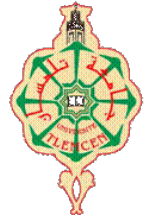


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen
Faculté de Technologie



Département Sciences et Technologie
LMD : Sciences et Technologie LMD - 2^o Année

TRAVAUX PRATIQUES D'ELECTROTECHNIQUE

A.Mechernene et M.A. Brikci Nigassa

Table des matières

AVANT-PROPOS

DEROULEMENT DES SEANCES DE TRAVAUX PRATIQUES	1
RECOMMANDATIONS RELATIVES A LA REDACTION DES COMPTES RENDUS.....	1
RECOMMANDATIONS RELATIVES A L'ELABORATION DES MONTAGES ELECTRIQUES.....	3
GENERALITES SUR LES MESURES	4
COMPLEMENT THEORIQUE N°1 MESURE DE RESISTANCES.....	15
TP N°1 : MESURE DE RESISTANCES	24
COMPLEMENT THEORIQUE N°2 MESURE D'IMPEDANCES.....	28
TP N°2 : MESURE D'IMPEDANCES.....	35
COMPLEMENT THEORIQUE N°3 DIPOLE RLC A FREQUENCE VARIABLE.....	39
TP N°3 : DIPOLE RLC A FREQUENCE VARIABLE.....	43
COMPLEMENT THEORIQUE N°4 REDRESSEMENTS MONOPHASES	48
TP N°4 : REDRESSEMENTS MONOPHASES.....	54
COMPLEMENT THEORIQUE N°5 THYRISTOR ET REDRESSEMENT MONO-ALTERNANCE....	58
TP N°5 : THYRISTOR ET REDRESSEMENT MONO-ALTERNANCE.....	62

ANNEXES

- Tracer une courbe expérimentale avec le tableur Excel
- Les grandeurs électriques et leurs unités
- Feuille réponse pour le tracé d'oscillogramme
- Extrait datasheet : Thyristor 2N4443

Avant-propos

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

Dans l'enseignement du génie électrique, 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 employés, 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 cinq 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 requis ;
- les manipulations proposées, complétées d'un schéma de montage et d'un mode opératoire détaillé.

En annexe, l'étudiant trouvera un bref rappel sur le tracé d'une courbe expérimentale à l'aide du tableur Excel, un rappel sur les principales grandeurs électriques et des feuilles réponses pour lui faciliter le relevé d'oscillogrammes lors des manipulations.

Déroulement des séances de travaux pratiques

- Les manipulations seront effectuées en binôme ou trinôme, selon le cycle des permutations défini 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 0/20 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 appel à 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.

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 4 ou 5 pages, les graphiques étant inclus.
- Le compte-rendu comportera impérativement les rubriques suivantes :
 - **une page de garde** 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 utilisées 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 fixés, 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 rangé en fin de séance, etc...), la **prestation des étudiants** le jour du TP (au sein d'un binôme, si l'un des deux étudiants effectue 80% du travail, il est évident que la note attribuée à chaque étudiants sera différente), le **comportement des étudiants** (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'élaboration des montages électriques

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 rangé,
- choisir les différents éléments constitutifs du montage et les disposer en respectant pour chacun la disposition qu'indique le schéma pratique,
- les régler (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 oscilloscope et 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 le *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, le 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 un 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 réduire 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 au mesurande.
- Un **étalon de mesure** est un dispositif auquel on doit se fier pour contrôler l'exactitude des résultats 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* a 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 mesurée 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.e.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 autre 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 considérations. 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 toute 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 rencontré.

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 :

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

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 :

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

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 :

$$\delta U_{inst} = \frac{\Delta U_{inst}}{U} = \frac{0.15}{24} \approx 0.006 = 0.6\% \quad \text{ou encore} \quad \delta U = \frac{0.5}{100} \cdot \frac{150}{120} \approx 0.006 = 0.6\%$$

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.**

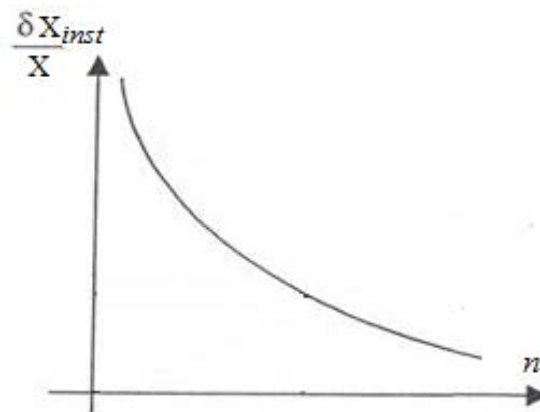


Figure 1. Courbe de l'erreur relative instrumentale en fonction de la lecture

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 :

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

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

Exemple : Soit une mesure de tension est réalisée 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 :

$$(y/100).U = (0.2/100).24 = 0.048 \text{ Volt}$$

alors que le second est lui égal à :

$$z \cdot (\text{gamme}/\text{nombre de points}).U = 1 \cdot (30/300) = 0.1 \text{ Volt}$$

d'où :

$$\Delta U = 0.048 + 0.1 = 0.148 \approx 0.15 \text{ Volt}$$

et l'incertitude relative correspondante est donc :

$$\delta U = \frac{\Delta U}{U} = \frac{0.15}{24} \approx 0.006 = 6\%$$

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 :

$$\delta X_{op\acute{e}rat} = \frac{\Delta X_{op\acute{e}rat}}{X} = \frac{1}{4} \cdot \frac{Calibre}{Echelle \cdot X} \quad \text{or} \quad \frac{Calibre}{X} = \frac{Echelle}{Lecture}$$

donc :

$$\delta X_{op\acute{e}rat} = \frac{\Delta X_{op\acute{e}rat}}{X} = \frac{1}{4 \cdot Lecture}$$

Elle est inversement proportionnelle à la lecture en divisions, si bien, que là 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 :

$$\Delta X_{totale} = \Delta X_{inst} + \Delta X_{op\acute{e}rat} + \Delta X_{m\acute{e}th}$$

- pour les appareils à affichage numérique:

$$\Delta X_{totale} = \Delta X_{inst} + \Delta X_{m\acute{e}th}$$

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 .

1^{ère} étape : Exprimer la différentielle :

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

2^{ème} 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 :

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

1^{ère} étape : Expression de la différentielle :

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

2^{ème} 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 :

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

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

Exemples :

$$I = I_1 + I_1 + I_1 \Rightarrow \Delta I = \Delta I_1 + \Delta I_1 + \Delta I_1$$

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

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.

Exemples :

6,8	possède 2 chiffres significatifs
6,80	possède 3 chiffres significatifs
6800	possède 4 chiffres significatifs
0,68	possède 2 chiffres 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 :

$25,42 \times 72,5 = 1,84.10^3$		
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 à 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 augmenté 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 d'éliminer 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 :

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

mais pas 11600 g (5 chiffres significatifs) ;

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

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 donné avec 3 chiffres significatifs suffit pour les mesures ordinaires. Il est conseiller d'effectuer les calculs intermédiaires avec un nombre de chiffres significatifs plus élevé 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

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

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

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

COMPLEMENT THEORIQUE N°1

MESURE DE RESISTANCES

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).

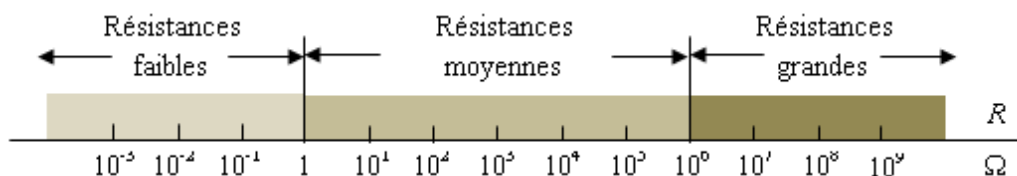


Figure 1. Classification des résistances selon leur ordre de grandeur

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'émail. 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).

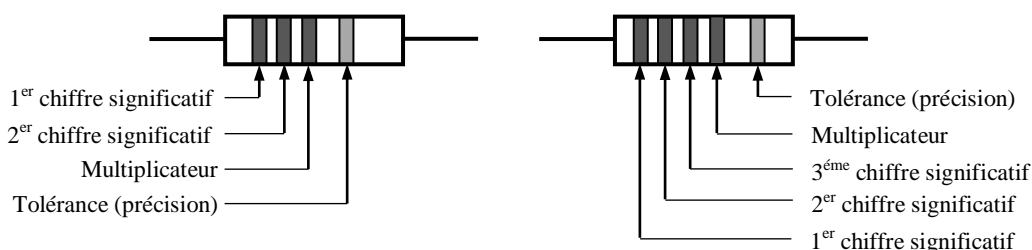
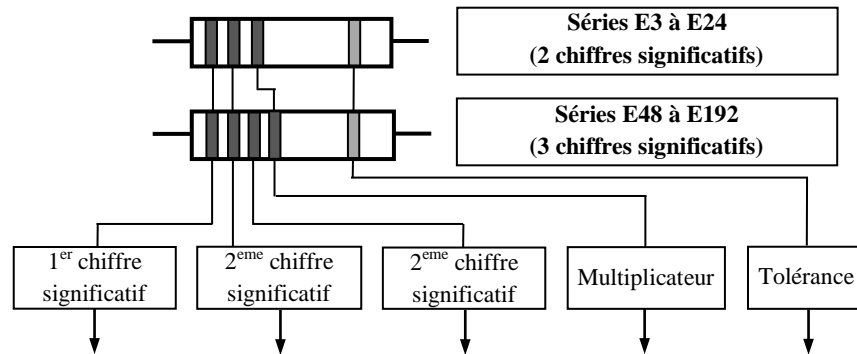


Figure 2. Identification des résistances avec le code des couleurs

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).



Noir		0	0	$\times 10^0$	20 %
Marron	1	1	1	$\times 10^1$	1 %
Rouge	2	2	1	$\times 10^2$	2 %
Orange	3	3	2	$\times 10^3$	
Jaune	4	4	3	$\times 10^4$	
Vert	5	5	4	$\times 10^5$	
Bleu	6	6	5	$\times 10^6$	
Violet	7	7	6	$\times 10^7$	
Gris	8	8	7	$\times 10^8$	
Blanc	9	9	8	$\times 10^9$	
Argent				$\times 10^{-2}$	10 %
Or				$\times 10^{-1}$	5 %

Figure 3. Marquage des résistances avec le code des couleurs

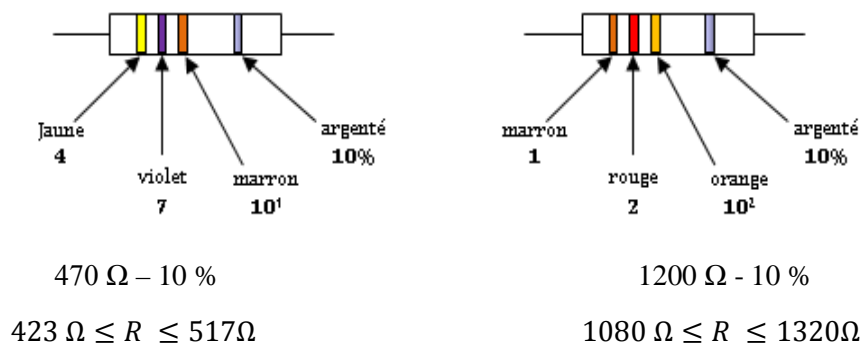


Figure 4. Exemple d'identification de la valeur d'une résistance avec le code des couleurs

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.

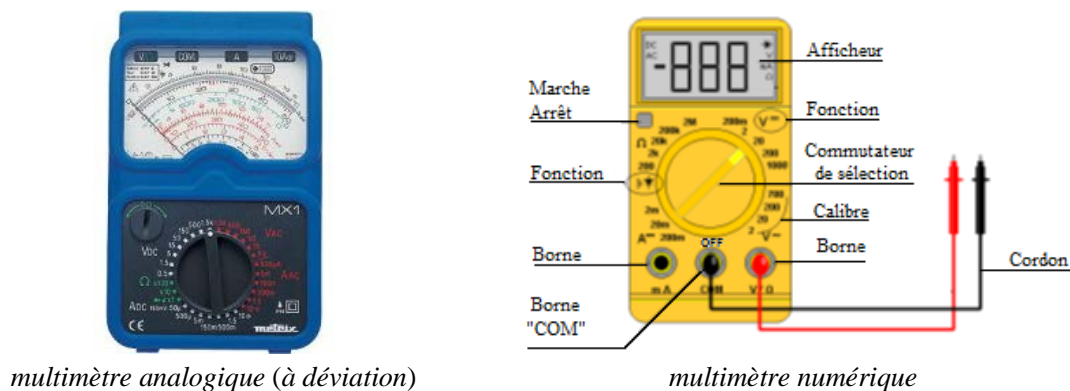


Figure 5. Présentation modèles de multimètres

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 faire 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.

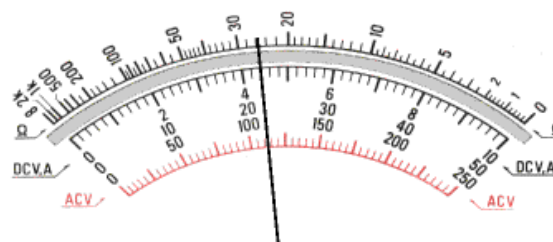


Figure 6. Graduations d'un ohmmètre à déviation

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 .

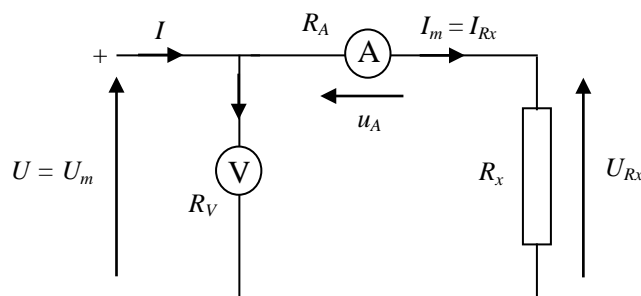


Figure 7. Montage amont

La résistance mesurée R_m est donc :

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

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_m est donnée par la relation :

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

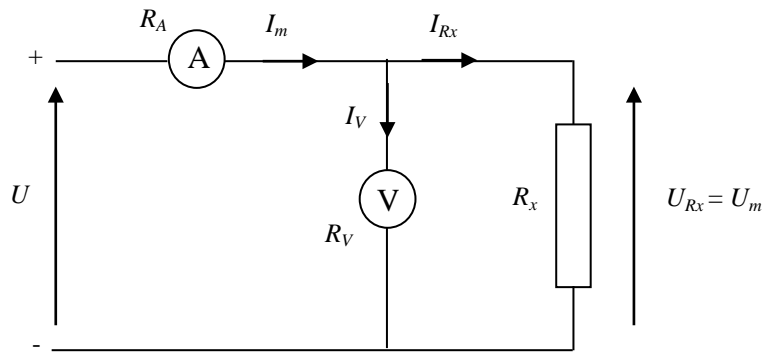


Figure 8. Montage aval

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 :

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

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

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

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.

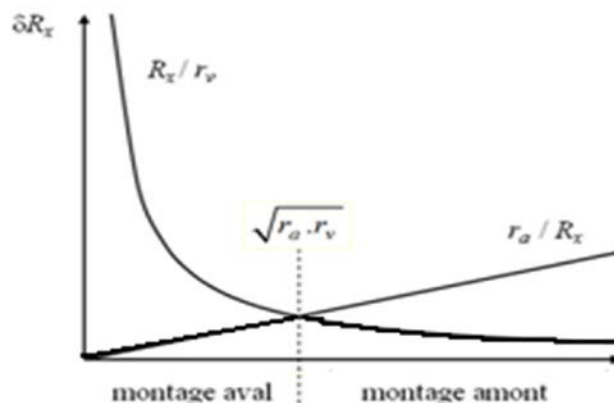


Figure 9. Variations des erreurs relatives en fonction de la valeur de la résistance à mesurer

Le choix du montage sera fait selon la règle suivante :

- si $R_x \text{ approchée} \leq \sqrt{R_A \cdot R_V}$ (résistances de faibles valeurs) on privilégie le montage aval ;
- si $R_x \text{ approchée} \geq \sqrt{R_A \cdot R_V}$ (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 donnée par les relations suivantes :

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

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

• 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 Ω), pour les résistances faibles (<1 Ω) et les grandes résistances (>1M Ω), on utilise des méthodes spécifiques. Elle s'avère beaucoup plus longue à mettre en œuvre par rapport par rapport à l'emploi d'un ohmètre, mais plus précise s'il s'agit d'un appareil à déviation. Toutefois une mesure à l'aide d'un ohmètre 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 continu, et donc parcouru par un même courant I (figure 10).

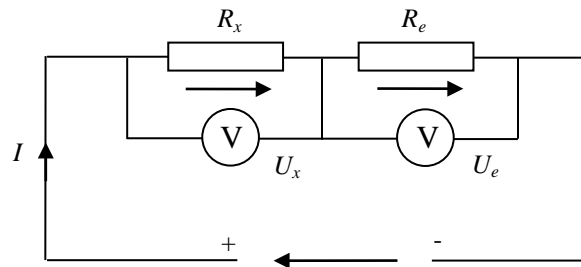


Figure 10. Schéma de principe pour la méthode de comparaison

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 à 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 inférieur 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 répandu, son mode opératoire est simple et rapide, sa précision satisfaisante et elle est particulièrement bien adaptée aux faibles résistances.

TP N°1 : MESURE DE RESISTANCES

1. Objectifs

- Mesurer par différentes méthodes la résistance de dipôles passifs.
- Evaluer la précision relative pour chacune des méthodes.

2. Matériel nécessaire

01	Pupitre d'essai (<i>Electronica Veneta</i>)	
01	Alimentation stabilisée	DC : 2 x (0 / 30 V - 3 A)
02	Résistances (inconnue)	R_{x1} ; R_{x2} - 17 W (sur pupitre)
01	Résistances étalons – (<i>RBOX 418</i>)	$R_{e1} = 30 \Omega$ - 1 W - 1 % $R_{e2} = 2 \text{ k}\Omega$ - 1 W - 1 %
01	Résistance variable - (<i>RBOX 418</i>)	$R_H = 20 \Omega$ - 1 W - 1 %
01	Multimètre	à déviation
01	Multimètre	numérique
01	Voltmètre	Magnétoélectrique ou numérique
01	Ampèremètre	Magnétoélectrique ou numérique

3. 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.
- Q2- 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.
- Q3- Donner le principe de la mesure des résistances par la méthode du *Pont de Wheatstone*, citer un mode opératoire, faites une étude des incertitudes et énumérer les précautions à respecter pour obtenir une précision satisfaisante.
- Q4- Donner le principe de la *méthode du voltmètre en série* pour la mesure des résistances de grandes valeurs, citer un mode opératoire, faites une étude des incertitudes et énumérer les précautions à respecter pour obtenir une précision satisfaisante.

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

Il s'agit de déterminer les valeurs des deux résistances inconnues R_{x1} et R_{x2} 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.

• Tableau de mesure :

Complétez le tableau suivant pour chacune des résistances R_{x1} et R_{x2} .

Résistance :	$R_{x..}$	Code des couleurs	Ohmmètre numérique	Ohmmètre à déviation
	$R_{x..}$	Ω		
	$\Delta R_{x..}$	Ω		
	$\delta R_{x..}$	%		
	$R_{x..} - \Delta R_{x..} \leq R_{x..} \leq R_{x..} + \Delta R_{x..}$	Ω		

5. 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 chacune des résistances R_{x1} et R_{x2} , les appareils de mesure étant imposés. Puis, après avoir effectué les mesures, de déterminer la valeur de chacune des résistances et son incertitude pour le montage choisi.

• Schéma de montage

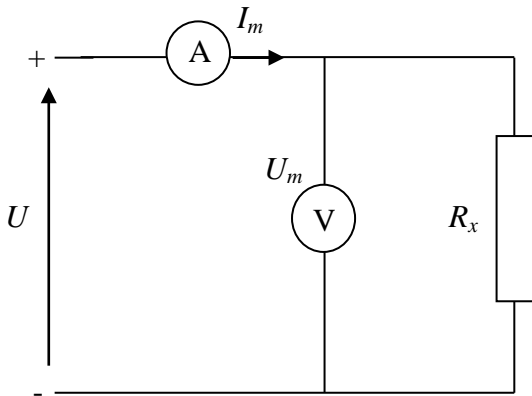


Figure 1.a Montage aval

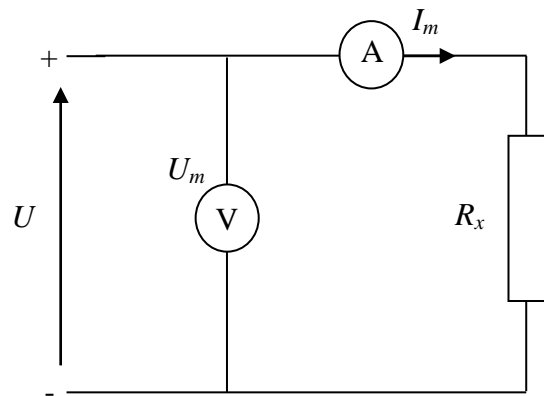


Figure 1.b Montage amont

• Mode opératoire

Pour chacune des résistances R_{x1} et R_{x2} :

- évaluer la puissance maximale admissible ;
 - en déduire l'intensité maximale admissible ;
 - calculez la valeur maximale de la tension supportable par la résistance ;
 - choisir une valeur pour la tension d'alimentation en fonction du générateur disponible 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 ;
- déterminer le montage le mieux approprié à la mesure de la résistance considérée ;
 - réaliser le montage correspondant ;
 - faire vérifier les calculs et le montage ;
 - ajuster les calibres des appareils de mesure conformément aux valeurs estimées antérieurement ;
 - alimenter le montage et régler la tension d'alimentation ;
 - relever les indications du voltmètre et de l'ampèremètre.

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

• **Tableau de mesure :**

Complétez le tableau suivant pour chacune des résistances R_{x1} et R_{x2} .

Résistance : $R_{x..}$ **Montage adopté :**

$P_{max} = \dots\dots\dots$ Watts $I_{max} = \dots\dots\dots$ Ampères $U = \dots\dots\dots$ Volts

$U_{m..} = (C_V / N_V) . L_V$					V
$I_{m..} = (C_A / N_A) . L_A$					A
$R_{m..} = (U_{m..} / I_{m..})$		Ω	$(\Delta U_{m..} / U_{m..})$ <i>instr + opérat</i>		%
$(\Delta I_{m..} / I_{m..})$ <i>instr + opérat</i>		%	$(\Delta R_{m..} / R_{m..})$ <i>instr + opérat</i>		%
$(\Delta R_{m..} / R_{m..})$ <i>méthode</i>		%	$(\Delta R_{m..} / R_{m..})$ <i>totale</i>		%
δR_x		%	ΔR_x		Ω
$R_{x..} - \Delta R_{x..} \leq R_{x..} \leq R_{x..} + \Delta R_{x..}$					Ω

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

Il s'agit de déterminer les valeurs des deux résistances inconnues R_{x1} et R_{x2} à l'aide de la méthode de comparaison puis de déterminer, pour chacune des résistances, son incertitude.

• **Schéma de montage**

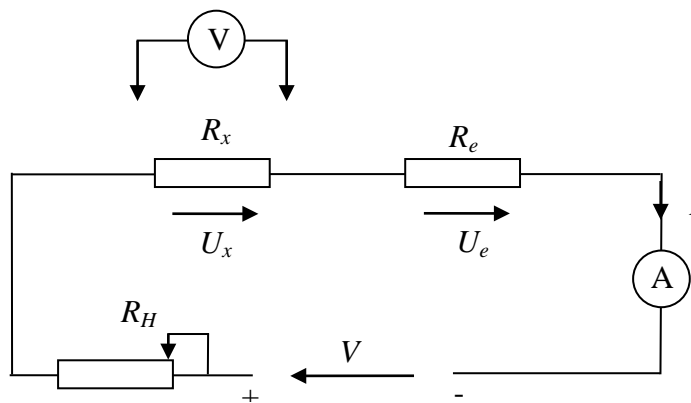


Figure 2. Schéma de montage pour la méthode de comparaison

• **Mode opératoire**

Pour chacune des résistances R_{x1} et R_{x2} , connaissant son intensité maximale admissible :

- réaliser le montage et faire le vérifier ;
- régler la tension d'alimentation V sur zéro ;
- régler le rhéostat R_H 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 les résistances ;

- choisir le calibre approprié pour le voltmètre et brancher le aux bornes de la résistance ;
- ajuster l'alimentation pour obtenir une déviation correspondant à une graduation du troisième tiers de son échelle ;
- relever la déviation n_x de l'appareil ;
- brancher le voltmètre aux bornes de la résistance étalon R_e ;
- relever la nouvelle déviation n_e .

• **Tableau de mesure :**


Complétez le tableau suivant pour chacune des résistances R_{x1} et R_{x2} .

Résistance : $R_{x..}$ $U = \dots\dots\dots$ Volts $\delta R_{e..} = \dots\dots\dots$ %
 $P_{max} = \dots\dots$ Watts $I_{max} = \dots\dots$ Ampères $\Delta n = \dots\dots\dots$ div

n_e		div	Calibre : C_V		V
n_x		div	Echelle : N_V		div
δR_x		%	ΔR_x		Ω
$R_{x..} - \Delta R_{x..} \leq R_{x..} \leq R_{x..} + \Delta R_{x..}$					Ω

7. Travail à effectuer

- Rédiger un compte-rendu de TP dans lequel vous exposerez tous les résultats accompagnés de leur interprétation.
- Comparer les valeurs des résistances R_{x1} et R_{x2} et les précisions obtenues avec les différentes méthodes de mesure mises en œuvre.
- Donnez une conclusion à ce travail.

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

COMPLEMENT THEORIQUE N°2

MESURE D'IMPEDANCES

1. Modèles équivalents des dipôles en régime sinusoïdal

Les dipôles sont essentiellement modélisés, en régime linéaire, par des associations d'éléments parfaits tels que les *résistances pures*, les *inductances* 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. 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

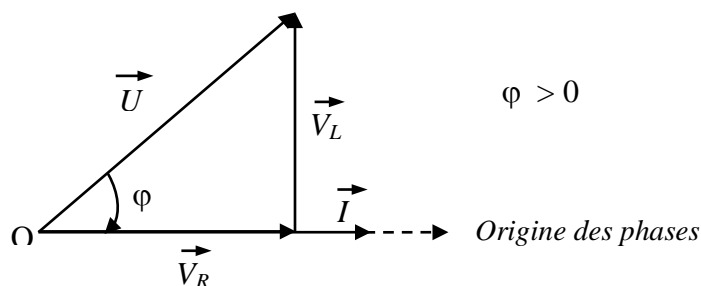


Figure 2. Diagramme de Fresnel pour le modèle série d'une bobine

- Impédance complexe :

$$\underline{Z} = R_s + j \cdot (L_s \cdot \omega) = Z \cdot e^{j\varphi}$$

- Module et argument (déphasage) :

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

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).

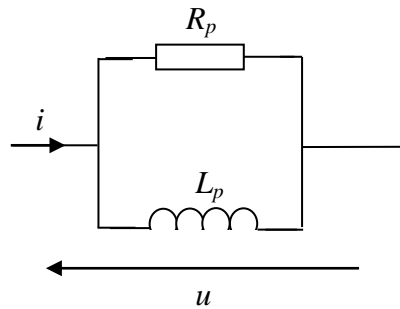


Figure 3. Modèle parallèle d'une bobine réelle

- Équivalence 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 d'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.

3. 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 4).

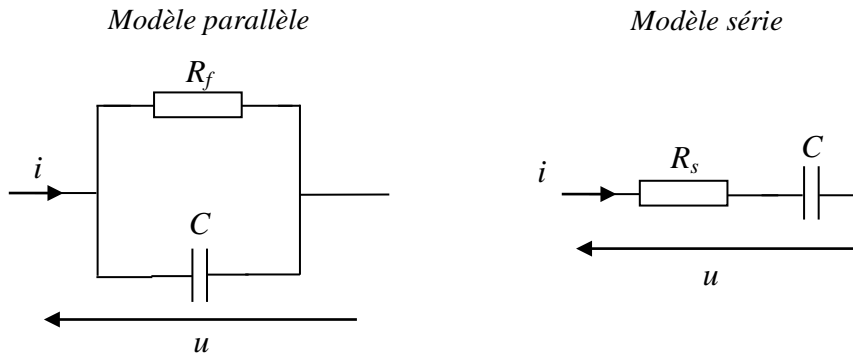


Figure 4. Modèles d'un condensateur réel

• **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 4).

- Représentation vectorielle

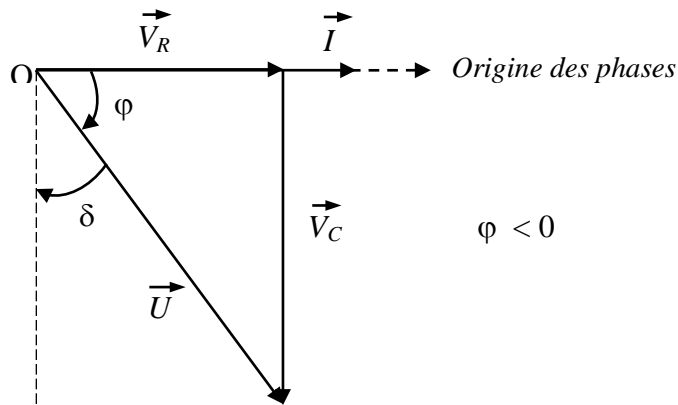


Figure 5. Diagramme de Fresnel pour le modèle série d'un dipôle capacitif

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

- Impédance complexe :

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

- Module et argument (déphasage) :

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

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 présentés 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.

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)

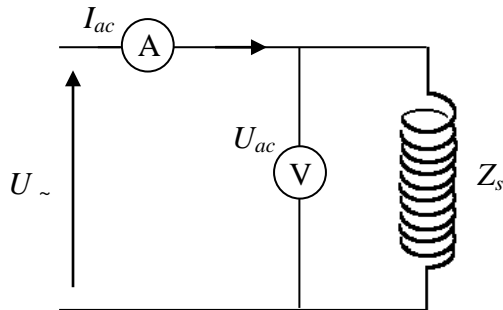


Figure 6.a Mesure en sinusoïdal

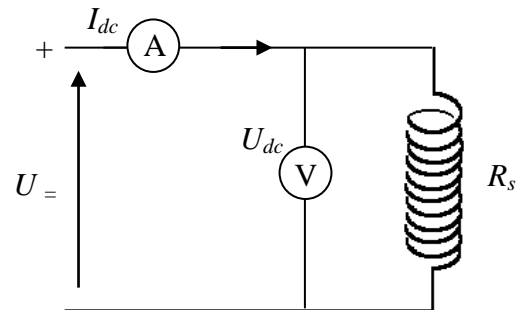


Figure 6.b Mesure en continu

Deux mesures sont nécessaires, l'une en alternatif sinusoïdal pour déterminer l'impédance de la bobine, l'autre en courant continu afin d'évaluer sa résistance (figures 6).

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 : $\cos \varphi = \frac{R_s}{Z}$ $\varphi = \arctan\left(\frac{X_s}{R_s}\right)$

- **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 à noyaux de fer en régime saturé.

5. 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 fréquences 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.

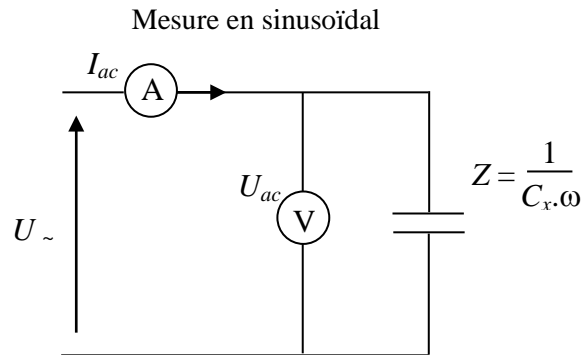


Figure 6. Mesure de l'impédance d'un condensateur en BF

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.

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 alimentée sous tension sinusoïdale, les valeurs efficaces des tensions U , U_{Re} , U_B sont mesurées à l'aide de trois voltmètres (figure 7).

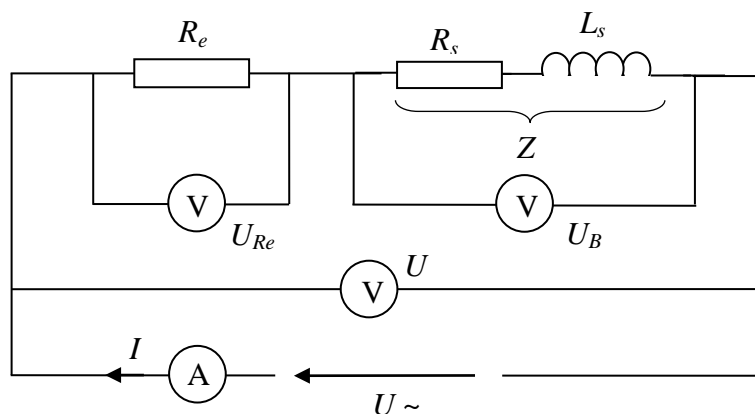


Figure 7. Schéma de principe pour la méthode des trois voltmètres

- Détermination de l'impédance de la bobine

Le courant peut être exprimé par les relations suivantes :

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

d'où :

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

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_R) 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 :

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

- Diagramme vectoriel

En prenant le vecteur courant à l'origine des phases, il est possible de tracer le vecteur \vec{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 \vec{U}_{Re} , \vec{U}_B , \vec{U}_L .

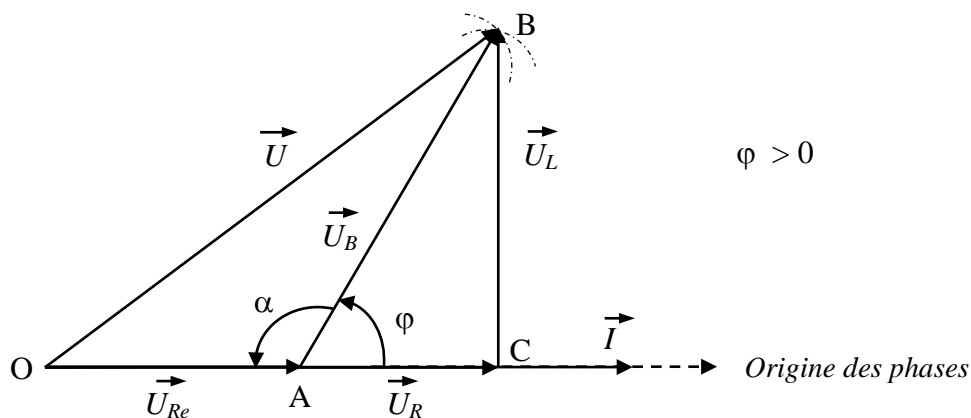


Figure 2. Diagramme de Fresnel pour le modèle série d'un dipôle capacitif

• **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 :

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

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

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

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 :

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

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 voltampéremétrique, elle n'est pas appropriée à la mesure d'impédance des condensateurs polarisés.

TP N°2 : MESURE D'IMPEDANCES

1. Objectifs

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

2. Matériel nécessaire

01	Alimentation continue et sinusoïdale	DC : 0 / 230 V - 6 A AC : 0 / 250 V - 6 A - 50 Hz
01	Bobine (<i>Leybold</i> 562 13)	$Z [R_s, L_s]$; $I_{max} = 5$ A ; 250 spires
01	Boite de capacités variables (<i>AOIP - CD4E1</i>)	C_x ; $U_{max} = 400$ V - 220 V _{eff} - 1 %
01	Résistance étalon - (<i>RBOX</i> 418)	$R_{e1} = 1 \Omega$ - 1 W - 1 %
01	Rhéostat	$R_H = 1000 \Omega$ - 0.6 A
01	Multimètre	Numérique
01	Voltmètre	Magnétoélectrique ou numérique
01	Ampèremètre	Magnétoélectrique ou numérique

3. 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- Montrer que l'intensité du courant absorbé par une bobine alimentée par une source continue est plus important que celui qui la traverserait en courant sinusoïdal. En déduire les précautions à respecter lors de la mesure de l'impédance d'une bobine par la méthode voltampéremétrique ?
- Q3- Comment calcule-t-on l'incertitude liée à la mesure par la méthode voltampéremétrique de la capacité d'un condensateur, illustrer votre réponse par un exemple numérique concret.
- Q4- 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 *Sauty* 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.

4. Manipulation N°1 : Mesures de l'impédance d'une bobine par la méthode voltampéremétrique

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**

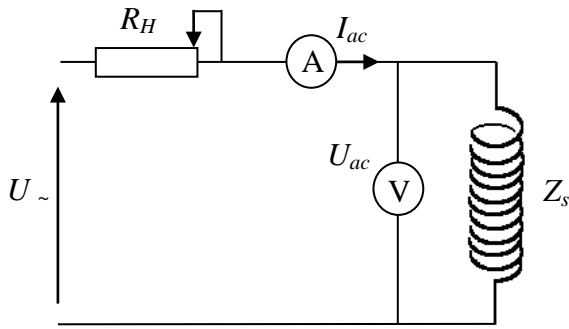


Figure 1.a Mesure en sinusoïdal

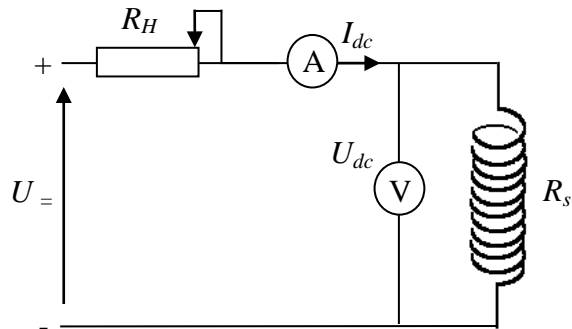


Figure 1.b Mesure en continu

• **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 150 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 150 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

$U = (C_V / N_V) \cdot n_V$	$I = (C_A / N_A) \cdot n_A$	$R_s = (U / I)$
V	A	Ω

Alimentation sinusoïdale

$U = \dots\dots\dots$ Volts

$U = (C_V / N_V) \cdot n_V$	$I = (C_A / N_A) \cdot n_A$	Z	X _s	L _s	cosφ
V	A	Ω	Ω	Ω	/

Calcul d'incertitudes

$\Delta Z / Z$	ΔZ	$\Delta R_s / R_s$	ΔR_s	$\delta(\cos\varphi)$	$\Delta X_s / X_s$	ΔX_s	$\Delta L_s / L_s$	ΔL_s
%	Ω	%	%	Ω	%	Ω	%	H

5. Manipulation N°2 : 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

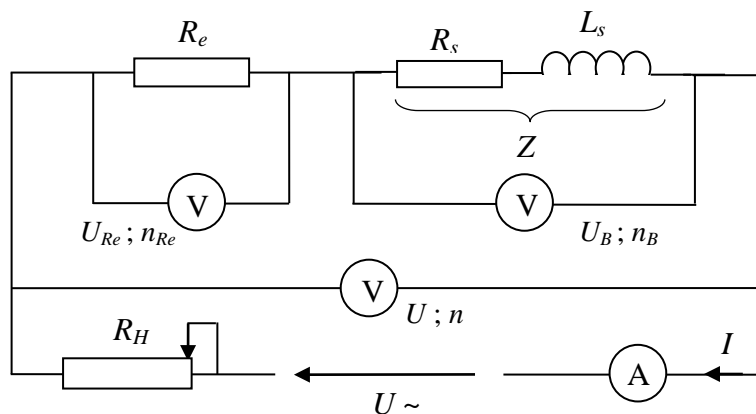


Figure 2. Schéma de montage pour la méthode des trois voltmètres

• Mode opératoire

Afin de comparer les résultats obtenus avec ceux de la méthode précédente, la même bobine sera utilisée, la résistance étalon sera telle que $R_e = 1 \Omega$.

- Réaliser le montage et faire le vérifier ;
- s'assurer que la tension d'alimentation est réglée sur zéro et choisir la position AC ;
- régler la résistance R_H du rhéostat de protection sur sa valeur maximale ;
- alimenter le montage et régler la tension d'alimentation sur environ 140 Volts ;
- ajuster la résistance R_H du rhéostat pour obtenir pour obtenir des lectures de tension sur le même calibre et des déviations maximales ;
- relever les indications n_B, n_{Re} et n des appareils de mesure.

- **Tableau de mesure :**

Complétez les tableaux suivants.

Alimentation sinusoïdale

$U = \dots\dots\dots$ Volts

$R_e = \dots\dots \Omega$

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

Alimentation sinusoïdale

 $U = \dots\dots\dots$ Volts $R_e = \dots\dots \Omega$

$\Delta Z / Z$	ΔZ	$\delta(\cos\varphi)$	$\Delta R_s / R_s$	ΔR_s	$\Delta X_s / X_s$	ΔX_s	L_s	$\Delta L_s / L_s$	ΔL_s
%	Ω	%	%	Ω	%	Ω	H	%	H

6. Manipulation N°3 : Mesure de la capacité d'un condensateur par la méthode voltampéremétrique

Il s'agit de mesurer la capacité C_x d'un condensateur à l'aide du multimètre numérique et par la méthode voltampéremétrique, puis de déterminer son incertitude.

• Mode opératoire

- Mesurer la capacité C_x du condensateur à l'aide du multimètre numérique ;
- Déterminer l'incertitude liée à la mesure ;
- Consigner les résultats obtenus dans un tableau ;
- réaliser le montage correspondant à la méthode voltampéremétrique (sans rhéostat) ;
- faire le vérifier le montage ;
- s'assurer que la tension d'alimentation est réglée sur zéro et choisir la position AC ;
- alimenter le montage et régler la tension d'alimentation sur environ 60 Volts ;
- puis ajuster la valeur de la tension pour obtenir des déviations maximales ;
- relever les indications des appareils de mesure.

• Tableau de mesure :

Complétez le tableau suivant.


Alimentation sinusoïdale

 $U = \dots\dots\dots$ Volts

$U = (C_V / N_V).n_V$	$I = (C_A / N_A).n_A$	Z	$\Delta Z / Z$	ΔZ	C_x	$\Delta C_x / C_x$	ΔC_x
V	A	Ω	%	Ω	μF	%	μF

7. Travail à effectuer

- Rédiger un compte-rendu de TP dans lequel vous exposerez tous les résultats accompagnés de leur interprétation.
- Pour la bobine et le condensateur étudiés, comparer les valeurs des paramètres, ainsi que les précisions, obtenues pour les différentes méthodes de mesure mises en œuvre.
- Donnez une conclusion à ce travail.

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

COMPLEMENT THEORIQUE N°3

DIPOLE RLC A FREQUENCE VARIABLE

1. Circuit RLC série excité à fréquence variable

On considère le dipôle RLC, représenté sur la figure 1, comportant une bobine, de résistance R et d'inductance L , relié en série avec un condensateur de capacité C . Le circuit est excité par une tension sinusoïdale : $u(t) = U \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$, de fréquence f variable et de valeur efficace U fixe.

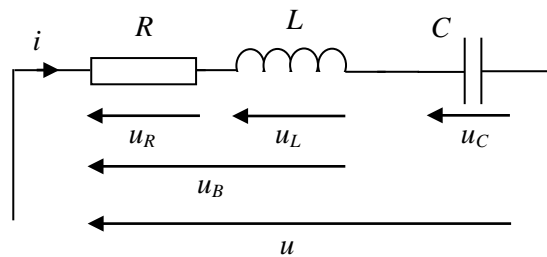


Figure 1. Circuit RLC série

Le circuit est siège d'oscillations de courant, sinusoïdales et forcées à la fréquence f imposée par la source de tension.

L'expression du courant s'écrit : $i(t) = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - \varphi)$

et, en vertu de la loi des mailles, on peut écrire : $\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C$

L'impédance complexe du montage est défini par :

$$\underline{Z} = R + j \cdot \left(L \cdot \omega - \frac{1}{C \cdot \omega} \right)$$

son module représente l'impédance réelle :

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(L \cdot \omega - \frac{1}{C \cdot \omega} \right)^2}$$

son argument donne le déphasage entre la tension et le courant introduit par le dipôle RLC :

$$\varphi = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) = \arctan\left(\frac{L \cdot \omega - \frac{1}{C \cdot \omega}}{R}\right)$$

Ces relations montrent que lorsque la fréquence varie le déphasage, les réactances $X_L = L \cdot \omega$, $X_C = (1/C \cdot \omega)$, et par suite l'impédance, sont modifiées.

Trois cas se présentent selon le signe de la réactance X :

* $\left(L \cdot \omega - \frac{1}{C \cdot \omega} \right) > 0$, le dipôle est inductif et le courant est en retard sur la tension : $\varphi > 0$;

* $\left(L \cdot \omega - \frac{1}{C \cdot \omega} \right) = 0$, le dipôle est résistif, il se comporte comme une résistance et le courant est en phase avec la tension $\varphi = 0$;

* $\left(L \cdot \omega - \frac{1}{C \cdot \omega} \right) < 0$, le dipôle est capacitif, et le courant est en avance sur la tension $\varphi < 0$.

La figure 2 montre les différentes tensions dans le plan complexe pour les trois cas.

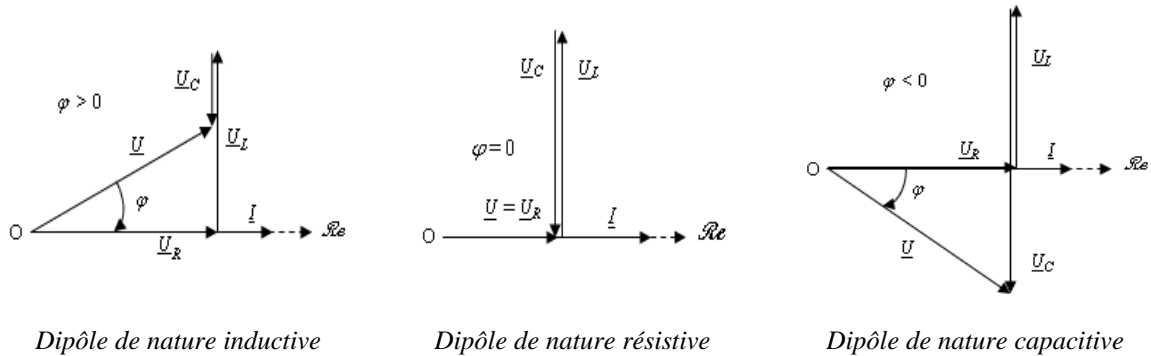


Figure 2. Représentation des tensions dans le plan complexe pour les trois cas

Lorsque les valeurs des réactances inductive et capacitive sont égales ($X_L = X_C$), le dipôle est résistif, il s'agit là d'un phénomène particulier appelé *résonance*.

La pulsation de résonance ω_0 est la pulsation pour laquelle : $L \cdot \omega = \frac{1}{C \cdot \omega}$

et donc :

$$L \cdot C \cdot \omega_0^2 = 1 \quad \Rightarrow \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

La fréquence de résonance, encore appelée fréquence propre du dipôle est telle que :

$$f = f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

La fréquence propre est une caractéristique immuable du dipôle, si l'on ne modifie pas ses paramètres L ou C , sa valeur ne change pas. Par conséquent, un dipôle RLC entre en résonance lorsque la fréquence f de la source qui l'excite est égale à sa fréquence propre f_0 .

A cette fréquence, $\underline{Z} = R$ ($Z = R$, $\varphi = 0$) passe par un minimum et le dipôle, vu de la source d'alimentation, est équivalent à une résistance de valeur R .

L'intensité du courant est alors maximale :

$$I_0 = \frac{U}{R}$$

et on observe une surtension aux bornes de l'inductance et du condensateur :

$$U_{L0} = U_{C0} = L \cdot \omega \cdot I_0 = \frac{1}{C \cdot \omega} \cdot I_0$$

Suivant la valeur de la résistance, la surtension est plus ou moins amortie, et la résonance est dite *aigüe* ou *floue*.

On peut, également, obtenir la résonance par réglage des éléments L et/ou C , afin d'accorder la fréquence propre du dipôle à la fréquence de la tension d'alimentation, qui elle est gardée constante.

La figure 3 montre l'évolution de l'intensité du courant traversant le circuit lorsque la fréquence de la source d'alimentation sinusoïdale varie, cette courbe présente un *pic* correspondant à la résonance.

Afin de caractériser la finesse de ce pic, on considère les fréquences f_1 et f_2 , dites de coupure, correspondant aux courants : $I_0/\sqrt{2} \approx 0,707 \cdot I_0$

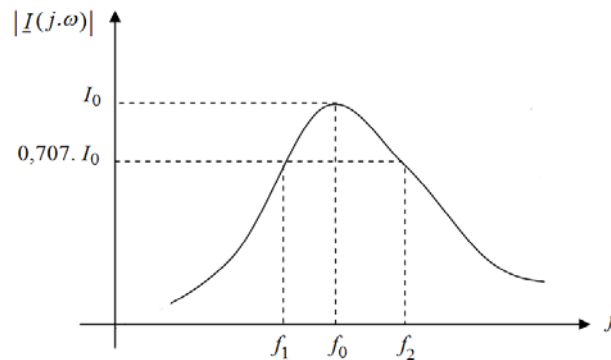


Figure 3. Réponse en fréquence du courant pour le circuit RLC en régime sinusoïdal

De même, la bande passante du circuit est définie par l'intervalle :

$$\Delta f = f_1 - f_2$$

et on démontre que :

$$\Delta f = \frac{f_0}{Q}$$

Q étant le facteur de qualité du circuit (encore appelé coefficient de surtension):

$$Q = \frac{L \cdot \omega_0}{R} = \frac{1}{R \cdot C \cdot \omega_0}$$

D'autre part, on remarque pour :

$$f = f_1 \quad \Rightarrow \quad \varphi = -45^\circ$$

$$f = f_2 \quad \Rightarrow \quad \varphi = +45^\circ$$

Les tensions U_B (R , L) et U_C aux bornes de la bobine et du condensateur sont pratiquement égales et peuvent être très supérieures au courant total :

$$U_B \approx U_C = \frac{I_0}{L \cdot \omega} = \frac{1}{L \cdot \omega} \cdot \frac{U}{R} = Q \cdot U$$

On est en présence d'un phénomène de surtension caractérisé par le facteur Q .

2. Circuit RLC parallèle excité à fréquence variable

Soit le dipôle, représenté sur la figure 4, constitué par une bobine (résistance R , inductance L) et un condensateur de capacité C , branchées en parallèle.

L'ensemble est alimenté par une tension sinusoïdale de fréquence f variable et de valeur efficace U fixe.

Comme précédemment, le circuit est siège d'oscillations de courant, sinusoïdales et forcées à la fréquence f imposée par la source de tension. L'expression du courant est telle que :

$$i(t) = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - \varphi)$$

En vertu de la loi des nœuds, on peut écrire : $I = I_B + I_C$

Si $R \ll L \cdot \omega$, le courant I_B parcourant la bobine a pour valeur efficace ($U / L \cdot \omega$) et se trouve en quadrature arrière par rapport à la tension d'alimentation comme le montre la représentation dans le plan complexe sur la figure 4.

Le courant traversant le dipôle a alors la valeur efficace :

$$I = |I_B - I_C| = \left| \frac{U}{L \cdot \omega} - \frac{U}{1/C \cdot \omega} \right| = U \cdot \left| \frac{1}{L \cdot \omega} - C \cdot \omega \right|$$

et pour phase par rapport à la tension :

$$\varphi = 90^\circ \text{ en arri\ere} \quad \text{si : } I_B > I_C \quad \Rightarrow \quad L \cdot \omega < 1/ C \cdot \omega \quad (f < f_0)$$

$$\varphi = 90^\circ \text{ en avance} \quad \text{si : } I_B < I_C \quad \Rightarrow \quad L \cdot \omega > 1/ C \cdot \omega \quad (f < f_0)$$

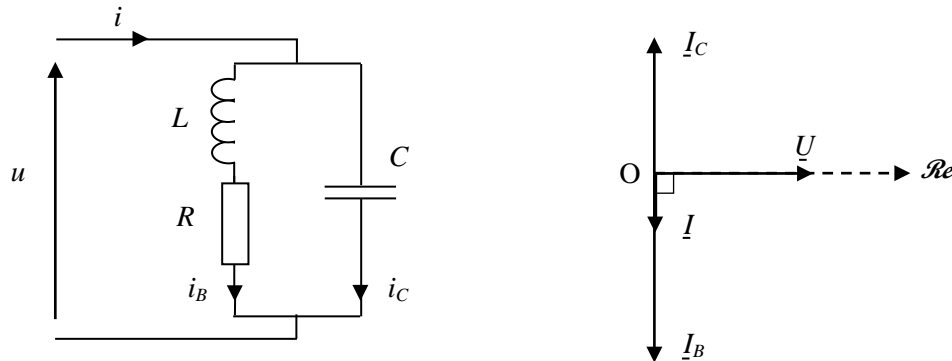


Figure 4. Circuit bouchon : bobine et condensateur en parallèle

Lorsque la condition :

$$L \cdot \omega = \frac{1}{C \cdot \omega} \quad \text{c'est à dire} \quad f = f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

est satisfaite, les courants I_B et I_C sont égaux, en valeur efficace, si bien que le courant total i débité par la source d'alimentation s'annule.

C'est le phénomène de résonance parallèle, mais à la différence de la résonance série, l'impédance du dipôle au lieu d'être minimale, est infinie puisque le courant s'annule. C'est pour cette raison que le dipôle constitué d'une bobine et d'un condensateur en parallèle, lorsqu'il est à la résonance, est appelé *circuit bouchon*.

En fait, à la résonance, l'impédance du circuit n'est infinie que si la résistance R de la bobine est nulle. En pratique cette condition n'est pas réalisée et la valeur de l'impédance passe simplement par un maximum, le courant quant à lui présente alors un minimum, en phase avec la tension ($\varphi = 0$), dont la valeur efficace est donnée par :

$$I_0 = \frac{U}{L/R \cdot C}$$

D'autre part, les courants I_B et I_C dans la bobine et le condensateur, pratiquement égaux, peuvent être très supérieurs au courant total :

$$I_C \approx I_B = \frac{U}{L \cdot \omega} = Q \cdot I_0$$

On est en présence d'un phénomène de surintensité caractérisé par le facteur Q .

Tout comme pour le circuit série, on définit une bande passante $\Delta f = f_1 - f_2$, mais dans ce cas les fréquences f_1 et f_2 correspondent au courant $I_0 \cdot \sqrt{2}$, et on démontre à nouveau que :

$$\Delta f = \frac{f_0}{Q} \quad \text{avec} \quad Q = \frac{L \cdot \omega_0}{R} = \frac{1}{R \cdot C \cdot \omega_0}$$

TP N°3 : DIPOLE RLC A FREQUENCE VARIABLE

1. Objectifs

- Etudier le comportement des dipôles RLC série et parallèle, en régime sinusoïdal et sous fréquence variable.
- Vérifier les propriétés des circuits résonants série et parallèle.
- Déterminer expérimentalement les fréquences de résonance.

2. Matériel nécessaire

01	Générateur basse fréquence (GBF)	
01	Bobine (Leybold 562 13)	$0.6 \Omega - 2.2 \text{ mH} ; I_{max} = 5 \text{ A} ; 250 \text{ spires}$
01	Boite de capacités variables (AOIP - CD4E1)	$C = 10 \mu\text{F} ; U_{max} = 400 \text{ V} - 220 \text{ V}_{eff} - 1 \%$
01	Résistances étalons – (RBOX 418)	$R' = 50 \Omega - 1 \text{ W} - 1 \%$ $R'' = 100 \Omega - 1 \text{ W} - 1 \%$
03	Voltmètres	Magnétoélectrique ou numérique
03	Ampèremètres	Magnétoélectrique ou numérique
01	Oscilloscope bi-courbe	Sondes (02) ou connecteurs BNC (02)

3. Travail de préparation

Q1- Soit le circuit le circuit RLC série, représenté sur la figure 1, alimenté sous une tension sinusoïdale $u(t)$ à fréquence variable. On appelle f_0 la valeur de la fréquence f pour laquelle le courant I prend la valeur maximale I_0 ($U = 3 \text{ V}$, $r_B = 0.6 \Omega$, $R' = 50 \Omega$).

Déterminer et les expressions littérales et les valeurs théoriques :

- de la fréquence f_0 , des impédances de la bobine Z_{B0} et du condensateur Z_{C0} ;
- de l'impédance du circuit Z_0 , de l'intensité du courant I_0 et du déphasage φ_0 ;
- des tensions aux bornes de la bobine U_{B0} et du condensateur U_{C0} ;
- de la bande passante, du facteur de qualité et des fréquences de coupure f_1 et f_2 .

Q2- Soit le circuit le circuit RLC parallèle, représenté sur la figure 2, alimenté sous une tension sinusoïdale $u(t)$ à fréquence variable. On appelle f_0 la valeur de la fréquence f pour laquelle le courant I prend la valeur minimale I_0 ($U = 3 \text{ V}$, $r_B = 0.6 \Omega$, $R' = 50 \Omega$).

Déterminer les expressions littérales et les valeurs théoriques :

- de la fréquence f_0 , des impédances de la bobine Z_{B0} et du condensateur Z_{C0} ;
- de l'impédance du circuit Z_0 , de l'intensité du courant I_0 et du déphasage φ_0 ;
- des courants efficaces traversant la bobine I_{B0} et le condensateur I_{C0} ;
- de la bande passante, du facteur de qualité et des fréquences de coupure f_1 et f_2 .

NB : Présenter les résultats sous forme de tableaux.

4. Manipulation N°1 : Etude d'un dipôle RLC série sous fréquence variable

Il s'agit de relever expérimentalement, dans le domaine des fréquences allant de $(0,5.f_0)$ à $(2.f_0)$, les courbes correspondantes aux différentes tensions, au courant et impédances du circuit RLC série, représenté sur la figure 1, en fonction de la fréquence.

• Schéma de montage

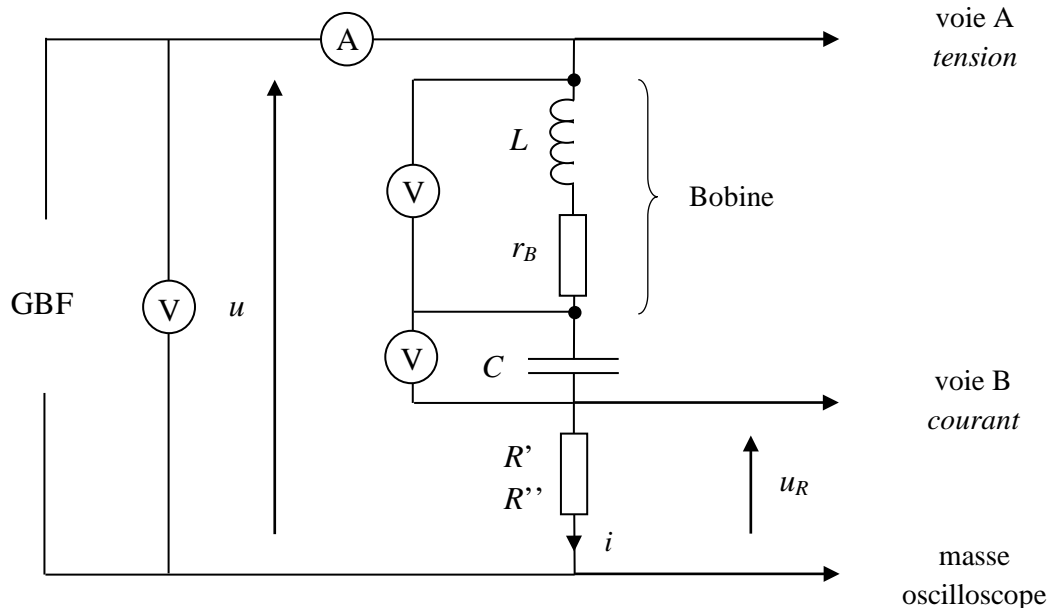


Figure 1 Schéma de montage pour l'étude du circuit RLC série

On notera pour la résistance totale du circuit : $R = (R' + r_B)$ puis $R = (R'' + r_B)$

Résistances: $R' = 50 \Omega$ puis $R'' = 100 \Omega$

Les angles de déphasage φ seront mesurés à l'oscilloscope.

• Mode opératoire

- Réaliser le montage avec ($R' = 50 \Omega$) et faire le vérifier ;
- vérifier que la tension d'alimentation est réglée sur zéro ;
- alimenter le montage et régler la tension délivrée par le GBF à 3 Volts ;
- ajuster la valeur de la fréquence pour obtenir la résonance (on cherchera avec précision l'intensité maximale du courant ainsi que la fréquence correspondante) ;
- mesurer les valeurs $f_0, I_0, U_{B0}, U_{C0}, \varphi_0$;
- régler la valeur de la fréquence depuis $(0,5.f_0)$ jusqu'à $(2.f_0)$, en conservant la tension délivrée par le GBF constante, et relever pour chaque réglage la valeur de la fréquence f , les valeurs efficaces des tensions U_B et U_C , l'intensité efficace du courant I et le déphasage φ ;
- mesurer les fréquences f_1 et f_2 et les angles φ_1 et φ_2 pour lesquelles ($I = I_0/\sqrt{2}$) ;
- visualiser à l'aide de l'oscilloscope et relever les oscillogrammes de la tension $u(t)$ et du courant $i(t)$, pour les trois cas suivants : $f > f_0$, $f = f_0$ et $f < f_0$;
- remplacer la résistance $R' = 50 \Omega$ par $R'' = 100 \Omega$, et refaire les mêmes mesures.

• **Tableau de mesure**

Complétez le tableau suivant.

$$U = 3 \text{ Volts}$$

$$r_B = 0.6 \Omega$$

$$L = 2.2 \text{ mH}$$

$$C = 10 \mu\text{F}$$

R	f	I	U_B	U_C	φ	Z_B	Z_C	Z
Ω	Hz	mA	V	V	°	Ω	Ω	Ω
$(r_B + 50)$	$0,5.f_0$							
	⋮							
	f_0							
	⋮							
	$2.f_0$							
$(r_B + 100)$	$0,5.f_0$							
	⋮							
	f_0							
	⋮							
	$2.f_0$							

• **Pour chacun des cas étudiés : $R = (50 + r_B)$ et $R = (100 + r_B)$:**

- Tracer en fonction de la fréquence les graphes suivants :

✓ Graphe 1 : $Z_B = g(f)$ $Z_C = g(f)$ $Z = g(f)$

✓ Graphe 2 : $U_B = g(f)$ $U_C = g(f)$ $I = g(f)$

✓ Graphe 3 : $I = g(f)$ $\varphi = g(f)$

- Délimiter les domaines inductif, résistif et capacitif.

- Pour la résonance, déterminer graphiquement les valeurs :

✓ de la fréquence f_0 ;

✓ de l'intensité du courant I_0 ;

✓ de l'impédance du circuit Z_0 ;

✓ de l'angle de déphasage φ_0 .

- Déterminer graphiquement la valeur de la bande passante Δf et en déduire le facteur de qualité $Q = f_0/\Delta f$.

- Commenter l'influence de la résistance R sur l'amortissement du circuit.

- Comparer les résultats théoriques et expérimentaux.

5. Manipulation N°2 : Etude d'un dipôle RLC parallèle sous fréquence variable

Il s'agit de relever expérimentalement, dans le domaine des fréquences allant de $(0,5.f_0)$ à $(2.f_0)$, les courbes correspondantes aux différentes tensions, au courant et impédances du circuit RLC parallèle, représenté sur la figure 2, en fonction de la fréquence.

- **Schéma de montage**

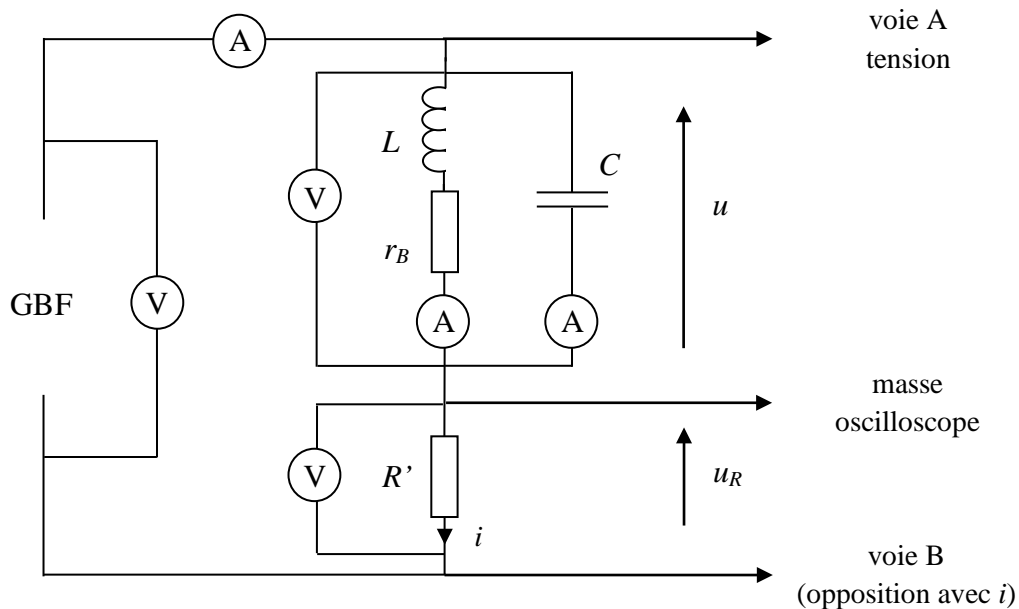


Figure 2 Schéma de montage pour l'étude du circuit RLC parallèle

Les éléments du montage sont les mêmes que ceux du circuit étudié lors de la manipulation précédente.

- **Mode opératoire**

- Réaliser le montage avec ($R' = 50 \Omega$) et faite le vérifier ;
- vérifier que la tension d'alimentation est réglée sur zéro ;
- alimenter le montage et régler la tension délivrée par le GBF pour obtenir $U = 2$ Volts aux bornes de la bobine (et du condensateur) ;
- maintenir cette tension constante durant toute la manipulation ;
- ajuster la valeur de la fréquence pour obtenir la résonance (on cherchera avec précision l'intensité minimale du courant ainsi que la fréquence correspondante) ;
- mesurer la valeur de la fréquence f_0 , la valeur de l'angle de déphasage φ_0 et les valeurs efficaces des courants I_0, I_B, I_C ;
- régler la valeur de la fréquence depuis $(0,5.f_0)$ jusqu'à $(2.f_0)$, en conservant la tension U aux bornes de la bobine constante, et relever pour chaque réglage la valeur de la fréquence f , la valeur efficace de l'intensité du courant I , les valeurs efficaces des courants I_B, I_C et le déphasage φ ;
- mesurer les fréquences f_1 et f_2 et les angles φ_1 et φ_2 pour lesquelles ($I = I_0 \cdot \sqrt{2}$) ;
- visualiser à l'aide de l'oscilloscope et relever les oscillogrammes de la tension $u(t)$ et du courant $i(t)$, pour les trois cas suivants : $f > f_0$, $f = f_0$ et $f < f_0$;
- Comparer les résultats théoriques et expérimentaux.

• **Tableau de mesure**

Complétez le tableau suivant.

	$U = 2 \text{ Volts}$	$r_B = 0.6 \Omega$	$L = 2.2 \text{ mH}$	$C = 10 \mu\text{F}$				
$R = (R' + r_B)$	f	I	I_B	I_C	φ	Z	Z_B	Z_C
Ω	Hz	mA	mA	mA	°	Ω	Ω	Ω
$R = (50 + r_B)$	$0,5.f_0$							
	\vdots							
	f_0							
	\vdots							
	$2.f_0$							

• **Pour le cas étudié ($R' = 50 \Omega$) :**

- Tracer en fonction de la fréquence les graphes suivants :
 - ✓ Graphe 1 : $Z = g(f)$ $Z_B = g(f)$ $Z_C = g(f)$ $\varphi = g(f)$
 - ✓ Graphe 2 : $I = g(f)$ $I_B = g(f)$ $I_C = g(f)$
- Délimiter les domaines inductif, résistif et capacitif.
- Pour la résonance, déterminer graphiquement les valeurs :
 - ✓ de la fréquence f_0 ;
 - ✓ de l'intensité du courant I_0 ;
 - ✓ de l'impédance du circuit Z_0 ;
 - ✓ de l'angle de déphasage φ_0 .
- Déterminer graphiquement la valeur de la bande passante ($\Delta f = f_2 - f_1$).
- Donner les valeurs du déphasage φ_1 et φ_2 pour les fréquences de coupure f_1 et f_2 .
- Déduire la valeur du facteur de qualité ($Q = f_0/\Delta f$).
- Comparer les résultats théoriques et expérimentaux.

6. Travail à effectuer

- Rédiger un compte-rendu de TP dans lequel vous exposerez tous les résultats accompagnés de leur interprétation.
- Récapituler brièvement les principales propriétés observées pour les deux circuits.
- Donnez une conclusion à ce travail.

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

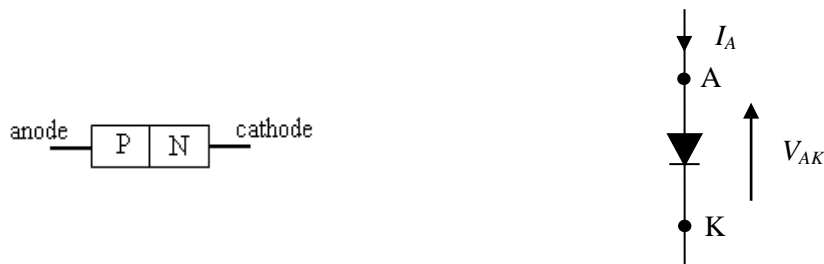
COMPLEMENT THEORIQUE N°4

REDRESSEMENTS MONOPHASES

1. La diode à jonction

La diode est un composant semi-conducteur essentiel en électronique, elle est constituée par une jonction PN. Elle possède deux bornes, l'anode et la cathode, respectivement reliées aux zones P et N. Son fonctionnement est assimilable à un dipôle électrique unidirectionnel, donc qui ne laisse passer le courant que dans un seul sens.

La figure 1 illustre la constitution et le symbole d'une diode à jonction.

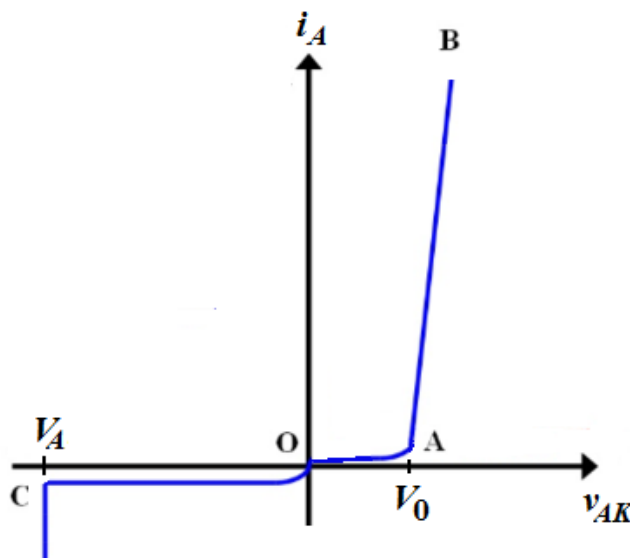


Si la diode est considérée idéale, alors :

- en *polarisation directe*, c'est-à-dire si $V_{AK} > 0$ (potentiel anode > potentiel cathode), elle se comporte alors comme un interrupteur fermé ;
- en *polarisation inverse* ($V_{AK} < 0$), elle est équivalente à un interrupteur ouvert ($I_A = 0$).

• Caractéristique statique

C'est la caractéristique $I_A = f(V_{AK})$ relevée en courant continu (figure 2).



Elle est dissymétrique et comprend trois régions :

- la région OA, la diode est polarisée direct, la tension V_{AK} est positive mais inférieure à la tension de seuil $V_0 \approx 0.6$ Volt, le courant est considéré comme nul ;
- la région OB, la tension V_{AK} est positive, et supérieure à la tension de seuil, la diode est polarisée en direct et conductrice, elle présente alors une résistance dynamique R_D très faible et pratiquement constante ;
- la région OC, la tension V_{AK} est négative, le courant inverse est quasi nul, la diode est bloquée ;
- après le point B, la tension inverse devient supérieure à V_A , le courant croit brutalement, c'est le phénomène de claquage de la jonction qui est toujours destructif pour le composant

• Les modèles simplifiés

Pour l'analyse des montages utilisant des diodes, on utilise couramment des modèles équivalents, plus ou moins simplifiés, comme indiqué par la figure 3.

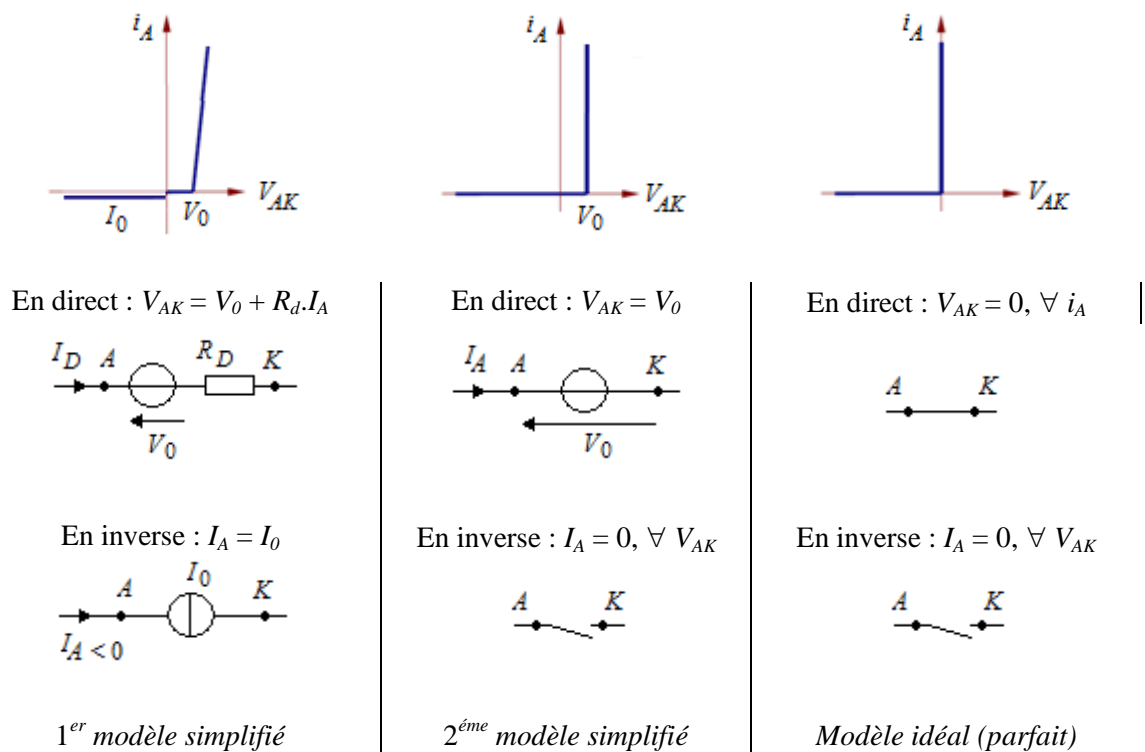


Figure 3. Les différents modèles d'une diode à jonction

2. Redressements monophasés non commandés

Un redresseur monophasé est un convertisseur de puissance qui transforme une source de tension sinusoïdale v_E , de fréquence et de valeur efficace constantes, en une source de tension v_S unidirectionnelle de valeur moyenne également fixe. Pour obtenir une tension quasi continu, il est ensuite nécessaire d'employer un circuit de filtrage.

Trois types de circuits sont employés : le redresseur simple alternance (à une diode) et les redresseurs double alternance avec un transformateur à point milieu (à deux diodes) et à pont de Graetz (à quatre diodes).

On considère que :

- la charge est une résistance R ,
- les diodes sont parfaites (pas de chute de tension en direct ($V_0 = 0$), et courant nul en inverse ($I_0 = 0$)).

• **Le redressement mono-alternance**

La figure 4 montre le schéma de principe d'un redresseur mono-alternance.

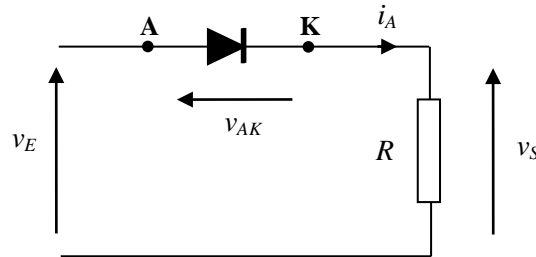


Figure 4. Schéma de principe d'un redresseur mono-alternance à diode

La tension d'entrée est sinusoïdale et définit par : $v_E = \hat{V} \cdot \sin \omega \cdot t$

Pendant l'alternance positive de la tension d'entrée v_E , le potentiel sur l'anode de la diode est le plus élevé du montage, la diode conduit :

$$v_{AK} = 0 \quad \Rightarrow \quad v_S = v_E = \hat{V} \cdot \sin \omega \cdot t \quad \Rightarrow \quad i_A = \frac{v_E}{R}$$

Pendant l'alternance négative de v_E , le potentiel sur l'anode de la diode est le plus faible ; la diode, polarisée en inverse est bloquée :

$$i_A = 0 \quad \Rightarrow \quad v_S = 0 \quad \Rightarrow \quad v_{AK} = v_E = \hat{V} \cdot \sin \omega \cdot t$$

La figure 5 représente les chronogrammes des tensions d'entrée v_E et de sortie v_S en fonction de l'angle ($\alpha = \omega \cdot t$).

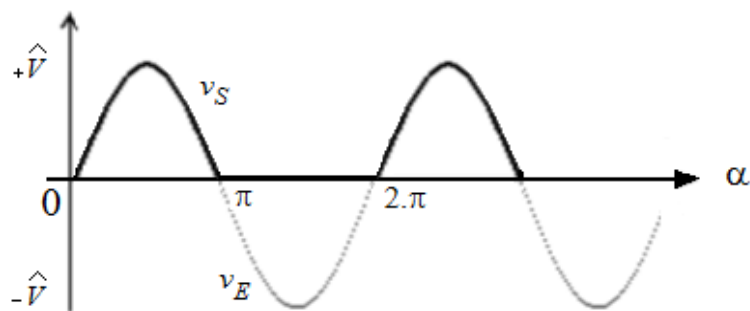


Figure 5. Chronogrammes des tensions d'entrée v_E et de sortie v_S

Le signal de la tension v_S est périodique, de période 2π et existe entre 0 et π , la valeur moyenne de la tension de sortie a donc pour expression :

$$\bar{V}_S = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^\pi \hat{V} \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha = \frac{\hat{V}}{\pi}$$

$$\bar{V}_S = \frac{\hat{V}}{\pi} = \frac{V \cdot \sqrt{2}}{\pi}$$

Quant à sa valeur efficace, elle a pour expression :

$$V_S^2 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^\pi (v_S)^2 \cdot d\alpha = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^\pi (\hat{V} \cdot \sin\alpha)^2 \cdot d\alpha = \frac{\hat{V}^2}{4}$$

$$V_S = \frac{\hat{V}}{2} = \frac{V \cdot \sqrt{2}}{2}$$

L'onde de la tension de sortie est unidirectionnelle, mais pas continue, on considère qu'elle est équivalente à la superposition d'une composante continue de valeur égale à la valeur moyenne de la tension redressée et d'une composante alternative représentant son ondulation. Pour caractériser l'importance de cette ondulation par rapport à la tension moyenne, on définit :

- le facteur de forme :

$$F = \frac{V_S}{\bar{V}_S} = \frac{\text{valeur efficace}}{\text{valeur moyenne}}$$

- le taux d'ondulation :

$$\tau = \sqrt{F^2 - 1}$$

Le facteur de forme F est d'autant voisin de l'unité que l'allure de la tension redressée est proche d'une tension continue pure. Alors que l'on observe que plus la valeur du taux d'ondulation se rapproche de zéro, moins la tension redressée ondule autour de sa valeur moyenne.

Dans le cas du redressement mono-alternance, on obtient pour ces deux paramètres les valeurs suivantes :

$$F = \frac{\hat{V}/2}{\hat{V}/\pi} = \frac{\pi}{2} = 1.57 \quad \text{et} \quad \tau = \sqrt{1.57^2 - 1} \approx 1.21 = 121 \%$$

Ces résultats montrent que la tension redressée est loin d'être constante, et vu la faible valeur de la tension moyenne, le redressement mono-alternance est très peu utilisé en pratique.

- **Le redressement double alternance par transformateur à point milieu**

La figure 6 montre le schéma de principe d'un redresseur double alternance avec un transformateur à point milieu.

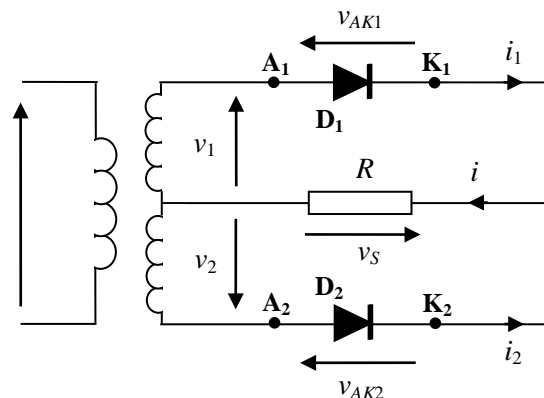


Figure 6. Schéma de principe d'un redresseur double alternance avec transformateur à point milieu

Les tensions aux bornes des deux demi-enroulements du secondaire sont sinusoïdales et en opposition de phase, soit que :

$$\begin{cases} v_1 = V. \sin \omega. t \\ v_2 = -V. \sin \omega. t \end{cases}$$

Pendant la première alternance, la tension v_1 est positive et la tension v_2 est négative, la diode D_1 est passante, alors que la diode D_2 est bloquée, ce qui conduit à :

$$v_{AK1} = 0 \quad \Rightarrow \quad v_S = v_1 = \hat{V}. \sin \omega. t \quad \Rightarrow \quad i = i_1 = \frac{v_1}{R}$$

$$i_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad v_{AK2} = -2. v_1 = -2. \hat{V}. \sin \omega. t$$

Pendant la deuxième alternance D_1 est bloquée, alors que la diode D_2 est passante :

$$v_{AK2} = 0 \quad \Rightarrow \quad v_S = v_2 = \hat{V}. \sin \omega. t \quad \Rightarrow \quad i = i_2 = \frac{v_2}{R}$$

$$i_1 = 0 \quad \Rightarrow \quad v_{AK1} = -2. v_2 = 2. \hat{V}. \sin \omega. t$$

La figure 7 représente les chronogrammes des tensions d'entrée v_1 , v_2 et de la tension de sortie v_S en fonction de l'angle ($\alpha = \omega.t$).

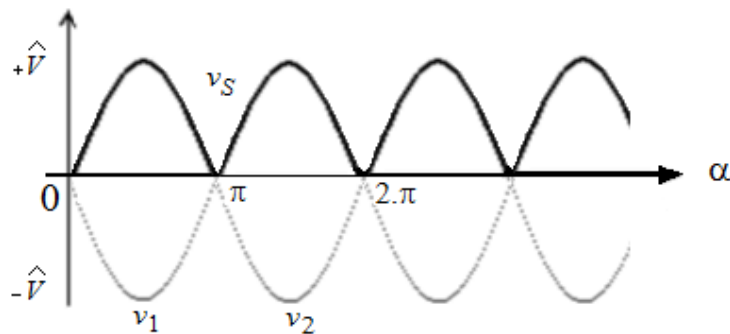


Figure 7. Chronogrammes des tensions d'entrée v_E et de sortie v_S

Le signal de la tension v_S est périodique, de période π , sa valeur moyenne a pour expression :

$$\bar{V}_S = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} \hat{V}. \sin \alpha. d\alpha = \frac{2. \hat{V}}{\pi}$$

$$\bar{V}_S = \frac{2. \hat{V}}{\pi} = \frac{2. V. \sqrt{2}}{\pi}$$

Quant à sa valeur efficace, elle a pour expression :

$$V_S^2 = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} (v_S)^2. d\alpha = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} (\hat{V}. \sin \alpha)^2. d\alpha = \frac{\hat{V}^2}{2}$$

$$V_S = \frac{\hat{V}}{\sqrt{2}}$$

Le facteur de forme et le taux d'ondulation ont pour valeurs :

$$F = \frac{\hat{V}/\sqrt{2}}{2. \hat{V}/\pi} = \frac{\pi. \sqrt{2}}{4} = 1.11 \quad \text{et} \quad \tau = \sqrt{1.11^2 - 1} \approx 0.48 = 48\%$$

- **Le redressement double alternance par pont de Graetz**

La figure 8 montre le schéma de principe d'un redresseur double alternance à pont de Graetz.

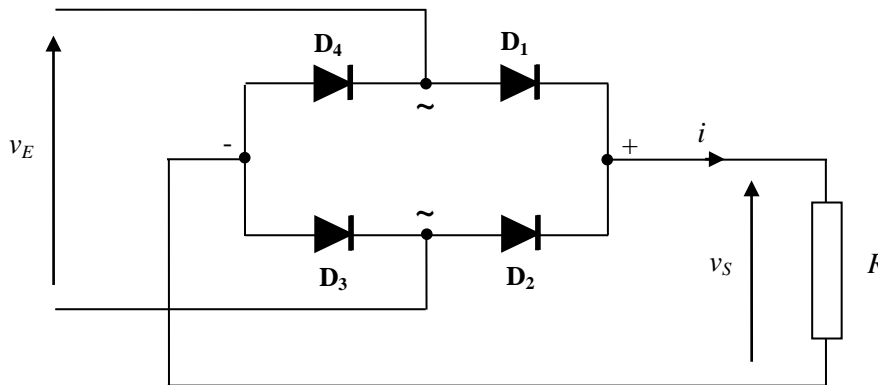


Figure 8. Schéma de principe d'un redresseur double alternance à pont de Graetz

L'allure de la tension de sortie est identique à celle obtenue avec le transformateur à point milieu.

Pendant l'alternance positive de la tension d'entrée v_E , les diodes D_1 et D_3 sont passantes, alors que les diodes D_2 et D_4 sont bloquées, d'où :

$$v_{AK\ 1,2} = 0 \quad \Rightarrow \quad v_S = -v_E = \hat{V} \cdot \sin \omega \cdot t \quad ; \quad i = \frac{v_E}{R} \quad ; \quad v_{AK\ 3,4} = -v_E$$

Pendant l'alternance négative de v_E , les diodes D_1 et D_3 sont passantes et les diodes D_2 et D_4 sont bloquées, d'où :

$$v_{AK\ 3,4} = 0 \quad \Rightarrow \quad v_S = -v_E = -\hat{V} \cdot \sin \omega \cdot t \quad ; \quad i = -\frac{v_E}{R} \quad ; \quad v_{AK\ 1,2} = v_E$$

La valeur moyenne de la tension de sortie a donc pour expression :

$$\bar{V}_S = \frac{2 \cdot \hat{V}}{\pi} = \frac{2 \cdot V \cdot \sqrt{2}}{\pi}$$

L'expression de la valeur efficace est donnée par :

$$V_S = \frac{\hat{V}}{2} = \frac{V \cdot \sqrt{2}}{2}$$

Le facteur de forme et le taux d'ondulation ont pour valeurs :

$$F = 1.11 \quad \text{et} \quad \tau = 48 \%$$

Ces résultats montrent que la tension redressée est loin d'être constante, et vue la faible valeur de la tension moyenne, le redressement mono-alternance est très peu utilisé en pratique.

Les trois types de redressement ne fournissent en sortie que des ondes de tensions et de courants unidirectionnelles, encore différentes de celles de tensions et courants constantes. Pour améliorer les formes d'ondes obtenues, et donc limiter les ondulations, deux procédés sont couramment mis en œuvre :

- le filtrage de tension par condensateur en parallèle, pour des charges à courant faibles,
- le filtrage de courant par inductance en série pour des charges à courant fort.

TP N°4 : REDRESSEMENTS MONOPHASES

1. Objectifs

- Etudier le fonctionnement et les caractéristiques des différents montages redresseurs monophasés à diodes.
- Visualiser l'allure des différentes tensions pour chaque montage étudié.
- Mettre en évidence le filtrage de tension par condensateur et le filtrage de courant par inductance.

2. Matériel nécessaire

01	Pupitre d'essai (<i>Electronica Veneta</i>)	
01	Alimentation sinusoïdale	AC : 6 V - 5 A ; 12 V - 2.5 A ; 50 Hz
04	Diodes	D ₁ à D ₄ : 6 A - 100 V (sur pupitre)
01	Résistance	R = 31.5 Ω - 17 W (sur pupitre)
02	Condensateurs	C ₁ = C ₂ = 500 μF ; 25 Volts (sur pupitre)
02	Bobines (inductances)	L ₁ = L ₂ = 60 mH ; 0.5 A (sur pupitre)
02	Voltmètres	Numérique (TRMS et =)
02	Ampèremètres	Numérique (TRMS et =)
01	Oscilloscope bi-courbe	Sondes (02) ou connecteurs BNC (02)

3. Travail de préparation

- Q1- Donner, dans le cas général, les expressions de la valeur efficace et de la valeur moyenne d'un signal périodique de période T .
- Q2- Quelle est la nature des indications données par les appareils de mesure suivants (voltmètre ou ampèremètre) : magnétoélectrique (position DC), magnétoélectrique (position AC), numérique avec indication TRMS (position DC), numérique avec indication TRMS (position AC), ferromagnétique ?
- Q3- Sachant qu'un oscilloscope ne permet pas de visualiser directement un courant, proposer deux méthodes pour visualiser simultanément la tension aux bornes d'un dipôle et l'image du courant le traversant, ainsi que les relations donnant ses valeurs maximale et efficace (illustrer votre réponse à l'aide de schémas).
- Q4- Pour les circuits redresseurs représentés sur les figures 1, 2 et 3, dans le cas de charge résistive :
- tracer les oscillogrammes des tensions d'entrée v_E , de sortie v_S et de la tension v_{AK} aux bornes de la diode D₁ ;
 - calculer les valeurs moyennes, efficaces des tensions de sortie v_S et des courants traversant la résistance de charge, en déduire les valeurs correspondantes des facteurs de forme et des taux d'ondulation ;
 - expliquer comment se fait le choix des diodes pour chacun des montages ;

NB : Présenter les résultats sous forme de tableaux.

4. Manipulation N°1 : Etude du redressement mono-alternance

Il s'agit d'étudier les propriétés du redressement mono-alternance, de mesurer les valeurs moyennes et efficaces de la tension de sortie obtenue et du courant traversant la charge, ainsi que de relever les oscillogrammes correspondants. Enfin d'observer l'influence du filtrage de tension par condensateur et du filtrage de courant par inductance.

- **Schéma de montage**

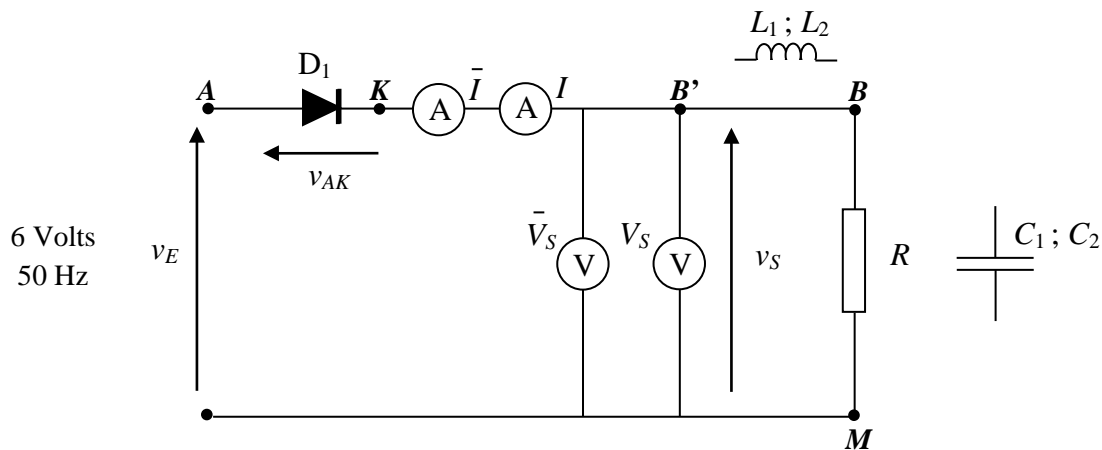


Figure 1. Schéma de montage pour l'étude du redressement mono-alternance

- **Mode opératoire**

- Réaliser le montage et faire le vérifier ;
- visualiser et relever les oscillogrammes des tensions d'entrée v_E et de sortie v_S (voie A en A, voie B en B et masse de l'oscilloscope en M) ;
- visualiser et relever l'oscillogramme de la tension v_{AK} aux bornes de la diode (voie A en A et masse de l'oscilloscope en K) ;
- relever les indications (valeurs moyennes et efficaces) des appareils de mesure ;
- en déduire les valeurs des facteurs de forme et d'ondulation ;
- brancher successivement les condensateurs C_1 et C_2 (de capacité $500 \mu\text{F}$ chacun) en parallèle avec la résistance de charge ;
- visualiser, dans les deux cas, les oscillogrammes des tensions d'entrée v_E et de sortie v_S (voie A en A, voie B en B et masse de l'oscilloscope en M) ;
- relever, dans les deux cas, les indications (valeurs moyennes et efficaces) des appareils de mesure ;
- en déduire les valeurs des facteurs de forme et d'ondulation pour la tension ;
- quelle est l'influence des condensateurs sur l'allure de la tension v_S et sur ses valeurs moyennes et efficaces ? conclure ;
- débrancher les condensateurs et brancher successivement en série, entre B et B', les inductances L_1 et L_2 (de 60 mH chacune) ;

- visualiser, dans les deux cas, les oscillogrammes de la tension de sortie v_S et de l'image du courant dans la résistance de charge R (voie A en B' , voie B en B et masse de l'oscilloscope en M) ;
- relever, dans les deux cas, les indications (valeurs moyennes et efficaces) des appareils de mesure ;
- en déduire les valeurs des facteurs de forme et d'ondulation pour le courant ;
- quelle est l'influence des inductances sur l'allure de la tension v_S et sur ses valeurs moyennes et efficaces ? même question pour le courant dans la charge ? conclure.
- Comparer les résultats théoriques et expérimentaux.

NB : Présenter les résultats sous forme de tableaux.

Représenter les oscillogrammes sur les feuilles réponses prévues à cet usage.

5. Manipulation N°2 : Etude du redressement double alternance avec transformateur à point milieu

Il s'agit d'étudier les propriétés du redressement double-alternance avec transformateur à point milieu, de mesurer les valeurs moyennes et efficaces de la tension de sortie obtenue et du courant traversant la charge, ainsi que de relever les oscillogrammes correspondants.

• Schéma de montage

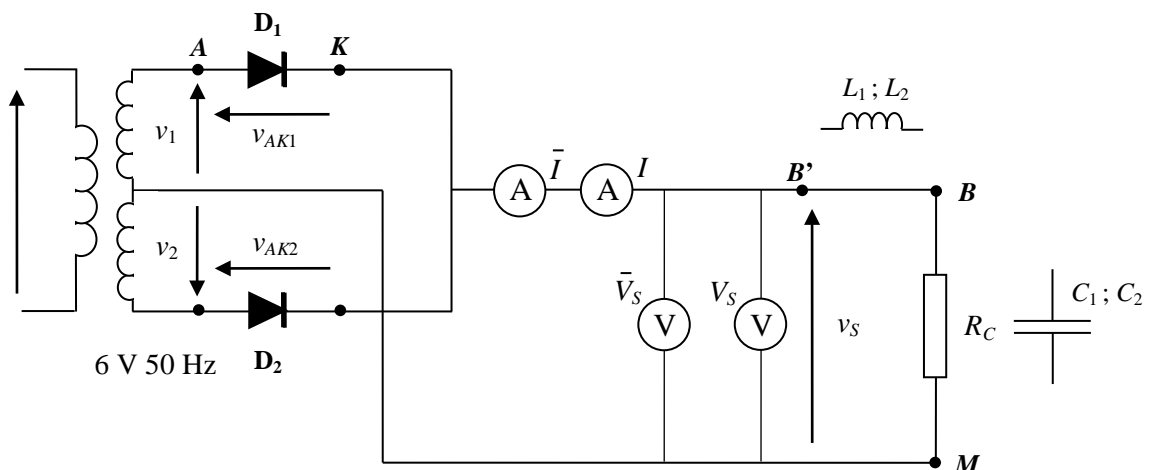


Figure 2. Schéma de montage pour l'étude du redressement double alternance avec transformateur à point milieu

• Mode opératoire

- Réaliser le montage et faire le vérifier ;
- visualiser et relever les oscillogrammes des tensions d'entrées v_1 et v_2 ;
- visualiser et relever l'oscillogramme de la tension de sortie v_S ;
- visualiser et relever l'oscillogramme de la tension v_{AK1} aux bornes de la diode D_1 ;
- suivre le même mode opératoire que pour le redressement mono-alternance.

6. Manipulation N°3 : Etude du redressement double alternance avec pont de Graetz

Il s'agit d'étudier les propriétés du redressement double-alternance avec pont de Graetz, de mesurer les valeurs moyennes et efficaces de la tension de sortie obtenue et du courant traversant la charge, ainsi que de relever les oscillogrammes correspondants.

• Schéma de montage

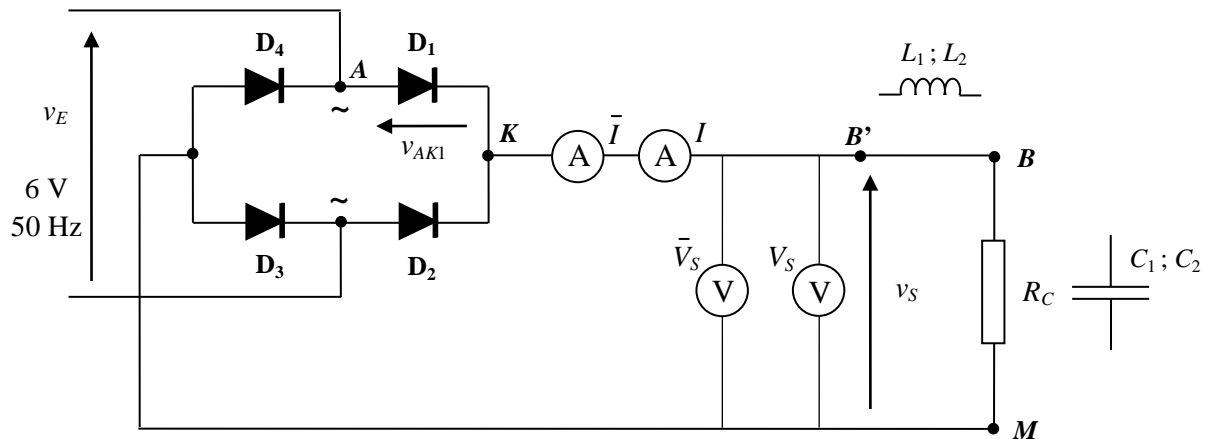


Figure 3. Schéma de montage pour l'étude du redressement double alternance avec pont de Graetz

• Mode opératoire

- Réaliser le montage et faire le vérifier ;
- suivre le même mode opératoire que pour le redressement mono-alternance. manipulation précédente.

Attention, les masses des deux voies de l'oscilloscope étant communes, dans le cas du redressement par pont de diodes, **il y a risque de court-circuit et de détérioration des diodes**, si l'on visualise simultanément les tensions d'entrée v_E et de sortie v_S .

Ne jamais visualiser simultanément les tensions d'entrée et de sortie

Si nécessaire, visualiser les individuellement une après l'autre.

7. Travail à effectuer

- Rédiger un compte-rendu de TP dans lequel vous exposerez tous les résultats accompagnés de leur interprétation.
- Comparer les résultats théoriques et expérimentaux.
- Donner une conclusion concernant le rôle et l'efficacité des filtres par condensateur et par inductance.
- Récapituler les principales propriétés observées concernant les redressements étudiés.
- Donner une conclusion à ce travail.



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

COMPLEMENT THEORIQUE N°5

THYRISTOR ET REDRESSEMENT

MONO-ALTERNANCE

1. Le thyristor

Le thyristor est essentiellement un composant de puissance utilisé en électronique de puissance. C'est un semi-conducteur au silicium capable d'interrompre ou d'établir des courants dont l'intensité peut atteindre plusieurs centaines d'ampères, ce qui en fait un organe très utilisé pour la commande des moteurs. C'est un interrupteur statique unidirectionnel, autrement dit le courant ne peut le parcourir uniquement dans un seul sens.

Le thyristor est un redresseur à électrode de commande. Il est constitué de silicium réparti en 4 couches dopées alternativement P et N, comme illustré sur la figure 1.

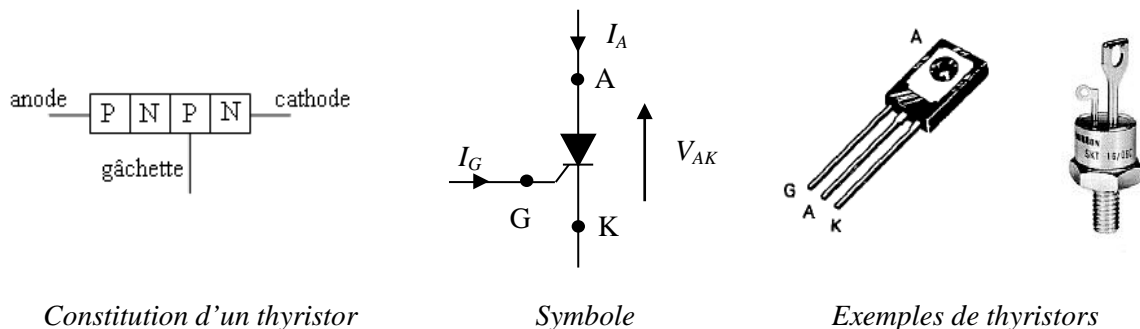


Figure 1. Présentation du thyristor

La couche P est appelée *anode*, la couche N est appelée la *cathode*. La couche voisine de la cathode est reliée à une électrode de commande appelée *gâchette*.

Le thyristor présente deux états stables :

- l'état *bloqué* : sa résistance est alors très grande (environ $1\text{ M}\Omega$),
- l'état *passant* : sa résistance est alors très faible (environ $1\ \Omega$).

Le passage de l'état bloqué à l'état passant s'appelle l'amorçage (ou le déclenchement), alors que le passage de l'état passant à l'état bloqué s'appelle le blocage.

Dans le cas idéal, lorsque le thyristor est passant il est considéré équivalent à un interrupteur fermé ($V_{AK} \approx 0$). Alors que lorsqu'il est bloqué, il est équivalent à un circuit ouvert ($I_A = 0$).

• Caractéristique statique

C'est la caractéristique $I_A = f(V_{AK})$ relevée en courant continu, elle comprend trois régions :

- la région OA, la tension V_{AK} est négative, le thyristor est polarisé en inverse, il est bloqué ;
- la région OB, la tension V_{AK} est positive, le thyristor est polarisé en directe, donc amorçable, mais n'ayant pas reçu de courant de gâchette il reste bloqué ;
- la région OC, après l'envoi d'une impulsion, alors que V_{AK} est positive, le thyristor s'amorce et devient passant.

On remarque qu'en l'absence d'impulsion de gâchette, si la tension V_{AK} directe est suffisante, l'amorçage spontané peut se produire. D'autre part, selon l'importance du courant de gâchette la valeur de la tension directe pour laquelle se produit le déclenchement est différente.

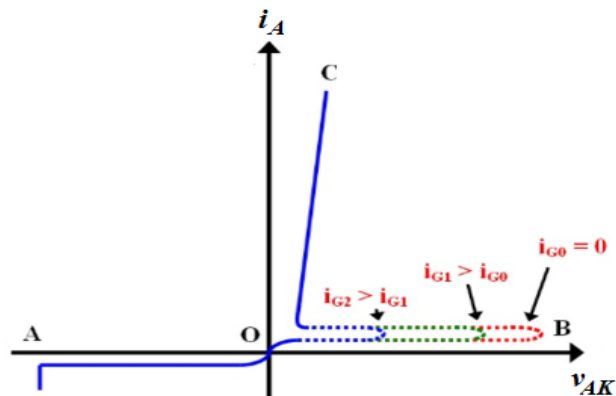


Figure 2. Caractéristique statique d'un thyristor

• L'amorçage

Pour amorcer un thyristor il faut donc satisfaire deux conditions :

- $V_{AK} > 0$, mais en réalité la tension anode-cathode doit être supérieure au seuil de tension du thyristor soit 1 Volt environ ;
- $i_G > 0$, mais en pratique le courant de gâchette i_G doit être supérieur à un courant minimum $i_{G\min}$, appelé courant de maintien i_H .

Quand un thyristor est passant, la suppression du courant de gâchette ne modifie plus son état. Donc, pour rendre passant un thyristor, il suffira qu'il soit polarisé en direct et qu'une impulsion de gâchette viennent l'amorcer.

• Le blocage

En pratique, le blocage est obtenu en annulant la tension V_{AK} ou en la rendant négative. Toutefois si l'intensité du courant qui traverse le thyristor de l'anode vers la cathode devient inférieure à l'intensité du courant de maintien, le thyristor se bloque.

Chaque thyristor a ses caractéristiques propres données par les catalogues constructeurs.

Les principales étant :

- l'intensité maximum en sens passant,
- la tension maximum en sens bloqué,
- le courant de gâchette nécessaire pour amorcer le thyristor.

2. Redressement commandé mono-alternance

Un redresseur monophasé commandé est un convertisseur de puissance qui transforme une source de tension sinusoïdale v_E , de fréquence et de valeur efficace constantes, en une source de tension v_S de valeur moyenne réglable. Pour l'essentiel, ce type de redresseur utilise des thyristors, qui sont des commutateurs commandés à la fermeture. Une partie commande est alors chargée de contrôler les composants de puissance qui assurent la conversion.

Le redressement commandé mono-alternance, bien que peu utilisé en pratique, est un convertisseur essentiel pour la compréhension des structures plus complexes et avec charge industrielles telles que les moteurs, les circuits inductif (enroulements d'excitation), etc...

La figure 3 montre le schéma de principe d'un redresseur commandé mono-alternance.

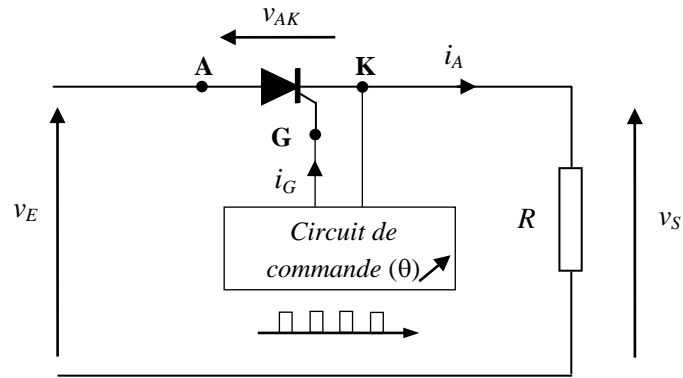


Figure 3. Schéma de principe d'un redresseur mono-alternance à thyristor

On considère que :

- la tension d'entrée est sinusoïdale : $v_E = V_E \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \omega \cdot t$,
- que la charge est une résistance R ,
- le thyristor est parfait (pas de chute de tension, aucune perte en conduction et courant nul au blocage).

Le circuit de commande envoie des impulsions de courant i_G dans la gâchette du thyristor pendant la première alternance de chaque période. Le thyristor est donc amorcé avec un angle de retard à l'amorçage θ , ce qui signifie que l'impulsion de gâchette lui parvient un temps θ/ω après que la tension v_{AK} soit devenue positive.

La figure 4 représente, en concordance de temps, les chronogrammes des tensions d'entrée v_E et de sortie v_S en fonction de l'angle ($\alpha = \omega \cdot t$).

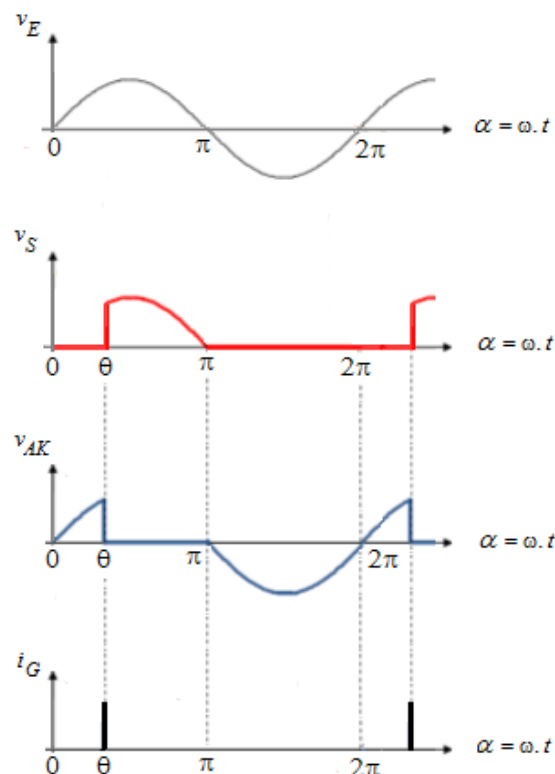


Figure 4. Chronogrammes des tensions v_E , v_S , v_{AK} et i_G

- **Valeur moyenne de la tension v_S de sortie**

Le signal de la tension v_S est périodique, de période $2.\pi$ et existe entre θ et π , la valeur moyenne de la tension de sortie a donc pour expression :

$$\bar{V}_S = \frac{1}{2.\pi} \cdot \int_{\theta}^{\pi} V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha = \frac{V \cdot \sqrt{2}}{2.\pi} \cdot (1 + \cos \theta)$$

$$\bar{V}_S = \frac{V \cdot \sqrt{2}}{2.\pi} \cdot (1 + \cos \theta)$$

Le réglage de l'angle θ de retard à l'amorçage permet de faire varier la valeur moyenne de la tension de sortie, entre $(\bar{V}_S = V \cdot \sqrt{2}/\pi)$ pour $\theta = 0^\circ$ et $\bar{V}_S = 0$ pour $\theta = \pi$.

La figure 5 montre les variations de la valeur moyenne de la tension de sortie en fonction de l'angle de retard à l'amorçage.

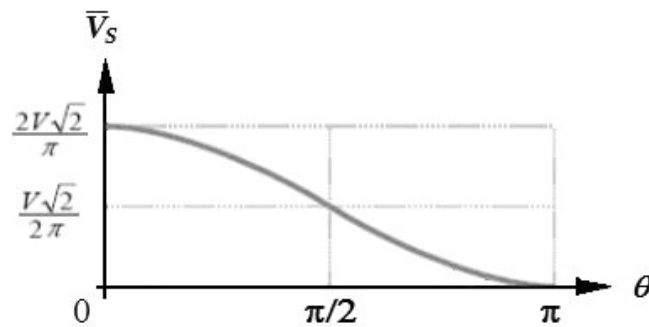


Figure 2. Evolution de la tension moyenne en fonction du retard à l'amorçage

Le chronogramme de la tension v_{AK} montre que la tension maximale que doit supporter le thyristor en inverse est : $V_{max} = V \cdot \sqrt{2}$.

TP N°5 : THYRISTOR ET REDRESSEMENT MONO-ALTERNANCE

1. Objectifs

- Etudier les conditions d'amorçage et de blocage d'un thyristor sur la base d'observations expérimentales.
- Etudier le fonctionnement et les caractéristiques d'un montage redresseur commandé mono-alternance.
- Visualiser la tension de sortie et mesurer sa valeur moyenne pour différents angles de retard à l'amorçage

2. Matériel nécessaire

01	Pupitre d'essai (<i>Langlois</i>)	
02	Alimentations stabilisées	DC : 0 / 230 V – 3 A
01	Alimentation sinusoïdale	AC : 6 V - 5 A ; 12 V - 2.5 A ; 50 Hz
01	Thyristor	2N4443 - (datasheet en annexe)
01	Diode	1N4001
03	Résistances	1 k Ω - ¼ W ; 220 Ω - ¼ W 4.7 k Ω - ¼ W
01	Résistance variable - (<i>RBOX 418</i>)	$0 \leq R_H \leq 10$ k Ω - 1 W - 1 %
01	Lampe	12 V - 5 W
02	Condensateurs	6.8 μ F - 35 V ; 1 μ F - 63 V
02	Voltmètres	Magnétoélectrique ou numérique
02	Ampèremètres	Magnétoélectrique ou numérique
01	Oscilloscope bi-courbe	Sondes (02) ou connecteurs BNC (02)

3. Travail de préparation

- Q1- Enumérer les différences existant entre une diode et un thyristor du point de vue de leur constitution et de leur fonctionnement.
- Q2- Citer l'objectif du redressement commandé. Quelles sont les différences entre les redressements mono-alternance commandé et non commandé.
- Q3- Relever, sur la fiche technique fournie par le constructeur les paramètres caractéristiques suivants, concernant le thyristor 2N4443 : $I_{T(RMS)}$, $I_{T(AV)}$, I_{GT} , I_H , V_{TM} , V_{DRM} . Définir chacun de ces paramètres.
- Q4- Soit le circuit représenté sur la figure 2, quel est le rôle du circuit de gâchette ? Tracer, en concordance de temps, les chronogrammes illustrant l'allure des tensions v_E , v_R et v_{AK} . Donner les expressions littérales des valeurs moyennes \bar{V}_R et \bar{I}_A de la tension v_R et du courant i_A . Calculer les valeurs numériques pour $\theta = 45^\circ$, 90° et 135° . Tracer le graphe représentant les variations de la valeur moyenne \bar{V} de la tension en fonction de l'angle θ .

4. Manipulation N°1 : Etude de l'amorçage d'un thyristor

Il s'agit d'étudier les conditions d'amorçage d'un thyristor sur la base d'observations expérimentales.

- **Schéma de montage**

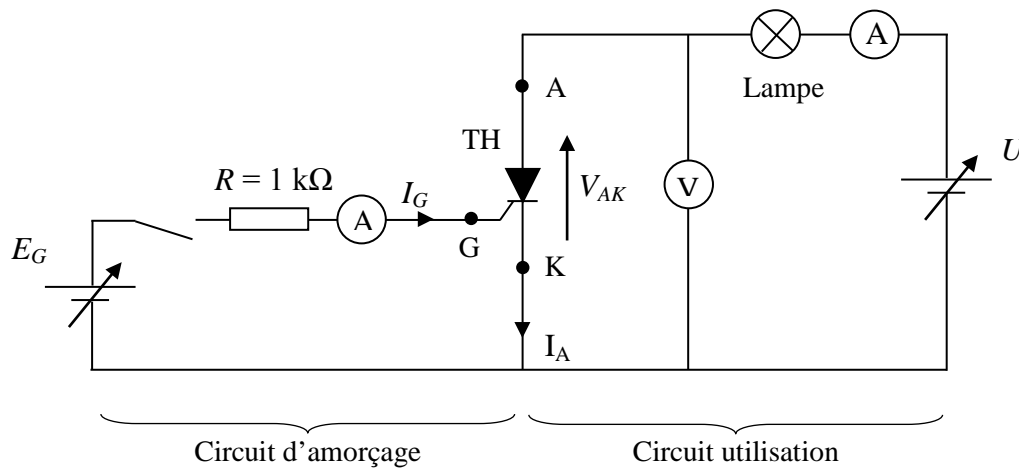


Figure 1. Schéma de montage pour l'étude de l'amorçage et du blocage du thyristor

E_G : Alimentation stabilisée 0/30 Volts

U : Alimentation stabilisée 0/30 Volts

$R = 1 \text{ k}\Omega$ (résistance de protection du circuit de gâchette)

- **Mode opératoire**

- Réaliser le montage et faire le vérifier ;
- fixer la valeur de la tension du circuit de gâchette à $E_G = 0$ et celle du circuit d'utilisation à $U = 12$ volts ;
- augmenter progressivement la valeur de la tension E_G du circuit d'amorçage jusqu'à ce que le thyristor s'amorce ;
(Le thyristor est amorcé lorsque la lampe s'allume et le courant I_A passe d'une valeur nulle à une valeur non-nulle).
- relever l'intensité minimale du courant de gâchette provoquant l'amorçage $i_{G \min}$;
- noter la valeur de la tension V_{AK} entre l'anode et la cathode lorsque le thyristor est amorcé ;
- continuer à augmenter E_G ,
quels sont les effets sur le courant I_A et sur la tension V_{AK} ?
- ouvrir le circuit de gâchette,
quel est l'effet sur le thyristor ?
- débranchez, puis rebranchez le générateur du circuit d'utilisation,
qu'observez-vous ?
- inverser les bornes du thyristor (anode et cathode), fermer le circuit de gâchette et régler la valeur de la tension E_G pour obtenir un courant $I_G > I_{G \min}$,
le thyristor s'amorce-t-il ?
- déduire des observations une conclusion sur les conditions d'amorçage du thyristor.

5. Manipulation N°2 : Etude du blocage d'un thyristor

Il s'agit d'étudier les conditions de blocage d'un thyristor sur la base d'observations expérimentales.

• Mode opératoire

- en utilisant le même montage, amorcer le thyristor, puis supprimer le courant de gâchette ;
- diminuer progressivement le courant I_A en réduisant la tension U , relever l'intensité du courant de maintien I_H et la valeur correspondante de la tension V_{AK} ;
(Lorsque le courant I_A passe sous l'intensité minimale, notée I_H , qui permet au thyristor de rester amorcé, ce dernier se bloque et la lampe s'éteint).
- pour ces valeurs, réamorcer le thyristor, que se passe-t-il ?
- fixer à nouveau la tension du circuit d'utilisation à $U = 12$ Volts, réamorcer le thyristor, puis brancher un conducteur entre l'anode et la cathode, qu'observez-vous ? expliquez ;
- reprendre la valeur initiale de la tension U (12 Volts), réamorcer le thyristor, charger ensuite un condensateur (par exemple $6.8 \mu\text{F}$) sous U , puis le brancher en inverse entre l'anode et la cathode du thyristor, décrire ce qui se passe ;
- déduire des observations une conclusion sur les conditions blocage du thyristor.

6. Manipulation N°3 : Etude du redressement commandé mono-alternance

Il s'agit d'étudier le fonctionnement et les caractéristiques d'un montage redresseur mono-alternance commandé, de visualiser la tension de sortie et mesurer sa valeur moyenne pour différents angles de retard à l'amorçage.

• Schéma de montage

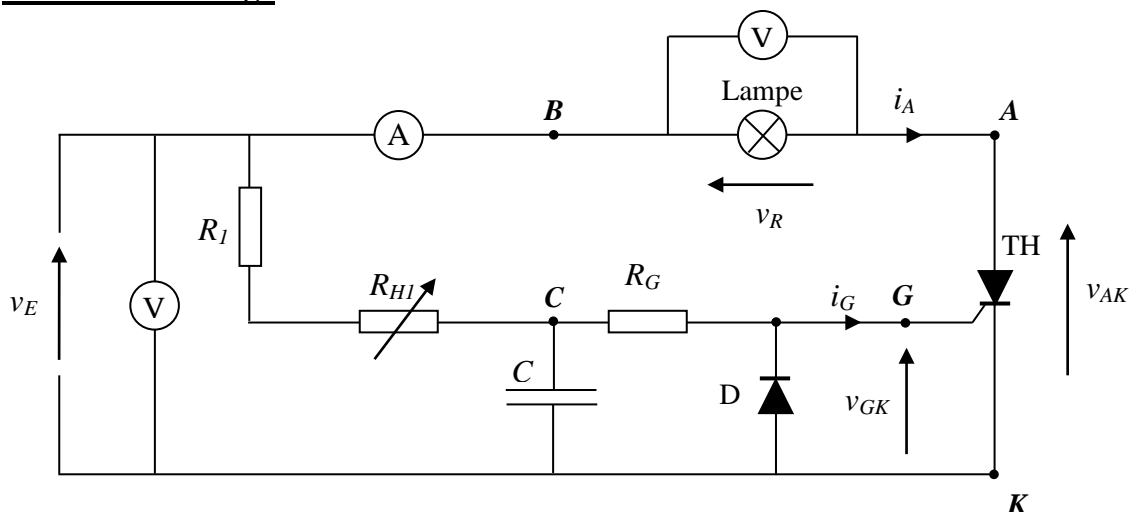


Figure 2. Schéma de montage pour l'étude du redressement commandé mono-alternance

La tension v_E est sinusoïdale de fréquence 50Hz et de valeur efficace $V_E = 12$ Volts

D : 1N4001	C = 1 μF - 63 V	(lampe ou R = 1 k Ω - 3 W)
$R_I = 220 \Omega$ - 1/4 W	$R_G = 4.7 \text{ k}\Omega$ - 1/4 W	$0 \leq R_H \leq 10 \text{ k}\Omega$

• **Mode opératoire**

- Réaliser le montage et faite le vérifier ;
- régler la résistance R_H sur sa valeur minimale et alimenter le montage ;
- visualiser la tension v_E (voie A en B et masse de l'oscilloscope en K) ;
- visualiser la tension v_R (voie A en B et masse de l'oscilloscope en A) ;
- ajuster la valeur de la résistance R_H pour obtenir un angle de retard à l'amorçage d'environ $\theta = 45^\circ$, relever sur le voltmètre et l'ampèremètre les valeurs moyennes respectives (\bar{V}_R, \bar{I}_A) de la tension v_R et du courant i_A ;
- visualiser respectivement les tensions v_{AK} et v_{GK} (voie A en A, voie B en G et masse de l'oscilloscope en K) ;
- refaites les mêmes mesures pour les angles de retard suivants : $\theta = 90^\circ$ et $\theta = 135^\circ$;
- quelle est l'influence des variations de la résistance R_H sur la tension v_{GK} , sur l'angle de retard θ et enfin sur la tension v_R ?
- faire varier la résistance R_H depuis sa valeur minimale jusqu'à sa valeur maximale, relever les valeurs extrêmes ($\theta_{min}, \theta_{max}$) de l'angle de retard et celles des valeurs moyennes ($\bar{V}_{R min}, \bar{V}_{R max}$) et ($\bar{I}_{A min}, \bar{I}_{A max}$) de la tension v_R et du courant i_A .

NB : *Présenter les résultats sous forme de tableaux.*

Représenter les oscillogrammes sur les feuilles réponses prévues à cet usage.

• **Tableau de mesure**

Complétez le tableau suivant.

θ	$^\circ$	$\theta_{min} = \dots$					$\theta_{max} = \dots$
\bar{V}	V	$\bar{V}_{R max} = \dots$					$\bar{V}_{R min} = \dots$
\bar{I}_A	mA	$\bar{I}_{A max} = \dots$					$\bar{I}_{A min} = \dots$
\bar{V}_R / \bar{I}_A	Ω						

- Tracer les graphes suivants représentants :
 - ✓ les variations de la valeur moyenne \bar{V} de la tension en fonction de l'angle θ ;
 - ✓ les variations de la valeur moyenne \bar{I}_A du courant en fonction de l'angle θ ;
- Que représente le rapport (\bar{V}_R / \bar{I}_A) ? comparer avec sa valeur calculée ;
- Comparer les résultats théoriques et expérimentaux.

8. Travail à effectuer

- Rédigez un compte-rendu de TP dans lequel vous exposerais tous les résultats accompagnés de leur interprétation.
- Récapituler les principales propriétés observées pour l'amorçage et le blocage du thyristor, ainsi que celles concernant le redressement commandé mono-alternance.
- Donnez une conclusion à ce travail.



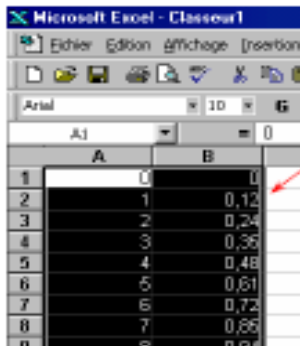
MISE EN GARDE : Pour toutes les manipulations, les montages seront réalisés hors tension et vérifiés par le professeur avant mise sous tension.

ANNEXES

- **Tracer une courbe expérimentale avec le tableur Excel**



1. Lancer le logiciel (par exemple avec un double clic gauche sur l'icône du bureau).

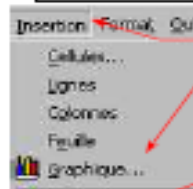


2. Entrer les données au clavier

Pour les puissances de dix, on utilise E.
Par exemple : $2,5 \cdot 10^{-4} \Leftrightarrow 2,5E-4$.

La colonne A contient les données à placer en abscisse.

La colonne B contient les données à placer en ordonnée.



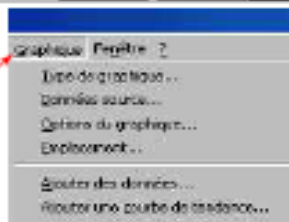
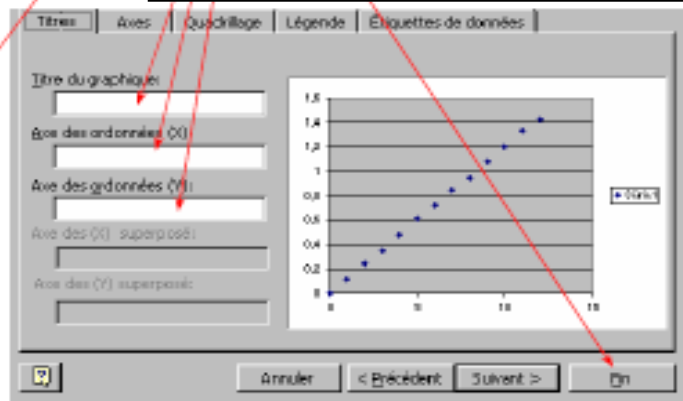
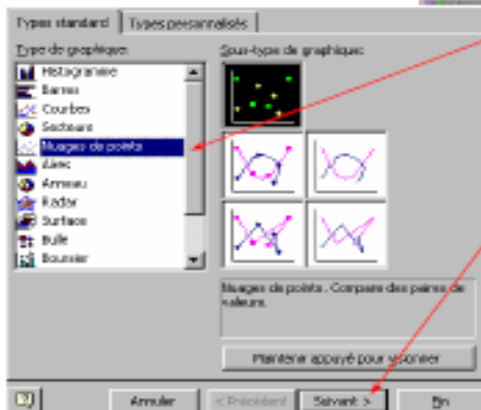
3. Cliquer sur *insertion* puis *graphique*

4. Choisir *Nuage de points* puis cliquer sur *Suivant*.

Cliquer à nouveau sur *Suivant* après avoir vérifié que la case *colonnes* est cochée.

Dans l'onglet Titres indiquer le titre du graphe puis les grandeurs des deux axes et leurs unités.

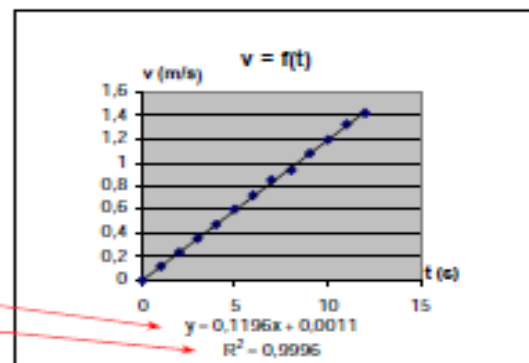
Cliquer sur *Fin*



5. Pour ajouter une courbe de tendance, sélectionner le graphique, cliquer sur *Graphique* puis sur *Ajouter une courbe de tendance*.

Choisir le **Type** puis, dans l'onglet **Options**, cocher :

- Coupe l'axe horizontal (X) à 0
- Afficher l'équation sur le graphique
- Afficher le coefficient de détermination



6. On peut modifier les graduations des axes, la couleur du fond, des axes ... en cliquant avec le bouton droit de la souris sur la partie à modifier.

Remarque : Plus le coefficient de détermination est proche de 1, plus la courbe que l'on a tracée s'approche de la courbe de tendance.

• 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
Eclairement	E	Lux	Lux	Luxmètre
Intensité lumineuse	I	Candela	Cd	Candelamètre

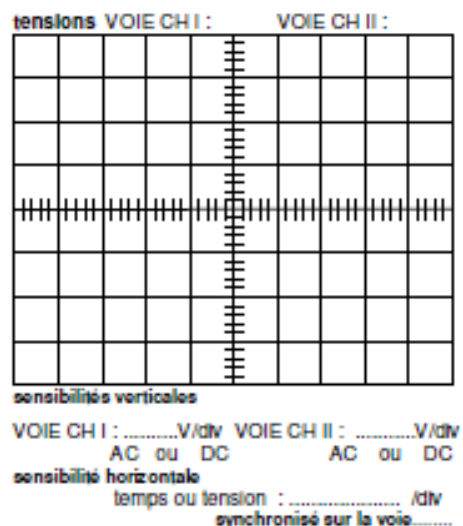
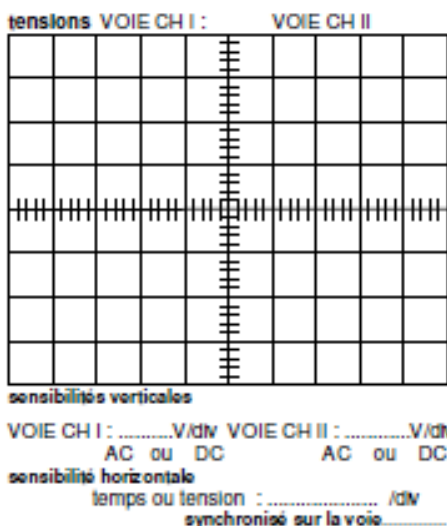
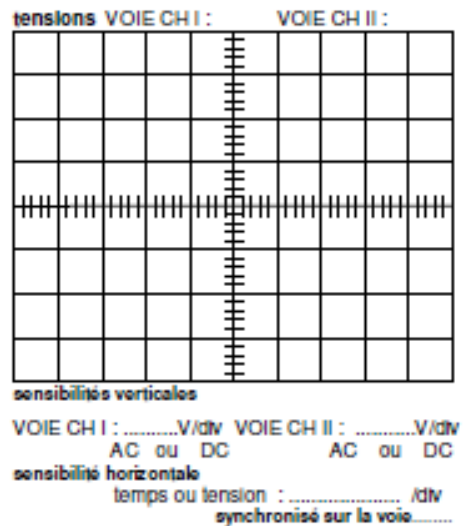
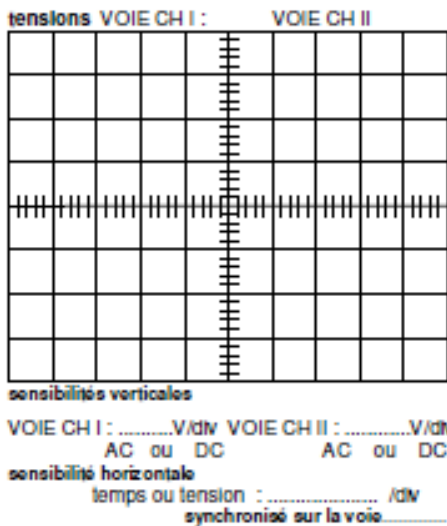
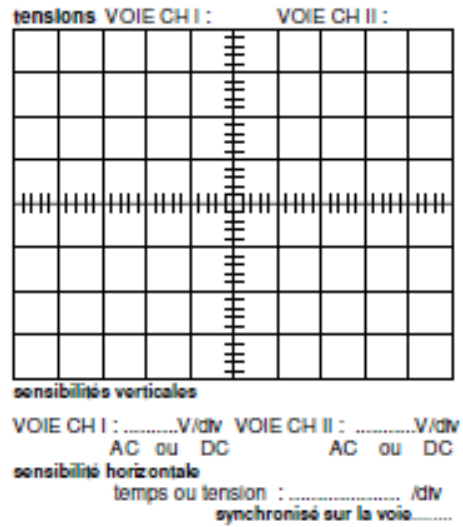
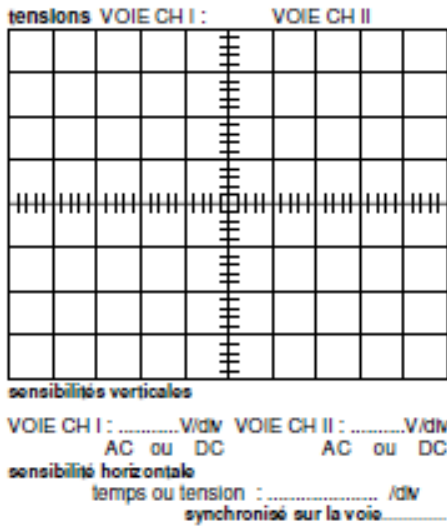
Tableau 2 : Multiples et sous multiples des unités

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}

• **Feuille réponse pour le tracé d'oscillogramme**

TP N° :
 Nom :
 Section :

Titre :
 Prénom :
 Groupe : Binôme :



- Extrait datasheet : Thyristor 2N4443

MOTOROLA SC (DIODES/OPTO)

6367255 MOTOROLA SC (DIODES/OPTO)

01 DE 6367255 0078964 0

01E 78964 D

T-25-15

Silicon Controlled Rectifiers Reverse Blocking Triode Thyristors

... designed for high-volume consumer phase-control applications such as motor speed, temperature, and light controls and for switching applications in ignition and starting systems, voltage regulators, vending machines, and lamp drivers requiring:

- Small, Rugged, Thermopad Construction — for Low Thermal Resistance, High Heat Dissipation, and Durability
- Practical Level Triggering and Holding Characteristics @ 25°C
 $I_{GT} = 7 \text{ mA (Typ)}$
 $I_H = 6 \text{ mA (Typ)}$
- Low "On" Voltage — $V_{TM} = 1 \text{ Volt (Typ)}$ @ 5 Amps @ 25°C
- High Surge Current Rating — $I_{TSM} = 80 \text{ Amps}$

**2N4441
thru
2N4444**

SCRs
8 AMPERES RMS
50 thru 600 VOLTS



MAXIMUM RATINGS ($T_J = 100^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Peak Repetitive Forward and Reverse Blocking Voltage, Note 1	V_{DRM} or V_{RRM}	50 200 400 600	Volts
*Non-Repetitive Peak Reverse Blocking Voltage ($t = 5 \text{ ms (max)}$ duration)	V_{RSM}	75 300 500 700	Volts
*RMS On-State Current (All Conduction Angles)	$I_T(\text{RMS})$	8	Amps
Average On-State Current, $T_C = 73^\circ\text{C}$	$I_T(\text{AV})$	5.1	Amps
*Peak Non-Repetitive Surge Current (1/2 cycle, 60 Hz preceded and followed by rated current and voltage)	I_{TSM}	80	Amps
Circuit Fusing ($T_J = -40 \text{ to } +100^\circ\text{C}$; $t = 1 \text{ to } 8.3 \text{ ms}$ *)	I^2t	25	A^2s
*Peak Gate Power	P_{GM}	5	Watts
*Average Gate Power	$P_{G(\text{AV})}$	0.5	Watt
*Peak Forward Gate Current	I_{GM}	2	Amps
*Peak Reverse Gate Voltage	V_{RGM}	10	Volts

*Indicates JEDEC Registered Data.

(cont.)

Note 1. Ratings apply for zero or negative gate voltage but positive gate voltage shall not be applied concurrently with a negative potential on the anode. When checking forward or reverse blocking capability, thyristor devices should not be tested with a constant current source in a manner that the voltage applied exceeds the rated blocking voltage.

MOTOROLA THYRISTOR DEVICE DATA

2N4441 thru 2N4444

MAXIMUM RATINGS — continued ($T_J = 100^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	Value	Unit
*Operating Junction Temperature Range	T_J	-40 to +100	$^\circ\text{C}$
*Storage Temperature Range	T_{stg}	-40 to +150	$^\circ\text{C}$
Mounting Torque (8-32 screw), Note 1	—	8	in. lb.

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Typ	Max	Unit
*Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	—	2.5	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	40	—	$^\circ\text{C/W}$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Peak Forward or Reverse Blocking Current (Rated V_{DRM} or V_{RRM} , gate open) $T_J = 25^\circ\text{C}$ $T_J = 100^\circ\text{C}$	I_{DRM}, I_{RRM}	—	—	10 2	μA mA
Gate Trigger Current (Continuous dc) ($V_D = 7\text{ Vdc}$, $R_L = 100\text{ Ohms}$) $T_C = 25^\circ\text{C}$ $*T_C = -40^\circ\text{C}$	I_{GT}	—	7	30 60	mA
Gate Trigger Voltage (Continuous dc) ($V_D = 7\text{ Vdc}$, $R_L = 100\text{ Ohms}$) ($V_D = 7\text{ Vdc}$, $R_L = 100\text{ Ohms}$) ($V_D = \text{Rated } V_{DRM}$, $R_L = 100\text{ Ohms}$) $T_C = 25^\circ\text{C}$ $T_C = -40^\circ\text{C}$ $T_J = 100^\circ\text{C}$	V_{GT}	—	0.75	1.5 2.5	Volts
Peak On-State Voltage (Pulse Width = 1 to 2 ms, Duty Cycle < 2%) ($I_{TM} = 5\text{ A peak}$) $*I_{TM} = 15.7\text{ A peak}$	V_{TM}	—	1	1.5 2	Volts
Holding Current ($V_D = 7\text{ Vdc}$, gate open) $T_C = 25^\circ\text{C}$ $*T_C = -40^\circ\text{C}$	I_H	—	6	40 70	mA
Gate Controlled Turn-On Time ($I_{TM} = 5\text{ A}$, $I_{GT} = 20\text{ mA}$, $V_D = \text{Rated } V_{DRM}$)	t_{gt}	—	1	—	μs
Circuit Commutated Turn-Off Time ($I_{TM} = 5\text{ A}$, $I_H = 5\text{ A}$) ($I_{TM} = 5\text{ A}$, $I_H = 5\text{ A}$, $T_J = 100^\circ\text{C}$)	t_q	—	15 20	—	μs
Critical Rate of Rise of Off-State Voltage ($V_D = \text{Rated } V_{DRM}$, Exponential Waveform, $T_J = 100^\circ\text{C}$, Gate Open)	dv/dt	—	50	—	$\text{V}/\mu\text{s}$

*Indicates JEDEC Registered Data.

Note 1. Torque rating applies with use of torque washer (Sheepskin WD19522 #6 or equivalent). Mounting torque in excess of 8 in. lbs. does not appreciably lower case-to-sink thermal resistance. Anode lead and heatlink contact pad are common.

For soldering purposes (either terminal connection or device mounting), soldering temperatures shall not exceed +225 $^\circ\text{C}$.