Office de la Formation Professionnelle
et de la Promotion du Travail

Technicien Spécialisé

Génie Electrique

Tronc commun

Manuel de cours

Module 3

Circuits à courant continu et courant alternatif

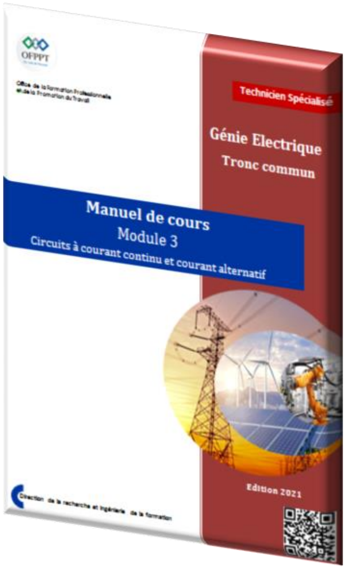
Edition 2021

Direction de la Recherche et Ingénierie de la Formation

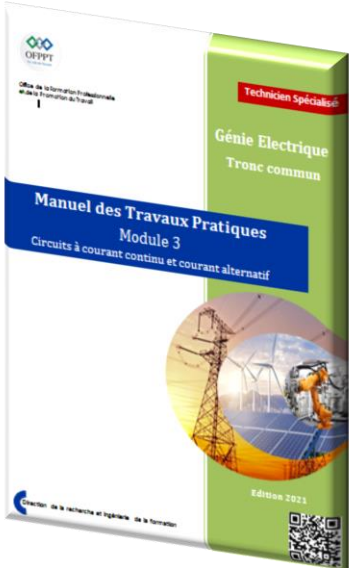
Avant-propos

Les manuels de cours, de travaux pratiques et le guide e-learning sont téléchargeables à partir de la plateforme e-learning OFPPT moyennant les codes QR suivants :

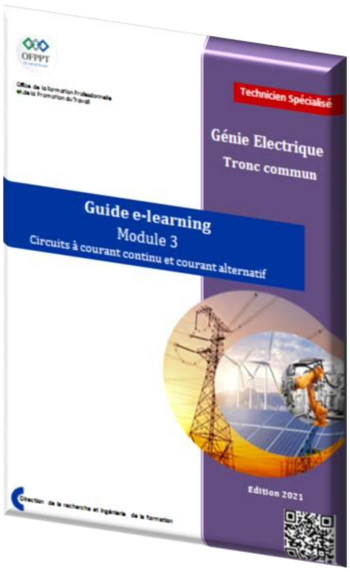
Manuel de cours



Manuel des travaux pratiques



Guide e-learning



SOMMAIRE

COMPETENCES-CIBLES ET OBJECTIFS OPERATIONNELS

Module 3 : Circuits à courant continu et courant alternatif

Code : GETC – 03 **Durée : 75 heures**

ENONCE DE LA COMPETENCE

Analyser le fonctionnement des circuits à courant continu et courant alternatif

CONTEXTE DE REALISATION

- Individuellement
- A l'atelier et en laboratoire
- À partir :
  - de composants électriques et électroniques
  - de montages sur bancs didactiques
  - de systèmes industriels
  - de circuits d'alimentation et de distribution électrique
  - d'une approche modulaire pour l'analyse de circuits
  - de schémas, de plans et de la documentation technique
- À l'aide :
  - d'instruments de mesure : multimètre, oscilloscope, générateur de fréquence, pince ampérométrique, fréquencemètre
  - d'outillage de base
  - d'un logiciel de simulation

CRITÈRES GÉNÉRAUX DE PERFORMANCE

- Dextérité manuelle
- Manipulation soignée des instruments de mesure
- Utilisation adéquate des outils et de l'équipement
- Comportement sécuritaire et préventif
- Utilisation appropriée d'un logiciel de simulation

ÉLEMENTS DE LA COMPETENCE	CRITÈRES PARTICULIERS DE PERFORMANCE
A. Appliquer les lois et les principes relatifs aux circuits électriques.	• Application correcte des principes • Application correcte des formules mathématiques et physiques • Application correcte de la loi d'ohm • Application correcte de la loi de Kirchhoff
B. Analyser le fonctionnement de circuits d'alimentation et de distribution électrique en courant continu	• Interprétation correcte des schémas • Interprétation juste des fiches techniques • Détermination précise des caractéristiques à partir des fiches techniques : le code de couleurs, les puissances et les technologies. • Interprétation précise du principe de fonctionnement des différents circuits
C. Analyser le fonctionnement de circuits d'alimentation et de distribution électrique en courant alternatif	• Détermination correcte des paramètres de fonctionnement d'un système monophasé • Détermination correcte des paramètres de fonctionnement d'un système triphasé • Interprétation précise du principe de fonctionnement des différents circuits
D. Mesurer les signaux d'un montage de circuit électrique sur une plaquette d'expérimentation	• Interprétation juste des plans, des schémas et de la documentation technique • Choix judicieux des instruments de mesure appropriés • Choix approprié des points de mesure • Branchement correct des instruments de mesure • Respect des mesures de protection • Exactitude des mesures • Interprétation juste des écarts • Justesse du verdict sur le fonctionnement du circuit

Chapitre I

CIRCUITS A COURANT CONTINU

1. Structure de la matière et production de l’électricité

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 Forme de la matière.

La matière est constituée de particules élémentaires : les atomes.

Actuellement, il y a 114 espèces d’atomes connues. Elles diffèrent par leurs structures et leurs masses.

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.

La matière se trouve sous forme de mélanges (homogène ou hétérogène) de corps purs.

Un corps pur est caractérisé par ses propriétés physiques (température de fusion, température d’ébullition, masse volumique, indice de réfraction, etc…) ou chimiques.

On distingue deux catégories de corps purs :

- Corps purs simples : substance constitué d’un même élément ou par des molécules constituées d’atomes identiques (H_2, O_2, Cl_2, N_2, O_3).
- Corps purs composés : ce sont des molécules possédant plusieurs types d’élément chimiques, (Ex : H_2O, $NaOH$, H_2SO_4, NH_3…).

La matière existe sous trois formes :

- Solide : les molécules ont moins de liberté, leurs mouvements se réduisent à de simples oscillations autour de positions de l’équilibre, cet état est condensé qui peut être ordonné (état cristallin) ou désordonné (état amorphe). un solide possède à la fois un volume et une forme propre.
- Liquide : les molécules sont au contact les unes des autres, leurs mouvements sont très limités mais il existe encore une agitation moléculaire et leurs positions relatives se modifient d’une façon continue, ils constituent un état fluide c-à-d déformable. c’est un état condensé et désordonné, un liquide possède un volume propre mais pas de forme propre.

- Gaz : les molécules sont très éloignées les unes des autres, d'autant plus que la pression est plus faible, c'est un état non condensé et totalement désordonné un gaz n'a pas de volume propre, de même les gaz sont doués d'expansibilité : ils occupent tout le volume qui lui est offert.

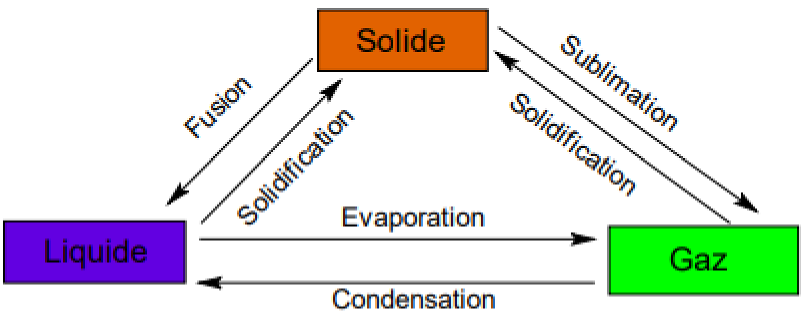
1.2 Changement d'état de la matière.

Toute substance pure peut exister sous les trois états fondamentaux de la matière en fonction de la température T et de la pression P : état solide, état liquide et état gazeux. Le passage entre états est représenté dans le schéma ci-dessous :

Le froid et la chaleur jouent un rôle très important dans le changement d'état.

Le passage de la matière de l'état solide à l'état liquide se fait par fusion, de l'état liquide à l'état gazeux par vaporisation et de l'état solide à l'état gazeux par sublimation.

Ces transformations sont illustrées ci-dessous : Les états de la matière et ses transformations.



1.3 Attraction entre atomes et molécules.

Les atomes et les molécules s'attirent avec des forces pareilles à la force gravitationnelle; ces forces augmentent à mesure que les molécules se rapprochent et déterminent la forme sous laquelle se présente la substance : de gaz, de solide ou de liquide.

Les solides ont les atomes très rapprochés les uns des autres. Les forces d'attraction sont intenses, ce qui détermine leur rigidité connue et empêche tout déplacement d'atome dans sa structure. Les molécules constituant les gaz sont relativement espacées. Ainsi les forces d'attraction sont négligeables, ce qui permet leur mouvement indépendant.

L'état liquide correspond à une situation intermédiaire à ceux présentées auparavant.

1.4 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 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 négatif 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.

1.6 Classification des corps.

Les corps se classent en 3 catégories : conducteurs, isolants et semi-conducteurs.

Les **conducteurs** opposent une faible résistance au passage du courant électrique. Tous les métaux sont des conducteurs, l'aluminium et le cuivre étant les plus utilisés.

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.

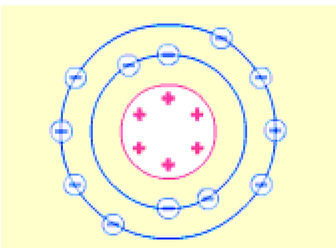
Les **semi-conducteurs** présentent une situation intermédiaire entre les conducteurs et les isolants.

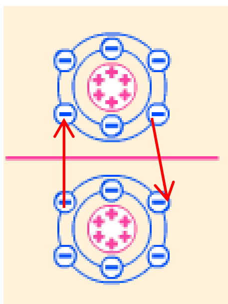
Le germanium et le silicium sont les semi-conducteurs les plus utilisés. En outre les semi-conducteurs ont déterminé un développement spectaculaire de l'électronique car ils servent à la réalisation des composants comme : diodes, transistors, circuits intégrés.

L'électricité statique est un phénomène de surface généré lorsque deux ou plusieurs surfaces entrent en contact puis sont séparées. On identifie deux domaines distincts de l'électricité : statique et dynamique.

1.7 Électricité statique.

L'électricité statique étudie les phénomènes électriques concernant la charge électrique en état de repos sur les objets.

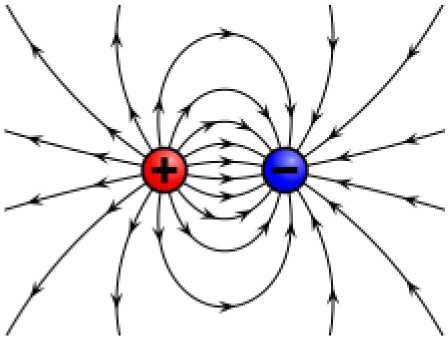




Il se produit alors une sorte de dédoublement au cours duquel des électrons négatifs sont transmis d'un atome à l'autre.

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.

1.7.1 Charge électrique.



La charge électrique est une grandeur physique qui mesure le fait qu'un objet ne soit pas électriquement neutre. Un objet peut ainsi porter une charge électrique positive ou négative. Deux charges de même signe se repoussent, tandis que deux charges de signes opposés s'attirent.

L'unité standard internationale est le Coulomb (C), qui est homogène à des ampères par seconde.

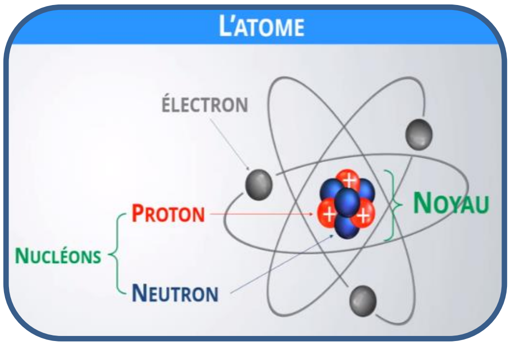
Les corps peuvent être chargés négativement ou positivement d'après le surplus ou le déficit d'électrons acquis. La charge électrique s'exprime en coulombs et son symbole est C. Un coulomb représente la charge cumulée de 6,25 x 1018 électrons.

La charge de l'électron vaut -1,6 x 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.

Vidéos learning

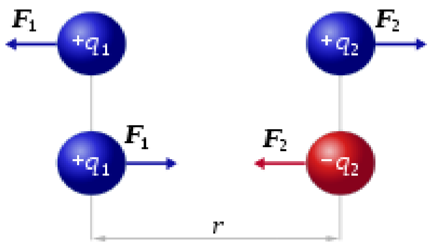
L'atome et la structure atomique

V1



Lien hypertexte www

1.7.2 Loi de Coulomb.



Dans les deux cas, la force est proportionnelle au produit des charges et varie en carré inverse de la distance entre les charges

$$|F_1| = |F_2| = k_e \frac{|q_1 \times q_2|}{r^2}$$

La loi de Coulomb exprime, en électrostatique, la force de l'interaction électrique entre deux particules chargées électriquement. Elle est nommée d'après le physicien français Charles-Augustin Coulomb qui l'a énoncée en 17851 et elle forme la base de l'électrostatique. Elle peut s'énoncer ainsi :

L'intensité de la force électrostatique entre deux charges électriques est proportionnelle au produit des deux charges et est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les deux charges. La force est portée par la droite passant par les deux 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.

L'équation de cette loi est la suivante :

$$\mathbf{F} = \mathbf{k}\frac{\mathbf{q_1 \ x \ q_2}}{\mathbf{r}^2}$$

Où on a :

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

$\mathbf{q_1}$ = la première charge en Coulomb;

$\mathbf{q_2}$ = la deuxième charge en Coulomb;

r = la distance séparant les deux charges en mètres;

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

1.7.3 Potentiel.

La différence de potentiel électrique entre deux points de l'espace ou d'un circuit permet de calculer la variation d'énergie potentielle d'une charge électrique, ou de trouver plusieurs tensions inconnues dans un circuit électrique ou électronique.

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 est exprimé en Volts.

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 :

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

UAB = la tension (d.d.p.) entre les points A et B

VA = le potentiel dans le point A

VB = le potentiel dans le point B

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

1.8 Électricité dynamique

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

1.8.1 Courant électrique

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 défini le **courant électrique**.

La grandeur qui caractérise le courant électrique s'appelle **l'intensité**. L'intensité est exprimée 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 est exprimée 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.

1.8.2 Sens du courant électrique

Le sens ***conventionnel*** correspond au déplacement des charges positives, donc du pôle positif (+) au pôle négatif (-). 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 (+).

1.9 Production de l'électricité

L'énergie électrique se distingue des autres formes d'énergie par la facilité de la transporter, de lui modifier les paramètres (tension, courant) aussi que par l'impossibilité de la stocker ce qui exige l'ajustement de la production à la consommation. Les appareils servant à la production de l'énergie électrique s'appellent générateurs électriques. Un générateur électrique transforme une énergie d'un certain type (chimique, mécanique) en énergie électrique. Parmi les générateurs électriques on peut citer les piles, les accumulateurs, les alternateurs, etc

1.9.1 Méthode chimique

Cette méthode de production de l'énergie électrique est utilisée dans le cas des ***piles et des accumulateurs.***

Une pile est réalisée à l'aide de deux métaux différents appelés électrodes, plongés dans une solution acide appelée électrolyte. L'action chimique de l'électrolyte sur les électrodes engendre un pôle positif et un pôle négatif et une différence de potentiel entre ceux-ci. La valeur de cette différence de potentiel varie entre 1 V et 2,5 V en fonction des métaux et de l'électrolyte utilisé.

1.9.2 Méthode électromagnétique

C'est la méthode industrielle de production de l'énergie électrique, utilisée dans les machines tournantes telles que les *alternateurs* et les *dynamos*.

L'énergie mécanique est ainsi transformée en énergie électrique par l'intermédiaire de l'induction électromagnétique.

NB. ***Cette méthode sera présentée en détail dans un chapitre 2 § Electromagnétisme.***

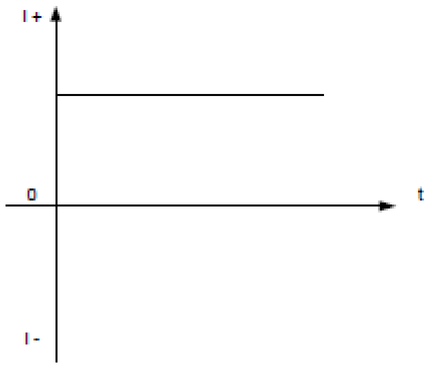
1.10 Types de courant électrique

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.

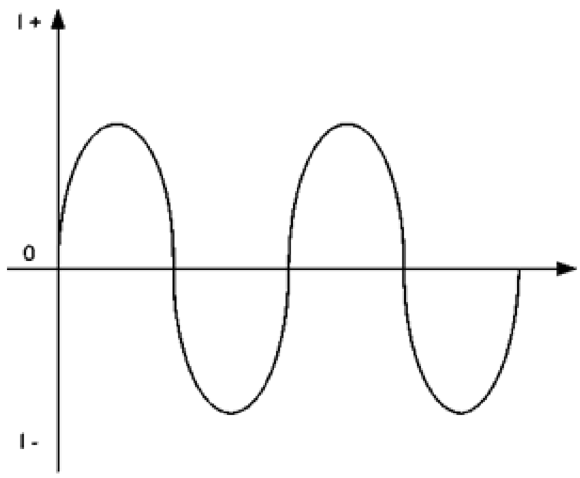
1.10.1 Courant continu

C'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 suivante



1.10.2 Courant alternatif

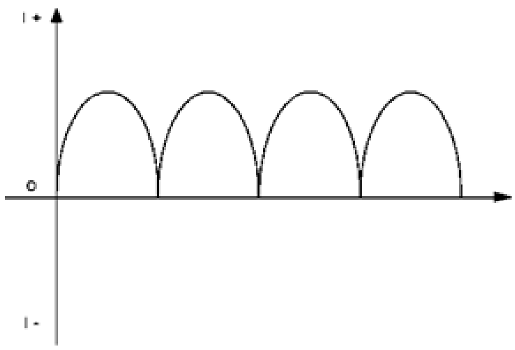
C'est un courant dont la valeur et le sens changent périodiquement. Il passe d'une valeur maximale positive à une valeur négative maximale tout en passant par le zéro. Puis il retourne à zéro et à sa valeur positive maximale et le cycle recommencent.



Cette figure présente le graphique d'un courant alternatif. Il est produit de manière industrielle par les alternateurs.

1.10.3 Courant pulsatif

C'est un courant dont la valeur change périodiquement, mais dont le sens reste toujours le même.

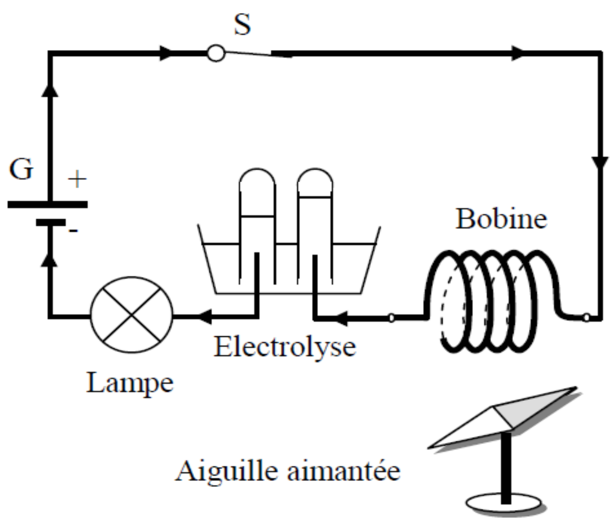


Cette figure présente le graphique d'un tel courant. Le courant pulsatif est obtenu par le redressement du courant alternatif.

1.11 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.

Un circuit électrique est un ensemble comprenant un générateur, un ou plusieurs récepteurs reliés par des fils conducteurs et parcouru par un courant électrique.



Il s'agit par exemple d'une pile ou d'une batterie.

Les récepteurs transforment l'énergie électrique transportée par le courant :

- en énergie thermique pour la lampe,
- en énergie chimique pour L'électrolyse.
- en énergie mécanique pour l'aiguille aimantée.

Lorsque l'interrupteur S est fermé, le courant électrique transporte l'énergie dans le circuit de la borne positive vers la borne négative du générateur : la lampe s'éclaire (énergie thermique), l'aiguille aimantée dévie (énergie mécanique) et l'électrolyse fonctionne (énergie chimique).

1.11.1 Effet thermique

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.

1.11.2 Effet chimique

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.

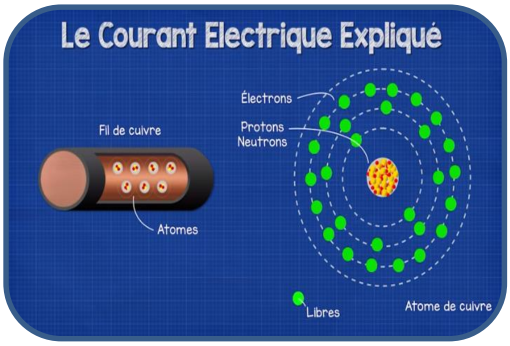
1.11.3 Effet magnétique

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.

Vidéos learning

Le Courant Électrique Expliqué

V2



Lien hypertexte www

2. Caractéristiques des composantes de circuit 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.
- 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.

2.1 Résistances

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

2.1.1 Types de résistances

D'après leur construction on distingue :

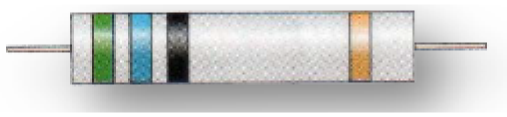
- des résistances bobinées.
- des résistances au carbone.

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.

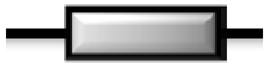



Le domaine des valeurs des résistances bobinées commence de quelques ohms et arrive jusqu'à plusieurs milliers d'ohms. La puissance de ces résistances, c'est-à- dire la quantité de chaleur qu'elles peuvent évacuer sans subir de dommage, se situe entre cinq et plusieurs centaines de watts.

Les ***résistances au carbone*** sont réalisées de particules de carbone au graphite mélangé à un matériel isolant en poudre. 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.



Résistance de 1 W

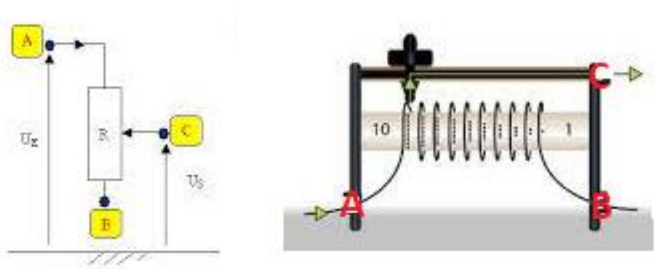


Symbole

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. L'élément résistant d'un rhéostat est représenté par un seul fil. Les rhéostats sont munis de deux ou trois bornes.



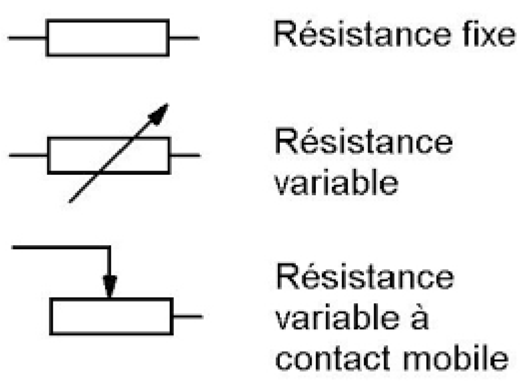
Rhéostat

Les ***potentiomètres*** sont des résistances variables utilisées pour le réglage de la tension d'un circuit. Ils ont trois bornes.

L'élément résistant et réalisé en carbone, et leur dimension plus réduite mais offrant une plage de réglage plus précise

2.1.2 Symboles

Les symboles utilisés pour la représentation des résistances dans les schémas sont présentés dans la figure ci-dessous.



2.1.3 Puissance dissipée

La puissance dissipée des résistances est une caractéristique très importante pour celles-ci. Elle indique la capacité d'évacuation de chaleur d'une résistance due au passage du courant électrique.

La puissance de dissipation s'exprime en Watts.

Plus une résistance est grande, plus sa puissance de dissipation augmente. Par sécurité, on utilise une résistance avec une puissance de dissipation de 2 W, si les calculs indiquent l'utilisation d'une résistance de 1 W.

La tolérance de la valeur de la résistance indique le pourcentage de variation possible entre la valeur réelle et sa valeur indiquée. Les producteurs fournissent sur le marché des résistances dont la tolérance se situe entre 1 et 20 %. Pour la plus part des circuits on accepte l'utilisation des résistances d'une tolérance de 10%.

2.2 Sources de tension

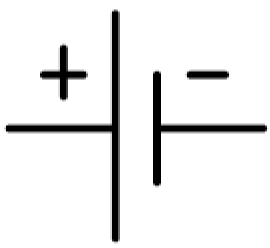
La source de tension est un appareil qui fournit la force électromotrice nécessaire pour engendrer le courant électrique dans un circuit électrique.

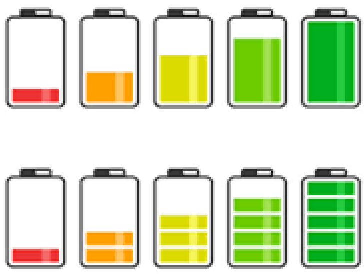
2.2.1 Types de sources

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

2.2.2 Pile

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.



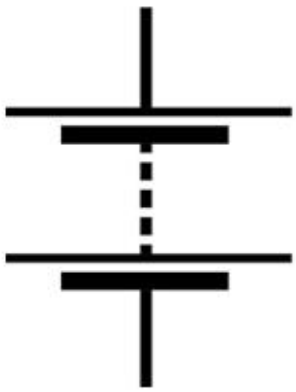


Lorsqu'on groupe de manière convenable plusieurs piles on peut obtenir des tensions plus élevées.

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 alkalino-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.

2.2.3 Accumulateur

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.

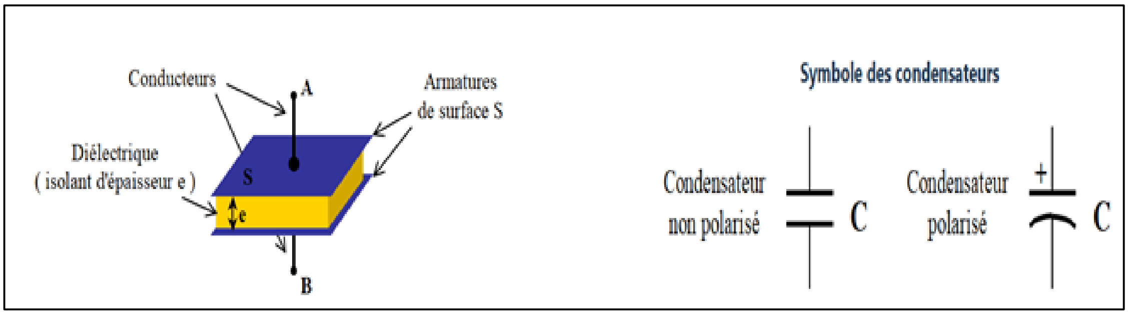
2.3 Condensateurs

Un condensateur est un composant constitué par 2 conducteurs parallèles, appelés armatures séparés sur toute l'étendue de leur surface par un milieu isolant de faible épaisseur, exprimé par sa rigidité diélectrique ε_r (epsilon) ou permittivité relative.

Les condensateurs sont des dispositifs capables d'accumuler de l'énergie électrique lorsqu'ils sont chargés d'où le terme 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 (pF) et le picofarad (pF).

Un condensateur est constitué de deux plaques métalliques séparées par un isolant, aussi appelé diélectrique (figure. ci-dessous).



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.

Les condensateurs sont classés généralement d'après le type du diélectrique utilisé.

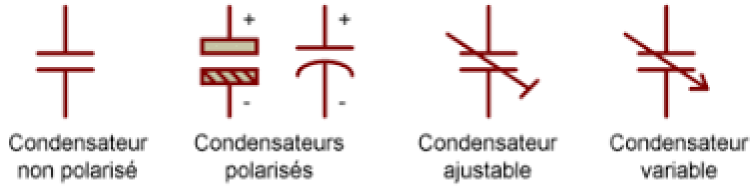
Il existe ainsi des condensateurs à l'air, au papier, à la céramique etc.

Les condensateurs sont réalisés sous diverses formes : tubulaire, plate, disque etc.

En plus tous les condensateurs sont dans une des deux catégories suivantes : fixes ou variables. (***Polarisé* ou *non Polarisé)*.**

condensateur polarisé

condensateur 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.

Dans le cas d'un condensateur axial, un trait portant le signe «-», pointe dans la direction de l'électrode qui doit être branché au potentiel inférieur. De plus près de la broche opposée, le condensateur est légèrement déformé par une rayure, toujours présente du côté de la broche assignée à la polarité plus élevée.

Dans le cas du condensateur radial, le trait comportant le même signe «-» indique l'électrode négative.

La tolérance d'un condensateur exprime en pourcentage la marge d'erreur de sa capacité indiquée par le fabricant. Elle appartient à une plage de valeurs qui commence par ± 1% et peut aller jusqu'à ± 20%.

Les principaux paramètres des condensateurs sont :

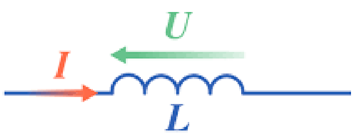
- la *tension nominale*, qui indique la valeur maximum de la différence de potentiel que l'on peut appliquer à ses bornes sans causer le claquage de son diélectrique.

- le *coefficient de température*, qui exprime le taux de variation de la capacité avec la température. Dans la plupart des cas ce coefficient est positif, mais il existe aussi des condensateurs dont le coefficient est négatif (leur capacité diminue avec l'élévation de la température), et même nul ce qui traduit la stabilité de la capacité par rapport à la variation de la température.

Le marquage des condensateurs au mica et des condensateurs à la céramique est effectué conformément au *code des couleurs des condensateurs*. Celui-ci sera présenté dans une leçon prochaine.

2.4 Inductances

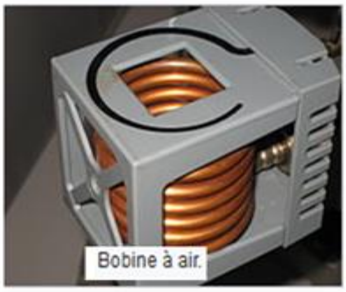
L'inductance est définie comme la propriété d'un circuit de s'opposer à toute variation du courant qui le traverse. Le composant fabriqué de manière à posséder la propriété d'inductance s'appelle inductances, bobines ou encore bobines d'inductance ou selfs.



Une bobine est un terme générique en électricité pour désigner un dipôle formé de une à une multitude de spires de fil autour d'un noyau.

Ce noyau peut être vide ou en un matériau favorisant l'induction magnétique (matériau ferromagnétique, afin d'augmenter la valeur de l'inductance).

Il peut être également fermé, avec ou sans entrefer, afin de constituer un circuit magnétique fermé.



NB : En régime continu, la tension aux bornes d'une self est nulle.

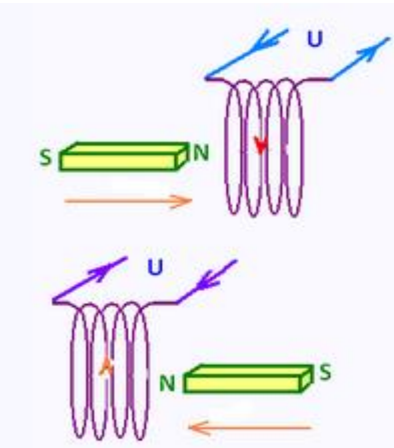
Construction	Formule	Dimensions
Bobine à air	$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}$	• L = inductance en henry (H) • μ_0 = constante magnétique = $4\pi \times 10^{-7}$ H·m^{-1} • N = nombre de spires • S = section de la bobine en mètres carrés (m^2) • l = longueur de la bobine en mètres (m)
Bobine avec noyau magnétique	$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 S}{l}$	• L = inductance en henry (H) • μ_0 = constante magnétique = $4\pi \times 10^{-7}$ H·m^{-1} • μ_r = perméabilité relative effective du matériau magnétique • N = nombre de spires • S = section effective du noyau magnétique en mètres carrés (m^2) • l = longueur effective du conducteur en mètres (m)

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.

Les bobines sont utilisées dans de nombreuses applications :

- Pour créer une impulsion de haute tension (moteurs à allumage commandé, clôture électrique tube fluorescent).
- Pour leurs propriétés électromagnétiques (électroaimants ; relais électromécaniques moteurs électriques).
- Pour le filtrage d'un signal électrique.
- Pour constituer des circuits résonants.
- Pour accorder l'impédance d'un circuit.
- Pour les alimentations à découpage.
- Pour les flashs électroniques.
- Pour les armes fonctionnant par choc électrique.



Lorsqu'un aimant est mis en mouvement à proximité d'une bobine, une tension apparait aux bornes de la bobine et devient nulle lorsque l'aimant s'immobilise.

Cette tension prend soit une valeur positive soit une valeur négative. Le signe de cette tension dépend :

- du pôle magnétique de l'aimant mis face à la bobine, et
- du sens du mouvement de l'aimant qui s'approche ou s'éloigne de la bobine.

2.5 Code de couleurs des composants

2.5.1 Code de couleurs des résistances

Le marquage des résistances s'effectue d'après leur type :

- Les résistances bobinées sont assez grandes pour qu'on puisse inscrire sur leur boîtier leur ***valeur ohmique et leur tolérance***.
- Les résistances au carbone, qui sont de petites dimensions, sont marquées d'après un ***code des couleurs des résistances***.

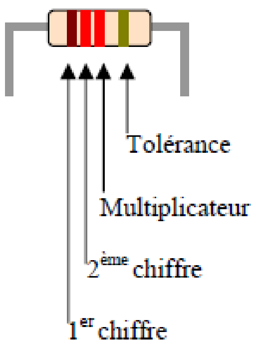
Pour réaliser la codification des résistances on a introduit un système de bandes de couleurs imprimées sur une extrémité de leur boîtier qui constitue le code de couleurs des résistances.

Ce code est utilisé pour le marquage des résistances au carbone qui sont de petites dimensions. Les résistances bobinées sont assez grandes pour qu'on puisse inscrire sur leur boîtier la valeur de la résistance et la tolérance.

La codification est basée sur le principe qu'on peut exprimer tout nombre assez près de sa valeur réelle en arrondissant cette valeur selon les deux premiers chiffres qui le composent. Lorsqu'il s'agit de résistances de précision élevée, on garde les premiers trois chiffres pour exprimer la valeur à codifier.

Le marquage des résistances à l'aide du code de couleur utilise 4 bandes de couleurs pour les résistances de tolérance supérieure à 2%, et 6 bandes pour les résistances de tolérance 2% ou encore mieux. On trouve aussi des résistances ayant un marquage de 3 ou 5 bandes.

Code des couleurs :



Valeur : 12 x 100 Ω
Soit : 1,2 k Ω à ±5%

Couleur	1er chiffre	2ème chiffre	multiplicateur	Tolérance
			x 0,01 Ω	±10 %
			x 0,1 Ω	±5 %
Noir	0	0	x 1 Ω	±20 %
Marron	1	1	x 10 Ω	±1 %
Rouge	2	2	x 100 Ω	±2 %
Orange	3	3	x 1 kΩ	
Jaune	4	4	x 10 kΩ	
Vert	5	5	x 100 kΩ	±0,5 %
	6	6	x 1 MΩ	±0,25 %
	7	7		±0,1 %
Gris	8	8		±0,05 %
Blanc	9	9		

A) Marquage à trois bandes

L'interprétation du marquage se fait de gauche à droite : les premiers deux indiquent les deux chiffres de la valeur de la résistance, la troisième indique un facteur de multiplication décimal. La tolérance des résistances marquées avec trois bandes est implicite, de 20%.

B) Marquage à quatre bandes

Les significations des premiers trois bandes sont les mêmes que dans le cas du marquage à trois bandes : de gauche à droite, les premiers deux bandes indiquent les deux chiffres de la valeur de la résistance, la troisième indique un facteur de multiplication décimal; la quatrième indique la tolérance en pourcentage.

Les résistances habituellement utilisées ont une tolérance de 5% et portent ainsi un marquage à quatre bandes.

Note : Si la quatrième bande n'est pas indiquée, la résistance a une tolérance de 20 %.

Exemple :

Soit une résistance à quatre bandes de couleurs vert, jaune, rouge et or. L'interprétation est la suivante: vert = 5, jaune = 4, rouge = 2 zéro et or = 5%.

La valeur de la résistance est 5400 Ω ± 5%, elle se situe dans la plage

5400 - 270 = 5130 Ω et 5400 + 270 = 5670 Ω

C) Marquage à cinq bandes

La présence d'une cinquième bande est nécessaire lorsqu'on veut indiquer le coefficient de fiabilité.

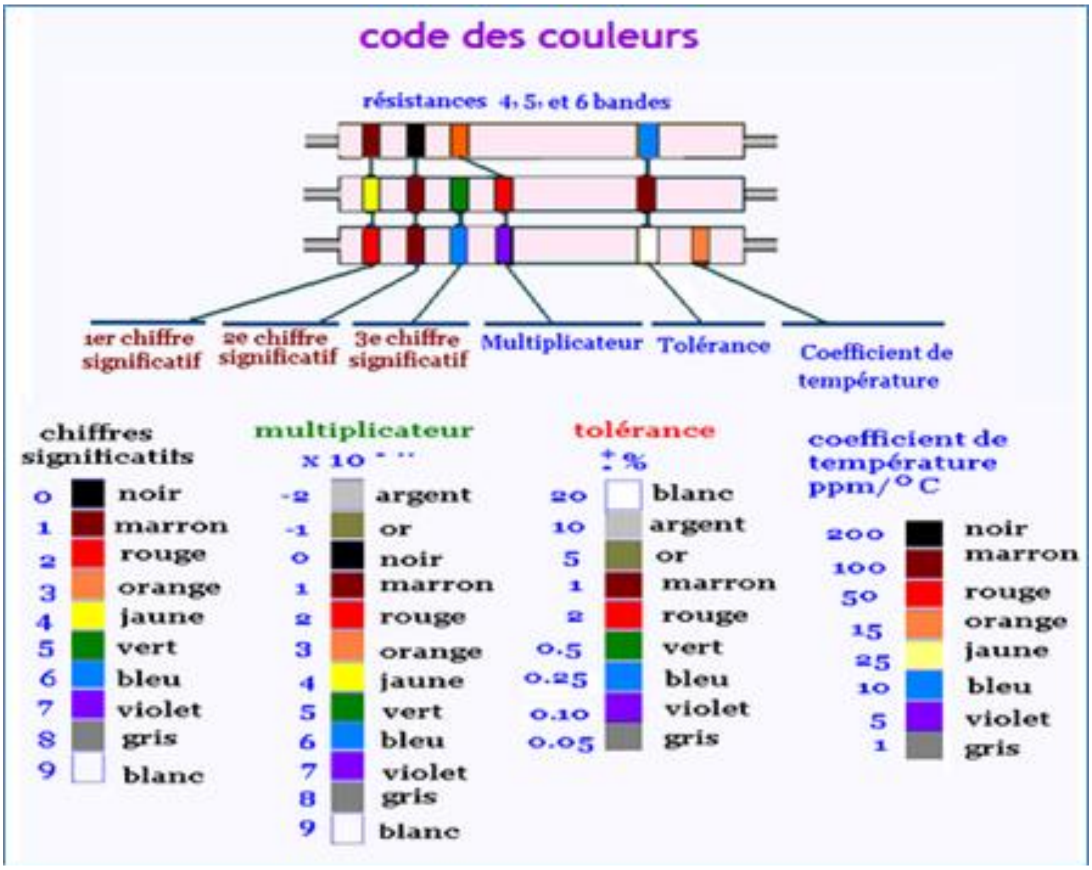
Le coefficient de fiabilité représente le taux de défaillance, exprimé en pourcentage, par 1000 heures d'opération.

D) Marquage à six bandes

Dans le cas où la tolérance est de 2% ou encore plus faible, on utilise une sixième bande pour le marquage: les premières 3 bandes pour indiquer les 3 chiffres de la valeur de la résistance, la quatrième pour le multiplicateur, la cinquième pour la tolérance et la sixième pour le coefficient de fiabilité.

Remarque : Pour mesurer la valeur ohmique de la résistance on utilise l'ohmmètre

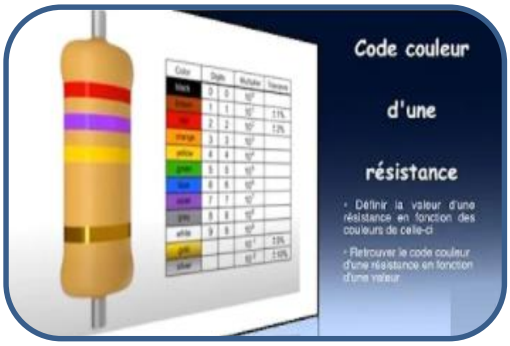
Couleur	1* bande	2*bande	3* bande	Multiplicateur		5* tolérance	
Noir	0	0	0	10°			
Brun	1	1	1	10^1		1 %	
Rouge	2	2	2	10^2		2%	1
Orange	3	3	3	10^3			
Jaune	4	4	4	10^4			
Vert	5	5	5	10^5			
Bleu	6	6	8	10^6			
Violet	7	7	7	10^7			
Gris	8	8	8	10^8			
Blanc	9	9	9	10^9			
Or				10^{-1}		5%	
Argent				10-2		10%	



Vidéos learning

Code couleur d'une résistance

V3



Lien hypertexte www

A) Les valeurs normalisées des résistances

Il serait inutile de fabriquer des résistances dans toutes les valeurs ohmiques possibles. La principale raison est que les valeurs normalisées ont été établies de telle sorte qu'une combinaison de ces dernières suffit à créer la résistance voulue.

Dans les cas où une très grande précision est requise, les manufacturiers d'appareils électroniques utilisent des résistances de précision fabriquées spécialement pour satisfaire leur besoin.

Les valeurs normalisées en ohms (dites les valeurs standards) sont les suivantes :

Valeurs standards de résistances								
0.10	1.0	10	100	1k0	10k	100k	1M0	10M0
0.11	1.1	11	110	1k1	11k	110k	1M1	11M0
0.12	1.2	12	120	1k2	12k	120k	1M2	12M0
0.13	1.3	13	130	1k3	13k	130k	1M3	13M0
0.15	1.5	15	150	1k5	15k	150k	1M5	15M0
0.16	1.6	16	160	1k6	16k	160k	1M6	16M0
0.18	1.8	18	180	1k8	18k	180k	1M8	18M0
0.20	2.0	20	200	2k0	20k	200k	2M0	20M0
0.22	2.2	22	220	2k2	22k	220k	2M2	22M0
0.24	2.4	24	240	2k4	24k	240k	2M4	
0.27	2.7	27	270	2k7	27k	270k	2M7	
0.30	3.0	30	300	3k0	30k	300k	3M0	
0.33	3.3	33	330	3k3	33k	330k	3M3	
0.36	3.6	36	360	3k6	36k	360k	3M6	
0.39	3.9	39	390	3k9	39k	390k	3M9	
0.43	4.3	43	430	4k3	43k	430k	4M3	
0.47	4.7	47	470	4k7	47k	470k	4M7	
0.51	5.1	51	510	5k1	51k	510k	5M1	
0.56	5.6	56	560	5k6	56k	560k	5M6	
0.62	6.2	62	620	6k2	62k	620k	6M2	
0.68	6.8	68	680	6k8	68k	680k	6M8	
0.75	7.5	75	750	7k5	75k	750k	7M5	
0.82	8.2	82	820	8k2	82k	820k	8M2	
0.91	9.1	91	910	9k1	91k	910k	9M1	

Le tableau précédent met en évidence les valeurs standards de résistances dans les dizaines d'ohms. On constate que ces résistances sont au nombre de vingt-quatre et que les valeurs standards correspondent aux multiples et aux sous-multiples de ces valeurs. Pour mémoriser toutes les valeurs standards de résistances, il suffit d'apprendre ces vingt-quatre valeurs, soit:

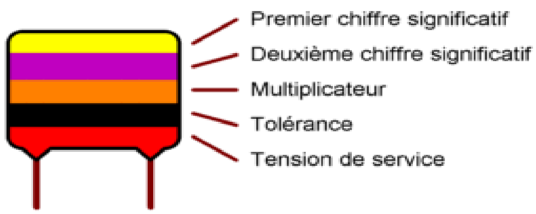
10, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 20, 22, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 43, 47, 51, 56, 62, 68, 75, 82, 91.

2.5.2 Code de couleurs des condensateurs

Le code de couleurs des condensateurs a été établi pour le marquage des condensateurs à céramique et au mica. Le marquage indique la capacité du condensateur, la tolérance et le coefficient de température.

On utilise les mêmes couleurs que pour le codage des résistances, mais les valeurs codées sont exprimées en picofarads (pF), car il s'agit de petits condensateurs. La figure ci-jointe montre le marquage des deux types de condensateurs mentionnés.

Remarque : Lorsqu' aucune tension nominale n'a pas été spécifiée, elle est habituellement de 400 à 600V.



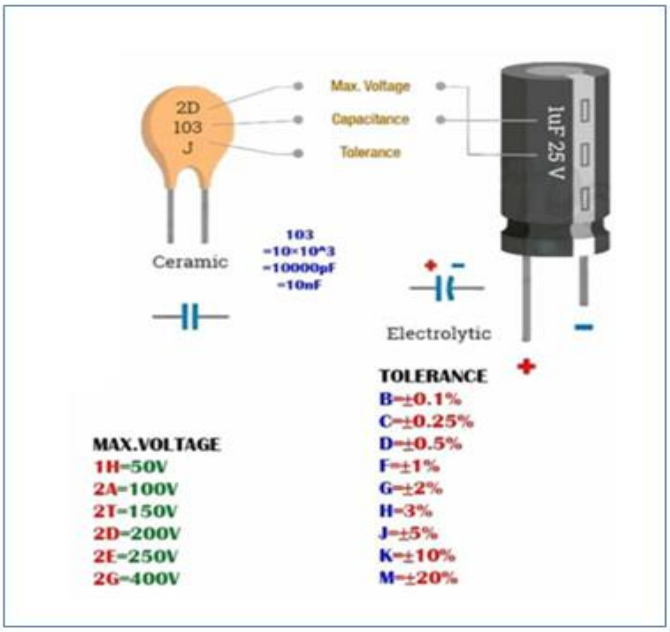
Chiffres significatifs	Multiplicateur	Tolérance	Coefficient température	Tension de service
		Rien : +/- 20 %		Rien : 500 V
	Argent : x 0,01	Argent : +/- 10 %		Argent : 2000 V
	Or : x 0,1	Or : +/- 5 %	Or : + 100	Or : 1000 V
Noir : 0	Noir : x 1	Noir : +/- 20 %	Noir : 0	
Marron : 1	Marron : x 10	Marron : +/-1%	Marron : - 30	Marron : 100 V
Rouge : 2	Rouge : x 100	Rouge : +/- 2 %	Rouge : - 80	Rouge : 200 V
Orange : 3	Orange : x 1 K		Orange : - 150	Orange : 300 V
Jaune : 4	Jaune : x 10 K		Jaune : -220	Jaune : 400 V
Vert : 5	Vert : x 100 K	Vert : +/- 5 %	Vert : - 330	Vert : 500 V
Bleu : 6	Bleu : x 1 M		Bleu : - 470	Bleu : 600 V
Violet : 7	Violet : x 10 M		Violet : - 750	Violet : 700 V
Gris : 8			Gris : - 2200	Gris : 800 V
Blanc : 9		Blanc : +/- 10 %		Blanc : 900 V

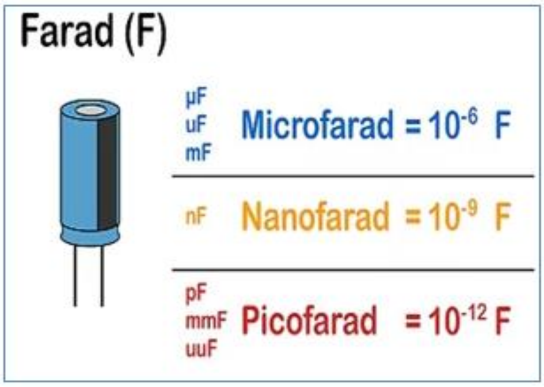
Multiples et sous-multiples des unités de mesure

Dans de nombreuses applications électriques et électroniques, les unités de base (le volt, l'ampère, l'ohm, le farad, le henry etc.) s'avèrent trop petites ou encore trop grandes.

Par exemple, les résistances peuvent atteindre des valeurs de millions d'ohms pendant qu'il y a des condensateurs dont la capacité n'est que de quelques millionièmes de farads, ou encore des courants inférieurs à une millième d'ampère. Dans ces cas ou dans des cas semblables, il convient d'utiliser des multiples ou des sous-multiples de ses unités.

Les figures et tableaux suivants illustrent les principaux sous-multiples des unités de mesure.





NOM (SYMBOLE)	VALEUR	PUISSANCE
exa (E)	1 000 000 000 000 000 000 d'unités	10^{18}
peta (P)	1 000 000 000 000 000 d'unités	10^{15}
téra (T)	1 000 000 000 000 d'unités	10^{12}
giga (G)	1 000 000 000 d'unités	10^{9}
mega (M)	1 000 000 d'unités	10^{6}
kilo (k)	1 000 unités	10^{3}
hecto (h)	100 unités	10^{2}
déca (da)	10 unités	10^{1}
déci (d)	0,1 unité	10^{-1}
centi (c)	0,01 unité	10^{-2}
milli (m)	0,001 unité	10^{-3}
micro (µ)	0,000 001 unité	10^{-6}
nano (n)	0,000 000 001 unité	10^{-9}
pico (p)	0,000 000 000 001 unité	10^{-12}
femto (f)	0,000 000 000 000 001 unité	10^{-15}
atto (a)	0,000 000 000 000 000 001 unité	10^{-18}

3. Propriétés des circuits à courant continu.

La loi découverte par le physicien allemand Ohm au début du XIXème 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.

3.1 Loi d'Ohm

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 :

$$\mathbf{R = U / I}$$

Où : 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 :

$$\mathbf{I = U / R}$$

Et

$$\mathbf{U = R \times I}$$

3.2 Puissance électrique

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

L'énergie électrique consommée dans les récepteurs provient d'une source. Le récepteur est caractérisé par une résistance. Par ailleurs, lorsqu'un courant circule dans une résistance, le déplacement des électrons d'un atome à l'autre provoque un dégagement de chaleur. Cette puissance dissipée par la résistance sous forme de chaleur, est égale à la puissance fournie par la source si on néglige les pertes inévitables, comme celles dans les conducteurs de liaison.

La puissance dissipée par la résistance est d'autant plus grande que le courant y circulant est grand ; en outre l'augmentation de la tension à ses bornes se traduit par une augmentation proportionnelle du courant qui circule dans cette même résistance.

On peut conclure que la puissance électrique 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 :

$$\mathbf{P = U \times I \quad ou \quad P = E \times I}$$

3.2.1 Puissance disponible

Considérons une source de f.é.m. E qui débite dans un circuit un courant d'intensité I. La puissance débitée par la source dans le circuit, donc disponible à la consommation des récepteurs contenus par celui-ci, est :

$$\mathbf{P = E \times I}$$

3.2.2 Puissance dissipée

Soit une résistance R branchée dans un circuit parcouru par un courant d'intensité I. Si la tension à ses bornes est U, on a conclu que la puissance dissipée est :

$$\mathbf{P = U \times I}$$

Il existe des relations équivalentes à celle-ci qui, d'après le cas s'avère très utiles dans les applications :

Si on remplace le courant I par son expression déduite de la loi d'Ohm, on obtient :

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

- Remplacement de la tension

Si on remplace la tension U par son équivalence fournie par la loi d'Ohm, on obtient :

$$P = U \times I \qquad P = U \times \frac{U}{R} \qquad P = U \times \frac{U^2}{R}$$

4. Différents groupements des composants de circuit à courant continu.

4.1 Définitions

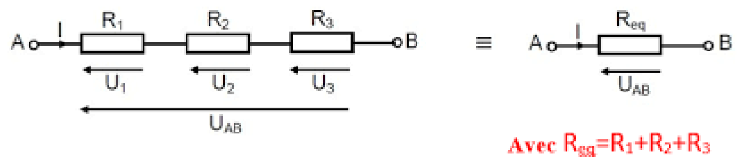
Afin de pouvoir utiliser les récepteurs d'énergie électrique, il faut les brancher dans des circuits électriques. Nous connaissons maintenant les différents composants de circuit passifs et actifs. Le raccord entre ces composants conduit à la réalisation des circuits électriques, ce qui permet la circulation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

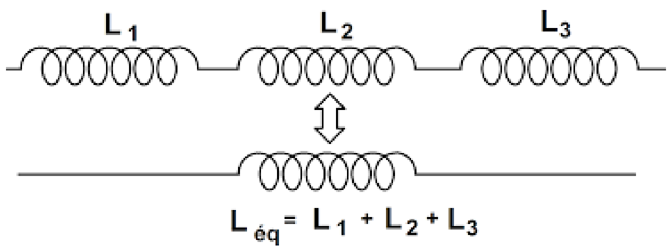
Les montages en série, en parallèle et mixte (en série - parallèle) composent la plus part des circuits, d'où l'importance particulière qu'on donne à leur étude.

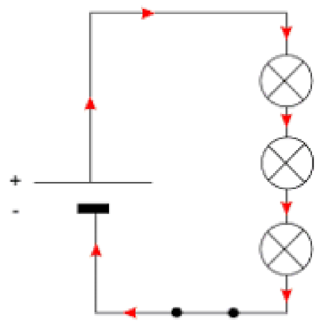
4.1.1 Montage en série

On dit que les composants d'un circuit électrique (ou encore des appareils, dispositifs, 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. (Exemple : Figure. ci-dessous).







Un circuit en série

Un groupement série est alimenté par les deux bornes qui restent non occupées et représente l'ensemble.

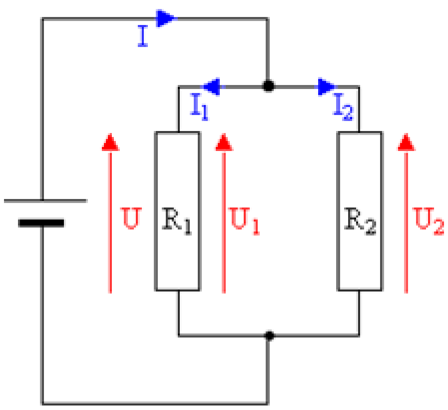
La **tension** d'alimentation du groupement se distribue sur tous les composants de manière que la somme des tensions à leurs bornes est égale à celle d'alimentation.

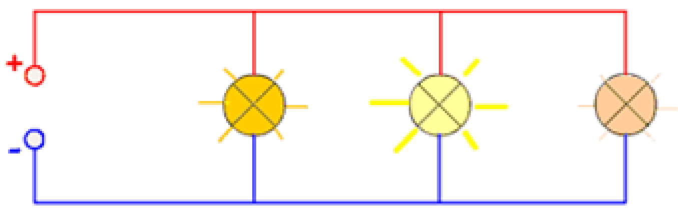
Le courant dans tous les composants du groupement série est le même, ce qui évident du fait qu'il n'y a qu'un seul chemin pour le passage du courant.

Lorsqu'on considère un groupement série alimenté par une source, la *somme des puissances* absorbées par les composants est *égale* à la *puissance* fournie par la *source*.

4.1.2 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 On trouve ainsi, aux bornes de chacun des composants la *même différence de potentiel* ce qui est la tension d'alimentation du groupement. (Exemple : Figure. ci-dessous).



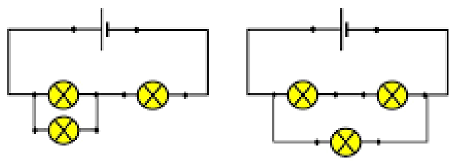


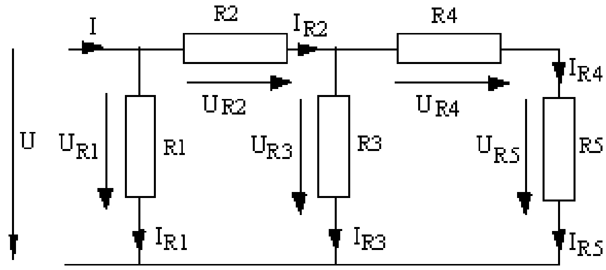
La somme des courants circulant dans les composants du groupement parallèle est égale au courant d'entrée dans le groupement (soit le courant débité par la source). Cette remarque qui tient de l'évidence car le courant qui entre dans le groupement parallèle se ramifie pour emprunter tous les chemins qui lui sont offerts par les composants du groupement.

Lorsqu'on considère le groupement parallèle alimenté par une source, la somme des puissances absorbées par les composants est égale à la puissance fournie par la source.

4.1.3 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 (Exemple : Figure ci-dessous).





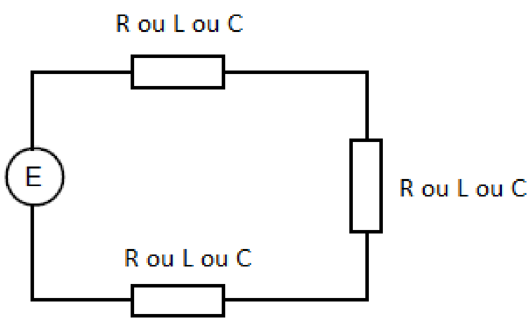
L'étude d'un circuit mixte s'appuie sur les notions relatives aux montages en série et parallèle.

4.2 Circuit équivalent d'un groupement série

On dit que les composants d'un circuit électrique sont branchés en série lorsqu'ils sont connectés dans un ordre successif, ce qui ne permet au courant électrique qu'un seul chemin pour son passage.

4.2.1 Schématisation

Le montage série comprend trois récepteurs (résistance ou inductance ou capacité).
On remarque leur branchement bout à bout, la fin d'une avec le début de la suivante.

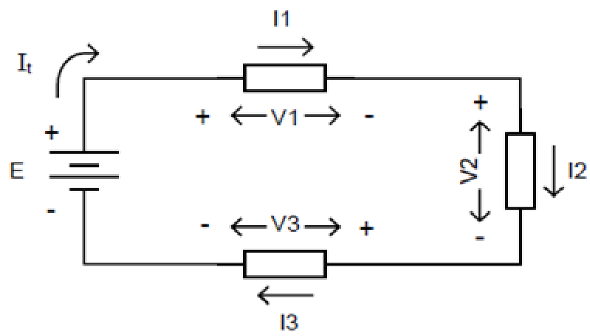


4.2.2 Caractéristiques électriques

Le ***courant*** dans un montage série est le même à travers tous les éléments du circuit. L'ouverture du circuit dans un point quelconque produit l'interruption du courant. L'intensité du courant dans l'une des récepteurs, est égale à l'intensité totale du circuit.

La ***tension*** aux bornes de chaque composant dépend de ses caractéristiques, mais la somme des tensions aux bornes de tous les composants est égale à la tension de la source.

La figure ci-dessous, présente l'illustration des caractéristiques courant et tension pour un circuit série.



Remarque : Dans la représentation schématique des circuits électriques, on utilise le sens conventionnel du courant, soit du pôle positif vers le pôle négatif.

4.2.3 Résistance équivalente dans un circuit série :

Dans un groupement série de résistances, la résistance de l'ensemble que l'on appelle ***résistance équivalente*** (Req), est égale à la somme des résistances du groupement série.

L'équation qui exprime le groupement série est la suivante :

$$\mathbf{R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \text{—} + R_n.}$$

4.2.4 Inductance équivalente dans un circuit série :

Dans un groupement série des inductances, l’inductance de l’ensemble que l’on appelle ***l'inductance équivalente*** (Leq), est égale à la somme des inductances du groupement série.

L'équation qui exprime le groupement série des inductances est :

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

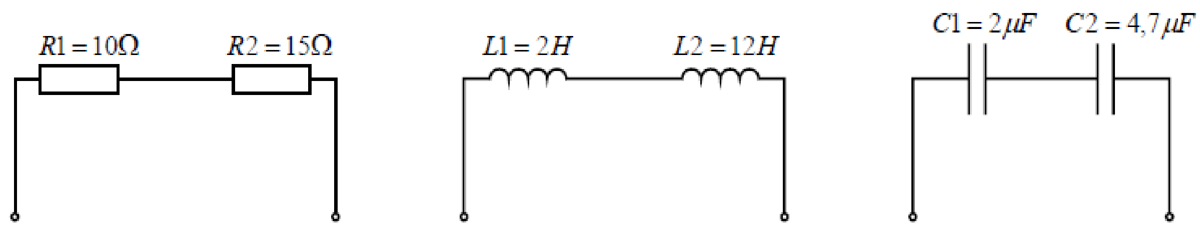
4.2.5 Capacité équivalente

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*** (Ceq) d'un groupement série de condensateurs est calculée avec la formule suivante :

$$1/Ceq = 1/C1 + 1/C2 + 1/C3 + \dots + 1/Cn$$

Exemple:

La figure suivante résume le calcul de la résistance, inductance et capacité équivalente dans le cas simple d'un groupement série de deux éléments.



$$Req = R1 + R2 = 10\Omega + 15\Omega$$
$$= 25\Omega$$

$$Leq = L1 + L2 = 2H + 12H$$
$$= 14H$$

$$\frac{1}{Ceq} = \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2}$$

$$\frac{1}{Ceq} = \frac{1}{2\mu F} + \frac{1}{4{,}7\mu F}$$

$$\frac{1}{Ceq} = 0{,}712766$$

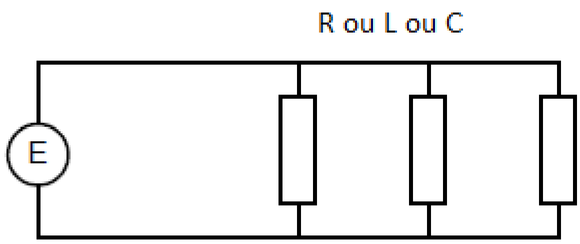
$$Ceq = 1{,}40299\mu F$$

4.3 Circuit équivalent d'un groupement parallèle

Un groupement d'éléments est considéré comme *parallèle* lorsque tous ceux-ci sont connectés directement aux bornes de la source. Aux bornes de chaque élément la tension est la même, celle de la source.

4.3.1 Schématisation

La figure ci-dessous montre un branchement de trois récepteurs en parallèle.



4.3.2 Caractéristiques électriques

Le ***courant total*** fourni par la source se divise dans chacune des branches du groupement parallèle. En conséquence le courant total est la somme des courants dans chacune des branches.

L'équation qui illustre ce type de groupement est la suivante :

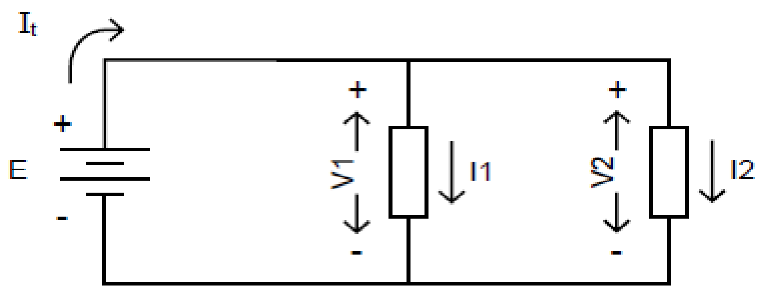
$$I_t = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$$

La ***tension*** aux bornes de tous les éléments d'un groupement parallèle est la même que celle de la source. Ainsi plusieurs récepteurs qui fonctionnent sous la même tension seront branchés en parallèle.

L'équation des tensions pour le groupement parallèle est :

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

La figure ci-dessous, résume le comportement du ***courant*** et de la ***tension*** pour un groupement parallèle.



4.3.3 Résistance équivalente

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.

4.3.4 Inductances en parallèle

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

$$1/L_t = 1/L_1 + I/L_2 + I/L_3 + \ldots + 1/L_n.$$

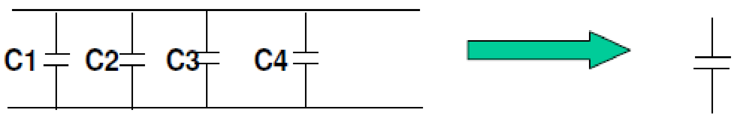
4.3.5 Capacité équivalente

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 équivalente*** d'un groupement parallèle est supérieure à la plus grande capacité qui compose l'ensemble.

L'équation illustrant le groupement parallèle des condensateurs est la suivante :

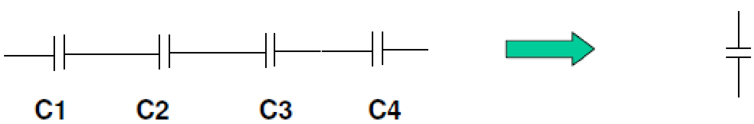
$$C_t = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots + C_n.$$

En parallèles



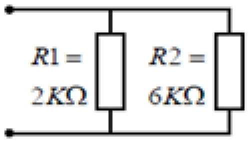
$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$

En série



$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4}$$

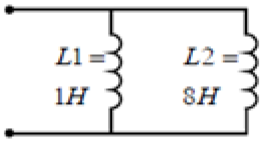
La figure ci-dessous, résume le calcul de la résistance, inductance et capacité équivalente dans le cas simple d'un groupement parallèle de deux éléments.



$$Req = \frac{R1xR2}{R1+R2}$$

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

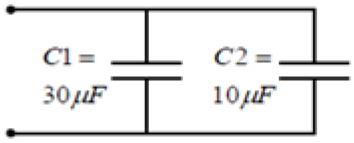
$$Req = 1500\Omega$$



$$Leq = \frac{L1 * L2}{L1+L2}$$

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

$$Leq = 889mH$$



$$Ceq = C1 + C2$$

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

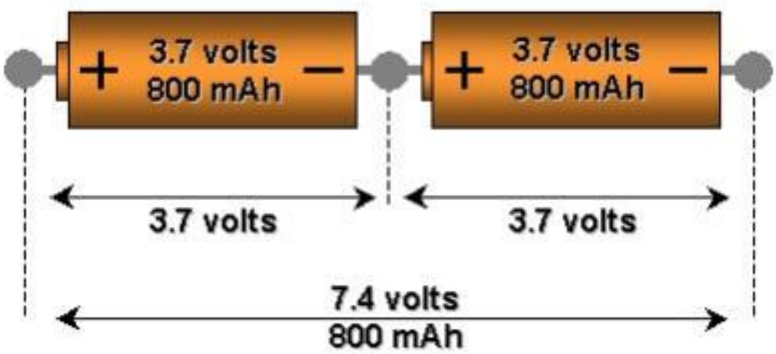
$$Ceq = 40\mu F$$

4.4 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.

4.4.1 Groupement série

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.



Pour faire un voltage plus élevé, en série, les voltages s'addition, mais les ampères ne s'additionne pas.

Le montage en série consiste à relier des batteries en alternant les polarités, la première batterie aura le + relié au - de la deuxième batterie et la deuxième batterie aura le + relié au - de la troisième batterie et ainsi de suite.

Les relations mathématiques de cette équivalence sont les suivantes :

- ***$E_{eq} = E_1 + E_2$ (f.é.m).***
- ***$R_{eq} = r1 + r_2$ (pour la résistance interne).***

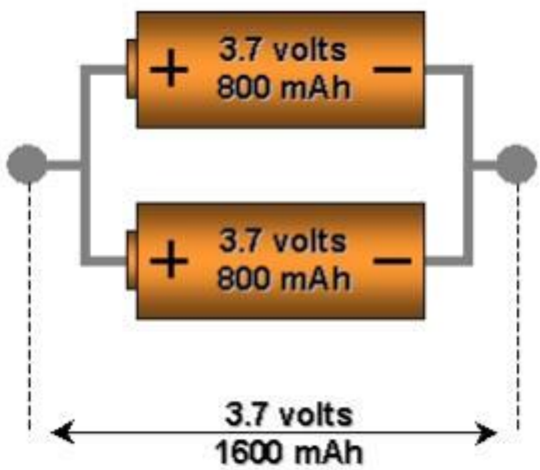
Dans le cas d'un groupement série de sources identiques (de caractéristiques E et r), la force électromotrice (E_{eq}) et la résistance interne (r_{eq}) de l'ensemble vaut la force électromotrice d'une source multipliée par le nombre de sources du groupement, respectivement la résistance interne multipliée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

Les relations mathématiques de cette équivalence sont les suivantes :

- ***Eeq = n x E (pour la f.é.m).***
- ***req = n x r (pour la résistance interne).***

4.4.2 Groupement parallèle

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.



La mise en parallèle des piles nécessite de disposer d'éléments strictement identiques pour que les éléments ne se déchargent les uns dans les autres. La moindre différence de tension, va occasionner des fuites qui vont devenir des pertes, et réduire la capacité attendue. Si un élément est plus faible que les autres, ceux-ci vont débiter dans le plus faible et se décharger.

En parallèle, les voltages ne s'additionne pas, mais les ampères s'addition. Naturellement, pour que cela se produise, il faut que les pôles positifs de chaque pile soient reliés entre eux, de même que les pôles négatifs. Aux bornes de l'ensemble, le voltage est égal à celle fournie par une seule pile mais l'ampérage total est égal à la somme des ampérages de chaque pile.

Dans le cas d'un groupement parallèle de sources identiques (de caractéristiques E et r), la force électromotrice (Eeq) et la résistance interne (req) de l'ensemble vaut la force électromotrice d'une source, respectivement la résistance interne divisée par le même nombre.

Les relations mathématiques de cette équivalence sont les suivantes :

- ***Eeq = E (pour la f.é.m).***
- ***req = r/n (pour la résistance interne).***

4.5 Simplification des circuits à courant continu.

On a décrit précédemment les divers groupements des composants les caractéristiques des circuits à courant continu. Ci-dessous seront présentées des techniques appropriées pour la simplification et la résolution des circuits.

4.5.1 Circuit série

On parle d'un *branchement série* de composants, lorsque ceux-ci sont connectés dans un ordre successif, n'offrant qu'un seul chemin au passage du courant. Ci - dessous il est présenté un court rappel des caractéristiques des circuits série.

A) Résistance

Dans un circuit série, la résistance équivalente (Req) est égale à la somme de chaque résistance formant le circuit. On peut écrire donc:

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

B) Courant

Dans un circuit série, le courant est identique dans tous les points du circuit, conséquence de l'existence d'un seul chemin pour la circulation des électrons.

$$I_t = I_1 = I_2 = I_3 \cdots = I_n$$

C) Tension

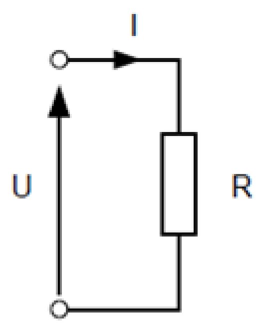
Dans un circuit série, la somme des chutes de tensions aux bornes des composants est égale à la tension de la source.

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

La **loi de maille** 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.

Lorsqu'on parle de somme algébrique il faut établir la convention d'après laquelle on attribue le signe aux différences de potentiel.

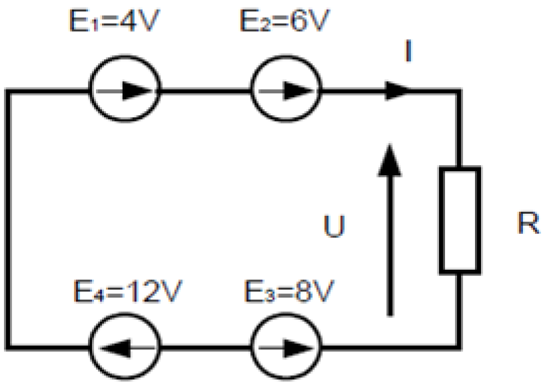
Ainsi la polarité d'une tension aux bornes d'une résistance est la suivante : la borne d'entrée du courant a un potentiel supérieur à celle de sortie.



Lorsqu'on applique la loi de maille, il faut parcourir la boucle fermée à partir d'un point dans un sens préétabli. Voici un exemple d'application de la loi de maille pour un circuit série.

Exemple :

Soit le circuit, présenté sur la figure suivante. Déterminer la tension aux bornes de la résistance du circuit.



On peut appliquer la loi de maille de Kirchhoff, ce qui donne :

$$E_1 + E_2 - E_3 - U + E_4 = 0$$

$$U = E_1 + E_2 - E_3 + E_4$$

$$U = 4\ V + 6V - 8V + 12V = 14V.$$

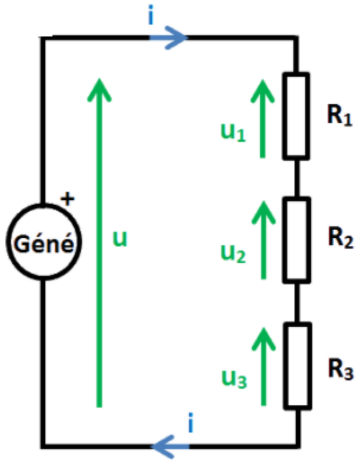
D) Puissance

La puissance dissipée par les résistances provient toujours d'une source. Dans un ***circuit série***, la *puissance totale fournie par la source est égale à la somme des puissances dissipées par chacune des résistances* :

$$\mathbf{P_t = P_1 + P_2 + P_3 \ldots + P_n}$$

E) Résolution des circuits série

Résoudre un circuit électrique signifie déterminer les paramètres électriques du circuit lorsqu'on connaît sa composition, les caractéristiques des composants et des sources.



La résolution du circuit série nécessite à calculer :

- la résistance équivalente.
- le courant circulant dans le circuit.
- les tensions aux bornes de chacune des résistances.
- la puissance dissipée par chacune des résistances.
- la puissance fournie par la source.

- Calcul de la résistance équivalente

La résistance équivalente d'un groupement série est la somme de chacune des résistances du groupement. Donc :

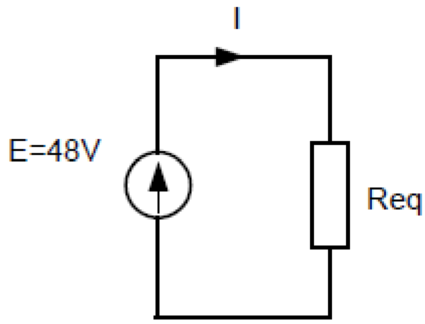
Req = R1 + R2 + R3

Req = 12 Ω + 8 Ω + 4 Ω

Req = 24 Ω

- Calcul du courant

Après le remplacement du groupement série par la résistance équivalente, on obtient le circuit suivant :



On applique la loi d'Ohm pour le calcul du courant dans le circuit :

I = E / Req

I = 48 V / 24 Ω

I = 2 A

- Calcul des tensions

On applique de nouveau la loi d'Ohm pour le calcul des tensions aux bornes des résistances.

U1 = R1 x I	U2 = R2 x I	U3 = R3 x I
U1 = 12 Ω x 2 A	U2 = 8 Ω x 2 A	U3 = 4 Ω x 2A

- Calcul des puissances dissipées par les résistances

Il suffit d'appliquer une des expressions de la puissance d'une résistance. Soit :

P1 = U1 x I	P2 = U2 x I	P3 = U3 x I
P1 = 24 V x 2 A	P2 = 16 V x 2 A	P3 = 8 V x 2 A

On pourrait également utiliser la formule la puissance en fonction de la résistance et du courant :

$$\mathbf{P = R \times I^2}$$

Ou encore celle en fonction de la tension et de la résistance :

$$P = U^2 / R.$$

Le résultat aurait été le même.

Exemple : Calcul de la puissance fournie par la source

- Pt = E x I.
- Pt = 48 V x 2 A
- Pt = 96 W

On peut effectuer une vérification de l'exactitude du calcul en comparant la valeur trouvée pour la puissance de la source avec la somme des puissances dissipées par chacune des résistances.

- $P_t = P_1 + P_2 + P_3$
- P_t = 48 W + 32 W +16 W
- P_t = 96 W

4.5.2 Circuit parallèle

On parle d'un branchement parallèle de composants, lorsque ceux-ci sont connectés à deux mêmes bornes, voir directement aux bornes de la source. La différence de potentiel aux bornes des composants du groupement parallèle est égale à la valeur de la tension de la source. Ci-dessous il est présenté un court rappel des caractéristiques des circuits parallèles.

<u>Résistance</u>

Dans un circuit parallèle, la résistance équivalente (Req) est égale à l'inverse de la somme de chacune des conductances formant le circuit. On peut écrire donc:

$G_{eq} = G_1 + G_2 + G_3 ... + G_n$

Geq = 1/R1 + I/R2 + 1/R3 + ….. + 1/Rn

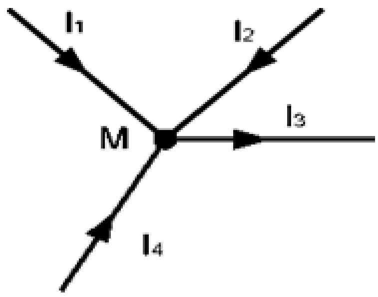
Req = 1/Geq.

A) <u>Courant</u>

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

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

La ***loi du nœud***, formulée par ***Kirchhoff***, démontre cette caractéristique des circuits parallèle. 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.



Cette figure donne l'exemple de cette loi. Dans le nœud M:

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

$$I_3 = I_1 + I_2 + I_4.$$

B) <u>Tension</u>

Dans un circuit parallèle, la tension aux bornes de chacune des résistances est égale à la tension de la source :

$$E = U_1 = U_2 = U_3 \cdots = U_n$$

C) Puissance

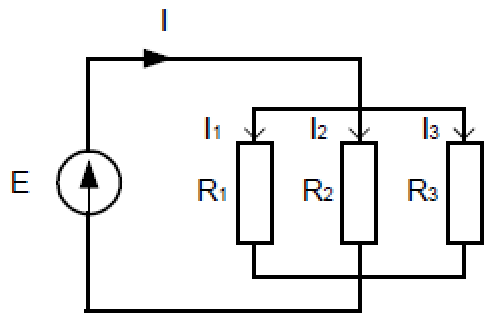
La puissance consommée dans les résistances du groupement est fournie par la source. Alors, de même que pour le circuit série, la puissance fournie par la source est égale à la somme des puissances dissipées par chacune des résistances du circuit parallèle.

Pt = P1+ P2 + P3 ······ + Pn

D) Résolution des circuits parallèle

Sur la figure suivante est présenté un circuit parallèle à résoudre. Les caractéristiques des composants et de la source sont :

E = 24 V ; R1=12 Ω ; R2 = 8 Ω ; R3 = 4 Ω.



Pour la résolution du circuit il faut calculer :

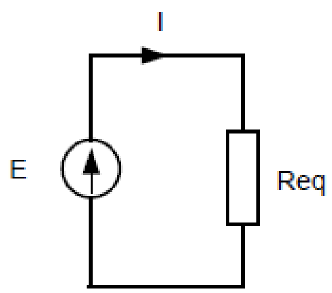
- la résistance équivalente.
- le courant fourni par la source.
- le courant dans chaque branche du circuit.
- la puissance dissipée par chacune des résistances.
- la puissance fournie par la source.
- Calcul de résistance équivalente

Pour le groupement parallèle la résistance équivalente est égale à l'inverse de la somme de chacune des conductances du circuit :

$G_{eq} = G_1 + G_2 + G_3$

$G_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$

$G_{eq} = 1/12\ \Omega + 1/8\ \Omega + 1/4\ \Omega$



G_{eq} = 0,458 S

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

R_{eq} = 2,182 Ω

- Calcul du courant fourni par la source

Pour le calcul du courant dans le circuit on n'a qu'à appliquer la loi d'Ohm :

I = E / R

I = 4,5 / 2,182

I = 2,062 A

- Calcul du courant dans chaque branche du circuit

La tension aux bornes du groupement est égale à la tension de la source. On calcule les courants dans les branches du circuit en appliquant la loi d'Ohm

I_1 = E / R1	$I_2 = E / R_2$	I_3 = E /R3
I_1 = 4,5 V / 12 Ω	I_2 = 4,5 / 8 Ω	I_3 = 4,5 / 4 Ω

Remarque : La somme des courants dans chaque branche est bien égale au courant fourni par la source.

- Calcul de la puissance dissipée par chacune des résistances

On peut calculer la puissance dissipée par les résistances en utilisant n'importe laquelle des trois formules présentées, car on connaît les trois paramètres électriques : courant, tension et résistance.

$P_1 = E \times I_1$	$P_2 = E \times I_2$	$P_3 = E \times I_3$
P_1 = 4,5 V x 0,375 A	P_2 = 4,5 V x 0,562 A	P_3 = 4,5 V x 1,125 A
P1 = 1,687 W	P_2 = 2,529 W	P_3 = 5,062 W

On pourrait également utiliser la formule de la puissance en fonction de la résistance et du courant :

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

Ou encore celle en fonction de la tension et de la résistance :

$$P = E^2 / R.$$

Le résultat aurait été le même.

- Calcul de la puissance fournie par la source

La puissance fournie par la source est exprimée par la formule:

Pt = E x I

Pt = 4,5 V x 2,062 A

Pt = 9,278 W

On peut effectuer une vérification de l'exactitude du calcul en comparant la valeur déterminée pour la puissance fournie par la source avec la somme des puissances dissipées par chacune des résistances.

Pt = P1 + P2 + P3

Pt = 1,687 W + 2,529 W + 5,062 W

Pt = 9,278 W

4.5.3 Circuit mixte

La plupart des circuits comprennent des composants groupés tantôt en parallèle, tantôt en série. Il s'agit des circuits mixtes. La résolution de tels circuits fait donc appel à la connaissance associée aux circuits série et parallèle. Si la procédure de résolution des circuits série et parallèle s'applique sans aucune particularité en toutes situations, pour les circuits mixtes on ne peut pas définir une méthode applicable à la lettre. Il faut agir selon le circuit en tenant compte de sa configuration particulière.

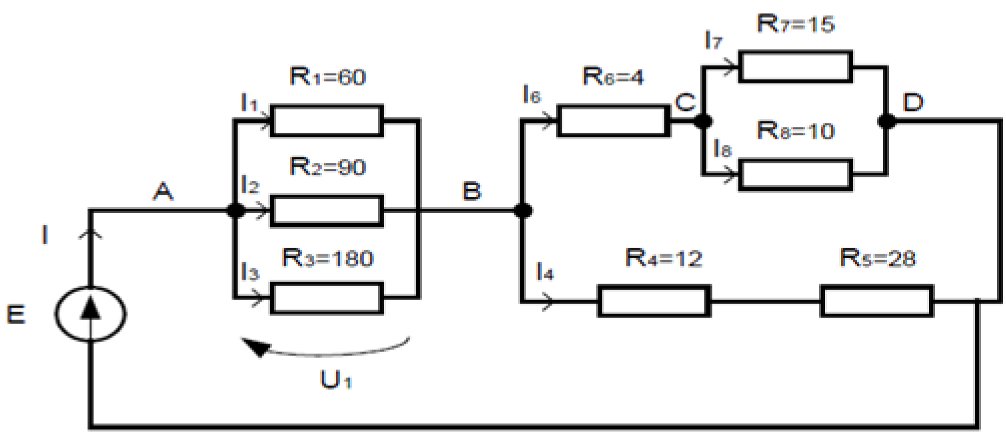
Pour toutes les résolutions on peut décrire les étapes suivantes :

- Prendre connaissance des données et des exigences du problème : tension d'alimentation, valeurs des résistances, paramètres à déterminer (courants, tensions, puissances, etc.).
- Examiner attentivement le circuit afin d'identifier les groupements série et parallèle.
- Restreindre un à un les groupements identifiés et dessiner après chaque transfiguration le circuit équivalent.

Remarque : Il est possible de résoudre le même problème par différentes voies toutes menant à la solution correcte. Le choix de la voie la plus efficace n'est qu'un problème d'exercice.

Pour le circuit mixte montré sur la figure ci-après, composé de huit résistances (dont les valeurs sont indiquées sur la figure) et branché à une source de tension de 76V, calculer :

- la valeur de la résistance équivalente Req ;
- l'intensité du courant fourni par la source I ;
- l'intensité du courant et la chute de tension dans chacune des résistances ;
- la puissance dissipée par chacune des résistances ;
- la puissance fournie par la source.



- Calcul de la résistance équivalente

Après l'analyse du circuit, on remarque :

- le groupement parallèle des résistances R1, R2 et R3.
- le groupement série des résistances R4 et R5.
- le groupement parallèle des résistances R7 et R8.

Calcul de R_{eq1}:

$1 / R_{eq1} = 1 / R_1 + 1 / R_2 + 1 / R_3.$

$1 / R_{eq1} = 1 / 60 + 1 / 90 + 1 / 180.$

$R_{eq1} = 30\ \Omega.$

Calcul de R_{eq2} :

Req2 = R4 + R5.

Req2 = 12 + 28.

Req2 = 40 Ω.

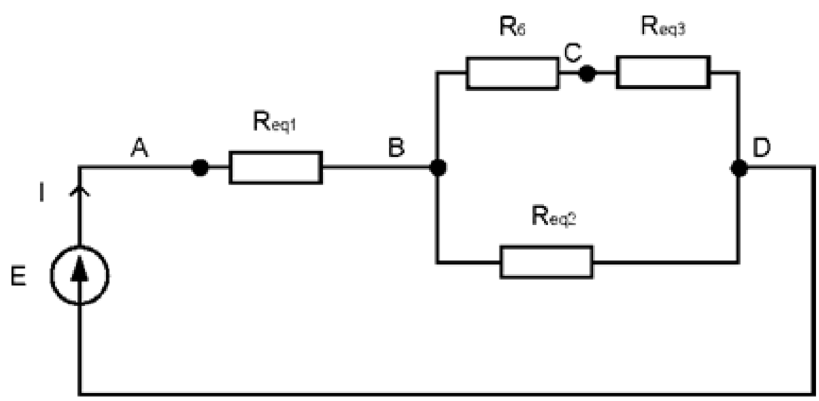
Calcul de R_{eq3}:

1 / Req3 =1 / R7 + 1 / R8.

1 / Req3 = 1 / 15 + 1 / 10.

Req3 = 6 Ω.

La figure suivante présente le circuit après les transfigurations (décompositions) successives qui accompagnent les équivalences des groupements mentionnés.



On remarque l'association série des résistances R6 et Req3 en parallèle avec Req2.

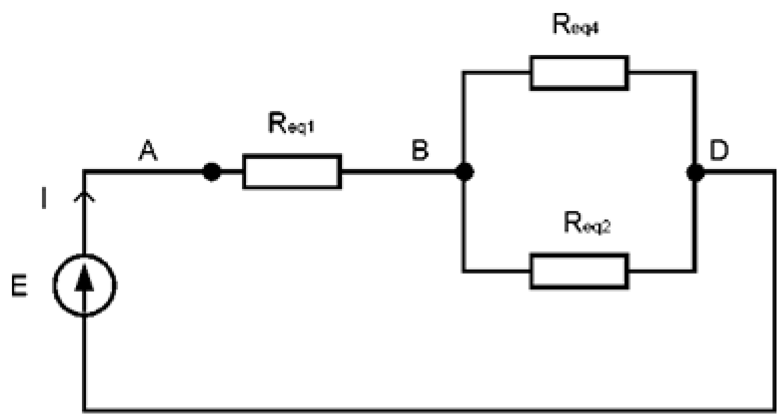
Calcul de R_{eq4} :

$R_{eq4} = R_6 + R_{eq3}$.

$R_{eq4} = 4 + 6$.

$R_{eq4} = 10\ \Omega$.

La transformation suivante présente l'association parallèle des résistances Req2 et Req4 en série avec Req1.



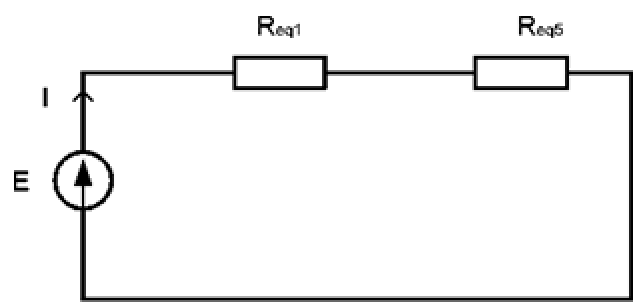
Calcul de R_{eq5} :

$1 / R_{eq5} = 1 / R_{eq4} + 1 / R_{eq2}$.

$1 / R_{eq5} = 1 / 10 + 1 / 40$.

$R_{eq5} = 8\ \Omega$.

La résistance équivalente du circuit d'après la dernière transfiguration est :



Calcul de R_{eq} :

$R_{eq} = R_{eq1} + R_{eq5}$

$R_{eq} = 30 + 8$

$R_{eq} = 38\ \Omega$

- Calcul du courant fourni par la source.

Pour déterminer le courant fourni par la source il suffit d'appliquer la loi d'Ohm dans le circuit équivalent qui comprend la résistance Req.

$I = E / R_{eq}$

$I = 76\ V / 38\ \Omega$

$I = 2\ A$

- Calcul du courant et des tensions dans chacune des résistances

La chute de tension U1 aux bornes du groupement parallèle des résistances R_1, R_2 et R_3 est :

U1 = I x Req1

U1 = 2 A x 30 Ω

U1 = 60 V

Pour le calcul des courants du groupement, comme on connaît la tension à ses bornes et la valeur de chaque résistance il suffit d'appliquer encore la loi d'Ohm.

$I_1 = U1 / R1$	$I_2 = U_1 / R_2$	$I_3 = U_1 / R_3$
$I_1 = 60\ V / 60\ \Omega$	$I_2 = 60\ V / 90\ \Omega$	$I_3 = 60\ V / 80\ \Omega$
$I_1 = 1\ A$	$I_2 = 0{,}667 A$	$I_3 = 0{,}333\ A$

Si on applique la loi des mailles à la boucle fermée A - B - D, on obtient la valeur de la tension $U_{B\text{-}D}$:

UA-B + UB-D - E = 0

UA-B = U1

UB-D = E – U1

UB-D = 76 V - 60 V

UB-D = 16 V

On calcule le courant I4 et les tensions U4 et U5 en appliquant la loi d’ohm

$I_4 = U_{B\text{-}D} / R_{eq2}$	U4 = I4 x R4	$U5 = I_4 \times R5$
$I_4 = 16\ V / 40\ \Omega$	U4 = 0,4 A x 12 Ω	U5 = 0,4 A x 28 Ω

Pour l… J6 on …)hm :

$I_6 = U_{B\text{-}D} / R_{eq4}$	$U_6 = I_6 \times R_6$
$I_6 = 16\ V / 10\ \Omega$	$U_6 = 1{,}6\ A \times 4\ \Omega$

La tension au groupement parallèle des résistances R_7 et R_8, $U_{C\text{-}D}$ et les courants dans ces résistances sont les derniers à calculer :

$U_{C\text{-}D} = I_6 \times Req3$	$I_7 = U_{C\text{-}D} / R7$	$I_8 = U_{C\text{-}D} / R8$
$U_{C\text{-}D} = 1{,}6\ A \times 6\ \Omega$	$I_7 = 9{,}6\ V / 15\ \Omega$	$I_8 = 9{,}6\ V / 10\ \Omega$
$U_{C\text{-}D} = 9{,}6\ V$	$I_7 = 0{,}64\ A$	$I_8 = 0{,}96\ A$

❖ ***Calcul des puissances dissipées par chacune des résistances.***

Connaissant pour chacune des résistances, la valeur ohmique, le courant et la tension, on peut calculer la puissance dissipée en utilisant n'importe laquelle des trois formules possibles

P1 = U1 x I1	P2 = U1 x I2
P1 = 60 V x 1 A	P2 = 60 V x 0,667 A
P1 = 60 W	P2 = 40,02 W
P3 = U1 x I3	P4 = U4 x I4
P3 = 60 V x 0,333 A	P4 = 4,8 V x 0,4 A
P3 = 19,98 W	P4 = 1,92 W
P5 = U5 x I4	P6 = U6 x I6
P5 = 11,2 V x 0,4 A	P6 = 6,4 V x 1,6 A
P5 = 4, 48 W	P6 = 10,24 W
P7 = UC-D x I7	P8 = UC-D x I8
P7 = 9,6 V x 0,64 A	P8 = 9,6 V x 0,96 A
P7 = 6,144 W	P8 = 9,216 W

- ***Calcul de la puissance fournie par la source***
  - Pt = E x I
  - Pt = 76 V x 2 A
  - Pt = 152 W

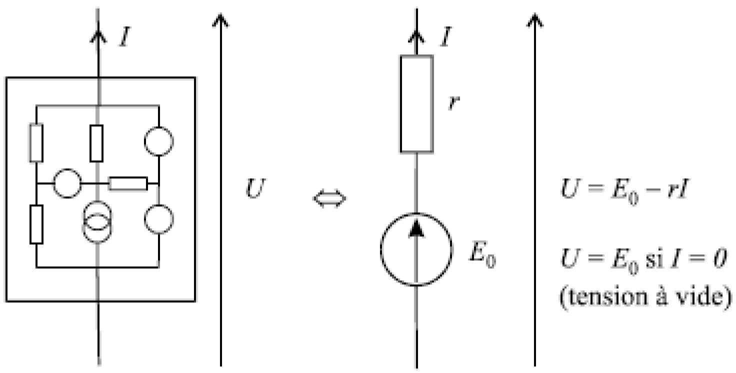
On peut faire une vérification de l'exactitude des calculs, en procédant à un bilan de puissances par le calcul de la somme des puissances dissipées par chacune des résistances :

- Pt = P1 + P2 + P3 + P4 + P5 + P6+ P7 + P8
- Pt = 60W + 40,02W + 19,98W + 1,92W + 4,48W + 10,24W + 6,144W + 9,216W
- Pt =152 W

4.6 Théorèmes de Thévenin et de Norton.

4.6.1 Théorème de Thévenin

En régime continu, tout réseau linéaire dipolaire est équivalent à un générateur de tension dit de Thévenin, de force électromotrice E0 et de résistance interne r (figure ci-dessous).



La résistance r est égale à la résistance équivalente du réseau lorsque tous ses générateurs sont éteints.

La tension E_0 est égale à la tension à vide du réseau (lorsque I = 0 dans le schéma de la figure ci-dessus).

Notons que puisqu'il s'agit de déterminer un générateur de tension équivalent à un dipôle, nous employons bien évidemment la convention génératrice.

<u>Exemple 1 :</u>

Déterminer le générateur équivalent de Thévenin du dipôle AB représenté sur (fig.a) en calculant successivement la résistance équivalente du dipôle puis sa tension à vide.

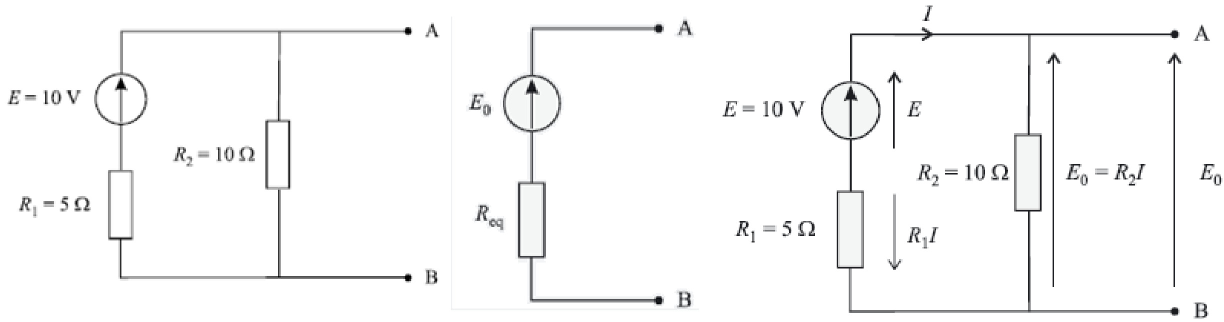


fig.a fig.b fig.c

Le dipôle AB (fig. a) ci-dessus est équivalent au générateur de Thévenin représenté sur la (fig.b), Req représentant la résistance équivalente du dipôle lorsque E est court-circuité, et E_0 la tension à vide du dipôle.

R_{eq} se trouve être la résistance équivalente à l'association parallèle de R_1 et R_2.

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{10 \times 5}{10 + 5} = 3{,}33\,\Omega$$

Pour déterminer la tension à vide E0 du dipôle AB, il suffit d'écrire la loi des mailles dans le circuit de la (fig.a).

La tension aux bornes de R2 correspondra bien à cette tension à vide (fig. c).

On a : $$\begin{cases} E_0 = R_2 I \\ E - R_2 I - R_1 I = 0 \end{cases}$$

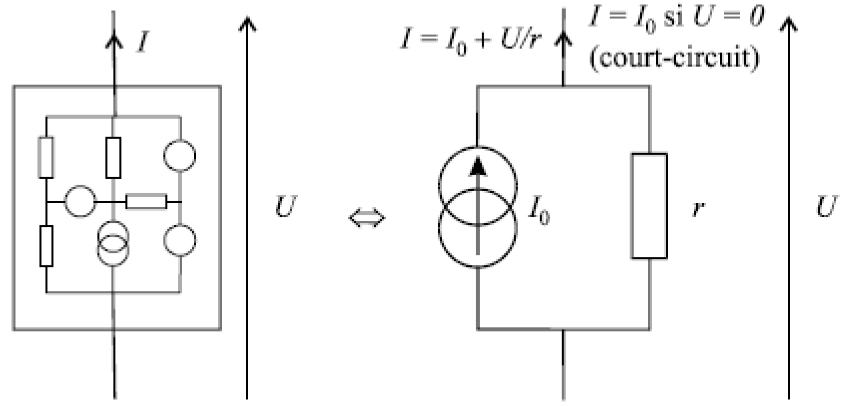
D'où : $$I = \frac{E}{R_1 + R_2}$$

Soit : $$E_0 = E\frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 \times \frac{10}{15} = 6{,}67\,\mathrm{V}$$

Le générateur de Thévenin équivalent au dipôle AB est donc un générateur de tension E_0 = 6,67V et de résistance interne R_{eq} = 3,33Ω.

4.6.2 Théorème de Norton.

Le théorème de Norton propose un autre dipôle simple équivalent à tout réseau dipolaire.



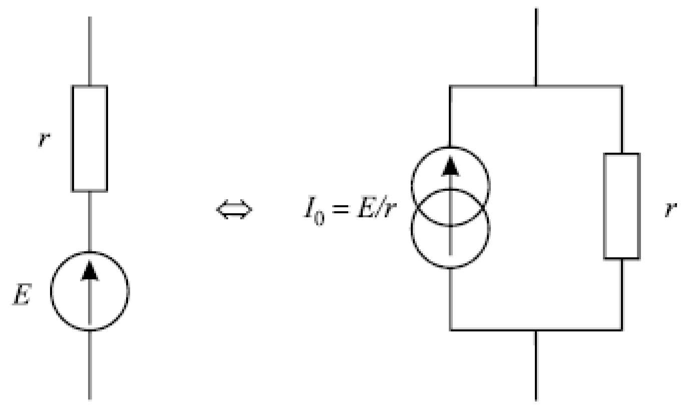
En régime continu, tout réseau linéaire dipolaire est équivalent à un générateur de courant dit de Norton, de courant I et de résistance interne r (figure ci-dessus) égale à la résistance interne du générateur de Thévenin.

La résistance r est égale à la résistance équivalente du réseau lorsque tous ses générateurs sont éteints. On utilise volontiers le terme de conductance interne g pour qualifier 1/r.

Le courant I est égal au courant de court-circuit du dipôle (courant circulant dans le dipôle lorsque l'on court-circuite ses deux bornes).

4.6.3 Équivalence Thévenin – Norton.

Un générateur de tension de Thévenin, de force électromotrice E et de résistance interne r est équivalent à un générateur de Norton, de courant $I0 = E/R$ et de même résistance interne r (figure ci-dessous).



Exemple 2 :

Déterminer le générateur équivalent de Thévenin (E0 et Req) du dipôle AB représenté sur la (fig.a).

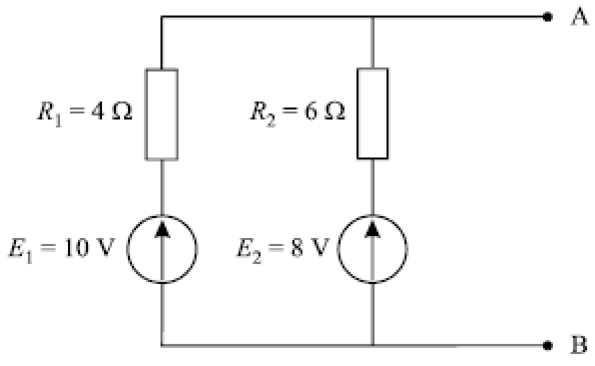


fig.a

Transformons chacun des deux générateurs de tension en son dipôle équivalent de Norton puis regroupons les générateurs de courant d'une part (deux générateurs de courant en parallèle sont équivalents à un seul générateur de courant égal à la somme des deux courants) et les deux résistances d'autre part (fig.b).

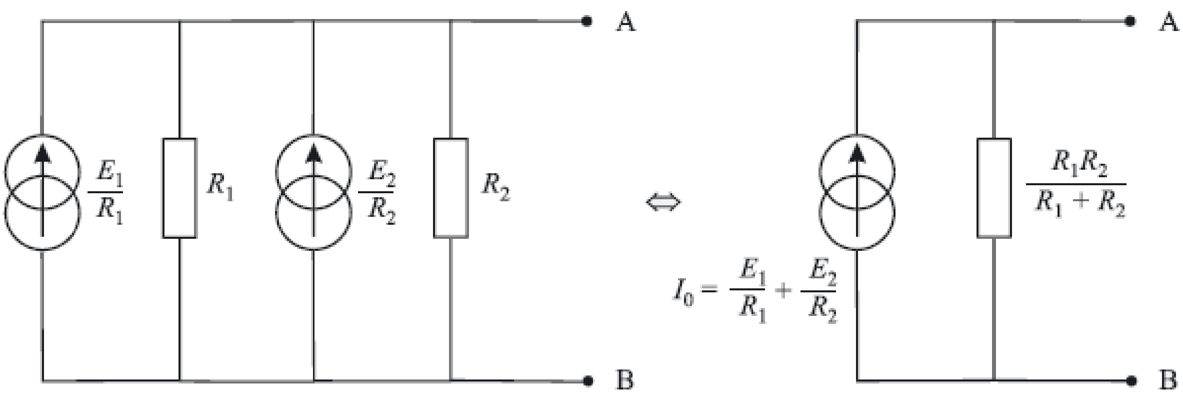


fig.b

Nous avons obtenu le générateur équivalent de Norton du dipôle AB. La transformation Norton- Thévenin nous conduit à la (fig.c).

Application numérique :

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{4 \times 6}{4 + 6} = 2{,}4\,\Omega$$

$$E_0 = \left(\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2}\right)\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_2 E_1 + R_1 E_2}{R_1 + R_2}$$

$$E_0 = \frac{(6 \times 10) + (4 \times 8)}{4 + 6} = 9{,}2\,\text{V}$$

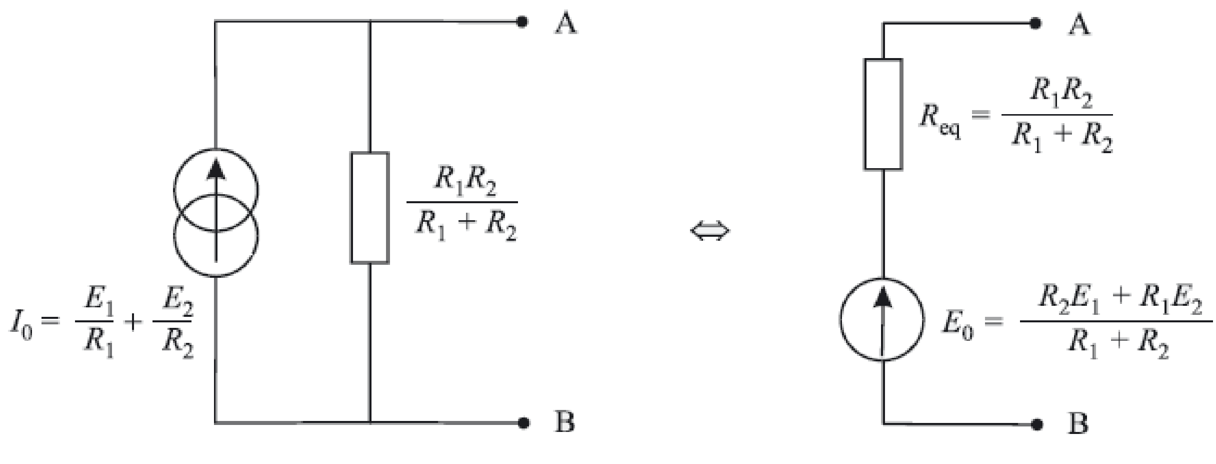


fig.c)

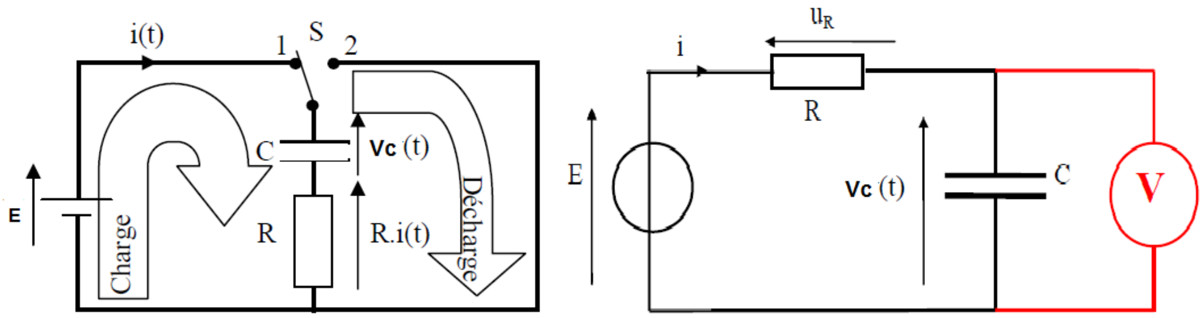
Ce qu'il faut retenir de cet exercice : La transformation Thévenin-Norton est un outil très performant : plusieurs transformations successives permettent d'obtenir très rapidement le générateur de Thévenin ou de Norton de pratiquement n'importe quel dipôle. Procéder de la sorte peut être plus rapide que de rechercher E_0 et Req d'après leur définition. Bien utilisés, les théorèmes de Thévenin et de Norton sont des moyens efficaces de résoudre des problèmes complexes d'électrocinétique.

5. Caractéristique des constantes des temps RC et RL dans les circuits à courant continu.

Le comportement des condensateurs et des bobines dans les circuits de courant continu est différent de celui d'une résistance et cela se manifeste d'une façon très prononcée à la mise en fonction et à l'arrêt du circuit quand on observe ce que nous appellerons les *états transitoires*.

5.1 Circuit RC

Le circuit, composé d'un condensateur et d'une résistance, branchés en série avec une source d'alimentation à courant continu est appelé circuit RC.



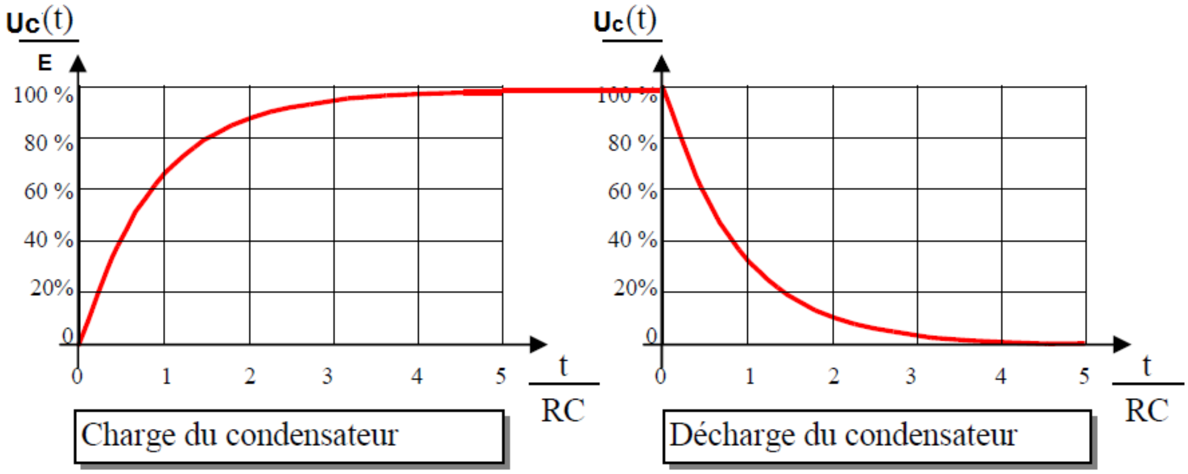
5.1.1 Charge d'un condensateur

Soit le circuit RC, présenté ci-dessus. Considérons que la charge du condensateur est nulle au début, donc au moment où il sera branché dans le circuit.

Lorsqu'on ferme le circuit RC, les électrons de la plaque reliée à la borne positive de la source sont transférés à la plaque négative jusqu'à ce que la différence de potentiel entre les deux armatures du condensateur soit égale à la tension de la source.

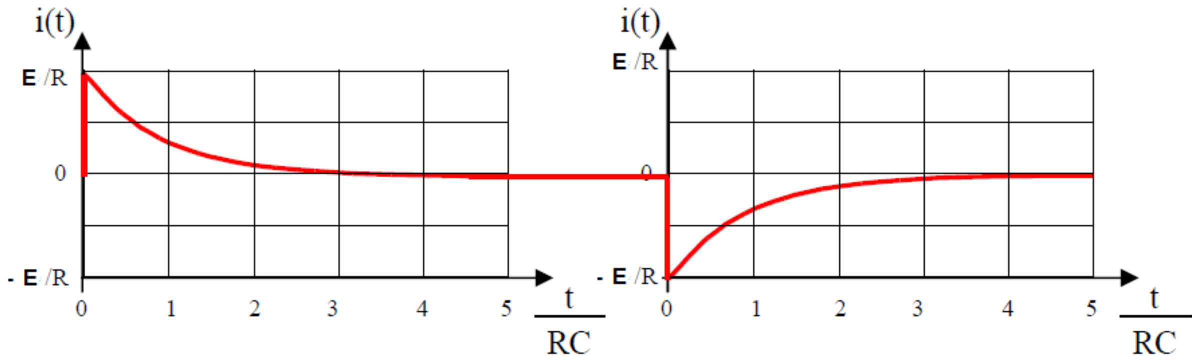
La vitesse de déplacement des électrons diminue à cause de l'opposition générée par la résistance. On dit que la charge du condensateur ne se fait pas instantanément ; il y a un délai avant que la tension aux bornes du condensateur atteigne la valeur de la tension de la source, ce qui correspond à la fin du processus.

- **Allure de la tension aux bornes du condensateur :**



Temps (s)	1τ	2τ	3τ	4τ	5τ
Vc (t)	63% de E	86% de E	95% de E	98% de E	99% de E

- **Allure du courant dans la Résistance :**



Les courbes universelles de charge et de décharge d'un condensateur C à travers une résistance R donnent l'allure de la tension aux bornes du condensateur Vc(t) en pourcentage de la tension E aux bornes du générateur en fonction du temps t exprimé par rapport à la constante de temps RC.

Ces courbes montrent que la charge et la décharge du condensateur sont pratiquement terminées au bout d'un temps t = 5 x R.C

Donc connaissant les valeurs de R et de C on peut facilement déterminer le temps nécessaire pour que la tension aux bornes du condensateur atteigne un certain pourcentage de la tension E du générateur.

5.1.2 Constante de temps

La ***constante de temps*** (τ) d'un circuit RC est exprimée par le produit entre la résistance et la capacité des deux éléments du circuit :

$$\tau = R \times C$$

avec τ = constante de temps du circuit, en secondes (s)

R = la résistance du circuit RC, en ohm (Ω)

C = la capacité du condensateur du circuit RC, en farad (F)

La constante de temps représente le temps nécessaire pour que la tension aux bornes du condensateur atteigne 63,2% de la tension de la source.

On appelle « demi temps » T_0 le temps (en s) pour lequel la charge du condensateur augmente (diminue) à moitié.

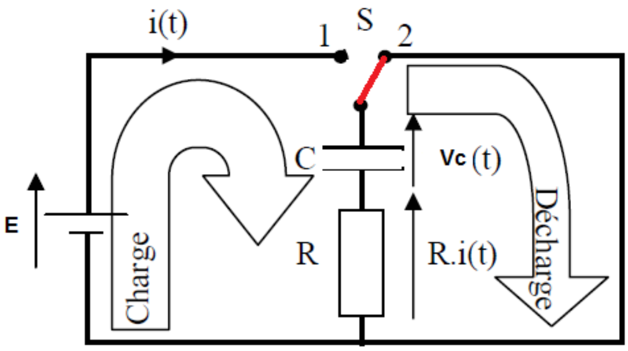
$$T_0 = 0,7\ \tau$$

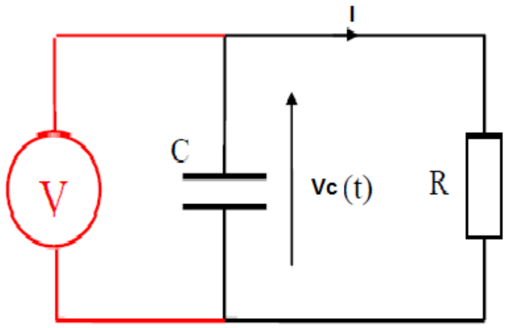
La période de charge représente le temps nécessaire pour charger le condensateur. On admet que le condensateur est chargé à la valeur de la tension de la source après une période égale à cinq constantes de temps (5 τ).

Remarque : A l' instant où le condensateur est chargé, la circulation des électrons s'arrête et le courant devient nul. Si on débranche le condensateur de la source, il reste chargé et la tension à ses bornes est égale à celle de la source.

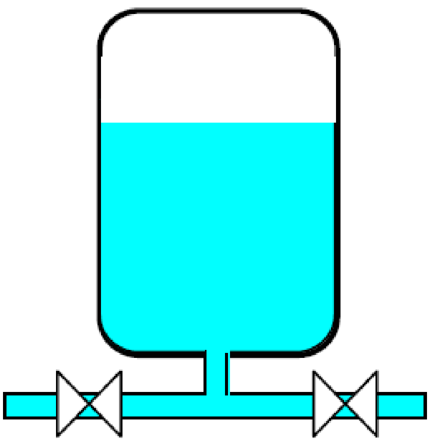
5.1.3 Décharge d'un condensateur

Lorsque le condensateur, chargé à la tension de la source, est relié à une résistance (voir figure ci-après), les électrons en excès sur l'armature négative se déplacent vers la plaque positive à travers la résistance. Le procédé demande un délai identique au celui de la charge. Ainsi après une période égale à la constante de temps (τ) la tension diminue de 63,2% de sa valeur initiale maximale et après une période de 5 τ le condensateur est presque complètement déchargé.





Temps (s)	1τ	2τ	3τ	4τ	5τ
Vc (t)	37% de E	14% de E	5% de E	2% de E	1% de E



Analogique avec l'eau : le condensateur est comparable à un réservoir d'eau

- Lorsqu'il est alimenté, il accumule une quantité d'eau (il se charge).
- Lorsque l'alimentation est coupée, il sert d'alimentation (il se décharge).

Il ne faut dépasser la pression maximale (tension de service), sinon il y a un risque de destruction.

Exemple château d'eau ou un bac de stockage.

5.1.4 Courbes de charge et de décharge d'un condensateur

Il est intéressant de remarquer que les courbes de charge et de décharge du condensateur ne sont pas linéaires.

Au début de la période de charge ou de décharge, le condensateur se charge ou se décharge très rapidement et la tension à ses bornes varie de même. A la fin du processus, la variation de la tension est beaucoup plus faible pour une unité de temps.

Les tableaux ci-dessus donnent les valeurs de la tension aux bornes d'un condensateur en pour cent par rapport à la tension de la source E pour chaque valeur de la constante du temps.

<u>Exemple</u> :

Calculer la constante de temps d'un circuit RC si la résistance est égale à 150 kΩ et la capacité du condensateur est 20 µF. Evaluer ensuite la période de charge du condensateur.

Pour déterminer la constante de temps du circuit il suffit d'utiliser sa formule de définition :

$\tau = R \times C$

$\tau = 150k\Omega \times 20\ pF$

$\tau = 1\ s$

Quant à la période de charge :

$T = 5\ \tau$

$T = 5 \times 1s$

$T = 5\ s$

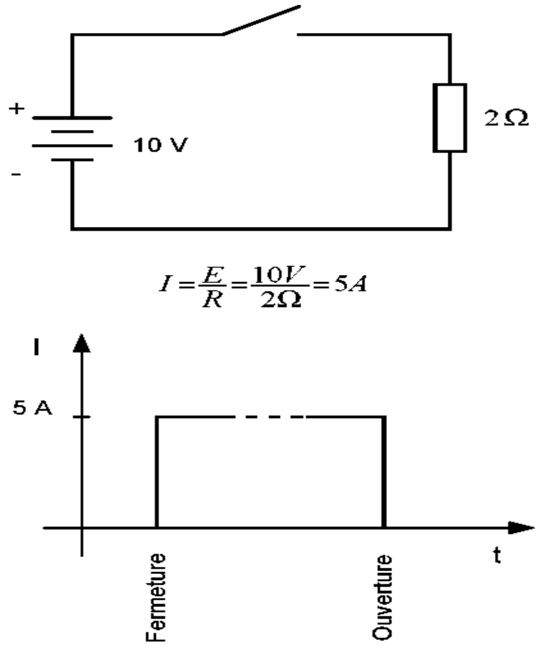
5.2 Circuit RL

Le circuit, composé d'une bobine et d'une résistance, branché en série à une source d'alimentation à courant continu est appelé circuit RL.

Un circuit composé d'une résistance et d'une bobine se comporte sensiblement de manière différente d'un circuit qui comprend seulement la résistance. C'est à cause de la propriété de la bobine de retarder l'établissement du courant dans le circuit lorsque le courant tend à augmenter et à maintenir le courant lorsqu'il tend à diminuer (la loi de Lenz). Ce comportement est dû au phénomène d'auto-induction (self - induction) et s'explique ainsi : la variation du courant dans la bobine produit une variation correspondante du flux magnétique qui induit dans celle-ci une tension d'une polarité opposée dans le cas de l'augmentation du courant et de même polarité si le courant diminue.

5.2.1 Réaction d'un circuit résistif

L'établissement du courant, par l'intermédiaire d'un interrupteur, dans un circuit composé d'une résistance et d'une source de tension de courant continu est instantané.



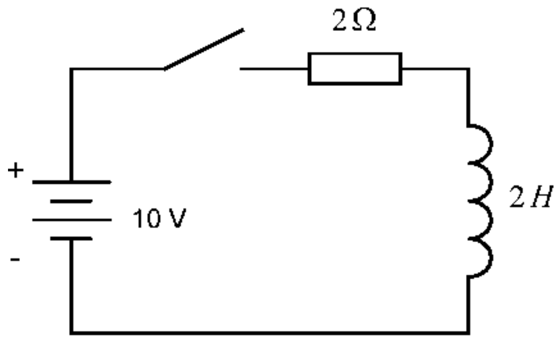
$$I = \frac{E}{R} = \frac{10V}{2\Omega} = 5A$$

Il est de même lors de l'ouverture du circuit. On peut conclure que la résistance ne fait que s'opposer au passage du courant.

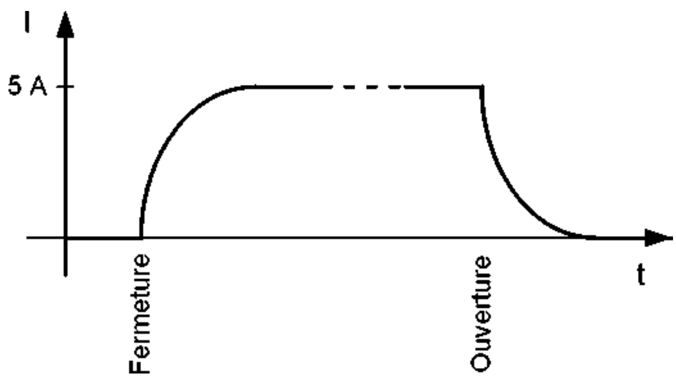
5.2.2 Réaction d'un circuit inductif

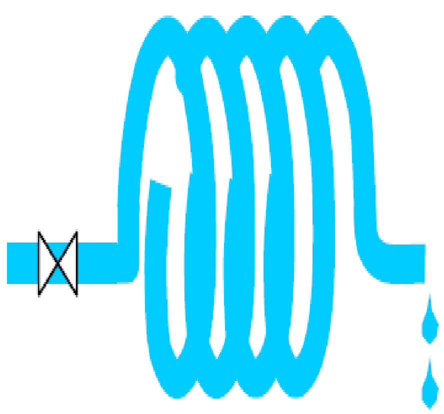
Si on ajoute au circuit précédent une *bobine*, lors de la fermeture du circuit, on remarque une période de transition pour l'établissement du courant à sa valeur nominale, qui est égale à celle du circuit en l'absence de la bobine. Il sera de même lors de l'ouverture de l'interrupteur : une période de transition est nécessaire afin que le courant s'annule.

Cela s'explique par le phénomène de ***l'auto-induction***. Lors de la fermeture du circuit le courant augmente, ce qui engendre une augmentation du flux dans la bobine, qui induit une tension en celle-ci de polarité inverse à celle de la source. Cette tension s'oppose à l'établissement du courant dans le circuit (la loi de Lenz).



$$I = \frac{E}{R} = \frac{10V}{2\Omega} = 5A$$



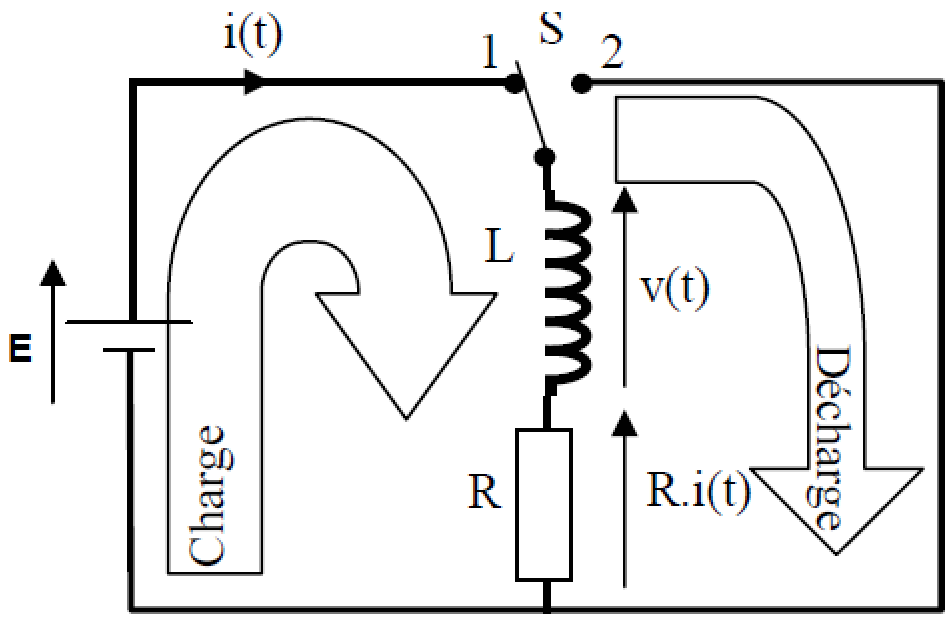


<u>Le réacteur réagit aux variations de courant</u> :

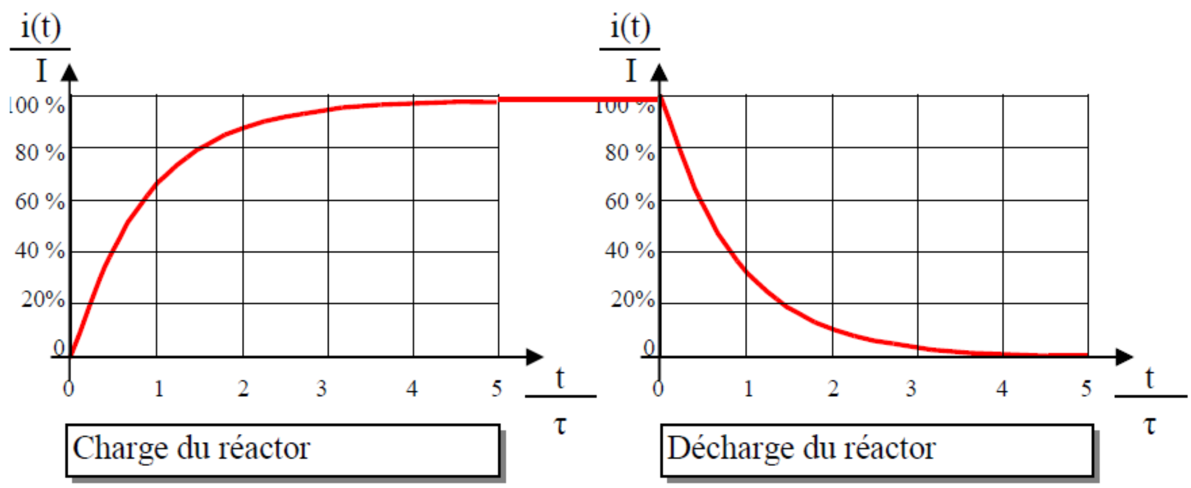
Analogie avec l'eau : le réacteur est comparable à un tuyau enroulé.

- Lorsqu'on ouvre la vanne, il se passe un certain temps avant que l'eau ne coule : il faut vider l'air contenu dans le tuyau.
- Lorsque l'on ferme la vanne l'eau ne s'arrête pas instantanément de couler : il y a une quantité emmagasinée dans le tuyau.

A l'inverse, lors de l'ouverture du circuit, le courant diminue et la variation correspondante du flux induit dans la bobine une tension de polarité identique à celle de la source. Cette tension induite occasionne un retard de l'annulation du courant.



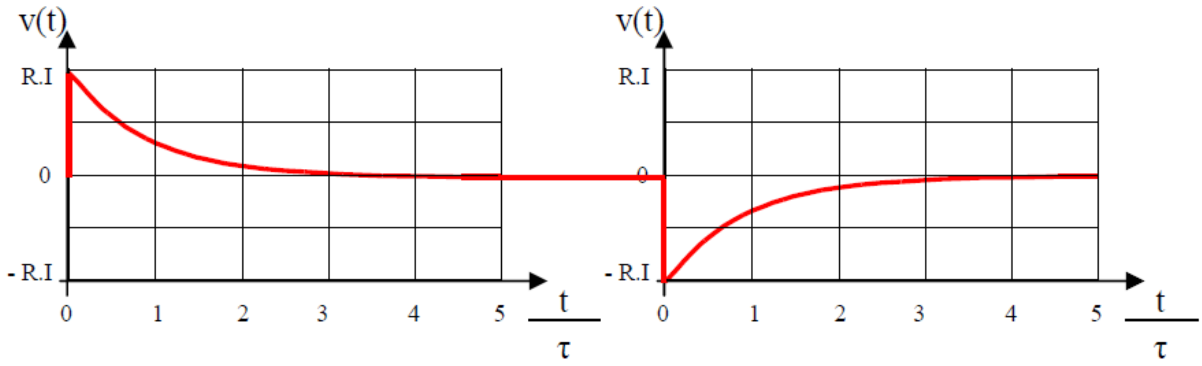
❖ **Allure de l'intensité du courant dans la résistance :**



Les courbes universelles de charge et décharge d'un réacteur L à travers une résistance R donnent l'allure de l'intensité du courant dans le réacteur i(t) en pourcentage de l'intensité fournie par le générateur E en fonction du temps t exprimé par rapport à la constante de temps.

Ces courbes montrent que le courant est pratiquement établi dans le circuit au bout d'un temps t=5.T

❖ **Allure de la tension aux bornes du l'inductance :**



5.2.3 Constante de temps

La ***constante de temps*** (τ) d'un circuit RL s'exprime par le rapport entre l'inductance et la résistance des deux éléments du circuit. Sa formule de calcul est donc :

$$\tau = R/L$$

avec τ = constante de temps du circuit, en secondes (s).

L = inductance de la bobine, en henrys (H).

R = résistance du circuit RC, en ohm (Ω).

La figure ci-dessus présente les courbes d'établissement du courant dans un circuit inductif lors de la fermeture et de l'ouverture du circuit.

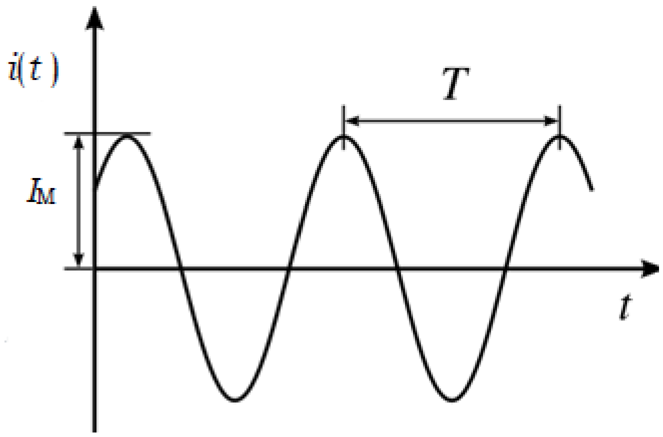
Chapitre II

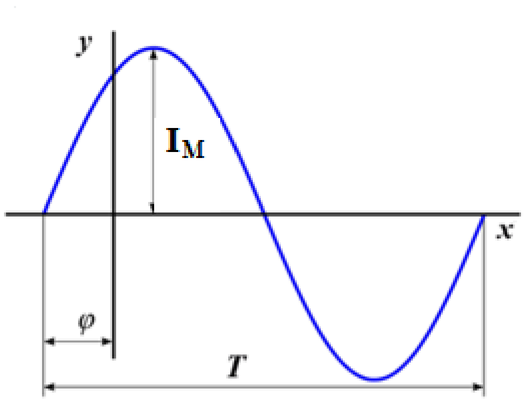
CIRCUITS A COURANT ALTERNATIF

6. Caractéristiques des circuits à courants alternatifs.

6.1 Définition d'un courant alternatif.

Un courant est alternatif s'il change de sens au cours du temps *t* ; en outre, il est périodique si son intensité *i* reprend la même valeur à des intervalles de temps égaux à *T*.





On a alors : i = $f(t) = f(t + nT)$

- *n* est un nombre entier.
- *T* est la *période* et son inverse *f* est la *fréquence* : $f = \frac{1}{T}$

La période est mesurée en *secondes* et la fréquence en *hertz* (*Hz*).

Un courant alternatif est sinusoïdal, lorsque son intensité est une fonction sinusoïdale du temps

$$\boxed{i = I_M \sin(\omega t + \varphi) \quad \text{ou}^{1} \quad i = I_M \cos(\omega t + \varphi)}$$

$$\boxed{\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}}$$

$$\boxed{i(t) = \mathbf{I_M} \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \phi) = \mathbf{I_M} \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)}$$

1 : Un changement de l'origine des phases de $\pi/2$ donne l'une ou l'autre des deux expressions

- ***i***(t) : est la valeur instantanée du courant.
- $\mathbf{I_M}$: est l'amplitude maximale du courant.
- **f** : est la fréquence du signal (l'inverse de sa période).
- **ω** : pulsation ou fréquence angulaire en rad s^{-1} (le produit 2πf).
- **ω t + φ** : phase instantanée en rad.
- **φ** : phase à l'origine en rad (un décalage vers la gauche ou la droite de la courbe sinusoïdale).

a. La valeur efficace :

La valeur efficace d'un courant alternatif est définie comme la racine carrée de la moyenne du carré de l'intensité calculée sur une période. Elle s'écrit :

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2\, dt}$$

I_{eff} (valeur efficace) d'un courant alternatif est égale à la valeur du courant continu qui provoquerait le même échauffement dans une même résistance.

Dans le cas d'un courant alternatif sinusoïdal, on obtient :

$$\boxed{I_{eff} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}}$$

La valeur instantanée d'un tel courant s'écrit alors :

$$i = I_{eff}\sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi)$$

Le courant efficace I équivaut à un courant continu qui dissiperait la même puissance dans une même résistance.

b. 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.

c. 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 :

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

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.

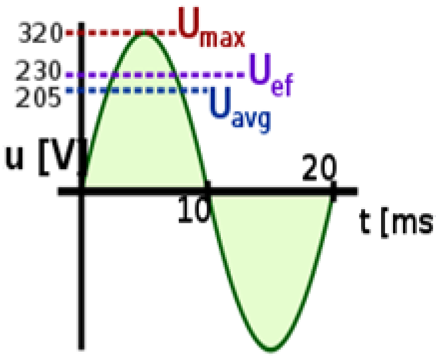
d. L'amplitude :

Représente la plus grande valeur atteinte par le courant alternatif au cours d'une période. Elle peut être positive

<u>Les amplitudes maximales, moyennes et efficaces</u>

Comme tout signal périodique, un signal sinusoïdal a une amplitude maximale, une amplitude crête-crête, une amplitude moyenne, une valeur efficace, etc...

Le courant qui circule dans les prises électriques possède les propriétés suivantes :



- Fréquence de 50 Hz.
- Tension efficace de 230 Volts.
- Tension maximale de 320 Volts.
- Tension crête-crête de 640 Volts.

Exemple :

Prenons le cas d'une tension alternative sinusoïdale ayant l'expression

$$\boxed{u(t) = 60 \sin(200\pi t + \pi/3)}$$

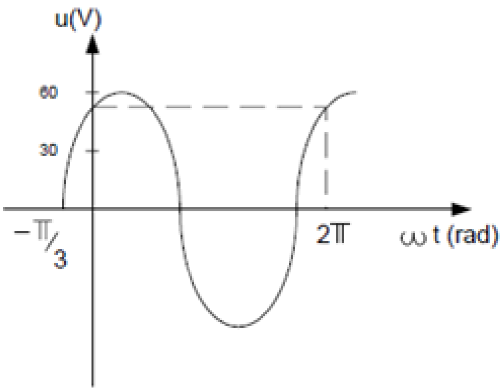
- La valeur de crête est UM = 60V
- La pulsation est **ω** = 200rad
- La période est calculée d'après la formule :

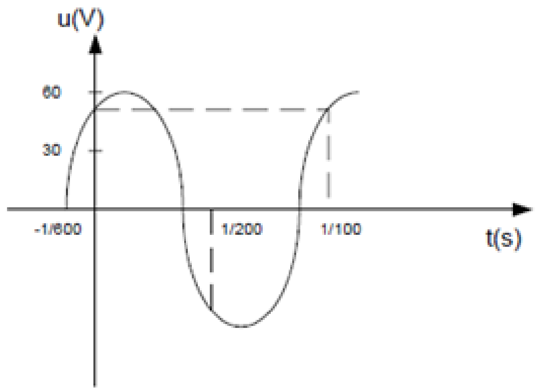
$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \text{ donc } T = \frac{2\pi}{200} = \frac{1}{100}\ s$$

- La fréquence est : $f = \frac{1}{T} = 100Hz$
- La phase initiale : ϕ = π/ 3.

La représentation graphique de cette onde est présentée en 2 variantes :

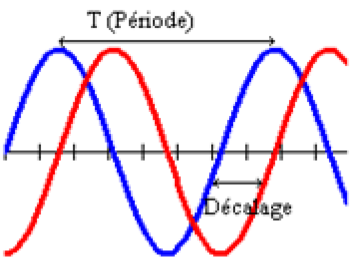
- en fonction du temps
- en fonction de l'angle (phase)

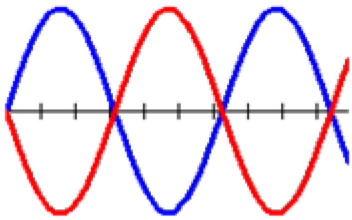




e. Déphasage.

Lorsqu'on a deux grandeurs alternatives sinusoïdales de même fréquence on peut mettre en évidence le décalage entre les deux ondes qui les représentent. Ce décalage est appelé ***le déphasage***.





- Signal sinusoïdal simple.
- Signaux déphasés de 90° (quadrature de phase).
- Signaux déphasés de 180° (opposition de phase).

Le déphasage se déduit par une simple règle de 3 du décalage temporel séparant les deux signaux.

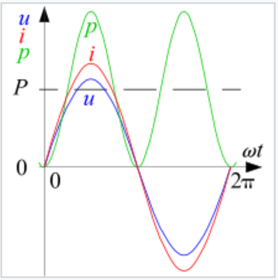
En effet, 0° (ou 0 radian) correspond à 0 seconde de déphasage et 360° (ou 2π radians) correspondent à des signaux décalés d'une période (T), ils sont alors à nouveau en phase. Si on appelle τ le décalage temporel entre les signaux, on peut écrire :

$$\text{en degrés : } \Delta\varphi = \tau \cdot \frac{360}{T}$$

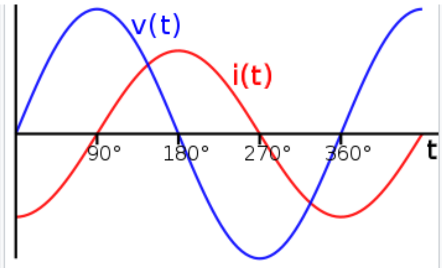
$$\text{en radians : } \Delta\varphi = \tau \cdot \frac{2\pi}{T}$$

Le déphasage entre deux grandeurs sinusoïdales peut être identifié facilement lorsqu'on représente les deux grandeurs sur le même système de référence.

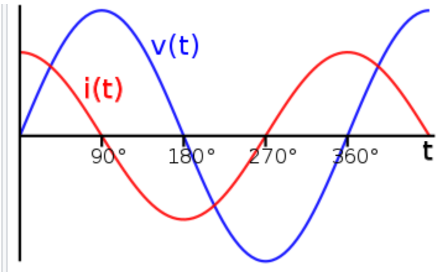
<u>Cas de déphasage entre la tension et le courant</u>



Cas où tension et intensité sont en phase, sans décalage.



Cas où tension et intensité, décalées l'une par rapport à l'autre, ne sont donc pas en phase. On voit que l'intensité est ici en retard sur la tension.

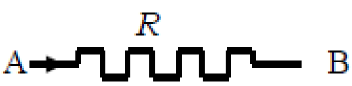


Cas où tension et intensité, décalées l'une par rapport à l'autre, ne sont donc pas en phase. On voit que l'intensité est ici en avance sur la tension.

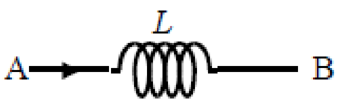
6.2 Lois d'Ohm en courant alternatif.

6.2.1 Définition de a loi d'Ohm en alternatif.

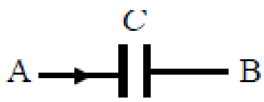
Les lois d'Ohm s'appliquent au courant alternatif sinusoïdal. Elles s'expriment à chaque instant, dans le cas des éléments simple comme suit :



$$u_A - u_B = R\,i$$

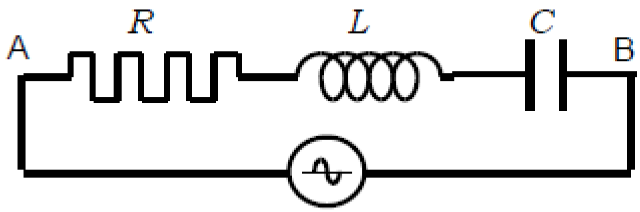


$$u_A - u_B = L\frac{di}{dt}$$



$$u_A - u_B = \frac{q}{C} = \frac{1}{C}\int i\,dt$$

La mise en série des trois éléments *R, L* et *C* est représentée par le circuit de la figure ci-dessous



On applique, aux bornes de A et B du circuit une tension : $u(t) = U_M \cos(\omega t)$,

$$u(t) = Ri + L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int i\, dt$$

C'est l'équation de l'oscillateur électrique amorti en régime forcé sinusoïdal. La solution générale de cette équation est la somme de la solution de l'équation sans second membre et d'une solution particulière de l'équation avec second membre. La première n'intervient que durant le régime transitoire, la seconde constitue la solution du régime permanent φ est le déphasage du courant par rapport à la tension.

$$i(t) = I_M \cos(\omega t + \varphi) \qquad u(t) = U_M \cos(\omega t)$$

Il s'agit à présent de déterminer la valeur maximale I M (ou la valeur efficace I) du courant et son déphasage φ à partir de la tension :

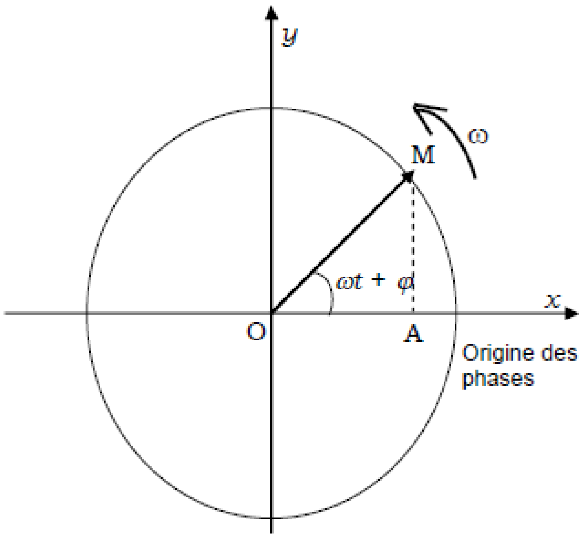
On peut utiliser deux méthodes :

- une méthode symbolique : la '' notation complexe ''(sera exclus dans ce chapitre)
- une méthode vectorielle : la '' représentation de Fresnel ''

6.2.2 La représentation de Fresnel.

A. Principe de la méthode de Fresnel.

La méthode de Fresnel permet d'effectuer la somme de deux ou plusieurs grandeurs sinusoïdales de même pulsation ω. Son principe est le suivant :

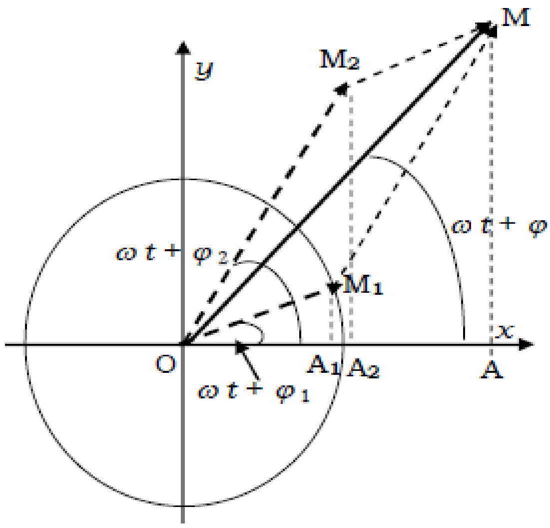


Considérons un vecteur *OM*, de module *A*, qui tourne autour d'un point fixe O à la vitesse constante *ω*. A l'instant *t* = 0, il fait un angle *p* avec l'axe *Ox.*

AL *l'*instant *t*, il fait un angle *(ωt + ϕ*) avec l'axe *Ox* . La projection OA de ce vecteur sur *Ox* est :

$$\boxed{x = A\cos\left(\omega t + \varphi\right)}$$

Considérons deux mouvements vibratoires parallèles de même fréquence angulaire *ci-dessous* :



A un instant t, ces vibrations peuvent être représentées respectivement, par les vecteurs OA1 et OA2.

$$X1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$$
$$X2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2).$$

Ces derniers représentés respectivement sur OX des vecteurs OM1 et OM2 tournant à la même vitesse ω.

On sait que la projection sur un axe de la somme de plusieurs vecteurs a comme valeur, la somme algébrique des projections de ces vecteurs sur cet axe, soit : X = *X1+ X2.*

Où*, x* est la projection du vecteur :

$$\overrightarrow{OM} = \overrightarrow{OM}_1 + \overrightarrow{OM}_2$$

OM est la diagonale du parallélogramme OM1MM2. Cette dernière tourne à la vitesse *a* sans se déformer. La figure ci-dessus montre une représentation de ces vecteurs à un instant *t*.

Ainsi, la construction de Fresnel permet de remplacer le calcul de la somme de plusieurs fonctions trigonométriques (équation X = *X1+ X2*) de même pulsation *ω* par une construction géométrique (équation vectorielle *OM = OMi + OM 2*) plus simple.

Règle de Fresnel.

Le vecteur de Fresnel associé à la somme de plusieurs vibrations, s'obtient en faisant la somme vectorielle des vecteurs de Fresnel associés à chacune des vibrations.

B. Impédance et déphasage.

Dans la construction de Fresnel, le choix de l'origine des phases est arbitraire. De ce fait, on choisit la phase de l'intensité du courant comme origine et on écrit:

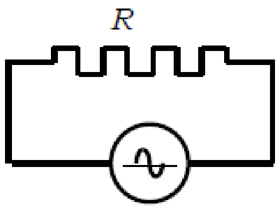
$$\boxed{i(t) = I_M \cos(\omega t)}$$

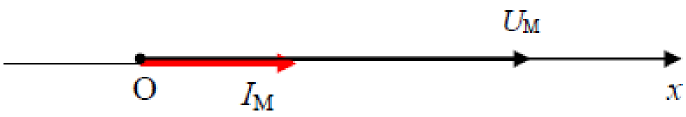
La d.d.p aux bornes d'un circuit parcouru par un tel courant devient alors :

$$\boxed{u(t) = U_M \cos(\omega t + \varphi)}$$

Ø représente le déphasage entre l'intensité du courant et la tension ; il peut être positif ou négatif.

6.2.3 Circuit formé d'une résistance pure.





La résistance *R* du circuit, est traversée par un courant sinusoïdal d'intensité

$$\boxed{i(t) = I_M \cos(\omega t)}$$

La d.d.p à ses bornes s'écrit d'après la loi d'Ohm : u (t) = Ri(t) Soit :

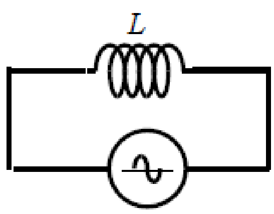
$$\boxed{U_M \cos(\omega t + \varphi) = R \,.\, I_M \cos(\omega t)}$$

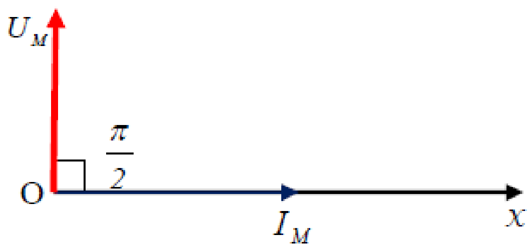
En identifiant les deux membres de cette équation on obtient :

$$\boxed{U_M = R\, I_M \quad \text{et} \quad \varphi = 0}$$

Dans la représentation de Fresnel, le courant et la tension sont en phase

6.2.4 Circuit formé d'une self pure.





La bobine de self inductance L du circuit représenté sur la figure ci-dessus est parcourue par un courant $i(t) = I_M \cos(\omega t)$: il en résulte une d.d.p aux bornes de self :

$$\boxed{u(t) = L\frac{di}{dt}}$$

$$U_M \cos(\omega t + \varphi) = -L\omega . I_M \sin(\omega t) = L\omega . I_M \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

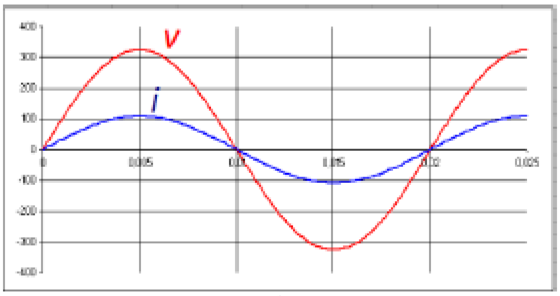
$$U_M = L\omega I_M \quad \text{et} \quad \varphi = +\frac{\pi}{2}$$

En considérant les valeurs efficaces, on obtient

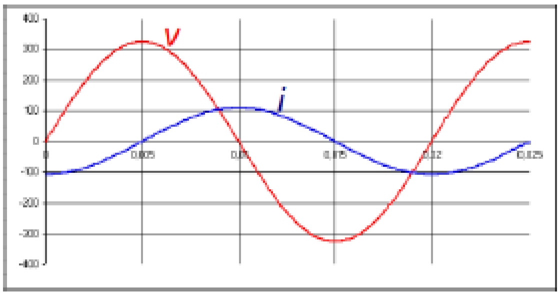
$$\boxed{U = L\omega I = Z\ I \qquad \text{soit} \qquad Z = L\omega}$$

<u>Z est l'impédance de la self</u>.

Dans la représentation de Fresnel le courant dans la self est en retard de $\pi/2$ par rapport à la d.d.p à ses bornes ; (ou la d.d.p aux bornes de la self est en avance de $\pi/2$ sur le courant qui la parcourt).



Charge résistive
(i en phase avec v)



charge purement inductive
(i en retard d'1/4 de période sur v)

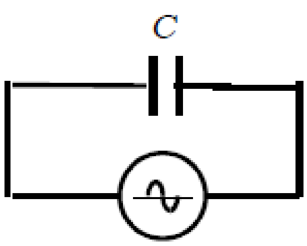
6.2.5 Circuit formé d'un condensateur pur.

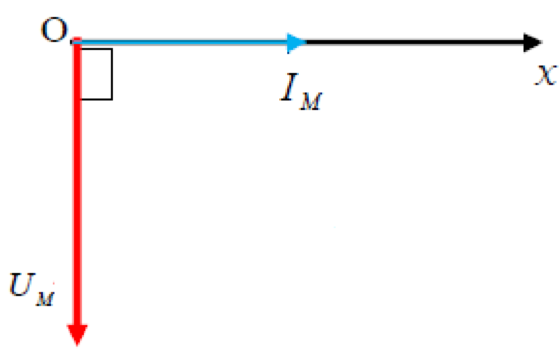
Le circuit, de la figure ci-dessous, est parcouru par un courant sinusoïdal d'intensité

$$\boxed{i(t) = I_M \cos(\omega t)}$$

La d.d.p aux bornes du condensateur de capacité C est donnée par la loi d'Ohm :

$$\boxed{u(t) = \frac{1}{C}\int i\,dt}$$





D'où :

$$\boxed{U_M \cos(\omega t + \varphi) = \frac{I_M}{C\omega}\sin(\omega t) = \frac{I_M}{C\omega}\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)}$$

On obtient :

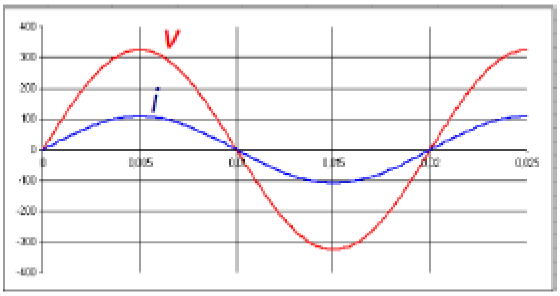
$$\boxed{U_M = \frac{1}{C\,\omega} I_M \quad \text{et} \quad \varphi = -\frac{\pi}{2}}$$

En considérant les valeurs efficaces, on a :

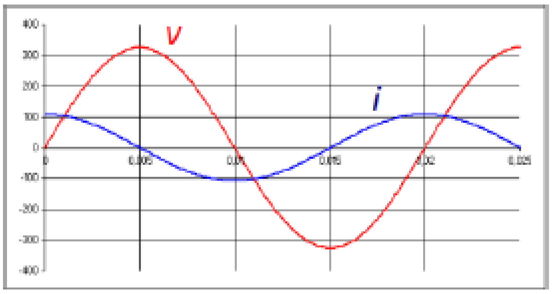
$$\boxed{U = \frac{1}{C\,\omega} I = Z\,I \quad \text{soit} \quad Z = \frac{1}{C\,\omega}}$$

Z représente l'impédance du condensateur de capacité C.

Dans le diagramme de Fresnel la d.d.p aux bornes du condensateur est en retard de π **/2** sur le courant. Ou inversement, le courant présente une avance de π **/2** sur la d.d.p.



Charge résistive
(i en phase avec v)



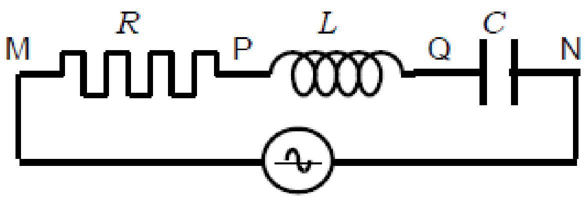
charge purement capacitive
(i en avance d'1/4 de période sur v)

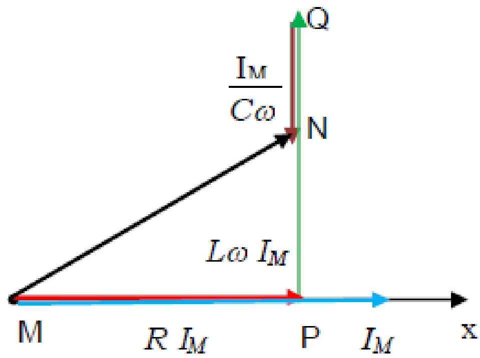
Cependant quel que soit le choix de cette origine, le courant est toujours:

- en phase avec la tension dans le cas d'une résistance R.
- en retard de π **/2** sur la tension dans le cas d'une self.
- en avance de π **/2** dans le cas d'une capacité.

6.2.6 Etude du circuit R, L, C série.

Un courant d'intensité i(t)= I_M cos (ωt) circule dans le circuit de ci-dessous. La d.d.p aux bornes du circuit est donnée par la loi d'Ohm :





$$u(t) = R\,i + L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int i\,dt \qquad \text{avec} \quad i(t) = I_M \cos(\omega t)$$

Sachant que :

$$u_M - u_P = Ri = RI_M \cos(\omega t)$$

$$u_P - u_Q = L\frac{di}{dt} = L\omega I_M \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$$
$$u_Q - u_N = \frac{1}{C}\int i\,dt = \frac{I_M}{C\,\omega}\cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

L'expression de *u(t)* devient :

$$u(t) = U_M \cos(\omega t) = RI_M \cos(\omega t) + L\omega I_M \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) + \frac{I_M}{C\,\omega}\cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

En utilisant les résultats trouvés ci-dessus, on trace le diagramme de Fresnel (voir figure au-dessus) correspondant à cette 'équation.

La d.d.p *u(t)* aux bornes du circuit est représentée par le vecteur ***MN***. Son module, qui représente la valeur maximale ***U_M*** de cette d.d.p, et le déphasage ***φ*** peuvent être calculés à partir du triangle MPN rectangle en P.

$$U_M = \sqrt{R^2 + \left[L\omega - \frac{1}{C\omega}\right]^2}\; I_M \quad \text{et} \quad tg\,\varphi = \frac{1}{R}\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)$$

Si on pose :

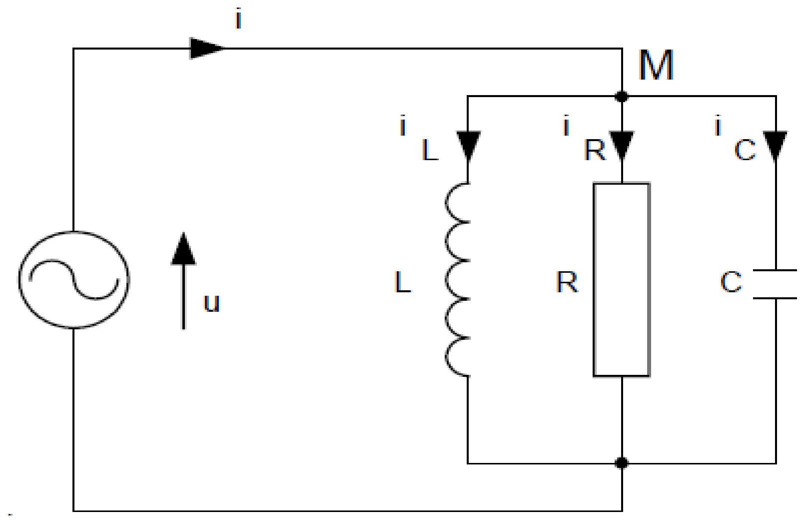
$$U_M = Z\,I_M$$

L'impédance du circuit s'écrit alors :

$$Z = \sqrt{R^2 + \left[L\omega - \frac{1}{C\omega}\right]^2}$$

6.2.7 Circuit R - L - C parallèle.

Les expressions des valeurs efficaces des courants à travers chaque élément sont :



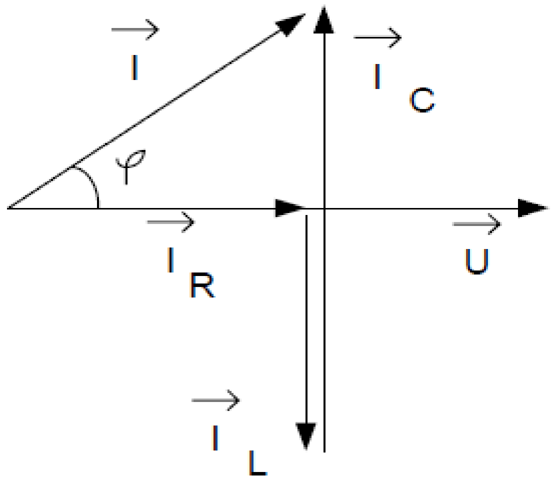
$I_R = \frac{U}{R}$, le courant efficace à travers la résistance ;

$I_L = \frac{U}{X_L}$, le courant efficace à travers la bobine, où X_L est la réactance inductive, $X_L = L\omega$

$I_C = \frac{U}{X_C}$, le courant efficace à travers le condensateur, où X_C est la réactance capacitive, $X_C = \frac{1}{C\omega}$

Le vecteur I représentant le courant principal du circuit est donnée par la somme vectorielle des vecteurs $\mathbf{I_R}$**,** $\mathbf{I_L}$ **et** $\mathbf{I_C}$.

On obtient graphiquement le vecteur I en rassemblant les représentations des vecteurs tensions et courant pour chaque composant du diagramme vectoriel ci-dessous :



Si on applique le théorème de Pythagore dans le triangle rectangle mis en évidence par le diagramme de Fresnel (figure. Ci-dessus) :

$$\boxed{I^2 = I_R^2 + (I_C - I_L)^2}$$

Lorsqu'on remplace les courants dans les composants par leurs expressions, on obtient :

$$I^2 = \left(\frac{U}{R}\right)^2 + \left(\frac{U}{X_C} - \frac{U}{X_L}\right)^2 \quad \text{soit} \quad I^2 = U^2\left[\frac{1}{R^2} - \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)^2\right]$$

D'où la valeur efficace du courant principal dans le circuit :

$$I = U\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)^2} \quad \text{soit} \quad I = U\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(C\omega - \frac{1}{L\omega}\right)^2}$$

Et l'admittance du circuit R-L-C parallèle définie comme le rapport entre le courant effectif et la tension effective aux bornes du circuit :

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

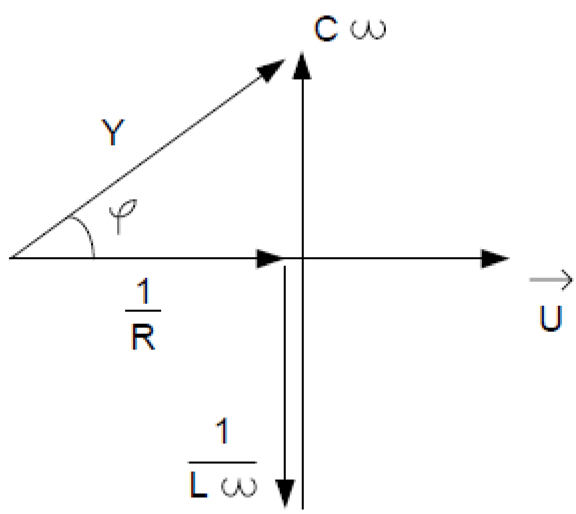
L'impédance du circuit qui est l'inverse de l'admittance a pour l'expression :

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

Remarque : On pourrait déterminer l'admittance du circuit à partir du triangle d'admittances,

associé au circuit, présenté auparavant et redessiné ci-dessous (figure ci-dessous):

$$\mathbf{Y} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + (C\omega - \frac{1}{L\omega})^2}$$



L'angle de déphasage φ entre la tension et le courant est compris entre –90° et 90°. Il peut être exprimé tel que :

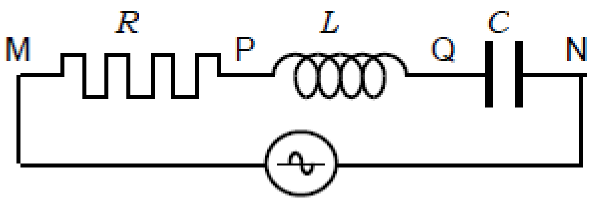
$$\mathbf{tg}\ \varphi = \mathbf{R(C}\omega - \mathbf{1/L}\omega\mathbf{)}$$

- Pour $C\omega > \frac{1}{L\omega}$, le circuit à caractère capacitif.
- Pour $C\omega < \frac{1}{L\omega}$, le circuit à caractère inductif.
- Pour $C\omega = \frac{1}{L\omega}$, le circuit est en résonance.

On peut facilement déterminer aussi le facteur de puissance du circuit en fonction de ses caractéristiques :

$$\cos\varphi = \frac{1}{RY}, \text{ ou } \cos\varphi = \frac{Z}{R} \text{ ou } \cos\varphi = \frac{1}{R\sqrt{\frac{1}{R^2}-(C\omega-\frac{1}{L\omega})^2}}$$

6.2.8 Etude du circuit R, L, C série : Résonance.



Le circuit de la figure ci-contre constitué d'une résistance *R*, d'un condensateur *C* et d'une bobine de self inductance *L* montés en série, est alimenté par une tension sinusoïdale de la forme : $u(t)=U_M \cos(\omega t)$

Rappel qu'on déjà vu précédemment dans la partie circuit R, L, C série la relation suivante :

$$Z=\sqrt{R^2+\left[L\omega-\frac{1}{C\omega}\right]^2} \quad \text{et} \quad tg\,\varphi=\frac{1}{R}\left(\frac{1}{C\omega}-L\omega\right)$$

Où φ représente le déphasage entre la tension.

$u(t) = U_M \cos(\omega t)$ et le courant $i(t) = IM \cos(\omega t + \varphi)$

Il est intéressant d'étudier les variations de l'impédance Z ou celles de l'intensité efficace I = U/Z en fonction de la pulsation ω. Les figures ci-dessous illustrent les évolutions de ces grandeurs en fonction de ω.

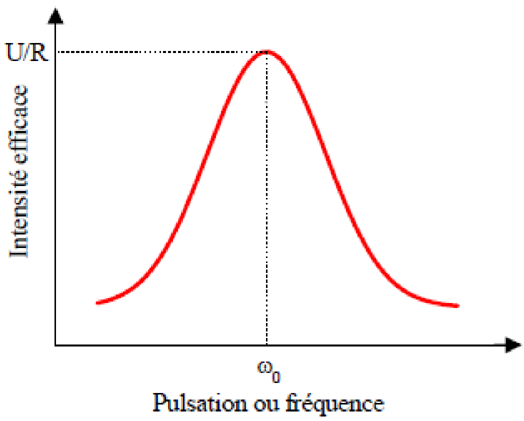
A partir des graphes des figures ci-dessous, on note que lorsque:

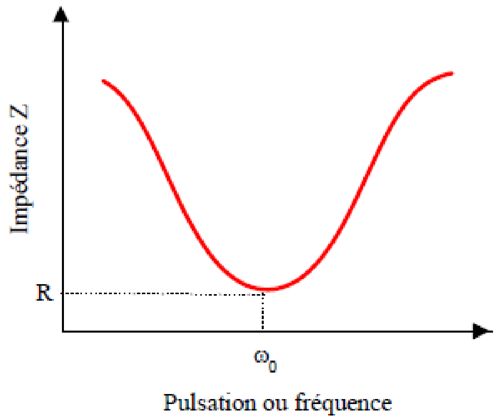
$$\boxed{\left[L\omega - \frac{1}{C\omega}\right]^2 = 0 \qquad \Rightarrow \qquad LC\omega^2 = 1}$$

L'impédance Z est minimale et vaut R ; l'intensité I est maximale et vaut U/R.

La pulsation a pour valeur:

$$\boxed{\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}}$$





ω_0 ne dépend que des caractéristiques L et C du circuit électrique qui constitue un oscillateur électrique. C'est la raison pour laquelle ω_0 est appelée pulsation propre de l'oscillateur et f_0 sa fréquence propre.

Lorsque la fréquence de l'excitation u(t) se rapproche de la fréquence propre de l'oscillateur, ce dernier entre en résonance.

A la résonance, plusieurs phénomènes sont observés, à savoir :

- Les tensions aux bornes de la bobine et du condensateur sont algébriquement opposées et la d.d.p aux bornes du circuit résulte uniquement de la présence de la résistance.
- Les tensions aux bornes de la bobine et du condensateur peuvent à la résonance, valoir plusieurs centaines de fois la tension appliquée : on dit alors qu'il y a un phénomène de surtension.
- La formule montre que le déphasage entre le courant et la tension d'excitation est nul.

6.2.9 Facteur de qualité du circuit Q.

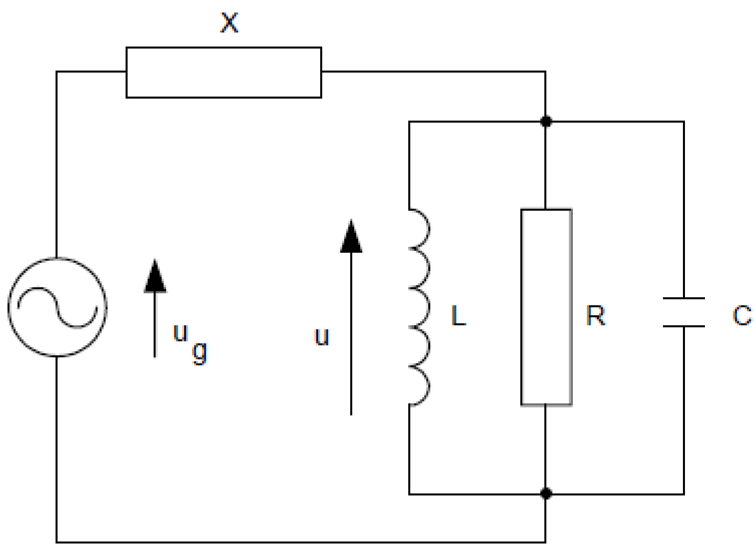
La résonance d'un circuit R-L-C série la tension aux bornes des éléments réactifs peuvent même dépasser la tension d'alimentation.

On appelle le facteur de qualité du circuit (symbole Q) le rapport entre la tension aux bornes d'un élément réactif et la tension d'alimentation pour la fréquence de la résonance :

$$Q = \frac{U_{LO}}{U} = \frac{U_{CO}}{U} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R}$$

Comme $\omega_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ d'où $Q = \frac{L}{2\pi R\sqrt{LC}}$ **et** $Q = \frac{1}{2\pi R}\sqrt{\frac{L}{C}}$

6.2.10 Etude du circuit R, L, C parallèle : Résonance.



Il existe une fréquence particulière pour laquelle les réactances des deux éléments réactifs sont égales :

$$X_L = X_C \qquad \text{et} \quad L\omega = \frac{1}{C\omega} \qquad fo = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

La condition de résonance ainsi que l'expression de la fréquence de résonance sont les mêmes que celles associées au circuit R-L-C série. Les diagrammes vectoriels associés sont présentés sur la figure ci-dessous.

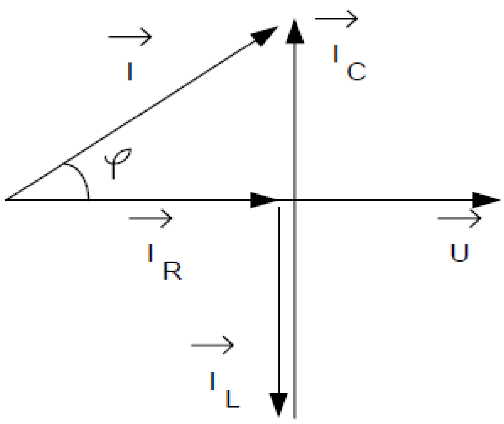


Diagramme de Fresnel pour $f \neq f_o$

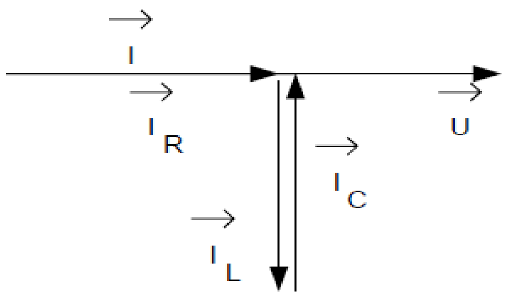


Diagramme de Fresnel pour $f = f_o$

On dit que pour cette fréquence fo il y a la résonance de la tension U ou aussi que le circuit R-L-C se trouve à la résonance.

Le courant principal devient le courant dans le circuit en résonance. Le groupement obtient un caractère purement résistif et le courant total et la tension à ses bornes sont en phase.

Pour la fréquence de résonance :

- Le courant total du groupement parallèle atteint un minimum.
- L'impédance du circuit devient égale à la résistance.

$$Z = R$$

Alors l'impédance d'un circuit R-L-C parallèle à la résonance est minimum. La fréquence de résonance ne dépend que des caractéristiques des éléments réactifs :

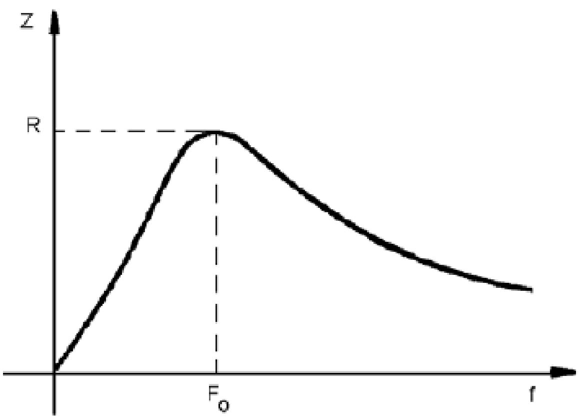
$$\boxed{fo = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}}$$

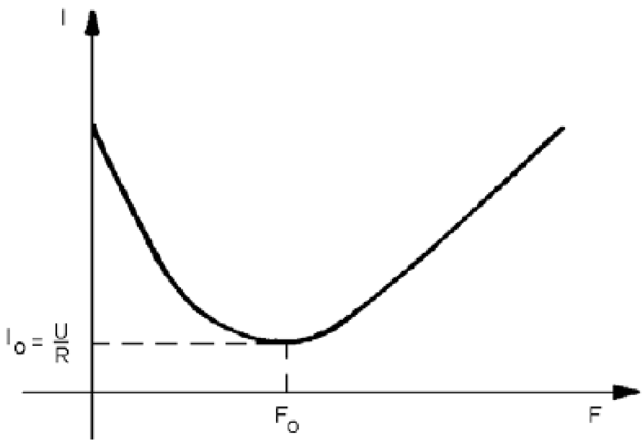
Les graphiques sur la figure ci-dessous présentent :

- la variation de l'impédance du circuit R-L-C parallèle en fonction de la fréquence;
- la variation du courant dans un circuit R-L-C parallèle en fonction de la fréquence d'une tension d'alimentation de valeur efficace constante.

Remarque :

A la résonance d'un circuit R-L-C parallèle le courant total du groupement est égal au courant dans la résistance. Cela ne signifie pas que les éléments réactifs ne seraient pas parcourus par des courants. On observe dans le diagramme vectoriel que les courants dans les éléments réactifs sont égaux en valeur efficace, mais déphasés de 180° un sur l'autre.



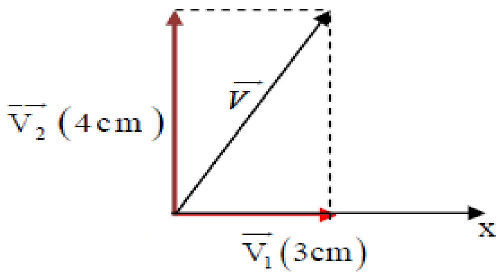


6.2.11 Exercices de compréhensions :

Ex. 1

Effectuer par la méthode de Fresnel, la somme des grandeurs sinusoïdales :

$$x_1 = 3\sin\omega t \qquad x_2 = 4\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$



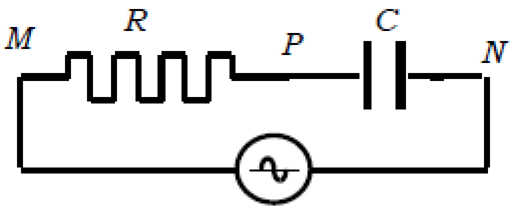
$$x_1 \rightarrow \overrightarrow{V_1} : \left\|\overrightarrow{V_1}\right\| = 3\,cm, \quad \varphi_1 = \left(\overrightarrow{Ox}, \overrightarrow{V_1}\right) = 0$$

$$x_2 \rightarrow \overrightarrow{V_2} : \left\|\overrightarrow{V_2}\right\| = 4cm, \quad \varphi_2 = \left(\overrightarrow{Ox}, \overrightarrow{V_2}\right) = \frac{\pi}{2}$$

$$x \rightarrow \overrightarrow{V} : \left\|\overrightarrow{V}\right\| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2} = 5cm \ , \quad \mathrm{tg}(\varphi) = \frac{x_2}{x_1} = 1.33 \Rightarrow \varphi = 53°\,(0.3\pi)$$

D'où , $$x = x_1 + x_2 = 5\sin(\omega t + 0.3\,\pi) \quad \Rightarrow \quad x = 5\sin 2\pi\left(\frac{t}{T} + 0,15\right)$$

Ex. 2



Le circuit de la figure ci-contre, constitué d'une résistance R et d'un condensateur C placés en série, est parcouru par un courant sinusoïdal de la forme :

$$i(t) = I_M \cos(\omega t).$$

En utilisant la représentation de Fresnel, déterminer l'impédance équivalente du circuit ainsi que le déphasage entre la d.d.p u(t) et le courant qui le parcourt.

A.N. ω **=5.10 3 rd/s,** R **= 1kΩ,** C **= 0,22 µF**

La d.d.p aux bornes du circuit est donnée par la loi d'Ohm :

$$\boxed{u(t) = Ri + \frac{1}{C}\int i\,dt \quad \text{avec} \quad i(t) = I_M \cos(\omega t)}$$

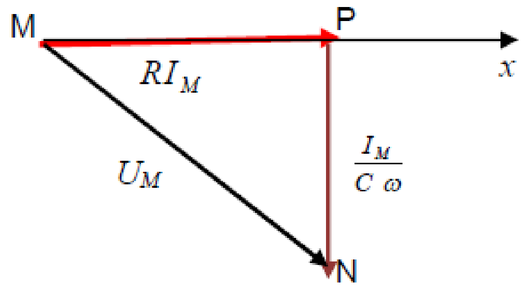
Sachant que :

$$V_M - V_P = Ri = RI_M \cos(\omega t)$$

$$V_P - V_N = \frac{1}{C}\int i\,dt = \frac{I_M}{C\omega}\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\boxed{\text{et que : } \frac{U_M}{I_M} = Z}$$

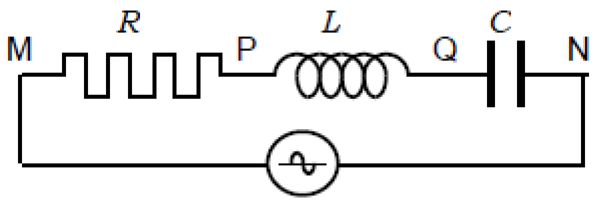
On obtient à partir du triangle MPN rectangle en P



$$Z = \frac{U_M}{I_M} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{C\omega}\right)^2} \qquad \text{tg}\,\varphi = \frac{1}{RC\omega}$$

A.N : on trouve $Z = 1.35\ \text{k}\Omega$, et $\varphi = 0.74\ \text{rad}\ (42°)$

Ex. 3



On considère un circuit *R, L, C* monté en série (figure ci-dessous) et soumis à une d.d.p :

$$\boxed{u(t) = U\sqrt{2}\,\sin(\omega t)}$$

On donne : U = 2 volts, L = 0,4 mH, C = 400 pF, R = 5 Ω.

1) Calculer la pulsation propre ω_0, du circuit, sa fréquence propre fo et la valeur maximale du courant Io qui parcourt le circuit à la résonance.

2) Trouver les valeurs des tensions U_{oL} et U_{oC} , mesurées à la résonance, aux bornes de la self et de la capacité.

En déduire le coefficient de surtension ou facteur de qualité du circuit :

Q= U_{oL} / U.

La pulsation propre du circuit est calculée à partir de l'expression

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \Rightarrow \quad f_o = \frac{\omega_o}{2\pi} \qquad I_o = \frac{U}{R}$$

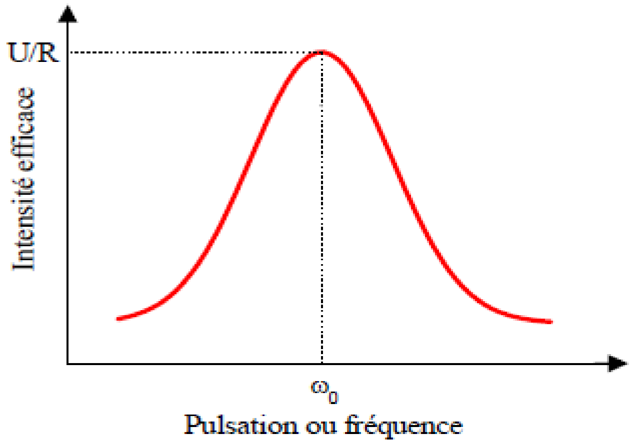
A.N: ω_0= 2,5 10^6 rad/s, f o = 400 kHz, Io = 0,4 A

Calcul des tensions U_{oL} et U_{oC} et du coefficient de qualité Q :

$$U_{o,L} = L\omega_o I_o \quad \text{soit avec (a)} \quad U_{o,L} = L\omega_o \frac{U}{R} = 400 \text{ volts} \quad \Rightarrow$$

$$Q = \frac{U_{oL}}{U} \qquad \text{soit} \qquad Q = \frac{L\omega_o}{R} = 200$$

A la résonance la tension aux bornes de la self U_{oL} est multipliée par un facteur Q = 200 : il en résulte une surtension. Il en est de même de la tension aux bornes du condensateur : U_{oC} = 400 volts. La courbe, qui représente la variation du courant en fonction de la fréquence (figure ci-dessous), est d'autant plus aigüe que le facteur de qualité Q est grand



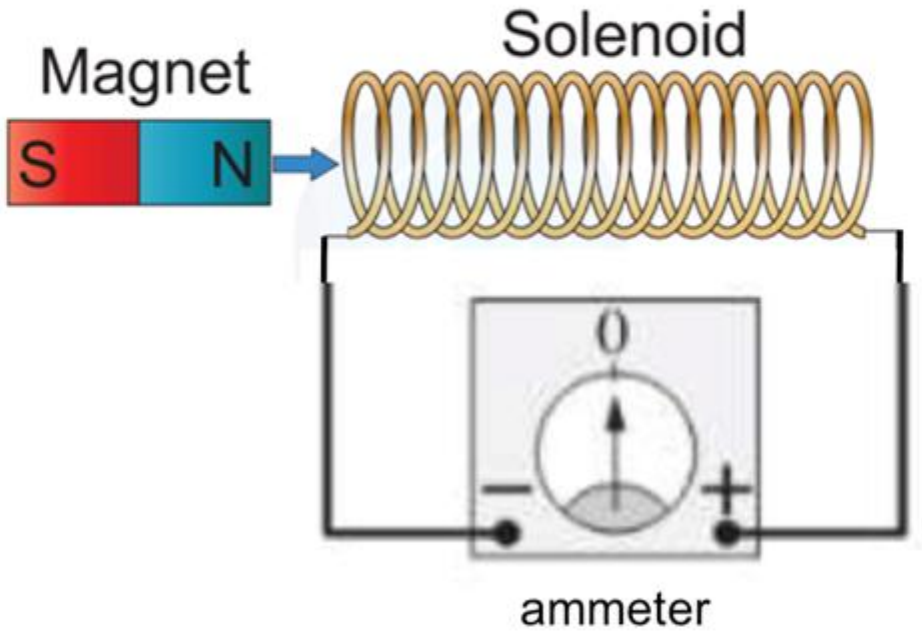
6.3 Production d'une onde sinusoïdale.

6.3.1 Induction électromagnétique

L'induction électromagnétique est un **phénomène** physique conduisant à **l**'apparition d'une force électromotrice dans un conducteur électrique soumis à un flux de champ magnétique variable. Ce phénomène fut découvert par Michel Faraday en 1831.

La loi de Faraday dit que la force électromotrice induite dans un bobinage fermé placé dans un champ **magnétique** est proportionnelle à la variation au cours du temps du flux du champ **magnétique** qui entre dans le circuit :

$$\boxed{e = -\frac{d\Phi}{dt}}$$

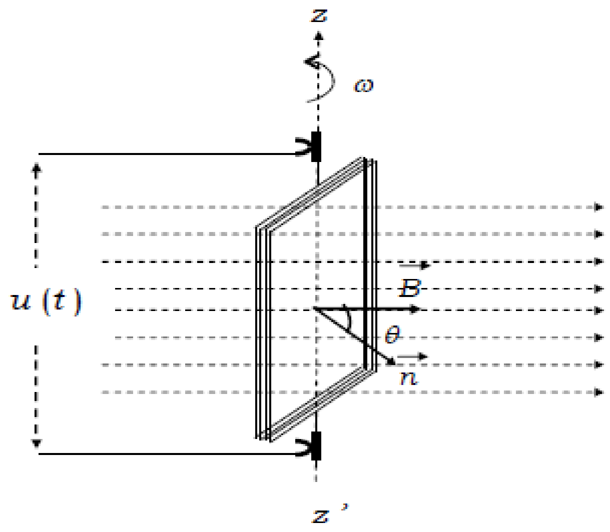


a) Si le flux magnétique varié avec le temps à l'intérieur d'une spire (voire circuit électrique) une tension appelée force électromotrice est induite entre ses bornes.

b) La valeur de cette tension induite est proportionnelle au taux de variation du flux

c) La valeur de la tension induite, change se signe en fonction de la du sens de l'aimant Nord /Sud.

Le courant induit prend deux sens positif et négative en fonction de la polarité Nord Sud



Soit une bobine à *N* spires tournant, autour de l'axe *z'z* à la vitesse angulaire constante ω, dans un champ magnétique uniforme *B* perpendiculaire à *z'z*.

Nous avons trouvé que la f.é.m. induite dans la bobine est :

$$\boxed{e = -\frac{d\Phi}{dt} = \omega\,\Phi_M \sin(\omega t) = E_M \sin(\omega t)}$$

Il en résulte, aux bornes de la bobine une différence de potentiel, ou tension sinusoïdale *u* (*t*) de pulsation *ω*.

On obtient le même résultat si le cadre est fixe et si le champ tourne à la vitesse angulaire *ω*. C'est le principe de l'alternateur monophasé.

On choisit une origine des phases qui permet d'écrire :

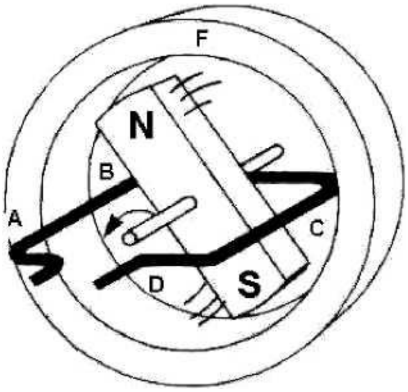
$$u(t) = U_M \cos(\omega t) \quad \text{ou} \quad u(t) = U\sqrt{2}\cos(\omega t)$$

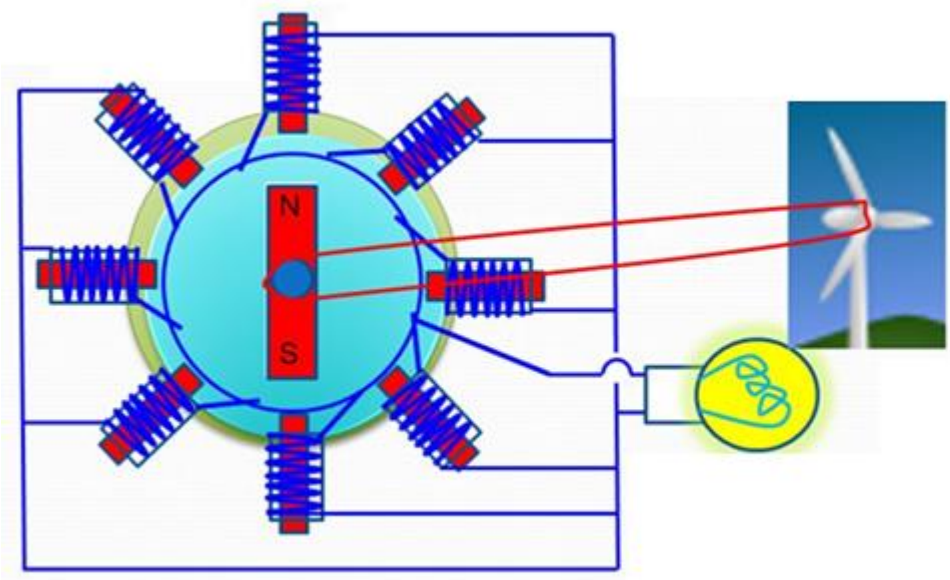
U est la valeur efficace de la tension u (t).

Lorsque le générateur est relié à une charge, il débite en régime permanent, un courant sinusoïdal de même pulsation ω et déphasé d'un angle ϕ par rapport à u(t).

6.3.2 Principe d'Alternateur et Dynamo.

A) Générateur de courant induit : Alternateur





Peut-être :

- Une éolienne.
- Une chute d'eau.
- Un moteur.
- Ou autres.

Tout système fait tourner l'aimant permanent (en rouge au centre), ce dernier en passant devant les bobines crée du courant dans les bobines et par conséquent, la lampe s'allume.

Un alternateur correspond à l'association d'une bobine et d'un aimant qui peut tourner. (A grande échelle, comme dans une centrale électrique l'aimant est remplacé par un **électroaimant**).

Lorsque l'aimant tourne, ses pôles magnétiques sud et nord s'approchent puis s'éloignent successivement de la bobine provoquant ainsi l'apparition d'une tension aux bornes de cette dernière: **la bobine joue alors le rôle de** générateur électrique.

Lorsque l'aimant d'un **alternateur** (ou son électroaimant) est mis en rotation celui-ci possède une énergie cinétique qui est convertie en énergie électrique.

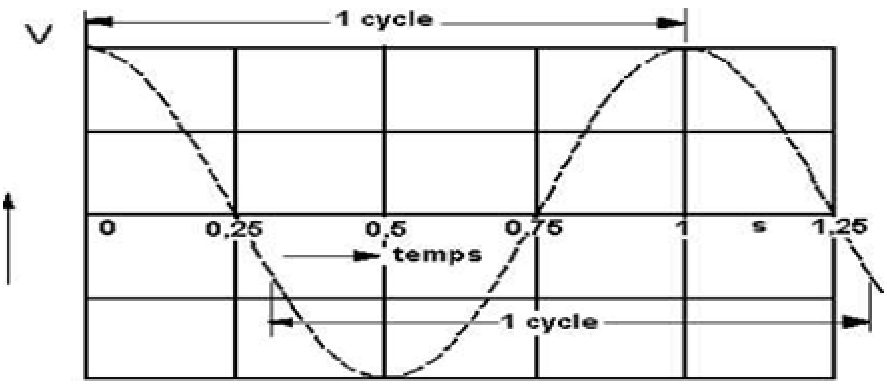
Conclusion :

Un alternateur est un convertisseur d'énergie cinétique en énergie électrique.

Lorsqu'on représente sur un graphique les valeurs que la tension induite prise pour chaque position de l'aimant, on obtient une courbe ondulée avec des valeurs extrêmes de même valeur absolue mais de polarité contraire.

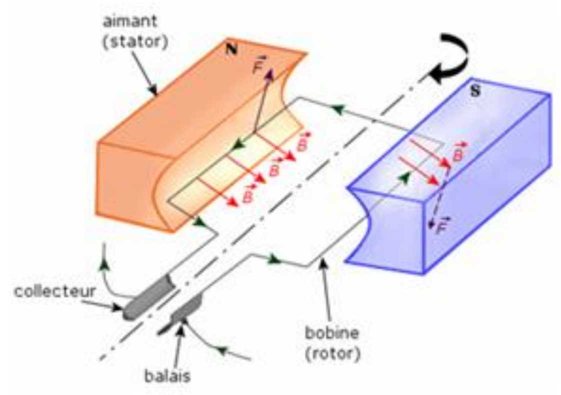
Une tension dont la polarité alterne successivement d'une valeur positive à une valeur négative est appelée ***alternative***. En plus la forme d'onde de la tension induite dans la spire est sinusoïdale.

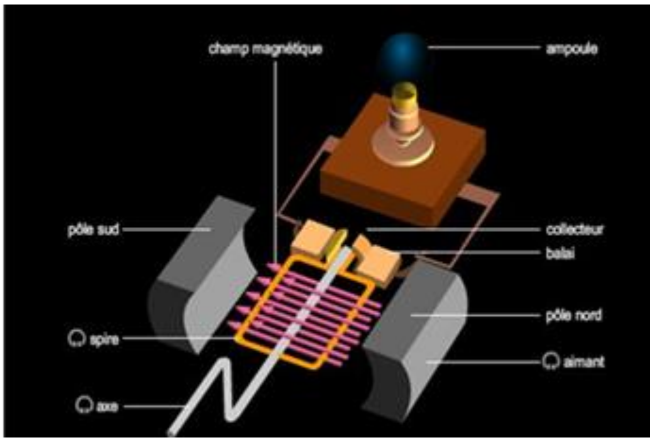
Les machines qui génèrent ces tensions s'appellent ***alternateur*** ou *générateur à courant alternatif.*



Forme d'onde de la tension induite en fonction de temps.

B) Générateur de courant induit : Dynamo





6.4 Puissance électrique en courant alternatif monophasé.

6.4.1 Puissance active

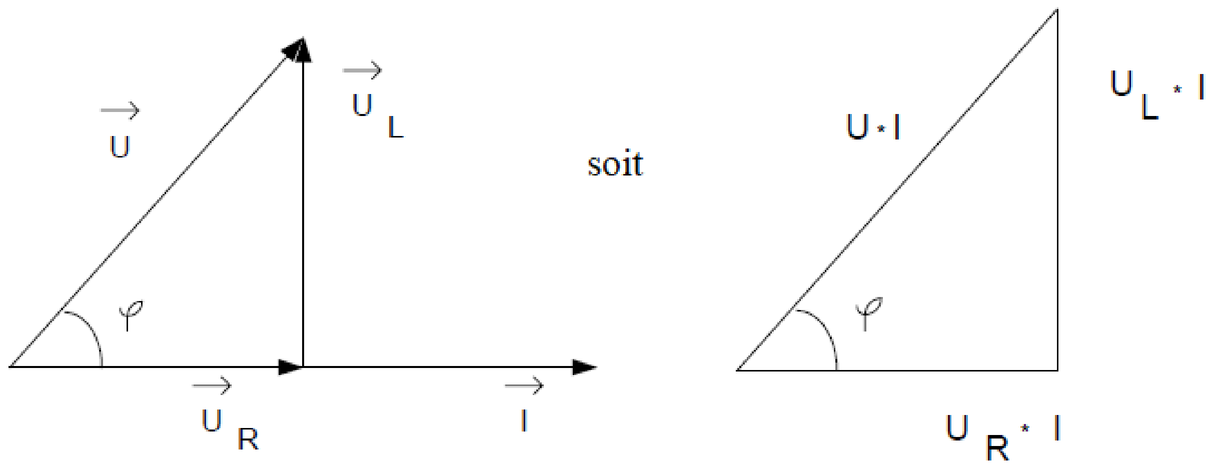
Elle désigne la puissance effective liée à l'énergie électrique qui peut être convertie par le récepteur résistif sous une autre forme d'énergie (mécanique, calorifique etc..). Elle est mesurée en **watt (W)** et son expression en courant sinusoïdal est donnée par l'équation :

$$\boxed{P = U\ I \cos\varphi}$$

Le terme cos ϕ est appelé "facteur de puissance" du récepteur. Il mesure l'efficacité d'un système à produire de la puissance active.

Dans le cas

- d'une self ou d'un condensateur, $\varphi = \pm\frac{\pi}{2} \Rightarrow P = 0.$
- d'une résistance $\varphi = 0 \Rightarrow P = U\ I$



6.4.2 Puissance réactive.

Elle est liée, comme le montrent les exemples qui suivent, à l'énergie emmagasinée durant un quart de période, dans les selfs et les condensateurs du récepteur, puis entièrement restituée au réseau au cours de l'autre quart. C'est une énergie qui n'est donc pas consommée par la charge, elle est définie par :

$$\boxed{Q = U\ I\ \sin\varphi}$$

Elle est mesurée **en Var** (volt-ampère-réactif).

Cette puissance est qualifiée ainsi parce que l'absorption et la restitution de l'énergie sont dues à la réaction d'une self ou d'un condensateur aux variations du courant.

6.4.3 Puissance apparente.

La puissance apparente est, par définition, égale au produit de la tension par le courant.

$$\boxed{S = U\,I}$$

C'est la puissance maximale que peut atteindre la puissance active.

Le rapport de la puissance active P sur la puissance apparente notée S définit le facteur de puissance. On écrit alors :

$$\boxed{\frac{P}{S} = \cos\varphi}$$

S est mesurée en " volt-ampère " (VA).

Les puissances active, réactive et apparente sont reliées entre elles par les expressions suivantes:

$$\left.\begin{array}{l} P = UI\cos\varphi = S\cos\varphi \\ \\ Q = UI\sin\varphi = S\sin\varphi \end{array}\right\} \Rightarrow \left\{\begin{array}{l} S^2 = P^2 + Q^2 \\ \cos\varphi = \dfrac{P}{S} \end{array}\right.$$

Où :

S : la puissance apparente en VA.

P : la puissance active (réelle) en W.

Q : la puissance réactive en var.

6.4.4 Facteur de puissance

Le facteur de puissance cos ϕ est défini comme le rapport entre la puissance active (réelle) et la puissance apparente :

$$\boxed{\cos\varphi = \frac{P}{S}}$$

On demande d'une installation électrique de fonctionner avec une efficacité élevée, donc avec un maximum de puissance active. Le facteur de puissance doit être le plus proche de l'unité.

Conclusion :

On peut construire le triangle de puissances ayant les trois puissances pour côtés pour tous les récepteurs, les circuits ou les installations en courant alternatif (Figure ci-après).

Les relations pour le calcul des puissances en fonction des grandeurs globales sont :

- pour la puissance apparente : **S = UI**.
- pour la puissance active : **P = U I cos φ**.
- pour la puissance réactive : **Q = U I sin φ**.

Où :

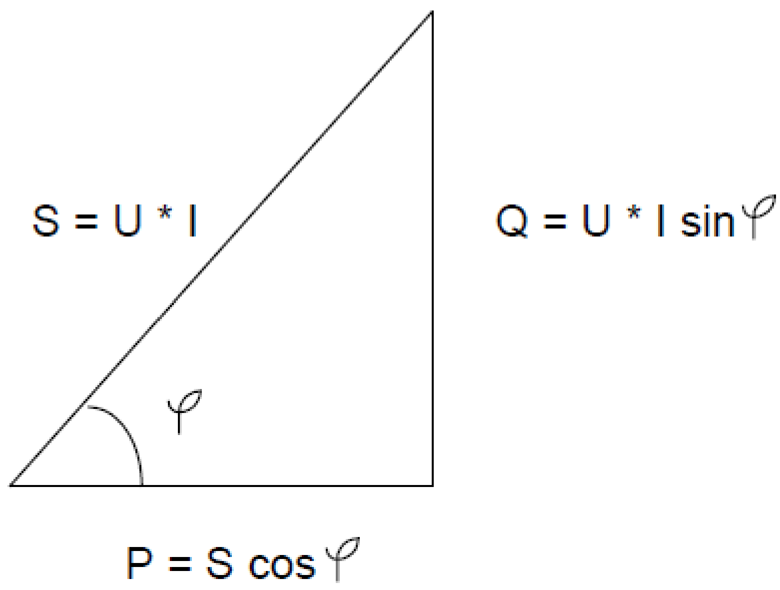
U = la tension efficace aux bornes du récepteur, du circuit ou de l'installation.

I = le courant efficace dans le récepteur, le circuit ou l'installation.

φ = le déphasage entre la tension U et le courant I aux bornes du récepteur, du circuit ou de l'installation.

Ou bien :

$$P = S \cos \varphi \qquad Q = S \sin \varphi \qquad P.\, tg\, \varphi = Q$$



6.5 Filtres et analyse fréquentielle.

6.5.1 Définition d'un filtre

Un filtre est un circuit dont le comportement dépend de la fréquence du signal d'entrée. Il permet de privilégier ou d'éliminer certaines fréquences d'un signal.

Il n'est pas un système électronique qui ne fasse appel à, au moins, un filtre. La plupart en comportent en grande quantité.

Le filtrage est une forme de traitement de signal, obtenu en envoyant le signal à travers un ensemble de circuits électroniques, qui modifient son spectre de fréquence et/ou sa phase et donc sa forme temporelle.

Il peut s 'agir soit :

- d'éliminer ou d'affaiblir des fréquences parasites indésirables
- d'isoler dans un signal complexe la ou les bandes de fréquences utiles.

Applications :

- systèmes de télécommunications (téléphone, télévision, radio, transmission de données…)
- systèmes d'acquisition et de traitement de signaux physiques (surveillance médicale, ensemble de mesure, radars…)
- alimentation électrique….

6.5.2 Exemple de filtre : condensateur de filtrage des lignes téléphonique.

Lors d'un appel téléphonique, l'utilisateur crée, par l'intermédiaire du micro, un signal électrique de fréquence comprise entre 300 et 4000 Hz (fréquence audibles). Une ligne téléphonique transporte ces signaux. Mais, à cause de parasitages (ondes électromagnétiques …), on retrouve également sur la ligne des signaux supplémentaires de fréquences élevées.

Or, pour l'autre utilisateur (en réception), seuls les signaux de fréquences audibles sont nécessaires. Les signaux parasites peuvent éventuellement dégrader la qualité de la communication.

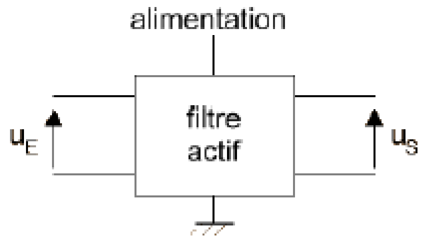
L'opérateur téléphonique a donc à l'époque ajouté un filtre que l'on nomme passe-bas (filtre conservant les basses fréquences et éliminant les hautes fréquences) afin d'éliminer les signaux parasites.

En pratique, cela est réalisé par un condensateur placé dans les prises téléphoniques.

6.5.3 Types de filtre

Les filtres peuvent se rencontrer sous une multitude de formes de circuits. On distingue toutefois 3 grandes familles : les filtres actifs, les filtres passifs et les filtres numériques.

Les filtres actifs sont des circuits comprenant une alimentation externe.

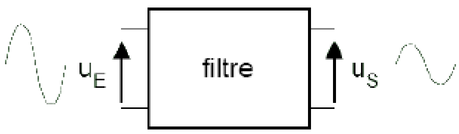


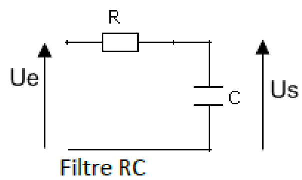
Les filtres numériques fonctionnement à partir de signaux échantillonnés en réalisant des opérations mathématiques sur les échantillons

Les filtres passifs sont des quadripôles constitués de résistances, de bobines et de condensateurs.

Rq : On n'étudiera dans ce cours que le filtrage passif

Les filtres passifs se présentent sous la forme de quadripôle linéaire : réseau électrique à 4 bornes à base de composants passifs (résistances, inductances, condensateurs).





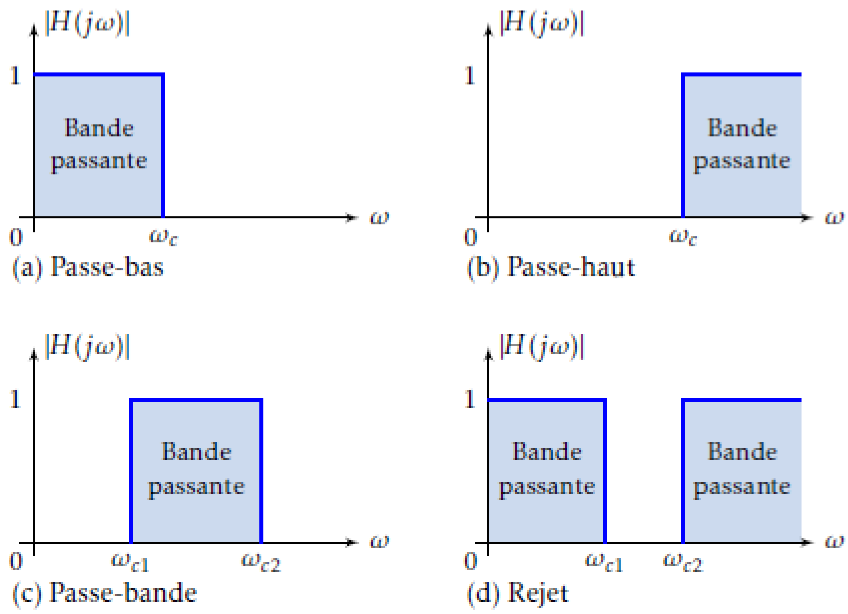
R=10kΩ

C=10 nF

Un filtre passif est un circuit linéaire ⇒ si la tension d'entrée est sinusoïdale alors la tension de sortie est sinusoïdale de même fréquence. (Rq : une tension continue a une fréquence nulle.)

On distingue 4 types de filtres fondamentaux :

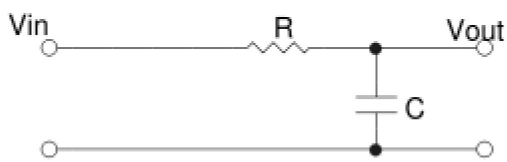
- passe bas : le circuit garde les signaux ayant une basse fréquence (inférieure à un certain seuil)
- passe haut : le circuit garde les signaux ayant une haute fréquence (supérieure à un certain seuil)
- passe bande : le circuit conserve les signaux ayant une fréquence comprise entre deux seuils
- réjecteur : le circuit coupe les signaux ayant une fréquence comprise entre deux seuils



6.5.4 Filtre passe-bas

Le concept de filtre passe-bas est d'atténuer les fréquences supérieures à sa fréquence de coupure fc et ce, dans le but de **conserver uniquement les basses fréquences**. La fréquence de coupure du filtre est la fréquence séparant les deux modes de fonctionnement idéaux du filtre: passant ou bloquant.

Filtre passe-bas du premier ordre



La manière la plus simple de réaliser physiquement ce filtre est d'utiliser un circuit RC. Comme son nom l'indique, ce circuit est constitué d'une résistance R et d'un condensateur de capacité C. Ces deux éléments sont placés en série avec la source vi du signal. Le signal de sortie vo est récupéré aux bornes du condensateur. Pour retrouver la fonction de transfert de ce filtre, il faut travailler dans le domaine de Laplace en utilisant les impédances des éléments. Avec cette technique, le circuit devient un simple diviseur de tension, et on obtient cette formule :

$$\mathrm{Av} = \frac{\mathrm{Vout}}{\mathrm{Vin}} = \frac{1}{1 + jRC\omega}$$

L'impédance du condensateur vaut

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{jC\omega}$$

- Si ! → 0 alors ZC → ∞ (refaire le schéma en supprimant la branche contenant le condensateur) et Us → Ue.
- Si ! → ∞ alors ZC → 0 (refaire le schéma en remplaçant la branche contenant le condensateur par un fil) et Us ⟶ 0.

On peut donc déjà dire que le filtre transmet les signaux de basse fréquence et atténue ceux de haute fréquence d'où la dénomination de filtre passe-bas.

Fonction de transfert

La fonction de transfert est définie par

$$\boxed{\underline{H}(j\omega) = \frac{\underline{U}_s}{\underline{U}_e}}$$

$$\frac{\underline{U}_s}{\underline{U}_e} = \frac{\dfrac{1}{jC\omega}}{R + \dfrac{1}{jC\omega}} = \frac{1}{1 + jRC\omega}$$

$$\boxed{\underline{H}(j\omega) = \frac{1}{1 + j\dfrac{\omega}{\omega_0}}}$$

$$\text{en posant } \omega_0 = \frac{1}{RC}$$

Diagramme de Bode - Pulsation de coupure à -3dB

Le module de la fonction de transfert est appelée gain

$$H(\omega) = |\underline{H}(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}$$

$$\text{expérimentalement } H(\omega) = \frac{U_{sm}}{U_{em}} = \frac{U_s}{U_e} \text{ (oscilloscope ou multimètre)}$$

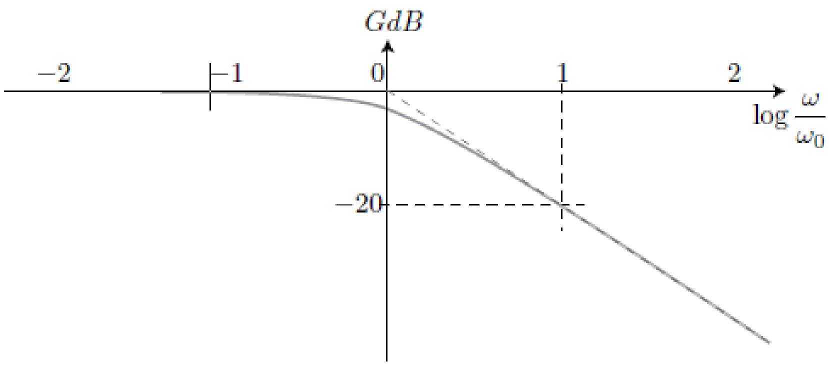
On définit le gain en décibel

$$\boxed{G_{dB} = 20\log|\underline{H}(j\omega)|} \quad = -10\log\left(1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)$$

On représente le gain en décibel non pas en fonction de $\frac{\omega}{\omega_0}$ (ou ω ou f) mais en fonction de $\log\frac{\omega}{\omega_0}$ (la plage de fréquence pouvant s'étendre de quelques Hz à $10^6\,Hz$ et plus)

Si ω petit devant ω_0 alors $G_{dB} \simeq 0$

Si ω grand devant ω_0 alors $G_{dB} \simeq -20\log\frac{\omega}{\omega_0}$ droite de pente $-20\,dB$ par décade ce qui signifie que si ω est multiplié par 10, $\log\frac{\omega}{\omega_0}$ augmente de 1 et G_{dB} diminue de $20\,dB$



Les deux asymptotes se coupent pour $0 = -20\log\frac{\omega}{\omega_0}$ c'est à dire pour $\omega = \omega_0$; pour $\omega = \omega_0$, $H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}}$ et $G_{dB} = 20\log\frac{1}{\sqrt{2}} \simeq -3\,dB$. ω_0 est appelé pulsation de coupure à $-3\,dB$ et noté ω_c.

La **pulsation de coupure** à $-3\,dB$ du filtre est par définition la pulsation telle que

$$\boxed{G_{dB}(\omega_c) = -3\,dB}$$

Elle peut être interprétée comme la limite entre les comportements BF et HF du filtre :

les signaux de pulsations $\omega < \omega_c$ sont transmis en sortie avec une atténuation inférieure à $3\,dB$;
les signaux de pulsations $\omega > \omega_c$ sont transmis en sortie avec une atténuation supérieure à $3\,dB$;
Idéalement on considérera que le filtre laisse passer une pulsation ω si l'atténuation en sortie est inférieure à $3\,dB$.

La **bande passante** de ce filtre, c'est à dire l'ensemble des pulsations qu'il laisse passer, est donc $[0, \omega_0]$.

- Les signaux de pulsations $\omega < \omega_c$ sont transmis en sortie avec une atténuation inférieure à 3dB ;
- Les signaux de pulsations $\omega > \omega_c$ sont transmis en sortie avec une atténuation supérieure à 3dB ;

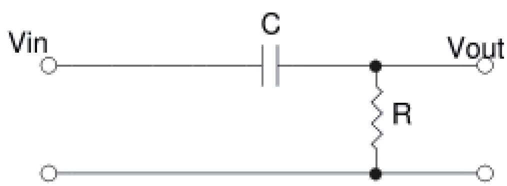
Idéalement on considèrera que le filtre laisse passer une pulsation ω si l'atténuation en sortie est inférieure à 3dB.

La bande passante de ce filtre, c'est à dire l'ensemble des pulsations qu'il laisse passer, est donc $[0, \omega_0]$.

6.5.5 Filtre passe-haut

Le concept de filtre passe-haut est d'atténuer les fréquences inférieure à sa fréquence de coupure fc et ce, dans le but de **conserver uniquement les hautes fréquences**. La fréquence de coupure du filtre est la fréquence séparant les deux modes de fonctionnement idéaux du filtre: bloquant ou passant.

Filtre passe-haut du premier ordre



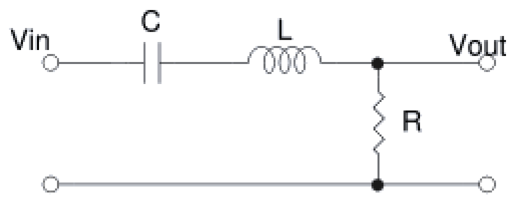
La manière la plus simple de réaliser physiquement ce filtre est d'utiliser un circuit RC. Comme son nom l'indique, ce circuit est constitué d'un condensateur de capacité C et d'une résistance R. Ces deux éléments sont placés en série avec la source vi du signal. Le signal de sortie vo est récupéré aux bornes de la résistance. Le circuit est identique à celui du filtre passe-bas mais les positions de la résistance et du condensateur sont inversées. Pour retrouver la fonction de transfert de ce filtre, il faut travailler dans le domaine de Laplace en utilisant les impédances des éléments. Avec cette technique, le circuit devient un simple diviseur de tension, et on obtient cette formule :

$$\mathrm{Av} = \frac{\mathrm{Vout}}{\mathrm{Vin}} = \frac{jRC\omega}{1 + jRC\omega}$$

6.5.6 Filtre passe-bande

Un filtre passe-bande est un filtre ne **laissant passer qu'un intervalle de fréquences**, celui-ci étant limité par la fréquence de coupure basse et la fréquence de coupure haute du filtre. Les applications en électronique sont multiples. Un circuit passe-bande peut servir à éliminer le bruit du signal, si l'on sait que le signal a des fréquences comprises dans une gamme de fréquences déterminée. C'est aussi un circuit passe-bande qui permet, en radiocommunication, de sélectionner la fréquence radio écoutée.

Filtre passe-bande du deuxième ordre



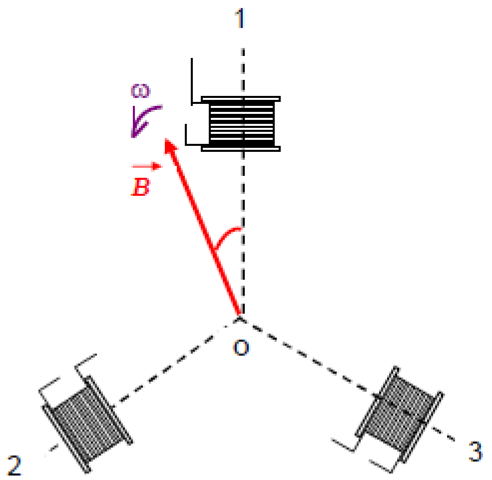
7. Circuits triphasés.

7.1 Les systèmes triphasés équilibrés.

Un système de tensions (ou courants) est triphasé et équilibré s'il est composé de trois tensions (ou courants) :

- Sinusoïdales.
- De même amplitude.
- De même fréquence.
- Et déphasées les unes par rapport aux autres de 2π/3.

7.1.1 Production de tensions triphasées:



Considérons :

- trois bobines identiques dont les axes sont fixes, décalés, l'un par rapport à l'autre, de $2\pi/3$ et placés comme l'indique la figure ci-dessus.
- et un champ magnétique B, uniforme et constant, tournant, autour de O, à la vitesse angulaire constante ω.

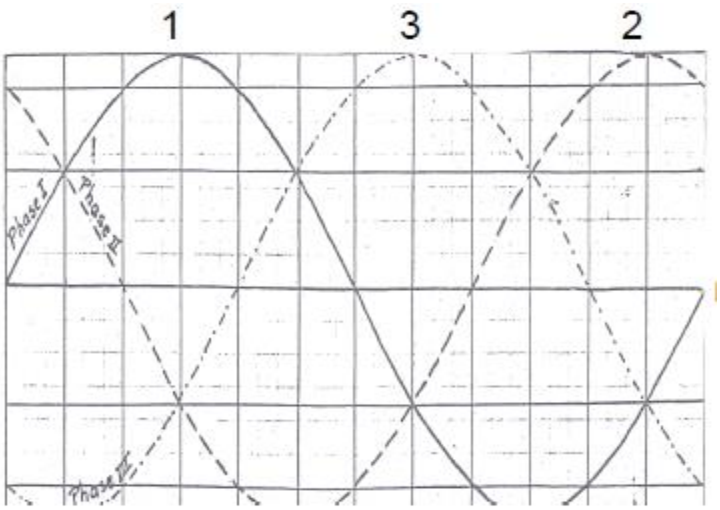
Les flux magnétiques traversant chaque bobine, sont respectivement :

$$\Phi_1 = B\,S\cos(\omega t)$$
$$\Phi_2 = B\,S\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$
$$\Phi_3 = B\,S\cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

S est la surface totale des N spires d'une bobine. Dans chaque bobine nait une force électromotrice induite.

$$e_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt} = \omega\,B\,S\sin(\omega t) \quad\Rightarrow\quad e_1 = E\sqrt{2}\,\sin(\omega t)$$
$$e_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt} = \omega\,B\,S\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad\Rightarrow\quad e_2 = E\sqrt{2}\,\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$
$$e_3 = -\frac{d\Phi_3}{dt} = \omega\,B\,S\sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad\Rightarrow\quad e_3 = E\sqrt{2}\,\sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Aux bornes des bobines apparaissent trois forces électromotrices sinusoïdales, de même amplitude EM = E $\sqrt{2}$, de même fréquence et déphasées de **2π/3.** Elles constituent un système triphasé. *E* est la valeur efficace de ces forces électromotrices.



On obtient le même résultat en faisant tourner, à la vitesse angulaire constante ω, un ensemble de 3 bobines solidaires, dont les axes sont décalés de $2\pi/3$, dans un champ magnétique uniforme et fixe. Le principe de l'alternateur triphasé est basé sur ce phénomène d'induction électromagnétique. Dans un alternateur, le champ magnétique est créé par l'inducteur placé en général sur la partie tournante (le rotor) et les f.é.m. prennent naissance dans l'induit, système de bobines placées sur la partie fixe (le stator).

7.1.2 Courants triphasés.

Si on ferme les trois bobines sur une charge constituée de trois impédances identiques :

$$Z1 = Z2 = Z3 = Z$$

Il passe dans chaque bobine de l'alternateur et dans chaque impédance un courant :

$$\boxed{\begin{aligned} i_1 &= I\sqrt{2}\ \sin(\omega t - \varphi) \\ i_2 &= I\sqrt{2}\ \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_3 &= I\sqrt{2}\ \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned}}$$

Ces trois courants forment, eux aussi, un système triphasé équilibré. Les tensions V_1, V_2, V_3, aux bornes de chaque impédance, constituent un système de tensions triphasé.

7.1.3 Transport de l'énergie électrique.

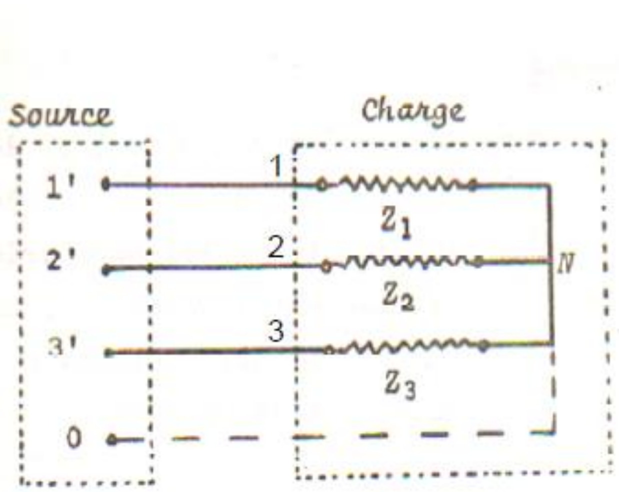
Pour transporter l'énergie électrique, ainsi produite, on peut utiliser 6 conducteurs qui relient la source (alternateur), à la charge (les 3 impédances) de l'utilisateur, mais cette solution est onéreuse. Il suffit de relier les 3 entrées des 3 bobines en un seul point O, et de monter la charge formée par les 3 impédances comme le montre la figure ci-dessous. Dans cette figure la charge est montée en étoile.

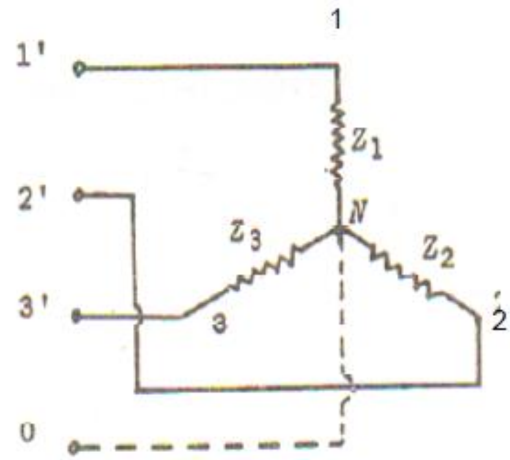
Au lieu de six conducteurs, on n'en utilise que quatre :

- trois fils pour les courants $\mathbf{i_1}$, $\mathbf{i_2}$, $\mathbf{i_3}$.
- et un fil neutre.

7.2 Montage de la charge en étoile.

Les deux charges triphasées, des figures ci-dessous sont identiques. Elles sont montées en étoile.





Les trois entrées 1, 2 et 3 des impédances sont respectivement reliées aux trois fils de ligne 1, 2 et 3, et les trois sorties, reliées entre elles, forment le neutre.

Remarque : Si les trois impédances sont identiques, la charge est équilibrée et les trois courants dans les lignes sont égaux, et que : $i\,1 + i\,2 + i\,3 = 0$. Le fil neutre n'est plus nécessaire et peut être supprimé.

Comme en monophasé, on représente chaque tension v et le courant i qu'elle crée par 2 vecteurs déphasés d'un angle Ø.

$$\vec{V} \quad \text{et} \quad \vec{I}$$

Les modules de ces vecteurs représentent les valeurs efficaces de v et i

En triphasé équilibré, on obtient un système de 3 vecteurs :

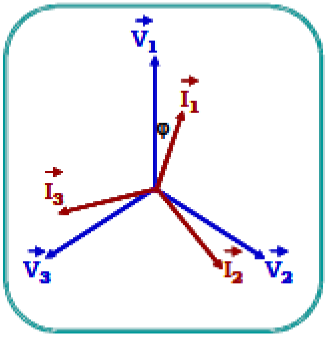
$$\vec{V}_1 \ , \ \vec{V}_2 \ , \ \vec{V}_3$$

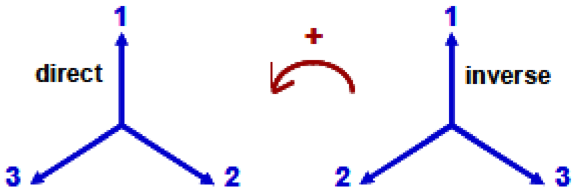
De même module décalés de $2\pi/3$, et un système de courants :

$$\vec{I}_1 \ , \ \vec{I}_2 \ , \ \vec{I}_3$$

Déphasé par rapport au précédent système d'un angle Ø (Figure ci-dessous).

Les tensions entre phases et neutres v1, v2, v3 sont également appelées ''tensions simples''.





Le premier système représente les 3 tensions et le second les courants qui leur correspondent.

Le système triphasé est direct si les 3 vecteurs se suivent dans le sens positif. Le système est inverse dans le cas contraire.

Les tensions entre lignes, ou tensions composées :

$$\boxed{\vec{U}_1 \quad , \quad \vec{U}_2 \quad , \quad \vec{U}_3}$$

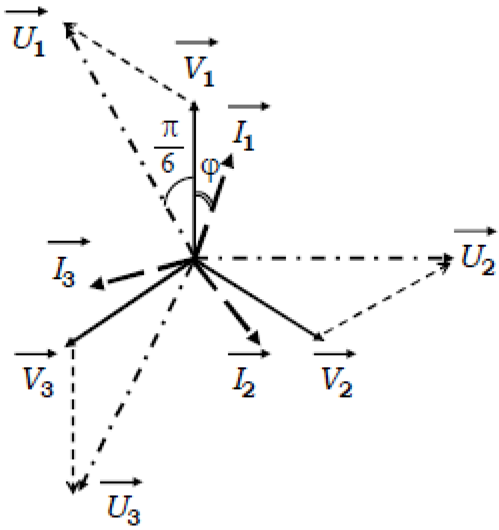
Forment un système triphasé équilibré en avance de $\pi\ /6$ sur le système de tensions simples.

$$\boxed{\vec{V}_1 \quad , \quad \vec{V}_2 \quad , \quad \vec{V}_3}$$

En effet

:

$$\begin{array}{ll} u_1 = v_1 - v_2 & \vec{U}_1 = \vec{V}_1 - \vec{V}_2 \\ u_2 = v_2 - v_3 & \vec{U}_2 = \vec{V}_2 - \vec{V}_3 \\ u_3 = v_3 - v_1 & \vec{U}_3 = \vec{V}_3 - \vec{V}_1 \end{array}$$



La figure ci-dessus montre que les tensions entre les lignes *U* et les tensions entre phase et neutre *V*, sont reliées par :

$$U = 2V\cos\frac{\pi}{6} \quad \Rightarrow \quad U = V\sqrt{3}$$

Dans le montage étoile le courant dans la ligne est égal au courant dans la phase.

7.3 Montage de la charge en triangle.

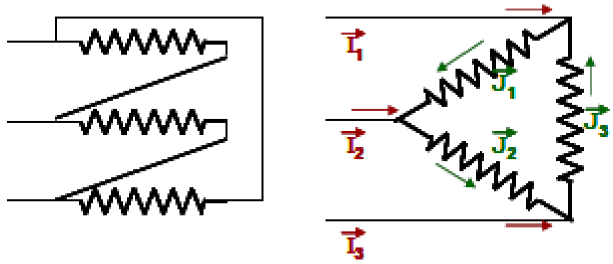
Les deux circuits représentés ci-après sont équivalents. Les tensions entre lignes :

$$\vec{U}_1 \quad , \quad \vec{U}_2 \quad , \quad \vec{U}_3$$

Forment un système triphasé équilibré en avance de $\pi/6$ sur le système des tensions simples. Il en est de même des courants :

$$\vec{J}_1 \quad , \quad \vec{J}_2 \quad , \quad \vec{J}_3$$

Dans les impédances. Ces courants ***J*** forment un système triphasé équilibré déphasé de Ø par rapport aux tensions entre les lignes ***U.***

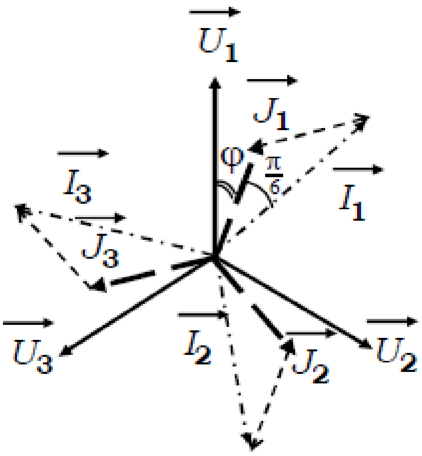


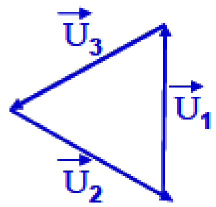
Lorsque la charge est montée en triangle, les lois de Kirchhoff permettent d'écrire :

$$\vec{I}_1 = \vec{J}_1 - \vec{J}_3$$

$$\vec{I}_2 = \vec{J}_2 - \vec{J}_1$$

$$\vec{I}_3 = \vec{J}_3 - \vec{J}_2$$





La figure ci-dessus montre que les courants *I* dans les lignes forment un système triphasé équilibré déphasé de 30° par rapport au système des courants *J*. On a :

$$I = 2\,J\cos\frac{\pi}{6} \qquad \Rightarrow \qquad I = J\sqrt{3}$$

Remarque :

1°) Dans un *montage en triangle*, il n'y a pas de point neutre.

2°) Lorsque les trois impédances ne sont pas identiques la charge est déséquilibrée, les courants n'ont plus la même amplitude et ils ne sont plus déphasés entre eux de 120°.

3°) L'étude des systèmes triphasés peut être généralisée en introduisant un nombre *p* de phases. Un système de tensions est *p*-phasé équilibré, s'il comporte *p* tensions sinusoïdales, de même amplitude, de même fréquence et déphasées les unes par rapport aux autres de 2 π /*p*.

7.4 Puissances en triphasé.

Que le système soit équilibré ou déséquilibré, la puissance active consommée par une charge triphasée est :

$$\boxed{P = \frac{1}{T}\int_0^T (v_1 i_1 + v_2 i_2 + v_3 i_3)\, dt}$$

Lorsque la charge est équilibrée et montée en étoile, les puissances instantanées dans chaque phase sont :

$$\begin{aligned}
p_1 &= V_M I_M \cos(\omega t)\cos(\omega t - \varphi) &&= V I \cos\varphi + V I \cos(2\omega t - \varphi) \\
p_2 &= V_M I_M \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\cos\left(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) &&= V I \cos\varphi + V I \cos\left(2\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) \\
p_3 &= V_M I_M \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)\cos\left(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) &&= V I \cos\varphi + V I \cos\left(2\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right)
\end{aligned}$$

A chaque instant la puissance totale consommée par la charge est :

$$\boxed{p = p_1 + p_2 + p_3 = 3 V I \cos\varphi \quad \text{soit} \quad p = \sqrt{3}\, U I \cos\varphi}$$

Cette puissance est constante, alors qu'en monophasé elle varie en fonction du temps. Lorsque le système est équilibré, que la charge soit montée en étoile ou en triangle, la puissance active consommée est :

$$\boxed{P = \sqrt{3}\, U I \cos\varphi}$$

La puissance réactive s'exprime sous la forme :

$$\boxed{Q = \sqrt{3}\, U I \sin\varphi}$$

Et la puissance apparente :

$$\boxed{S = \sqrt{3}\ U\ I}$$

7.5 Avantage des systèmes triphasés.

Les systèmes triphasés présentent de nombreux avantages par rapport aux systèmes monophasés.

1) Lors du transport de l'énergie électrique :

- Les pertes en ligne sont plus faibles en triphasé qu'en monophasé.
- Avec une même masse de cuivre, l'énergie transportée en triphasé est supérieure à celle qui serait transportée en monophasé.

2) Les systèmes triphasés permettent

- d'obtenir, à partir de bobines fixes, des champs magnétiques tournants.
- de disposer, au niveau du secteur de deux tensions d'alimentation. En basse tension : 220 V & 127 V et actuellement 380 V & 22O V.
- d'avoir un taux d'ondulation plus faible dans les redresseurs.

Bibliographie

- Companion Course to ECE 2020 - Electrical Circuits I Updated on August 17, 2020
- Marcel Jufer et Yves Perriard, Électrotechnique : Base de l'électricité, PPUR, 2014, 2e éd.
- Djelouah H *Electromagnétisme* Licence LMD S4, Ed. Les ''Cours de la Faculté de Physique'' 2012.
- Séguin M., Descheneau J., Tardif B. : *Electricité & magnétisme* Editions du Renouveau pédagogique 2010 - Edition DUNOD.
- Christophe Szczygielski, « Lecture et compréhension dans différents systèmes sémiotiques en électricité : Raisonner sur des schémas électrocinétiques ou electrotechniques et des montages électriques », Aster, no 48, 2009
- Lê Huy Hoàng, Circuits électriques, Presses de l'U. Laval, 2004
- Pérez J-P. , Carles R. , Fleckinger R. *Electromagnétisme - Fondements et applications* Ed. Masson Paris 2001
- Abdelmadjid Benseghir et Jean-Louis Closset, « Prégnance de l'explication électrostatique dans la construction du concept de circuit électrique : points de vue historique et didactique », Didaskalia, no 2, 1993
- Benson Harris *Electricité &Magnétisme* Edition du renouveau pédagogique 1999
- Travaux pratiques d'électromagnétisme Hassan MHARZI ENSAK 2016-2017.
- Basic Electrical Engineering Lab, DEV BHOOMI INSTITUTE OF TECHNOLOGY
- Recherches sur sites internet

Chapitre III

TRAVAUX DIRIGES / AUTOEVALUATION