



ROYAUME DU MAROC

مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل

Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail
DIRECTION RECHERCHE ET INGENIERIE DE FORMATION

**RESUME THEORIQUE
&
GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES**

**MODULE N°: 1 UTILISATION DES APPAREILS
DE MESURE ELECTRIQUES**

SECTEUR : ELECTROTECHNIQUE

**SPECIALITE : ELECTRICITE
DE BÂTIMENT**

NIVEAU : SPECIALISATION

ANNEE 2006

SOMMAIRE

Présentation du Module 1	
RESUME THEORIQUE	8
1. NOTIONS DE BASE D'ELECTRICITE	9
1.1. Notions de courant et de tension	9
1.1.1. Structure de la matière	9
1.1.2. Structure de l'atome	10
1.1.3. Classification des corps	11
1.1.4. Domaines de l'électricité	12
1.2. Circuits électriques	16
1.2.1. Types de courant électrique	16
1.2.2. Effets du courant électrique	18
1.3. Circuits à courant continu	19
1.3.1. Résistance	21
1.3.2. Condensateur	23
1.3.3. Inductance	25
1.4. Lois fondamentales	26
1.4.1. Loi d'Ohm	26
1.4.2. Loi des nœuds	27
1.4.3. Loi des mailles	28
1.5. Associations des récepteurs	29
1.5.1. Montage en série	29
1.5.2. Montage en parallèle	31
1.5.3. Montage mixte	34
1.5.4. Groupement des piles	35
1.6. Notions d'énergie et de puissance	37
1.6.1. Energie	37
1.6.2. Puissance	37
1.6.3. Loi de Joule	38
1.7. Circuit à courant alternatif	40
1.7.1. Types de courants alternatifs et leurs caractéristiques principales	40
1.7.2. Puissance en alternatif	46
2. MESURES ELECTRIQUES	47
2.1. Appareils de mesure électriques	47
2.1.1. Appareils analogiques	48
2.1.2. Appareils numériques	51
2.2. Ampèremètre	52
2.3. Voltmètre	54
2.4. Ohmmètre	55
2.4.1. Ohmmètre analogique	55
2.4.2. Ohmmètre numérique	57
2.4.3. Mégohmmètre (Ohmmètre à magnéto)	57
2.4.4. Mégohmmètre numérique	59
2.5. Multimètre	60
2.6. Pince ampèremétrique	63
2.7. Wattmètre	63

<i>GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES</i>	67
<i>TP1 – Mesure de l'intensité et de la tension en continu</i>	68
<i>TP 2 – Mesure de continuité</i>	71
<i>TP3 - Etude d'une résistance</i>	74
<i>TP4 – Mesure d'isolement</i>	77
<i>TP 5 – Mesure de la résistance d'une prise de terre</i>	83
<i>EVALUATION DE FIN DE MODULE</i>	86
<i>Liste des références bibliographiques</i>	91

MODULE : 1

UTILISATION DES APPAREILS DE MESURE
ELECTRIQUES

Durée : 30 h

OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU
DE COMPORTEMENT

COMPORTEMENT ATTENDU

Pour démontrer sa compétence l'apprenti doit **utiliser les appareils de mesure électriques** selon les conditions les critères et les précisions qui suivent.

CONDITIONS D'EVALUATION

- Individuellement
- A l'aide des appareils de mesure
- A partir de :
 - questionnaires à compléter
 - travaux à réaliser.

CRITERES GENERAUX DE PERFORMANCE

- Choix et utilisation adéquats des appareils ;
- Respect des limites d'utilisation ;
- Respect des règles de santé et de sécurité ;

**OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU
DE COMPORTEMENT**

**PRECISIONS SUR LE
COMPORTEMENT ATTENDU**

**CRITERES PARTICULIERS DE
PERFORMANCE**

A) *Utiliser les notions de base
d'électricité*

- ✓ *Application juste de notions de courant et de tension en courant continu et alternatif*
- ✓ *Application adéquate des lois de l'électricité (loi d'Ohm, loi de Joule)*

B) *Utiliser les appareils de mesure*

- ✓ *Choix des appareils appropriés*
- ✓ *Respect des normes d'utilisation*
- ✓ *Utilisation conforme aux recommandations du constructeur*
- ✓ *Respect des règles de sécurité*

C) *Ranger les appareils de mesure*

- ✓ *Rangement approprié et propreté des lieux.*

OBJECTIFS OPERATIONNELS DE SECOND NIVEAU

l'apprenti DOIT MAITRISER LES SAVOIRS, SAVOIR FAIRE, SAVOIR PERCEVOIR OU SAVOIR-ETRE JUGES PREALABLES AUX APPRENTISSAGES DIRECTEMENT REQUIS POUR L'ATTEINTE DE L'OBJECTIF DE PREMIER NIVEAU, TELS QUE :

Avant d'apprendre à utiliser les notions de base d'électricité l'apprenti doit (A) :

1. Donner la signification des termes relatifs aux circuits électriques
2. Distinguer les caractéristiques des composants d'un circuit électrique (sources, résistances, condensateurs, inductances)
3. Expliquer la loi d'Ohm et la loi de Joule (l'expression de la puissance).
4. Reconnaître différents groupements de composants.

Avant d'apprendre à utiliser les appareils de mesure l'apprenti doit (B) :

5. Identifier et décrire la fonction du voltmètre
6. Identifier et décrire la fonction de l'ampèremètre
7. Identifier et décrire la fonction de l'ohmmètre
8. Identifier et décrire la fonction du contrôleur universel
9. Identifier et décrire la fonction de la pince ampèremétrique
10. Déterminer les grandeurs à mesurer

Avant d'apprendre à ranger les appareils de mesure l'apprenti doit (C) :

11. Développer les méthodes de rangement efficace et sécuritaire

Présentation du Module

« **Utilisation des appareils de mesure électriques** » est le module qui donne aux apprentis de la spécialité « Électricien de bâtiment » les notions de base de l'électricité et les règles d'utilisation des appareils de mesure électriques nécessaires pour le travail correct sur un chantier. L'objectif de ce dernier est non seulement d'informer l'apprenti sur la matière mais aussi de lui proposer la suite adéquate des consignes à suivre afin d'obtenir des habilités durables au travail pour arriver à des manipulations sécurisées dans le domaine.

***Module 1 : UTILISATION DES
APPAREILS DE MESURE
ELECTRIQUES
RESUME THEORIQUE***

1. NOTIONS DE BASE D'ELECTRICITE

1.1. Notions de courant et de tension

La nature et l'origine de l'électricité résident même dans l'organisation interne de la matière. C'est la raison pour laquelle une brève étude de la structure de la matière s'avère nécessaire.

1.1.1. Structure de la matière

La matière se présente sous deux formes d'existence : substance et champs. La substance est concrète, palpable pendant que le champ n'est pas détectable avec les sens humains. Les champs se manifestent par les forces qui lui sont spécifiques.

Les substances peuvent être simples (élémentaires) ou tout simplement éléments et composées. Dans la structure des substances composées on retrouve des éléments associés sous des divers rapports.

Les éléments peuvent être décomposés jusqu'au niveau des atomes. Les atomes ont une structure particulière et caractéristique pour chaque élément. Lorsque l'on subdivise on modifie la nature de l'élément. L'atome représente la plus petite particule qui conserve les propriétés d'origine d'un élément.

Les atomes s'associent d'après des mécanismes spécifiques et engendrent les molécules. La molécule est la plus petite particule à la base de la constitution d'une substance composée qui conserve les propriétés d'origine de celle-ci. Une molécule est un groupement d'au moins deux atomes, mais on a synthétisé des substances dont les molécules contiennent des milliers d'atomes.

1.1.2. Structure de l'atome

L'atome est constitué par un noyau très petit et lourd portant une charge positive (+) autour duquel tournent à grande vitesse les électrons porteurs de charges négatives (-). Ceux-ci gravitent sur des orbites occupant des couches concentriques. La charge totale des électrons neutralise la charge positive du noyau. Dans son ensemble l'atome est neutre du point de vue électrique.

Entre le noyau (+) et les électrons (-) s'exercent des forces d'attraction d'autant plus grandes que les électrons sont près du noyau.

Le noyau est composé de 2 sortes de particules : les protons et les neutrons. Les protons sont des particules possédant une charge positive de valeur absolue égale à la charge négative de l'électron. Les neutrons ne possèdent pas de charge électrique.

La masse du proton est à peu près égale à celle du neutron et environ 1840 fois plus grande que celle de l'électron.

Le nombre de protons est égal à celui d'électrons et il est caractéristique pour chacun des 110 éléments identifiés dans l'univers.

Un atome peut perdre ou accepter un ou plusieurs électrons; ainsi il n'est plus en état neutre du point de vue électrique, et on l'appelle ion. Un ion positif est un atome qui a perdu d'électrons et un ion négative est un atome qui a accepté d'électrons.

Les électrons sont répartis en couches concentriques. Ceux appartenant à la couche extérieure s'appellent électrons de valence. Ils sont moins attirés par le noyau et ils peuvent quitter leur atome pour circuler dans l'espace libre autour des atomes. Ils deviennent des électrons libres. Leur vitesse est très grande (1000

km/s) et leur mouvement très désordonné, mais ils ne quittent pas la structure à laquelle ils appartiennent et celle-ci reste neutre (fig. 1-1).

Le déplacement d'électrons de manière ordonnée constitue le courant électrique.

Les électrons de valence jouent un rôle très important dans le courant électrique. Pour un élément avec de bonnes propriétés électriques comme l'aluminium le nombre d'électrons de valence est 3.

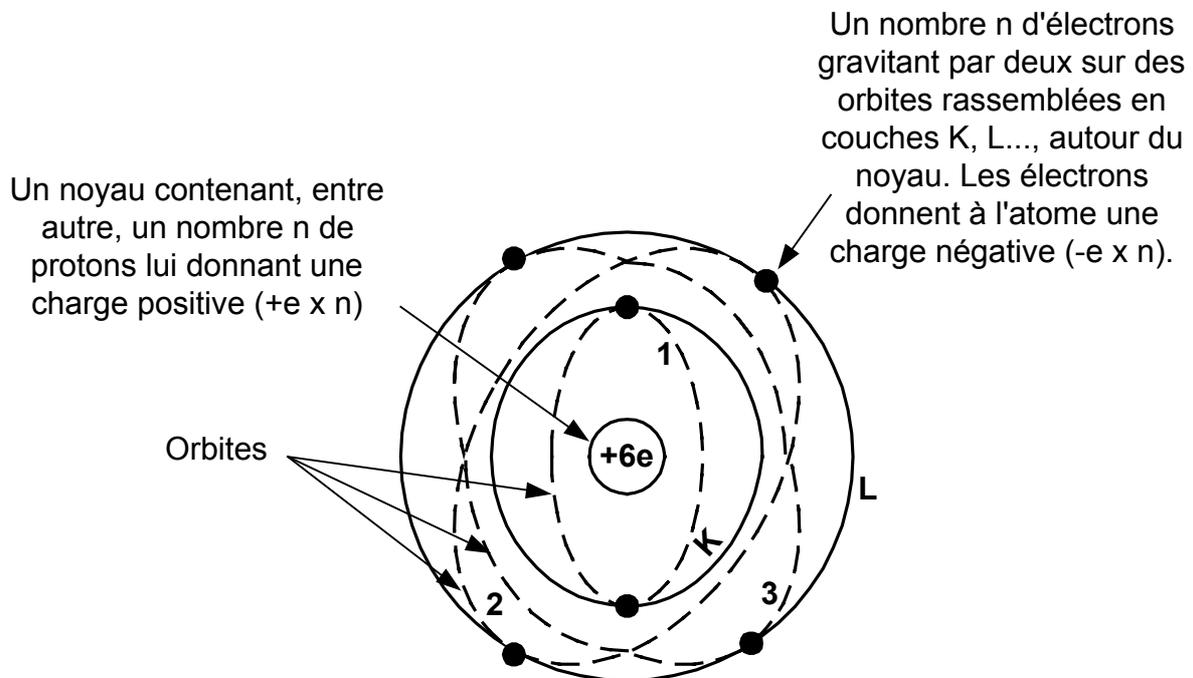


Schéma d'un atome de carbone (6 protons +6e et 6 électrons -6e)

Fig. 1-1

1.1.3. Classification des corps

Du point de vue électrique les corps sont classés en 3 catégories : conducteurs, isolants et semi-conducteurs.

Les **conducteurs** opposent une faible résistance au passage du courant électrique. Ce sont les éléments qui possèdent au maximum 3 électrons de valence qui se déplacent facilement dans leur structure et une concentration élevée d'électrons libres. Tous les métaux sont des conducteurs, l'aluminium et le cuivre étant les plus utilisés.

Par contre les **isolants** sont des matériaux qui ne permettent pas le passage du courant. Le papier, le bois, le caoutchouc, le plastique, le verre, la porcelaine sont des exemples de matériaux utilisés comme isolants en électrotechnique. Les isolants sont d'habitude des substances composées qui ne permettent pas l'apparition des électrons libres, contrairement aux conducteurs qui sont des éléments purs.

Les **semi-conducteurs** présentent une situation intermédiaire entre les conducteurs et les isolants. Ces éléments se caractérisent par 4 électrons de valence ; leur concentration d'électrons libres dépende de la température. Le germanium et le silicium sont les semi-conducteurs les plus utilisés. En outre les semi-conducteurs ont déterminé un développement spectaculaire de l'électronique car ils servent à la réalisation des composants comme : diodes, transistors, circuits intégrés.

1.1.4. Domaines de l'électricité

Les phénomènes électriques sont produits par la *charge électrique*. **On appelle charge élémentaire d'électricité la plus petite quantité d'électricité qui puisse exister.**

En fonction de l'état cinétique de la charge, on identifie deux domaines distincts de l'électricité : statique et dynamique.

L'électricité statique étudie les phénomènes électriques concernant la charge électrique en état de repos sur les objets. Un corps se charge d'électricité lorsqu'un déséquilibre apparaît entre le nombre d'électrons et de protons qu'il possède. Ce

déséquilibre se produit au niveau atomique, mais il est mis en évidence sur le corps. Un corps chargé présente soit un surplus soit un déficit d'électrons et le processus suivant auquel il arrive en cet état s'appelle électrisation.

La charge électrique est exprimée en *coulombs* et son symbole est **C**. Un coulomb représente la charge cumulée de $6,25 \times 10^{18}$ électrons.

La charge de l'électron vaut $-1,6 \times 10^{-19}$ C. De même toute charge électrique est un multiple entier de la charge élémentaire de l'électron qui est la plus petite charge identifiée dans l'univers.

L'existence des charges électriques a été mise en évidence à travers les forces spécifiques qui s'exercent entre celles-ci. Ces forces ont été étudiées par Charles-Auguste Coulomb et les résultats de ces expériences ont été synthétisés par la loi qui porte son nom. L'équation de cette loi est la suivante :

$$F = \frac{k \times Q_1 \times Q_2}{d^2}$$

dans laquelle on a :

F = la force d'attraction ou de répulsion exercée entre les deux charges ponctuelles en Newton;

Q_1 = la première charge en Coulomb;

Q_2 = la deuxième charge en Coulomb;

d = la distance séparant les deux charges en mètres;

k = constante de proportionnalité qui dépend des propriétés électriques du milieu où se trouvent les charges.

Les forces de répulsion s'exercent entre charges de même polarité pendant que les forces d'attraction s'exercent sur les charges de polarité opposée. L'orientation des forces colombiennes est donnée par la droite des 2 corps ponctuels.

La charge électrique modifie les propriétés de son environnement de manière qu'elle exerce des forces de nature électrique sur toute autre charge qui y serait placée. Ces forces peuvent déplacer cette autre charge tout en effectuant un travail mécanique. On introduit une grandeur physique appelée *potentiel électrique* afin de caractériser le champ électrique dans un point de la manière suivante : Soit une charge électrique ponctuelle et fixe dans l'espace, le potentiel électrique dans un point est le rapport entre le travail mécanique effectué pour déplacer une autre charge q du point considéré jusqu'à l'infini et la valeur de cette deuxième charge.

L'expression mathématique du potentiel électrique est :

$$V_A = \frac{W}{q}$$

V_A = le potentiel dans le point A

W = le travail mécanique des forces électriques pour déplacer la charge q du point A à l'infini.

Le potentiel électrique s'exprime en *Volts* (symbole **V**).

Une autre grandeur que nous rencontrerons très souvent c'est la *tension électrique*. Par définition la tension entre deux points est la différence des potentiels électriques correspondant aux deux points.

La tension électrique est appelée aussi différence de potentiel (d.d.p.) par des raisons évidentes ou encore force électromotrice (f.é.m.).

La relation mathématique de la tension est :

$$U_{AB} = V_A - V_B$$

U_{AB} = la tension (d.d.p.) entre les points A et B

V_A = le potentiel dans le point A

V_B = le potentiel dans le point B

L'unité de mesure de la tension est la même que celle du potentiel, le **Volt**.

L'électricité dynamique étudie les phénomènes concernant le déplacement de charges électriques dans un conducteur.

Dans le cas des conducteurs les électrons de valence sont assez éloignés par rapport au noyau de l'atome auquel ils appartiennent afin que les forces d'attraction qui s'exercent sur eux soient négligeables.

Lorsque le conducteur est soumis à une action externe qui se manifeste par des forces exercées sur les électrons dans un sens bien déterminé, ceux-ci acquièrent un déplacement ordonné qui détermine un transport de charges électriques. **Ce déplacement ordonné d'électrons à travers un corps conducteur définit le courant électrique.**

La grandeur qui caractérise le courant électrique s'appelle **l'intensité**. L'intensité s'exprime par le rapport entre la charge transportée par le courant à travers une section transversale du conducteur durant un certain temps et la valeur de cette période de temps.

La relation mathématique de l'intensité est :

$$I = \frac{Q}{t}$$

I = l'intensité du courant

Q = la charge transportée dans la période t par une section transversale du conducteur

L'intensité s'exprime en *ampères* (symbole **A**) et son instrument de mesure est *l'ampèremètre*.

L'apparition du *courant électrique* est liée à l'existence des forces (dans la plupart des cas électriques) qui s'exercent sur les électrons. Ces forces peuvent apparaître lorsqu'on réalise entre les extrémités du conducteur une *différence de potentiel*, autrement dit, si on applique une tension aux extrémités du conducteur.

Le *sens conventionnel* correspond au déplacement des charges positives, donc du pôle positif (+) au pôle négative (-). Dans les gaz et les liquides on trouve des porteurs de charges positifs ayant en effet ce déplacement. Dans le cas des conducteurs les seuls porteurs de charge sont les électrons. Leur déplacement se fait dans le sens contraire au sens conventionnel.

Le *sens électronique* c'est le sens réel de déplacement des électrons, du pôle négatif (-) vers le pôle positif (+).

1.2. Circuits électriques

1.2.1. Types de courant électrique

Le courant électrique représente le déplacement ordonné des porteurs de charges (les électrons dans le cas des conducteurs). La manière d'après laquelle ce déplacement se produit détermine le type du courant. Les principaux types de courant sont : le *courant continu*, le *courant alternatif* et le *courant pulsatif*.

Le **courant continu** est un courant de valeur et de sens demeurant constants. Les piles et les accumulateurs sont les principales sources de courant continu. La représentation graphique d'un courant continu est montrée sur la fig. 1-2.

Le **courant alternatif** est un courant dont la valeur et le sens changent périodiquement. Il passe d'une valeur maximale positive à une valeur négative maximale tout en passant par le zéro. Puis il retourne à zéro et à sa valeur positive maximale et le cycle recommencent (fig. 1-3). Il est produit de manière industrielle par les alternateurs.

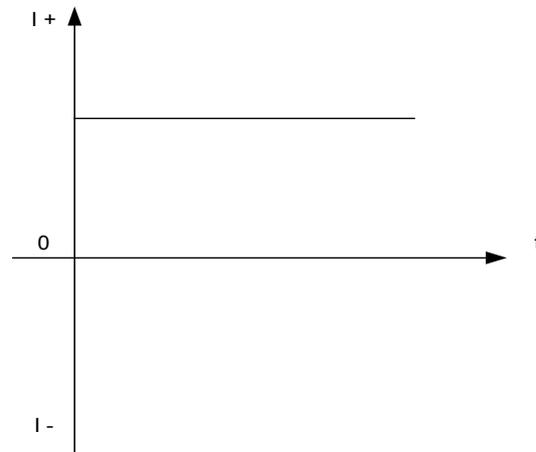


Fig. 1-2

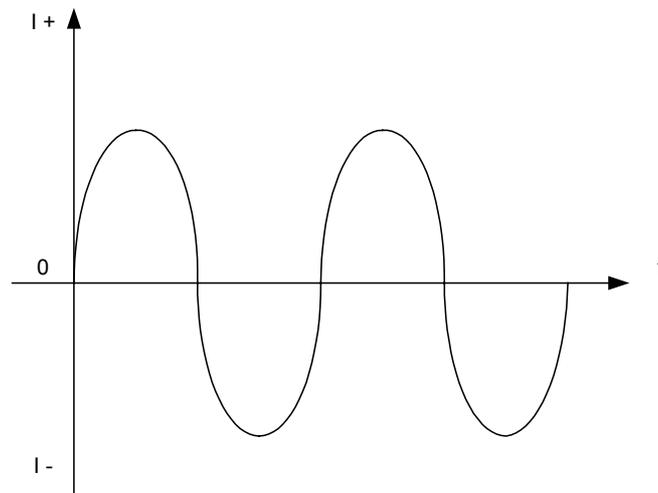


Fig. 1-3

Le **courant pulsatif** est un courant dont la valeur change périodiquement, mais dont le sens reste toujours le même (fig. 1-4). Le courant pulsatif est obtenu par le redressement du courant alternatif.

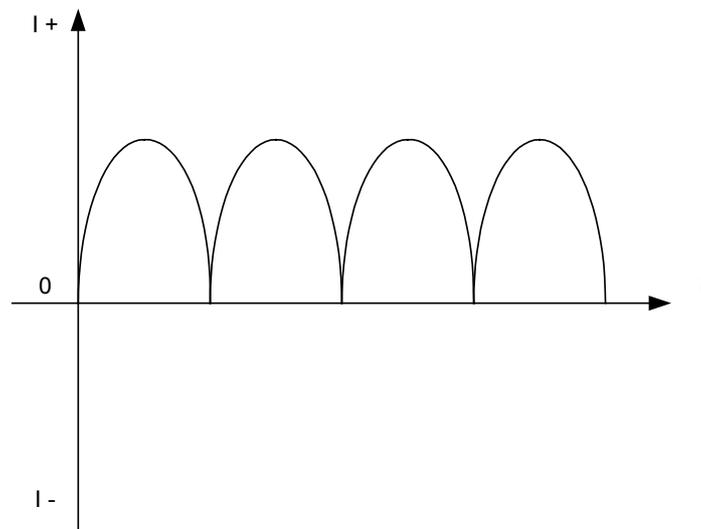


Fig. 1-4

1.2.2. Effets du courant électrique

Toute application du courant électrique utilise un de ses effets. Bien que nombreux et variés ils peuvent être regroupés en trois types : thermique, chimique et magnétique.

L'effet thermique consiste en la production de la chaleur par un courant dans le conducteur traversé par celui-là (effet Joule). Cet effet est utilisé dans certains appareils électroménagers (chaufferettes, fer à repasser, cuisinières etc.) et dans la production de la lumière dans les ampoules électriques (le filament porté à la température d'incandescence émet de la lumière). Il s'avère fort nuisible dans la plus grande partie des cas en étant la cause de la surchauffe des conducteurs.

L'effet chimique est caractéristique seulement au courant continu et consiste en la décomposition par celui-ci des différents composants chimiques (l'électrolyse). Cet effet a beaucoup d'applications parmi lesquelles on peut citer : la galvanoplastie (plaquage avec de l'or, de l'argent ou du chrome), le raffinage de métaux légers tels que l'aluminium, le magnésium, le cuivre.

L'**effet magnétique** consiste en la production d'un champ magnétique autour d'un conducteur parcouru par un courant électrique. La plupart des appareils électriques, tels que relais, transformateurs, machines tournantes, mettent à profit cet effet du courant. Comme conséquences nuisibles de cet effet on peut mentionner l'interférence sur les ondes radios observée à la proximité d'une ligne de haute tension.

1.3. Circuits à courant continu

Les *appareils* électriques, électroniques ou électromécaniques sont tous des *consommateurs d'énergie électrique* qui leur est fournie dans le cadre d'un *circuit électrique*.

Un **circuit électrique** est composé :

- d'un générateur de force électromotrice (source de tension) ;
- d'un ou plusieurs récepteurs d'énergie électrique ;
- d'un système de transmission de l'énergie électrique ;
- d'accessoires pour la commande ou la protection du circuit.

Le *système de transmission* de l'énergie électrique est constitué par l'ensemble d'éléments conducteurs servant au transport du courant électrique des générateurs électriques aux récepteurs. Ce système est constitué par les conducteurs, les câbles et les raccords.

La *source de tension* est un appareil qui fournit la force électromotrice nécessaire pour engendrer le courant électrique dans un circuit électrique.

Les sources de tension en courant continu peuvent être une pile, un accumulateur, une pile solaire, une dynamo, un thermocouple ou un dispositif piézo-électrique.

La **pile** est un générateur électrique qui transforme directement l'énergie chimique en énergie électrique. Elle est constituée par deux métaux différents immergés

dans une solution acide appelée électrolyte. Actuellement l'électrolyte n'est plus liquide mais plutôt pâteux et les piles s'appellent sèches.

La tension des piles ne dépasse pas 1,6 V. Lorsqu'on groupe de manière convenable plusieurs piles on peut obtenir des tensions plus élevées.

Les piles ont des applications multiples. Les piles au carbone – zinc sont utilisées dans les jouets, lampes de poches, etc. Pour les appareils photo ou les petits moteurs sont préférées les piles alcalino-manganèse en raison de leur longue vie. Grâce à leur petite taille et à leur tension constante, les piles à mercure et à argent sont utilisées pour les montres électroniques, les prothèses auditives.

Les **accumulateurs**, appelés aussi piles secondaires, diffèrent des piles primaires dans le sens que leur processus est réversible. Ainsi un accumulateur complètement déchargé peut être rechargé, en faisant circuler un courant inverse, à l'aide d'une source extérieure de tension appelée chargeur, ce qui conduit à reconstituer ses électrodes. C'est un grand avantage qui rend les accumulateurs utilisables dans beaucoup de domaines comme sources d'énergie auxiliaire ou d'urgence, ou encore comme sources dans les appareils mobiles comme les automobiles, les voitures électriques, les avions.

Selon l'application on distingue deux types d'accumulateurs :

- L'accumulateur au plomb se caractérise par une grande capacité électrique et une durée de service en quelque sorte réduite. Il est utilisé pour les appareils mobiles.
- L'accumulateur au nickel - cadmium peut fournir de grandes puissances pendant de courtes périodes de temps. Il est très fiable et peut durer plus de 15 ans sans entretien ce qui le rend convenable comme source d'énergie auxiliaire ou d'urgence.

Les batteries sont des groupements de piles primaires ou secondaires raccordées ensembles pour fournir une tension plus élevée ou une capacité énergétique plus grande. Ce regroupement est enfermé dans un boîtier.

Les symboles normalisés utilisés pour les piles et pour les batteries sont représentés sur la fig. 1-5.

Dans les deux symboles, le trait court représente la borne négative alors que le trait long désigne la borne positive.

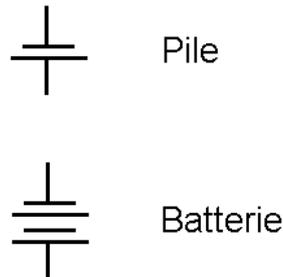


Fig. 1-5

1.3.1. Résistance

Les résistances sont des *dipôles passifs* dans lesquels toute l'énergie électrique mise en jeu est convertie en chaleur par effet Joule.

D'après leur construction on distingue :

- des résistances bobinées;
- des résistances au carbone.

Les *résistances bobinées* sont fabriquées en enroulant un fil métallique ou un ruban métallique autour d'un noyau isolant. La valeur de la résistance est déterminée par la longueur du fil et par la résistivité du matériel.

Le domaine des valeurs des résistances bobinées commence de quelques ohms et arrive jusqu'à plusieurs milliers d'ohms. La puissance de ces résistances, c'est-à-dire la quantité de chaleur qu'elles peuvent évacuer sans subir de dommage, se situe entre cinq et plusieurs centaines de watts.

Les *résistances au carbone* sont réalisées de particules de carbone au graphite mélangé à un matériel isolant en poudre (fig. 1-6). La proportion de ces éléments dans le mélange détermine la valeur de la résistance. Quant aux valeurs de celle-ci, on les retrouve de 1 à 22 000 000 ohm. Les valeurs de la puissance des résistances au carbone sont normalisées dans les cadres de : 0,1 W; 0,125 W; 0,25 W; 0,5 W; 1 W et 2 W.



Fig. 1-6

Les résistances présentées auparavant se caractérisent par la valeur fixe de leur résistance. La technique moderne emploie fréquemment des résistances variables, pour lesquelles on peut faire varier la valeur de leur résistance. Selon leur usage, elles sont appelées :

- rhéostats;
- ou potentiomètres.

Les *rhéostats* sont des résistances variables utilisées pour régler le courant dans un circuit. Leur gabarit est supérieur à celui des potentiomètres et leur diamètre peut atteindre 150, voire 200 mm. L'élément résistif d'un rhéostat est représenté par un seul fil. Les rhéostats sont munis de deux ou trois bornes. L'une d'elles est raccordée au contact mobile et l'autre (les autres) à une extrémité (aux extrémités) de l'élément résistif.

Les *potentiomètres* sont des résistances variables utilisées pour le réglage de la tension d'un circuit. Ils ont trois bornes et son diamètre ne dépassent pas 12 mm. L'élément résistif est réalisé en carbone (fig. 1-7).

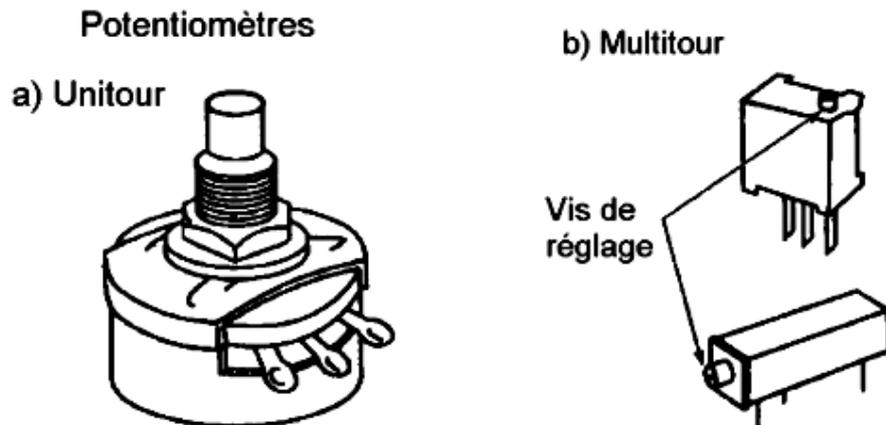


Fig. 1-7

1.3.2. Condensateur

Les condensateurs sont des dispositifs capables d'accumuler de l'énergie électrique lorsqu'ils sont chargés.

La propriété des condensateurs, une fois chargés, d'accumuler de l'énergie électrique dans leurs champs électriques est exprimée par une grandeur caractéristique appelée **capacité**. Le symbole de la capacité est C et son unité de mesure est le farad, symbolisé par la lettre F. Le farad étant une unité trop grande il s'avère nécessaire d'utiliser ses sous - multiples : le microfarad (μF) et le picofarad (pF).

Un condensateur est constitué de deux plaques métalliques séparées par un isolant, aussi appelé diélectrique (fig. 1-8).

La capacité d'un condensateur est déterminée par les facteurs suivants :

- la surface des plaques;
- la distance entre les plaques;
- la nature du diélectrique utilisé.

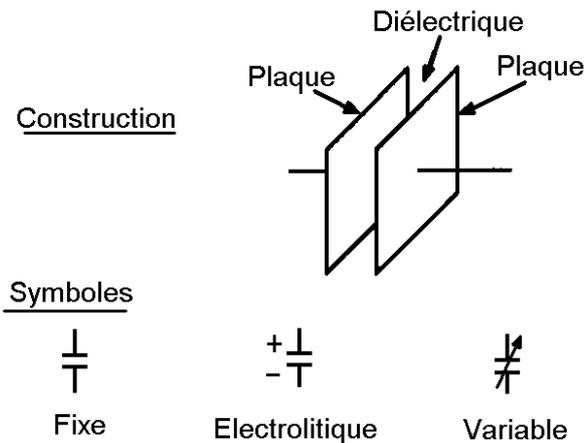


Fig. 1-8

Les condensateurs sont classés généralement d'après le type du diélectrique utilisé. Il existe ainsi des *condensateurs à l'air, au papier, à la céramique* etc. Les condensateurs sont réalisés sous diverses formes : *tubulaire, plate, disque* etc. En plus tous les condensateurs sont dans une des deux catégories suivantes : *fixes et variables*.

Les condensateurs appartiennent aussi à une des deux groupes suivants : **polarisé** ou **non polarisé**. Les condensateurs au papier, au mica ou à la céramique entrent dans le groupe des condensateurs **non polarisés**, cela veut dire qu'ils n'ont pas une polarité assignée à leurs électrodes.

Dans le groupe des condensateurs **polarisés**, on trouve les condensateurs électrolytiques. Celui doit recevoir un potentiel plus positif sur une électrode que sur l'autre, autrement il sera détruit. Une des électrodes est clairement identifiée.

Les *principaux paramètres* des condensateurs sont :

- la **tension nominale**, qui indique la valeur maximum de la différence de potentiel que l'on peut appliquer à ses bornes sans causer le claquage de son diélectrique.
- le **coefficient de température**, qui exprime le taux de variation de la capacité avec la température.

Dans un condensateur plane on peut admettre que le champ électrostatique est uniforme ($E = U / e$). Il existe une **valeur maximale E_{\max} du module E** , appelé **champ de claquage ou champ disruptif**, pour laquelle il y a arrachement des électrons du réseau cristallin. L'isolant devient alors brusquement conducteur et le condensateur est détruit. Ce champ disruptif dépend évidemment de la nature du diélectrique. Il en résulte une limitation de la tension de charge U_c qui est mentionnée sur les condensateurs du commerce ($U_{\max} = E_{\max} \cdot e$).

1.3.3. Inductance

L'*inductance* est définie comme la propriété d'un circuit de s'opposer à toute variation du courant qui le traverse. Le composant fabriqué de manière à posséder la propriété d'inductance s'appelle *inductance*, *bobine* ou encore *bobine d'inductance* ou *self* (fig. 1-9).

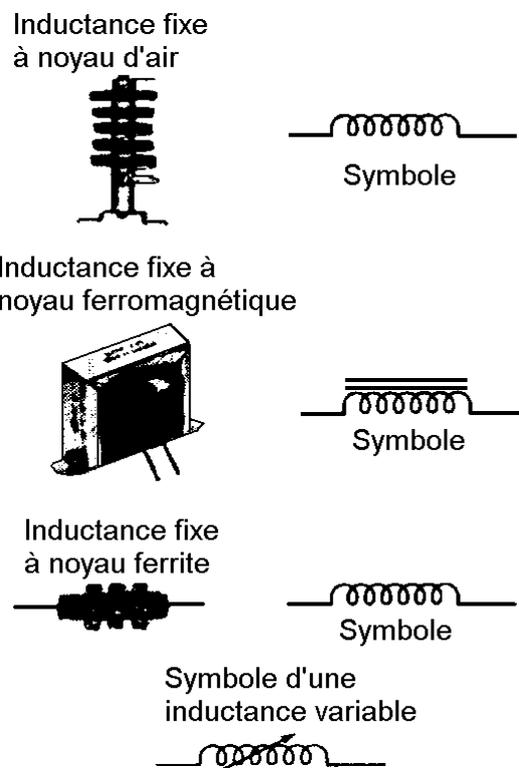


Fig. 1-9

La valeur d'inductance d'une bobine dépend des facteurs suivants :

- dimensions et forme de la bobine;
- nombre de spires;
- nombre de couches de fil;
- type de matériel du noyau .

1.4. Lois fondamentales

1.4.1. Loi d'Ohm

La loi découverte par le physicien allemand Ohm au début du XIX-ème siècle, plus précisément en 1828, est la plus utilisée dans la résolution des problèmes en électricité et en électronique. Elle vise la relation existante entre les trois paramètres électriques d'un circuit ou composant : tension, courant et résistance.

Georg Simon Ohm a trouvé suite à ses recherches sur les éléments de Volta qu'il existe une relation précise entre les trois paramètres électriques : tension, courant et résistance. Si on maintient la résistance du circuit fixe, l'augmentation de la tension de la source se traduit par une augmentation du courant dans le circuit, à cause de la « pression » accrue exercée sur les électrons.

La synthèse des observations faites auparavant est présentée par la formule suivante :

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

Ou R = la résistance exprimée en ohms (Ω)

I = le courant exprimé en ampères (A),

U = la tension exprimée en volts (V),

L'énoncé de cette loi est donc : **On appelle une résistance idéale le quotient R de la tension U aux bornes de cette résistance par le courant I qui la parcourt.**

Dans la pratique on utilise souvent aussi les deux autres expressions :

$$U = R . I$$

et

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

1.4.2. Loi des nœuds

Dans un circuit à plusieurs branches, le courant total fourni par la source est égal à la somme des courants dans chaque branche du circuit :

$$I_t = I_1 + I_2 + I_3 \dots + I_n$$

La loi du nœud (fig. 1-10), formulée par *Kirchhoff*, démontre cette caractéristique des circuits. L'énoncé de la loi du nœud est le suivant : **La somme algébrique des courants arrivant (+) et sortant (-) à un nœud d'un circuit est égale à zéro.**

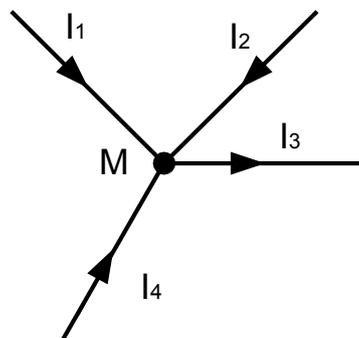


Fig. 1-10

Dans le nœud M :

$$I_1 + I_2 - I_3 + I_4 = 0$$

$$I_2 = -I_1 + I_3 - I_4$$

1.4.3. Loi des mailles

Dans un circuit série, la somme des chutes de tensions aux bornes des composants est égale à la tension de la source.

$$E = U_1 + U_2 + U_3 \dots + U_n$$

La loi de maille (fig. 1-11), établie par *Kirchhoff*, est en relation avec les tensions. L'énoncé de cette loi est le suivant: **La somme algébrique des différences de potentiel dans une boucle fermée est égale à zéro.**

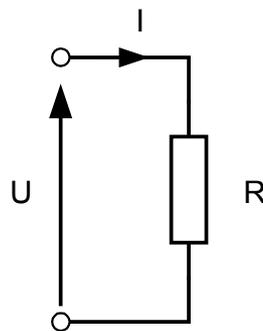


Fig. 1-11

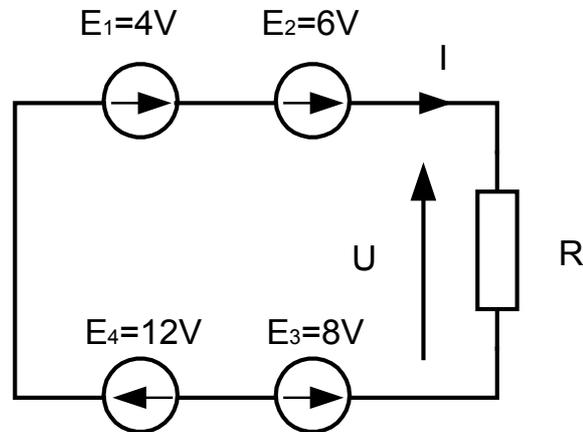
Lorsqu'on parle de somme algébrique il faut établir la convention d'après laquelle on attribue le signe aux différences de potentiel et aussi le sens dans lequel on effectue la somme. Ainsi la polarité d'une tension aux bornes d'une résistance est la suivante : la borne d'entrée du courant a un potentiel supérieur à celle de sortie. Lorsqu'on applique la loi de maille, il faut parcourir la boucle fermée à partir d'un point dans un sens préétabli.

On peut appliquer la loi de maille de Kirchhoff dans l'exemple suivant (fig. 1-12), ce qui donne :

$$E1 + E2 - E3 - U + E4 = 0$$

$$U = E1 + E2 - E3 + E4$$

$$U = 4 \text{ V} + 6\text{V} - 8\text{V} + 12\text{V} = 14\text{V}$$



1.5. Associations des récepteurs

Afin de pouvoir utiliser les récepteurs d'énergie électrique, il faut les brancher dans des circuits électriques. Connaissant les différents composants de circuit, passifs et actifs, le raccord entre ces composants conduit à la réalisation des circuits électriques, ce qui permet la circulation du courant et la consommation de l'énergie électrique.

1.5.1. Montage en série

On dit que les composants d'un circuit électrique (ou encore des appareils, des dispositifs, des récepteurs électriques) sont branchés **en série** lorsqu'ils sont connectés dans un *ordre successif*, n'offrant qu'un seul chemin au passage du courant.

Pour un groupement série la borne d'un composant est connectée avec la borne du suivant, afin de réaliser une chaîne (fig. 1-12). Un groupement série est alimenté par les deux bornes qui restent non occupées et représente l'ensemble.

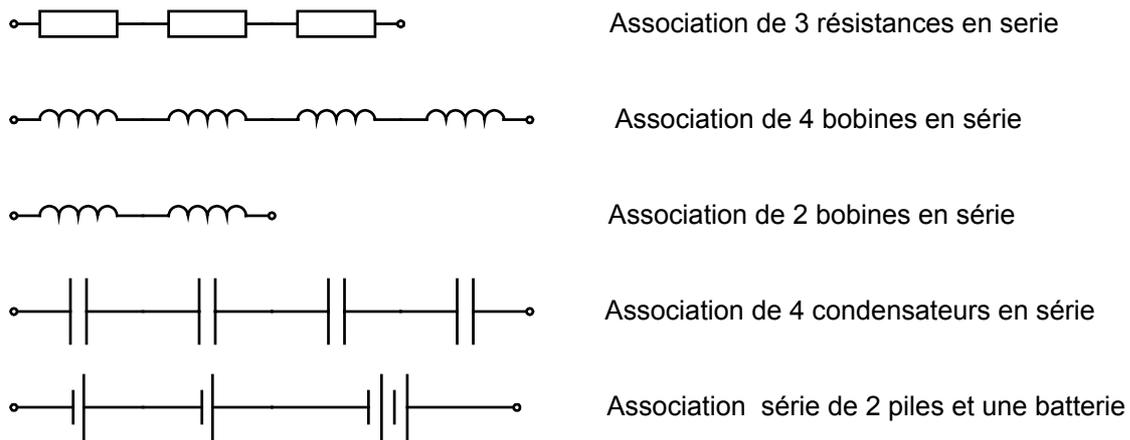


Fig. 1-12

La *tension* d'alimentation du groupement se distribue sur tous les composants de manière que la somme des tensions à leurs bornes est égale à celle d'alimentation (fig. 1-13).

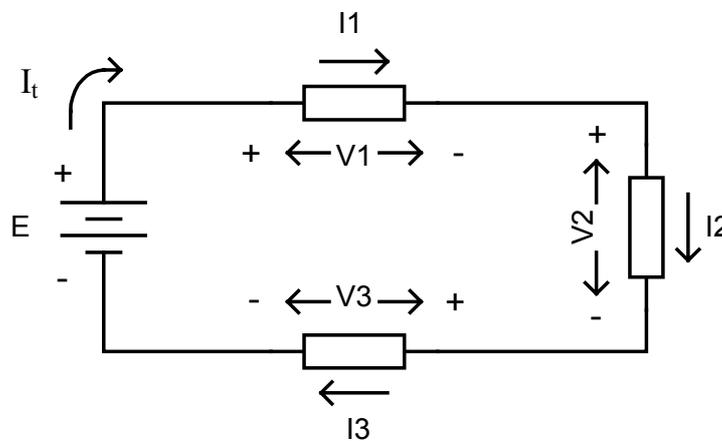


Fig. 1-13

Le *courant* dans tous les composants du groupement série est le même, ce qui est évident du fait qu'il n'y a qu'un seul chemin pour le passage du courant.

Remarque : Le groupement série présente un désavantage assez important - si l'un des composants du circuit s'ouvre ou se détériore, le courant ne peut plus circuler.

Si on considère un groupement série de résistances, la résistance de l'ensemble que l'on appelle **résistance équivalente** (R_{eq}), est égale à la somme des résistances du groupement série :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

Dans le cas des inductances l'équivalence d'un groupement série est similaire à celle des résistances, donc **l'inductance équivalente** (L_{eq}) d'un ensemble d'inductances branchées en série est égale à la somme des inductances du groupement :

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n$$

Le branchement des condensateurs en série revient à une augmentation de l'épaisseur de l'isolant, ce qui a pour effet la diminution de la capacité équivalente. La **capacité équivalente** (C_{eq}) d'un groupement série de condensateurs est calculée avec la formule suivante :

$$1/C_{eq} = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 + \dots + 1/C_n$$

1.5.2. Montage en parallèle

On dit que les composants d'un circuit électrique (ou encore des appareils, dispositifs, récepteurs électriques) sont branchés **en parallèle** lorsque leurs bornes sont connectées aux deux mêmes points (fig. 1-14).

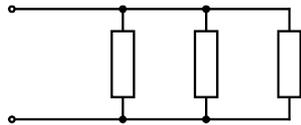
On trouve aux bornes de chacun des composants la *même différence de potentiel* ce qui est la *tension d'alimentation* du groupement.

$$E = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_n$$

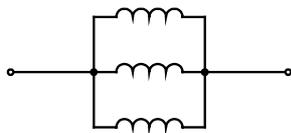
La *somme des courants* circulant dans les composants du groupement parallèle est égale au *courant d'entrée* dans le groupement (soit le courant débité par la source). Cette remarque qui tient de l'évidence car le courant qui entre dans le groupement

parallèle se ramifie pour emprunter tous les chemins qui lui sont offerts par les composants du groupement.

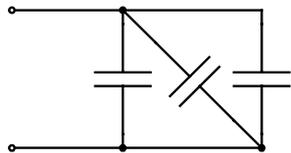
$$I_t = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$$



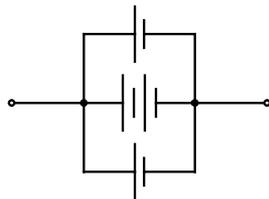
Association de 3 résistances en parallèle



Association de 3 bobines en parallèle



Association de 3 condensateurs en parallèle



Association de 2 piles et une batterie en parallèle

Fig. 1-14

Un branchement parallèle offre plusieurs chemins à la circulation du courant. C'est pourquoi la résistance équivalente du groupement est toujours inférieure à la plus petite des résistances qui le compose.

Pour déterminer la valeur de la **résistance équivalente** d'un groupement parallèle, on a recours à une nouvelle grandeur appelée **conductance (G)**, qui n'est que l'inverse de la résistance. Autant que la résistance exprime la propriété du matériel de s'opposer au passage du courant, la conductivité exprime la facilité à laisser le courant à passer à travers celui-ci. La conductance s'exprime en *siemens* (S) et correspond à l'équation suivante :

$$G = 1/R$$

La conductance équivalente G_{eq} d'un groupement parallèle de résistances est égale à la somme des conductances des résistances qui le composent. L'équation qui illustre le groupement parallèle est :

$$G_{eq} = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n$$

Quant à la résistance équivalente elle n'est que l'inverse de la conductance équivalente :

$$R_{eq} = 1/G_{eq}$$

On peut exprimer directement la résistance équivalente du groupement en fonction des résistances qui le composent. On trouve ainsi l'équation suivante :

$$1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \dots + 1/R_n$$

Pour le groupement de deux résistances on emploie souvent la formule qui exprime directement la valeur de la résistance équivalente, ce qui permet de simplifier les calculs:

$$R_{eq} = R_1 \times R_2 / (R_1 + R_2)$$

Remarque : Lorsque les résistances du groupement sont de valeur égale, la résistance équivalente sera égale à la valeur d'une résistance divisée par le nombre de résistances du circuit.

Comme pour les résistances, l'**inductance équivalente** d'un groupement parallèle d'inductances est calculée par la formule des inverses. L'équation qui exprime le groupement parallèle des inductances est :

$$1/L_{eq} = 1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3 + \dots + 1/L_n$$

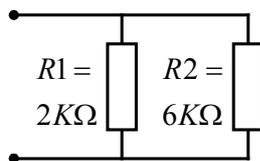
Lorsqu'on branche des condensateurs en parallèle on augmente la surface plane, ce qui a pour effet une augmentation de la capacité de l'ensemble. Ainsi la capacité d'un groupement parallèle est supérieure à la plus grande capacité qui compose l'ensemble.

L'équation de la **capacité équivalente** du groupement parallèle des condensateurs est la suivante :

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$$

Exercice:

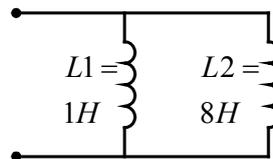
Calcul de la résistance, de l'inductance et de la capacité équivalente dans le cas simple d'un groupement parallèle de deux éléments (fig. 1-15).



$$R_{eq} = \frac{R1 \times R2}{R1 + R2}$$

$$= \frac{2K\Omega * 6K\Omega}{8K\Omega}$$

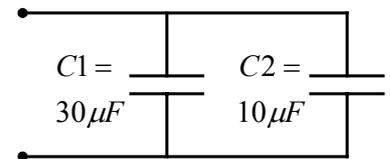
$$R_{eq} = 1500\Omega$$



$$L_{eq} = \frac{L1 * L2}{L1 + L2}$$

$$= \frac{1H * 8H}{9H}$$

$$L_{eq} = 889mH$$



$$C_{eq} = C1 + C2$$

$$= 30\mu F + 10\mu F$$

$$C_{eq} = 40\mu F$$

Fig. 1-15

1.5.3. Montage mixte

Un circuit mixte est réalisé de composants dont certains sont reliés en série tandis que d'autres sont associés en parallèle. Ainsi on peut dire qu'un circuit mixte comporte des groupements séries de composants associés en parallèle et des groupements parallèles de composants associés en série (fig. 1-16).

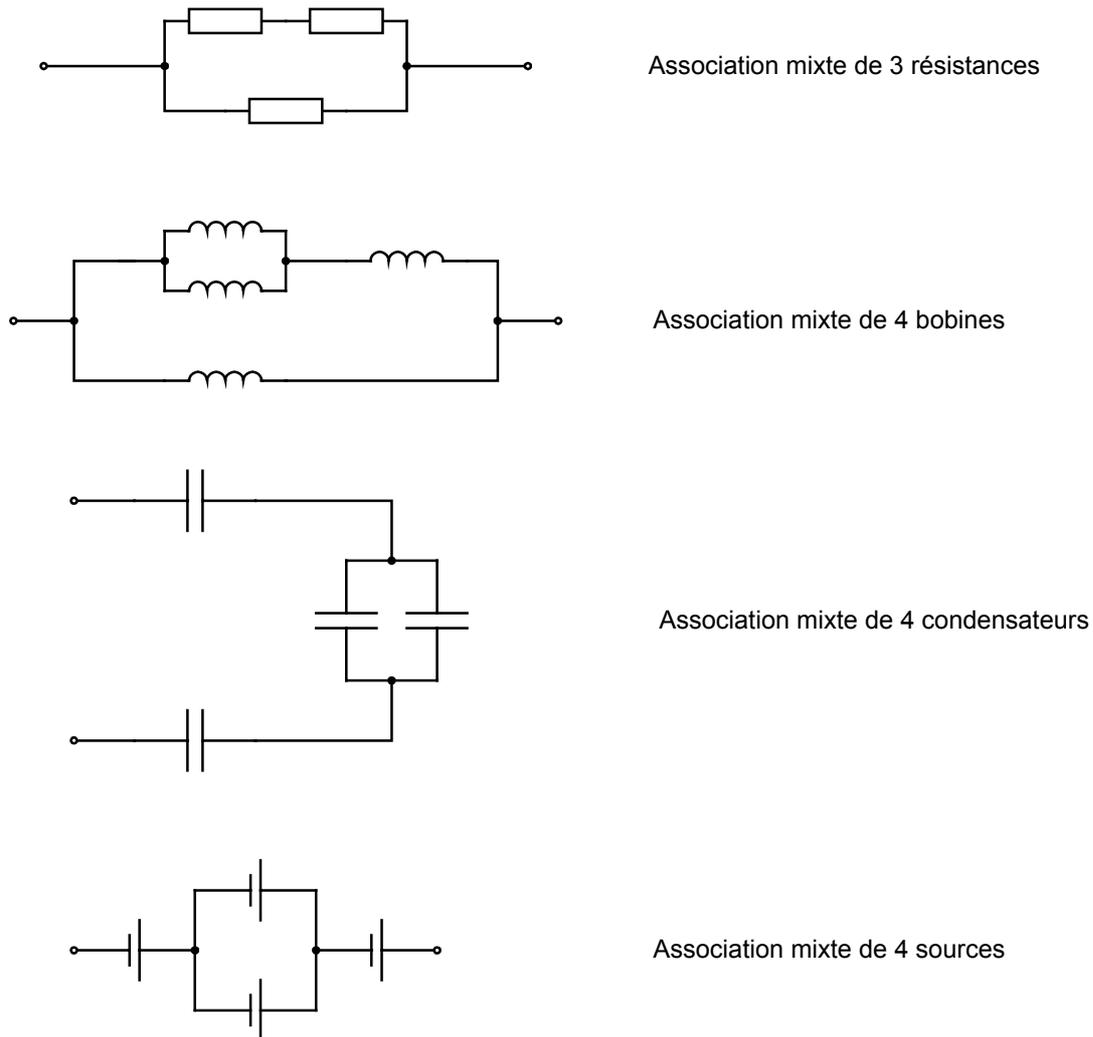


Fig. 1-16

L'étude d'un circuit mixte s'appuie sur les notions relatives aux montages en série et parallèle.

1.5.4. Groupement des piles

Une pile est caractérisée par sa force électromotrice (E) et par sa résistance interne (r). On réalise un groupement de piles lorsqu'on désire à obtenir une tension d'alimentation supérieure ou une capacité énergétique plus grande.

Deux sources associées en série admettent une source équivalente : la force électromotrice de la source équivalente vaut la somme des forces électromotrices des sources associées et sa résistance interne est égale à la somme des résistances interne de celles-ci.

Les relations mathématiques de cette équivalence sont les suivantes :

$$\begin{array}{ll} \mathbf{E_{eq} = E_1 + E_2} & \mathbf{pour\ la\ f.\acute{e}.m.} \\ \mathbf{r_{eq} = r_1 + r_2} & \mathbf{pour\ la\ r\acute{e}sistance\ interne} \end{array}$$

Remarque : Ce résultat peut être généralisé pour un nombre quelconque de sources.

Dans le cas d'un groupement série de *sources identiques* (de caractéristiques E et r), la force électromotrice (E_{eq}) et la résistance interne (r_{eq}) de l'ensemble vaut la force électromotrice d'une source multipliée par le nombre de sources du groupement, respectivement la résistance interne multipliée par le même nombre.

Donc :

$$\begin{array}{ll} \mathbf{E_{eq} = n \times E} & \mathbf{pour\ la\ f.\acute{e}.m.} \\ \mathbf{r_{eq} = n \times r} & \mathbf{pour\ la\ r\acute{e}sistance\ interne} \end{array}$$

Bien qu'il existe les relations d'équivalence d'un groupement parallèle de sources différentes, nous allons présenter seulement le cas concernant les sources identiques, d'ailleurs le plus souvent rencontré dans la pratique.

Dans le cas d'un groupement parallèle de sources identiques (de caractéristiques E et r), la force électromotrice (E_{eq}) et la résistance interne (r_{eq}) de l'ensemble vaut la force électromotrice d'une source, respectivement la résistance interne divisée par le même nombre. Donc :

$$\begin{array}{ll} \mathbf{E_{eq} = E} & \mathbf{pour\ la\ f.e.m.} \\ \mathbf{r_{eq} = r/n} & \mathbf{pour\ la\ r\acute{e}sistance\ interne} \end{array}$$

1.6. Notions d'énergie et de puissance

1.6.1. Energie

On appelle *énergie* toute cause capable de produire du travail. Les *différentes formes d'énergie* sont :

- *Mécanique*: l'énergie fournit par un corps en mouvement (énergie cinétique, énergie potentielle) ;
- *Thermique* ;
- *Chimique* ;
- *Electrique* ;
- *Autres*: solaire, nucléaire, éolienne, etc.

Postulat de conservation de l'énergie: L'énergie ne se crée pas et ne se perd pas, elle se conserve en quantité et se transforme d'une forme en d'autre.

Les unités de mesure d'énergie sont les mêmes que les unités de mesure de travail :

1 Joules (J) - l'unité très petite et dans la pratique on utilise

1 Watt-heure (Wh) = 3600 J

1 KWh = 1000 Wh = 3600000 J

1.6.2. Puissance

Un récepteur électrique est un dispositif destiné à consommer de l'énergie électrique. Sa capacité de consommer de l'énergie électrique est caractérisée par un quatrième paramètre électrique très important, appelé la **puissance électrique**. La puissance électrique est exprimée par le rapport entre l'énergie électrique consommée par le récepteur dans un temps déterminé et la valeur de cette même durée. Donc, la puissance est l'énergie fournit en unité de temps (1 s).

La puissance est symbolisée par la lettre **P** et son unité de mesure est le watt (**W**).

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ Joules} / 1 \text{ s}$$

$$W = P \cdot t$$

$$1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s}$$

$$P = W / t$$

1.6.3. Loi de Joule

Le savant anglais James Joule a déterminé le premier l'expression mathématique de la transformation de l'énergie électrique en énergie thermique: une résistance R parcourue par un courant I et soumise à une d.d.p. (tension) U, consomme une énergie qui est dissipée sous forme de chaleur.

$$W = Q \cdot U$$

W - en Joules (J), mais:

$$Q = I \cdot t$$

d'où:

$$W = U \cdot I \cdot t$$

I - en Ampères (A)

U - en Volts (V)

t - en secondes (s)

$$U = I \cdot R$$

$$W = R \cdot I^2 \cdot t$$

d'où: 1 cal = 4,18 J

L'expression de la puissance prend la forme :

$$P = R \times I^2$$

Si dans la formule de la puissance ci-dessus on remplace la tension U par son équivalence fournie par la loi d'Ohm, on obtient :

$$P = U \times I$$

$$P = U \times \frac{U}{R}$$

$$P = \frac{U^2}{R}$$

On détermine la puissance débitée par la source dans le circuit, et donc disponible à la consommation des récepteurs contenus par celui-ci, comme **puissance disponible** :

$$P = E \times I$$

L'énergie électrique consommée dans les récepteurs provient d'une source. Le récepteur est caractérisé par une résistance. La **puissance dissipée** par une résistance est proportionnelle au courant qui la parcourt et à la tension à ses bornes, ce qui s'exprime par la formule mathématique suivante :

$$P = U \times I$$

Pour un groupement des récepteurs en série on peut écrire :

$$P_1 = U_1 \cdot I \quad P_2 = U_2 \cdot I \quad P_3 = U_3 \cdot I$$

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = U_1 \cdot I + U_2 \cdot I + U_3 \cdot I = (U_1 + U_2 + U_3) \cdot I$$

$$P = U \cdot I$$

Pour un groupement des récepteurs en série on peut écrire :

$$\begin{aligned} P_1 &= I_1 \cdot U & P &= P_1 + P_2 + P_3 \\ P_2 &= I_2 \cdot U & P &= I_1 \cdot U + I_2 \cdot U + I_3 \cdot U \\ P_3 &= I_3 \cdot U & P &= (I_1 + I_2 + I_3) \cdot U \end{aligned}$$

$$P = U \cdot I$$

La puissance absorbée par un groupement de récepteurs est toujours égale à la somme des puissances absorbées par chacun des récepteurs, quelque soit le mode de groupement (le théorème de Boucherot).

1.7. Circuit à courant alternatif

1.7.1. Types de courants alternatifs et leurs caractéristiques principales

Ce sont des courants qui changent de sens dans le temps. Les courants alternatifs les plus connus sont (fig. 1-17) :

- *Sinusoïdaux* (se sont les plus utilisés);
- *Carrés*;
- *En dent de scie*.

Les courants alternatifs (et cela est valable pour les tension alternatives ou n'importe quel autre signal alternatif) sont périodiques.

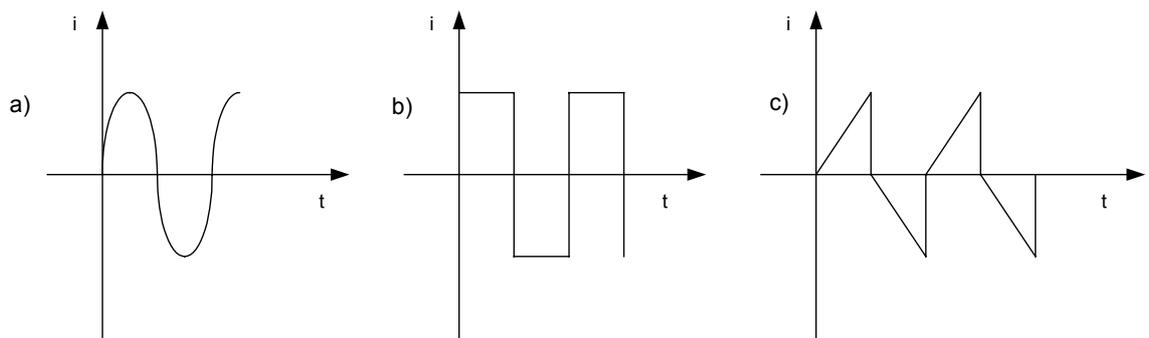


Fig. 1-17

Les caractéristiques d'un courant alternatif sinusoïdal sont :

- *La période* : représente la durée minimum après laquelle une grandeur alternative reprend les mêmes valeurs. La période est exprimée en seconde et on la symbolise par T .
- *La fréquence* : représente le nombre de périodes par seconde. On désigne la fréquence par f et on l'exprime en hertz (Hz).

La relation entre la période et la fréquence d'un courant alternatif ou n'importe quel autre signal alternatif est :

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{et} \quad 1\text{Hz} = \frac{1}{\text{s}}$$

La fréquence normalisée d'un courant alternatif est de 50 Hz. Un courant alternatif présente deux alternances : une alternance positive, représentée au-dessus de l'axe du temps, qui correspond à un certain sens du courant, une alternance négative, figurée au-dessous de l'axe horizontal, qui correspond au sens opposé de circulation du courant. Au cours d'une alternance le sens du courant alternatif reste le même.

- *L'amplitude* d'un courant alternatif est la plus grande valeur atteinte par le courant au cours d'une période. Elle peut être positive ou négative.

Un courant alternatif sinusoïdal est caractérisé par une variation sinusoïdale en fonction du temps (fig. 1-18).

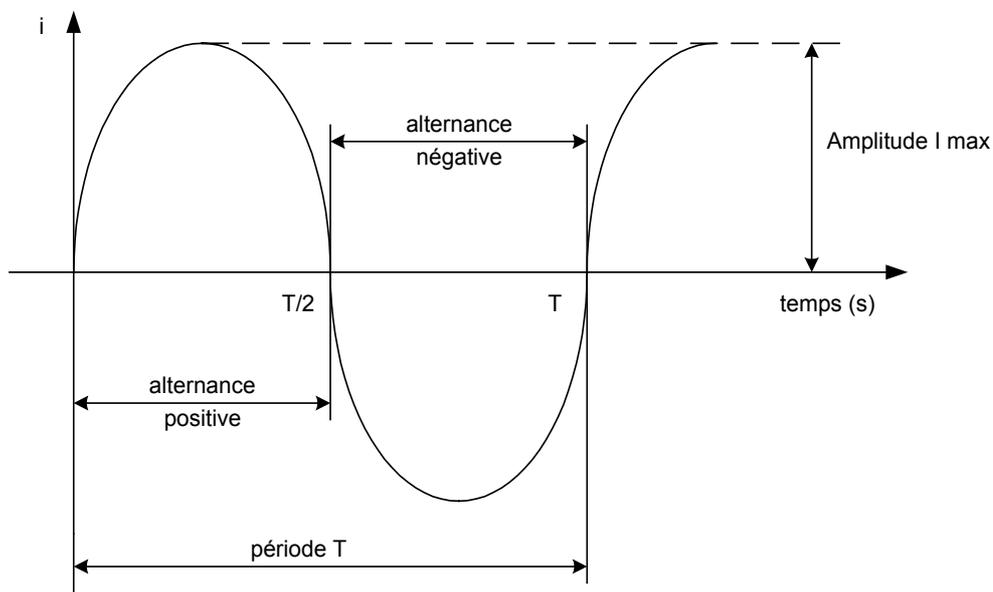


Fig. 1-18

Soit I_{\max} l'amplitude du courant alternatif sinusoïdal, on définit pour toute onde sinusoïdale une valeur efficace :

$$I = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$$

La **valeur efficace** I d'un courant alternatif est égale à la valeur du courant continu qui, dans le même circuit, dégage la même puissance calorifique (la même quantité de chaleur. C'est la **valeur mesurable** du courant alternatif qui est représentative des actions du courant et qui peut entrer dans les calculs.

La tension est la cause du courant dans un circuit : celle qui y engendre un courant alternatif est donc sinusoïdale et de même fréquence que le courant (fig. 1-19). Elle est caractérisée par : sa valeur maximale U_{\max} , sa valeur efficace $U = U_{\max} / \sqrt{2}$ et sa fréquence f .

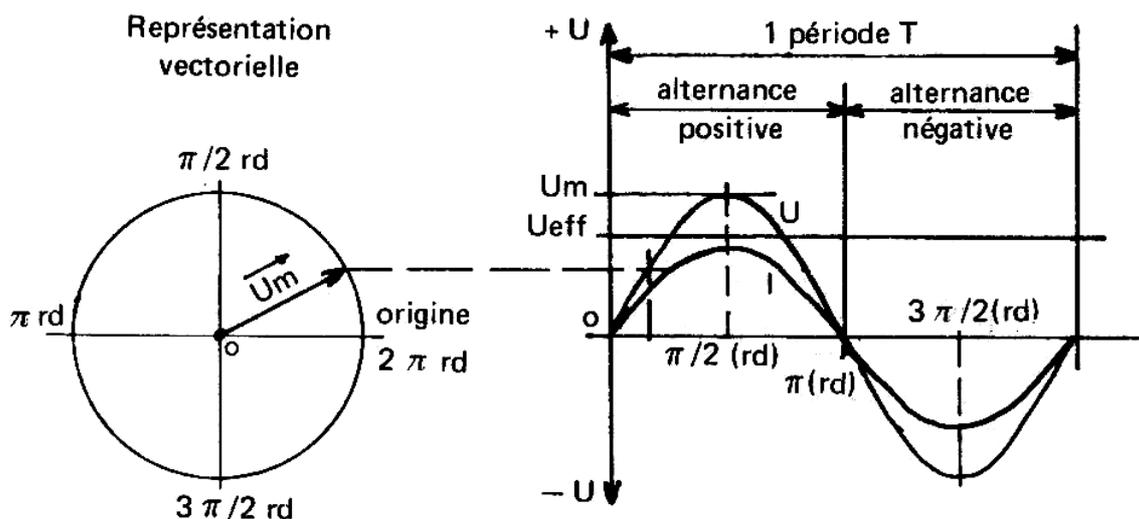


Fig. 1-19

Le courant I ici est en phase avec la tension U , donc ils ont la même origine et ils sont positifs ou négatifs simultanément : cas des circuits qui ne comportent que de résistance.

Quand les circuits comportent et d'autres éléments – inductances ou capacités – les deux grandeurs U et I n'ont plus la même origine et ne se développent pas en même temps (fig. 1-20).

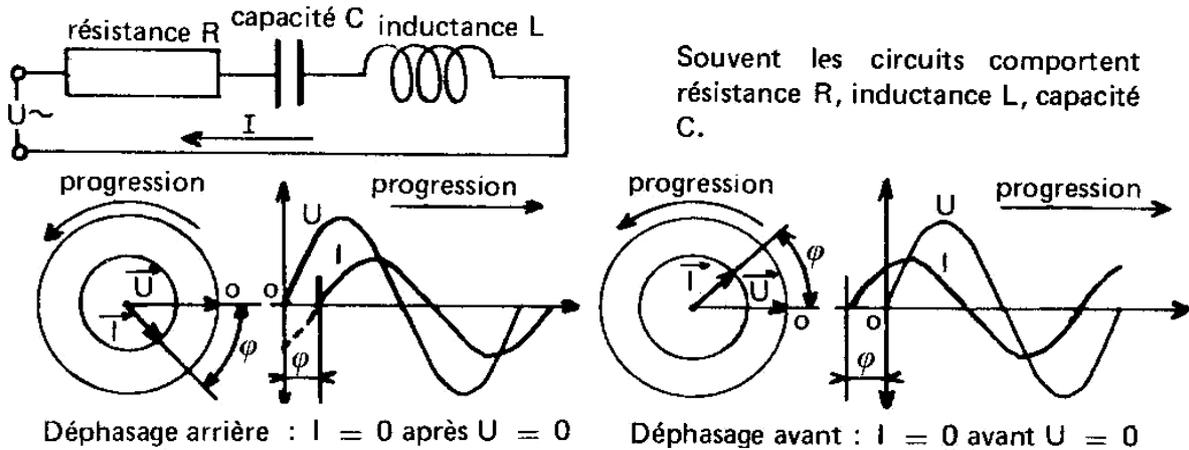


Fig. 1-20

Le physicien français Fresnel a proposé une représentation vectorielle des grandeurs sinusoïdales de la même fréquence : le module du vecteur est proportionnel à la valeur efficace de la grandeur et l'orientation du vecteur est définie par rapport à une axe de référence des phases et elle garde le sens trigonométrique positif (fig. 1-21).

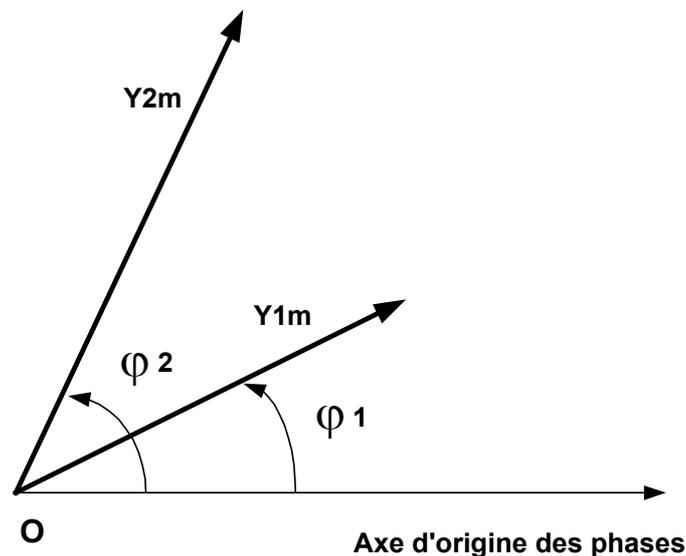
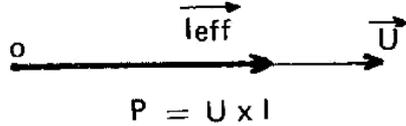


Fig. 1-21

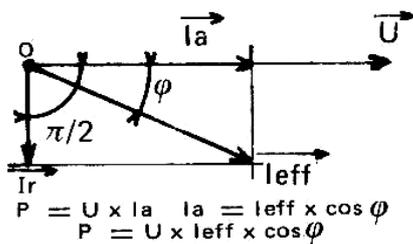
Pour expliquer la notion de déphasage il faut analyser à l'aide de la représentation vectorielle les cas sur la fig. 1-22. On confond le vecteur de la tension avec l'axe

d'origine des phases. Alors l'angle d'origine du courant devient l'angle de déphasage φ entre la tension d'alimentation U et le courant I .



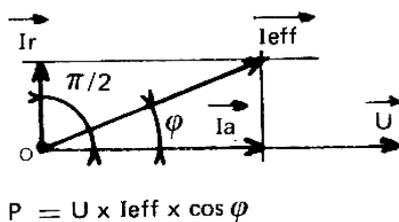
Le courant efficace d'un circuit résistif est un courant actif parce que, en phase avec la tension, il participe entièrement à la puissance utile dégagée.

a)



Si le circuit est résistif et inductif, le courant I_{eff} est déphasé en retard sur U , donnant un courant actif I_a et un courant réactif I_r en retard de $\pi/2$ sur U et ne donnant aucune puissance utile

b)

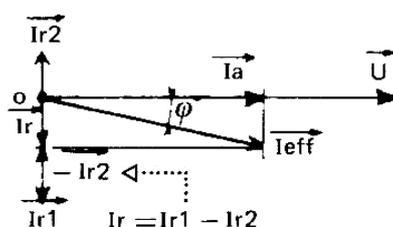


Si le circuit est résistif et capacitif, I_{eff} , en avance sur U , donne un courant actif I_a et un courant réactif I_r en avance de $\pi/2$ sur U et ne donnant aucune puissance utile.

c)

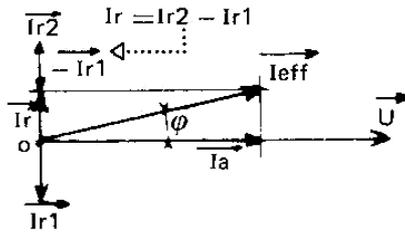
Fig. 1-22

Et si le circuit comporte en même temps les éléments résistif, inductif et capacitif, il peut présenter trois cas possibles (fig. 1-22).



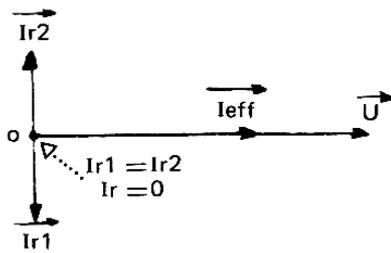
Le courant I_{eff} détermine deux courants réactifs opposés, l'un I_{r1} inductif, l'autre I_{r2} capacitif qui donne un courant réactif résultant $I_r = I_{r1} - I_{r2}$, composante de I_{eff} avec I_a .

a)



Si l'effet de capacité est prépondérant le courant réactif résultant est $I_{r2} - I_{r1}$ en avance sur U , I_{eff} est aussi en avance sur U , sa composante, la étant toujours en phase avec U .

b)



Si l'effet capacitif est égal à l'effet inductif le courant réactif résultant $I_r = 0$: I_{eff} est en phase avec U et devient le courant actif comme si il n'y avait ni capacité ni inductance.

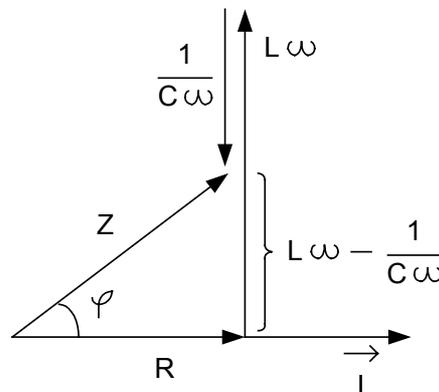
c)

Fig. 1-22

En alternatif pour des circuits comportant inductance ou capacité le rapport U/I donne une valeur appelée **impédance Z** en ohms, plus grande que la résistance R du circuit. On a :

$$Z = U / I$$

Il est possible de tracer le diagramme de Fresnel à l'échelle des *impédances* pour obtenir une représentation homologue qu'on appelle le **triangle des impédances** (fig. 1-23).



a)