucher plus à la résistance R_v

En alternatif :

- Mettre le générateur en tension alternatif 3 V ; 10KHz (vérifiée à l'oscilloscope)
- Avec les boîtes à décades des capacités modifier la valeur de C_v pour obtenir la valeur minimale de la tension qui correspond à l'équilibre du pont.
- En déduire la valeur de L_x .
- Indiquer les approximations faites : R_x et L_x .
- Refaire l'opération précédente en variant la résistance R_2 puis équilibrer le pont de nouveau à l'aide de R_v et C_v ,
- En déduire une nouvelle valeur de R_x et de L_x .
- Détailler les calculs des incertitudes $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta(1/R_1, R_2), \Delta C_v, \Delta R_v, \Delta(1/R_v)$ et et remplir le tableau suivant.

Tableau de mesure 4: mesure de R_x et L_x par la méthode du pont de Maxwell

R_2 (Ω)	100	200	300	400	500
ΔR_2 (Ω)					
R_1 (Ω)	100	100	100	100	100
ΔR_1 (Ω)					
$K = R_1 R_2$					
$\frac{1}{K}$					
$\Delta \frac{1}{K}$					
R_v (Ω)					

ΔR_V (Ω)					
C_V (μF)					
ΔC_V (μF)					
$\frac{1}{R_V}$					
$\Delta\left(\frac{1}{R_V}\right)$					

(*) Détailler le calcul d'incertitudes.

- Tracer les graphes

$$\frac{1}{R_V} = f\left(\frac{1}{K}\right)$$

. et

$$C_V = f\left(\frac{1}{K}\right)$$

- A partir de ces courbes, déterminer R_x ; ΔR_x et L_x ainsi que ΔL_x , puis écrire le résultat sous la forme :

$$R_{eq} = \pm \text{ (unité).}$$

$$L_{eq} = \pm \text{ (unité).}$$

6. Conclusions

- Comparer les valeurs de R_x et L_x mesurées par le montage voltampèremétrique , la méthode de comparaison et le pont de Maxwell (Discuter sur la base des incertitudes).
- Discuter et commenter les résultats obtenus.

TP No 04

MESURES DE PUISSANCE EN MONOPHASE

Complément théorique

1. Rappels sur la description des grandeurs sinusoïdales.

a. Ecriture des grandeurs sinusoïdales.

On écrira une tension sinusoïdale sous la forme

$$u = U_m \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

avec U_m amplitude (V)

ω pulsation (rad.s-1)

φ phase initiale (rad)

$\omega t + \varphi$ phase instantanée (rad)

b. Valeur moyenne d'une grandeur périodique.

$$\langle u \rangle = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u \, dt$$

(pour un signal sinusoïdal $\langle u \rangle = 0$)

c. Valeur efficace d'une grandeur périodique.

C'est la racine carré de la valeur moyenne du carré de la grandeur considérée.

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2 \, dt}$$

Pour une tension sinusoïdale on trouve :

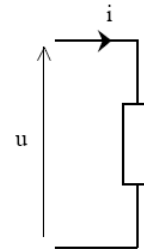
$$U = U_m / \sqrt{2} \quad \text{ainsi on écrira souvent} \quad u = U\sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

La valeur efficace est celle indiquée par les voltmètres et les ampèremètres. En électrotechnique on donne toujours la valeur efficace des tensions et des courants. Ainsi quand on parle du réseau électrique domestique à 220 V il s'agit bel et bien de la valeur efficace de la tension.

Remarque : Au type d'appareil de mesure utilisé. Les voltmètres et ampèremètres ferromagnétiques et électrodynamiques indiquent la valeur efficace quelque soit la forme du signal mesuré (sinusoïdal ou non) ; tandis que les appareils magnétoélectriques ne donnent une valeur efficace exacte que pour des grandeurs sinusoïdales.

2. Puissances en régime monophasé.

Avec la convention de signe récepteur si la puissance est positive alors le système considéré reçoit de l'énergie, si la puissance est négative alors il cède de l'énergie.



a. Puissance instantanée.

$$p = u \cdot i \quad (\text{watt} - W)$$

b. Puissance active (puissance moyenne).

La puissance active est la valeur moyenne de la puissance instantanée ; dans le cas de grandeurs périodiques de période T :

$$P = \langle p \rangle = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p \, dt \quad (\text{watt} - W)$$

C'est l'énergie effectivement récupérable par la charge (sous forme de travail mécanique, de chaleur, etc.). Dans le cas d'un courant et d'une tension sinusoïdales $u = U\sqrt{2} \cdot \cos(\omega t)$ et

$i = I\sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + \varphi)$ on trouve :

$$p = UI \cdot \cos \varphi + UI \cdot \cos(2\omega t + \varphi)$$

d'où $p = UI \cdot \cos \varphi$ la puissance active en régime sinusoïdal monophasé.

On retrouve ce résultat en écrivant $P = \vec{U} \cdot \vec{I}$ (produit scalaire des vecteurs associés à la tension et à l'intensité)

c. Puissance apparente.

On définit la puissance apparente par :

$$S = U \cdot I \text{ (volt-ampère – VA)}$$

Ce qui permet d'introduire le facteur de puissance : $k = P / S$ (sans unité)

En régime sinusoïdal on trouve donc $k = \cos\varphi$.

d. Puissance réactive en régime sinusoïdal.

La puissance réactive en régime sinusoïdal est donnée par

$$Q = UI \cdot \sin\varphi \text{ (volt-ampère réactifs – VAR)}$$

On peut alors écrire $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$

et un certain nombre de relation utiles:

$$\tan\varphi = Q/P \qquad \cos\varphi = P/S \qquad \sin\varphi = Q/S$$

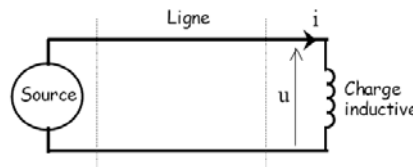
Vectoriellement on peut exprimer la puissance réactive sous la forme d'un produit scalaire :

$$Q = \vec{U}' \cdot \vec{I} \quad \text{avec } \vec{U}' \text{ vecteur déphasé en arrière de } \pi/2 \text{ par rapport à } \vec{U} \text{ et de même norme.}$$

Interprétation physique.

La puissance réactive traduit les échanges d'énergie, à valeur moyenne nulle entre une source et une inductance ou une capacité.

Ainsi si on considère une source de tension sinusoïdale alimentant une charge purement inductive via une ligne, la puissance active consommée par la charge est nulle. En effet dans l'inductance la tension est en avance de $\varphi = \pi/2$ par rapport au courant, d'où $P = UI \cdot \cos\varphi = 0$. La puissance réactive est égale à la puissance apparente $Q = UI \cdot \sin\varphi = UI = S$ et $k = 0$.

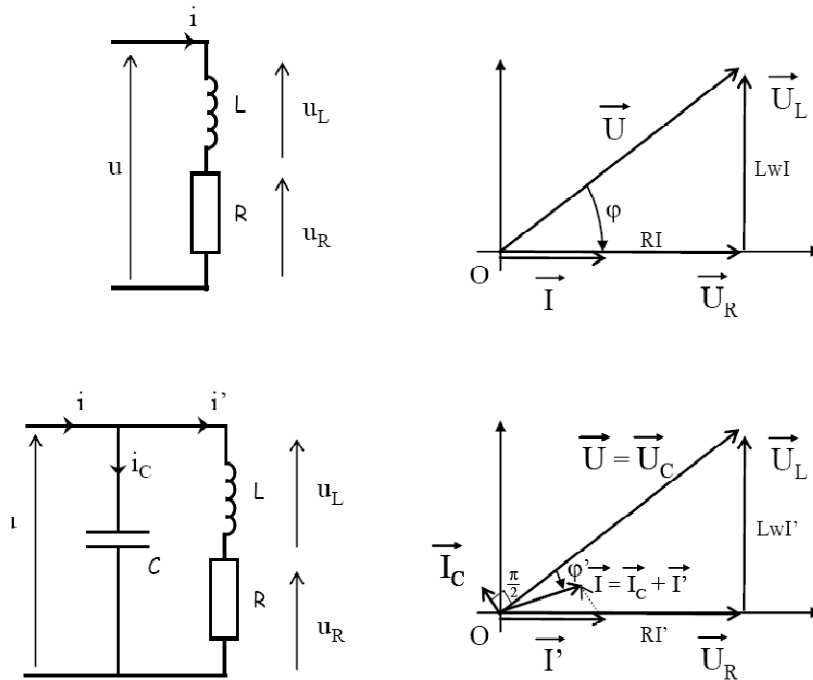


Périodiquement, l'inductance stocke une certaine énergie magnétique fournie par la source puis la restitue ; cet échange d'énergie se fait via la ligne électrique. C'est la puissance apparente qui permet de dimensionner la ligne, cette dernière est parcourue par l'énergie électrique échangée et est le siège de pertes par effet Joule.

Les installations industrielles sont en général inductives (à cause des enroulements des moteurs), de plus les compteurs électriques mesurent et permettent de facturer la puissance active consommée par un abonné. Ainsi si le facteur de puissance d'un abonné est faible les pertes joule dans le réseau électrique sont élevées par rapport à la puissance active qui lui est facturée. Aussi SONALGAZ impose-t-il une valeur minimale du facteur de puissance (un $\cos\varphi$ minimal), sous peine de pénalités financières, aux utilisateurs.

Le facteur de puissance k , définit en quelque sorte un taux d'activité "utile" de la ligne.

Pour relever le facteur de puissance d'une charge inductive il suffit de placer en parallèle de la charge des condensateurs en batterie, cette technique est illustrée figure suivante (la tension U étant imposée par le réseau elle n'est pas modifiée) :



$$\cos\phi' > \cos\phi$$

A noter que la capacité ajoutée ne consomme pas de puissance active.

e. Théorème de Boucherot.

Dans un réseau, à fréquence constante, il y a conservation de la puissance active d'une part et de la puissance réactive d'autre part.

Remarque : le théorème de Boucherot n'est pas valable pour la puissance apparente.

Ainsi si on considère l'association de k dipôles, qu'ils soient placés en série, en parallèle ou en toute combinaison série-parallèle possible, on a :

$$P = \sum_k P_k \quad Q = \sum_k Q_k \quad S \neq \sum_k S_k$$

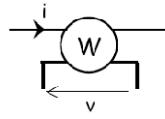
avec P, Q et S les puissances actives, réactives et apparentes de l'ensemble et P_k, Q_k et S_k celles associées à chacun des dipôles.

Puissance complexe.

On définit également une puissance complexe $\mathcal{P} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = P + jQ$

3. Le Wattmètre.

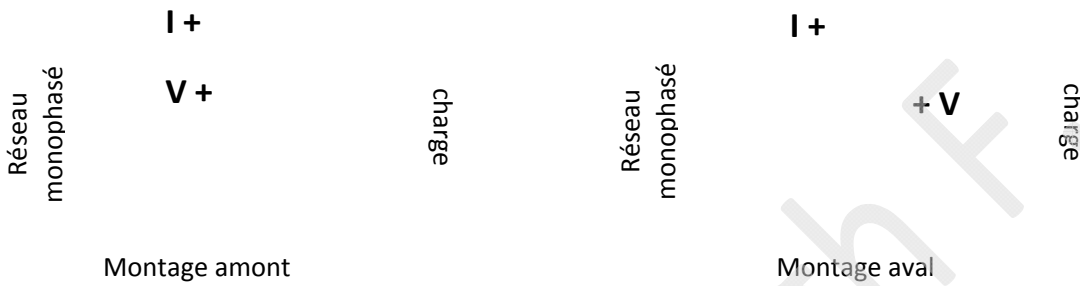
En électrotechnique les mesures de puissance sont effectuées au moyen de wattmètres, dont le symbole est donné ci-après :



Cet appareil permet de mesurer la puissance active correspondant au courant i traversant son circuit courant et à la tension v aux bornes de son circuit tension.

L'indication donnée par le wattmètre est : $W = \langle vi \rangle = \vec{V} \cdot \vec{I} \text{ (W)}$

Type de montage d'un wattmètre



Le wattmètre AOIP WATT 25

1- Caractéristiques

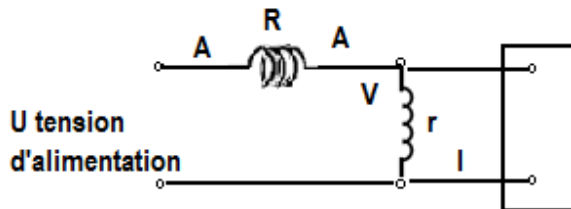
Ce wattmètre électrodynamique permet la mesures des puissances en continu ou alternatif monophasé ou triphasé.

Référence	Intensité en ampère A	Tension en volts V	Résistances internes Ω	Puissances max	Précision à 50 Hz
WATT 25	12,5	30-400	$51 \cdot 10^3$	11 KW	1 %
	25				

W 2- Utilisation en courant alternatif

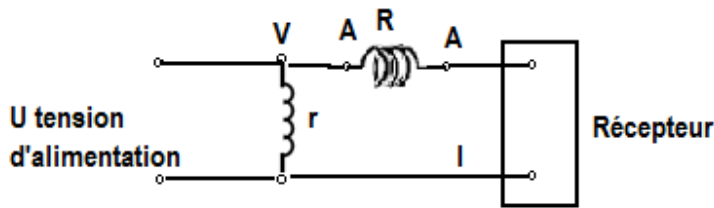
a) Principe

Le montage aval où le circuit tension est branché aux bornes du récepteur. Il est surtout employé pour mesurer la puissance UI réellement absorbée par le circuit d'utilisation. C'est le cas le plus général.



U mesurée est exacte
I mesurée est fausse par excès de la valeur U/r

Le montage amont où le circuit tension est branché aux bornes de l'alimentation. Il est surtout employé pour mesurer la puissance $U'I'$ fournie par la source.



I mesurée est exacte
 U mesurée est fausse par excès de la valeur R I


b) Montage pratique

- Brancher le circuit tension en choisissant le calibre entre 30 et 450 volts
- S'assurer que le commutateur d'intensité est sur la position court circuit (c.c.) avant de brancher le circuit intensité.
- choisir le calibre intensité après contrôle de sa valeur sur un ampèremètre placé en série.
- relier la borne V à l'une des deux bornes A . le choix de l'une ou l'autre de ces bornes dépend de la mesure à effectuer.
- Effectuer la lecture sur l'échelle noire 0 à 150 et multiplier cette lecture par le coefficient K donné par le tableau suivant en fonction des calibres utilisés. Le résultat donne directement la puissance en Watts.

Exemple : calibre 12,5 A ; calibre tension 75 V

Si l'aiguille est sur la division 100, multiplier cette lecture par le coefficient $K=6,25$, soit $P = 100 \times 6,25 = 625 \text{ W}$

Calibre tension		30	75	150	300	450
Calibre intensité	12,5 A	2,5	6,25	12,5	25	37,5
	25 A	5	12,5	25	50	75



MISE EN GARDE : Pour toutes les manipulations, les montages seront réalisés hors tension et vérifiés par le professeur avant mise sous tension.

TP N°4 : Mesures de puissances en monophasé

1. Objectifs

Mesurer les puissances consommées par les charges résistive, inductive et capacitive parcourues par un courant alternatif à l'aide d'un wattmètre ou d'un voltmètre et d'un ampèremètre.

2. Travail de préparation


Q1- Montrer que lorsque les grandeurs u et i sont sinusoïdales et déphasées de φ :

Q2- Calculer les erreurs de montage commises lors de ces mesures.

Q3- Démontrer le théorème de Boucherot

Matériels utilisés

Vous disposez du matériel suivant :

01 alimentation en alternatif secteur  DANGER	220 V , 10 A
0 1 Wattmètre	AOIP type WATT 25A
01 Voltmètre	Magnétoélectrique ou numérique
0 1 Ampèremètre	Magnétoélectrique ou numérique
01 plaque de montage	
01 une lampe	100 W ; Ω
01 une lampe	40 W ; Ω
01 capacité	28 μ F
01 une bobine	1 H ; 230 Ω
04 Fil rouge	
0 4 Fil noir	

NB : Ne pas oublier de relever les caractéristiques des appareils de mesure utilisés et les informations concernant leur résistance interne (la chute de tension pour l'ampèremètre et la résistance spécifique pour le voltmètre).

Tableau des Caractéristiques des appareils

Appareil	Alimentation	Ampère mètre	Voltmètre	Wattmètre
Caractéristiques				
Classe				
Résolution				

Etendue				
---------	--	--	--	--

3. Manipulation N° 1 : Puissance absorbée par une récepteur

Schéma de montage

R₁ lampe de 100 W, R₂ lampe de 40 W, C=28 μF et L est une inductance 1H ; 230Ω.

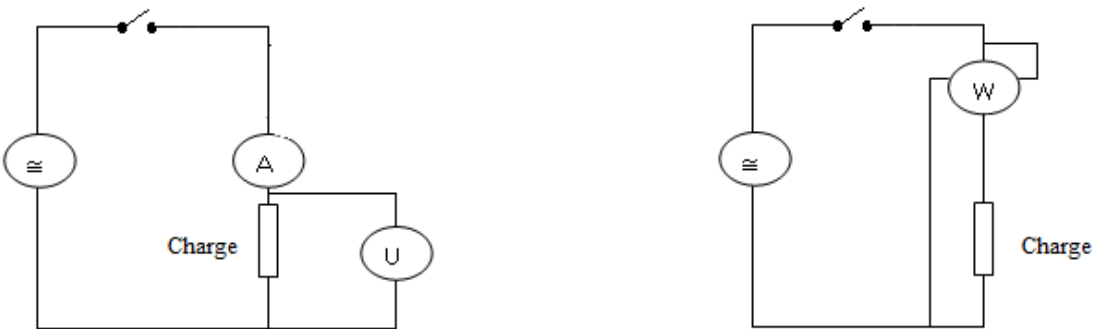


Fig.1 : Montage de mesure de la puissance en alternatif

Mode opératoire

Montage amont :

- Faire vérifier votre montage par le professeur avant de mettre sous tension
- La mesure de puissance sera effectuée grâce à un wattmètre.
- Réaliser le montage ci-dessus (montage amont) en prenant le calibre intensité 12,5A et le calibre tension 30 V.
- Brancher la sortie de l'ampèremètre sur R1
- Noter la valeur efficace du courant $i(t)$: I ainsi que celle de la tension d'alimentation notée U.
- Noter la puissance active P tel que $P = \text{lecture} \times K$, puis calculer la puissance réactive Q et apparente S ainsi que le facteur de puissance $\cos \varphi$ absorbés par le récepteur.

Recommencer les opérations précédentes avec R2, C et L et le circuit combiné R1 // R2 , L// R1 , L// C

Enfin refaire les opérations avec un montage aval :

Complétez le tableau suivant pour les deux montages

Tableau de mesure 1 :

Tableau de mesure 3 : Comparaison des mesures directes et indirectes

	P_{directe}	$P_{\text{indirecte}}$	$ P_{\text{dir}} - P_{\text{indir}} $	ΔP_{dir}	ΔP_{indir}	$\Delta P_{\text{dir}} + \Delta P_{\text{indir}}$
$P_1(R_1)$						
$P_2(R_2)$						
$P_3 (R_1 // R_2)$						
$P_4 (C)$						
$P_5 (L)$						
$P_6 (L // R_1)$						
$P_7 (L // C)$						

6. Conclusions

- Discuter et commenter les résultats obtenus.

ANNEXES

Les grandeurs électriques et leurs unités

Les principales grandeurs électriques qu'un électrotechnicien est **amené** à mesurer sont

- la tension ou différence de potentiel entre deux points,
- l'intensité d'un courant dans une branche,
- la résistance ou l'impédance d'un récepteur,
- la capacité d'un condensateur,
- la puissance dissipée dans un circuit,
- la fréquence et la période d'un signal

Les grandeurs et unités de base dans le système international (**SI**) sont données par les tableaux suivants :

Tableau 1 : Grandeurs et unités usuelles en Electrotechnique

Grandeur	Symbole	Unité	Symbole	Appareil de mesure
Tension	U	Volt	V	Voltmètre
Intensité	I	Ampère	A	Ampèremètre
Puissance	P	Watt	W	Wattmètre
Energie	W, E	kWh	kWh	Compteur d'énergie
Résistance	R	Ohm	Ω	Ohmmètre
Impédance	Z	Ohm	Ω	Ponts d'impédances
Réactance	X	Ohm	Ω	Ponts d'impédances
Capacité	C	Farad	F	Capacimètre
Inductance	L	Henry	H	
Déphasage	φ	radian, degré	rad ($^{\circ}$)	
Période	T	seconde	s	Périodemètre
Fréquence	f	Hertz	Hz	Fréquencemètre
Vitesse de rotation	N	tour par seconde	s^{-1} (tr/s)	Tachymètre
Pulsation	ω	radian / seconde	rad/s	
Induction magnétique	B	Tesla	T	Teslamètre
Flux magnétique	ϕ	Weber	Wb	Fluxmètre
Température	T, θ	degrés Celsius	$^{\circ}\text{C}$	Thermomètre
Pression	P	Pascal	Pa (ou bar)	Baromètre
Chaleur	Q	Calorie	Cal	Calorimètre
Eclairage	E	Lux	Lux	Luxmètre
Intensité lumineuse	I	Candela	Cd	Candelamètre

Tableau 2 : Multiples et sous multiples des unités

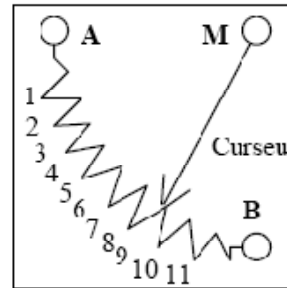
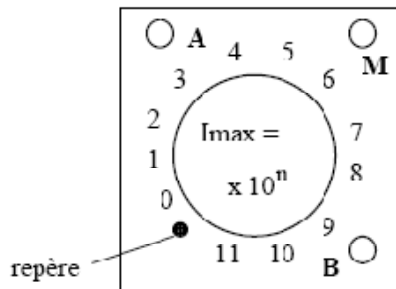
Préfixe	Symbole	Multiplicateur	Préfixe	Symbole	Multiplicateur
Téra	T	10^{12}	déci	d	10^{-1}
Giga	G	10^9	centi	c	10^{-2}
méga	M	10^6	milli	m	10^{-3}
Kilo	K	10^3	micro	μ	10^{-6}
Hecto	h	10^2	nano	n	10^{-9}
déca	da	10^1	pico	p	10^{-12}

LE MATERIEL A. O. I. P.

LES BOITES A DECADES

Vue extérieur (haut)

Schéma de principe



- Les boîtes sont encastrables, de telle sorte qu'il soit possible de réaliser des montages compacts.
- Si une boîte est utilisée entre les bornes A et M, elle permet de réaliser une résistance connue que l'on peut faire varier à volonté entre $0 \times 10^n \Omega$ et $11 \times 10^n \Omega$ (n est un nombre entier).
- Il existe toute une gamme de boîtes de $n = -1$ (ou $\times 0,1$), $n = 0$ (ou $\times 1$) jusqu'à $n = 6$ (ou $\times 10^6$).
- Sur chaque boîte est inscrit la valeur du courant maximal admissible sous peine de détérioration.
- La précision garantie par le constructeur est indiquée sur un côté de la boîte (0,2% ou 0,5% selon la valeur de n).
- Il faut toujours éviter de faire passer inutilement du courant entre deux mesures : les résistances s'échauffent et leur valeur peut légèrement varier.

Les boîtes ohms

D'aspect extérieur semblable, elles permettent d'obtenir entre A et M des résistances de 1 Ω , 10 Ω , 100 Ω , etc. sans valeurs intermédiaires.

BOITES TETE DE PONT OU BOITES DE RAPPORT

Elles sont utilisées dans le montage de certains ponts de mesure. L'indication qu'elles portent correspond au rapport des deux résistances a et b déterminées entre les bornes M et B d'une part, A et M d'autre part.

CLES DE CONTACT

- Levier à l'horizontal : circuit coupé, l'interrupteur est couvert.
- Levier en position haute : circuit fermé.
- Levier en position basse : contact à impulsion.

CONNEXIONS

Elles peuvent être réalisées à l'aide de barrettes métalliques qu'il faut veiller à bien serrer. Il en existe de différentes tailles adaptées à tous les types de montages.