

Ecole Supérieure Polytechnique
Institut Supérieur des Métiers de l'Energie (ISME énergie)
Filière : Génie électrique et Energie Renouvelable

Programme d'électricité ISME / GEER

1^{ère} année (1^{er} semestre)
Circuits électriques

Objectifs et plan de cours

A.

Cours

1) Titre

Circuits électriques

Le cours est semestriel : 3 heures par semaine (cours magistral ; TD et TP)

Enseignant : Sidi BOUHAMADY, sidi.bouhamady@esp.mr ; télé : 32 64 85 09

2) Objectifs du cours

Ce cours est destiné aux étudiants de différents niveaux de formation des facultés des sciences et techniques des universités et ceux en génie électrique, génie électromécanique et énergie renouvelable des instituts et écoles de technologies. Autrement dit, par sa présentation relativement simple de sujets souvent complexes, nous osons croire que ce cours suscitera un grand intérêt pour une gamme très variée de lecteurs en formation surtout à l'**Institut Supérieur des Métiers de l'Energie (ISME énergie)** / Option Génie électrique et Energie Renouvelable. Cet enseignement est conçu pour permettre aux différents lecteurs de se familiariser aux concepts de base d'électricité en général et en particulier aux lois fondamentales et méthodes de résolutions des circuits électriques en courants continu. En somme, il donne aux étudiants et en particulier à ceux de la première année GEER de l'ISME la possibilité :

- d'acquérir des notions de base en électricité ;
- de comprendre le comportement des différents composants des circuits électriques ;

- de maîtriser les méthodes de résolution d'un certain nombre de problèmes des circuits électriques.

Ce cours de circuits électriques de base permet également aux étudiants d'avoir une bonne préparation aux cours d'installations électrique du bâtiment et industrielle (1^{ère} année, 2^{er} semestre), de machines (2^{ème} année, 2nd semestre) et de réseaux électriques 1 et 2 (1^{er} année 3^{ème} année). Ce cours est également tout indiqué pour ceux qui souhaitent acquérir une connaissance générale de l'électrotechnique.

Globalement, ce module permet d'avoir une vue d'ensemble des lois fondamentales de l'électricité et des circuits électriques en courant continu et alternatif.

3) Contenu du cours

a) Généralités

Le cours est divisé en trois chapitres durant lesquels des notions de bases et des méthodes de résolution des problèmes des circuits électriques seront exposées.

Pour fixer les idées, chaque chapitre est sanctionné à sa fin par une série d'exercices. Et nous pensons que pour tirer le maximum de ce cours, il est fortement conseiller aux différents utilisateurs de faire les exercices proposés qui se trouvent à la fin de chaque chapitre du module.

Pour mieux maîtriser le fonctionnement des circuits électriques, des séances de travaux pratiques sont prévues au laboratoire d'électrotechnique de l'ESP. Pour les travaux pratiques des protocoles seront remis à temps en vue de leur préparation. L'étudiant est tenu de rendre un compte rendu de chaque séance de TP qui sera noté.

b) Détail du cours magistral des différents chapitres

Chapitre I : Notions de base d'électricité

Chapitre II : Circuits électriques et ses composants

Chapitre III : Montages de récepteurs en courant continu, lois de Kirchhoff et théorèmes fondamentaux

B) Evaluation de l'étudiant

Durant chaque semestre l'étudiant aura à faire au moins un devoir surveillé et un examen final. La pondération dans le calcul de la note finale est la suivante :

Devoir surveillé 25 %

Travaux pratiques 30 %

Examen final 45 %.

Plan détaillé des chapitres du module "Circuits Electriques"

Chapitre I : Notions de base d'électricité

Introduction

I) Courant électrique

I-1) Généralités

I-3) Sens et mesure du courant électrique

II) Tension électrique et différence de potentiel (d.d.p)

II-1) Généralités

II-2) Quelques remarques

III) Résistance électrique

III-1) Généralités

III-2) Quelques remarques

III-3) Cas d'un court-circuit

IV) Utilisation d'un multimètre

IV-1) Généralités

IV-2) Exemple de mesure de résistance (fonction ohmmètre)

V) Puissance électrique (active)

V-1) Généralités

V-2) Bilan des puissances et rendement

V-3) Mesure de puissance

VI) Énergie électrique

VI-1) Généralités

VI-2) Quelques transformations d'énergie

VII) Résumé du chapitre I

Exercices chapitre

Chapitre II : Circuits électriques et ses composants

I) Généralités sur les circuits électriques

II) Analogie circuits hydraulique et électrique

III) Eléments actifs d'un circuit électrique

III-1) Sources dépendantes et indépendantes

III-2) Sources de tension idéale et réelle

III-3) Sources de courant idéales et réelles

III-4) Equivalence sources de tension et de courant réelles

IV) Eléments passifs d'un circuit électrique : condensateur et inductance

IV-1) Condensateur

IV-2) Inductance

Exercices

Chapitre III : Montages de récepteurs en courant continu et lois de Kirchhoff

I) Introduction

I-1) Montage en série de récepteurs

a) Généralités

b) Courant dans un montage série

c) Tensions dans un montage série

d) Résistance équivalente d'un circuit série

e) Puissances dans un montage série

I-2) Montage parallèle de récepteurs

a) Courants dans un montage parallèle

b) Tension dans un montage parallèle

c) Résistance équivalente dans un montage parallèle

d) Puissance dans un montage parallèle

I-3) Montage mixte (série-parallèle) de récepteurs

I-4) Montages étoile et triangle

a) Quelques définitions

b) Transformation étoile - triangle et vice versa

II) Lois de Kirchhoff

II-1) Généralités

II-2) Quelques définitions

a) Branche

b) Nœud

c) Boucle

d) Maille

II-3) Conventions de signes

II-4) Première loi de Kirchhoff (loi des noeuds)

II-5) Deuxième loi de Kirchhoff (loi des mailles)

II-6) Remarques sur les deux lois de Kirchhoff

II-7) Conséquences des lois de Kirchhoff

a) Théorème de Thévenin

- b) Théorème de Norton
- c) Principe de superposition
- d) Méthode des mailles

Exercices

oooooooooooooooooooooooooooo

Travaux Pratiques Circuits Electriques

Les travaux pratiques de ce module tournent autour des notions fondamentales, de montages d'appareils de mesure (**voltmètre, ampèremètre, ohmmètre...**), récepteurs (série, parallèle et mixte), circuit ouvert et court-circuit, lois de Kirchhoff et théorèmes fondamentaux.

Introduction

Un **circuit électrique** est un ensemble **d'éléments interconnectés** destinés à **produire, à transporter, à distribuer et à transformer l'énergie électrique** en une autre forme d'énergie. Autrement dit, un **circuit électrique** est un **ensemble** complexe ou simple de **conducteurs et de composants** électroniques ou électriques qui sont **traversés par un courant électrique**.

Dans ce présent chapitre, nous traiterons les grandeurs de base des systèmes électriques qui permettent de caractériser les échanges énergétiques entre les différents éléments actifs et passifs (respectivement sources et charges). Les **paramètres de base (courant, tension, impédance (résistance), puissance et énergie)** seront déterminés en vue de caractériser chaque élément qui compose les circuits électriques.

Dans ce chapitre, l'accent sera mis surtout sur le courant (tension) continu et non sur le courant (tension) alternatif qui sera l'objet du module de réseau électrique.

I) Courant électrique I

I-1) Généralités sur le courant électrique

La **matière** et en particulier les conducteurs du courant électrique comme le cuivre et l'aluminium (matériaux très utilisés pour les installations électriques et surtout en basse tension) **est formée** de petites particules appelées **atomes**. Ces derniers sont constitués d'un noyau au centre autour duquel gravitent à une très grande vitesse des **particules chargées négativement appelées électrons (e-)**. Le noyau est très lourd, très petit et porte une charge électrique positive (+).

La composition de l'atome peut être assimilée au système solaire, dans lequel les électrons jouent le rôle des planètes tandis que le soleil remplit celui du noyau. Pour illustrer ce concept de la constitution de la matière, nous proposons à la figure I-1 a) ci-dessous la structure simplifiée de l'atome du cuivre.

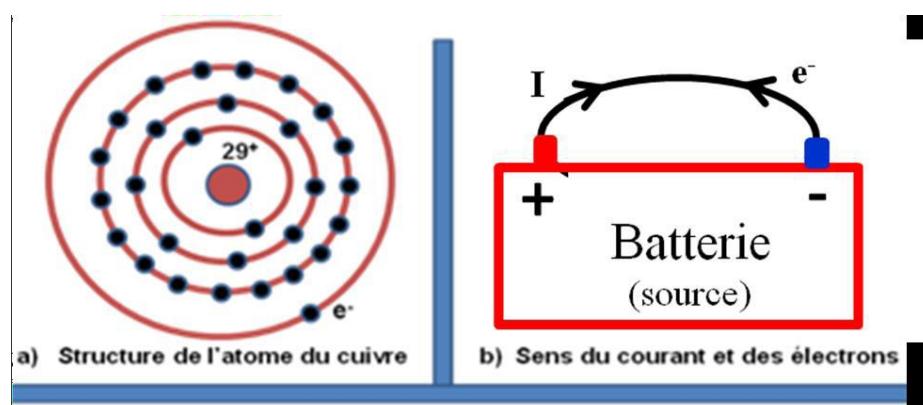


Figure I-1. a) Structure de l'atome du cuivre et b) sens du courant et des électrons

Dans le cas de l'atome du cuivre de la figure I-1 a), nous avons 29 électrons qui tournent sur des orbites définies autour du noyau. Cette configuration de la matière est à la base de l'existence des forces d'attraction électriques d'un atome entre le noyau chargé positivement(+) et les électrons(-).

Dans ces conditions, la charge totale négative des électrons (29-) égalise la charge positive du noyau (29+). C'est la raison pour laquelle, électriquement l'atome reste dans son ensemble neutre.

Pour le cas de l'atome du cuivre, l'électron de l'orbite extérieure est très peu lié au noyau. Par conséquent, il est relativement libre et saute continuellement dans toutes les directions d'un atome à autre dans un échantillon de cuivre.

Cause pour laquelle, il porte le nom d'électron libre contrairement à ceux qui restent attachés au noyau de l'atome. Et d'une manière générale, **dans les métaux, ces électrons mobiles sont peu liés** (donc libres) **aux atomes** auxquels ils appartiennent **contrairement aux isolants électriques**. On dit alors que ces électrons se trouvent **dans la bande de conduction** et ils **se déplacent facilement** dans les matériaux métalliques.

En tenant compte de toutes ces considérations, **pour produire de l'électricité, il faut changer le peuplement des électrons entre deux points**, chimiquement comme une batterie par exemple.

Cause pour laquelle, quand on applique une **différence de potentiel aux extrémités d'un conducteur** électrique, alors elle provoque le **déplacement des électrons** de ce conducteur.

Par exemple, lorsqu'on relie les deux bornes d'une batterie par un fil conducteur électrique (voir figure I-1 b), les électrons libres du conducteur sont attirés par la

borne positive (+) et repoussés par la borne négative (-) de celle-ci selon le principe que deux charges de même signe se repoussent et que deux charges de signe contraire s'attirent. Ainsi, il s'établit un mouvement d'électrons de la borne négative vers la borne positive à l'extérieur de la batterie (dans le conducteur).

C'est justement ce **mouvement d'électrons** qui **constitue le courant électrique**. Si bien que le **courant électrique est** défini comme étant un **déplacement de flux d'électrons** d'un point à un autre dans un conducteur électrique pendant un intervalle de temps donné. D'où l'équation (I-1) suivante :

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{I-1})$$

Dans cette équation I = intensité du courant en ampère (A) ;

Q = charge électrique en coulomb (C) et 1 C = 6,24.10¹⁸ électrons tandis que la charge d'un électron vaut : 1 e⁻ = 1,6.10⁻¹⁹ C ;

t = temps en seconde (s).

De la relation (I-1), il en découle qu'un ampère est un flux de charge électrique d'un coulomb par seconde entre deux points d'un conducteur électrique. C'est-à-dire :

$$1\text{A} = \frac{1\text{C}}{1\text{s}}$$

De la relation (I-1), l'intensité du courant électrique en un point du circuit apparaît alors comme un débit de la charge passant dans le conducteur en ce point.

Et pour qu'il y ait **circulation de courant** électrique I, il faut un circuit (un chemin électrique par lequel passent les électrons) électrique **fermé constitué** d'un **générateur** de tension ou de courant qui est la **source** (alternateur, pile, accumulateur, dynamo...) et d'un ou de plusieurs **charges** (réfrigérateur, fer à repasser, lampe, machine à laver...). Les bornes de ces appareils qui produisent et qui transforment l'énergie électrique sont reliées entre elles par des fils conducteurs (fils de cuivre, aluminium...) pour constituer un circuit fermé, c'est-à-dire sans rupture.

Un **courant** (tension) **continu** (CC ou DC) est un courant (tension) dont la valeur et le sens **ne changent pas** (il est **unidirectionnel**) **avec le temps**.

L'un des circuits les plus simples à réaliser consiste à alimenter une charge (récepteur de résistance R ici une lampe) électrique par une source de tension E (dynamo, pile..) idéale (sans résistance interne).

Nous représentons à la figure I-2-1, un circuit électrique à courant continu constitué d'une source (batterie), d'un interrupteur (système de commande) et d'une lampe (système commandé ou récepteur).

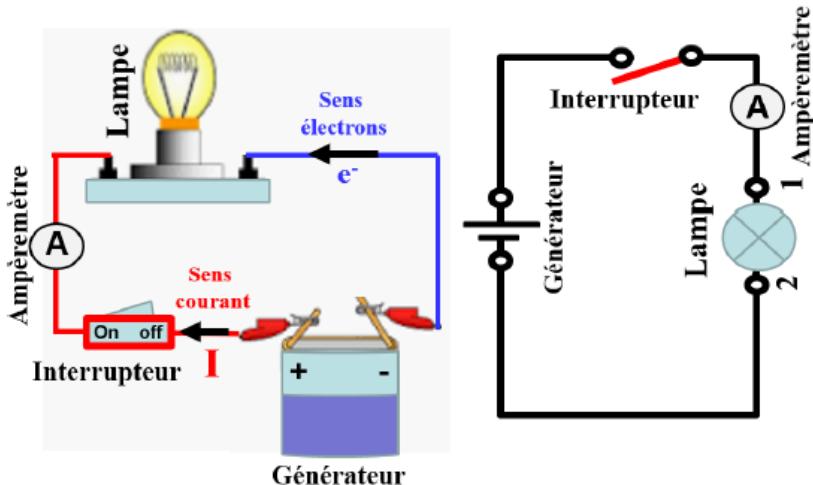


Figure I-2-1. Schématisation d'un circuit électrique

Dans ce circuit de la figure I-2-1, le courant circule toujours de la borne positive vers la borne négative contrairement au sens des électrons. C'est-à-dire que le courant (tension) est indépendant du temps et circule à chaque instant dans le même sens. Pour mettre cela en exergue, on trace à la figure I-2-2 la variation d'un courant continu en fonction du temps. Lorsque la tension E de la source est constante, un courant constant I s'écoule à travers le circuit et on obtient un circuit à courant continu.

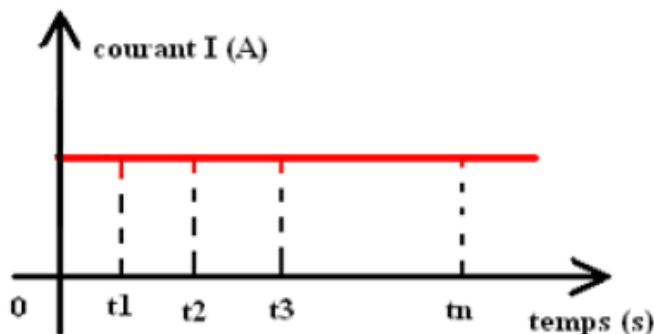


Figure I-2-2. Variation d'un courant continu en fonction du temps

La figure I-2-2 montre que le courant est entièrement constant en direction et en intensité au cours du temps. Les valeurs du courant pour un temps égal à n'importe quel temps (t_1 , t_2 , t_3 ou t_n) sont les mêmes.

I-3) Sens et mesure du courant électrique

Dans un circuit électrique, le courant électrique part **de la borne positive vers la borne négative** de la source, c'est-à-dire **l'inverse du sens de déplacement des électrons**.

La figure I-2-3 nous donne le sens conventionnel du courant et des électrons (a) et la méthode de mesure de l'intensité du courant électrique b).

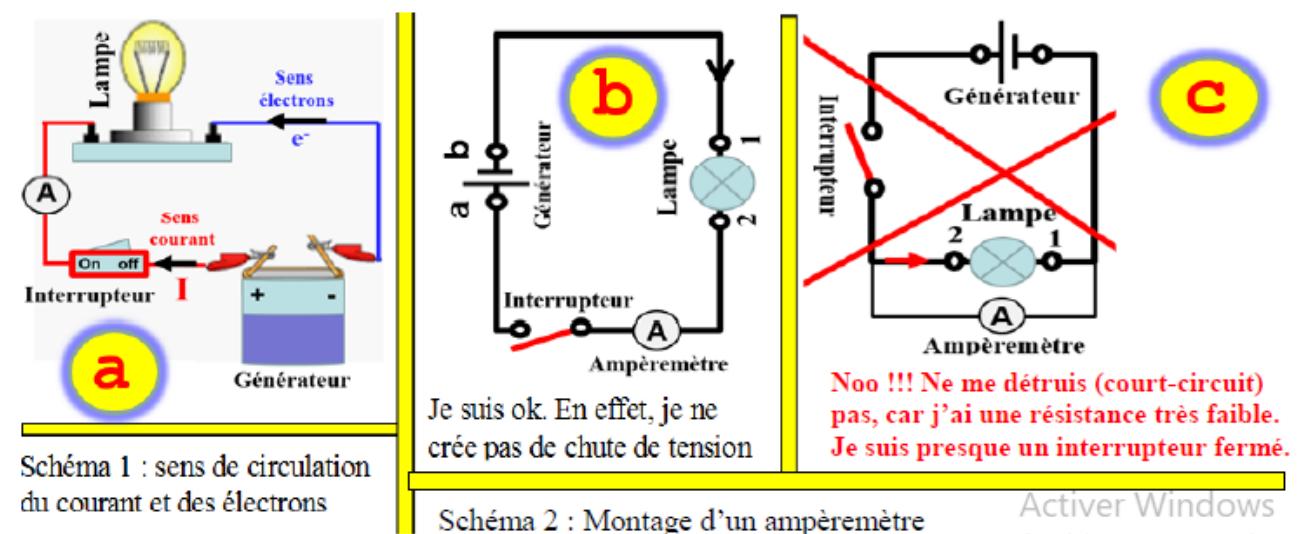


Figure I-2-3 : Sens du courant et des électrons et montage d'un ampèremètre

I) Tension électrique et différence de potentiel (d.d.p) - f.e.m

II-1) Généralités sur la tension électrique

Lorsque les deux bornes 1 et 2 d'un élément (pile par exemple) présentent respectivement un excès (-) et un déficit d'électrons (+) alors, on parle de différence de concentration de charges électriques (électrons) entre ces deux bornes.

La grandeur qui représente cette **concentration** de charges est **appelée potentiel électrique** V_i . Entre ces **deux bornes** 1 et 2 de **concentrations différentes**, il existe donc une **différence de potentiel** notée $V_1 - V_2$ ou tension électrique U_{12} . Cette différence de potentiel est souvent appelée **force électromotrice** E car elle est **capable de mettre en mouvement** les **électrons** libres du circuit.

Par exemple, il existe continuellement une différence de densité des électrons libres entre les deux bornes d'une pile électrique. La borne négative possède une concentration d'électrons plus forte que la normale tandis que la borne positive est déficiente en électrons. Si bien qu'on considère la **tension** (ou force électromotrice) électrique U_{12} entre deux points 1 et 2 d'un élément comme étant le **travail nécessaire pour déplacer une charge unitaire de 1 vers 2**. C'est la raison pour laquelle, la tension électrique est définie comme étant une variation d'énergie par unité de charge. D'où l'équation (I-2) ci-dessous :

$$U_{12} [V] = \frac{dW_{12} [J]}{dQ [C]}$$

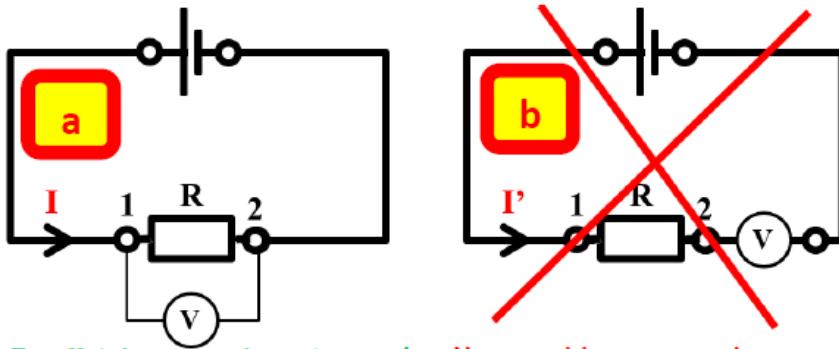
L'unité de la tension électrique est le volt (symbole V).

Donc, d'après la relation I-2, le volt sera défini comme la différence de potentiel qui existe entre deux points 1 et 2 qui exige un travail de 1 Joule pour déplacer une charge unitaire de 1 coulomb entre ces deux points. C'est-à-dire :

$$1V = \frac{1J}{1C}$$

Pour mesurer la tension aux bornes d'un élément on utilise le montage de la figure I-3a. Ce montage permet non seulement le passage presque de la totalité du courant I de la source (situation idéale) mais également de pouvoir mesurer les deux niveaux de potentiel V_1 et V_2 afin d'en déduire la tension U_{12} appliquée aux 2 bornes du récepteur R.

A l'opposé, la figure 1-3b, ne permet pas non seulement de mesurer la tension appliquée entre les bornes 1 et 2 du récepteur (impossibilité du voltmètre de voir V_1 et V_2), mais aussi ce dernier ne sera pas correctement alimenté. En effet, dès lors que le **voltmètre a une résistance presque infinie**, alors presque la totalité de la tension de la source se retrouvera au niveau du voltmètre.



Je suis ok. En effet, je ne serai pas traversé par une partie du courant I de la source, car j'ai une résistance presque infinie

Non, ne bloque pas le courant I , car j'ai une résistance presque infinie. Je suis presque un interrupteur ouvert

Figure I-3. Montage d'un voltmètre

II-2) Quelques remarques relatives à la tension

- Quand la tension aux bornes d'un élément (dipôle) isolé (circuit ouvert) **n'est pas nulle, alors** on considère que **ce dernier est un générateur de tension** (source). Dans ce cas, il n'y pas de circulation de courant car le circuit est ouvert. Par conséquent, **une tension peut exister en l'absence de tout courant électrique** ;
- Lorsqu'un élément est parcouru par un courant électrique, alors une tension électrique existe entre ses bornes. **Donc, un courant ne peut pas circuler en l'absence de tension (de source) électrique** ;
- Additivité des tensions en série dans un circuit électrique. En courant continu, la tension aux bornes d'un groupe de dipôles montés en série est égale à la somme algébrique des tensions aux bornes de chacun d'eux. On considère que les fils conducteurs bien dimensionnés comme les appareils de mesure ne participent pas aux échanges énergétiques.

Par exemple pour la figure I-3-1 qui suit, nous avons : $\mathbf{V_{12} = V_{13} + V_{34} + V_{42}}$

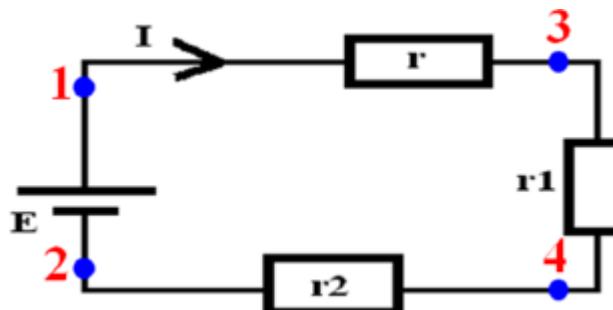


Figure I-3-1 : Additivité des tensions en série dans un circuit électrique

Si l'on note une additivité de tensions dans un circuit série, pour un circuit parallèle (dérivation) nous avons une égalité.

III) Résistance électrique

III-1) Généralités sur la résistance électrique

La **résistance électrique** notée R d'un élément est son **opposition** au passage du courant électrique. Elle représente le rapport de la tension appliquée entre les deux bornes de l'élément au courant qui le traverse. Ce rapport est une constante notée R et s'exprime en ohm (Ω) avec :

$$R_{12}[\Omega] = \frac{U_{12}[V]}{I[A]} \quad (\text{I-4})$$

Ainsi, 1 Ω est défini comme étant la résistance électrique qui existe entre deux points d'un élément parcouru par un courant de 1 A lorsqu'une différence de potentiel constante de 1 V est appliquée entre ses bornes.

La **loi** permettant de **relier** la résistance R , le courant I qui la traverse et la tension U appliquée à ses bornes s'appelle la **loi d'Ohm**. Cette loi est régie par l'équation (I-5).

$$U = R.I$$

Pour **mesurer** la **résistance** (des ohms) entre deux points d'un élément, on utilise un **OHMmètre**. Cet appareil de mesure de résistance se monte en parallèle avec l'élément dont on veut déterminer sa résistance (voir figure I-4). Il faut noter que l'**Ohmmètre** est **toujours utilisé lorsque la tension principale** (source) aux bornes de la résistance dont on veut déterminer sa valeur est **supprimée**. Cette précaution de supprimer la source principale doit être de mise car l'ohmmètre est lui-même une source de tension (pile).

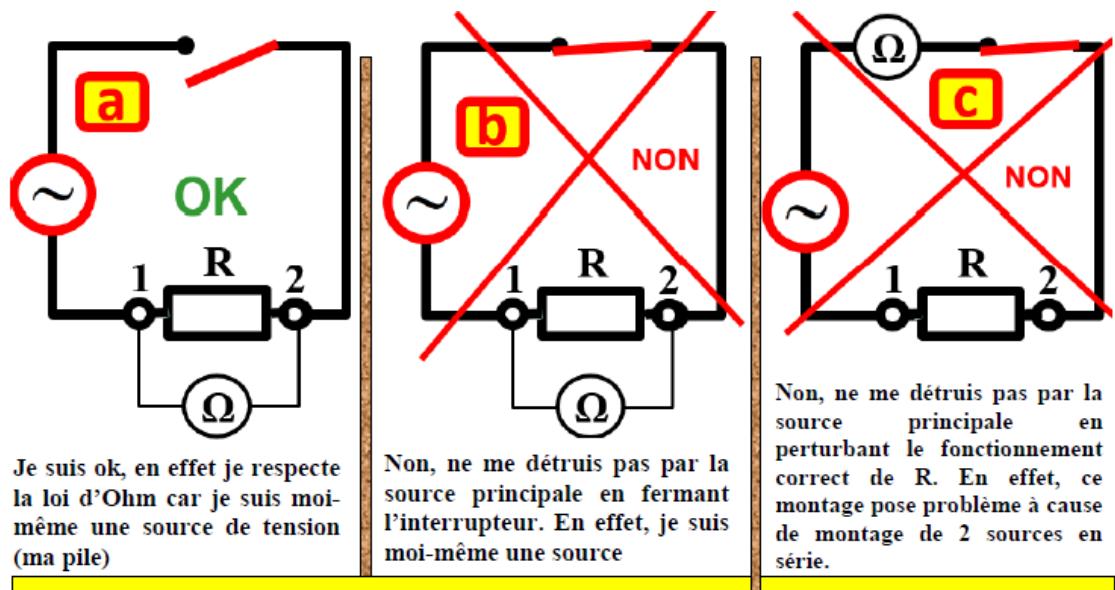


Figure I-4. Mesure de résistance à l'aide d'un ohmmètre

Exemple 1 : Déterminer la résistance d'un fer à repasser électrique branché à une source de tension de la SENELEC 220 V si l'on suppose qu'il tire un courant de 2 A.

Solution : La loi d'Ohm donne $U = RI$ d'où $R = U/I = 220/2 = 110 \Omega$.

Exemple 2: Trouver le courant d'une lampe à incandescence de résistance $R = 110 \Omega$ si elle est branchée sous une tension de 220 V.

Solution : De la loi d'Ohm $U = RI$ on tire $I = U / R = 220/110 = 2 A$.

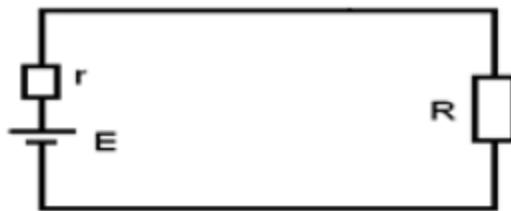
La résistance r_{fil} d'un fil conducteur électrique de longueur l , de section s et de résistivité ρ est donnée par la relation suivante :

$$r_{fil} = \frac{\rho l}{s}$$

Avec une résistivité ρ qui dépend de la nature du conducteur. Pour le cuivre $\rho_{Cu} = 16,10^{-9} \Omega.m$ et pour l'aluminium $\rho_{Alu} = 26,10^{-9} \Omega.m$ à 0 °C et respectivement $\rho_C = 17,24 \cdot 10^{-9} \Omega.m$ et $\rho_{Alu} = 28,3 \cdot 10^{-9} \Omega.m$ à 20 °C.

Dans la relation (I-5'') la section est exprimée en m^2 et la longueur l en m.

Exemple 3: Déterminer la chute de tension de la ligne de transport ci-dessous.



On donne : $E = 220 \text{ V}$; $r = 1 \Omega$; $R = 21 \Omega$; conducteur en cuivre de longueur (distance source – charge) $l = 15 \text{ m}$; $\rho = 17,24 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$ et $s = 1,5 \text{ mm}^2$.

De même que l'on définit la résistance par le rapport U/I (d'après la loi d'Ohm), on exprime la **conductance G** par l'**inverse de la résistance** ; $G = I/U$. Ceci nous donne l'équation I-6 :

$$G = \frac{1}{R} \quad (\text{I-6})$$

L'**unité de la conductance** est le **siemens (S)**.

Contrairement à la résistance, la **conductance caractérise la possibilité** d'un élément **de laisser passer un courant** électrique.

III-2) Quelques remarques sur les résistances

- Dans ce présent chapitre, nous avons caractérisé l'opposition au passage de courant par une résistance (en courant continu). En courant alternatif, on parlera plutôt d'impédance ($Z = R + jX$), grandeur résultant de l'effet d'une résistance (R) et/ou d'une réactance (X) ;
- l'inverse d'une impédance est notée admittance, Y (en siemens S) à l'image respectivement de la résistance et de la conductance ;
- l'inverse d'une réactance est appelé susceptance, B (en siemens S) ;
- ces différents éléments seront traités dans le module relatif au courant alternatif.

III-4) Cas d'un court-circuit

a) Généralités d'un court-circuit

Un **court-circuit** se produit quand **deux éléments** (deux fils conducteurs par exemple) ayant des **potentiels différents** entrent **en contact** (voir figure I-6b). Voir également I-3) Sens et mesure du courant électrique et l'équation I-1'. Un élément (ici la résistance R) dont les bornes sont reliées par un fil conducteur (de résistance négligeable) est en court-circuit.

L'une des **conséquences** d'un **court-circuit** est l'**augmentation** du **courant** débité par la source **dans le circuit** car la résistance électrique du court-circuit (fils) est beaucoup plus faible que celle de l'élément court-circuité (ici la résistance R). Lorsqu'une source est court-circuitee, son courant n'est freiné que par sa résistance interne et celle des fils (très faibles). Or, toutes ces deux résistances sont supposées être très faibles, par conséquent, le courant de court-circuit devient très important. Ce courant de **court-circuit** très élevé (donc effet Joule très important) **peut entraîner la destruction de la source ou échauffer** fortement les fils jusqu'à provoquer un **incendie**.

Pour **limiter** les **dégâts** d'un **court-circuit**, on insère dans les **départs** des **éléments de protection** (fusible ou disjoncteur ...) des personnes et des biens contre ces manquements.

Nous donnons à la figure I-6, le schéma illustratif d'une situation de court-circuit.

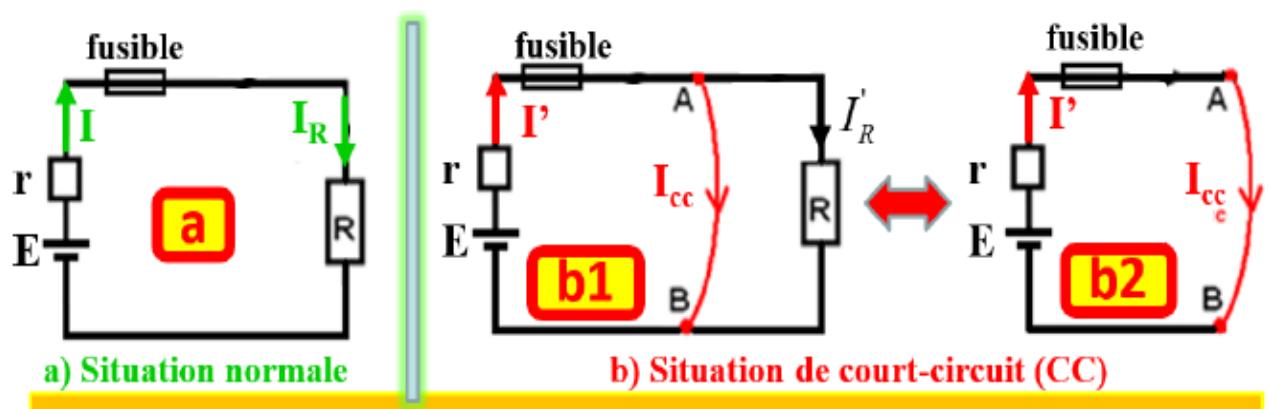


Figure I-6. Court-circuit

Compte tenu de ce qui précède (effet Joule très important) les **Courts-circuits sont à éviter**.

b) Calcul des paramètres d'un court-circuit

- **Situation normale** (figure I-6. a) : Dans le cas de la situation normale de fonctionnement, le bilan des tensions nous donne : $E = RI_R + Ir + r_{fil}I$ avec I et I_R respectivement courant source et charge (R). Mais, étant donné que les résistances R , r et r_{fil} sont en série, alors elles sont parcourues par le même courant I débité par la source. Par conséquent, $I_R = I$ et la relation $E = RI_R + Ir + r_{fil}I$ nous donne alors la valeur du courant I .

$$I = \frac{E}{R + r + r_{fil}} \quad (\text{I-7})$$

Ce courant est donc limité à la fois par la résistance interne r de la source, par celle des fils et surtout par celle de la vraie charge R .

- Situation de **court-circuit** (figure I-6 b) : Quand on relie les bornes A et B, le courant passe par le chemin le plus facile (absence de résistance) à l'image de l'être humain qui aime la facilité. Pour une telle situation, les points A et B sont au même niveau de potentiel. Autrement dit, $V_A = V_B$. Par conséquent, le courant de la figure I-6 b1 est donné par la relation suivante :

$$I'_R = \frac{V_{AB}}{R} = \frac{V_A - V_B}{R} = 0 \quad (\text{I-7'})$$

Ainsi, $I' = I_{cc}$ (intensité du courant de court-circuit) quelle que soit la valeur de R . A cet effet, le bilan des tensions devient alors à nouveau $E = rI'$. Dans ces conditions, l'intensité du courant I' n'est limitée que par la résistance interne r du générateur et des fils. En négligeant la résistance des fils conducteurs, l'intensité du courant de court-circuit se résume alors à :

$$I_{cc} = I' = \frac{E}{r} \quad (\text{I-8})$$

Donc

$$I_{\infty} = I' = \frac{E}{r + r_{fil}} \rightarrow \infty$$

Pour une situation de court-circuit la figure I-6 b1 est équivalente à I-6 b2. Ce courant de court-circuit I_{cc} dont la valeur tend vers l'infinie conduit à une énergie (chaleur) qui tend vers l'infinie. Ce qui est intenable et pour la source et pour les fils conducteurs. Ainsi, si des mesures de protection des biens contre les CC ne sont pas prises en compte, alors on va assister à leur destruction par casse mécanique, explosion ou incendie. Justement pour éviter ces manquements, tout départ électrique doit être protégé par des dispositifs (fusible, disjoncteur...) de protection contre les CC.

Remarque : La différence entre les conducteurs phase et neutre peut se faire par :

- Couleur :
 - Phase : toute couleur sauf bleu, vert, jaune et vert/jaune. Mais suivant la disponibilité sur le marché en général, le conducteur phase est de couleur rouge, noire et marron ;
 - Neutre : couleur bleu.
- Dangereosité :
 - la phase est dangereuse (ne jamais la toucher) ;
 - le neutre est sans danger ;
 - Tournevis testeur (détecteur de phase)
 - Placé correctement sur une phase, la lampe témoin du détecteur de phase s'allume ;
 - Placé sur le neutre, la lampe ne s'allume pas.

Exemple 1: Un circuit électrique est composé d'une source de tension $E = 100$ V ; d'une résistance interne $r = 1 \Omega$ et d'une charge de $R = 9 \Omega$. Poser une ou des hypothèses et comparer les courants débités par le générateur en situation nominale et en régime de court-circuit. Déterminer pour les deux cas, la tension aux bornes de la résistance interne r .

Exemple 2 : Vous êtes responsables d'une installation domestique d'une maison alimentée par le réseau de la SOMELEC 220 V. A partir de cette source de 220 V vous alimentez sur une longueur de 10 m une résistance (fer à repasser électrique) de 100Ω avec un fil de section $2,5 \text{ mm}^2$.

- a) Faites des hypothèses et calculer la tension appliquée aux bornes de ce fer.
- b) Un court-circuit s'est produit aux bornes de ce fer.
 - 1) Déterminer le courant de court-circuit.
 - 2) Faites des propositions pour protéger l'installation contre ce court-circuit.

IV) Utilisation d'un multimètre

IV-1) Généralités

En milieu professionnel, on utilise généralement un multimètre et non des appareils (ampèremètre, voltmètre...) avec une seule fonction. Le **multimètre** est un **appareil de mesure de plusieurs paramètres électriques** (multifonctions : voltmètre, ampèremètre, ohmmètre...).

Pour mesurer une grandeur (une tension par exemple) à l'aide d'un multimètre on peut procéder de la manière suivante avec 3 phases principales :

➤ Choix de la fonction du multimètre (ici voltmètre par exemple)

- Avoir une idée sur la nature de la source d'alimentation (AC ou CA : courant alternatif ou CC ou DC : courant continu) où la mesure se fera ;
- Choisir la position du commutateur (au centre de l'appareil). Ainsi, si la source est :
 - **alternative**, on choisira un des calibres dans la zone : 
 - **continue**, on sélectionnera un des calibres dans la zone : 

➤ Choix du calibre

- Si on a une idée de la grandeur à mesurer, alors on choisit le calibre approprié (immédiatement supérieur ou égal à la valeur de la grandeur à mesurer). Dans le cas contraire, faire une estimation de la grandeur à mesurer et adopter un calibre supérieur à la valeur estimée suivant le principe “ qui peut le plus peut le moins ”.
- Ainsi, lorsqu'on effectue une première mesure, la meilleure précision sera obtenue en adoptant le calibre immédiatement supérieur à la valeur à mesurer.

➤ Connexion des bornes de l'appareil

L'une des bornes (les fiches) du multimètre est toujours branchée sur la borne commune (souvent marquée “COM” de l'appareil tandis que l'autre est connectée sur la borne où est marqué le symbole de l'unité à mesurer.

IV-2) Exemple de mesure de résistance (fonction ohmmètre)

Le multimètre (ici fonction ohmmètre) est branché conformément à la figure I-7 en parallèle avec l'élément dont on veut mesurer la résistance R . Dans ces conditions, la loi d'Ohm est applicable aux bornes de la résistance qui a comme tension celle des piles (source) de l'ohmmètre. Le montage d'un **ohmmètre** doit se faire **toujours hors tension principale pour éviter sa destruction**. En effet, l'ohmmètre **est lui-même une source de tension (sa pile)** pour la résistance dont on veut déterminer sa valeur. Si la source principale n'est pas isolée (en circuit ouvert), alors elle sera en parallèle avec l'ohmmètre.

Pour l'utilisation d'un multimètre pour la mesure d'une résistance, on peut procéder comme suit :

- Suivre les étapes citées auparavant.

Ces étapes aboutissent à la figure I-7 ci-dessous.

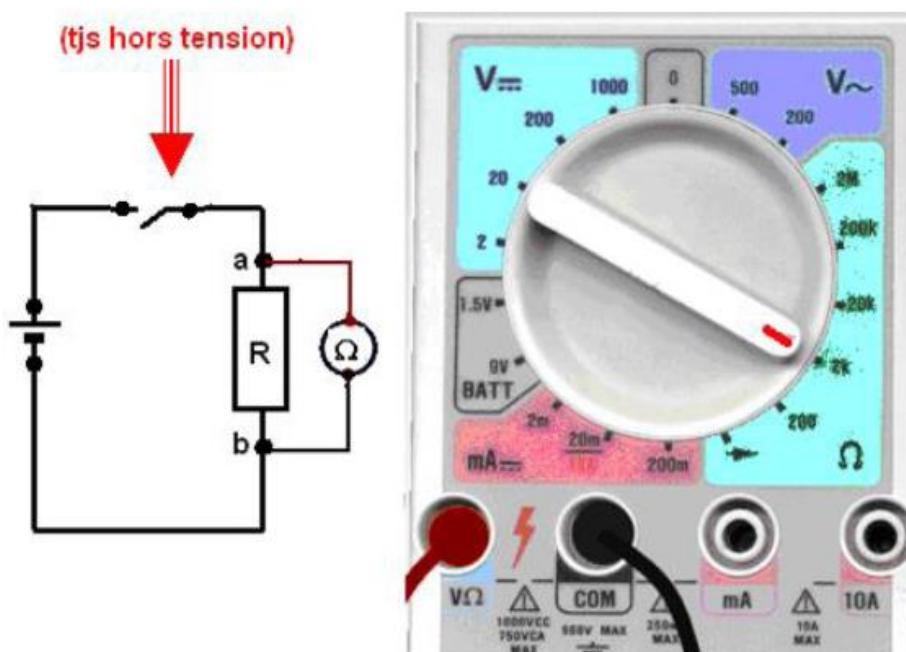


Figure I-7 : Mesure d'une résistance à l'aide d'un ohmmètre

- Résultat de la mesure

Suivant les appareils utilisés, la lecture est directe ou par calcul.

V) Puissance électrique (active)

V-1) Généralités sur la puissance électrique

La **puissance** est la **quantité d'énergie par unité de temps** fournie (ou reçue) par un système à un autre. Elle correspond donc à un débit d'énergie. Deux générateurs de puissances différentes pourront fournir la même énergie à deux récepteurs, mais le générateur le moins puissant sera le plus lent. Donc, dans la notion de puissance le temps est mis en exergue.

Par conséquent, on peut donc considérer que la **puissance** est la **vitesse à laquelle est effectué un travail**. Autrement dit, la **puissance** est la **variation d'énergie par unité de temps** ; c'est-à-dire la puissance électrique d'un appareil est l'énergie consommée ou fournie par cet appareil par unité de temps (en une seconde). D'où pour une puissance électrique, elle est donnée la relation (I-9) suivante :

$$P[W] = \frac{dW[J]}{dt[s]} = \frac{dW}{dQ} \times \frac{dQ}{dt} = U[V] \times I[A] \quad (I-9)$$

L'**unité** de cette forme de **puissance** dans le système international est le **watt**, noté W, qui correspond à un Joule (J) fourni par seconde.

Cette forme de **puissance** est dite **active** car est susceptible de **fournir du travail, de la chaleur, lumière...**

Pour **mesurer** la **puissance active** d'une installation électrique on **utilise** comme appareil de mesure le **WATTmètre**.

D'après la relation (I-9), la puissance électrique transformée (ou fournie) par un élément est aussi le produit de la tension U appliquée à ses bornes par le courant I qui le traverse. C'est-à-dire : $P = U.I$

Avec U et I comme étant les valeurs constantes (courant continu) de la tension aux bornes de l'élément et de l'intensité du courant qui le traverse.

De cette relation (I-9), il en résulte que la puissance consommée (ici en monophasé) par une résistance ohmique R peut s'écrire sous la forme de l'équation (I-10) suivante :

$$P = U.I = (R.I).I = R.I^2 = \frac{U^2}{R} \quad (I-10)$$

Avec : I = courant qui traverse la résistance ;
 U = tension aux bornes de R et cette dernière peut ne pas être égale à la tension délivrée par la source s'il y a des pertes.
Mais, l'expression la plus générale d'une puissance active fournie par une source ou transformée par un récepteur est de la forme de l'équation (I-11) qui suit :

$$P = kUI\cos\varphi \quad (\text{I-11})$$

Où k = coefficient de phase avec : $k = 1$ pour le système monophasé (formé d'une phase et le neutre) et $k = \sqrt{3}$ pour le système triphasé constitué de trois phases avec ou sans neutre ;

$\cos\varphi$ = facteur de puissance (coefficient de puissance) qui **dépend** de la **nature** de la source ou du récepteur (**installation**). Autrement dit, ce facteur dépend de l'angle du déphasage φ entre la tension appliquée aux bornes de l'élément et le courant qui le traverse.

A titre d'exemple, pour une résistance pure, **$\cos\varphi$** est égal à 1 car le courant et la tension de celle-ci sont en phase ($\varphi = 0$).

Pour l'**installation domestique** en Mauritanie, la SOMELEC considère que le facteur de puissance global **$\cos\varphi = 0,86$ sur tout le territoire national**.

V-2) Bilan des puissances et rendement

a) Bilan des puissances

La puissance active totale d'une installation électrique est égale à la somme des puissances des différents éléments qui la composent. Si bien elle égale à :

$$P_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n P_i \quad (\text{I-12})$$

Cette relation découle de la loi de conservation de l'énergie.

Donc, **pour alimenter en énergie** électrique une installation (ESP/Nouakchott), **on fait le bilan des puissances** (somme algébrique) des différents récepteurs électriques qui la composent.

La puissance **totale obtenue servira à définir la puissance à souscrire auprès** de la **SOMELEC** ou celle du groupe électrogène.

Pour dimensionner les différents composants (sections conducteurs, appareillages...), on aura besoin de faire le bilan des puissances de l'installation comme indiqué à la figure qui suit.

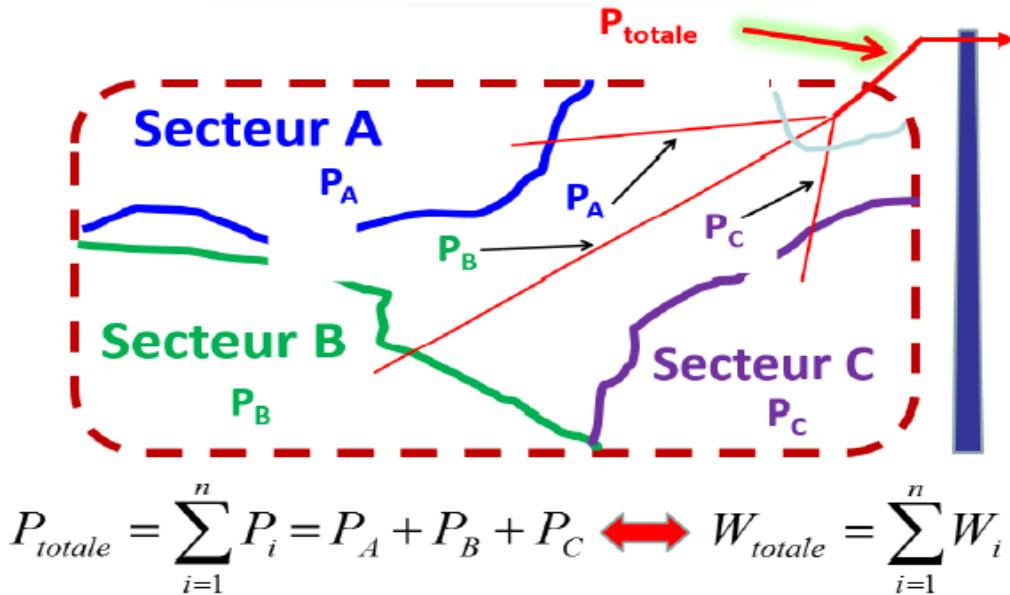


Figure 8 : Bilan des puissances

b) Rendement

Généralement, le **rendement** d'un système est le **rappor**t de ce qui est **utile** sur ce qui est **dépensé**. Autrement dit, le **rendement** est le **rappor**t de ce qui est **sortie** (utile) **sur la grandeur d'entrée** (consommée).

Donc, pour un récepteur (transformation de l'énergie électrique en une autre forme d'énergie), le rendement est le rapport de l'énergie obtenue à la sortie sur l'énergie électrique.

Tandis que le **rendement** d'un **alternateur** est le **rappor**t de la puissance **électrique** (utile fournie au réseau) **sur** la puissance **mécanique** reçue par l'alternateur + éventuellement de la puissance électrique reçue pour la création du flux inducteur.

Lors des transformations de puissances énergies) il y aura des **pertes**. Plus les **pertes** sont **faibles**, meilleur est le **rendement**.

Exemples de système de transformation d'énergie (puissance) : **moteur** (dispositif électrique qui **transforme** l'énergie **électrique reçue en énergie mécanique** voir figure I-8' a) et **alternateur** (dispositif qui transforme l'énergie **mécanique reçue en énergie électrique** voir figure I-8' b).

Schématiquement, le système de transfert d'énergies en régime moteur ou alternateur peut être représenté par la figure I-8'. Ce schéma nous permet de définir le rendement des deux systèmes de transfert d'énergie.

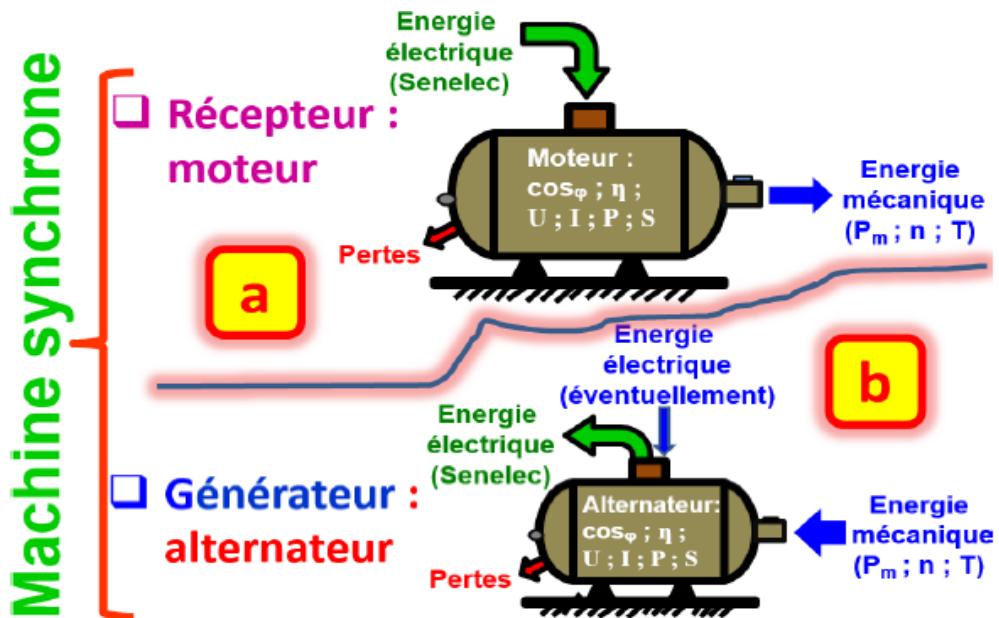


Figure I-8' : Sens des énergies et rendement d'un moteur et d'un alternateur

Dans cette chaîne de transformation d'énergies, le moteur qui entraîne par exemple le compresseur d'un frigo transforme l'énergie électrique reçue de la SOMELEC en énergie mécanique (rotation utile) et en chaleur (ça chauffe et ça occasionne des pertes effets Joule) indésirable.

En régle générale, le rendement d'un système peut être schématisé par la figure I-8'a ci-après.

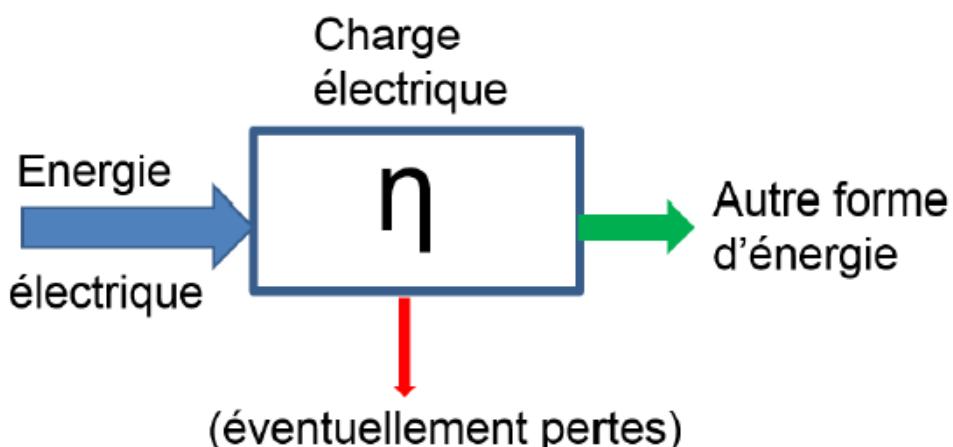
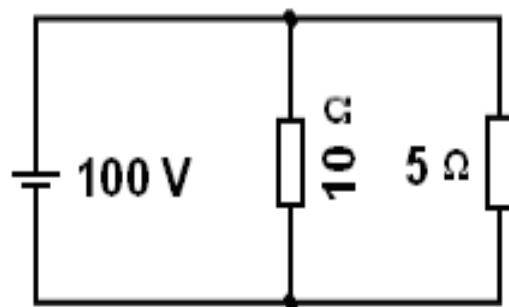
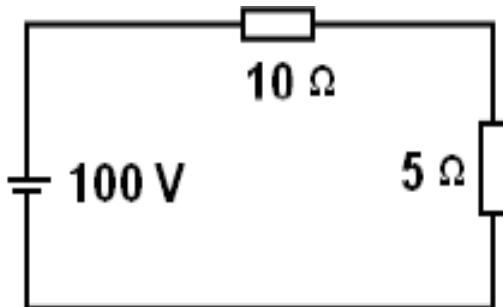


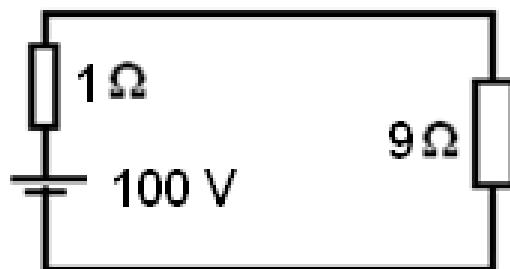
Figure I-8'a : Rendement d'un récepteur électrique

Exemple 4 : Soient les différents éléments montés en série et en parallèle (schémas ci-dessous). Faites le bilan des puissances pour les deux situations. Vérifier la loi de conservation de l'énergie.



Exemple 5 : Faites des hypothèses et :

- 1) Trouver le ou les rendements du schéma ci-dessous si l'on considère que la puissance fournie au générateur par la turbine est de 1 050 W. La charge est représentée par une résistance de 9 Ω. La résistance interne du générateur est $r = 1 \Omega$.
- 2) Un court-circuit se produit aux bornes de la charge de 9 Ω. Déterminer l'intensité du courant de ce court-circuit. Comparer le à sa valeur normale. Proposer des solutions contre ce manquement.



V-3) Mesure de puissance

En tension continue, on peut calculer la puissance électrique (en mono $P = VJ$ et en tri $P = \sqrt{3} UI \cos\varphi$) d'un récepteur à partir de la tension appliquée à ses bornes et de l'intensité qui le traverse. Pour se faire, on n'a pas besoin forcément d'un **WATTmètre** pour mesurer directement la puissance, mais plutôt d'un voltmètre et d'un ampèremètre afin d'en faire leur produit.

En alternatif, lorsque la relation $P = kUI$ n'est pas toujours applicable ($\cos\varphi \neq 0$) ; relation générale de puissance : $P = kUI \cos\varphi$ alors un appareil de mesure s'impose. Il s'agit d'un wattmètre. Etant donné que la puissance électrique est

caractérisée par deux grandeurs électriques (tension et courant), donc pour la mesurer on doit se servir d'un appareil qui peut mesurer à la fois ces deux paramètres. Pour simplifier, on peut considérer qu'un wattmètre est un appareil qui est composé à la fois d'un voltmètre et d'un ampèremètre.

Exemple 6 : Une maison d'une famille modeste de Nouakchott dont le disjoncteur est calibré sur 5 A est alimentée par le réseau SOMELEC 220 V (courant alternatif et monophasé avec un $\cos\varphi = 0,86$). Calculer la puissance souscrite de cette maison c'est-à-dire la puissance maximale mobilisée par la SOMELEC chez son client.

Solution : $P = UI \cos\varphi = 220 \times 5 \times 0,86 = 957 \text{ W}$.

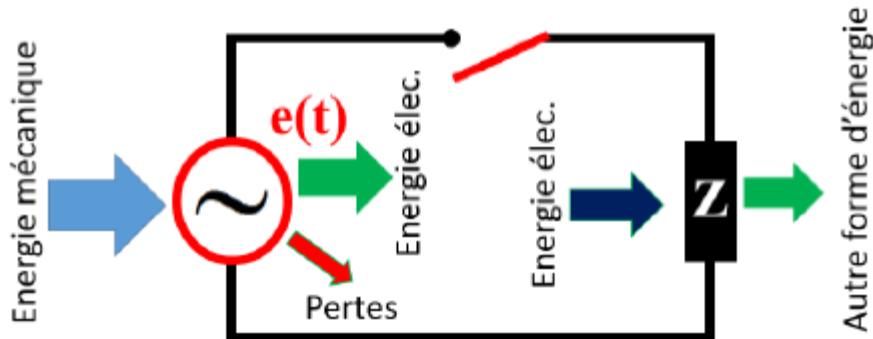
On voit bien que cette puissance est différente de celle obtenue en faisant le produit de la tension et du courant ($P' = 220 \cdot 5 = 1100 \text{ W}$).

VI) Énergie électrique

VI-1) Généralités sur l'énergie électrique

Un circuit électrique comporte un générateur qui fait "circuler" le courant c'est-à-dire qui met en mouvement les charges électriques par sa force électromotrice. Le générateur fournit alors de l'énergie électrique aux récepteurs qui la transforment en énergie utile et en pertes (en chaleur, ventilation...).

Le schéma ci-dessous est un exemple de circuit électrique avec ses différents systèmes de transferts d'énergies.



Le moteur qui entraîne par exemple le compresseur d'un frigo ne transforme pas la totalité de l'énergie électrique qu'il reçoit en énergie mécanique. Il occasionne des pertes (par effet Joule sous forme de chaleur, perte mécanique par exemple). Par conséquent, l'énergie électrique reçue est égale à la somme de l'énergie mécanique et des pertes.

Etant donné que le **rendement énergétique** est égal au **rapport** de l'énergie utile **fournie** et de l'énergie **totale reçue**, celui d'un moteur sera égal au rapport de l'énergie mécanique sur l'énergie électrique (voir tableau I-1 ci-après).

De la relation (I-9) qui stipule que la puissance P est le taux d'utilisation de l'énergie électrique W; c'est-à-dire l'énergie divisée par le temps, on en déduit la relation (I-13):

$$W = \int_{t1}^{t2} P dt \quad (I-13)$$

D'où l'**énergie** électrique consommée (ou fournie) par un récepteur (par un générateur) est le **produit** de la **puissance** de ce dernier (en watt) par le **temps** d'utilisation (en secondes) :

$$W [J] = P [W] \cdot t [s] \quad (I-14)$$

Mais d'une manière générale, les compagnies d'électricité comptabilisent l'énergie électrique en kW.h (compteurs SOMELEC) et non en joule.

Exemple : Soit une lampe de 40 W qui reste allumée dans la chambre d'un étudiant de l'ESP/Nouakchott pendant 3 heures de temps par jour. Calculer la facture bimestrielle de cette lampe si le kW.h vendu par la SOMELEC est de 56 MRO en moyenne.

VI-2) Quelques transformations d'énergies

Nous donnons au tableau I-1 quelques exemples de transformation d'énergies électriques en une autre forme d'énergie et vice-versa.

Tableau I-1 : transformation d'énergie électrique en une autre forme d'énergie et vice-versa

Energie d'entrée (consommée)	Générateur	Energie de sortie (utile fournie)
énergie chimique	pile, accumulateur en décharge	énergie électrique
énergie mécanique (travail)	dynamo, alternateur	énergie électrique
énergie électrique	transformateur	énergie électrique
rayonnante (lumière)	photopile solaire	énergie électrique
Energie d'entrée (consommée)	Récepteur	Énergie de sortie (utile fournie)
énergie électrique	moteur électrique	énergie mécanique (travail)
	lampe électrique	énergie rayonnante (lumière)
	transformateur	énergie électrique
	accumulateur en charge	énergie chimique

Le coût de l'énergie électrique est lié à un certain nombre de paramètres parmi lesquels on peut noter :

*** l'énergie consommée W exprimée en kilowattheure (kW.h) dans le domestique avec $W = P.t$. Pour rappel, les compteurs des compagnies d'électricité comme la SOMELEC donnent la lecture de l'énergie consommée en (kW.h).

VII) Résumé du chapitre I et symboles de quelques appareils de mesure

Dans ce présent chapitre, nous avons longuement traité les paramètres de base des circuits électriques que nous résumons dans ce tableau 2 :

Tableau 2 : paramètres de base des circuits électriques

Grandeur électrique	Formule	Unité	Symbol	Appareil de mesure
Intensité (courant)	$I = \frac{dQ}{dt}$	ampère	A	AMPÈREmètre
Tension (d.d.p) entre deux points 1 et 2	$U_{12} = \frac{dW_{12}}{dQ} = V_1 - V_2$	volt	V	VOLTmètre
Résistance entre deux bornes 1 et 2	$R_{12} = \frac{U_{12}}{I}$ ou $r_{fil} = \rho l/s(\text{fil})$	ohm	Ω	OHMmètre
Puissance électrique active	$P = \frac{W}{t} = UI = kUI \cos\varphi$ $= (RI)I = RI^2 = \frac{U^2}{R}$ Pour $\cos\varphi = k = 1$	watt	W	WATTmètre VARmètre
Energie électrique (SENELEC)	$W = P.t$	kW.h	J	Cosphimètre fréquencemètre

Activer Windows
Accédez aux paramètres de Windows.

Exercices chapitre I

Exercice 1 :

Une lampe dont le facteur de puissance est de $\cos\varphi = 0,5$ est utilisée pour assurer l'éclairage d'une chambre d'un étudiant de l'ESP. Elle consomme une énergie de 0,1 kWh en 5 h sous une tension de 220 V.

Calculer :

- 1) son courant ;
- 2) sa facture bimestrielle pour 5 h de fonctionnement par jour, si l'on considère que le kWh vendu par la SOMELEC est en moyenne de 115 MRO ;

- 3) faites le plan de masse (vue de dessus) de cette chambre et proposer le schéma électrique d'une telle installation.

Exercice 2 :

Un moteur électrique triphasé alimenté sous une tension de 400 V réseau SOMELEC, sert à actionner un monte-chARGE qui élève une masse totale de 600 kg (masse réelle + celle du monte-chARGE) à une hauteur de 20 m.

On considère que les pertes de frottements et autres pertes sont négligeables.

- 1) En vous fixant le temps mis pour soulever cette masse totale à cette hauteur, schématiser le système ;
- 2) Sur la gamme des puissances normalisée des moteurs (voir feuille en annexe dans ce chapitre) déterminer la puissance mécanique de ce moteur ;
- 3) En déduire la puissance électrique de ce dernier ;
- 4) Déterminer le calibre (le courant) du disjoncteur de protection de ce moteur ;
- 5) Calculer l'énergie électrique fournie par le réseau de la SOMELEC à ce moteur ;

Exercice 4 : Vous êtes consultés pour l'installation électrique d'un bâtiment à Nouakchott qui sera alimenté par le réseau de la SOMELEC 220 V (2 fils conducteurs : 1 phase et 1 neutre). On suppose que le disjoncteur sera calibré sur 10 A. Le matériel électrique qui y sera installé sera composé de : 10 ampoules de 40 W chacune, 1 frigo de 150 W ; une télévision de 100 W et d'autres appareils électriques (radio ; chaîne à musique) de puissance totale égale à 200 W. Pour fin de calcul, on suppose que tous ces éléments ont un facteur de puissance égal à 1.

- 1) Déterminer :
 - a) la puissance totale installée (puissance réelle de toute l'installation)
 - b) la puissance à souscrire auprès de la SOMELEC
- 2) Ce calibre du disjoncteur convient-il à cette maison ?
- 3) Calculer le courant tiré par ces appareils s'ils sont tous branchés en même temps.
- 4) Pour ce même calibre, le propriétaire décide d'acheter un réchaud électrique de puissance 2 kW sous 220 V. Commenter son projet.