

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



POLYCOPIE DE COURS

ÉLECTROTECHNIQUE FONDAMENTALE 1

(Cours)

Préparé par: **Mostefa KOULALI**



Promotion : **Licence2 Électrotechnique**
Semestre: **03**

Expertisé par:
Pr. NEGADI Karim
Dr. BOUAZZA Abdelkader

Année universitaire: 2022/2023



- 1- « L'Homme animé par l'esprit scientifique désire sans doute savoir, mais c'est aussitôt pour mieux interroger ». (Bachelard)
- 2- « Une théorie mathématiquement belle a plus de chance d'être correcte qu'une théorie inélégante, même si cette dernière décrit correctement les résultats expérimentaux ». (Paul Dirac)
- 3- « Le génie est fait d'un dixième d'inspiration... et de neuf dixième de transpiration ». (Edison)
- 4- « La théorie est absurde dans la pratique et la pratique est aveugle sans la théorie ». (Kant)
- 5- « En science, on trouve d'abord et on cherche ensuite. Il n'y a pas de fait en soi mais des faits observés ». (Imre Lakatos)
- 6- « Le savant n'est pas l'homme qui fournit les vraies réponses, c'est celui qui pose les vraies questions ». (C. Lévi-Strauss)
- 7- « Savoir s'étonner à propos est le premier mouvement de l'esprit vers la découverte ». (Louis Pasteur)
- 8- « Il ne faut pas dire que la science est utile parce qu'elle nous permet de construire des machines. Il faut dire : les machines sont utiles parce qu'elles nous permettent de faire de la science ». (Poincaré)
- 9-« Science sans conscience n'est que ruine de l'âme ». (Rabelais, 1494-1553)
- 10-« L'intelligence n'est pas une fonction isolable. Elle est, dans tout comportement, la plasticité qui permet d'échapper aux automatismes innés ou acquis ». (Zazzo, Le devenir de l'intelligence)
- 11-« Une personne qui n'a jamais commis d'erreurs, n'a jamais tenté d'innover ». (Albert Einstein)
- 12-« Je crois en une vie après la mort, tout simplement parce que l'énergie ne peut pas mourir Elle circule, se transforme et ne s'arrête jamais », (Albert Einstein)

TABLE DES MATIERES



Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I: Généralités et rappels mathématiques	
I. Définitions.....	3
II. Unités et formules simples.....	5
III. Les symboles électriques et électrotechniques	6
IV. Rappels mathématiques.....	8
IV.1 Formules de trigonométrie	8
IV.2 Nombres complexes	9
Chapitre II : Rappels sur les lois fondamentales de l'électricité	
I. Les grandeurs électriques.....	13
I.1.Le courant électrique.....	13
I.2. Les dipôles	13
I.2.1 Notions de dipôle et définitions.....	13
I.2.2 Classification des dipôles électrique	13
I.2.3.Conventions.....	14
II. Rappels sur les lois fondamentales de l'électricité	14
II.1 Lois et théorèmes en régime continue.....	14
II.1.1 Définition : (DC : direct current)	14
II-1-2 Définition Topologique	15
II.1.3 Les Résistances et leurs associations	15
II.1.4 Caractéristiques des sources de tensions.....	18
II.1.5 Analyse des circuits électriques	19
II.1.5.1 Lois de kirchhoff	19
II.1.5.2 Théorème de THEVENIN	22
II.1.5.3 Théorème de NORTAN	22
II.1.5.4 Théorème de Superposition.....	23
II.1.5.5 Diviseur de tension et de courant	23

II.1.5.6 Théorème de KENNELLY (transformation triangle-étoile)	23
II.2 Lois et théorèmes en régime alternatif.....	24
II.2.1 définition : (AC : alternating current)	24
II.2.2 intérêts	25
II.2.3 régimes variables.....	25
II.2.4 Caractéristiques du courant alternatif.....	26
II.2.5 Valeur moyenne- valeur efficace	27
II.2.6 Représentation d'une grandeur sinusoïdale	27
II.2.7 La loi d'Ohm et notion d'impédance.....	27
II.2.8 Eléments de base en alternatif.....	28
II.2.9 Association d'impédances	30
II.2.10 Résonance	31
II.2.11 Puissance électrique	32
II.2.12 L'énergie	34
II.3 Lois et théorèmes en régime transitoire	35
II.3.1 Définitions	35
II.3.2 Régimes transitoires de quelques circuits	35
II.3.2.1 Circuit RC	35
II.3.2.2 Circuit RL	36
II.3.2.3 Circuit RLC	37

Chapitre III : Systèmes Triphasés & Puissances Electriques

I. Généralités	38
I.1 Définition générale	38
I.2 Avantages du système triphasé	38
I.3 Applications	39
II. Système triphasé équilibré.....	40
II.1 Définition.....	40
II.2 Tensions simples et tensions composées	40

II.2.1 Courants et tensions	40
II.2.2 Tensions simples	40
II.2.3 Tensions composées.....	41
II.2.4 Relation entre U et V	42
II.3 Système triphasé équilibré direct et inverse.....	42
II.4 Récepteurs triphasés équilibrés.....	42
II.4.1 Définition	42
II.4.2 Couplage des récepteurs.....	43
III. Plaque à borne (Bornier)	46
III.1 Définition.....	46
III.2 Organisation d'une plaque à bornes	46
IV. Les puissances dans les récepteurs triphasés.....	48
IV.1 Rappel et définition	48
IV.1.1 Le triangle des puissances	48
IV.1.2 Théorème de BOUCHEROT.....	48
IV.2 Puissance dans les récepteurs triphasés équilibrés	49
IV.3 Mesure de puissance en triphasé	51
IV.3.1 Mesure de la puissance active dans le cas le plus général.....	51
IV.3.2 Méthode des deux wattmètres	51
IV.3.3 Relèvement du facteur de puissance.....	52
IV.4 Pertes joule dans un récepteur triphasé équilibré	53
IV.4.1 Pertes Joule en couplage triangle	53
IV.4.2 Pertes Joule en couplage étoile	53
V. Lecture de la plaque signalétique	54
VI. Notions sur le réseau de transport national	57
Chapitre IV : Circuits Magnétiques	
I. Généralités	58
I.1 Introduction	58

I-2 Définitions	58
I.3 Quelques exemples des circuits magnétiques	59
II. Electromagnétisme, matériaux et relations fondamentales	60
II.1 champ magnétique	60
II-2 Phénomènes d'excitation, d'aimantation et premières grandeurs	61
II.3 Classification des matériaux magnétiques	62
II.4 Les Matériaux ferromagnétiques	62
III. Notions incontournable et théorème d'ampère	63
III.1 Les ampères-tours ou force magnétomotrice	63
III.2 Le théorème d'ampère et son application à l'électrotechnique	64
III.3 Energie magnétique	64
III.4 Flux magnétique	65
III.5 Loi d'Hopkinson.....	66
III-6 Analogie circuits magnétiques / circuits électriques	66
III.7 Circuits magnétiques hétérogènes linéaires.....	67
IV. Circuits magnétiques en régime alternatif sinusoïdal	67
IV.1 Lien du flux magnétique à la tension (loi de Faraday).....	67
IV.2 Notions de flux total intercepté et inductance	68
IV.3 Relation importantes en régimes alternatifs	69
IV.4 Notions d'inductance : mutuelle, fuite et magnétisante	71
IV.5 Cycle d'Hystérésis	72
IV.6 Pertes liées aux matériaux réels	73

Chapitre V: Les Transformateurs

I. Introduction & Définitions.....	74
II. Transformateur Monophasé.....	76
II.1 Constitution	76
II.2 Symbole électrique.....	77
II.3 Principe de fonctionnement	77

II.4 Transformateur monophasé Parfait	78
II.4.1 Définition	78
II.4.2 Rapport de transformation	79
II.4.3 Rendement d'un transformateur parfait	80
II.4.4 Formule de BOUCHEROT	80
II.5 Transformateur monophasé réel.....	80
II.5.1 Définition	80
II.5.2 Rapport de transformation	81
II.5.3 Schéma équivalent complet d'un transformateur réel.....	81
III. Transformateur Triphasé	82
III.1 Intérêt	82
III.2 Constitution et caractéristiques d'un transformateur triphasé.....	83
III-3 Symbole	83

Chapitre IV: Introduction aux machines électriques

I. Définitions	84
II. Historique	84
III. Conversion de l'énergie électrique.....	85
III.1 Principe	85
III.2 Conversion électromécanique.....	86
VI. Classification des machines électriques	86
V. Constitution de base	87
IV. Bilan de puissance et rendement	87
IV.1 Machines à courant continu	87
IV.2 Machines synchrone (alternateur)	89
IV.3 Machines Asynchrone (Moteur Asynchrone triphasée).....	90
Références	92

INTRODUCTION GÉNÉRALE



I. Introduction générale :

L'énergie électrique est au cœur du développement économique de tout pays. Elle est inéluctablement vitale pour le fonctionnement de tous les mécanismes qui régissent les différentes dynamiques sociales. A ce titre, l'électrotechnique, dans tous ses segments (production, transport, distribution, conversion et contrôle) a occupé une place primordiale dans le secteur industriel des pays et continue à faire l'objet d'attention particulière, d'investissement scientifique et de perfectionnement technologique continu.

L'électrotechnique ne cesse de se développer grâce aux progrès de l'électronique de puissance, des microprocesseurs et des automates programmables. De plus, l'optimisation des systèmes électrotechniques et l'amélioration de leur rendement constitue un enjeu prometteur pour le secteur grâce à l'application des concepts de développement durable en réduisant leur poids et en utilisant des matériaux recyclables.

Tous ces développements technologiques majeurs enregistrés durant les dernières années ont fait accroître les besoins des entreprises industrielles en matière de compétences dans le domaine de l'électrotechnique. Investir dans la formation et préparer des cadres pour relever ces défis devient primordial. C'est dans cet objectif que cette formation est proposée.

Le troisième semestre constitue une pré-spécialisation et rassemble tous les étudiants de la famille Génie électrique. A partir du semestre 4, les enseignements deviennent spécialisés et sont orientés essentiellement vers l'électrotechnique.

La finalité de l'enseignement de l'électrotechnique est de familiariser les étudiants de deuxième année sciences et technologie (filière électrotechnique) avec les notions qui sont propres à cette discipline afin de leur permettre d'exercer éventuellement leur futur métier dans les entreprises industrielles proches de ce domaine.

La Licence Electrotechnique, de par son caractère généraliste, propose un enseignement équilibré dans les quatre axes du domaine de l'électrotechnique à savoir : les machines électriques, les réseaux électriques, l'automatique et l'électronique de puissance. Elle est motivée par le fait que de nos jours, les quatre options de l'électrotechnique sont très étroitement liées (une machine électrique est souvent utilisée avec un convertisseur statique et le circuit de commande).

Traditionnellement, l'électrotechnicien trouve sa place aussi bien dans les petites, que dans les moyennes ou les grandes entreprises. Il intervient dans les applications relatives aux secteurs de la production industrielle, du tertiaire, de l'habitat, du transport, de la distribution de l'énergie électrique et, plus récemment, il met en œuvre ou intervient sur des équipements reliés à des sources d'énergie renouvelable, couplées ou non au réseau national de distribution de l'énergie.

Ses interventions s'exercent sur des procédés industriels de fabrication ou au sein d'infrastructures publiques ou privées qui mettent en œuvre des équipements constitutifs d'applications nécessitant des sources d'énergie. Il est plus particulièrement spécialiste de la conversion d'énergie dans les procédés de transformation, de déplacement / transport ou de stockage de matières ou d'énergie. Ses compétences s'exercent également dans l'élaboration du processus destiné au pilotage, à la commande et la coordination des différents procédés qui sont mis en œuvre dans ces applications, tout particulièrement lorsque le génie électrique et l'automatique y occupent une place importante.

De part ses qualités spécifiques, l'électricité, vecteur d'énergie à haute valeur ajoutée, est omniprésente dans les applications. La propriété de réversibilité énergétique, présentée par les machines électriques tournantes et les convertisseurs statiques, permet la maîtrise du mouvement des chaînes cinématiques dans de nombreuses applications (produits manufacturés, moyens de production, froid industriel, infrastructures et services techniques, confort dans l'habitat, transports...).

Par ailleurs, comme cette énergie s'accumule difficilement et que son coût est élevé, sa gestion est devenue une préoccupation constante pour assurer la sûreté du fonctionnement et l'efficacité énergétique des systèmes mis en œuvre. Dans le même temps, les moyens de communication nécessaires à la gestion locale ou distante des équipements se développent rapidement.

D'une manière générale, le domaine de l'énergie reste toujours porteur en termes de débouchés dans différents domaines : les industries pétrolière et gazière, le froid, le conditionnement d'air, l'agroalimentaire, le transport, les industries chimiques, le secteur de l'hydraulique, les industries lourdes, etc.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS & RAPPELS

MATHÉMATIQUES



I. Définitions :

- ❖ Étymologiquement l'**électrotechnique** désigne l'étude des applications techniques de l'électricité. En réalité, l'électrotechnique regroupe les disciplines traitant l'électricité en tant qu'énergie. On peut citer la production, le transport, la distribution, le traitement, la transformation, la gestion et l'utilisation de l'énergie électrique. Parfois appelée Génie électrique, on peut situer sa naissance avec l'invention de la dynamo en 1869.
- ❖ L'électrotechnique est la discipline qui étudie la production, le transport, le traitement, la transformation et l'utilisation de l'énergie électrique.
- ❖ L'électrotechnique ou le génie électrique industriel est une partie de la physique qui concerne l'étude des applications techniques de l'électricité.

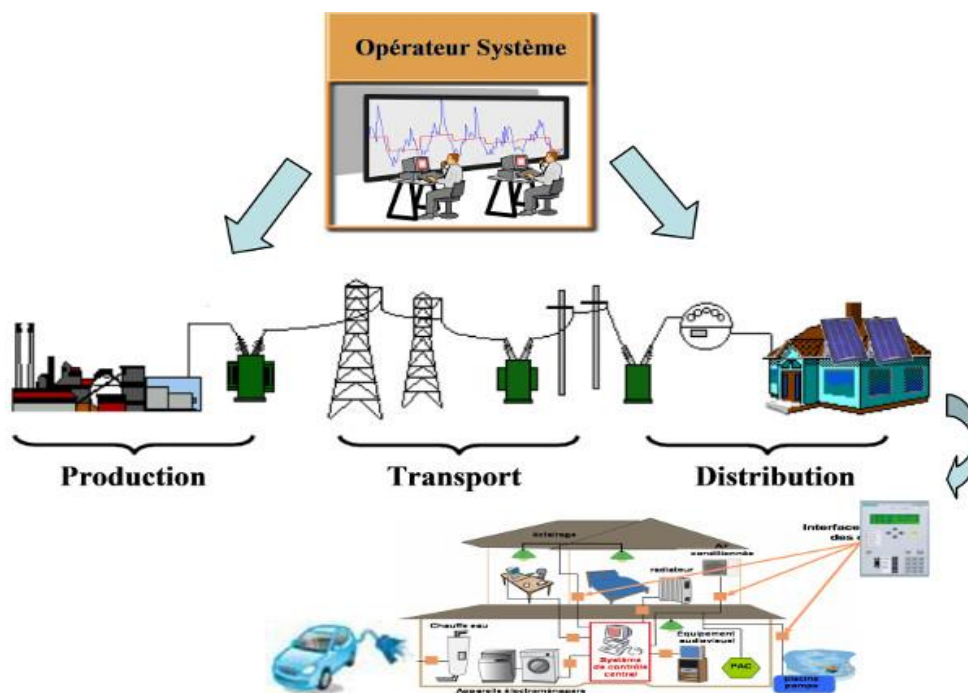
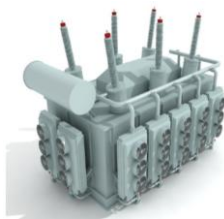
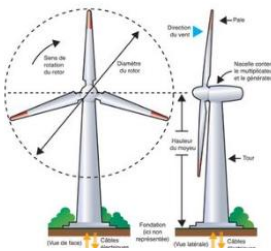
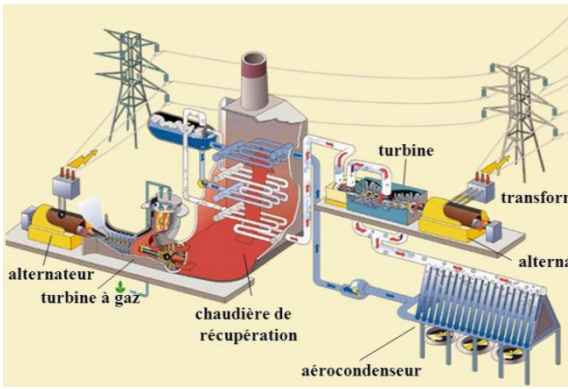


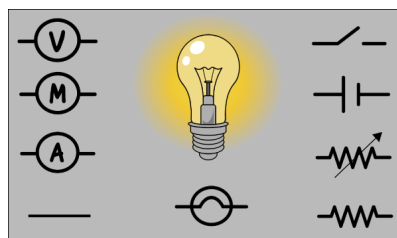
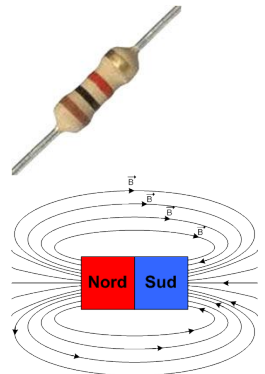
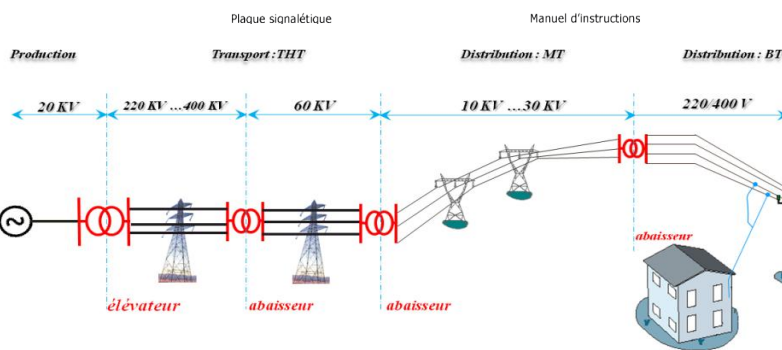
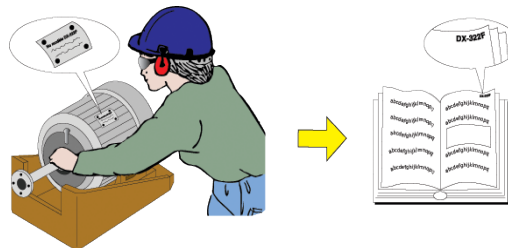
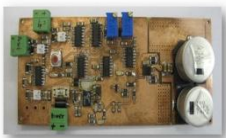
Fig1 : Les disciplines traitant l'électricité en tant qu'énergie

Cependant si on rencontre bien en électrotechnique :

- ❖ De **très fortes puissances**, de plusieurs mégawatts (MW) à quelques milliers de MW, principalement lors de la production et du transport de l'énergie électrique (une tranche de centrale nucléaire a une puissance de 1300 MW) ;
- ❖ On rencontre aussi de **faibles puissances**, de l'ordre du kW ou du W, pour le chauffage, l'électroménager, etc. ;
- ❖ Voire de **très faibles puissances**, de quelques μW pour les micros moteurs de montres à quartz, à quelques nW dans la motorisation de certaines techniques d'exploration médicale ; mettant ainsi en défaut l'opposition précédente.



APPLICATIONS DE L'ÉLECTROTECHNIQUE



➤ **Domaines D'applications :**

L'électrotechnique a un champ d'application extrêmement vaste :




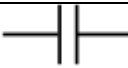
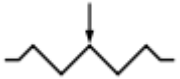
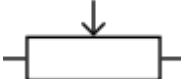
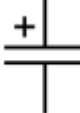
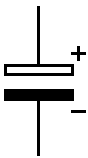
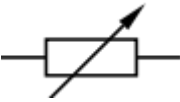
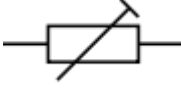
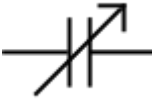
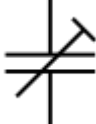
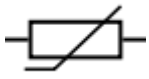
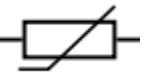
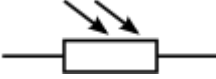
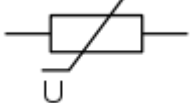



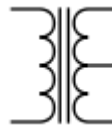
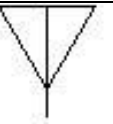
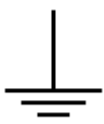


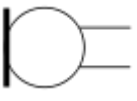


- ❖ Elle concerne de très nombreuses entreprises industrielles, dans les domaines de la production et du transport de l'énergie électrique.
- ❖ Dans les équipements électriques (Leroy Sommer, Legrand, Schneider Electric, Bosch, Valéo, etc.)
- ❖ En électronique de puissance et également dans des domaines plus inattendus comme l'aérospatial.
- ❖ L'électrotechnique est liée étroitement à l'électronique et à l'automatique auxquelles elle a fréquemment recours, en particulier pour la commande des moteurs.
- ❖ Le traitement de l'énergie électrique peut se faire à des fins de gestion et de sécurité : il s'agit de l'appareillage électrique, ou de la conversion d'énergie .

II. Unités et formules simples

Les 10 relations fondamentales d'électronique				
N°	Désignation	Relation entre les grandeurs	Relation entre les grandeurs physiques en toutes lettres	Relation produit entre les unités
01	Puissance d'un système électrique	$P=U.I$	puissance = tension x courant	$1 W = 1 V \times 1 A$
02	Tension dans une résistance électrique ("loi d'ohm")	$U=R.I$	tension = résistance x courant	$1 V = 1 \Omega \times 1 A$
03	Quantité d'électricité dans un circuit électrique	$Q=I.t$	quantité d'électricité = courant x temps	$1 C = 1 A \times 1 s$
04	Quantité d'électricité dans un condensateur	$Q=C.U$	quantité d'électricité = capacité x tension	$1 C = 1 F \times 1 V$
05	Flux magnétique dans un circuit électrique	$\Phi=U.t$	flux = tension x temps	$1 Wb = 1 V \times 1 s$
06	Flux magnétique dans une bobine	$\Phi=L.I$	flux = inductance x courant	$1 Wb = 1 H \times 1 A$
07	Constante de temps d'un circuit RC	$t=R.C$	temps = résistance x capacité	$1 s = 1 \Omega \times 1 F$
08	Constante de temps d'un circuit RL	$t=L/R$	temps = inductance / résistance	$1 H = 1 \Omega \times 1 s$
09	Energie emmagasinée dans un condensateur	$W=(C.U^2)/2$	énergie = $\frac{1}{2}$ x capacité x tension ²	$1 J = 1 F \times 1 V^2$
10	Energie emmagasinée dans une bobine	$W=(L.I^2)/2$	énergie = $\frac{1}{2}$ x inductance x courant ²	$1 J = 1 H \times 1 A^2$



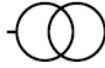






























Tab 1 : Relations fondamentales

III. Les symboles électriques et électrotechniques :

























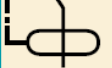
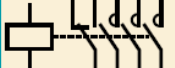










 Résistance électrique (norme américaine)	 Résistance électrique (norme européenne)	 Inductance ou self ou bobine	 Condensateur
 Potentiomètre (symbole américain)	 Potentiomètre (symbole européen)	 Condensateur polarisé	 Condensateur électrolytique
 Résistance variable Rhéostat	 Résistance ajustable Trimmer	 Condensateur variable	 Condensateur ajustable Trimmer
 - Thermistance CTN	 + Thermistance CTP	 Photorésistance LDR	 U Varistance VDR
 Transformateur	 Transformateur abaisseur	 Transformateur élevateur	 Transformateur à sortie médiane
 Antenne	 Terre	 Quartz	 Bobine d'arrêt (self de choc)
 Microphone	 Buzzer ou beeper		 Haut-parleur

Tab 2 : symbole en électrotechnique

➤ Symboles normalisés :

APPAREILS DE PRODUCTION ET TRANSFORMATION	APPAREILS DE MESURE	CANALISATIONS	APPAREILS D'UTILISATION
 Générateur  Batterie de piles ou accus  Transformateur  Transformateur triphasé triangle/étoile  Transformateur de courant  Transformateur tore  Autotransformateur	<p>Indicateurs</p>  Voltmètre  Ampèremètre  Wattmètre  Varmètre  Fréquencemètre	 Conducteur de phase  Neutre  De protection (terre)  5 conducteurs (3 P + N + T)  Connexion borne  Connexion barrette  Croisement de 2 conducteurs avec connexion  Sans connexion  Dérivation  Boîte de jonction non enterrée	 Lampe d'éclairage (symbole général)  Tube à fluorescence  Moteur  Sonnerie  Résistance  Condensateur  Impédance  Eclairage de sécurité sur circuit spécial  Bloc autonome d'éclairage de sécurité
	<p>Enregistreurs</p>  Compteur d'énergie active (wattheuremètre)  Compteur d'énergie active (varheuremètre)		

APPAREILLAGE D'INSTALLATION

Fonctions de l'appareillage	Appareillage à fonction simple	Appareillage à fonctions multiples	Appareillage de protection contre les surtensions
 Fonction disjoncteur  Fonction sectionneur  Fonction interrupteur-sectionneur  Fonction déclenchement automatique  Contact à fermeture (contact de travail)  Contact à ouverture (contact de repos)  Bobines de commande  Élément de protection thermique  Élément de protection magnétique	 Sectionneur  Interrupteur (commande)  Fusible (protection contre les surintensités)  Contacteur (commande)  Rupteur (commande)  Bouton-poussoir à fermeture et retour automatique  Tirette à ouverture et retour automatique	 Fusible interrupteur  Discontacteur  Fusible sectionneur  Interrupteur-sectionneur  Fusible interrupteur-sectionneur  Disjoncteur  Fusible à percuteur  Disjoncteur tripolaire à relais magnétothermiques  Disjoncteur différentiel  Contacteur tripolaire avec contact auxiliaire à deux directions	 Eclateur  Eclateur double intervalle  Limiteur de surtension  Parafoudre
			<p>Appareillage de connexion</p>  Fiche de prise de courant  Socket de prise de courant  Fiche et prise associées
			<p>Autres formes</p>  Fiche mâle  Prise femelle  Fiche et prise associées

IV Rappels mathématiques :

IV.1 Formules de trigonométrie :

Valeurs remarquables, périodicité :

$$\begin{aligned} \cos(-a) &= \cos(a) & \sin(-a) &= -\sin(a) \\ \cos(\pi + a) &= -\cos(a) & \sin(\pi + a) &= -\sin(a) \\ \cos(\pi - a) &= -\cos(a) & \sin(\pi - a) &= \sin(a) \\ \cos\left(\frac{\pi}{2} - a\right) &= \sin(a) & \sin\left(\frac{\pi}{2} - a\right) &= \cos(a) \\ \cos\left(\frac{\pi}{2} + a\right) &= -\sin(a) & \sin\left(\frac{\pi}{2} + a\right) &= \cos(a) \\ \tan(\pi + a) &= \tan(a) \end{aligned}$$

Formules d'addition :

$$\begin{aligned} \cos(a + b) &= \cos(a)\cos(b) - \sin(a)\sin(b) \\ \cos(a - b) &= \cos(a)\cos(b) + \sin(a)\sin(b) \\ \sin(a + b) &= \sin(a)\cos(b) + \sin(b)\cos(a) \\ \sin(a - b) &= \sin(a)\cos(b) - \sin(b)\cos(a) \\ \tan(a + b) &= \frac{\tan(a) + \tan(b)}{1 - \tan(a)\tan(b)} \\ \tan(a - b) &= \frac{\tan(a) - \tan(b)}{1 + \tan(a)\tan(b)} \end{aligned}$$

Expression en fonction de $\tan(a/2)$:

$$\begin{aligned} \cos(a) &= \frac{1 - \tan^2\left(\frac{a}{2}\right)}{1 + \tan^2\left(\frac{a}{2}\right)} & \sin(a) &= \frac{2\tan\left(\frac{a}{2}\right)}{1 + \tan^2\left(\frac{a}{2}\right)} \\ \tan(a) &= \frac{2\tan\left(\frac{a}{2}\right)}{1 - \tan^2\left(\frac{a}{2}\right)} \end{aligned}$$

Transformation produit \rightarrow somme :

$$\begin{aligned} \cos(a)\cos(b) &= \frac{1}{2}[\cos(a - b) + \cos(a + b)] \\ \sin(a)\sin(b) &= \frac{1}{2}[\cos(a - b) - \cos(a + b)] \\ \sin(a)\cos(b) &= \frac{1}{2}[\sin(a + b) + \sin(a - b)] \\ \cos(a)\sin(b) &= \frac{1}{2}[\sin(a + b) - \sin(a - b)] \end{aligned}$$

Fonctions et dérivées :

$$\begin{aligned} \cos(x) \text{ de } \mathbb{R} \text{ dans } [-1;1] & \quad \cos'(x) = -\sin(x) \\ \sin(x) \text{ de } \mathbb{R} \text{ dans } [-1;1] & \quad \sin'(x) = \cos(x) \\ \tan(x) \text{ de } \mathbb{R} \setminus \left\{\frac{k\pi}{2}, k \in \mathbb{Z}\right\} \text{ dans } \mathbb{R} & \quad \tan'(x) = 1 + \tan^2(x) = \frac{1}{\cos^2(x)} \end{aligned}$$

Equations :

$$\begin{aligned} \cos a = \cos b & \Rightarrow a = \pm b + 2k\pi \\ \sin a = \sin b & \Rightarrow \begin{cases} a = b + 2k\pi \\ a = \pi - b + 2k\pi \end{cases} \\ tga = tgb & \Rightarrow a = b + k\pi \end{aligned}$$

Formules de base :

$$\begin{aligned} \cos^2(a) + \sin^2(a) &= 1 & \tan(a) &= \frac{\sin(a)}{\cos(a)} & 1 + \tan^2(a) &= \frac{1}{\cos^2(a)} \\ \sin &= \frac{\text{côté-opposé}}{\text{hypoténuse}} & \cos &= \frac{\text{côté-adjacent}}{\text{hypoténuse}} & \tan &= \frac{\text{côté-opposé}}{\text{côté-adjacent}} \end{aligned}$$

Formules de duplication :

$$\begin{aligned} \cos(2a) &= \cos^2(a) - \sin^2(a) = 2\cos^2(a) - 1 = 1 - 2\sin^2(a) \\ \sin(2a) &= 2\sin(a)\cos(a) \\ \tan(2a) &= \frac{2\tan(a)}{1 - \tan^2(a)} \end{aligned}$$

Linéarisation des carrés, Euler, Moivre :

$$\begin{aligned} \cos^2(a) &= \frac{1 + \cos(2a)}{2} & \sin^2(a) &= \frac{1 - \cos(2a)}{2} \\ \cos(x) &= \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2} & \sin(x) &= \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i} \\ [\cos(x) + i * \sin(x)]^n &= \cos(nx) + i * \sin(nx) \end{aligned}$$

Transformation somme \rightarrow produit :

$$\begin{aligned} \cos(p) + \cos(q) &= 2\cos\left(\frac{p+q}{2}\right)\cos\left(\frac{p-q}{2}\right) \\ \cos(p) - \cos(q) &= -2\sin\left(\frac{p+q}{2}\right)\sin\left(\frac{p-q}{2}\right) \\ \sin(p) + \sin(q) &= 2\sin\left(\frac{p+q}{2}\right)\cos\left(\frac{p-q}{2}\right) \\ \sin(p) - \sin(q) &= 2\cos\left(\frac{p+q}{2}\right)\sin\left(\frac{p-q}{2}\right) \end{aligned}$$

IV.2 Nombres complexes :

IV.2.1 Définition :

1. Un nombre complexe est un nombre de la forme $z=x+iy$ avec x et y deux réels et i un nombre imaginaire tel que $i^2 = -1$.
2. L'ensemble des nombres complexes est noté \mathbb{C} .
Les règles de calcul dans \mathbb{C} sont les mêmes que dans \mathbb{R} .

IV.2.2 Partie réelle, partie imaginaire

La forme algébrique d'un nombre complexe est $x + iy$ où x et y sont deux réels.

Si $z = x + iy$ où $x \in \mathbb{R}$ et $y \in \mathbb{R}$, x est la partie réelle de z , notée $\text{Re}(z)$, et y est la partie imaginaire de z , notée $\text{Im}(z)$.

- ❖ La partie réelle et la partie imaginaire d'un complexe sont des nombres réels.
Exemple : la partie imaginaire de $3 + 2i$ est 2 et non pas $2i$.
- ❖ Les réels sont les nombres complexes dont la partie imaginaire est nulle.
- ❖ Les imaginaires purs sont les nombres complexes dont la partie réelle est nulle
- ❖ Deux nombres complexes sont égaux s'ils ont la même partie réelle et la même partie imaginaire.
- ❖ Un nombre complexe est nul si sa partie réelle et sa partie imaginaire sont nulles.

Remarque :

On considère deux complexes z et z' de formes algébriques respectives $x+iy$ et $x'+iy'$.

- ❖ La somme de z et de z' est le complexe $z+z' = x+x'+i(y+y')$.
- ❖ Si k est un réel, alors le produit de k par z est le complexe $kz = kx +iky$.
- ❖ Le produit de z et de z' est le nombre complexe $zz' = xx'-yy'+i(xy'+yx')$.

IV.2.3 Conjugué :

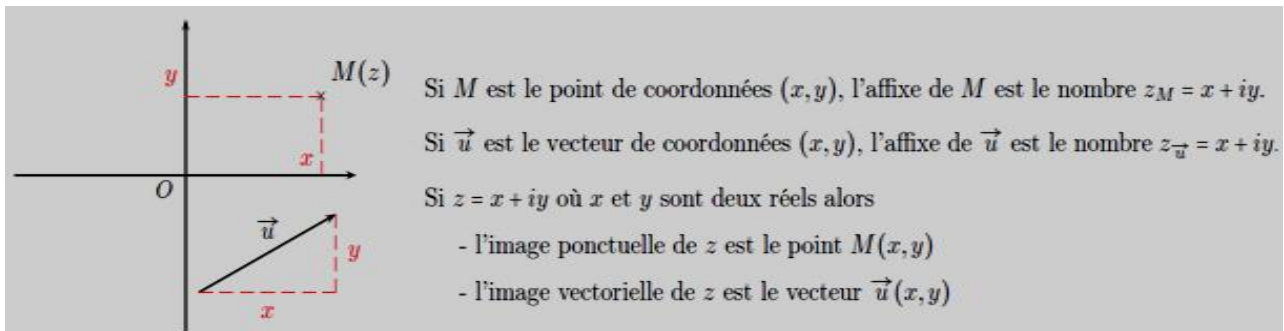
On considère un nombre complexe z de forme algébrique $x+iy$. Le nombre complexe $x-iy$, noté \bar{z} est le conjugué de z .

➤ Propriétés :

Pour tous complexes z et z' de formes algébriques $z = x+iy$ et $z' = x'+iy'$:

- ❖ $\overline{\bar{z}} = z$; $z + \bar{z} = 2\text{Re}(z) = 2x$; $z - \bar{z} = 2i \text{Im}(z) = 2iy$; $z\bar{z} = x^2 + y^2$
- ❖ $\overline{z + z'} = \bar{z} + \bar{z}'$; $\overline{zz'} = \bar{z}.\bar{z}'$; si z' est non nul $\overline{\left(\frac{z}{z'}\right)} = \frac{\bar{z}}{\bar{z}'}$
- ❖ z est réel si $z = \bar{z}$; z est imaginaire pur si $z = -\bar{z}$

IV.2.4 Affixe d'un point, affixe d'un vecteur. Image ponctuelle, image vectorielle d'un nombre complexe :

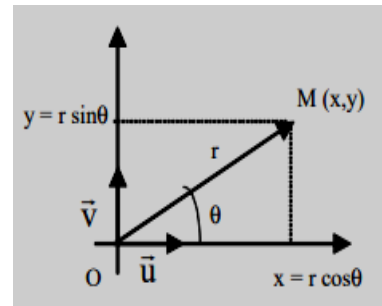


- ❖ Le point M s'appelle l'image du nombre complexe z .
- ❖ Le vecteur OM s'appelle la vectrice image du nombre complexe z .
- ❖ Le nombre complexe z s'appelle l'affixe du point M (ou du vecteur OM).
- ❖ Le plan, considéré comme l'ensemble des points $M(x, y)$ est appelé plan complexe, ou plan de Cauchy.
- ❖ L'axe Ox qui correspond aux points tels que $y = 0, z = x$, est l'axe des réels; l'axe Oy qui correspond aux points tels que $x = 0, z = jy$ est l'axe des imaginaires purs.

IV.2.5 Module et argument :

On considère un nombre complexe z non nul affixe d'un point M dans le plan muni d'un repère orthonormé direct (O, \vec{u}, \vec{v}) .

Si M a pour coordonnées polaires (r, θ) , alors r est le module de z noté $|z|$ et θ est un argument de z noté $\arg z$.



Notation : On a $|z| = \rho_z = r = OM$ et $\arg z = \theta = (\vec{u}, \overrightarrow{OM}) (2\pi)$.

Théorème :

Pour tout nombre complexe z non nul dont l'image M a pour coordonnées cartésiennes $(x ; y)$ et pour coordonnées polaires $(r ; \theta)$, on a :

$$\begin{cases} x = r \cdot \cos \theta \\ y = r \cdot \sin \theta \end{cases} \text{ équivaut à } \begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \cos \theta = \frac{x}{r} \text{ et } \sin \theta = \frac{y}{r} \end{cases}$$

➤ **Remarque :** $\operatorname{tg} \theta = \frac{x}{y}$, en tenant compte des signes de $\begin{cases} \cos \theta = \frac{x}{r} \text{ et } \sin \theta = \frac{y}{r} \end{cases}$

➤ Propriétés :

Pour tous complexes z et z' non nuls :

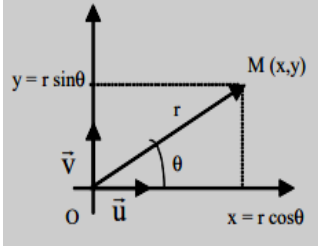
✚ $|zz'| = |z||z'|$ et $\arg(zz') = \arg z + \arg z' (2\pi)$

✚ Pour tout entier naturel n : $|z^n| = |z|^n$ et $\arg(z^n) = n \cdot \arg z (2\pi)$

✚ $\left| \frac{1}{z} \right| = \frac{1}{|z|}$ et $\arg\left(\frac{1}{z}\right) = -\arg z (2\pi)$

✚ $\left| \frac{z}{z'} \right| = \frac{|z|}{|z'|}$ et $\arg\left(\frac{z}{z'}\right) = \arg z - \arg z' (2\pi)$

IV.2.6 Formes d'un nombre complexe:

Forme algébrique	Forme trigonométrique	Forme exponentielle	Forme polaire	Forme géométrique
On appelle forme algébrique (ou cartésienne) d'un nombre complexe $z = (x, y)$ l'expression $z = x + iy$.	$z = r(\cos \theta + i \sin \theta)$ Avec : $\begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \cos \theta = \frac{x}{r} \text{ et } \sin \theta = \frac{y}{r} \end{cases}$	Pour tout nombre complexe z non nul de module r et d'argument θ , on pose : $z = r \cdot e^{i\theta}$	Pour tout nombre complexe z non nul de module r et d'argument θ , on pose : $z = r \cdot \theta^0$ Avec θ en degré	 $r = OM$ et $\arg z = \theta$

Tab 3 : Les différentes formes d'un nombre complexe

➤ Propriétés :

Forme trigonométrique	Forme exponentielle	Forme polaire
Pour tous nombres complexes non nuls z et z' :	Soit : $z_1 = e^{i\theta_1}$ et $z_2 = e^{i\theta_2}$	Soit : $z_1 = \rho_1^{\theta_1}$ et $z_2 = \rho_2^{\theta_2}$
❖ $\arg(z \cdot z') = \arg(z) + \arg(z') (2\pi)$	❖ $e^{i(\theta+\theta')} = e^{i\theta} \times e^{i\theta'}$	❖ $z_1 \cdot z_2 = \rho_1 \cdot \rho_2^{\theta_1+\theta_2}$
❖ $\arg\left(\frac{1}{z}\right) = \arg(\bar{z}) = -\arg(z) (2\pi)$	❖ $e^{-i\theta} = \frac{1}{e^{i\theta}}$	❖ $\frac{z_1}{z_2} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^{\theta_1-\theta_2}$
❖ $\arg\left(\frac{z}{z'}\right) = \arg(z) - \arg(z') (2\pi)$	❖ $e^{i(\theta-\theta')} = \frac{e^{i\theta}}{e^{i\theta'}}$	❖ $\frac{1}{z_1} = \left(\frac{1}{\rho_1}\right)^{-\theta_1}$
❖ Pour tout entier relatif n , $\arg(z^n) = n \cdot \arg(z) (2\pi)$	❖ $e^{in\theta} = (e^{i\theta})^n$	❖ $z_1^n = (\rho_1^n)^{n\theta_1}$
Pour tout réel θ , $e^{i\theta} = \cos(\theta) + i \sin(\theta)$		

Tab 4 : Les propriétés d'un nombre complexe

IV.2.7 .Formule D'EULER - Formule de MOIVRE :

A) Formule D'EULER :

Soit un nombre complexe de module égale 1 :
$$\begin{cases} z = e^{i\theta} = \cos\theta + i\sin\theta \\ \bar{z} = e^{-i\theta} = \cos\theta - i\sin\theta \end{cases}$$

En exprimant la somme et la différence :
$$\begin{cases} z + \bar{z} = 2.\cos\theta \\ z - \bar{z} = 2i\sin\theta = 2.i.\sin\theta \end{cases}$$

On en déduit les formules **D'EULER** : $\cos\theta = \frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2}$ et $\sin\theta = \frac{e^{i\theta} - e^{-i\theta}}{2.i}$

➤ Généralisation aux nombres complexes de module quelconque :

Pour un nombre complexe quelconque, dont le module est différent de l'unité, le cosinus et sinus de l'argument s'obtiennent suit :

$$\begin{cases} z = r.e^{i\theta} \Rightarrow \cos\theta + i\sin\theta = \frac{z}{r} \\ \bar{z} = r.e^{-i\theta} \Rightarrow \cos\theta - i\sin\theta = \frac{\bar{z}}{r} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \cos\theta = \frac{z + \bar{z}}{2.r} \\ \sin\theta = \frac{z - \bar{z}}{2.i.r} \end{cases}$$

B) Formule de MOIVRE :

Soit un nombre complexe de module unité $z = e^{i\theta}$.

L'élévation de puissance n donne : $z^n = (e^{i\theta})^n = e^{in\theta} = \cos n\theta + i.\sin n\theta$

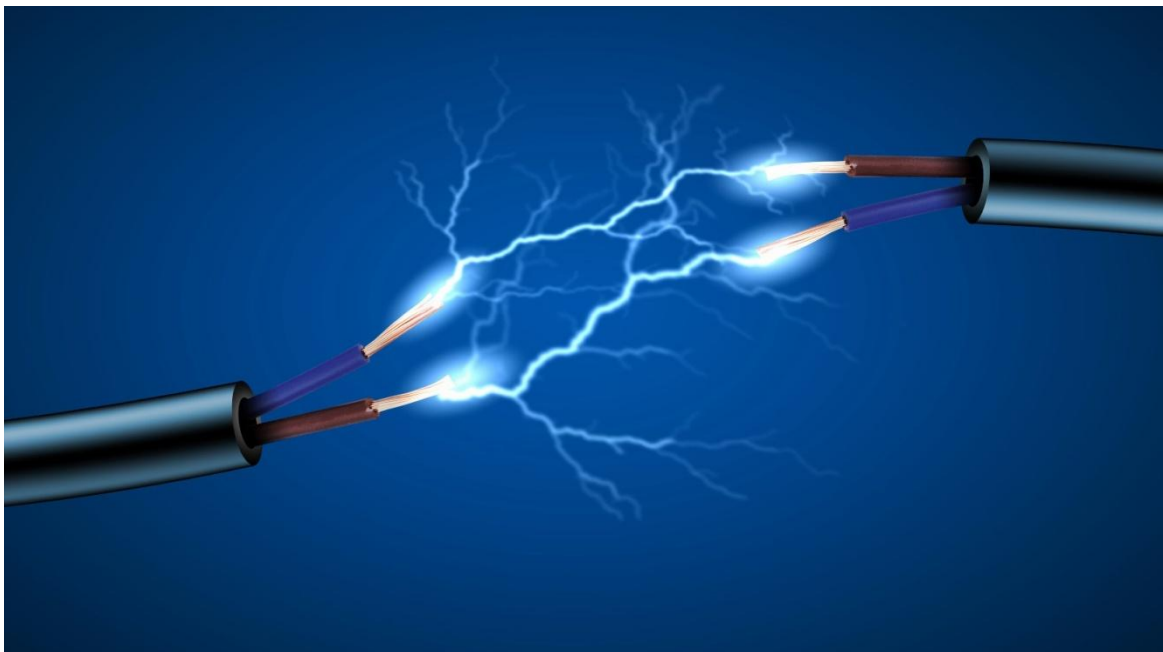
D'où la formule de **MOIVRE** :

$$(e^{i\theta})^n = \cos n\theta + i.\sin n\theta$$

Cette relation reste valable lorsque l'exposant n est négatif.

CHAPITRE II

RAPPELS SUR LES LOIS FONDAMENTALES DE L'ÉLECTRICITÉ



I. Les grandeurs électriques

I.1. Le courant électrique

Définition : Un courant électrique est la grandeur algébrique correspondant à la circulation de porteurs de charges mobiles (p.c.m.) électriques dans un conducteur. Par convention, le sens du courant (figure 1) est le sens de déplacement des charges positives. La charge électrique (notée q) est une propriété fondamentale des particules élémentaires qui constituent la matière. Elle s'exprime en coulomb C

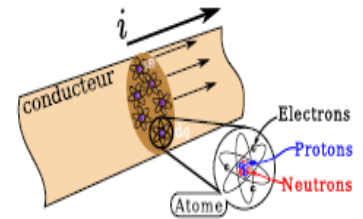


Fig 1: Sens du courant

➤ Milieu conducteur:

Un milieu est dit conducteur s'il existe des p.c.m. (électrons, ions, etc.) susceptibles de se déplacer dans tout le milieu. Dans le cas contraire, le milieu est dit isolant.

I.2. Les dipôles

I.2.1 Notions de dipôle et définitions

Définition : Un dipôle est un conducteur électrique possédant deux bornes. Le comportement d'un dipôle est caractérisé par :

- ❖ La tension ou différence de potentielle (d.d.p.) entre ces bornes (A et B) : $U_{AB} = (V_A - V_B)$
- ❖ le courant I qui le traverse.



Fig 2: Caractéristiques d'un dipôle

Conservation de la charge : à tout instant le courant entrant par une borne est égal au courant sortant par l'autre borne.

I.2.2 Classification des dipôles électrique :

Un dipôle est dit

- ✚ **ACTIF :** s'il peut fournir de l'énergie électrique de façon permanente (dipôle générateur, mais aussi et certains récepteurs).
- ✚ **PASSIF :** s'il ne peut pas fournir de l'énergie électrique de façon permanente. (Sa caractéristique passe par l'origine (ie. $I = 0$ si $U_{AB} = 0$), dipôle récepteur).
- ✚ **SYMÉTRIQUE :** son comportement n'est pas modifié si on inverse le sens du courant : il n'est pas polarisé.
- ✚ **LINÉAIRE** si sa caractéristique est défini par :
 - ✓ une fonction linéaire (eg. l'équation d'une droite) : $U_{AB} = aI + b$
 - ✓ ou une équation différentielle linéaire à coefficient constant
 - ✓ Un circuit électrique est dit **linéaire** s'il est constitué uniquement de **composants linéaires**

I.2.3. Conventions

a) Convention récepteurs :

Le courant et la tension sont orientés en sens inverse. Cela permet d'obtenir deux grandeurs positives pour des dipôles s'opposant à la circulation du courant.

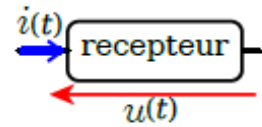


Fig 3: Convention récepteurs

b) Convention générateur :

Le courant et la tension sont orientés dans le même sens. Cela permet d'obtenir deux grandeurs positives pour des dipôles favorisant la circulation du courant.

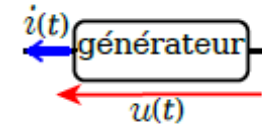


Fig 4: Convention générateur

II-Rappels sur les lois fondamentales de l'électricité

Le courant continu et le courant alternatif constituent les 2 types de régime que l'on rencontre dans les installations électriques. Ils sont produits par des générateurs qui ont leur propre mode de fonctionnement. Quelles sont leurs caractéristiques et leurs applications ?

II.1 Lois et théorèmes en régime continu:

II.1.1 Définition : (DC : direct current)

Le **courant** continu ou CC (DC pour direct current en anglais) est un **courant** électrique dont la tension est indépendante du temps (constante). Ce type de courant est délivré par les **piles**, les **batteries** ou encore les **panneaux photovoltaïques**. La tension et l'intensité produites par le générateur sont constantes dans le temps, tant que ce dernier ne se décharge pas.

Il est à noter que le courant circule dans le même sens, de la polarité positive vers la polarité négative, par convention.

Voici les différents types de générateurs délivrant une source de tension continue:

- ❖ **Le générateur électrochimique:** la pile ou la batterie d'accumulateurs
- ❖ **Le générateur électronique:** le panneau solaire
- ❖ **l'alimentation du secteur, passant par un redresseur,** et transformant le courant alternatif en continu.

Remarque:

Le seul récepteur existant en régime établi continue est la résistance dans le fonctionnement est régie par la **loi d'Ohm** $U = R.I$

II.1.2 Définition Topologique:

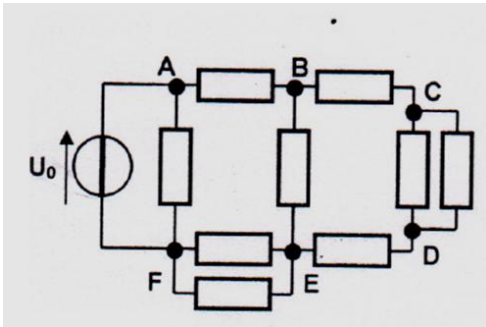


Fig 5: Topologie d'un circuit électrique

- ❖ **Branche** : Ensemble de dipôles connectés en série ou en parallèle par deux points entre lesquels aucune dérivation de courant ne se produit. **Exemples** : AB , AF , BC , EF.
- ❖ **Nœud** : Point où arrivent plusieurs branches (= extrémités des branches. **Exemples** : A,B , C , D , E et F.
- ❖ **Mille** : Ensemble de branches formant un circuit fermé, chacun des nœuds n'appartenant qu'à deux branches de ce circuit fermé. **Exemples** : ABEFA , BCDEB,

II.1.3 Les Résistances et leurs associations :

II.1.3.1 Définition :



La résistance électrique traduit la propriété d'un composant à s'opposer au passage d'un courant électrique (l'une des causes de perte en ligne d'électricité). Elle est souvent désignée par la lettre **R** et son unité de mesure est l'ohm (symbole : Ω). Elle est liée aux notions de résistivité et de conductivité électrique.

La résistance est responsable d'une dissipation d'énergie sous forme de chaleur. Cette propriété porte le nom d'effet Joule. Cette production de chaleur est parfois un effet souhaité (résistances de chauffage), parfois un effet néfaste (pertes Joule) mais souvent inévitable.


II.1.3.2 Résistance d'un fil homogène :

Pour un conducteur filiforme homogène, à une température donnée, la relation permettant de calculer sa résistance en fonction du matériau qui le constitue et de ses dimensions est:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s} = \frac{l}{\gamma \cdot s}$$

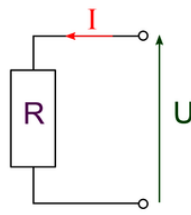
- ❖ ρ étant la résistivité en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$) ;
- ❖ l la longueur en mètres (m) ;
- ❖ s la section en mètres carrés (m^2) ;
- ❖ γ la conductivité en siemens par mètre (S/m).

II.1.3.3 La loi d'Ohm :



Georg Simon Ohm, (1789 -1854), est un physicien allemand. Professeur d'université, Ohm a commencé ses travaux de recherche par une étude sur la cellule électrochimique, il a découvert l'existence d'une relation de proportionnalité directe entre la différence de potentiel appliquée aux bornes d'un conducteur et le courant électrique qui le traverse, ce qu'on appelle maintenant la loi d'Ohm. Ces résultats expérimentaux lui ont permis de déterminer les relations fondamentales entre courant, tension et résistance électrique, ce qui constitue le début de l'analyse des circuits électriques. L'ohm, unité de mesure de résistance électrique, est nommé en son honneur.

Loi d'Ohm



Caractéristique (loi d'Ohm)

$U = R.I$
 $I = G.I$

- ❖ R : Résistance en Ohms (Ω).
- ❖ G : Conductance en Siemens (S).

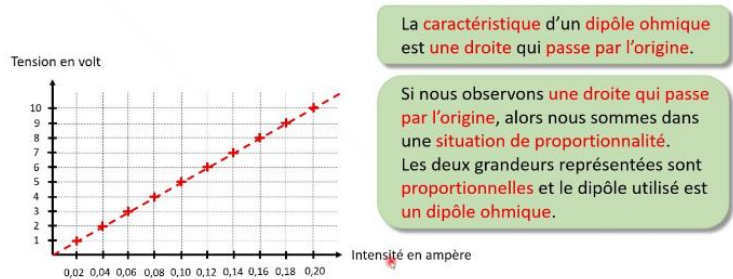


Fig 6: Caractéristique tension courant

II.1.3.4 Association des résistances:

Série :

Les résistors sont montés les uns à la suite des autres en série, ils sont donc traversés par le même courant I.

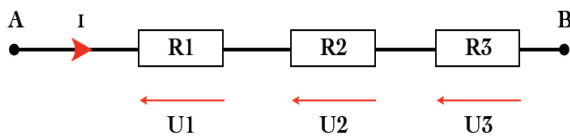
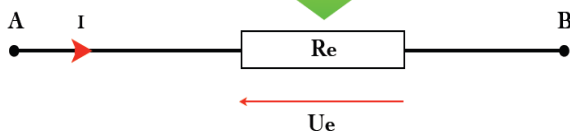


Fig 7: Montage série

Re = Résistance équivalente
Ue = Tension équivalente
I = Intensité traversant la résistance

Montage équivalent



$Re = R_1 + R_2 + R_3 .$

Parallèle

Les résistors sont montés en parallèle, ils sont soumis à la même tension.

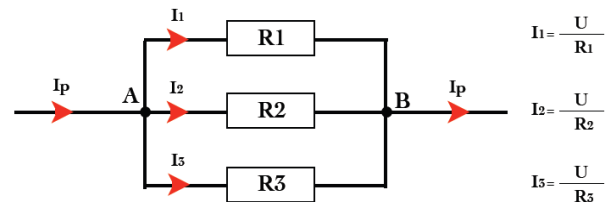
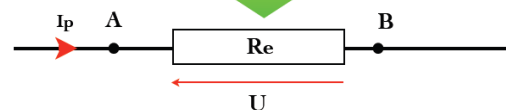


Fig 8: Montage parallèle (résistances)

Re = Résistance équivalente
U = Tension
Ip = Courant principal
I1, I2, I3 = Courants dérivés

Montage équivalent



$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

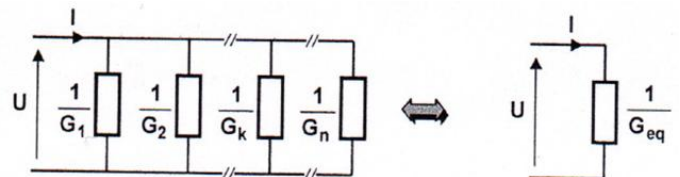


Fig 9: Montage parallèle (conductances)

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

Quand $R \rightarrow 0$ (ou $G \rightarrow \infty$) : le resistor \Leftrightarrow court-circuit ($U \rightarrow 0$)

Quand $R \rightarrow \infty$ (ou $G \rightarrow 0$) : le resistor \Leftrightarrow circuit ouvert ($I \rightarrow 0$)

➤ Remarque :

L'appareil qui mesure directement la résistance d'un résistor est l'OHMMÈTRE .Un MULTIMETRE numérique comporte toujours une fonction ohmmètre : « Ω ». La mesure se fait toujours en plaçant le résistor :

- ❖ hors tension,
- ❖ déconnecté,
- ❖ entre les deux bornes de l'appareil de mesure.

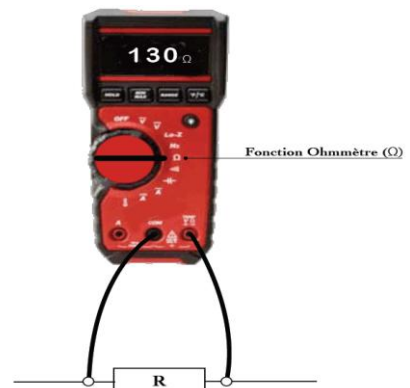


Fig 10: Ohmmètre)

II.1.3.5 Code des couleurs :

Déterminer la valeur d'une résistance grâce au code des couleurs :

Chiffre1	Chiffre2	Multiplicateur	Tolérance
noir	0	argent	+/- 5%
brun	1	or	+/- 10%
rouge	2	noir	x 1
orange	3	brun	x 10
jaune	4	rouge	x 100
vert	5	orange	x 1000
bleu	6	jaune	x 10K
violet	7	vert	x 100K
gris	8	bleu	x 1M
blanc	9	violet	x 10M

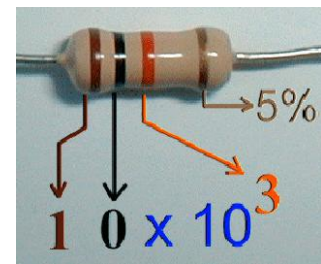


Fig 11: Code couleur

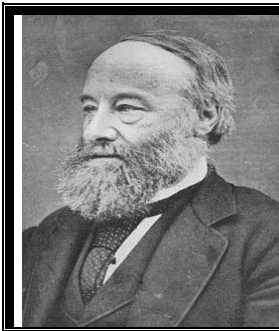
Exemple :

Chiffre1	Chiffre2	Multiplicateur	Tolérance
noir	0	argent	+/- 5%
brun	1	or	+/- 10%
rouge	2	noir	x 1
orange	3	brun	x 10
jaune	4	rouge	x 100
vert	5	orange	x 1000
bleu	6	jaune	x 10K
violet	7	vert	x 100K
gris	8	bleu	x 1M
blanc	9	violet	x 10M

ici, R = 22 000 Ω (+/- 5 %)

Fig 12: Application du Code couleur

II.1.3.6 Loi de JOULE



James Prescott Joule (1818 -1889), est un physicien anglais. Son étude sur la nature de la chaleur et sa découverte de la relation avec le travail mécanique l'ont conduit à la théorie de la conservation de l'énergie (la première loi de la thermodynamique). Il a également énoncé une relation entre le courant électrique traversant une résistance et la chaleur dissipée par celle-ci, appelée depuis le XX^e siècle la loi de Joule. Enfin il a travaillé avec Lord Kelvin pour développer l'échelle absolue de température et a étudié la magnétostriction. En 1850. Dans le Système international , l'unité de l'énergie et de la quantité de chaleur porte son nom : le joule.

On appelle effet joule, le dégagement de chaleur qui accompagne toujours le passage du courant électrique dans un conducteur. D'après la loi de Joule, l'énergie W transformée en chaleur (dégagée dans un conducteur de résistance R) est fonction de l'intensité du courant, du temps de passage de ce courant et la valeur de la résistance du conducteur $W = R.I^2.t$. En raison de la relation d'équivalence $1 \text{ kal} = 4180 \text{ J}$. La quantité de chaleur dégagé est $Q = R.I^2.t / 4180$

II.1.4 Caractéristiques des sources de tensions:

II.1.4.1 Puissance transformée par la source de tension :

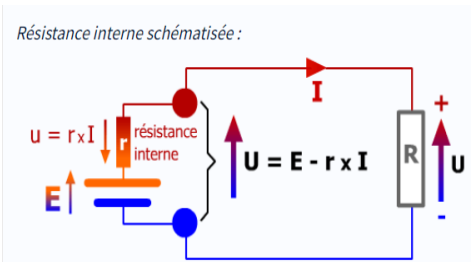


Fig 13: Schéma de principe d'une source de tension

$$U = E - r \cdot I \rightarrow E = U + r \cdot I \rightarrow E \cdot I = U \cdot I + r \cdot I^2 \rightarrow P_E = P' + P_r$$

Avec :

- ❖ $P_E = E \cdot I$ (la puissance transformée par la source de tension)
- ❖ $P_r = U \cdot I$ (la puissance consommée par la résistance interne du générateur (la source))
- ❖ $P' = U \cdot I$ (la puissance fournie au récepteur)

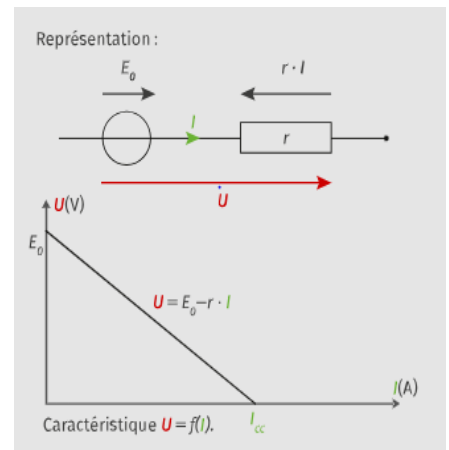
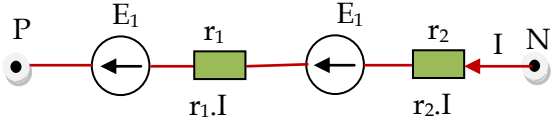
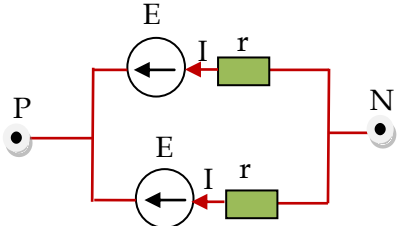


Fig 14: Caractéristique d'une source de tension

II.1.4.2 Association des sources de tensions :

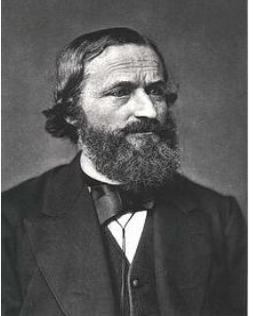
Association en série	Association en parallèle
 <p>Fig 15: Sources de tension en série</p> <p style="text-align: center;">$E_{eq} = E_1 + E_2$ et $r_{eq} = r_1 + r_2$</p> <p>D'une manière générale les générateurs associés en série sont équivalents à un générateur unique, dont la f.é.m. a pour valeur la somme algébrique des f.é.m. des générateurs associés, et dont la résistance interne est la somme des résistances internes.</p> $E_{eq} = \sum_n E_n \text{ (somme algébrique)}$ $r_{eq} = \sum_n r_n$ <p>L'avantage de l'association en série est d'avoir une source de tension élevée</p>	 <p>Fig 16: Sources de tension en parallèle</p> <p style="text-align: center;">$E_{eq} = E$ et $r_{eq} = r/2$</p> <p>D'une manière générale La conductance du générateur équivalent à une association en parallèle est égale à la somme des conductances des générateurs associés; autrement dit, sa résistance interne est égale à la résistance équivalente aux deux résistances associées en parallèle. En conclusion, du point de vue actif, les courants s'ajoutent de façon algébrique; du point de vue passif, les conductances s'additionnent</p> $I_0 = \sum_n I_n \text{ (somme algébrique)}$ $G_{eq} = \sum_n G_n$ <p>L'avantage de l'association en parallèle est d'avoir une résistance interne globale minimale et un fort courant</p>

Tab 1 : Association des sources de tensions

II.1.5 Analyse des circuits électriques :

Tous les théorèmes et toutes les lois s'appliquent aussi bien en régime continu (U,E,I, R, G) qu'en régime alternatif (U, E, I, Z, Y)

II.1.5.1 Lois de kirchhoff :



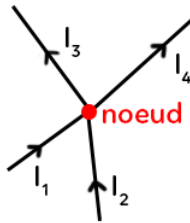
Gustav Robert Kirchhoff, (1824 -1887), physicien allemand a développé l'analyse spectrale et découvre la loi du rayonnement qui associe son nom à l'avènement d'une période nouvelle et brillante de la physique moderne.. Par ailleurs, il a déterminé les règles des réseaux électriques et apporté d'importantes contributions à l'électricité et à l'élasticité, ainsi qu'à l'hydrodynamique, la thermodynamique et l'optique.

Les lois de Kirchhoff expriment la conservation de l'énergie et de la charge dans un circuit électrique. Elles portent le nom du physicien allemand qui les a établies en 1845 : Gustav Kirchhoff.

Dans un circuit complexe, il est possible de calculer les différences de potentiel aux bornes de chaque résistance et l'intensité du courant continu dans chaque branche de circuit en appliquant les deux lois de Kirchhoff : la loi des nœuds et la loi des mailles

❖ Première loi de Kirchhoff : Loi des nœuds

La somme algébrique des intensités des courants qui passent par un nœud est nulle. Par convention on pose que les intensités des courants se dirigeant vers le nœud sont positives et les intensités des courants négatives sont les intensités qui s'en éloignent. Sur la figure on a représenté le sens (arbitraire) des courants traversant le nœud.



$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4$$

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

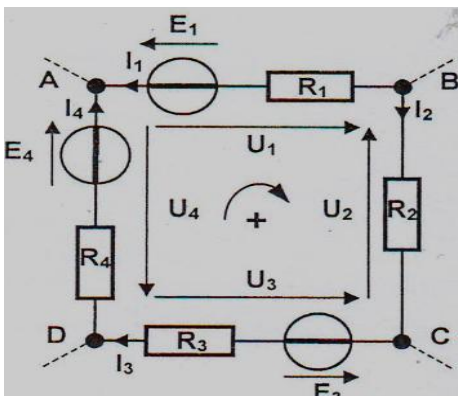
La somme algébrique des intensités à un nœud est nulle.

La somme des intensités qui arrivent à un nœud est égale à celle des intensités qui partent du nœud (figure 17).

Fig 17: Schéma d'un nœud

❖ Deuxième loi de Kirchhoff : Loi des mailles

Dans une maille quelconque d'un réseau, la somme algébrique des forces électromotrices (positives) et forces contre-électromotrices (négatives) est égale à la somme algébrique des différences de potentiel aux bornes des résistances. Le sens de parcours du courant dans la maille est choisi d'abord arbitrairement, les différences de potentiel aux bornes des résistances parcourues par un courant circulant dans le sens de parcours choisi sont affectées du signe négatif.



D'après la figure 18 :

$$U_1 - U_2 - U_3 - U_4 = 0$$

$$-E_1 + R_1 \cdot I_1 - R_2 \cdot I_2 - E_3 - R_3 \cdot I_3 + E_4 - R_4 \cdot I_4 = 0$$

Fig 18: Schéma d'une maille

Soit le circuit ci-dessous (figure 19) : Il comporte 4 nœuds : , 6 branches indiquées par les carrés numérotés et 7 Mailles

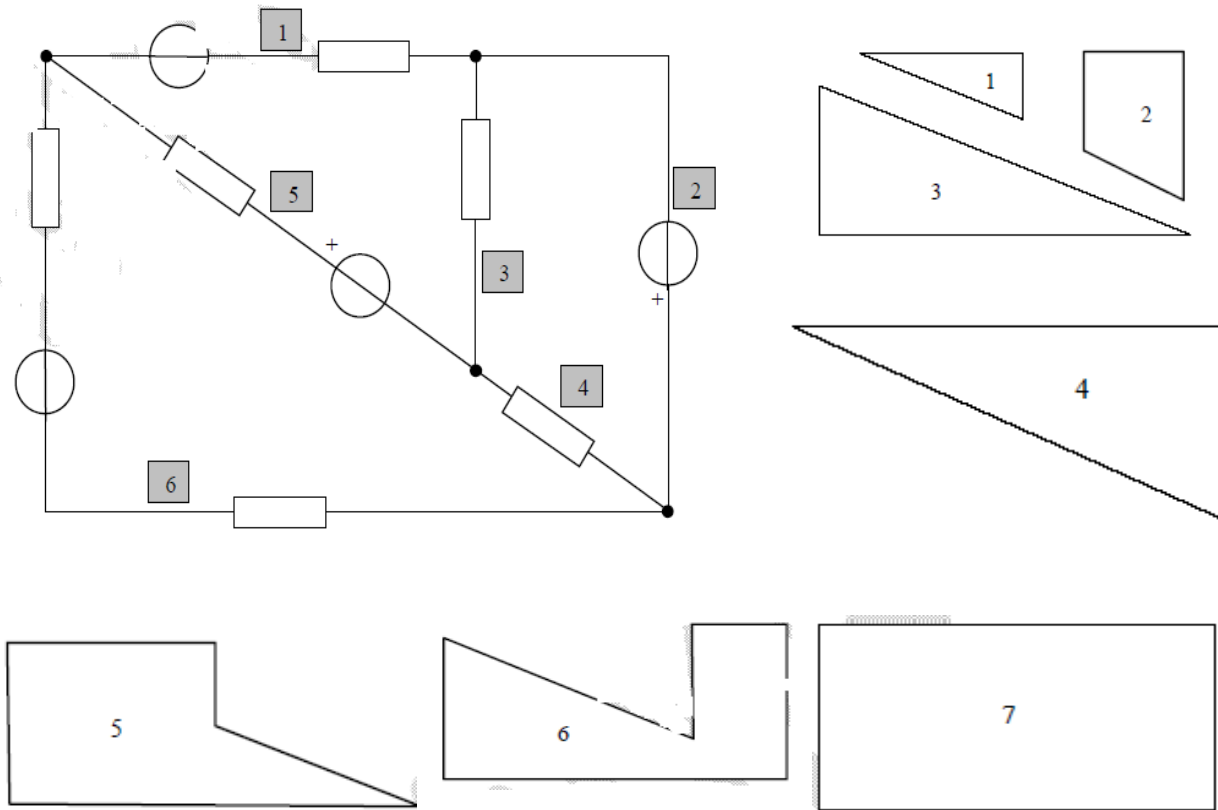
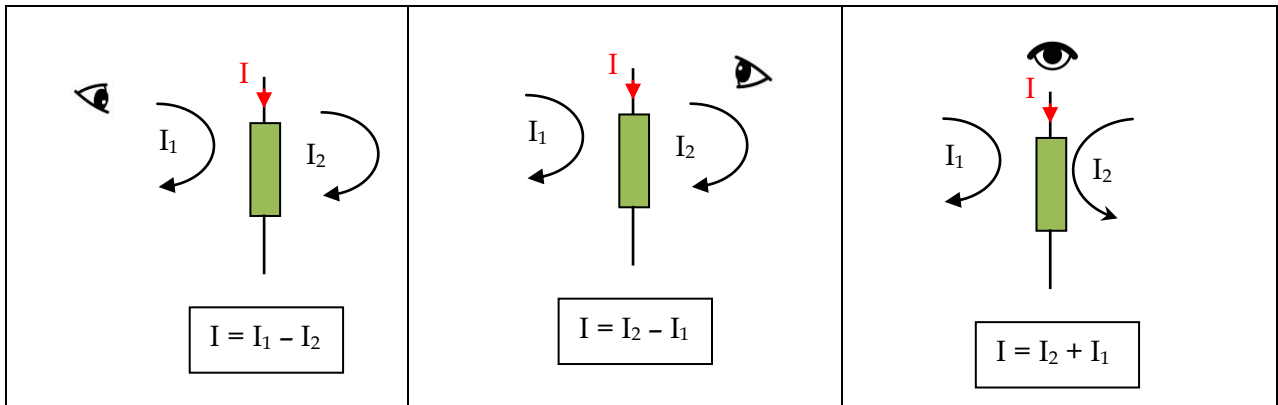
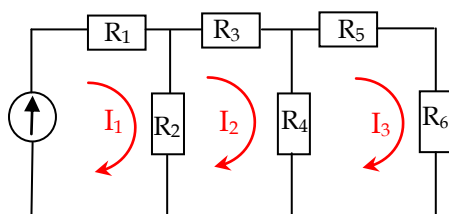


Fig 19: Schéma démonstratif

❖ Règles de calcul :



Exemple : Soit le circuit suivant



Avec :

$E = 10 \text{ V}$ et $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 2 \Omega$

Fig 20: Circuit à 3 mailles

On utilisant la li des maille calculer I_1, I_2, I_3 .


$$\begin{cases} R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot (I_1 - I_2) = E \\ R_2 \cdot (I_2 - I_1) + R_3 \cdot I_2 + R_4 \cdot (I_2 - I_3) = 0 \\ R_4 \cdot (I_3 - I_2) + (R_5 + R_6) \cdot I_3 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} (R_1 + R_2) \cdot I_1 - R_2 \cdot I_2 = E \\ -R_1 \cdot I_1 + (R_2 + R_3 + R_4) \cdot I_2 - R_4 \cdot I_3 = 0 \\ R_4 \cdot I_2 + (R_4 + R_5 + R_6) \cdot I_3 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 4I_1 - 2I_2 = 10 \\ -2I_1 + 6I_2 - 2I_3 = 0 \\ -2I_2 + 6I_3 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} 4 & -2 & 0 \\ -2 & 6 & -2 \\ 0 & -2 & 6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \det A = \begin{vmatrix} 4 & 2 & 0 \\ -2 & 6 & -2 \\ 0 & -2 & 6 \end{vmatrix} = 152$$

$$\det I_1 = \begin{vmatrix} 10 & 2 & 0 \\ 0 & 6 & -2 \\ 0 & -2 & 6 \end{vmatrix} = 320, \quad \det I_2 = \begin{vmatrix} 4 & 10 & 0 \\ -2 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 6 \end{vmatrix} = 120, \quad \det A = \begin{vmatrix} 4 & 2 & 10 \\ -2 & 6 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \end{vmatrix} = 40$$

$$I_1 = \frac{\det I_1}{\det A} = \frac{320}{152} = 2,10A, \quad I_2 = \frac{\det I_2}{\det A} = \frac{120}{152} = 0,78A, \quad I_3 = \frac{\det I_3}{\det A} = \frac{40}{152} = 0,26A.$$

II.1.5.2 Théorème de THEVENIN :

	<p>Léon Charles Thévenin (1857 -1926) est un ingénieur en télégraphie français. Il est l'auteur du théorème de Thévenin. Diplômé de l'École polytechnique et de l'École supérieure de télégraphie (EST) en 1879, il publie en 1883 une formule de simplification des schémas électriques qui est devenue célèbre sous le nom de théorème de Thévenin, en étudiant les lois de Kirchhoff dérivées de la loi d'Ohm.</p>
--	--

Tout circuit linéaire considéré de 2 points quelconques du circuit, peut être remplacé par un générateur de F.E.M. E_{th} et de résistance interne R_{th} (figure 21).

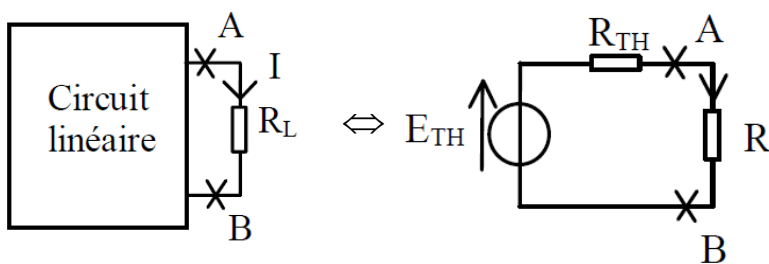



Fig 21: Circuit de principe du théorème de THEVENIN

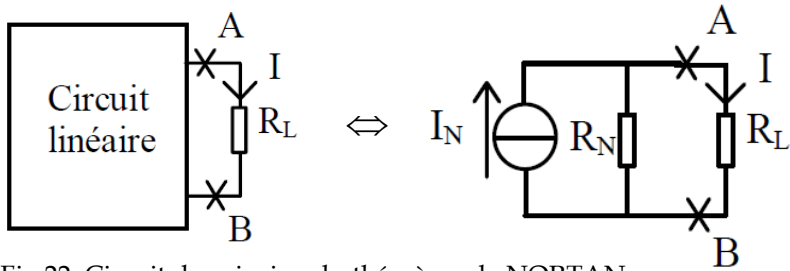
R_{TH} est obtenue en éteignant les générateurs (on garde leur résistance interne) : c'est la résistance que présente alors le circuit entre A et B.

E_{TH} est la différence de potentiels U_{AB} obtenue lorsque R_L n'est pas branchée.

II.1.5.3 Théorème de NORTAN :

	<p>Edward Lawry Norton (1898-1983) est un ingénieur en électricité américain. et est connu pour le théorème de Norton. Ses domaines de recherche actifs comprenaient la théorie des réseaux, les systèmes acoustiques, les appareils électromagnétiques et la transmission de données.</p>
---	---

Tout circuit linéaire considéré de 2 points quelconques du circuit, peut être remplacé par un générateur de courant I_N en parallèle avec une résistance R_N (figure 22).



$R_N = R_{TH}$ définie dans le théorème de Thévenin.
 I_N est l'intensité obtenue en court-circuitant les 2 points A et B.

Fig 22: Circuit de principe du théorème de NORTAN

II.1.5.4 Théorème de Superposition:

Dans un circuit linéaire contenant plusieurs générateurs, le courant est, en tout point, la somme des courants dus à chaque générateur agissant isolément, les autres étant éteints (ils conservent toutefois leur résistance interne).

II.1.5.5 Diviseur de tension et de courant :

Diviseur de tension	Diviseur de courant
<p>2 dipôles en série (figure 23) aux bornes desquels on connaît la tension U, et parcourus par le même courant I :</p> <p style="text-align: right;"> $U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U$ Démonstration : $U = (R_1 + R_2) \cdot I$ et $U_1 = R_1 \cdot I$ </p>	<p>2 dipôles en parallèle (figure 24) aux bornes desquels on connaît la tension U</p> <p style="text-align: right;"> $I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I$ Démonstration : $U = R_1 \cdot I_1 = R_2 \cdot I_2$ et $I = I_1 + I_2$ </p>
<p>Fig 23 : dipôles en série</p>	<p>Fig 24 : dipôles en parallèle</p>


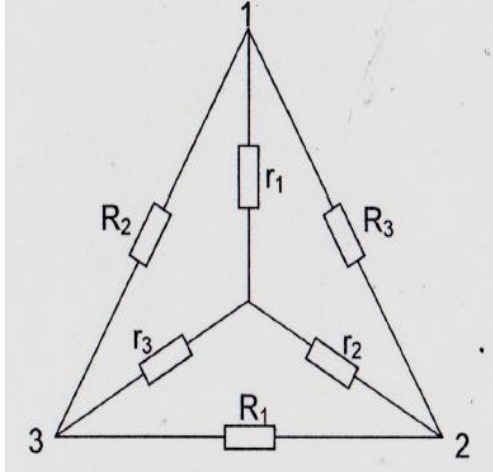
Tab 2 : Principe de : diviseur de tension & diviseur de courant

II.1.5.6 Théorème de KENNELLY (transformation triangle-étoile) :

Arthur Edwin Kennelly, (1861 – 1939) est un ingénieur en électricité américain. Il est célèbre pour avoir découvert des propriétés radio-électriques d'une couche de l'atmosphère : l'ionosphère.

Le théorème de Kennelly, ou transformation triangle-étoile, ou transformation $Y-\Delta$, ou encore transformation T- Π , est une technique mathématique qui permet de simplifier l'étude de certains réseaux électriques.

Ce théorème, nommé ainsi en hommage à **Arthur Edwin Kennelly**, permet de passer d'une configuration « triangle » (ou Δ, ou Π, selon la façon dont on dessine le schéma (figure 25)) à une configuration « étoile » (ou, de même, Y ou T). Ce théorème est utilisé en électrotechnique ou en électronique de puissance afin de simplifier des systèmes triphasés. Il est aussi d'utilisation courante en électronique pour simplifier le calcul de filtres ou d'atténuateurs.

Conversion triangle-étoile		Conversion étoile-triangle
<p>La résistance d'une branche de l'étoile équivalente est égale au produit des résistances adjacentes divisé par la somme totale des résistances.</p> $r_1 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$ $r_2 = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$ $r_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}$		<p>La résistance d'une branche du triangle équivalente est égale à la somme des produits des résistances, divisée par la résistance de la branche opposée:</p> $R_1 = \frac{r_1 \cdot r_2 + r_1 \cdot r_3 + r_2 \cdot r_3}{r_1}$ $R_2 = \frac{r_1 \cdot r_2 + r_1 \cdot r_3 + r_2 \cdot r_3}{r_2}$ $R_3 = \frac{r_1 \cdot r_2 + r_1 \cdot r_3 + r_2 \cdot r_3}{r_3}$
<p>Fig 25 : Schéma de principe de base du théorème de KENNELLY</p>		

II.2 Lois et théorèmes en régime alternatif:

II.2.1 définition : (AC : alternating current)

Le **courant alternatif** (qui peut être abrégé par CA) est un **courant** électrique périodique qui change de sens deux fois par période et qui transporte des quantités d'électricité alternativement égales dans un sens et dans l'autre. Il s'agit donc du courant qui arrive directement chez vous par le biais du distributeur d'énergie. C'est un type de courant qui change constamment de sens. On dit qu'il est périodique. Il change de sens à raison de **100 fois** par seconde; c'est pour cela que notre courant alternatif a une fréquence de **50Hz** (50 alternances/sec.). On ne parle plus de polarité + ou - mais de **phase** et de **neutre**. Le générateur délivrant une tension alternative sinusoïdale est un alternateur. C'est une machine comportant une partie magnétique fixe (appelée stator) dans laquelle tourne une bobine de fil (rotor). La rotation de cette bobine à l'intérieur du champ magnétique va générer un courant alternatif. Il existe deux modes de distribution de ce courant alternatif:

- ❖ **le courant monophasé** (une phase et un neutre)
- ❖ **le courant triphasé** (trois phases et un neutre)

Le transport de l'électricité se fait en courant alternatif à haute tension afin de limiter les pertes d'énergie sur de longues distances et facilite le passage d'un niveau de tension à un autre. Il est aussi beaucoup plus simple de transformer les caractéristiques d'un courant alternatif que celles d'un courant continu. Pour cela, on utilise le transformateur qui permet de passer d'un niveau de tension à un autre, très facilement. Cependant, ce type de conversion n'est pas adapté en courant continu car cela conduirait à la destruction du transformateur, n'étant pas conçu techniquement pour cela.

II.2.2 intérêts:

L'intérêt du courant alternatif est qu'il est facile à transformer. Les transformateurs permettent de modifier une tension alternative sans créer trop de pertes. Ces transformations des tensions sont nécessaires pour le transport du courant.

D'autres raisons font que la distribution électrique se fait habituellement en courant alternatif :

- ❖ Les alternateurs qui produisent le courant alternatif sont plus simples à réaliser et ont un meilleur rendement que les générateurs de courant continu.
- ❖ Les moteurs à courant alternatif sont plus simples que les moteurs DC.
- ❖ La coupure d'un courant alternatif est plus facile car le courant passe régulièrement par zéro alors qu'en courant continu un arc électrique a tendance à subsister.
- ❖ Le courant alternatif est aisément transformé en courant continu.

II.2.3 régimes variables :

Il existe deux grands types de régimes variables, c'est à dire dans lesquels les grandeurs électriques dépendent du temps : les **régimes transitoires** et les **régimes périodiques** .

- ✚ **Les régimes transitoires** : ce sont des évolutions particulières des grandeurs électriques qui apparaissent lors des modifications brutales des caractéristiques d'un circuit électrique.
- ✚ **Les régimes périodiques** : ils se caractérisent par le fait que les variations des grandeurs électriques en fonction du temps sont périodiques (répétitives). La durée de répétition s'appelle alors la période T (en secondes) et son inverse est appelée la fréquence $f = 1/T$ (en Hertz).



Heinrich Rudolf Hertz (1857 - 1894) est un ingénieur et physicien allemand. Il mit en évidence en 1888 l'existence des ondes électromagnétiques imaginées par James Maxwell en 1873 . Il a donné son nom aux ondes radio dites ondes hertziennes et découvert la photoélectricité.

Remarques:

- ❖ Un signal alternatif est un signal périodique de valeur moyenne nul sur une période.
- ❖ Un signal sinusoïdale est un signal définie de la forme $y(t) = Y_m \sin(\omega t + \varphi)$ ou φ l'angle de déphasage (rd/s)



Fig 26 : Signale périodique

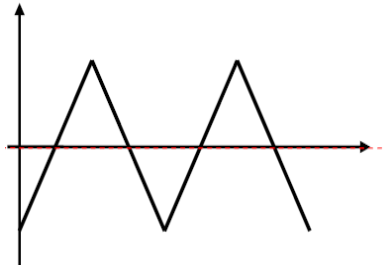


Fig 27 : Signale alternatif

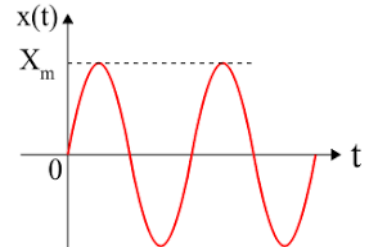


Fig 28 : Signale sinusoïdale

II.2.4 Caractéristiques du courant alternatif

- ❖ Le courant que nous fournit la compagnie d'électricité est périodique et sinusoïdal.
- ❖ Périodique: la tension change périodiquement de sens, le courant s'inverse constamment.
- ❖ Sinusoïdal: La tension varie en fonction du temps suivant une courbe appelée sinusoïde. Cette allure est due au principe de fonctionnement des alternateurs. Durant un tour de l'alternateur celui-ci crée une alternance positive suivie d'une alternance négative.
- ❖ On appelle période la durée de ces deux alternances. La période est désignée par la lettre T et s'exprime en secondes.
- ❖ La fréquence f est le nombre de périodes par seconde. Elle s'exprime en Hertz : (Hz) $f = 1/T$

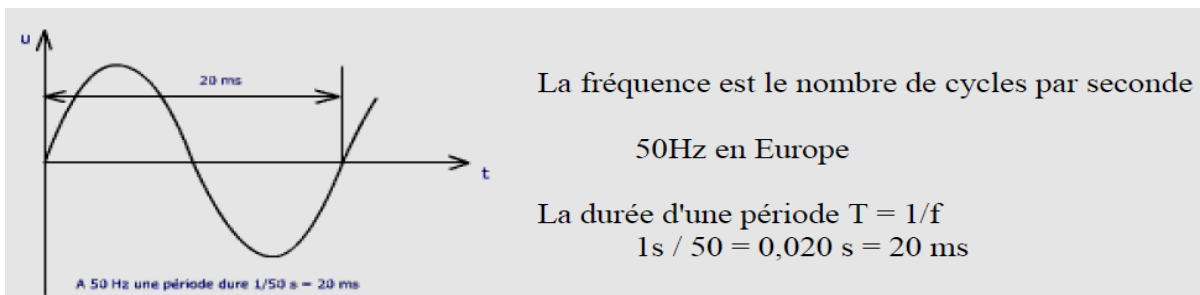


Fig 29 : Caractéristique du courant alternatif

- ❖ Certaines formules font appel à la pulsation ω (Oméga). elle s'exprime en radians par seconde (rd/s) $\omega = 2\pi f$.
- ❖ Les valeurs maximales notées U_m et I_m ne sont pas très utiles puisqu'elles ne sont atteintes que très passagèrement.
- ❖ Les valeurs instantanées sont fluctuantes. Elles sont fonctions des valeurs maximales, de la pulsation ω et de l'instant où elles sont mesurées;

$$u(t) = U_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad \text{et} \quad i(t) = I_{\max} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

- ❖ L'angle φ exprime ici que le courant peut être en retard ou en avance par rapport à la tension. Nous verrons en parlant des bobines et des condensateurs que le courant instantané $i(t)$ ne fluctue pas toujours en phase avec la tension instantanée $u(t)$. Une tension alternative sinusoïdale engendre bien un courant alternatif sinusoïdal mais selon la nature du circuit électrique le courant est en retard, en phase ou en avance sur la tension. Le décalage entre les deux signaux pourrait être exprimé en fractions de secondes mais les électriciens ont trouvé plus pratique d'exprimer ce déphasage par un angle φ (rd/s).
- ❖ Les tensions et les courants sont exprimés en valeurs efficaces.

II.2.5 Valeur moyenne- valeur efficace:

II.2.5.1 Valeur moyenne:

une fonction périodique $y(t)$ de période T a une valeur moyenne \bar{Y} donnée par: $\bar{Y} = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt$

Remarque : La valeur moyenne d'un signale alternatif est nul .

II.2.5.2 Valeur efficace: Un courant $i(t)$ circulant dans une résistance pure R , y engendre une dissipation d'énergie $p(t)$ correspondant à une puissance moyenne P . La même dissipation peut être produite par un courant constant I circulant dans R . On peut dire que $i(t)$ a une valeur efficace I_{eff} égale à ce courant constant I .Un raisonnement analogue peut être élaboré pour les tensions.

La fonction $y(t)$ de période T a une valeur efficace Y_{eff} donnée par: $Y_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (y(t))^2 dt}$

NB: la valeur efficace d'un signale sinusoïdale est : $Y_{eff} = \frac{Y_{max}}{\sqrt{2}}$

On définit en électrotechnique (en alternatif) les grandeurs par leur valeurs efficace .

II.2.6 Représentation d'une grandeur sinusoïdale:

Temporelle	Complexe	Vectorielle (de Fresnel)
$s(t) = \sqrt{2} S_{eff} \sin(\omega t + \varphi)$ S_{eff} : valeur efficace ω : pulsation (rd/s) $\omega = 2\pi f$ φ : phase initiale	$S = S_{eff} e^{j\varphi}$ S : amplitude complexe S_{eff} : module (valeur efficace) φ° : argument	

Tab 3 : les différents représentation d'une grandeur sinusoïdale

II.2.7 La loi d'Ohm et notion d'impédance:

Certains éléments de circuits s'opposent aux fluctuations du courant (les bobines) ou de la tension (les condensateurs) sans pour autant consommer de l'énergie comme le ferait une simple résistance. Ces composants présentent une réactance qui s'oppose aux fluctuations du courant. C'est notamment cette réactance qui est responsable du déphasage entre le courant et la tension.

Les circuits purement réactifs sont assez rares. Le plus souvent ils sont à la fois réactifs et résistifs, on parle alors d'impédance pour désigner la combinaison de ces deux phénomènes.

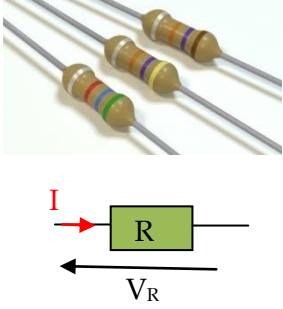
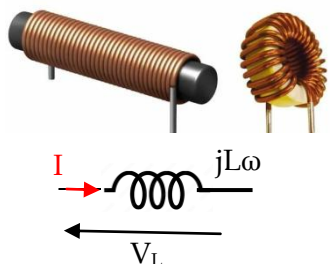
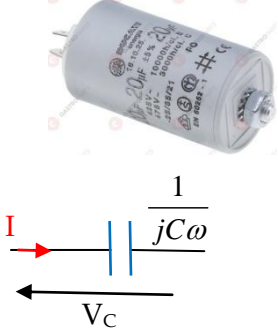
L'impédance s'exprime en Ohm comme pour les résistances. Cette grandeur est représentée par la lettre **Z**. On écrira par exemple la loi d'Ohm sous la forme **I = U / Z**




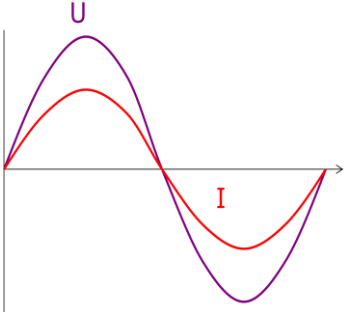
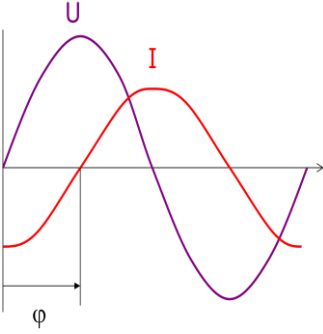
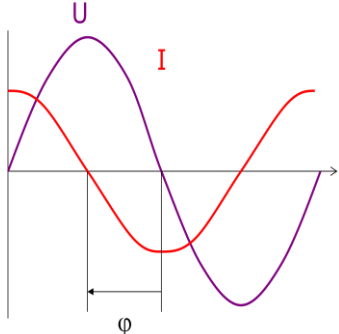
Ne confondez cependant pas l'impédance Z avec la résistance R :

- ❖ la résistance R ne dépend pas de la nature du courant (AC ou DC peu importe)
- ❖ l'impédance Z n'est à considérer qu'en alternatif elle dépend de la fréquence.

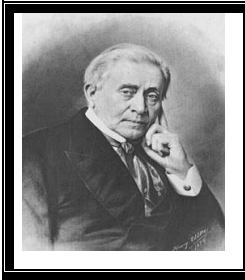
Impédance complexe	$Z = \frac{U}{I} = Z ^{\varphi^\circ} = R \pm jX$	R = Re(Z): résistance (Ω) X = Im(Z) : réactance (Ω) ❖ Le signe + indique que la réactance est inductive ($X_L = L\omega$) ❖ Le signe - indique que la réactance est capacitive ($X_C = 1/C\omega$)
		❖ si $\varphi > 0$ la tension est en avance sur le courant. ❖ Si $\varphi < 0$ la tension est en retard sur le courant ❖ Si $\varphi = 0$ la tension et le courant sont en phase
Admittance complexe	$Y = \frac{1}{Z} = Y ^{-\varphi^\circ} = G \pm jB$	G : Re(Y): conductance (siemens) B: Im(Y) susceptance (siemens) ❖ Le signe - indique que la susceptance est inductive ❖ Le signe + indique que la susceptance est capacitive

II.2.8 Eléments de base en alternatif:

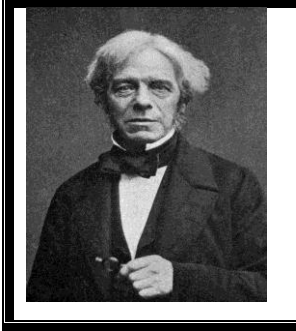
	Résistance	Inductance	Capacité
Elément	 <p>Fig 30 : Résistance</p>	 <p>Fig 31 : Bobine</p> <p>Une bobine ou inductance (Eng : self , inductor) est constituée de N spires obtenues par enroulement d'un fil métallique éventuellement d'un noyau en matériau ferromagnétique (noyau de fer). Avec L inductance , unité (henry : H) Si : $i(t) = Cst \rightarrow u(t) = 0$ La bobine se comporte comme un court circuit.</p>	 <p>Fig 32 : Condensateur</p> <p>Un condensateur (Eng : capacitor) est un composant électronique qui est constitué de deux armatures conductrices qui se font faces séparées par un diélectrique , de permittivités ϵ. Avec : C la capacité (unité : Farad : F). Si $u(t) = Cst \rightarrow i(t) = 0$ donc le condensateur se comporte comme un circuit ouvert.</p>

<p>Régime variable</p>	<p>La tension $u(t)$ aux borne d'une résistance pure est directement proportionnelle au courant $i(t)$: $u(t) = R.i(t)$ Aucune condition n'est imposée à $u(t)$ et $i(t)$</p>	<p>Quand dans un circuit le courant est variable, le flux magnétique au sein même du circuit varie, cette variation du flux produit une f.é.m induite u dans le circuit. Elle est proportionnelle à la dérivée par rapport au temps de l'intensité du courant, la constante de proportionnalité est appelée inductance du circuit. noté L $u(t) = L \frac{di}{dt}$ L: mesurée en henry (H)</p>	<p>La tension v aux bornes d'un condensateur est proportionnelle à sa charge Q. La constante de proportionnalité C est appelée capacité du condensateur : $q(t) = C.u(t)$ $i = dq/dt$ donc $u(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt$ C: mesurée en farad (F)</p>
<p>Régime permanent sinusoïdal</p>	<p>$U_R = R.I \Rightarrow Z = R = [R; 0]$</p>	<p>$U_L = jL\omega.I \Rightarrow Z = jL\omega = \left[L\omega; \frac{\pi}{2} \right]$</p>	<p>$U_C = \frac{1}{jC\omega}.I \Rightarrow Z = \frac{1}{jC\omega} = \left[\frac{1}{C\omega}; -\frac{\pi}{2} \right]$</p>
<p>Représentation de Fresnel</p>			
<p>Courbes</p>	 <p>Fig 33 : Caractéristique de la résistance Le courant et la tension sont en phase. Il n'y a pas de déphasage</p>	 <p>Fig 34 : Caractéristique de la bobine Le courant est en quadrature Arrière par rapport à la tension Il y a un déphasage $\varphi = 90^\circ$</p>	 <p>Fig 35 : Caractéristique du condensateur Le courant est en quadrature Avant par rapport à la tension Il y a un déphasage $\varphi = -90^\circ$</p>

Tab 4 : Propriétés des éléments de base en alternatif



Joseph Henry (1797 - 1878) est un physicien américain qui découvrit l'auto-induction et le principe de l'induction électromagnétique des courants induits. Dès 1829, il avait développé des électroaimants d'une grande puissance de levée. En 1831, il fabriqua le premier télégraphe électromagnétique opérationnel. Henry conçut et construisit également l'un des premiers moteurs électriques.



Michael Faraday (1791 - 1867) est un physicien et un chimiste britannique, connu pour ses travaux fondamentaux dans le domaine de l'électromagnétisme, l'électrochimie, le diamagnétisme, et l'électrolyse. Il donne son nom à de multiples lois et phénomènes dans ces domaines, notamment la loi de Faraday (ou Lenz-Faraday) en induction électromagnétique, les lois de Faraday en électrochimie, l'effet Faraday, ou encore à des dispositifs expérimentaux comme la cage de Faraday et la cavité de Faraday. Le farad, unité de capacité électrique, est également nommé en son honneur.

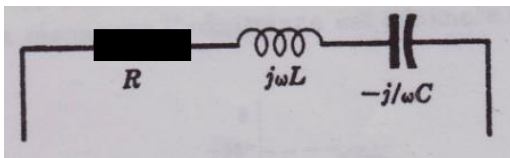
II.2.9 Association d'impédances:

II.2.9.1 Association en série :

L'impédance équivalente Z_{eq} d'un nombre quelconque d'impédances connectées en série est égale à la somme de ces impédances $Z_{eq} = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + \dots + Z_n$

Ces impédances sont des nombres complexes et leurs somme ne peut s'effectuer qu'en mettant chacune des impédance sous forme algébrique .

Exemple:



$$Z_{eq} = Z_R + Z_L + Z_C \Rightarrow Z_{eq} = R + jL\omega - \frac{j}{C\omega}$$

Fig 36 : circuit RLC série

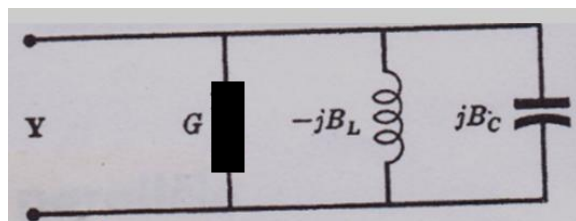
➤ **Remarque:**

Une fois le régime sinusoïdal établi dans un circuit les tensions ainsi que les courants doivent s'additionner vectoriellement.

II.2.9.2 Association en parallèle:

L'impédance équivalente d'un nombre quelconque d'impédance connectées en parallèle est ainsi donnée par : $1/Z_{eq} = 1/Z_1 + 1/Z_2 + 1/Z_3 + \dots + 1/Z_n$. Dans un circuits parallèle la notion d'admittance est particulièrement utile ($Y = 1/Z$) donc $Y_{eq} = Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_n$

Exemple:



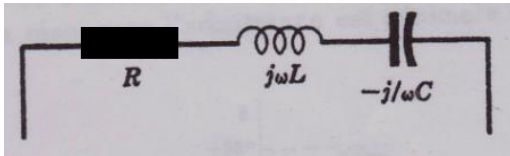
$$Y_{eq} = Y_R + Y_L + Y_C = G + jB_C - jB_L \Rightarrow Y_{eq} = \frac{1}{R} + jC\omega - \frac{j}{L\omega}$$

Fig 37 : circuit RLC Parallèle

II.2.10 Résonance:

On dit qu'un circuit est en résonance lorsque la tension appliquée et le courant résultant sont en phase. Par conséquent l'impédance complexe équivalente d'un circuit à la résonance est une résistance pure R.

II.2.10.1 La résonance série :



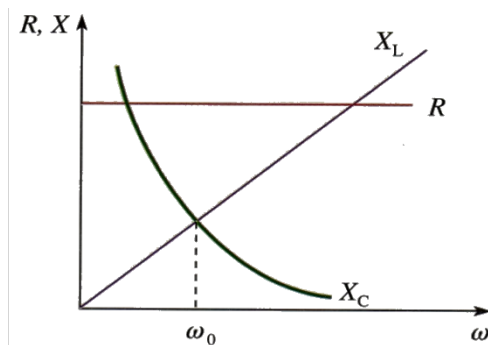
L'impédance complexe du circuit RLC série (figure 38)

$$\text{est : } Z_{eq} = Z_R + Z_L + Z_C = R + j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) = R + jX$$

Fig 38 : Résonance dans un circuit RLC série

Le circuit entre en résonance pour $X=0$, c'est à dire pour $L\omega = \frac{1}{C\omega}$ ou encore pour:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{La fréquence de résonance est alors donnée par : } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

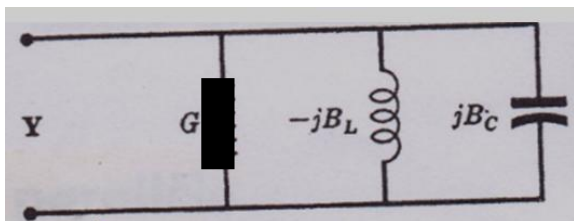


Les trois composantes R, X_L , X_C sont représentées en fonction de w . Pour $w = w_0$ les réactances inductives et les réactances capacitives sont égales ainsi l'impédance Z est minimale et le courant I est maximal.

$$X_L = L\omega \quad \text{et} \quad X_C = 1/C\omega$$

Fig 39 : Caractéristiques de R , X_L , X_C en fonction de ω

II.2.10.2 La résonance parallèle:



L'admittance des trois éléments est:

$$Y_{eq} = Y_R + Y_L + Y_C = G + j(B_C - B_L) = G + jB$$

avec $B = B_C - B_L$ $B_C = C\omega$ et $B_L = 1/L\omega$

Fig 40 : Résonance dans un circuit RLC parallèle

Le circuit est en résonance pour $B=0$ c'est à dire pour $L\omega = \frac{1}{C\omega}$ ou encore pour:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{La fréquence de résonance est alors donnée par : } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Comme dans le cas de la résonance en série , pour $w = w_0$ les susceptances capacitives et les susceptances inductives sont égale et par conséquent $Y= G$. Il en découle qu'à la résonance l'admittance est minimale est comme $I=V.Y$ le courant atteint également sa valeur minimale.

II.2.10.3 Facteur de surtension (facteur de qualité):

Noté Q c'est le facteur qui mesure la quantité d'augmentation de la tension afin d'arriver a la valeur maximal pour avoir la résonance.

cas d'une bobine	cas d'un condensateur (capacité)
$Q = \frac{U_{L_{\max}}}{U_{\max}} = \frac{L\omega_0 I_{\max}}{R \cdot I_{\max}} \Rightarrow Q = \frac{L \cdot \omega_0}{R}$	$Q = \frac{U_{C_{\max}}}{U_{\max}} = \frac{I_{\max} / C\omega_0}{R \cdot I_{\max}} \Rightarrow Q = \frac{1}{RC\omega_0}$

Tab 5 : Facteur de surtension

II.2.11 Puissance électrique:

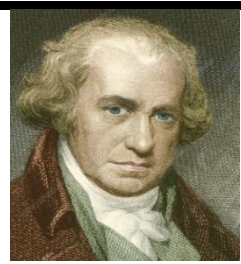
L'électrotechnique s'intéresse à l'aspect énergétique des systèmes électriques. La production, le transport, les techniques de conversion et la consommation électriques représentent des industries centrés sur des échanges énergétiques. Pourtant l'énergie au sens physique de terme est une grandeur difficilement définissable et très peu utilisée de façon brute, en revanche l'électrotechnique et beaucoup d'autres sciences utilisent à profusion le concept de puissance.

II.2.11.1 Types de puissance:**a) Puissance instantanée:**

C'est le produit $p(t) = u(t) \cdot i(t)$, c'est une grandeur qui varie dans le temps.

b) Puissance active:

En règle générale, la puissance qui caractérise un système de conversion d'énergie est sa puissance moyenne on l'appelle aussi la puissance active, noté P et mesurée en watt (W)



James **Watt** (1736-1819) est un ingénieur écossais dont les améliorations sur la machine à vapeur furent une des étapes clé dans la révolution industrielle. En hommage à ses recherches, le **watt** (symbole W), a été donné à l'Unité internationale de puissance, ou de Flux énergétique .

b.1 Puissance active en régime continu:

En régime continu le seul récepteur passif étant la résistance, les valeurs instantanées, moyennes et efficaces des grandeurs sont égales et constantes, la puissance active s'écrit alors $P = U \cdot I = R \cdot I^2$

b-2 Puissance active en régime alternatif:

C'est la valeur moyenne de la puissance instantanée, elle correspond à un travail physique effectif et elle est calculée selon la formule suivante $P = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos\varphi$.

c. Puissance réactif:

C'est une puissance sans effet de travail physique qui correspond à la partie réactive du courant, elle n'est définie qu'en régime sinusoïdal et s'écrit $Q = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \sin\varphi$

Son unité est le Volt-Ampère-Réactif (VAR).

remarque:

- ❖ si $Q > 0$ le dipôle consomme de puissance
- ❖ si $Q < 0$ le dipôle fournit de la puissance.

d. Puissance apparente :

Noté S. C'est le produit des valeurs efficaces (souvent appelé produit de dimensionnement) : $S = U_{eff} \cdot I_{eff}$ Son unité est le Voltampère (VA)

Les relations entre les trois puissances peuvent s'écrire :

$$S^2 = P^2 + Q^2 \Rightarrow S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

e. Facteur de puissance:

C'est une grandeur très importante en électrotechnique, noté F et calculé selon la formule suivante

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

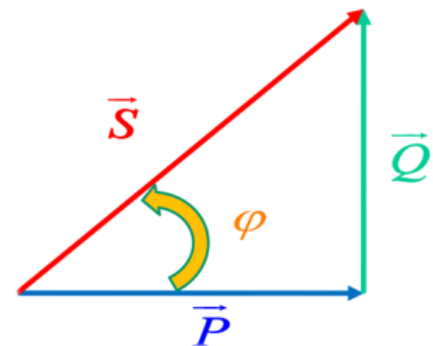



Fig 41 : Triangle des puissances

II.2.11.2 Puissance dans les différents éléments de base:

Eléments	Z (Ω)	P (W)	Q (VAR)	φ (°)
Résistance R	R	R.I ²	0	0
Bobine parfaite L	jLω	0	$L\omega \cdot I^2 = \frac{V^2}{L\omega}$	$\frac{\pi}{2}$
Condensateur Parfait C	$\frac{1}{jC\omega} = \frac{-j}{C\omega}$	0	$\frac{-I^2}{C\omega} = -C\omega \cdot V^2$	$-\frac{\pi}{2}$
Dipôle passif d'impédance Z = R+jX	R + jX	R.I ²	X.I ²	$\text{Arctg}\left(\frac{X}{R}\right)$

II.2.11.3 Théorème de BOUCHEROT:



Paul Boucherot (1869-1943) est un ingénieur français, il est bien connu des électrotechniciens, car il a donné son nom à une méthode de calcul des circuits en alternatif utilisant un bilan des puissances actives et réactives (le fameux théorème de Boucherot). à une formule reliant la tension et le flux dans les machines à flux forcé ; aux inductances de fuites totales des circuits couplés ; au moteur asynchrone à double cage.

Théorème de BOUCHEROT :

- Dan un réseau constitué de récepteurs parcourus par des courants sinusoïdaux de même fréquence :
- ❖ La puissance active totale fournie par le réseau est égale à la somme arithmétique des puissances actives consommées par chaque récepteur.
 - ❖ La puissance réactive totale fournie par le réseau est égale à la somme arithmétique des puissances réactives consommées par chaque récepteur.

Avant compensation

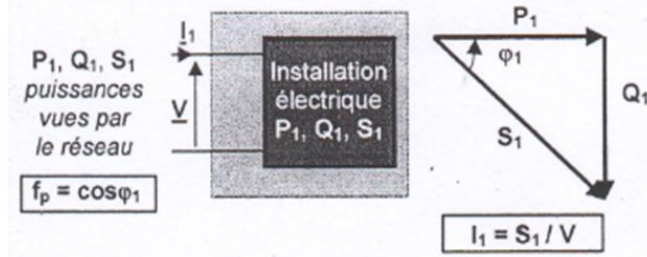


Fig 42 : Circuit sans compensation

Après compensation

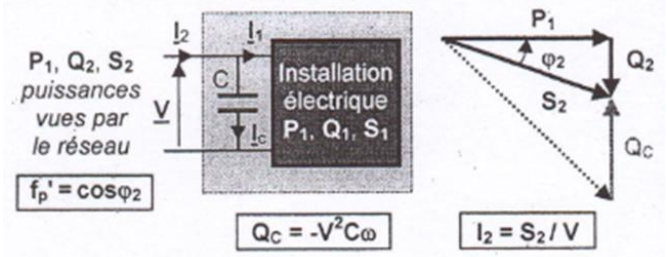


Fig 43 : Circuit avec compensation

D'après le Théorème de BOUCHEROT la puissance réactive de compensation à installer est telle que

$$Q_2 = Q_1 + Q_c \Rightarrow Q_c = P_1 \cdot (tg\phi_2 - tg\phi_1) \Rightarrow C = \frac{P_1 \cdot (tg\phi_1 - tg\phi_2)}{V^2 \omega}$$

Après compensation I_2 est plus faible que $I_1 \rightarrow$ diminution de la section des câbles \rightarrow diminution des pertes en ligne.....

II.2.11.4 Mesure de la puissance :

L'appareil qui mesure directement la puissance en Watt (W) est le WATTMETRE (figure 44) . Cet appareil a une dérivation proportionnelle au produit $UI=P$

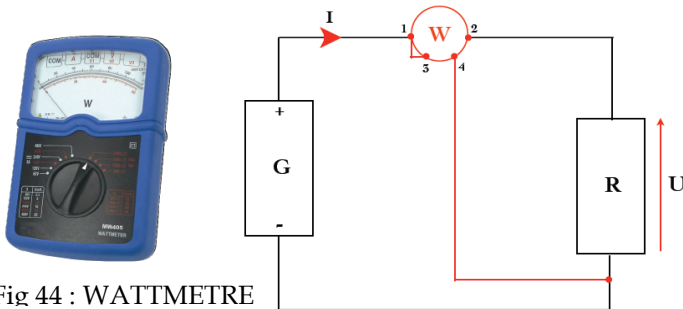


Fig 44 : WATTMETRE

- U : Tension aux bornes de la résistance
- R en Volts (V)
- I : Intensité en Ampère (A)
- R : La résistance
- G: Le générateur

Il est possible également, pour obtenir la puissance P, d'utiliser la méthode de mesure voltampère métrique. Puis réaliser le calcul avec la formule $P=UI$.

II.2.12 L'énergie :

II.2.12.1 Définition de l'énergie :

L'énergie électricité que l'on note W, est le résultat de la puissance multipliée par le temps. Elle s'exprime en Wattheure (Wh) ou Kilowattheure (kWh) mais également en Joule (J) sachant que $1Wh = 3600J$ $W=P.t = U.I.t = R.I^2 .t$

➤ **Remarque :**

L'énergie électricité se mesure avec un COMPTEUR WATTHEUREMÈTRE

II.3 Lois et théorèmes en régime transitoire:

II.3.1 Définitions :

Lorsqu'on ferme un circuit pour le mettre en fonction, les courants et les tensions mettent un certain temps à s'établir. C'est le **régime transitoire**. Cette partie fait l'étude des composants dont ce temps dépend : le condensateur et l'inductance. Les effets de ces composants sont étudiés dans des montages de base.

Dans l'analyse d'un système électrique ou physique, une distinction est faite entre le régime permanent et le régime transitoire ou dynamique.

- ❖ Un système électrique est dit être en régime permanent, lorsque les variables qui décrivent son comportement (tension, courant, etc..), sont soit invariables dans le temps (circuit DC) ou des fonctions périodiques du temps (circuit AC).
- ❖ Un système électrique est dit en régime transitoire quand les variables changent ou varient de manière non périodique. Le régime transitoire disparaît dans le temps et un nouvel état d'équilibre apparaît. Donc le régime transitoire est le passage d'un état stable à un autre état stable.

II.3.2 Régimes transitoires de quelques circuits :

II.3.2.1 Circuit RC :

Considérons un circuit composé d'une maille de charge, qui contient un générateur E , une résistance R et un condensateur de capacité C , et d'une maille de décharge, qui ne contient que R et C . Un condensateur est constitué de deux surfaces métalliques en regard, appelées armatures, séparées par un isolant ou diélectrique. La tension u_{AB} aux bornes du condensateur est proportionnelle à la charge q_A : $q_A = C u_{AB} = C u_C$

En convention récepteur, on représente le condensateur par :

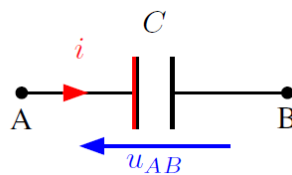


Fig 45 : Représentation d'un condensateur

L'intensité i correspond à un débit de charges q par unité de temps τ : $i = \frac{dq_A}{dt} = C \cdot \frac{du_{AB}}{dt} = C \cdot \frac{du_C}{dt}$

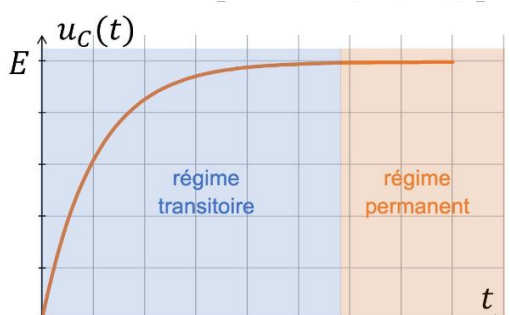
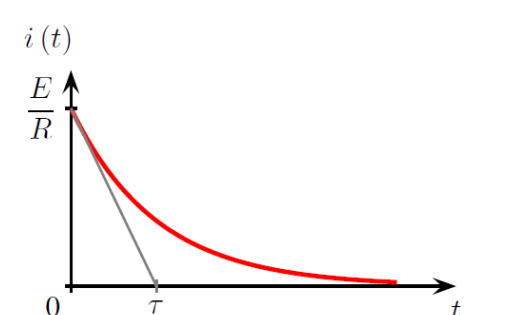
Par application de loi des mailles, on obtient l'équation différentielle de la charge d'un

condensateur à travers une résistance : $\frac{du_C(t)}{dt} + \frac{u_C(t)}{RC} = \frac{E}{RC}$

On pose τ constante de temps (en secondes) : $\tau = RC$

On obtient l'expression de la tension aux bornes du condensateur qui correspond à la charge de

celui-ci : $u_C(t) = E \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$

Réponse en tension	Réponse en courant
<p>Soumis à un échelon de tension $0 \rightarrow E$, la tension du condensateur initialement déchargé est de la forme suivante :</p> 	<p>À partir de la réponse en tension, et de la relation entre l'intensité i et la tension u_{AB}, on peut en déduire la forme de la courbe $i(t)$:</p> 
<p>Fig 46 : charge d'un condensateur (tension)</p>	<p>Fig 47 : charge d'un condensateur (courant)</p>

De façon analogue, par application de loi des mailles, on obtient l'équation différentielle de la

décharge : $\frac{du_C(t)}{dt} + \frac{u_C(t)}{\tau} = 0$ On obtient l'équation de la décharge : $u_C(t) = E.e^{-\frac{t}{\tau}}$

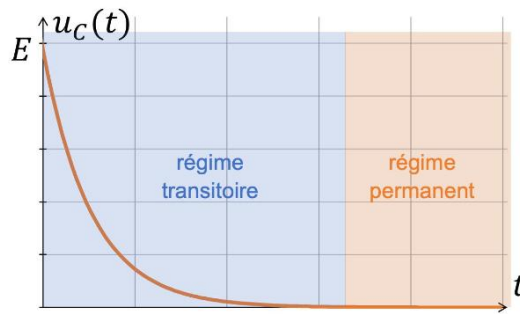


Fig 48 : décharge d'un condensateur (tension)

➤ Réponse à un échelon de tension :

Considérons un système composé d'un G.B.F. (Générateur basse-fréquence), d'une résistance R et d'un condensateur de capacité C. Sachant que $u(t)$ est continue aux bornes d'un condensateur (car l'énergie emmagasinée dans celui-ci est continue), on obtient une succession de charges et de décharges, toutes les demi-périodes du signal échelon. L'énergie stockée par un condensateur de

capacité C, dont la tension aux bornes est u_C , vaut : $E_C = \frac{1}{2}.C.u_C^2$

II.3.2.2 Circuit RL :

La relation entre la tension aux bornes de la bobine et l'intensité qui la traverse s'écrit :

$u_L = ri + L \frac{di}{dt}$: Avec L inductance de la bobine en henrys (H) et r résistance interne de la bobine en ohms (Ω). La convention récepteur est respectée sur le schéma suivant :

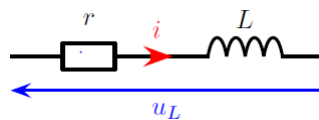


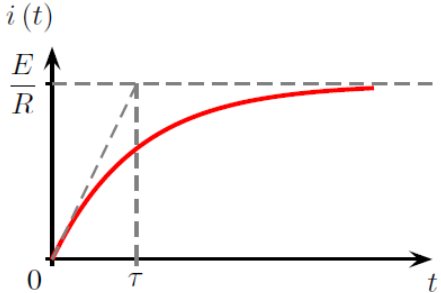
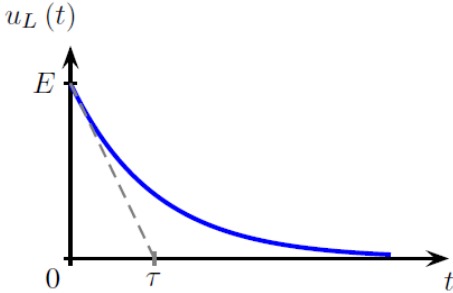
Fig 49 : Représentation d'une bobine

Une bobine s'oppose aux variations brusques de l'intensité du courant dans le circuit où elle se trouve. L'intensité du courant dans le circuit ne peut pas subir de discontinuité.

Considérons un circuit composé d'une maille de charge, qui contient un générateur E, une résistance R et une bobine d'inductance L, ainsi qu'une maille de décharge, qui ne contient que L et R. Par application de loi des mailles, on obtient l'équation différentielle de la charge :

$$\frac{di(t)}{dt} + \frac{R}{L}i(t) = \frac{E}{L}$$

En posant la constante de temps τ (en secondes) : $\tau = L/R$. D'où l'expression de l'intensité au cours de la charge : $i(t) = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$

Réponse en courant	Réponse en tension
<p>La solution de l'équation du courant a une courbe de la forme suivante :</p>  <p>Fig 50 : charge d'une bobine (courant)</p>	<p>À partir de la réponse en courant précédente, et de la relation entre la tension u_L et l'intensité i, on peut déduire la forme de la réponse en tension u_L :</p>  <p>Fig 51 : charge d'une bobine (tension)</p>

Une bobine d'inductance L traversée par un courant d'intensité i emmagasine l'énergie : $E_L = \frac{1}{2} . L . I^2$

De façon analogue, par application de loi des mailles, on obtient l'équation différentielle de la décharge : $\frac{di(t)}{dt} + \frac{i(t)}{\tau} = 0$.D'où l'expression de l'intensité pendant la décharge : $i(t) = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$

➤ Réponse à un échelon de tension :

Considérons un système composé d'un G.B.F., d'une résistance R et d'un solénoïde d'inductance L. Sachant que $i(t)$ est continue au borne d'un solénoïde (car son énergie est continue), on obtient une succession de charges et de décharges, toutes les demi-périodes du signal échelon.

II.3.2.3 Circuit RLC :

Considérons un circuit composé d'une maille de charge, qui contient un générateur E, une résistance R, un solénoïde d'inductance L et un condensateur de capacité C, ainsi que d'une maille de décharge, qui ne contient que L, R et C.

En posant la pulsation propre ω_0 et le facteur de qualité Q : $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ et $Q = \frac{L\omega_0}{R}$

On obtient : $\frac{d^2u_C(t)}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{du_C(t)}{dt} + \omega_0^2 u_C(t) = \omega_0^2 E$

Ou encore : $\frac{d^2u_C(t)}{dt^2} + 2\lambda \frac{du_C(t)}{dt} + \omega_0^2 u_C(t) = \omega_0^2 E$

CHAPITRE III

SYSTEMES TRIPHASÉS & PUISSANCES ELECTRIQUES



I. Généralités :

I.1 Définition générale :

Sur l'ensemble des réseaux électriques, la production, le transport et la distribution de l'énergie électrique se fait sous la forme de systèmes triphasés, c'est-à-dire à partir, non pas d'une seule, mais d'un ensemble **de trois tensions d'alimentation sinusoïdales de même fréquences et généralement de même amplitude qui sont déphasé entre elles de 120°** .

Même au niveau de la consommation électrique, au-delà d'une certaine puissance, l'ensemble des appareillages et des installations électriques est triphasés l'apport et les répercussions des systèmes triphasés sont donc très importants en électrotechnique d'autant plus que le triphasé est connu pour offrir la possibilité de créer un potentiel neutre par association des trois phases.

Un système triphasé est un ensemble de 3 grandeurs (tensions ou courants) sinusoïdales de même fréquence, déphasées les unes par rapport aux autres.

Le système est symétrique (équilibré) si les valeurs efficaces des grandeurs sinusoïdales sont égales et si le déphasage entre deux grandeurs consécutives vaut 120° .

I.2 Avantages du système triphasé (pour quoi le triphasé ?)

- 1) le transport de l'énergie électrique sous forme triphasé est plus économique que sous forme monophasé pour différentes raisons :
 - ✚ **Economie de câbles:** Puisque le neutre n'a pas besoin d'être transporté, trois câbles suffisent à transporter ce qui en nécessiterait six en monophasé. De ce point de vue le triphasé permet de réaliser une économie de trois câbles par ligne.
 - ✚ **Economie de cuivre :** Pour une puissance transportée donnée, l'utilisation d'une ligne triphasée permet de répartir le courant sur les trois câbles ; le courant transporté est alors moindre, ainsi les sections de câble nécessaires sont moins importantes, permettant une économie de matériau conséquente.
 - ✚ **Economie de pertes :** En économisant les câbles et en limitant le courant , le triphasé permet de limiter les pertes en ligne. En effet si l'on ne considère que les pertes Joule, celles-ci sont proportionnelles à la longueur totale des câbles et au carré du courant électrique
- 2) Une ligne triphasée à 3 câbles transporte, à tensions et courant égaux, trois fois plus de puissance qu'une ligne monophasée nécessitant deux câbles et pour une puissance transportée égale le courant est trois fois moins important dans une ligne triphasée que dans une ligne monophasée.

- 3) Les machines triphasées ont des puissances de plus de 50% supérieures aux machines monophasées de même masse et donc leurs prix sont moins élevés (le prix est directement proportionnel à la masse de la machine).
- 4) Les machines électriques triphasées ont un rendement meilleur que celui des machines monophasées et qui demandent beaucoup moins de maintenance.
- 5) A puissance transportée égale, une ligne triphasée est beaucoup plus économique qu'une ligne monophasée. La puissance électrique fournie par un générateur monophasé n'est pas constante dans le temps (on dit qu'elle fluctue) tant dis que un générateur triphasé présente l'énorme avantage de fournir une puissance constante dans le temps.
- 6) Utilisation de deux tensions: Le réseau triphasé met à la disposition de l'abonné deux tensions au lieu d'une, la première est prise entre deux phases (tension composée U) et la seconde prise entre phase et le neutre (tension simple V).
- 7) Champs tournants: Le triphasé permet de créer des champs magnétiques tournants, ce qui ne permet pas le monophasé. Ce champ est utilisé pour entraîner les moteurs triphasés qui sont plus petits et ont de meilleurs rendements que leurs homologues monophasés. De plus ils présentent un meilleur couple au démarrage.
- 8) Taux d'ondulation: Le passage de l'électricité alternative à l'électricité continue s'appelle le redressement. Celui-ci peut être effectué en monophasé à l'aide de 4 diodes au travers d'un pont de Graetz. La tension monophasée ainsi redressée présente une ondulation importante qu'il convient d'amoinrir à l'aide de condensateurs. En triphasé le pont de Graetz contient 6 diodes, soit uniquement deux de plus et la tension fournie présente une ondulation bien moindre, demandant un effort de lissage moins important.

I.3 Applications :

- 1) **Application industrielles** : Machines d'usinages, chauffage (fours de fonderie), moteurs électriques triphasés.....
- 2) **Applications tertiaires** : ascenseur d'immeuble, escalier roulant.....

I.4 Présentation :

Un circuit triphasé élémentaire est constitué d'un générateur (réseau de distribution de l'énergie) et d'un récepteur (figure 1).

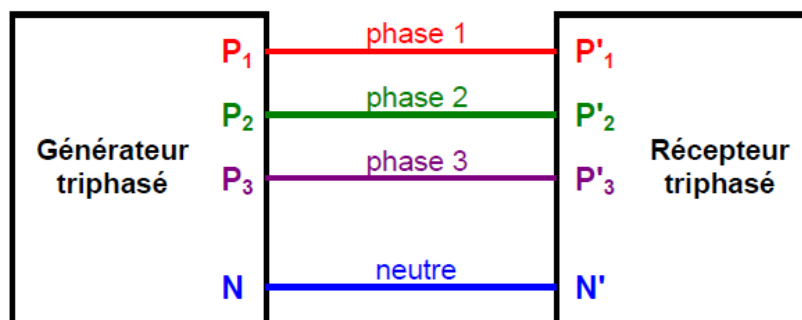


Fig 1: Circuit triphasé élémentaire

L'énergie est véhiculée par les trois conducteurs de phase, d'où l'appellation "triphase".
 Le conducteur de neutre est en général au potentiel 0V et peut ne pas être utilisé.

II. Système triphasé équilibré:

II.1 Définition:

Un système triphasé est dit équilibré lorsque les trois grandeurs qui le composent ont **même** valeurs efficace, **même** valeurs maximum et **déphasées de $\frac{2\pi}{3}$**

II.2 Tensions simples et tensions composées:

II.2.1 Courants et tensions

Le circuit de la figure 2 permet de définir 6 tensions et 4 courants (schéma ci-dessous):

- 1- V_1, V_2 et V_3 sont les **tensions simples** (entre phase et neutre).

$$\left. \begin{aligned} U_{12} &= V_1 - V_2 \\ 2 - U_{23} &= V_2 - V_3 \\ U_{31} &= V_3 - V_1 \end{aligned} \right\} \text{ tensions composées (entre 2 phases)}$$

- 3- i_1, i_2 et i_3 sont les **courants de ligne**.

On a la relation: $i_1 + i_2 + i_3 = i_N$.

Si le système est équilibré, le courant de neutre i_N est nul et on a donc : $i_1 + i_2 + i_3 = 0$.

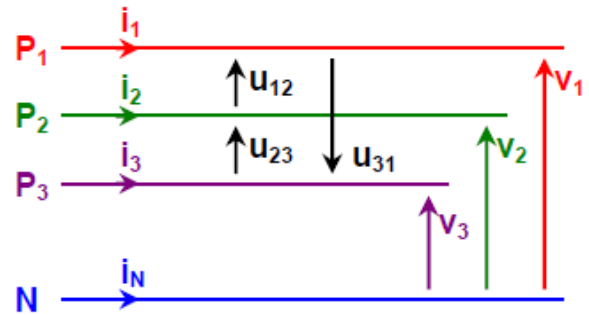


Fig 2 : tensions et courant d'un système triphasé

II.2.2 Tensions simples

La figure ci-dessous représente le chronogramme relatif aux tensions simples V_1, V_2 et V_3 :

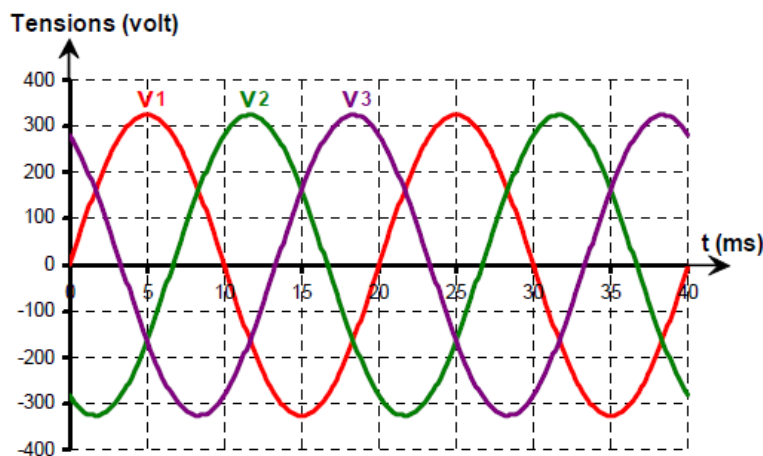


Fig 3 : Chronogramme relatif aux tensions simples

L'observation du chronogramme donne les propriétés suivantes :

- 1- Les tensions sont sinusoïdales, de valeur efficace $V = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{325}{\sqrt{2}} = 230V$ et de fréquence;

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{20 \cdot 10^{-3}} = 50Hz$$

- 2- La tension V_2 est en retard de $1/3$ de période soit $\frac{2\pi}{3}$ rad 120° par rapport à V_1 . On a le même retard entre v_3 et v_2 et entre v_1 et v_3 ce qui donne les expressions :

$$\left\{ \begin{aligned} V_1(t) &= V_M \sin(\omega t) & V_2(t) &= V_M \sin(\omega t - 2\pi/3) & V_3(t) &= V_M \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{aligned} \right\}$$

Remarques:

- ❖ V_1 est choisie comme tension de référence (origine des phases)
- ❖ Dans un réseau triphasé les tensions passent l'une Après l'autre par 0 ($V_1 \Rightarrow V_2 \Rightarrow V_3$)
- ❖ la somme vectorielle des 3 tensions est nul $\vec{V}_1 + \vec{V}_2 + \vec{V}_3 = \vec{0}$

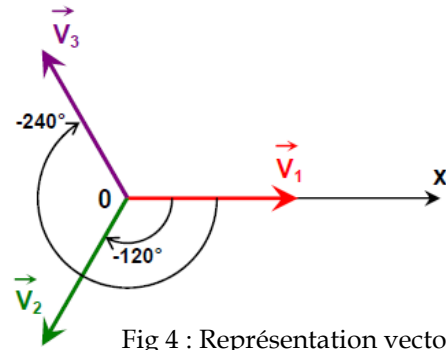
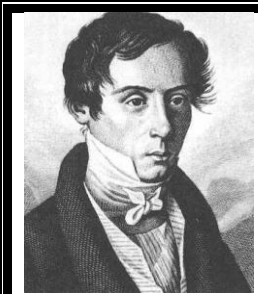


Fig 4 : Représentation vectorielle des tensions simple

Schéma de Fresnel :

Connaissant la valeur efficace et les phases entre les tensions simples, on peut tracer un schéma de Fresnel (figure 4).



Augustin Jean Fresnel (1788–1827) est un ingénieur et physicien français dont les recherches en optique ont conduit à l'acceptation définitive de la théorie ondulatoire de la lumière en remplacement de la théorie balistique qui s'était imposée depuis Newton. Il donna la première explication rationnelle du phénomène de la diffraction. Pour sa démonstration, il montra que l'addition de deux vibrations lumineuses de même fréquence pouvait être modélisée comme la composition de deux forces, c'est-à-dire de deux vecteurs, de grandeurs et directions différentes : les vecteurs de Fresnel.

II.2.3 Tensions composées

Reprenons le schéma de Fresnel relatif aux tensions simples et ajoutons les vecteurs relatifs aux tension composées : $U_{12} = V_1 - V_2$; $U_{23} = V_2 - V_3$ et $U_{31} = V_3 - V_1$.

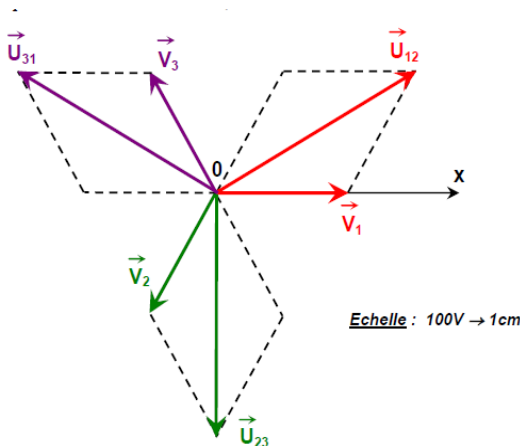


Fig 5 : Représentation vectorielle des tensions composées

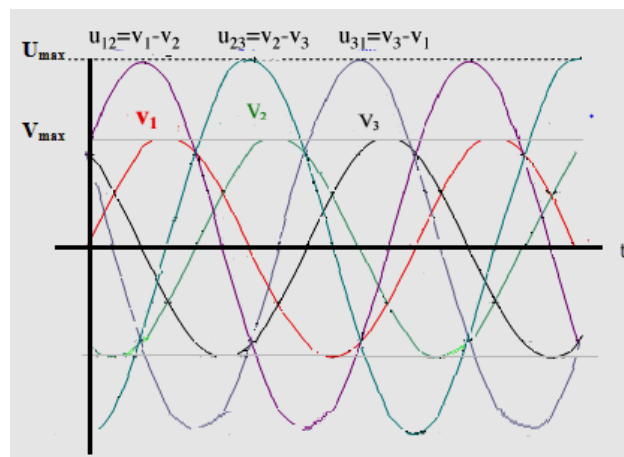


Fig 6 : Chronogramme relatif aux tensions composées

➤ **Les expressions temporelles :**

$$\{ U_{12}(t) = U_M \sin(\omega t + \pi / 6) \quad U_{23}(t) = U_M \sin(\omega t - \pi / 2) \quad U_{31}(t) = U_M \sin(\omega t + 5\pi / 6) \}$$

II.2.4 Relation entre U et V :

Considérons le triangle formé par "U" et "V"

On a : $\frac{U}{2} = V \cdot \cos 30^\circ \Rightarrow \frac{U}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V$

Ce qui donne la relation fondamentale

$$U = \sqrt{3} V$$

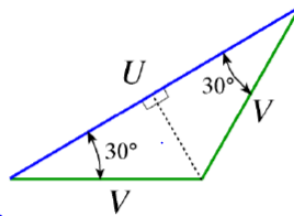


Fig 7 : Relation entre U et V

➤ Réseau de distribution "basse tension"

Pour le réseau de distribution domestique, on a $V = 220V$ et $U = 220 \times \sqrt{3} \approx 380V$. On a donc 220V entre phase et neutre et 380V entre deux phases.

II.3 Système triphasé équilibré direct ou inverse :

Nous avons reporté sur la figure ci dessous le diagramme de Fresnel d'un système de tensions triphasées équilibrées .Deux situation sont possibles:

- 1- Lorsque U_1 est en avance sur U_2 qui est en avance sur U_3 , comme reporté dans le volet (a).
- 2- Lorsque U_3 est en avance sur U_2 qui est en avance sur U_1 , comme reporté dans le volet (b).

Le système est dit direct :

Le système est dit inverse :

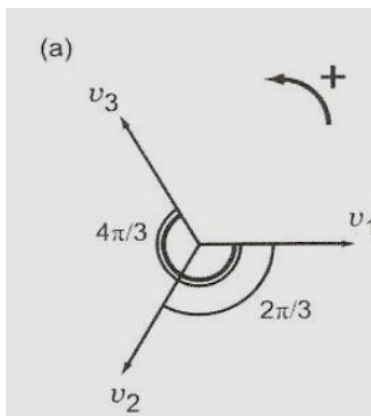


Fig 8 : Système de tension direct

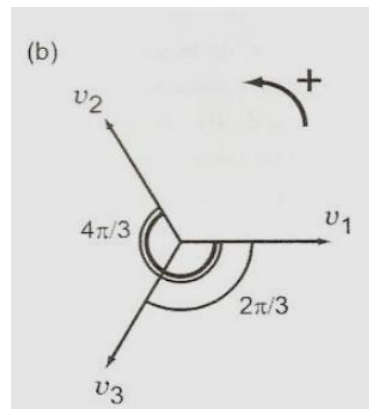


Fig 9 : Système de tension inverse

II.4 Récepteurs triphasés équilibrés :

II.4.1 Définition :

Un récepteur triphasé est composé de trois dipôles que l'on appelle **éléments, enroulements ou phases du récepteur d'impédances Z_i** . Les impédances des trois phases peuvent être différentes, mais lorsqu'elles sont égales, le récepteur est dit équilibré.

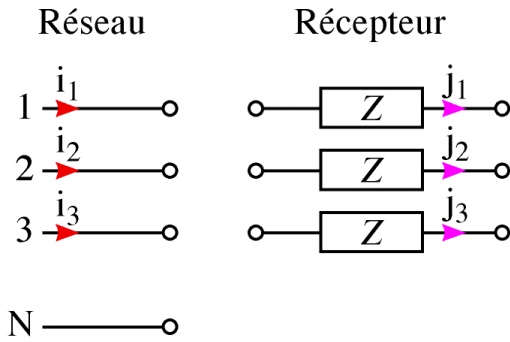


Fig 10 : Réseau- récepteur triphasé

- ❖ **Récepteurs triphasés** : ce sont des récepteurs constitués de trois éléments identiques, d'impédance Z .
- ❖ **Équilibré** : car les trois éléments sont identiques.
- ❖ **Courants par phase** : c'est le courant qui traverse les éléments Z du récepteur triphasés. **Symbole** : J
- ❖ **Courants en ligne** : c'est le courant dans les fils du réseau triphasé. **Symbole** : I

Chacune des phases du récepteur est traversé par le courant de phase que l'on note J et la tension de phase que l'on note V . Lorsqu'un récepteur équilibré est soumis à un système triphasé équilibré de tensions, les tensions de phase V et les courants de phase J forment à leur tour deux systèmes triphasés équilibrés.

II.4.2 Couplage des récepteurs :

Le fait de connecter les trois phases d'un récepteur à une ligne s'appelle le couplage. Ce dernier est nécessaire car il permet d'adapter le récepteur au réseau disponible.

Considérons par exemple le cas d'un récepteur triphasé équilibré: pour que celui ci soit traversé par un système triphasé de courants, il faut que les trois phases soient soumises aux même tensions, il n'existe par conséquent que deux manières de coupler le récepteur à la ligne le couplage triangle (noté : Δ ou D ou π) et le couplage étoile (noté: \star ou Y ou λ).

II.4.2.1 Couplage étoile:

Dans la documentation ou sur les machine le couplage étoile est schématisé à l'aide d'un Y ou d'un λ (lambda). Les anglo-saxons appellent d'ailleurs ce couplage " wye connection". Ainsi si une machine porte par exemple la mention $Y380 V$, cela veut dire qu'elle doit être couplée en étoile sur une ligne de tension 380V. Dans cette configuration, comme on peut observer sur la figure ci dessous, les trois phases du récepteur ont une borne en commun que l'on appelle **point d'étoile** et sont connectées par l'autre borne à un conducteur de ligne.

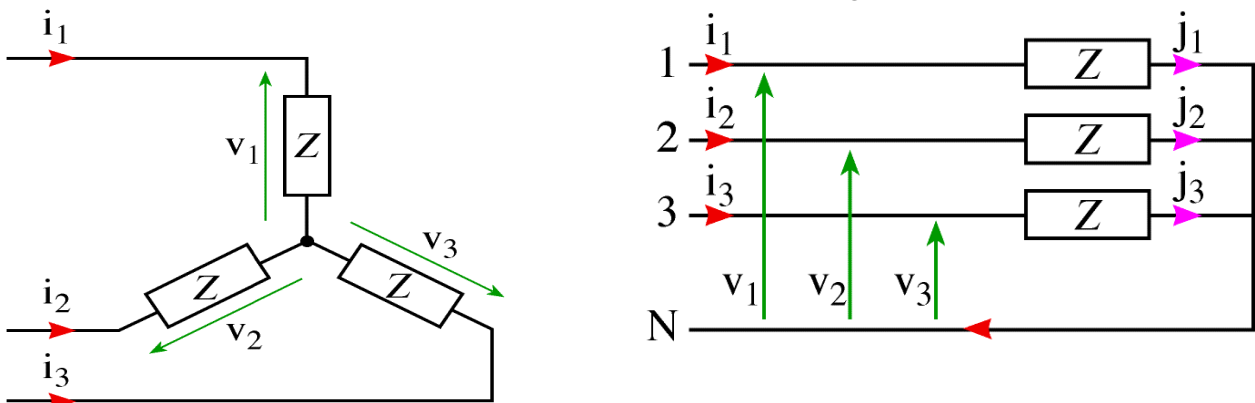


Fig 11 : Branchement étoile

- ❖ Même branchement représenté de deux façons différentes.
- ❖ Le premier schéma explique le terme « **étoile** ».

Considérons le cas d'un récepteur équilibré, c'est-à-dire pour lequel $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$ et intéressons nous aux grandeurs électriques dans le récepteur. Comme il s'agit des mêmes impédances, de ce fait $i_1 + i_2 + i_3 = 0$, donc $i_N = 0$. Le courant dans le fil neutre est nul. Le fil neutre n'est donc pas nécessaire. Pour un système triphasé équilibré, le fil neutre ne sert à rien.

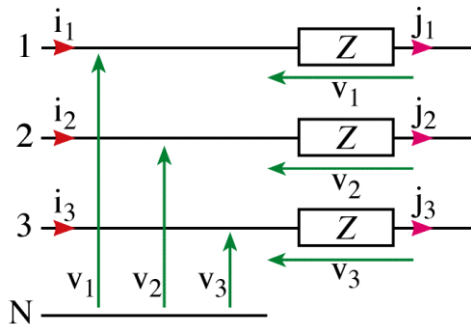


Fig 12 : Relation entre I et J (étoile)

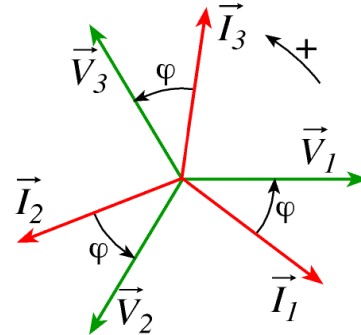


Fig 13 : Schéma vectorielle des V et I

- ❖ Chaque récepteur est soumis à une tension simple $V = V_1 = V_2 = V_3$
- ❖ Même impédance $Z \rightarrow$ même déphasage φ .
- ❖ Dans un couplage étoile équilibré les valeurs efficaces des tensions de ligne U et de tensions de phase V vérifient la relation $U = \sqrt{3} V$.
- ❖ Dans un couplage étoile équilibré, le point d'étoile est au potentiel du neutre.

➤ **Relations entre les courants**

On constate sur le schéma que les courants de ligne sont égaux aux courants par phase.

$I_1 = J_1 ; I_2 = J_2 ; I_3 = J_3$. de plus la charge et le réseau sont équilibrés, donc : $I_1 = I_2 = I_3 = I = J$. On retiendra pour le couplage étoile $I = J$

Pour un couplage étoile, **chaque élément est soumis à une tension simple V** (que le neutre N soit sorti ou non) et est traversé par **le courant de ligne I** . L'impédance Z impose un déphasage $\varphi(\vec{I}, \vec{V})$

II.4.2.2 Couplage triangle:

La deuxième façon de soumettre les trois phases d'un récepteur à la même valeur efficace de tension est de coupler le récepteur en triangle. Chacun des trois éléments du récepteur est relié aux deux autres par ses deux bornes et chacune des trois bornes du récepteur est reliée à une phase de la ligne comme représenter sur la figure ci dessous. Dans la documentation ou sur les machines, le couplage triangle est schématisé à l'aide d'un Δ (delta) ou un D . Les Anglo saxons appellent d'ailleurs ce couplage " delta connection ". Ainsi si une machine porte par exemple la mention $\Delta 220 V$ cela veut dire qu'elle doit être couplée en triangle sur une ligne de tension (de ligne 220 V).

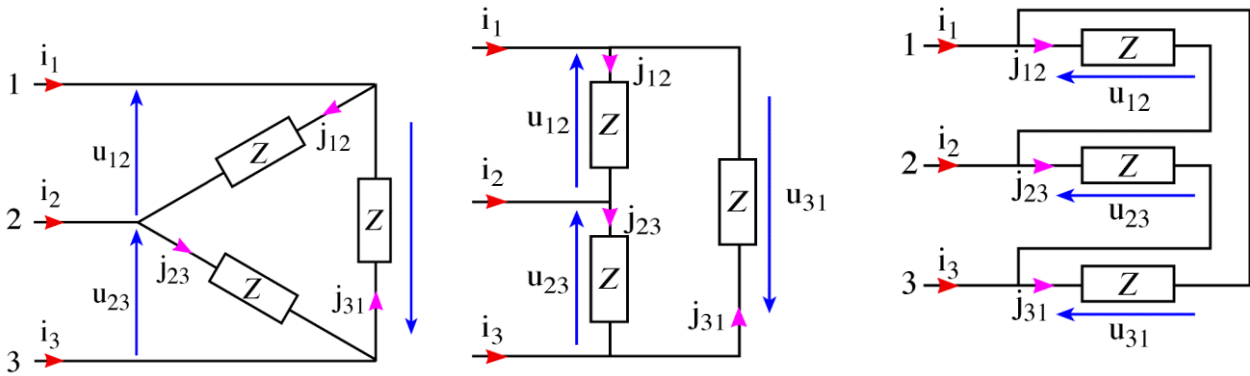


Fig 14 : Branchement triangle

- ❖ Même branchement représenté de trois façons différentes.
- ❖ Le premier schéma explique le terme « triangle ».

Comme il s'agit des mêmes impédances, $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ et $j_{12} + j_{23} + j_{31} = 0$, ici en aucun cas le fil neutre n'est nécessaire.

Considérons le cas d'un récepteur équilibré, chaque phase du récepteur est soumise à la tension de ligne U, de sorte que la tension de phase V est égale la tension de ligne $U = V$

➤ Relations entre les courants:

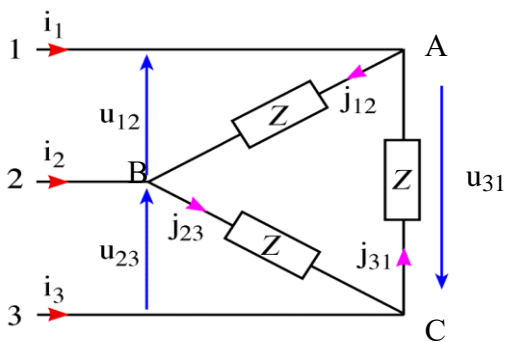


Fig 15: Relation entre I et J (triangle)

D'après le schéma:

- ❖ Au noeud A : $I_1 + J_{31} = J_{12} \rightarrow I_1 = J_{12} - J_{31}$
- ❖ Au noeud B : $I_2 + J_{12} = J_{23} \rightarrow I_2 = J_{23} - J_{12}$
- ❖ Au noeud C : $I_3 + J_{23} = J_{31} \rightarrow I_3 = J_{31} - J_{23}$

Le système triphasé est équilibré : $I_1 = I_2 = I_3 = I$ et $J_{12} = J_{23} = J_{31} = J$.

Pour le couplage triangle, la relation entre I et U est la même que la relation entre V et U

Pour le couplage triangle

$$J = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

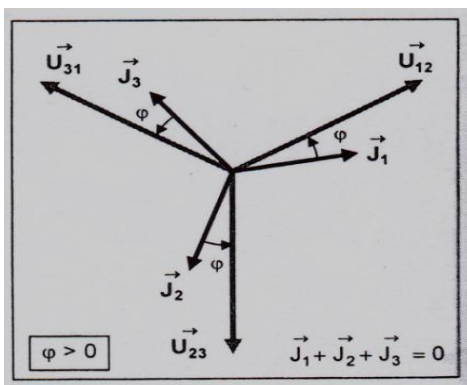


Fig 16 : Schéma vectorielle des U et J

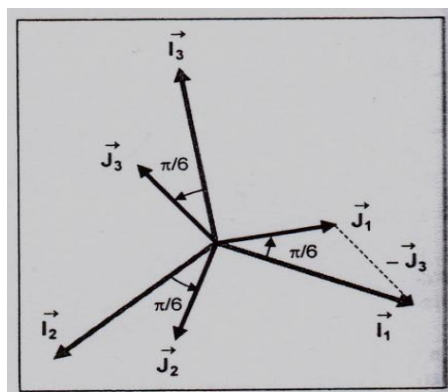


Fig 17 : Schéma vectorielle des I et J

Pour un couplage triangle, chaque élément est soumis à une tension composée U et est traversé par le courant entre phase J . L'impédance Z impose un déphasage $\varphi(\vec{J}, \vec{U})$

➤ Remarques :

1) déphasage:

Les déphasages pour les deux montages étoile et triangle sont les mêmes:

$$\varphi_{\Delta}(\vec{J}, \vec{U}) = \varphi_{\star}(\vec{I}, \vec{V})$$

2) conducteur de neutre:

- ❖ Le réseau triphasé industriel comporte des récepteurs triphasés (usagers industriels généralement) et des récepteurs monophasés (usagers domestiques branchés entre phase et neutre) .
- ❖ En pratique, il ne faut pas supprimer le conducteur de neutre. Dans un réseau de distribution d'énergie, le point neutre N est fréquemment relié à la terre, soit par une connexion directe d'impédance nulle, soit par une impédance qui est en pratique une réactance.

III. Plaque à borne (Bornier):

III.1 Définition :

Les récepteurs triphasés sont en fait constitués de trois récepteurs monophasés. Toute la « difficulté » est de raccorder ces trois récepteurs monophasés de façon à ce que chacun d'eux soit alimenté sous sa tension nominale. Le réseau de distribution triphasé est quant à lui composé de trois phases, éventuellement un neutre et un conducteur de protection équipotentielle

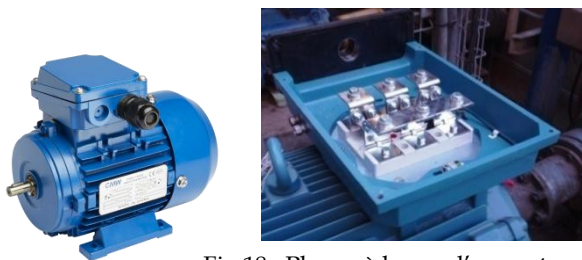
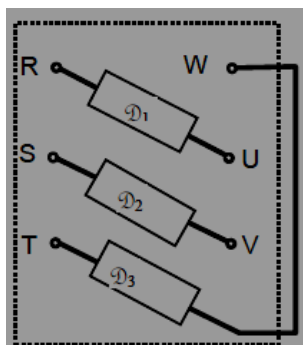


Fig 18 : Plaque à borne d'un moteur

Un récepteur triphasés pouvant se brancher en étoile ou en triangle suivant le réseau dont on dispose . On facilite le passage d'un couplage à l'autre en utilisant un bornier aussi appelé plaque à borne, tel que celui présenté sur la figure 1

III.2 Organisation D'une Plaque A Bornes :



Afin de faciliter la réalisation du couplage à l'aide de barrettes, la disposition des trois éléments sur une plaque à bornes industrielle est faite suivant le schéma ci-contre.

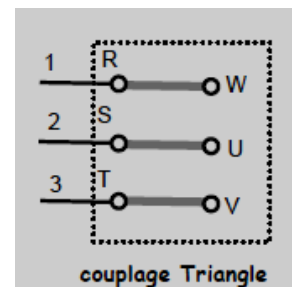
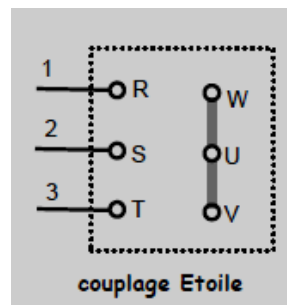


Fig 18 : Techniques de raccordement dans une plaque à borne

Fig 17 : Organisation d'une plaque borne

➤ **Remarque :**

Dans les boîtes à bornes on utilise des « barrettes de couplage » afin d'effectuer les liaisons autres que les arrivées d'énergie. Ces barrettes de couplage sont des plaquettes de cuivre percées qu'on positionnera afin d'obtenir le raccordement électrique correct. L'opération consistant à positionner correctement les barrettes de couplage s'appelle le couplage du moteur

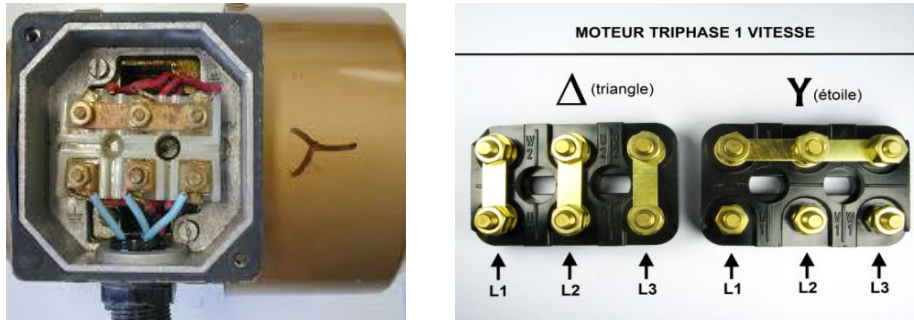


Fig 19 : Constitution d'une plaque à borne

➤ **Pour coupler correctement un moteur asynchrone sur un réseau triphasé :**

A) Comprendre les informations données par le réseau :

✓ **Cas ou deux tensions sont indiquées :**

- ❖ La tension la plus élevée est la tension composée, de valeur efficace U , mesurée entre deux phases.
- ❖ La tension la plus faible est la tension simple, de valeur efficace V , entre une phase et le neutre
- ❖ Une relation lie les deux types de tensions : $U = \sqrt{3} V$.

✓ **Cas ou une seule tension est indiquée :**

- ❖ La tension est toujours la tension composée, de valeur efficace U , mesurée entre deux phases
- ❖ La tension simple de valeur efficace V se déduit par la relation : $U = \sqrt{3} V$.

B) Comprendre la plaque signalétique du moteur :

- ❖ La plus petite des deux tensions doit se retrouver aux bornes de chaque enroulement
- ❖ Analyser les deux couplages possibles,
- ❖ Ne retenir que celui qui respecte les conditions d'utilisation du moteur

Couplage d'un récepteur sur le réseau

Certains récepteurs triphasés ont une plaque à bornes permettant un couplage étoile ou triangle. A partir du réseau triphasé dont on dispose, on effectue un couplage adapté au réseau.

La plus petite des deux tensions mentionner sur la plaque signalétique du récepteur, indique la tension efficace nominale aux bornes d'un enroulement. Les enroulements seront couplés de telle sorte que chacun d'entre eux soit soumis à cette tension. Deux cas sont possibles selon le réseau triphasé d'alimentation

III.3 Exemple :

Plaque à bornes d'un moteur triphasé asynchrone 220 V / 380 V. (Rappel : cela signifie que la tension nominale d'un enroulement est de 220 V).

Le raccordement électrique d'un moteur se fait par sa « boîte à bornes ».

1^{er} cas : On dispose d'un réseau triphasé 127 V / 220 V : Pour qu'un enroulement soit alimenté sous tension nominale (220V) , il faut le **coupler en triangle** car la tension composée U du réseau est de 220V

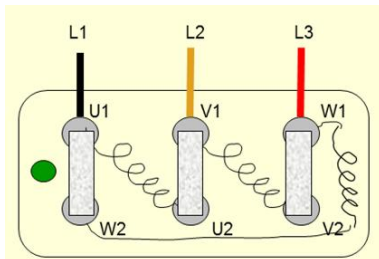


Fig 20 : position des barrettes dans le cas Δ

2^{ème} cas : On dispose d'un réseau triphasé 220 V / 380 V : Pour qu'un enroulement soit alimenté sous tension nominale, il faut le **coupler en étoile** car le tension simple V du réseau est de 220V

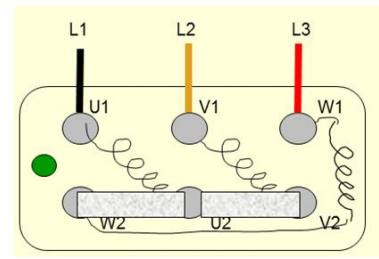


Fig 21 : position des barrettes dans le cas π

Remarque : Un moteur asynchrone triphasé 220 / 380 V est électriquement constitué de trois bobines identiques placées à 120° l'une de l'autre. La tension d'alimentation de chacune de ces bobines correspond à la plus faible des deux tensions indiquées sur la plaque signalétique .Les tensions sont indiquées sur la plaque signalétique du moteur

IV. Les puissances dans les récepteurs triphasés

IV.1 Rappel et définition:

IV.1.1 Le triangle des puissances:

Voici une façon simple de représenter (et de mémoriser) les relations entre P, Q et S en régime alternatif sinusoïdal triphasé équilibré en tensions et en courants:

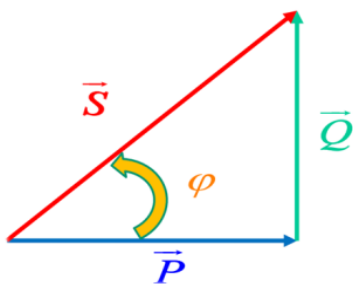


Fig 22 : Triangle des puissances

Rappeler les expressions de P, Q et S en régime alternatif sinusoïdal triphasé équilibré en tensions et courants.

$$S^2 = P^2 + Q^2 \Rightarrow S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{Q}{P}\right)$$

IV.1.2 Théorème de BOUCHEROT

A l'instar du régime monophasé, la puissance active consommée par une installation est égale à la somme des puissances actives consommées par chacun de ses sous-ensembles.

La puissance réactive consommée par une installation est égale à la somme des puissances réactives consommées par chacun de ses sous-ensembles.

➤ **Remarques :**

- 1) Ce théorème ne s'applique pas aux puissances apparentes, que l'on ne peut cumuler (la puissance apparente est une somme complexe, de composantes pas nécessairement en phase).
- 2) Lorsque les tensions et les courants sont alternatifs sinusoïdaux triphasés équilibrés, le théorème de Boucherot permet d'obtenir rapidement la puissance apparente de la ligne. On peut en déduire la valeur efficace du courant de ligne.
- 3) Lorsque les tensions et les courants sont alternatifs sinusoïdaux triphasés équilibrés, le théorème de Boucherot permet d'obtenir rapidement le facteur de puissance de la ligne et donc le déphasage des tensions simples par rapport aux courants de ligne de même numéro.

IV.2 Puissance dans les récepteurs triphasés équilibrés

IV.2.1 Définitions de base :

En triphasé comme en monophasé, on peut calculer la puissance active P , la puissance réactive Q et la puissance apparente S consommés par un récepteur. Rappelons que ces trois grandeurs ne décrivent pas les mêmes choses.

- ❖ la puissance active P décrit la conversion énergétique effectuée par le récepteur. Dans une installation domestique, elle est la seule à être mesurée ou compteur et à donner lieu à une facturation.
- ❖ la puissance réactive Q n'est absolument pas associée à une conversion énergétique mais plutôt à une notion de stockage en caractérisant les échanges de courant entre le récepteur et la source énergétique. Ainsi une puissance réactive excessive implique des appels de courants plus importants et engendrent indirectement des pertes Joules dans le transport.
- ❖ La puissance apparente S n'a pas de sens physique. C'est une grandeur très utile au dimensionnement des installations électriques parce qu'elle permet de déterminer l'intensité des courants de ligne appelés par le récepteur (elle permet de choisir correctement une source d'énergie).

IV.2.2 Puissance active

Le théorème de Boucherot permet d'écrire :

$P = \sum P_k = P_1 + P_2 + P_3$ ces puissances étant celles de chaque dipôle élémentaire d'une charge triphasée.

➤ **Pour le couplage étoile :** $P_k = V_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k$

Comme les tensions et les courants sont équilibrés cela donnera $P_1 = P_2 = P_3$ soit donc :

$$P = 3P_1 \Rightarrow P = 3V \cdot I \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

➤ **Pour le couplage triangle :** $P_k = U_k \cdot J_k \cdot \cos \varphi_k$

Comme les tensions et les courants sont équilibrés cela donnera $P_1 = P_2 = P_3$ soit donc :

$$P = 3P_1 \Rightarrow P = 3.U.J.\cos\varphi = \sqrt{3}.U.I.\cos\varphi$$

Nous constatons que la formule $P = \sqrt{3}.U.I.\cos\varphi$ est applicable quelque soit le type de couplage. Cette particularité est très appréciable dans certaines applications, telle l'électromécanique par exemple. Le couple délivré sur l'arbre des machines tournantes, souvent proportionnelle au courant, se trouve débarrassé de composantes vibratoires préjudiciables à la longévité des paliers mécaniques.

IV.2.3 Puissance réactive

Le raisonnement est le même en remplaçant $\cos\varphi$ par $\sin\varphi$ ce qui donnera :

- Couplage étoile : $Q = 3 Q_1 = 3 V.I.\sin\varphi$
- Couplage triangle: $Q = 3 Q_1 = 3 U.J.\sin\varphi$

Nous constatons que la formule $Q = \sqrt{3}.U.I.\sin\varphi$ est la même quelque soit le type de couplage.

IV.2.4 Puissance apparente complexe

En appliquant toujours la même méthode nous aurons : $S = \sum S_k = \sum P_k + j\sum Q_k$

En étoile $S = 3.V.I$ En triangle : $S = 3.U.J$

Ce qui permet d'écrire dans tous les cas : $S = \sqrt{3}.U.I$

IV.2.5 Puissance instantanée

Considérons une ligne alimentant une charge triphasée. Les courants et les tensions s'écrivent en prenant v_1 comme origine des phases :

$$\begin{aligned} v_{1(t)} &= \sqrt{2}V\cos(\omega t) & i_{1(t)} &= \sqrt{2}I\cos(\omega t - \varphi) \\ v_{2(t)} &= \sqrt{2}V\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & i_{2(t)} &= \sqrt{2}I\cos\left(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{3(t)} &= \sqrt{2}V\cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) & i_{3(t)} &= \sqrt{2}I\cos\left(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned}$$

Les puissances instantanées seront:

$$\begin{aligned} p_{1(t)} &= v_{1(t)} \cdot i_{1(t)} & p_{2(t)} &= v_{2(t)} \cdot i_{2(t)} & p_{3(t)} &= v_{3(t)} \cdot i_{3(t)} \\ p_{1(t)} &= 2 \cdot V.I \cos(\omega t) \cdot \cos(\omega t - \varphi) & p_{2(t)} &= V.I \cos(\varphi) + V.I \cos\left(2\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ p_{1(t)} &= V.I \cos(\varphi) + V.I \cos(2\omega t - \varphi) & p_{3(t)} &= 2 \cdot V.I \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ p_{2(t)} &= 2 \cdot V.I \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) & p_{3(t)} &= V.I \cos(\varphi) + V.I \cos\left(2\omega t - \varphi - \frac{8\pi}{3}\right) \end{aligned}$$

La puissance instantanée totale est la somme des trois, ce qui donne : $P(t) = 3.V.I.\cos(\varphi) + 0$

En effet, les trois termes fluctuants forment un système triphasé équilibré inverse à la pulsation 2ω dont la somme des trois composantes est nulle. **La puissance fluctuante d'un système triphasé équilibré est nulle.** Ceci a pour conséquence que l'énergie s'écoule de façon monotone de la source vers la charge sans avoir de flux et de reflux (du genre trois pas en avant, un pas en arrière). Les transducteurs électromécaniques utilisant le triphasé ne donneront pas d'ondulation de couple, ce qui très intéressant.

IV.3 Mesure de puissance en triphasé :

La puissance active est mesurée en monophasé avec un wattmètre, En triphasé le wattmètre est utilisé dans différentes montages permettant de procéder à la mesure de puissance active et dans certaines conditions à la mesure de puissance réactive. Le choix du montage dépend du nombre de fils impliqués dans le couplage et de l'équilibre du récepteur.

IV.3.1 Mesure de la puissance active dans le cas le plus général

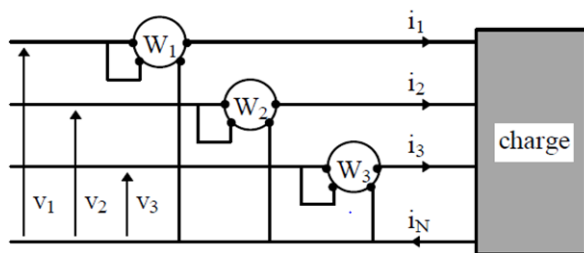


Fig 23 : Principe de Mesure de la puissance active dans le cas le plus général

Soit une ligne triphasée soumise à des tensions et des courants quelconques périodique de même période. La puissance active véhiculée par cette ligne s'exprime par la relation générale :

$$P = \langle v_1 \cdot i_1 \rangle + \langle v_2 \cdot i_2 \rangle + \langle v_3 \cdot i_3 \rangle$$

Il faut donc trois wattmètres pour mesurer la puissance active transmise par cette ligne triphasée.

$$P = \text{indication } W_1 + \text{indication } W_2 + \text{indication } W_3.$$

Remarquons que si le système est équilibré, les trois wattmètres mesurent la même valeur ($P_1 = P_2 = P_3$). Dans ce cas un seul des trois wattmètres suffit: on multiplie simplement la lecture par 3

Critique de la méthode: Le principal inconvénient de la méthode des trois wattmètres est le nombre de mesures nécessaires pour déterminer la valeur de la puissance active. En effet le technicien doit disposer de trois wattmètres, ou bien, s'il n'en dispose que d'un seul, il doit modifier les connexions à trois reprises pour effectuer une seule et même mesure. De plus elle nécessite la présence du neutre pour la mesure, ce qui interdit un montage triangle.

L'avantage de cette méthode c'est qu'elle fonctionne quelle que soit la charge, mais à condition de disposer du neutre.

IV.3.2 Méthode des deux wattmètres :

IV.3.2.1 Puissance active:

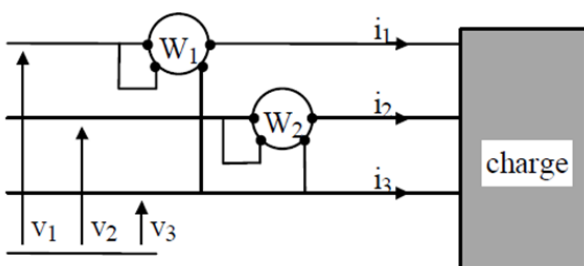


Fig 24 : Principe de Mesure de la puissance par la méthode des deux Wattmètres

Dans ce cas on peut donc mesurer la puissance active transmise par une ligne triphasée (équilibrée ou non, avec des signaux sinusoïdaux ou non) à l'aide de deux Wattmètres.

$$P = \text{indication } W_1 + \text{indication } W_2$$

IV.3.2.2 Puissance réactive :

Dans le cas d'un récepteur équilibré, et uniquement dans ce cas, la puissance réactive Q consommée par le récepteur peut être mesurée à l'aide de la méthode des deux wattmètres au travers de la soustraction

$$Q = \sqrt{3}(W_1 - W_2) \quad \text{Avec } W_1 : \text{indication du 1ère wattmètre et } W_2 \text{ indication du 2ème wattmètre}$$

IV.3.3 Relèvement du facteur de puissance

Dans le cas équilibré, la connaissance de P et Q permet de déterminer le facteur de puissance de l'installation. En effet:

$$\frac{Q}{P} = \frac{\sqrt{3}.U.I.\sin\varphi}{\sqrt{3}.U.I.\cos\varphi} = \tan\varphi = \frac{\sqrt{3}..(W1-W2)}{W1+W2} \Rightarrow \varphi = \tan^{-1}\left(\frac{P}{Q}\right) \Rightarrow \cos\varphi \text{ (facteur de puissance)}$$

Dans le cas où le facteur de puissance d'une installation électrique est faible, les courants absorbés en ligne augmentent pour le transport d'une puissance donnée. Ceci occasionne des pertes en ligne excessives entraînant leur surdimensionnement. Le fournisseur d'énergie (SONELGAZ) impose donc un facteur de puissance minimal à respecter, faute de quoi l'entreprise est taxée pour toute consommation de puissance réactive excédentaire.

La solution, comme en monophasé, consiste à compenser la surconsommation d'énergie réactive en ajoutant des condensateurs. La puissance réactive apportée par un condensateur étant proportionnelle au carré de la tension, il vaut mieux faire un couplage triangle. Ainsi, à capacité égale, Q_C sera trois fois plus grande (puisque $U = \sqrt{3}.V$)

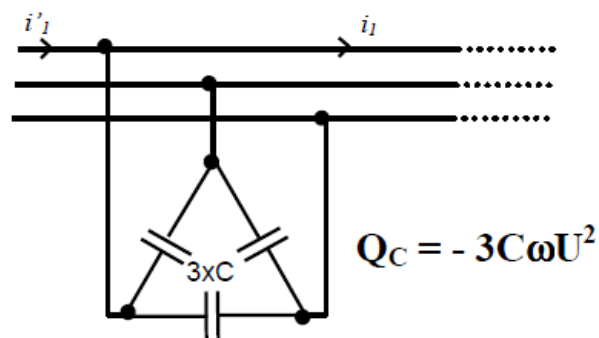


Fig 25 : Montage des condensateurs de composition en triangle

➤ **Remarque :**

On utilise aujourd'hui des compensateurs statiques. Ce sont des dispositifs d'électronique de puissance qui asservissent le facteur de puissance à la valeur souhaitée, tout en éliminant les harmoniques de courants indésirables

IV.4 Pertes joule dans un récepteur triphasé équilibré:

La caractérisation d'une machine triphasée passe systématiquement par l'évaluation des pertes Joule ou pertes par échauffement qu'elle subit. En effet les pertes Joule P_j correspondent à une conversion électrique en chaleur ; elles sont donc associées à une consommation de puissance active et entrent en jeu dans le calcul du rendement.

IV.4.1 Pertes Joule en couplage triangle :

Les pertes Joule s'écrivent à l'aide du théorème de Boucherot: $P_j = 3rJ^2$

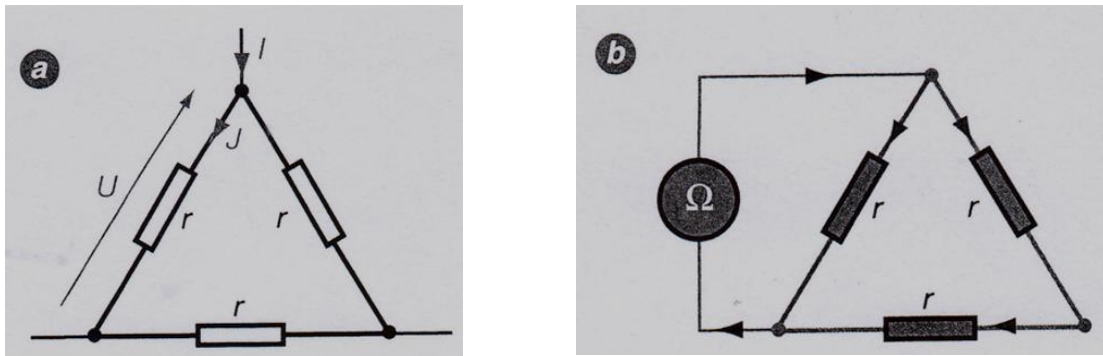


Fig 26 : Système triphasé équilibré couplé en triangle

Calcul des pertes Joule dans un système triphasé équilibré couplé en triangle avec la ligne : (a) Tensions et courants aux bornes d'un enroulement , (b) résistance équivalente entre deux bornes du récepteur.

IV.4.2 Pertes Joule en couplage étoile :

Les pertes Joule s'écrivent à l'aide du théorème de Boucherot: $P_j = 3rI^2$

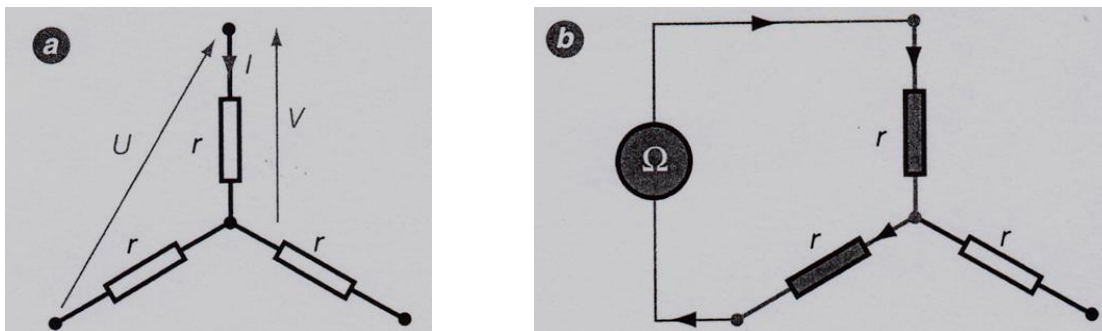


Fig 27 : Système triphasé équilibré couplé en étoile

Calcul des pertes Joule dans un système triphasé équilibré couplé en étoile trois fils avec la ligne : (a) Tensions et courants aux bornes d'un enroulement, (b) résistance équivalente entre deux bornes du récepteur.

Dans un récepteur triphasé équilibré, qu'il soit couplé en triangle ou en étoile les pertes Joule se calculent selon la relation: $P_j = \frac{3}{2} R.I^2$ avec R et la résistance entre deux bornes du récepteur (deux enroulements) et I le courant de ligne.

➤ Remarque :

Couplage triangle Δ : $R = \frac{2}{3}.r$	Couplage étoile Y : $R = 2.r$
--	-------------------------------

V. Lecture de la plaque signalétique:

V.1 Définition d'une plaque signalétique sur une machine :

Chaque machine et outil à moteur thermique ou électrique vendu sur le marché disposent d'une plaque signalétique ou fiche d'identification afin de pouvoir reconnaître clairement le produit. Que ce soit une motobineuse, une tondeuse, un compresseur d'air, un groupe électrogène ou un nettoyeur haute pression, tous disposent d'une plaque apposée par le fabricant lors de la fabrication en usine.

V.2 Emplacement :

Celle-ci est généralement située sur la châssis du matériel, proche du moteur dans un endroit protégé pour éviter qu'elle s'abîme avec le temps. Parfois elle se trouve aussi dans la notice ou dans la documentation technique . La plaque signalétique de votre machine en est sa carte d'identité, elle vous permet d'identifier exactement le type de produit et la série de fabrication dont vous disposez et vous permet de trouver les pièces détachées facilement . La fiche signalétique est généralement un autocollant ou un sticker apposé sur le carter de la machine, cela peut aussi être une plaque métallique gravée.

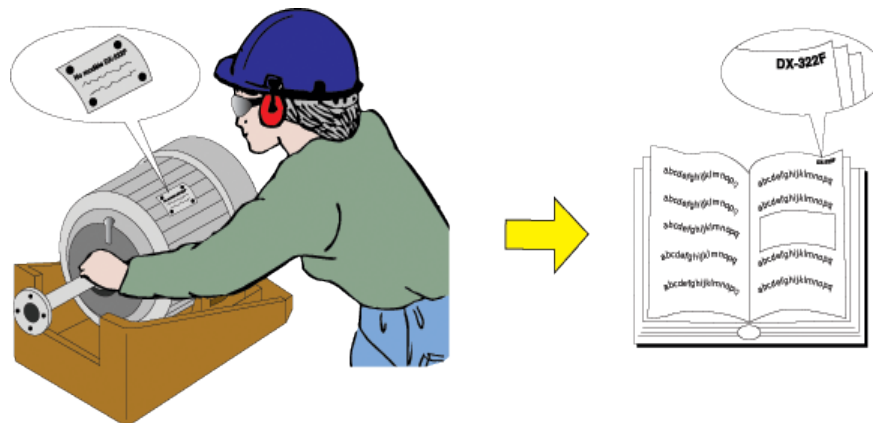


Fig 28 : Lecture de la plaque signalétique



Fig 29 : plaque signalétique d'un moteur

Manuel d'instructions

LEROY SOMER		MOT. 3 ~ FLSB 180 M			CE	
IP 55 IK 08		I cl. F	40 °C	S3	40 %	6 d/h
N° 596 059 GH 001		kg : 208				
V	Hz	min ⁻¹	kW	cos φ	A	
Δ 220	50	1427	17	0.88	60	
Y 380	50	1427	17	0.88	35	
U _R 250					I _R 42	
GRAISSE ESSO UNIREX N3						
DE 6310 C3		15 cm ³	11000 /	H 50/60 Hz		
NDE 6310 C3		15 cm ³	11000 /	H 50/60 Hz		

Couplage adopté
Vitesse nominale
Puissance utile
Facteur de puissance
Intensité du courant en ligne

Fig 30 : détaille d'une plaque signalétique d'un moteur

V.3 Exemple de lecture:

Lecture de la plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé

LEROY SOMER	LS 200L	KW 15	725 tr/min
Kg 175	Cl.F ΔT= 80 K	IP 555	
50 Hz	V 230 / 400	A 30.5 / 17.6	
	cos φ 0.8	Rend. 88%	

Marque du constructeur Référence du constructeur

LEROY SOMER	LS 200L	KW 15	725 tr/min
Kg 175	Cl.F ΔT= 80 K	IP 555	
50 Hz	V 230 / 400	A 30.5 / 17.6	
	cos φ 0.8	Rend. 88%	

-1-

Classe de température : échauffement possible

Masse du moteur asynchrone

Indice de protection :

- contre les corps solides
- contre les corps liquides
- contre les chocs mécaniques

LEROY SOMER	LS 200L	KW 15	725 tr/min
Kg 175	Cl.F ΔT= 80 K	IP 555	
50 Hz	V 230 / 400	A 30.5 / 17.6	
	cos φ 0.8	Rend. 88%	

-2-

Puissance mécanique que le moteur délivre au point de fonctionnement nominal.

Cette valeur nominale sert de point de départ pour les ingénieurs qui doivent concevoir ce moteur

LEROY SOMER	LS 200L	KW 15	725 tr/min
50 Hz	V 230 / 400	A 30.5 / 17.6	
	cos φ 0.8	Rend. 88%	

Dans les conditions nominales, l'axe du moteur asynchrone tournera à la fréquence de rotation de 725 tr/min (fréquence de rotation dite nominale).

-3-

-4-

LEROY SOMER	LS 200L	KW 15	725 tr/min
Kg 175	Cl.F ΔT= 80 K	IP 555	
50 Hz	V 230 / 400	A 30.5 / 17.6	
	cos φ 0.8	Rend. 88%	

Dans les conditions nominales, le moteur doit être alimenté par un réseau triphasé - de fréquence 50 Hz

de tension efficace composée OU de tension efficace composée

U = 230 V **OU BIEN** **U = 400 V**

-5-

<p>LERROY SOMER LS 200L KW 15 725 tr/min</p> <p>Kg 175 Cl.F Δ T= 80 K IP 555</p> <p>50 Hz V 230 / 400 A 30.5 / 17.6</p>	<p>LERROY SOMER LS 200L KW 15 725 tr/min</p> <p>Kg 175 Cl.F Δ T= 80 K IP 555</p> <p>50 Hz V 230 / 400 A 30.5 / 17.6</p> <p>cos φ 0.8 Rend. 88%</p>
---	--

Pour un réseau 230V, je dois coupler le moteur en... **TRIANGLE**

Pour un réseau 400V, je dois coupler le moteur en... **ETOILE**

La valeur efficace d'un courant de ligne vaut alors... **30.5 A** pour le fonctionnement nominal

La valeur efficace d'un courant de ligne vaut alors... **17.6 A** pour le fonctionnement nominal

-6-

Réseau 230V: couplage TRIANGLE

Réseau 400V: couplage ETOILE

J'ai raison!

Moi aussi!

-7-

Les enroulements et donc le moteur fonctionnent dans les mêmes conditions!

U = 230 V I = 30.5 A

U = 400 V I = 17.6 A

Pour un réseau 230V, Chaque enroulement supporte une tension composée de valeur efficace 230 V... et est traversé par un courant d'intensité efficace $J = I/\sqrt{3} = 30.5/\sqrt{3} = 17.6 A$

Pour un réseau 400V, Chaque enroulement supporte une tension simple de valeur efficace $U = V/\sqrt{3} = 230 V$... et est traversé par un courant de ligne d'intensité efficace $I = 17.6 A$

-8-

Pour finir ...

LERROY SOMER	LS 200L	KW 15	725 tr/min
Kg 175	Cl.F Δ T= 80 K	IP 555	
50 Hz	V 230 / 400	A 30.5 / 17.6	
	cos φ 0.8	Rend. 88%	

Facteur de puissance nominal ϕ est le déphasage de la tension aux bornes d'un enroulement par rapport au courant traversant ce même enroulement

Rendement nominal = $\frac{\text{puissance mécanique utile}}{\text{puissance active reçue par le moteur}}$

-9-

VI. Notions sur le réseau de transport national :

La production d'électricité se fait dans les centrales en triphasé généralement sous 20 kV. Le transport à longue distance se fait en très haute tension 400 kV afin d'avoir des pertes en ligne et une masse de conducteur la plus faible possible (triphase trois fils).

Le réseau national 400 kV interconnecte entre eux les sous-réseaux régionaux 225 kV. Dans un sous réseau le transport est effectué en 90 ou 63 kV. La livraison est faite en 20 kV pour les gros consommateurs et en 380 V triphasé ou 220 monophasé pour les particuliers.

VI.1 SONELGAZ :



Sonelgaz, acronyme de **Société nationale de l'électricité et du gaz**, Est un groupe industriel énergétique algérien, spécialisé dans la production, la distribution et la commercialisation d'électricité et de l'achat, le transport, la distribution et la commercialisation de gaz naturel. Son siège social est situé à Alger. Sa capacité de production électrique s'élève à 72 395 GWh et exploite un réseau de transport électrique de 29 644 km et de 338 380 km pour la longueur du réseau de distribution électrique. La capacité installée s'élève à 20 963MW, le réseau de transport du gaz s'étale sur 21 597km et une longueur de distribution de 107 692km.

VI.2 Les niveaux de tension :

Tension alternative	Domaine de tension	Autre appellation courante	Valeurs usuelles en Algérie (tension d'utilisation)
≤ 50 V	TBT	TBT (très basse tension)	12 V - 24 V - 48 V
50 V < U ≤ 1000 V	BT	BT (basse tension)	220 V-230 V - 380 V - 400 V
1 kV < U ≤ 50 kV	HTA	MT (moyenne tension)	5.5 kV - 10 kV - 30 kV
U > 50 kV	HTB	HT (haute tension) THT (très haute tension)	63 kV - 90 kV - 150 kV 225 kV - 400 kV

Tab 1 : Les niveaux de tension

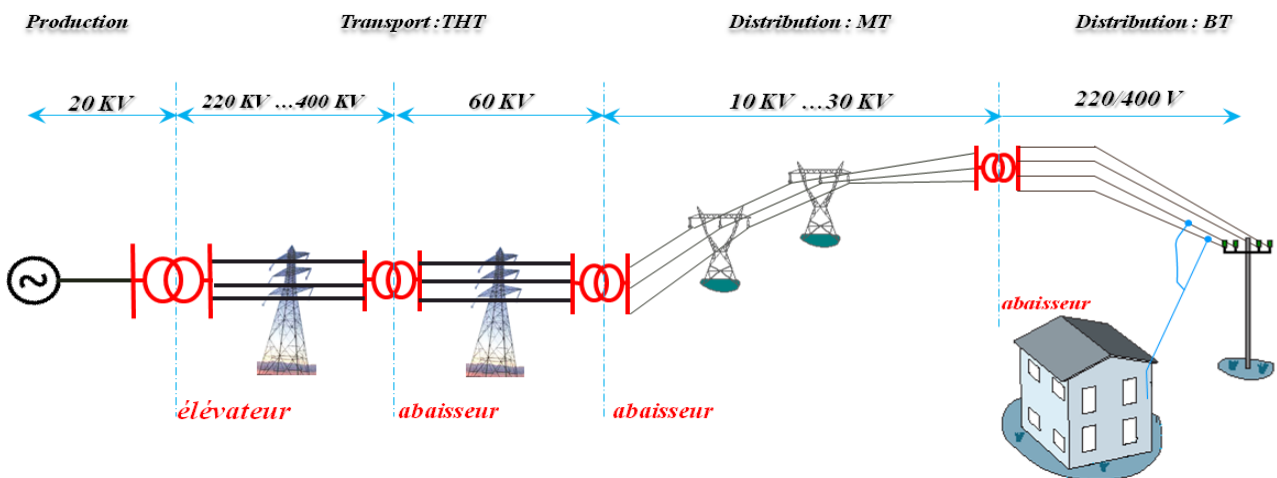
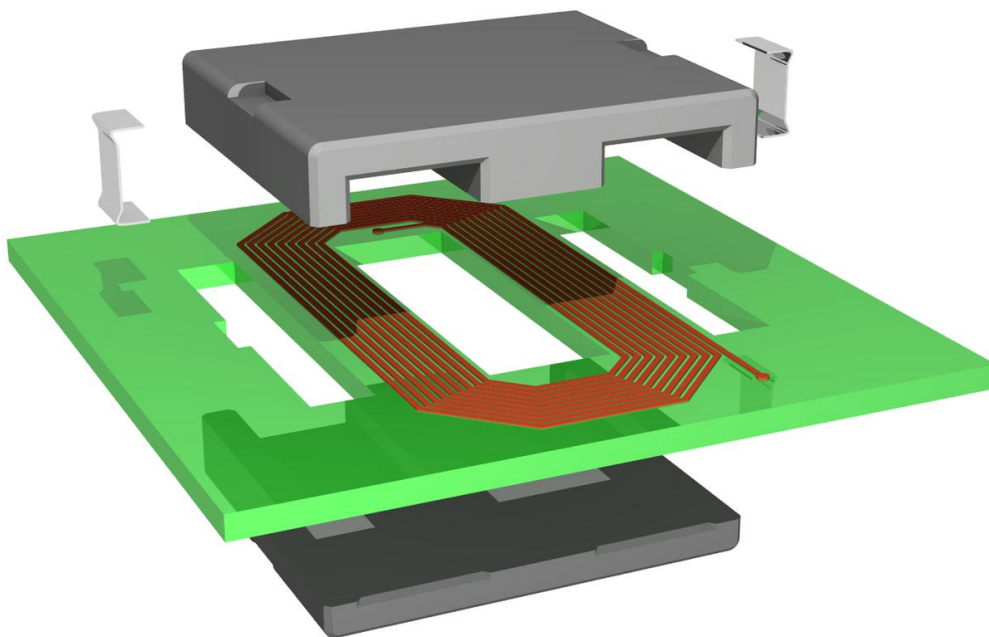


Fig 31 : Exemple d'un réseau électrique

CHAPITRE IV

CIRCUITS MAGNÉTIQUES



I. Généralités :

I.1 Introduction :

Les machines électriques sont des convertisseurs d'énergie. Ils convertissent l'énergie électrique en une autre énergie ou inversement. Les phénomènes physiques principaux intervenant dans une machine électrique sont principalement les phénomènes électriques et les phénomènes magnétiques.

Les phénomènes électriques sont généralement étudiés par des modèles de circuits électriques faisant intervenir des constantes localisées comme les résistances, les inductances ou mutuelles. Les phénomènes magnétiques sont régis par les équations de Maxwell et des lois de comportement des matériaux vis-à-vis du champ magnétique.

Les phénomènes magnétiques sont le fruit du mouvement des charges électriques. La grandeur vectorielle **champ d'induction magnétique** émane directement de ces mouvements grâce à la loi de Biot et Savart. L'autre grandeur importante, le **champ d'excitation magnétique**, vectoriel lui aussi, traduit l'influence du milieu. Dans les matériaux courants, ces vecteurs (induction et excitation) sont colinéaires. Enfin, on distingue une dernière grandeur, scalaire cette fois-ci, définie à partir de l'induction : le **flux d'induction magnétique**.

Les phénomènes électriques et magnétiques ont tout d'abord été étudiés séparément par plusieurs physiciens de renom, dont les principaux sont Franklin (1706 - 1790), Coulomb (1736 - 1806) Oested (1775 - 1851), Ampère (1775 - 1836), Gauss (1777 - 1855) et Faraday (1791 - 1867). C'est cependant à Maxwell (1831 - 1879) que l'on doit la formulation la plus complète des relations liant entre elles les grandeurs électriques et magnétiques. Les équations de Maxwell spécifient que toute variation spatiale d'un champ électrique ou magnétique en un point de l'espace entraîne ou est due à l'existence, ou la variation temporelle, d'un autre champ au même point de l'espace. Il s'agit là de leur forme locale, ou encore différentielle

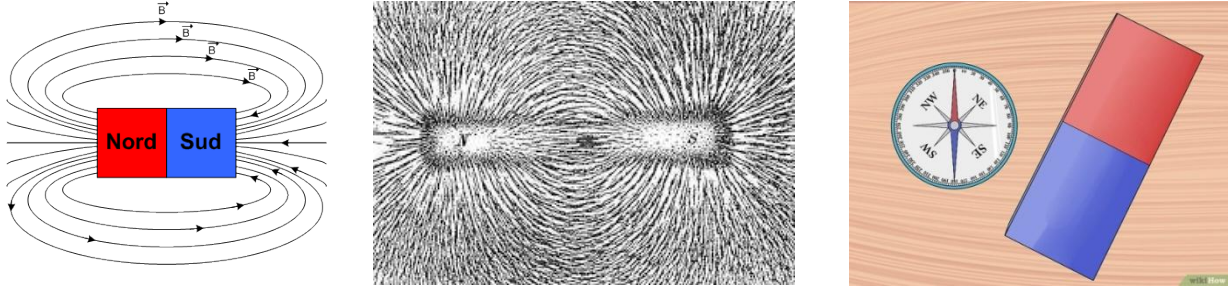
Remarque : Dans les machines électrique, l'utilisation d'un champ magnétique a imposé la réalisation **des circuits magnétiques** ayant des formes adaptées.



James Clerk Maxwell (1831-1879) est un physicien et mathématicien écossais. Il est principalement connu pour avoir unifié en **un** seul ensemble d'équations, les équations de Maxwell, l'électricité, le magnétisme et l'induction, en incluant une importante modification du théorème d'Ampère. Ce fut à l'époque le modèle le plus unifié de l'électromagnétisme. Il est également célèbre pour avoir interprété, dans un article que la lumière comme étant un phénomène électromagnétique. Il a notamment démontré que les champs électriques et magnétiques se propagent dans l'espace sous la forme d'une onde et à la vitesse de la lumière.

I-2 Définitions :

- 1) Un circuit magnétique est un circuit généralement réalisé en matériau ferromagnétique au travers duquel circule un flux de champ magnétique
- 2) Une bobine parcourue par un courant engendre un champ d'induction magnétique dans son environnement. Si on place dans cet environnement un objet en matériau ferromagnétique celui-ci peut modifier considérablement ce champ. On parle alors de circuit magnétique.
- 3) Un volume de matériau magnétique excité par une bobine ou par un aimant permanent devient circuit magnétique. Celui-ci au flux d'induction magnétique ce qu'un circuit électrique est au courant électrique.
- 4) L'interaction magnétique est la propriété que possèdent certains corps pour attirer des morceaux de fer, ces corps sont appelés : corps magnétique ou aimants ;
- 5) L'aimant possède deux points ou l'interaction magnétique est la plus intense.
- 6) Les pôles d'un même aimant sont donc différents : l'un est le pôle nord, l'autre le pôle sud
- 7) Nous caractérisons l'espace autour d'un aimant par un champ magnétique. Il y a donc des lignes de champ magnétique qui quittent l'aimant pour le pôle Nord et se referment sur le pôle Sud.



I.3 Quelques exemples des circuits magnétiques :

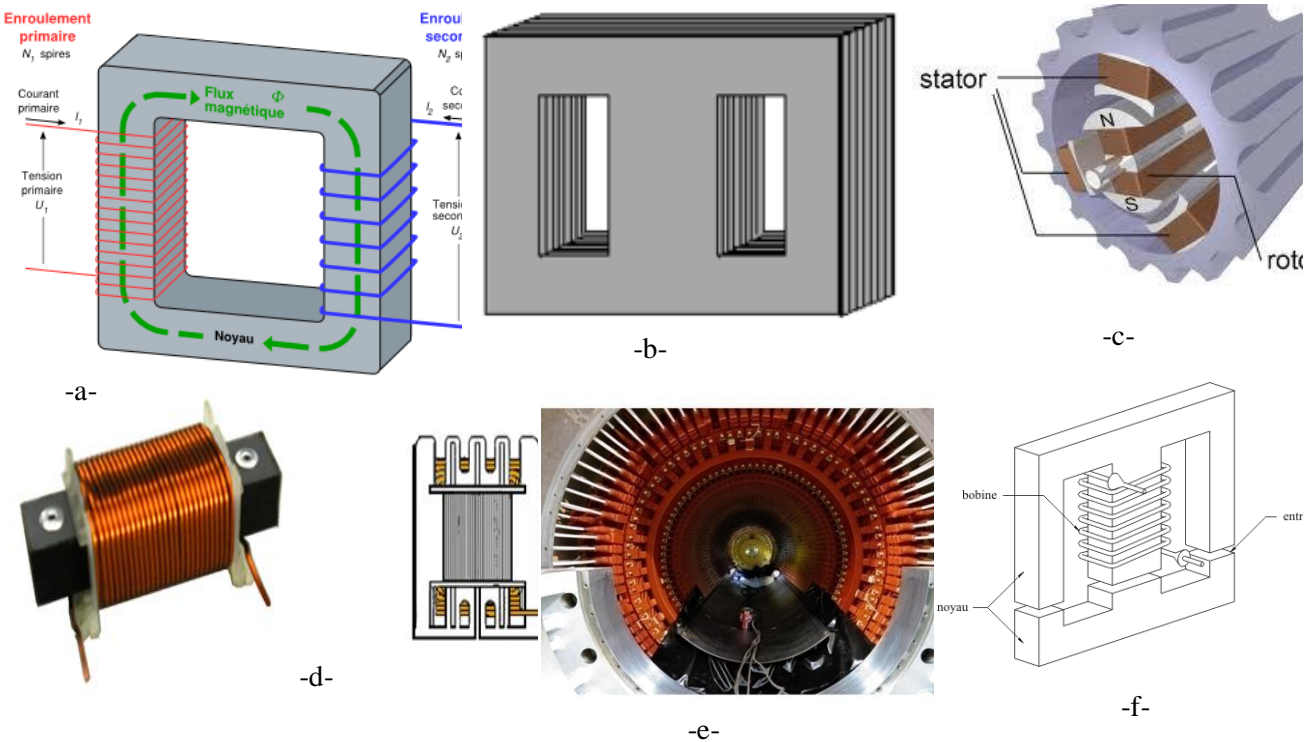


Fig 1 : exemples des circuits magnétiques

II. Electromagnétisme, matériaux et relations fondamentales :

II.1 champ magnétique :

On appelle champ d'excitation magnétique \vec{H} toute région de l'espace ou, soit une aiguille aimantée, soit un circuit fermé parcouru par un courant électrique est soumis à une force magnétique. Il s'agit donc du 3^{ème} type de champ après le champ de gravitation et le champ électrique.

➤ Orientation des vecteurs en fonction du sens du courant (règle de la main droite) :

Sur la figure 2-b est représenté le champ magnétique créé dans un solénoïde par la circulation du courant i .

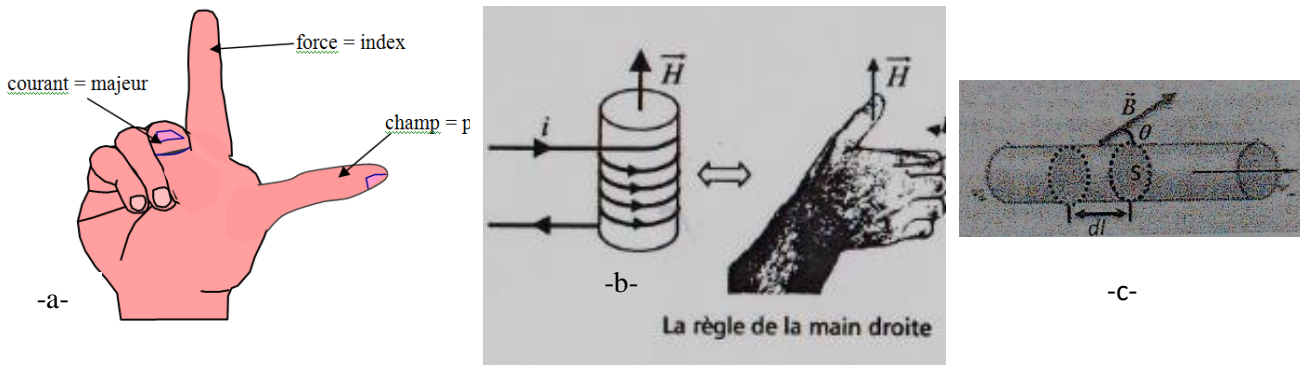


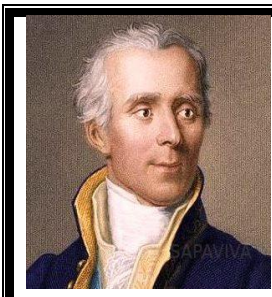
Fig.2: Règle de la main droite

La direction du champ créé correspond à la direction donnée par le pouce de la main droite, lorsque les autres doigts s'enroulent autour du solénoïde dans le sens du courant. Cette convention mise en évidence sur l'exemple du solénoïde est également valable pour n'importe quelle boucle d'un élément conducteur parcouru par un courant.

➤ Action d'un champ magnétique sur un courant électrique :

Soit un conducteur cylindrique parcouru par un courant I et placé dans un champ magnétique B formant un angle θ avec la direction du courant électrique (figure 2-c). Sur un élément dl s'applique une force de LAPLACE :

$$d\vec{F} = I \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B}$$



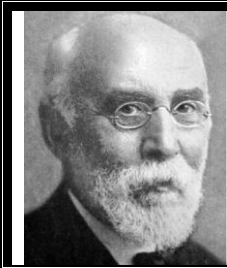
Pierre-Simon Laplace (1749 - 1827), est un mathématicien, astronome, physicien et homme politique français, il a apporté des contributions fondamentales dans différents champs des mathématiques, de l'astronomie et de la théorie des probabilités. Il a contribué de façon décisive à l'émergence de l'astronomie mathématique, reprenant et étendant le travail de ses prédécesseurs dans son *Traité de Mécanique céleste* (1799-1825). Cet ouvrage, a transformé l'approche géométrique de la mécanique développée par Newton en une approche fondée sur l'analyse mathématique.

Remarques :

- ❖ Le champ magnétique ou l'excitation magnétique a pour unité l'**Ampère par mètre (A/m)**.
- ❖ Certains corps naturels (l'oxyde de fer Fe_2O_3 par exemple) ont la propriété de créer naturellement dans leur voisinage un champ magnétique.

➤ **Lien induction - mouvement (loi de Lorentz) :**

La force \vec{F} s'exerçant sur une charge électrique q se déplaçant à la vitesse \vec{v} dans un champ d'induction magnétique \vec{B} s'exprime par : $\vec{F} = q.(\vec{v} \wedge \vec{B})$



Hendrik Antoon Lorentz : (1853 - 1928) est un physicien néerlandais qui s'est illustré par ses travaux théoriques sur la nature de la lumière et la constitution de la matière. Il est co-lauréat avec Pieter Zeeman du prix Nobel de physique de 1902

II-2 Phénomènes d'excitation, d'aimantation et premières grandeurs :

De façon assez simple, on définit l'excitation comme la mise en présence d'un corps à un champ magnétique et l'aimantation comme une polarisation magnétique du corps exposé.

En exposant un corps homogène à un **champ magnétique** \vec{H} créé par la circulation d'un courant i dans un bobinage d'excitation, il se crée une **aimantation** caractérisée de façon théorique par un vecteur \vec{J} colinéaire au champ \vec{H} qui l'a créé.

La polarisation magnétique du matériau est caractérisée par le vecteur d'induction magnétique \vec{B} , résultant de l'aimantation du vide ($\vec{B}_{vide} = \mu_0 \vec{H}$) ajoutée à celle de la matière considérée. On écrit alors : $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J})$

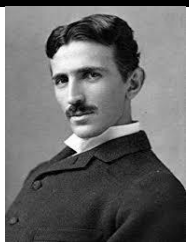
\vec{J} étant colinéaire à \vec{H} il est possible d'écrire : $\vec{J} = \chi \vec{H}$ (ou χ est appelée susceptibilité magnétique). On retiendra ainsi la formulation générale du vecteur induction :

$$\vec{B} = \mu_0(1 + \chi) \cdot \vec{H} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H}$$

Les grandeurs μ_0 et μ_r sont appelées respectivement : perméabilité du vide ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$) et perméabilité relative. Pour simplifier on appellera **perméabilité** μ le produit $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$. (μ a pour unité **Henry/mètre**)

\vec{B} : Induction magnétique (densité de flux magnétique), a pour unité **tesla [T]**

Remarque: On parle de matériau linéaire, ou d'utilisation linéaire dès lors qu'on peut considérer la perméabilité $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ comme constante.



Nikola Tesla (1856 -1943) est un inventeur et ingénieur américain d'origine serbe. Il est notamment connu pour son rôle prépondérant dans le développement et l'adoption du courant alternatif pour le transport et la distribution de l'électricité. Ses travaux les plus connus portent sur l'énergie électrique. Il a mis au point les premiers alternateurs permettant la naissance des réseaux électriques de distribution en courant alternatif, dont il est l'un des pionniers.

II.3 Classification des matériaux magnétiques :

La classification des matériaux magnétisme se base sur le signe et la valeur de la susceptibilité magnétique χ

Types de matériaux	Matériaux Paramagnétiques	Matériaux Diamagnétiques	Matériaux Ferrimagnétique	Matériaux Ferromagnétique
Valeurs de χ	$\chi > 0$ de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-7}	$\chi < 0$ de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-6}	$\chi > 0$ de l'ordre de 10^3	$\chi > 0$ de l'ordre de 10^4 à 10^6
Commentaire	Ils sont rares et leurs aimantation est quasiment négligeable.	Ils sont très abondants et leurs aimantation est quasiment négligeable. Ils forment la masse des matériaux qu'on appellera non magnétique comme le bois, le plastique, etc.....	Dits Ferrites , ils sont utilisés, malgré leur faible aimantation, en raison de leur résistivité vis-à-vis des courant de Foucault. Ils sont prépondérants dans les applications hautes fréquences et l'électronique de puissance	Les matériaux Ferromagnétique (Fe, Ni, Co) sont à la base d'un grand nombre d'appareillages en électrotechnique. On y retrouve le mot « fer », matériau le plus utilisé dans la construction des machines électriques, inductances, transformateurs, etc..... Cette matière développe une aimantation importante, mais, et ce sera une de ses caractéristiques, limitée (on parlera de saturation)
Exemples	aluminium, platine, manganèse, sodium	zinc, or, argent, silicium, plomb, alumine	Fe ₃ O ₄ , Fe ₂ O ₃ CoO	fer, cobalt, nickel et leurs alliages

Tab 1 : Classification des matériaux magnétiques

II.4 Les Matériaux ferromagnétiques :

Les matériaux ferromagnétiques sont des alliages de fer de nickel ou de cobalt. Ils ont la propriété du champ magnétique qui est beaucoup plus fort dans le matériau que dans l'air (On dit qu'un matériau ferromagnétique **canalise les lignes de champs (figure 3)**)

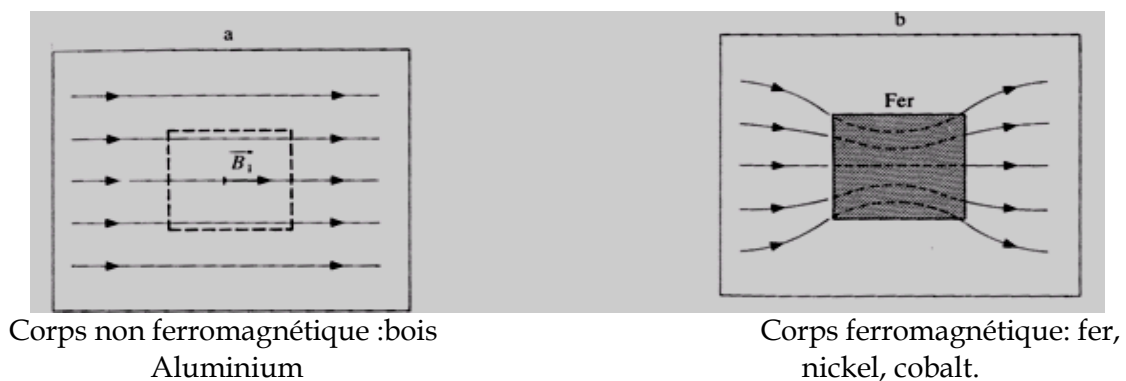


Fig 3: Lignes du champ magnétique

➤ **Remarque :**

Dans le cas d'un matériau ferromagnétique : Les fuites magnétiques sont réduites.

II.4.1 Métaux ferromagnétiques doux et durs :

On classe les matériaux ferromagnétiques en deux types bien distincts : matériaux doux et matériaux durs (appelés aimants permanents).

- ❖ **Matériaux doux :** Ce sont des métaux et alliages qui s'aimantent et se désaimantent facilement. Ils sont utilisés en général pour leur comportement quasi linéaire, c'est-à-dire en supposant que la courbe $B(H)$ revient à la droite $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \Rightarrow B = \mu \cdot H$.
- ❖ **Matériaux durs :** Ce sont des métaux et alliages destinés à produire une aimantation permanente. La technique de réalisation de ces matériaux rendent très difficile la désaimantation. Ils sont utilisés principalement pour la production d'induction. En conséquence ils sont insérés dans des circuits magnétiques pour lesquels ils se comportent comme le générateur d'induction, au même titre qu'on trouve des générateurs de tension dans les circuits électriques.

II.4.2 Applications technologiques des matériaux ferromagnétiques :

- ❖ Échange d'énergie entre deux enroulements électriques : transformateur
- ❖ Electroaimants (contacteurs, relais, vibreurs, levage)
- ❖ Mouvement : rotation dans la machine à courant continu ou dans les appareils de mesure à cadre mobile
- ❖ Champ tournant : machine asynchrone, machine synchrone, moteur pas à pas

III Notions incontournable et théorème d'ampère :

Dans la grande majorité des cas, l'aimantation des matériaux sera réalisée à partir d'un bobinage exciteur, c'est-à-dire par un courant électrique, la figure 4 présente ainsi, en tant que résumé, le cheminement classique depuis un courant d'excitation jusqu'à la production d'un flux

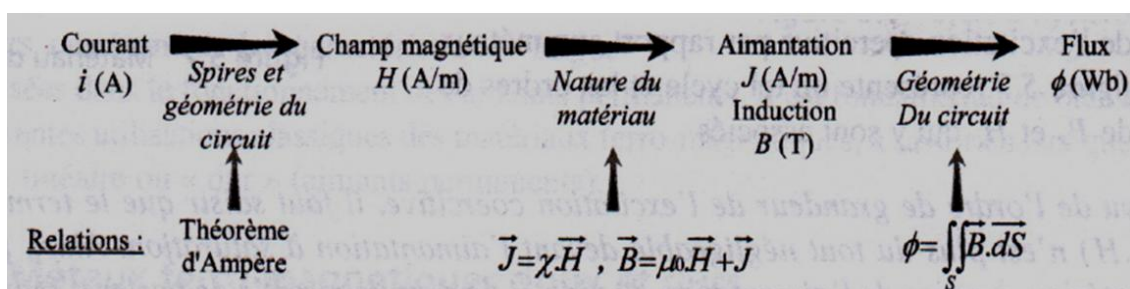


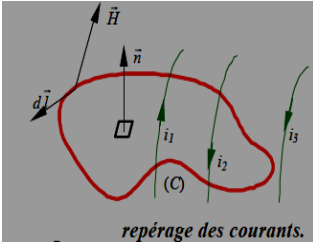
Fig 4 : Cheminement depuis un courant d'excitation jusqu'à la production d'un flux

III.1 Les ampères-tours ou force magnétomotrice :

Créer une aimantation à partir d'un bobinage de N spires traversé par un courant I fait toujours intervenir le produit $F = N \cdot I$ communément appelé « ampères-tours » ou plus élégamment « **force magnétomotrice** » et il est important de comprendre que la force de l'aimantation imposé par un bobinage réside dans le produit $F = N \cdot I$.

III.2 Le théorème d'ampère et son application à l'électrotechnique :

La circulation du vecteur champ d'excitation magnétique \vec{H} le long d'un contour fermé (C) orienté par sa normale est la somme algébrique des courants traversant la surface s'appuyant sur le contour (C).



$$\oint_{(C)} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_j \alpha_j i_j \quad \begin{cases} \alpha_j = +1 \text{ si le courant } i_j \text{ est dans le sens de la normale } \vec{n}. \\ \alpha_j = -1 \text{ si le courant } i_j \text{ est dans le sens contraire de la normale } \vec{n}. \\ \alpha_j = 0 \text{ si la surface n'est pas traversée par le courant } i_j. \end{cases}$$

Fig 5:principe du théorème d'Ampère

Il est ainsi intéressant de retenir la relation simplifiée, adaptée aux géométries simples sur lesquelles toutes les hypothèses précédentes sont valables : $\sum H.L = N.I$

Où:

- L : longueur moyenne des lignes de champs (m) N : nombre de spires de la bobine
- I : courant dans la bobine (A) H : excitation magnétique (A/m).

Exemples :

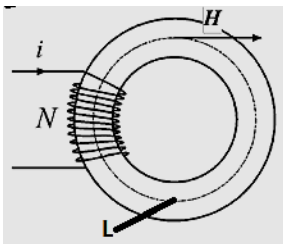


Fig 6 : Tore sans entrefer

D'après le théorème d'Ampère :

$$H.L = N.I$$

- ✓ L : longueur moyenne des lignes de champ (m).
- ✓ N : nombre de spires de la bobine.
- ✓ I ; courant dans la bobine (A)
- ✓ H : excitation magnétique (A/m).

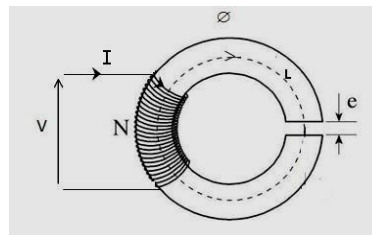


Fig 7 : Tore avec entrefer

D'après le théorème d'Ampère :

Dans la matière : $H.(L-e) = N.I$
 Dans l'entrefer : $H_0.e = N.I$

- ✓ L : longueur moyenne des lignes de champ (m).
- ✓ e : longueur de l'entrefer.
- ✓ N : nombre de spires de la bobine.
- ✓ I ; courant dans la bobine (A).
- ✓ H : excitation magnétique dans la matière (A/m).
- ✓ H₀ : excitation magnétique dans la l'entrefer (A/m).

III.3 Energie magnétique :

On définit ainsi la densité d'énergie magnétique stockée (J/m³) : $W_m = \frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H}$

Dans le cas d'un matériau linéaire et homogène cette expression devient : $W_m = \frac{1}{2\mu_0\mu_r} B^2$

- ❖ On constate que plus la perméabilité relative est grande moins le matériau est apte à stoker de l'énergie.
- ❖ Si l'on souhaite emmagasiner de l'énergie dans un circuit magnétique il est impératif de pratiquer un entrefer : c'est là qu'elle est localisée (c'est le cas dans les machines tournantes).
- ❖ Un transformateur n'accumule pas d'énergie, son circuit magnétique n'en comporte pas.

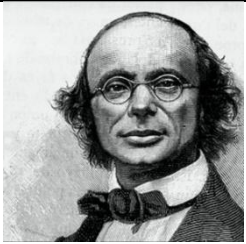
III.4 Flux magnétique :

Le flux magnétique se calcul en faisant le produit de l'induction magnétique par la surface du noyau (perpendiculaire aux lignes de forces ou au vecteur "B"). $\Phi = \mathbf{B} \times \mathbf{S}$

B: Induction magnétique (densité de flux), en teslas [T]

S : Surface, en mètres carrés [m²]

Φ : Flux traversant la surface, en weber [Wb]

	<p>Wilhelm Eduard Weber (1804 - 1891) est un physicien allemand. On lui doit une théorie originale de l'interaction électromagnétique. l'unité du flux magnétique porte son nom : le weber. Weber a publié de 1846 à 1856 d'importantes recherches sur la détermination des forces électrodynamiques. Il a proposé dans le cadre de ce travail une loi qui suggérera par la suite à Zöllner une alternative à la loi d'attraction universelle de Newton.</p>
---	---

III.5 Réluctance magnétique (\mathfrak{R}):

Dans un circuit magnétique, l'opposition au passage des lignes de force est appelée **réluctance**. La réluctance permet de quantifier une propriété physique : l'aptitude d'un circuit magnétique à s'opposer à sa pénétration par un champ magnétique. Cette grandeur a été créée par analogie avec la notion de **résistance**. L'inverse de la réluctance est appelée perméance magnétique, mais ce terme et cette notion sont assez peu utilisés.

➤ **Calcul du \mathfrak{R} :**

Pour un circuit **magnétique homogène**, (figure 8) c'est-à-dire constitué d'un seul matériau et de section homogène, il existe une relation permettant de calculer sa réluctance en fonction du matériau qui le constitue et de ses dimensions :

$$\mathfrak{R} = \frac{L}{\mu \times S} \quad \text{en } \mathbf{H}^{-1}$$

- μ : étant la perméabilité magnétique ($\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$) en (Henry/mètre).
- L: la longueur (en mètres m).
- S: la section en (m²).

➤ **Réluctance équivalente d'un entrefer:**

La réluctance d'un entrefer de **faible épaisseur** est donnée par :

$$\mathfrak{R} = \frac{e}{\mu_0 \times S} \quad \text{en } \mathbf{H}^{-1}$$

Avec :

e: épaisseur de l'entrefer, μ_0 :perméabilité du vide, S:section de l'entrefer

➤ **Remarque :**

Créer un entrefer dans un circuit magnétique augmente la réluctance de ce circuit.

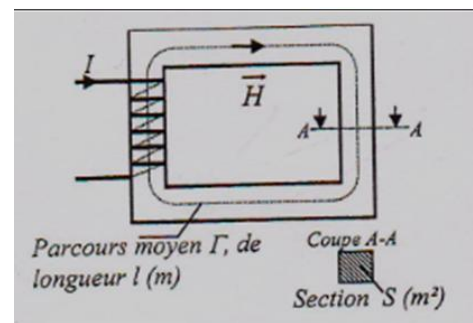



Fig 8 : circuit magnétique homogène

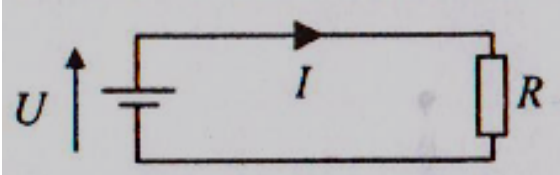
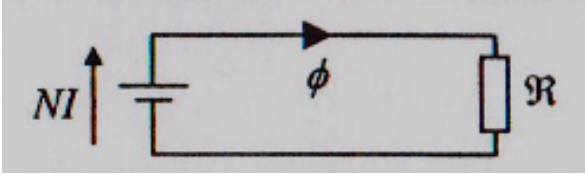
III.5 Loi d’Hopkinson:

En combinant la force magnétomotrice à la réluctance, on obtient alors la relation d’Hopkinson :

$$F = N.I = \mathfrak{R}.\phi$$

	<p>John Hopkinson (1849 -1898) physicien anglais. Il est devenu célèbre grâce à ses travaux sur les applications de l'électricité et du magnétisme sur des sujets tels que les dynamos et les électroaimants. Il est également le découvreur de l'effet Hopkinson.</p> <p>L'équivalent magnétique de la loi d'Ohm porte son nom : Formule de Hopkinson.</p>
---	--

III-6 Analogie circuits magnétiques / circuits électriques:

Circuits électriques	Circuits magnétiques
 <p>Fig 9 : circuit électrique</p>	 <p>Fig 10 : circuit magnétique</p>
<p>U : force électromotrice (V)</p>	<p>$F = N.I$: force magnétomotrice (A.t)</p>
<p>R : résistance (Ω)</p> <p>Avec : $R = \frac{\rho.l}{S}$</p> <p>ρ : étant la résistivité en (Ωm).</p> <p>L: la longueur d’un fil conducteur (m).</p> <p>S: la section du câble électrique en (m^2).</p>	<p>\mathfrak{R} : réluctance (H^{-1})</p> <p>Avec : $\mathfrak{R} = \frac{L}{\mu \times S}$ en H^{-1}</p> <p>μ : étant la perméabilité magnétique ($\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$) en (Henry/mètre).</p> <p>L: la longueur moyenne du circuit magnétique (m).</p> <p>S: la section du circuit magnétique en (m^2).</p>
<p>$G = \frac{1}{R}$: conductance</p>	<p>$p = \frac{1}{\mathfrak{R}}$: perméance</p>
<p>I : le courant électrique (A)</p>	<p>ϕ : flux magnétique (Wb) = B.S</p>
<p>Densité de courant J</p>	<p>Induction magnétique B</p>
<p>La loi d’Ohm : $U = R.I$</p>	<p>La loi d’Hopkinson: $F = N.I = \mathfrak{R}.\phi$</p>
<p>Association des résistances :</p> <p>Série : $R_{eq} = R1+R2+R3+.....$</p> <p>Parallèle : $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} +$</p>	<p>Association des réluctances :</p> <p>Série : $\mathfrak{R}_{eq} = \mathfrak{R1} + \mathfrak{R2} + \mathfrak{R3} +$</p> <p>Parallèle : $\frac{1}{\mathfrak{R}_{eq}} = \frac{1}{\mathfrak{R1}} + \frac{1}{\mathfrak{R2}} + \frac{1}{\mathfrak{R3}} +$</p>

Exemple :

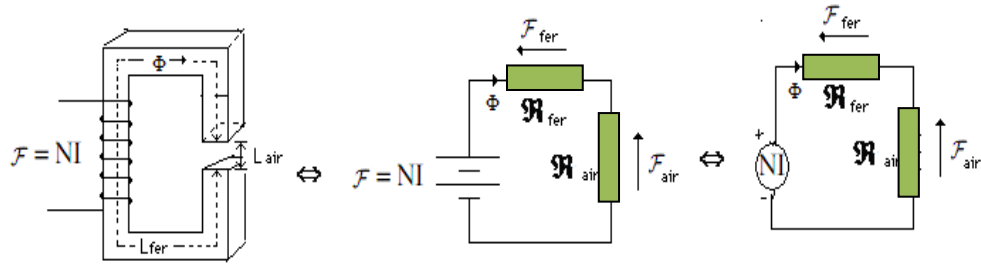


Fig 11 : Exemple de comparaison

III.7 Circuits magnétiques hétérogènes linéaires:

Un circuit est dit hétérogène dès lors qu’il est constitué de matériaux différents ou de géométries à section variables. La méthode d’étude consiste alors, comme dans un circuit électrique, à utiliser les associations connues des réluctances afin de calculer les différentes grandeurs recherchées

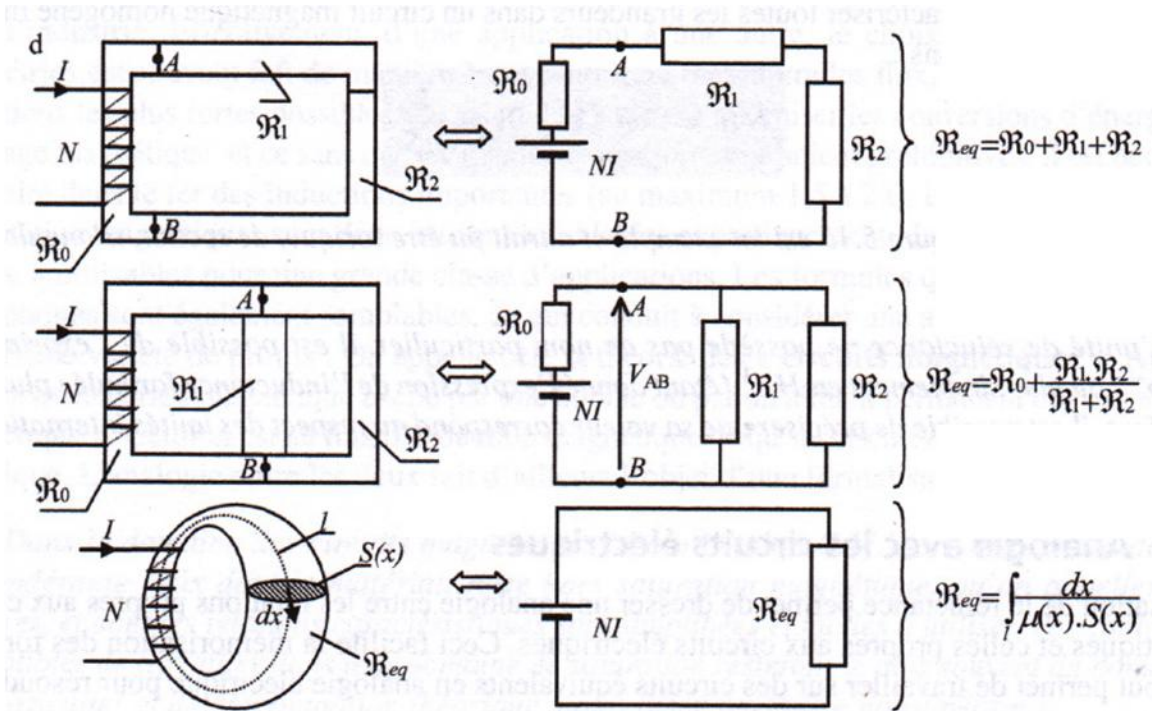


Fig 12 : Circuits magnétiques série, parallèles et hétérogènes.

IV. Circuits magnétiques en régime alternatif sinusoïdal :

IV.1 Lien du flux magnétique à la tension (loi de Faraday) :

Le phénomène liant la tension aux bornes d’une spire au flux la baignant est traduit :

- ❖ Sur le plan qualitatif (expression de l’opposition) par la loi de Lenz ;
- ❖ Sur le plan quantitatif par la loi de Faraday.

Une spire ouverte baignée par le flux $\Phi(t)$ voit apparaître à ses bornes une force électromotrice (fem) s'exprimant en **convention générateur** par :

$$e(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

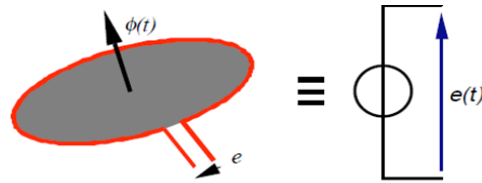


Fig 13 : Spire inductive

	<p>Michael Faraday (1791 - 1867) est un physicien et un chimiste britannique, connu pour ses travaux fondamentaux dans le domaine de l'électromagnétisme, l'électrochimie, le diamagnétisme, et l'électrolyse. Il donne son nom à de multiples lois et phénomènes dans ces domaines, notamment la loi de Faraday (ou Lenz-Faraday) en induction électromagnétique, les lois de Faraday en électrochimie, l'effet Faraday, ou encore à des dispositifs expérimentaux comme la cage de Faraday et la cavité de Faraday. Le farad, unité de capacité électrique.</p>
--	--

IV.2 Notions de flux total intercepté et inductance :

IV.2.1 Flux intercepté :

Dés lors qu'un bobinage de N spires aimante un matériau, ses N spires sont traversés par le flux ϕ créé au sein du matériau. On dit que le bobinage **intercepte** le flux dit total : $\phi_T = N.\phi$

Cette notion du flux total est liée en réalité à la mise en série de N spires de la bobine, chaque spire étant le siège de la force électromotrice : $\frac{d\phi}{dt}$

La figure 14 représente un étalement des spires du bobinage Ainsi que la force électromotrice totalisée aux bornes du bobinage.

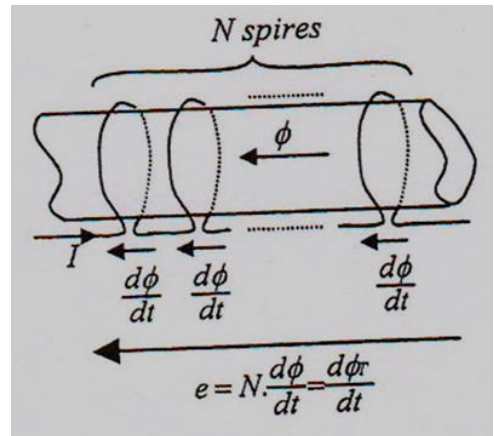


Fig 14 : Flux total intercepté

IV.2.2 Inductance :

En régime linéaire, ce flux est proportionnel au courant dans la bobine. Le facteur de proportionnalité entre ces deux grandeur s'appelle **l'inductance** ou encore **coefficient d'auto-induction**. $\phi_T = L.I$

Cette grandeur est le lien direct entre les grandeurs magnétiques d'un matériau aimanté et les grandeurs électriques du bobinage qui crée le flux.

On écrit alors le flux total $\phi_T = N.\phi = N.\frac{N.I}{\mathfrak{R}} = L.I$.La grandeur L est l'inductance du circuit

magnétique bobiné, son unité est le Henry (H), elle s'écrit $L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}}$

➤ **Remarque :**

L'inductance que représente un circuit magnétique avec entrefer est inférieure à l'inductance du

même circuit sans entrefer. $L_{\text{avec entrefer}} = \frac{N^2}{(\mathfrak{R}_e + \mathfrak{R}_f)} < L_{\text{sans entrefer}} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_f}$

IV.2.3 Flux de fuite:

Dans les circuits magnétiques industriels, les lignes de champ ne restent pas toutes canalisées à l'intérieur du circuit désigné. Par exemple, dans la Figure 13, une partie des lignes passe en dehors du noyau de fer et de l'entrefer.

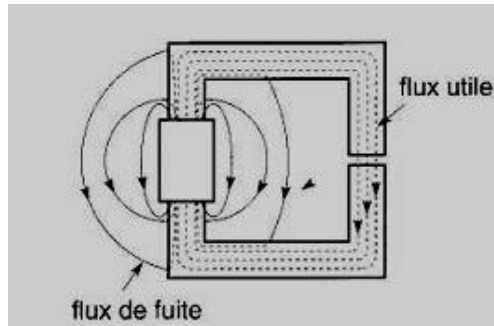


Fig 15 : Fuite dans un circuit magnétique

IV.3 Relation importantes en régimes alternatifs :

IV.3.1 Lois de Lenz :

La loi de Lenz stipule que chaque enroulement du bobinage (figure 14) est le siège d'une force électromotrice due à la nature variable des grandeurs $e(t) = \frac{d\phi_T(t)}{dt}$. La force électromotrice

totalisée aux bornes du bobinage correspond à la tension notée $v(t)$ avec : $v(t) = N \cdot \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{d\phi_T(t)}{dt}$



Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804- 1865) est un physicien allemand. Son nom est resté attaché à la loi sur l'interaction courant électrique - champ magnétique. Il observe en 1833 l'augmentation de la résistance des métaux avec la température et étudie l'effet Peltier.

IV.3.2 Formule générale « courant : tension » d'une inductance :

D'après la loi de Lenz $v(t) = \frac{d\phi_T(t)}{dt}$ et l'expression du flux total intercepté par le bobinage

$\phi_T = L \cdot i(t)$, il est possible de construire la formule générale reliant uniquement les grandeurs

électriques de la bobine : $v(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$

IV.3.3 Formule de BOUCHEROT :

On suppose que l'expression de la tension sinusoïdale $v(t) = V \sqrt{2} \cos(\omega t)$ et d'après la loi de Lenz $v(t) = N \cdot \frac{d\phi(t)}{dt}$. Ainsi en intégrant cette égalité, l'expression du flux dans le circuit magnétique

s'écrit : $\phi(t) = \frac{V\sqrt{2}}{N\omega} \sin(\omega t)$ et comme $\phi(t) = B(t) \cdot S$ alors $B(t) = \frac{V\sqrt{2}}{S \cdot N \cdot \omega} \sin(\omega t)$, on relève la valeur maximal $B_{\max} = \frac{V\sqrt{2}}{S \cdot N \cdot 2\pi \cdot f} \Rightarrow V = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N \cdot B_{\max} \cdot S \cdot f \Rightarrow$

la formule de BOUCHEROT $V = 4,44 \cdot N \cdot B_{\max} \cdot S \cdot f$

Cette formule est très utilisée pour le dimensionnement des grandeurs globales du circuit magnétique, ainsi pour comprendre l'effet de la fréquence sur les dimensions des appareillages basés sur le magnétisme.

Par ailleurs, c'est toujours en régime variable, et en particulier en régime alternatif sinusoïdal, qu'on s'intéresse au couplage entre plusieurs bobinages qui partagent des flux. Sans explication détaillée, la figure 14 fait apparaître de façon synthétique les relations générales qui lient les tensions aux courants dans le cas d'un bobinage seul (inductance propre) et dans le cas de deux bobinages couplés (inductance mutuelle).

IV.3.4 Couplage entre bobines :

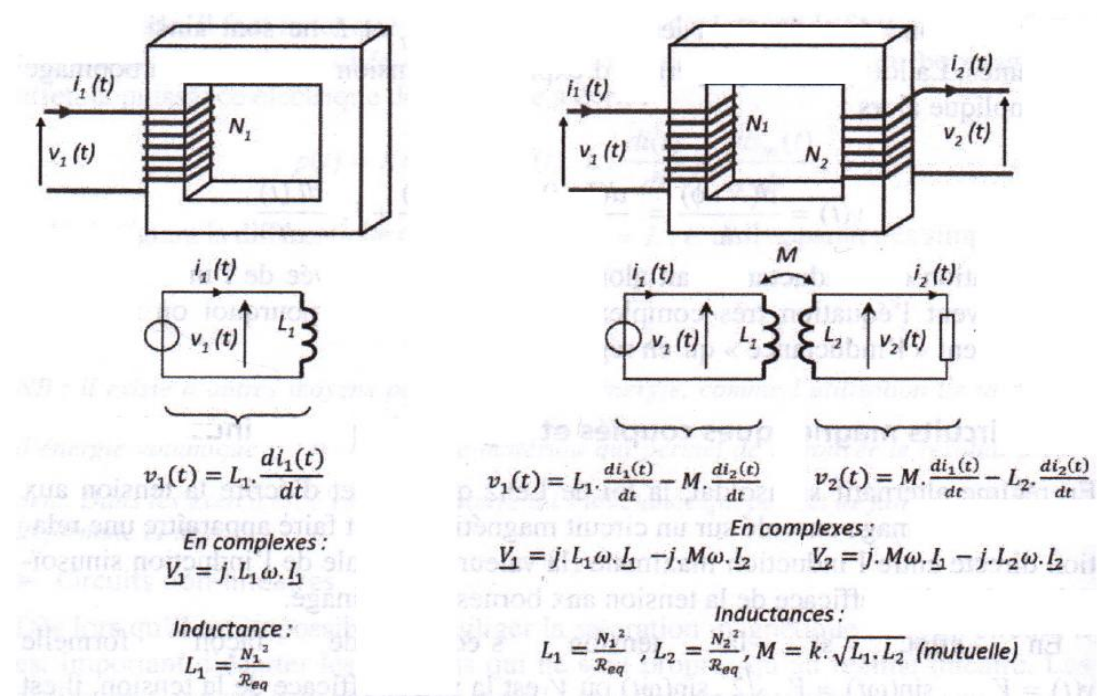


Figure 16 : relations fondamentales sur les couplages en alternatif sinusoïdal

Lorsqu'un couplage existe entre deux bobinages, l'intégralité du flux produit par un des deux bobinages ne traverse jamais tout à fait le second. Parfois le flux partagé est minoritaire par rapport aux flux propre. Pour quantifier clairement ces considérations, une grandeur est communément utilisée : **le facteur de couplage k**. Il représente la proportion du flux générée par un inducteur qui traverse une bobine « induit ». De façon simple, ce coefficient s'applique directement à la mutuelle inductance qui s'écrit alors :

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad \text{avec } k \in [0,1]$$

IV.4 Notions d'inductance : mutuelle, fuite et magnétisante :

IV.4.1 Inductance mutuelle :

Dés lors qu'un circuit magnétique est entouré de plusieurs bobinages, chacun des courants a une influence sur les flux mutuels présents dans le circuit. Ainsi une variation de courant dans un des bobinages induit une variation de tension aux bornes des autres. On parle alors d'inductance mutuelle dans le sens où chaque courant induit un flux dans un autre enroulement que le sien. La figure 17 représente le cas simple d'un matériau magnétique linéaire homogène sur lequel sont enroulés deux bobinages.

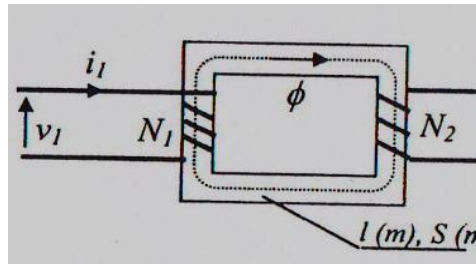


Fig 17 : inductance mutuelle entre deux bobinages

Pour calculer l'inductance mutuelle entre le bobinage 1 et 2, il suffit d'exprimer la valeur du flux créé par le courant i_1 traversant le bobinage 2 : $\phi_{1/2} = \frac{N_1 \cdot i_1}{\mathfrak{R}}$. Ensuite écrire l'expression du flux total intercepté par les N_2 spires du bobinage 2. Par analogie avec le coefficient d'auto-inductance, on identifie ce flux total à une grandeur proportionnelle au courant i_1 : $N_2 \cdot \phi_{1/2} = M \cdot i_1$

Le terme **M** représente l'**inductance mutuelle** (en Henry) qui relie ces deux bobinages. Dans ce cas simple on en déduit $M = \frac{N_1 \cdot N_2}{\mathfrak{R}}$ (mais cette formule n'est valable que pour un circuit à une seule maille).

IV.4.2 Inductance de fuite et inductance magnétisante :

En faisant l'hypothèse comme quoi le flux de fuite ϕ_f reste intercepté par les N spires du bobinage (figure 13) et que son trajet correspond à une réluctance donnée \mathfrak{R}_f la tension aux bornes du bobinage s'écrit

$$v(t) = N \cdot \frac{d\phi}{dt} = N \cdot \frac{d\phi_m + d\phi_f}{dt} = N \frac{d}{dt} \left(\frac{N \cdot i}{\mathfrak{R}} + \frac{N \cdot i}{\mathfrak{R}_f} \right) = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \frac{di}{dt} + \frac{N^2}{\mathfrak{R}_f} \frac{di}{dt} \Rightarrow v(t) = L_m \cdot \frac{di}{dt} + L_f \cdot \frac{di}{dt}$$

Cette écriture revient au fait de considérer les fuites magnétiques comme équivalentes à la présence de l'inductance **L_f** (**inductance de fuite**) placée en série avec l'inductance du circuit sans fuite **L_m** (**inductance magnétisante**) qui représente la proportionnalité entre le flux créé dans le circuit magnétique et le courant magnétisant i .

IV.5 Cycle d'Hystérésis :

Lorsqu'un matériau ferromagnétique est excité par un champ magnétique alternatif (par utilisation d'un courant d'excitation alternatif), la courbe d'aimantation $B(H)$ décrit le cycle d'Hystérésis représenté sur la figure 18

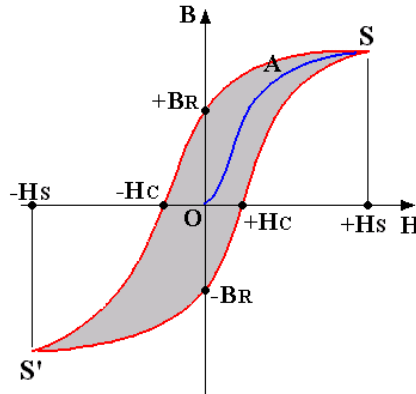


Fig 18 : cycle d'Hystérésis

Lorsque i passe de 0 à $+i_{\max}$ (c'est-à-dire H passe de 0 à $+H_{\max}$), c'est la courbe de première aimantation, B passe de 0 à $+B_{\max}$. Quand i revient de $+i_{\max}$ à 0 (c'est-à-dire H revient de $+H_{\max}$ à 0) le retour ne se fait pas par le même chemin que l'aller. Si bien que pour $H=0$, l'induction B_r rémanente n'est pas nulle : le morceau de fer est devenu un aimant permanent. B_r étant proportionnelle à B_{\max} (et à H_{\max} ou i_{\max} s'il n'y a pas saturation), Pour annuler B_r , il faut imposer un champ négatif H_c (champ coercitif). Finalement lorsque i oscille entre $+i_{\max}$ et $-i_{\max}$, $B(H)$ décrit un **cycle d'hystérésis** : chemins différents à l'aller et au retour.

➤ **Remarque :**

Un matériau magnétique présente un retard à l'aimantation et un retard la désaimantation d'où le phénomène hystérésis (hystérésis = retard en grec).

IV.6 Pertes liées aux matériaux réels :

Lorsqu'un matériau est aimanté et désaimanté de façon périodique, et c'est ce qui passe dans un fonctionnement en alternatif, il devient le siège des pertes particulières.

IV.6.1 Pertes par hystérésis :

La présence de l'hystérésis engendre une dissipation de puissance active dont la valeur est proportionnelle à la surface de l'hystérésis. Ce sont des pertes magnétiques = **Pertes par hystérésis** = P_H . Dans le cas où le phénomène est périodique les pertes sont calculées par la formule de Steinmetz :

$$PH = KH.V.f.(B_{\max})^n$$

Avec le coefficient K déterminé expérimentalement ; V = volume de fer en m^3 ; $n = 2$ pour des tôles (figure 1-b) et = 1.6 (figure 1-a) pour un matériau massif.

➤ **Remarque :**

Afin de minimiser ce type des pertes en utilisant des matériaux à cycles étroits, comme le fer au silicium

IV.6.2 Pertes par courants de Foucault :

Le matériau magnétique étant conducteur électrique, le bobinage induit des courants très faibles au sein du matériau qu'on appelle "courants de Foucault" qui provoquent l'échauffement du circuit magnétique (Ils sont une conséquence de l'induction électromagnétique).

Ces pertes sont calculées par la formule: $P_{CF} = K_{CF} \cdot V \cdot f^2 \cdot (B_{max})^2$ Avec le coefficient K_{CF} déterminé expérimentalement ; V = volume de fer en m^3

➤ **Remarque :**

Afin de minimiser ce type des pertes en utilisant des circuits magnétiques feuilletés.

IV.6.3 Pertes fer (pertes dans le circuit magnétique) :

Le matériau réel du circuit magnétique, lors de son utilisation, est la source de pertes dans la masse métallique qu'on appelle "pertes fer". On montre alors que : Pertes Fer = Pertes par hystérésis + Pertes par courants de Foucault :

$$P_f = P_H + P_{CF}$$

➤ **Remarque :**

On montre que les pertes fer sont proportionnelles au carré de la tension appliquée à l'inductance magnétisante. On peut donc représenter ces pertes par une résistance, notée R_f placée en parallèle sur cette tension (figure 19).

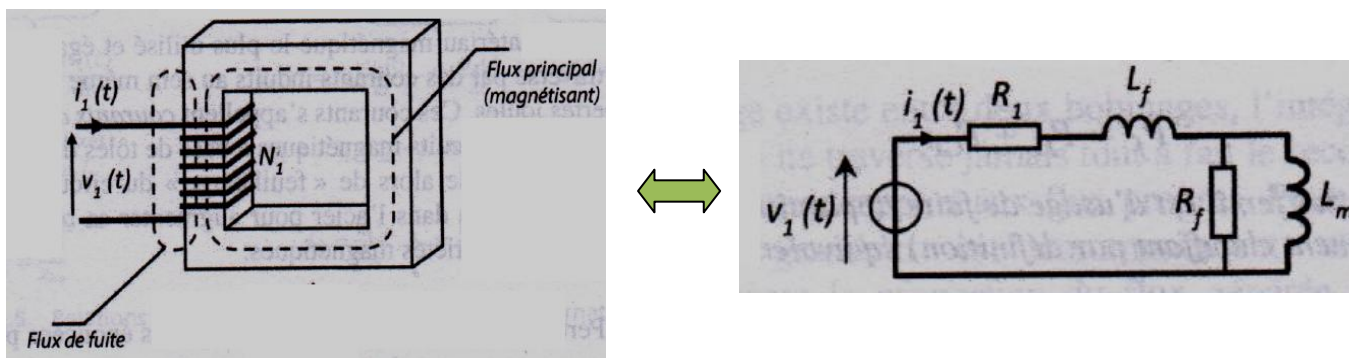


Figure 19 : schéma équivalent d'un circuit magnétique en régime sinusoïdal.

IV.6.4 Pertes Joule:

Aux pertes fer s'ajoutent pour une machine électrique des pertes par effet Joule dues aux courants électriques dans les enroulements i . Elles sont facilement calculables si on connaît la résistance des enroulements R (généralement en cuivre). On peut aussi les mesurer lors de l'essai de la machine en court-circuit. Ces pertes sont calculées par la formule: $P_J = R \cdot i^2$

➤ **Remarque :**

Afin de minimiser ce type des pertes il faut surtout éviter l'échauffement de la machine et ceci par ventilation.

CHAPITRE V

TRANSFORMATEURS



I. Introduction :

Le fait que l'énergie électrique, soit produite, transportée et utilisée principalement sous forme de tensions et courants alternatifs sinusoïdaux a des conséquences majeurs sur la physionomie des réseaux et des appareillages électrique. Une de ces conséquences liée à la nécessité de transporter l'énergie sous très haute tension (THT) est qu'il est nécessaire d'élever fortement les tensions produites par les alternateurs pour les transporter loin des centrales et de les abaisser ensuite au plus près des lieux de consommation.

Il apparait ainsi un besoin immense : celui de savoir passer facilement d'une valeur de tension sinusoïdale à une autre , de façon fiable, facile à réaliser et à entretenir, présentant une grande durée de vie et un très bon rendement. L'outil qui permet tout cela est le transformateur.



Le transformateur est un composant fondamental en électrotechnique, son étude constitue l'un des piliers de cette discipline. Rappelons que le transformateur industriel a été inventé par Lucien Gaulard et John-Dixon Gibbs en 1883 , et qu'il a eu un rôle décisif dans le développement de l'énergie électrique et plus particulièrement en courant alternatif.

Son essor fut immédiat, les puissances réalisées augmentèrent très rapidement (quelques 100 kVA en 1900 et quelques MVA en 1910).

Le transformateur permet de transférer de l'énergie (sous forme alternative) d'une source à une charge, tout en modifiant la valeur de la tension. La tension peut être soit augmentée ou abaissée selon l'utilisation voulue. Le changement d'un niveau de tension à un autre se fait par l'effet d'un champ magnétique

➤ Définitions :

- 1) Le transformateur est un appareil électromagnétique qui sert à transformer le courant alternatif avec certaines valeurs de tension ou de courant vers un courant alternatif avec d'autres valeurs de tension ou de courant mais à une fréquence constante. On trouve des transformateurs : monophasés ; triphasés ; de puissance ; de mesure et spéciaux.
- 2) Un transformateur est un convertisseur « alternatif-alternatif » qui permet de modifier la valeur d'une tension alternative en maintenant sa fréquence et sa forme inchangées. Le transformateur est un appareil qui peut :
 - ❖ Transformer une tension alternative d'une grandeur à une autre grandeur.
 - ❖ Transformer un courant alternatif d'une grandeur à une autre grandeur.
 - ❖ Isoler un circuit électrique d'un courant continu circulant dans un autre circuit électrique.
 - ❖ Faire paraître une impédance comme ayant une autre valeur.

- 3) Les transformateurs sont des machines électriques **entièrement statiques**, cette absence de mouvement est d'ailleurs à l'origine de leur excellent rendement. Leur utilisation est primordiale pour le transport de l'énergie électrique où l'on préfère « transporter des volts plutôt que des ampères ». Ils assurent l'élévation de tension entre la source (alternateurs) et le réseau de transport, puis ils permettent l'abaissement de la tension du réseau vers l'utilisateur.
- 4) Les contraintes liées à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'énergie électrique sont différentes. A partir de la production dans les centrales électriques, l'énergie est transportée :
- ❖ Par un réseau en très haute tension sous des tensions de 220 kV ou 400 kV ;
 - ❖ Puis la distribution se fait sous des tensions de 20 kV ;
 - ❖ Pour une utilisation finale en basse tension sur le réseau 220/380 V.

Toutes ces modifications de tension nécessitent l'utilisation de transformateurs éleveurs ou abaisseurs de tension qui fonctionnent en alternatif.

- 5) Les transformateurs ont pour fonction d'adapter une tension (réseau de distribution) à une autre (tension d'utilisation). Un transformateur est constitué d'un circuit magnétique feuilleté sur lequel sont bobinés les enroulements du primaire et les enroulements du secondaire. Des organes mécaniques assurent les fonctions de manutention, protection, support et refroidissement.

Parmi les applications des transformateurs, on note :

Electronique :

- a) alimentation à basse tension
- b) adaptation d'impédance

Electrotechnique :

- a) transformation de la tension pour le transport et la distribution d'électricité
- b) alimentation à basse tension (par exemple, lampes halogènes)

Mesure :

- a) transformateurs d'intensité de courant
 - b) transformateurs de potentiel Il y a deux types principaux de transformateurs, le type cuirassé et le type à colonnes.
- Dans le type cuirassé, on utilise un circuit magnétique à trois branches, et les enroulements sont autour de la branche centrale. Dans le type à colonnes, un circuit magnétique à deux colonnes est utilisé.

II. Transformateur Monophasé :

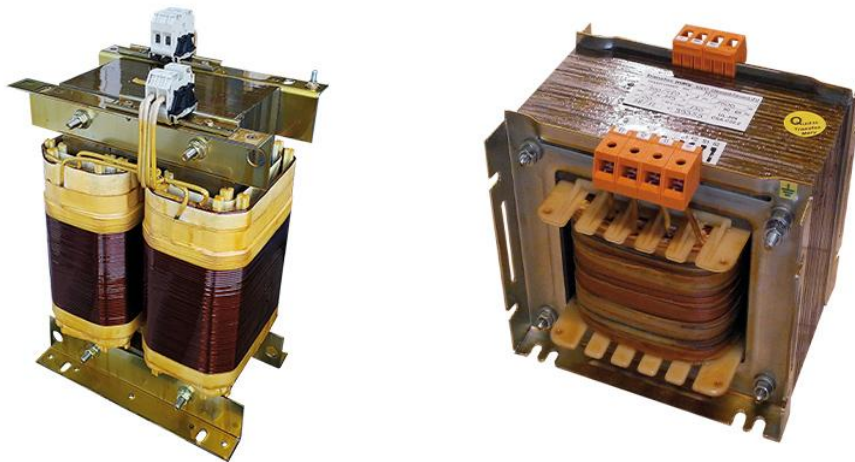


Fig 1 : Transformateur monophasé

II.1 Constitution :

Un transformateur monophasé est constitué de 2 bobines en fil de cuivre, l'une est dite "primaire", l'autre "secondaire". Ces bobines sont enroulées sur un noyau magnétique constitué d'un empilage de tôles minces en acier. Celui-ci permet de relier magnétiquement le primaire et le secondaire en canalisant les lignes de champ magnétiques produites par le primaire.

II.1.1 Le circuit magnétique:

Un transformateur monophasé comporte un circuit magnétique fermé, constitué par un empilage de tôles (en forme de E et de I), en matériaux **ferromagnétique** (alliages de fer de nickel ou de cobalt.), isolées entre elles par un vernis (**circuit magnétique feuilleté**) pour éviter des pertes d'énergie par circulation de courants de Foucault et limitant les pertes par hystérésis.

- **Remarque :** Les tôles ont une épaisseur entre 0,4 et 0,7 mm en fonction du soin qui est exigé par l'application.

II.1.2 Formes de circuits magnétiques:

Le circuit magnétique d'un transformateur permet de canaliser le flux magnétique Φ [Wb], Ce circuit peut avoir différentes formes:

- ❖ Soit à 2 colonnes (figure: 2) formées par un empilage de tôles décalées (couche 1 puis couche 2 et ainsi de suite).
- ❖ soit de forme cuirassée, (figure : 3) c'est-à-dire que les enroulements sont placés sur une colonne centrale et le flux magnétique Φ [Wb] se referme par chacun des côtés qui forment la cuirasse.

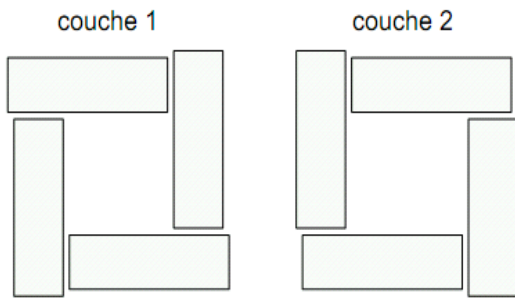


Fig 2 : Forme colonne

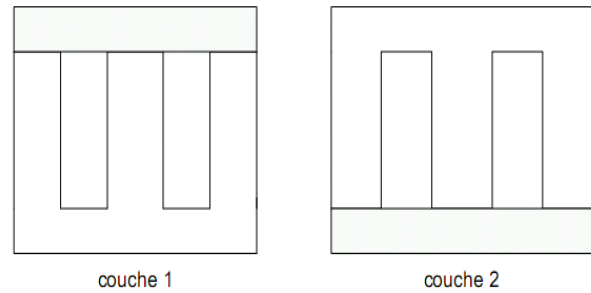


Fig 3 : Forme cuirassée

La forme des tôles, selon les dimensions du circuit magnétique, peut être en E , U, L ,C ou en I.

II.1.3 Les enroulements (bobines) :

Chaque enroulement est constitué de spires isolées entre elles par un vernis. Les deux enroulements sont placés autour d'un noyau magnétique afin de diminuer les fuites magnétiques et d'augmenter le champ.

L'enroulement qui comporte le nombre de spires le plus élevé est l'enroulement haute tension, il est constitué d'un fil plus fin que l'autre enroulement basse tension.

➤ **Remarque :**

Dans la pratique les enroulements sont imbriqués l'un dans l'autre pour améliorer le rendement du transformateur

II. 2 Symbole électrique :

Dans un schéma électrique, le transformateur peut être représenté par l'un des deux symboles suivants:

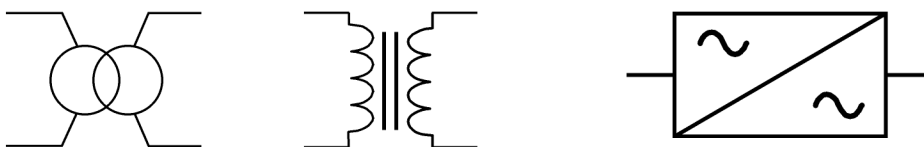


Fig 4 : Symbole du transformateur monophasé

II.3 Principe de fonctionnement :

Loi de Faraday : une variation de flux à travers une spire créer une f.é.m. e. Inversement une f.é.m. e dans une spire crée une variation de flux à travers celle-ci.

$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

Un transformateur est constitué de deux enroulements réalisés autour d'un circuit magnétique, comme le montre la figure 5

- ❖ L'enroulement primaire est branché à une source de tension sinusoïdale alternative.
- ❖ L'enroulement secondaire alimente une charge électrique :

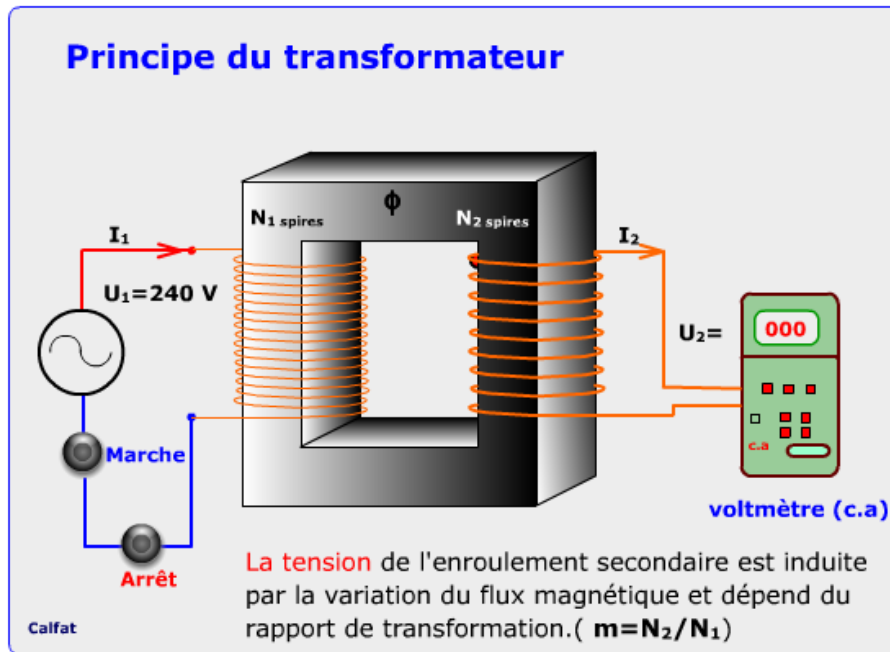


Fig 5 : Schéma de fonctionnement d'un transformateur monophasé

Le premier enroulement, constitué de N_1 spires, est appelé le **primaire du transformateur**. Si on l'alimente par une source de tension alternative U_1 , il se crée un flux ϕ variable. Si la tension est sinusoïdale, comme c'est le cas généralement, le flux est également sinusoïdal.

Le second enroulement, constitué de N_2 spires, est appelé le **secondaire du transformateur**.

On sait que si un conducteur, une spire ou une bobine sont placés dans un champ magnétique variable, ils seront le siège de forces électromotrices (f.é.m.) induites. C'est le cas de l'enroulement secondaire qui est traversé par le flux variable produit par le primaire et canalisé par le circuit magnétique. Le secondaire du transformateur sera donc le siège d'une f.é.m. induite U_2 sinusoïdale.

➤ **Remarque :**

C'est la **variation** du flux qui est à l'origine de la f.é.m. induite. Si la tension du primaire est sinusoïdale, le flux l'est également et ses variations sont telles que la f.é.m. est également sinusoïdale. Mais si la tension du primaire est continue, le flux est constant et n'engendre pas de f.é.m. induite. Si U_1 est une tension continue, alors $U_2 = 0$ V.

II.4 Transformateur monophasé Parfait (Idéal) :

II.4.1 Définition :

C'est un transformateur virtuel sans aucune perte. Il est utilisé pour modéliser les transformateurs réels. (Ces derniers sont considérés comme une association d'un transformateur parfait et de diverses impédances). Dans le cas où toutes les pertes et les fuites de flux sont

négligées, le rapport du nombre de spires primaires sur le nombre de spires secondaires détermine totalement le rapport de transformation du transformateur.

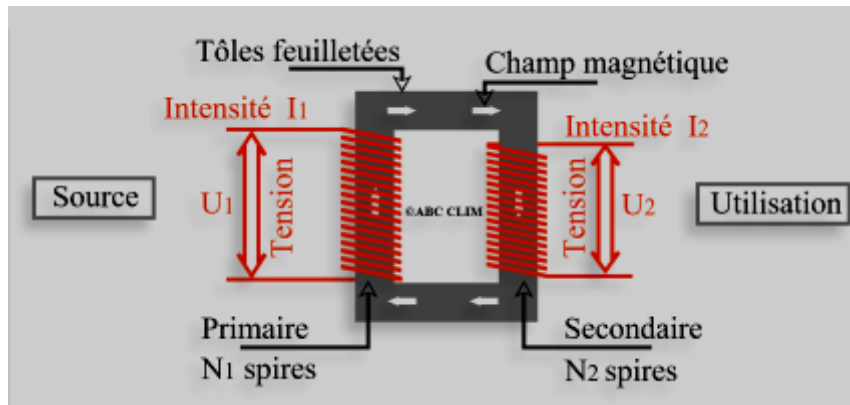


Fig6 : schéma de principe d'un transformateur monophasé

En parlant d'un transformateur monophasé parfait dès lors que les bobinages et le circuit magnétique sont considérés comme idéaux, c'est-à-dire présentent les caractéristiques suivantes :

- ❖ **Les bobinages** : ni chute de tension, ni pertes (pertes par effet joule nul). La résistance dans les fils (au primaire et secondaire) est nulle.
- ❖ **Le circuit magnétique** : est de perméabilité infinie ($\mu = \infty$), c'est-à-dire de réluctance nulle ($\mathfrak{R} = \frac{1}{\mu \cdot S} = 0$) (il n'y a pas de fuites magnétiques, Le noyau magnétique est parfait et les pertes fer sont nul).

II.4.2 Rapport de transformation :

La formulation de la loi de Lenz relative aux deux bobinages correctement conventionnés donne la

relation : $v_1(t) = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}$ et $v_2(t) = N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \Rightarrow \frac{v_2(t)}{v_1(t)} = \frac{N_2}{N_1}$

Le rapport des nombres de spires est une grandeur sans dimension notée m et appelée rapport de transformation. Elle représente le facteur de proportionnalité qui existe entre la tension primaire et secondaire, la relation obtenue est également valable en régime sinusoïdale et donc en notion

complexe. $\frac{v_2(t)}{v_1(t)} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = m$

Par ailleurs la formulation de la loi d'Hopkinson relative au circuit magnétique supposé parfait

donne la relation : $N_1 \cdot i_1(t) - N_2 \cdot i_2(t) = \mathfrak{R} \cdot \phi(t) = 0 \Rightarrow \frac{i_2(t)}{i_1(t)} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{m}$

On retiendra ainsi la formule $m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2}$

- Et on peut en déduire les résultats suivants :

$N_2 > N_1 \Rightarrow m > 1 \Rightarrow$ le transformateur est élévateur.

$N_2 < N_1 \Rightarrow m < 1 \Rightarrow$ le transformateur est abaisseur.

$N_2 = N_1 \Rightarrow m = 1 \Rightarrow$ le transformateur est isolateur.

L'expression de la puissance apparente complexe au primaire du transformateur :

$$S_1 = V_1 \cdot I_1 = \frac{V_2}{m} \cdot m \cdot I_2 = V_2 \cdot I_2 = S_2$$

Par identification des parties réelles et imaginaires, ceci est équivalent à : $P_1 = P_2$ et $Q_1 = Q_2$. Le transformateur parfait est donc absolument passif et sans pertes. Quand il élève la tension, il abaisse le courant (ou inversement) et ne modifie pas les puissances qui transitent.

Le transformateur parfait n'introduit pas de pertes dans la transmission énergétique du primaire vers le secondaire; on dit qu'il y a conservation de puissance.

II.6.3 Rendement d'un transformateur parfait :

La puissance instantanée demandée au réseau d'alimentation est $P_1 = U_1 \cdot i_1$, la puissance fournie à la charge connectée sur le secondaire est $P_2 = U_2 \cdot i_2$

Le rendement $\eta = \frac{P_2}{P_1} = 100 \%$

II.4.3 Formule de BOUCHEROT :

On suppose que l'expression de la tension sinusoïdale $v_1(t) = V_1 \sqrt{2} \cos(\omega t)$ et d'après la loi de

Lenz $v_1(t) = N_1 \cdot \frac{d\phi(t)}{dt}$. Ainsi en intégrant cette égalité, l'expression du flux dans le circuit

magnétique s'écrit $\phi(t) = \frac{V_1 \sqrt{2}}{N_1 \cdot \omega} \sin(\omega t)$ et comme $\phi(t) = B(t) \cdot S$ alors $B(t) = \frac{V_1 \sqrt{2}}{S \cdot N_1 \cdot \omega} \sin(\omega t)$, on

relève la valeur maximal $B_{\max} = \frac{V_1 \sqrt{2}}{S \cdot N_1 \cdot 2\pi \cdot f} \Rightarrow V_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_1 \cdot B_{\max} \cdot S \cdot f \Rightarrow$

Alors les formules de Boucherot sont données par :

$$V_1 = 4,44 \cdot N_1 \cdot B_{\max} \cdot S \cdot f \quad \text{et} \quad V_2 = 4,44 \cdot N_2 \cdot B_{\max} \cdot S \cdot f$$

II.5 Transformateur monophasé réel:

II.5.1 Définition :

Un transformateur réel est un appareil réalisé à partir de bobinages et d'un circuit magnétique tributaire de défauts. Il ne possède pas des caractéristiques parfaites comme le transformateur idéal. On doit tenir compte de :

- ❖ Noyau magnétique : Le noyau possède une caractéristique $B(H)$ non linéaire, avec hystérésis, et une perméabilité non-infinie ($\mu_r \neq \infty$).
- ❖ Bobinages : Les bobinages sont en cuivre, ayant une résistivité non-nulle ($\rho \neq 0$).

Compte tenu de ces caractéristiques, on peut déduire six sources de pertes dans le transformateur :

1. Puisque la perméabilité du noyau est non -infinie, la réluctance du noyau ne sera pas nulle. Il y a par conséquent des fuites de flux : au primaire et au secondaire.
2. On a déjà vu qu'il existait des fuites par hystérésis et des fuites par courants de Foucault.
3. La résistivité des fils de cuivre implique une résistance interne au primaire et au secondaire.

Les conséquences de ces phénomènes parasites sont :

- ❖ Le rendement du transformateur est inférieur à 100%.
- ❖ Le rapport de tension entre le primaire et le secondaire ne sera pas exactement égal au rapport du nombre de tours. La tension au secondaire variera aussi en fonction de la charge.

II.5.2 Rapport de transformation :

Le rapport de transformation se mesure à vide (pas de charge, $I_2=0$) $m = \frac{U_{20}}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$

II.5.3 Schéma équivalent complet d'un transformateur réel :

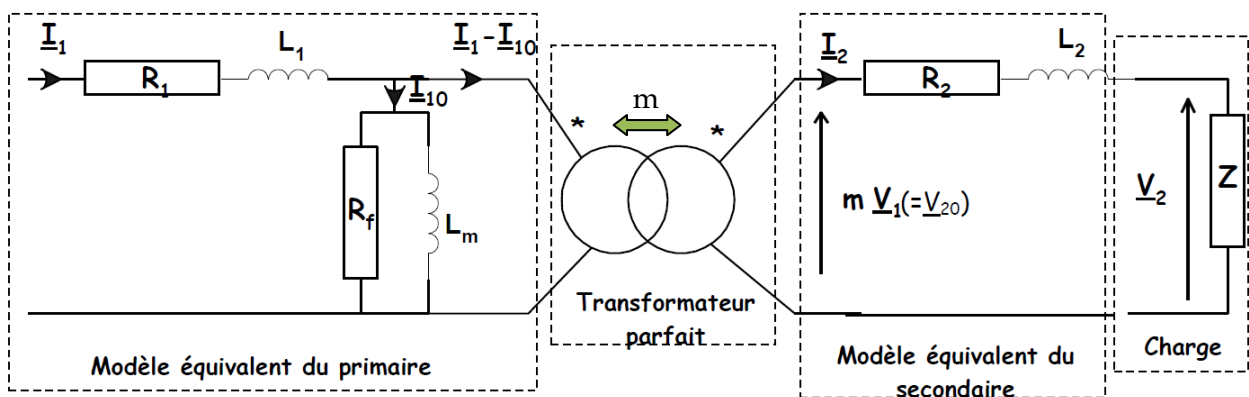


Fig 7 : schéma électrique équivalent

Avec :

- ❖ R_1 et R_2 résistances des enroulements primaire et secondaire.
- ❖ L_1 et L_2 inductances de fuites partielles du primaire et du secondaire.
- ❖ L_m inductance de magnétisation.
- ❖ R_f résistance simulant les pertes ferromagnétiques.
- ❖ m rapport de transformation à vide.

Ce schéma décrit bien le fonctionnement d'un transformateur réel en charge, mais son usage est difficile et surtout ses paramètres sont de mesure délicate en particulier les inductances de fuites l_1 et l_2

III. Transformateur Triphasé :

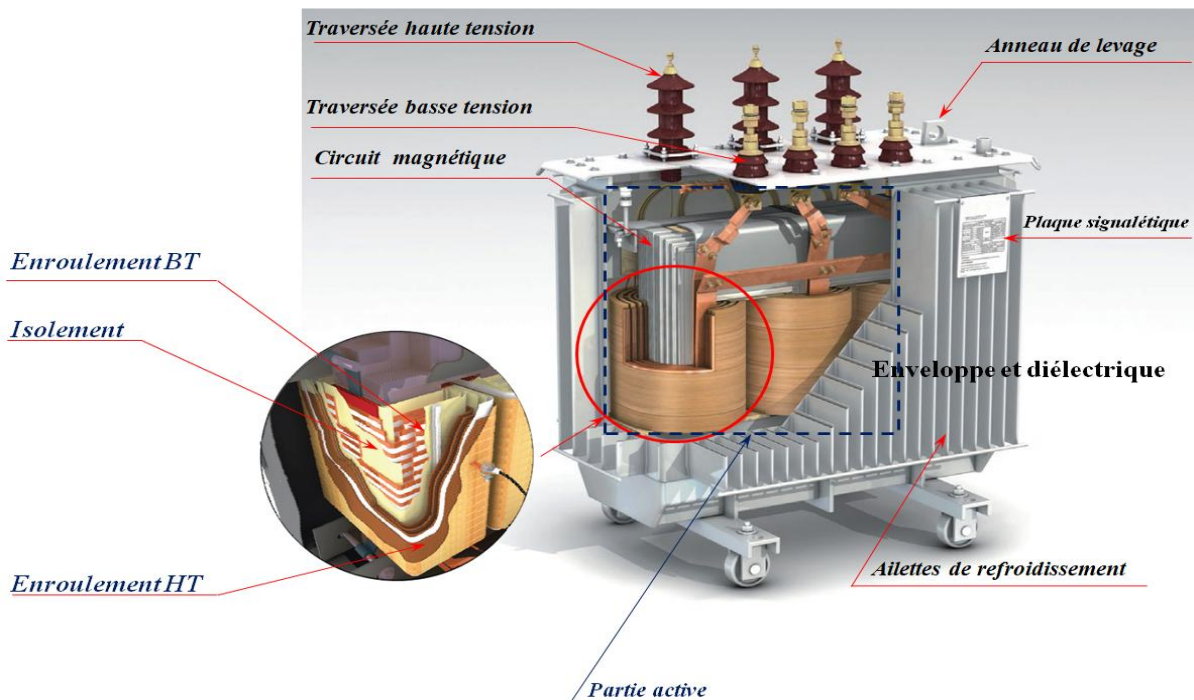


Figure 8 : Les principaux composants d'un transformateur triphasé

III.1 Intérêt :

La production de l'énergie électrique et son transport se fait généralement en triphasé (Figure 9) Par ailleurs on démontre facilement que le transport de l'énergie en haute tension est plus économique d'où la nécessité d'employer des transformateurs éleveurs à la sortie de centrale de production et abaisseurs tout proche des centres de consommation. En effet pour modifier la tension d'un système triphasé on peut choisir d'utiliser :

- ❖ Soit 3 transformateurs monophasés identiques
- ❖ Soit un seul transformateur triphasé (la solution la plus économique)

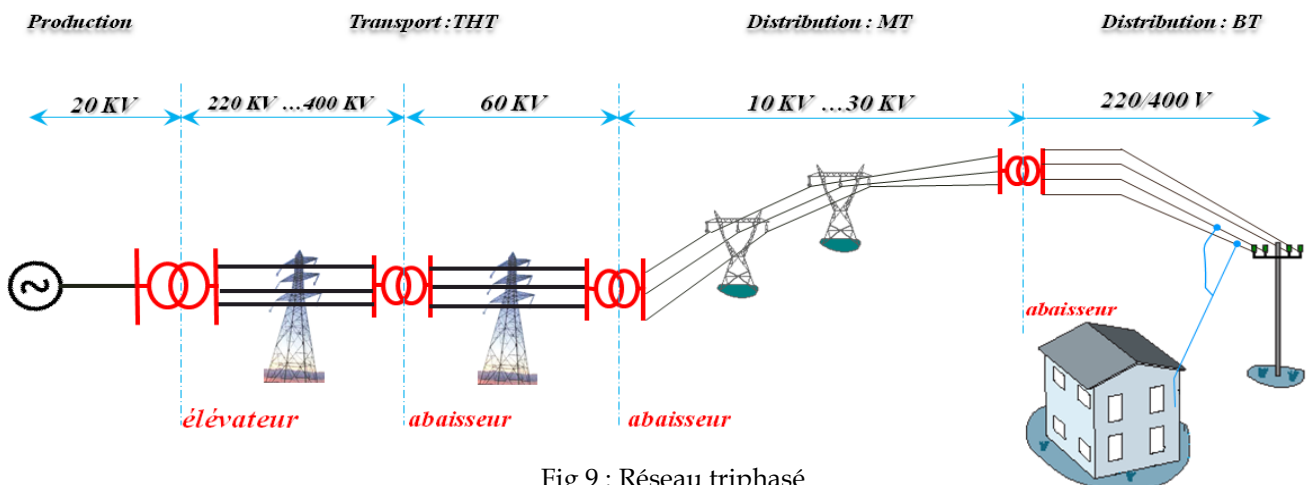


Fig 9 : Réseau triphasé

III.2 Constitution et caractéristiques d'un transformateur triphasé:

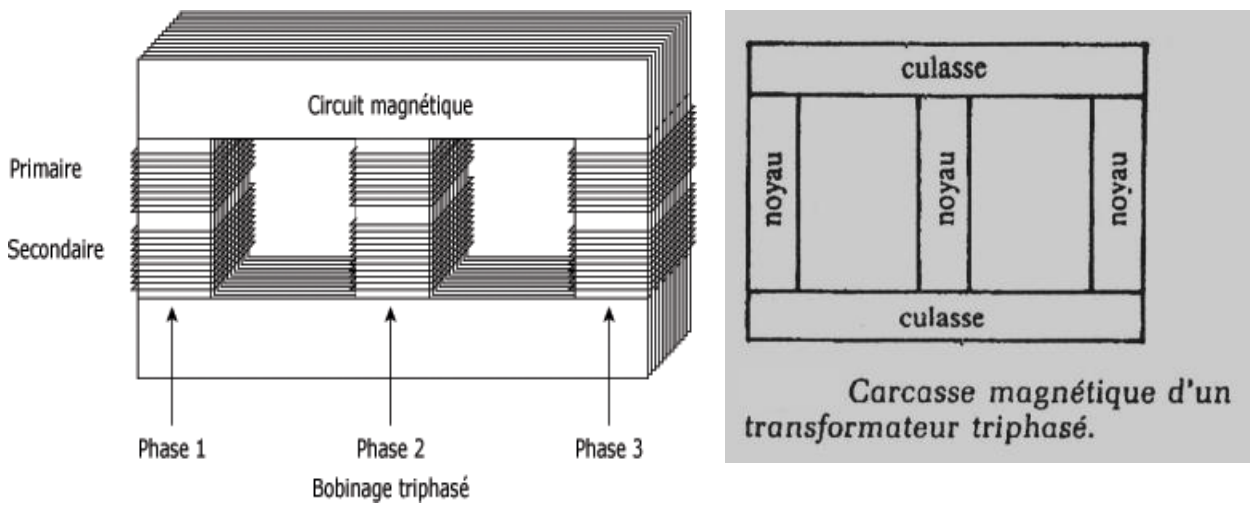


Fig 10 : Circuit magnétique d'un transformateur triphasé

Le circuit magnétique est constitué de trois colonnes (ou noyaux) en général alignées et de deux culasses qui assurent la fermeture du circuit. Il est réalisé par empilage **de tôles d'acier au silicium** (les colonnes et les culasses sont feuilletées pour diminuer les pertes d'énergie par courants de Foucault).

Chacune des colonnes reçoit les bobinages primaires et secondaires d'une phase comme pour les transformateurs monophasés (figure 10).

Les organes mécaniques ont un rôle plus important pour les transformateurs de forte puissance, tels que les anneaux de manutention ou le système de refroidissement.

III-3 Symbole :



Fig 11 : symbole du transformateur triphasé

CHAPITRE IV

INTRODUCTION AUX MACHINES ELECTRIQUES



I. Définitions :

Une machine électrique est un dispositif électromécanique fondé sur l'électromagnétisme permettant la conversion d'énergie électrique par exemple en travail ou énergie mécanique. Ce processus est réversible et peut servir à produire de l'électricité :

- ❖ Les machines électriques produisant de l'énergie électrique à partir d'une énergie mécanique sont communément appelées des génératrices, dynamos ou alternateurs suivant la technologie utilisée.
- ❖ Les machines électriques produisant une énergie mécanique à partir d'une énergie électrique sont communément appelées des moteurs.

Cependant, toutes ces machines électriques étant réversibles et susceptibles de se comporter soit en « moteur » soit en « générateur », la distinction moteur/générateur se fait « communément » par rapport à l'usage final de la machine.

Les moteurs rotatifs produisent une énergie correspondant au produit d'un couple par un déplacement angulaire (rotation) tandis que les moteurs linéaires produisent une énergie correspondant au produit d'une force par un déplacement linéaire.

Les transformateurs sont aussi classifiés comme des machines électriques. Ils permettent de modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme.

II. Historique

- ❖ **En 1821** après la découverte du phénomène du lien entre électricité et magnétisme, l'électromagnétisme, par le chimiste danois Ørsted, le théorème d'Ampère et la loi de Biot et Savart, le physicien anglais Michael Faraday construit deux appareils pour produire ce qu'il appela une « rotation électromagnétique » : le mouvement circulaire continu d'une force magnétique autour d'un fil, en fait la démonstration du premier moteur électrique.
- ❖ **En 1822**, Peter Barlow construit ce qui peut être considéré comme le premier moteur électrique de l'histoire : la « roue de Barlow » qui est un simple disque métallique découpé en étoile et dont les extrémités plongent dans un godet contenant du mercure qui assure le passage du courant. Elle ne produit cependant qu'une force juste capable de la faire tourner, ne lui permettant pas d'application pratique.
- ❖ Le premier moteur à courant continu fabriqué avec l'intention d'être commercialisé a été inventé par Thomas Davenport en 1834 puis breveté en **1837**. Ces moteurs n'ont pas connu de développement industriel à cause du coût des batteries à l'époque.

- ❖ On doit la vérification pratique de la réversibilité des machines électriques au physicien italien Antonio Pacinotti en 1864.
- ❖ **En 1869**, l'inventeur belge Zénobe Gramme rend possible la réalisation des génératrices à courant continu en imaginant le collecteur. Il améliore les premières versions archaïques d'alternateurs (1867) et devient célèbre en retrouvant le principe de l'induit en anneau de Pacinotti. En 1871, il présentera à l'Académie des sciences de Paris la première génératrice industrielle de courant continu, que l'on appela machine de Gramme.
- ❖ **En 1873**, Hippolyte Fontaine, partenaire de Zénobe Gramme, réalise la première application industrielle de la transmission électrique des forces. Tout en démontrant à l'occasion de l'exposition de Vienne, la réversibilité de la machine de Gramme, il présente une expérience associant dynamo et moteur à courant continu, séparés par 2 km de fils électriques. Avant cette expérience décisive, l'énergie mécanique des cours d'eau devait être utilisée sur place, car intransportable sur de longues distances.
- ❖ Le physicien Nikola Tesla dépose un brevet de « machine électrique-dynamo » **en 1886** (publié en 1887). La paternité de la machine asynchrone est controversée entre trois inventeurs : en 1887, le physicien Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone (publié en 1888), puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets. Pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1888
- ❖ **En 1889**, Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écurculeil qui sera construit industriellement à partir de 1891.

III. Conversion de l'énergie électrique :

III.1 Principe :

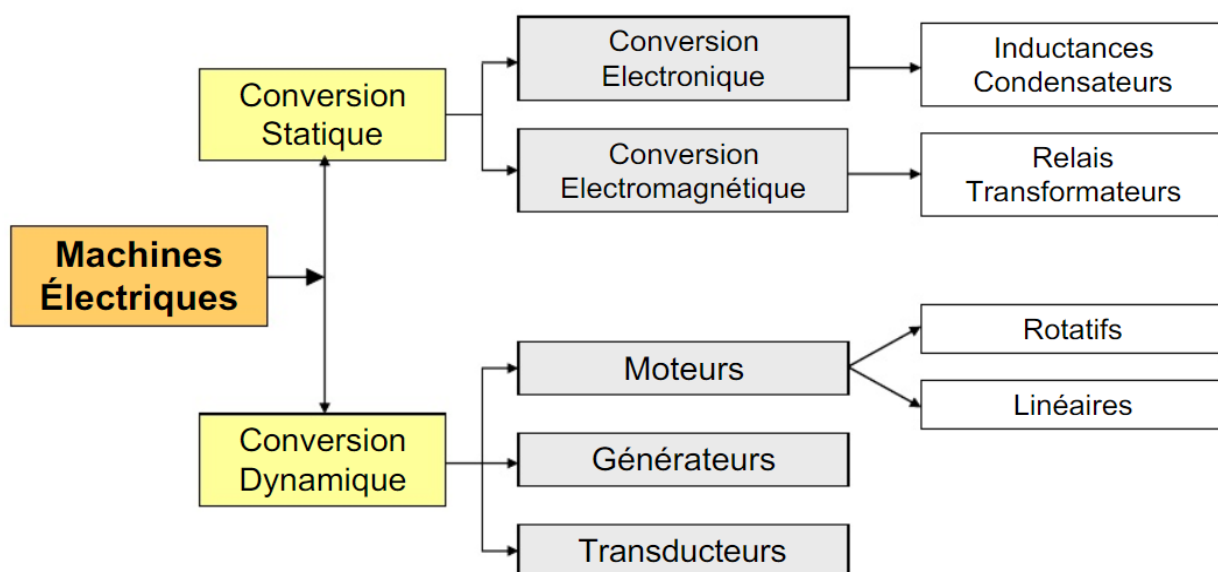


Fig 1 : Schéma de principe de la conversion d'énergie

III.2 Conversion électromécanique :

Ce sont des convertisseurs électromécaniques qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement.

- ❖ Conversion : électrique → mécanique : fonctionnement Moteur. Exploitation de la force électrodynamique (Loi de Laplace).
- ❖ Conversion : mécanique → électrique : fonctionnement Génératrice. Exploitation de la force électromotrice induite (Loi de Faraday).

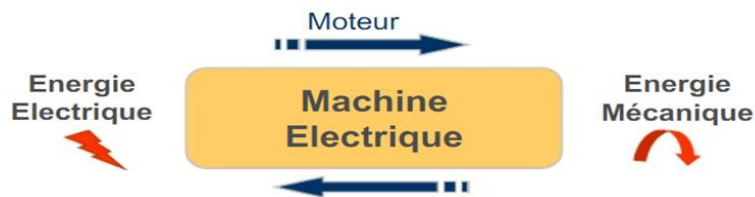


Fig 2 : Schéma de principe de la conversion électromécanique

VI. Classification des machines électriques :

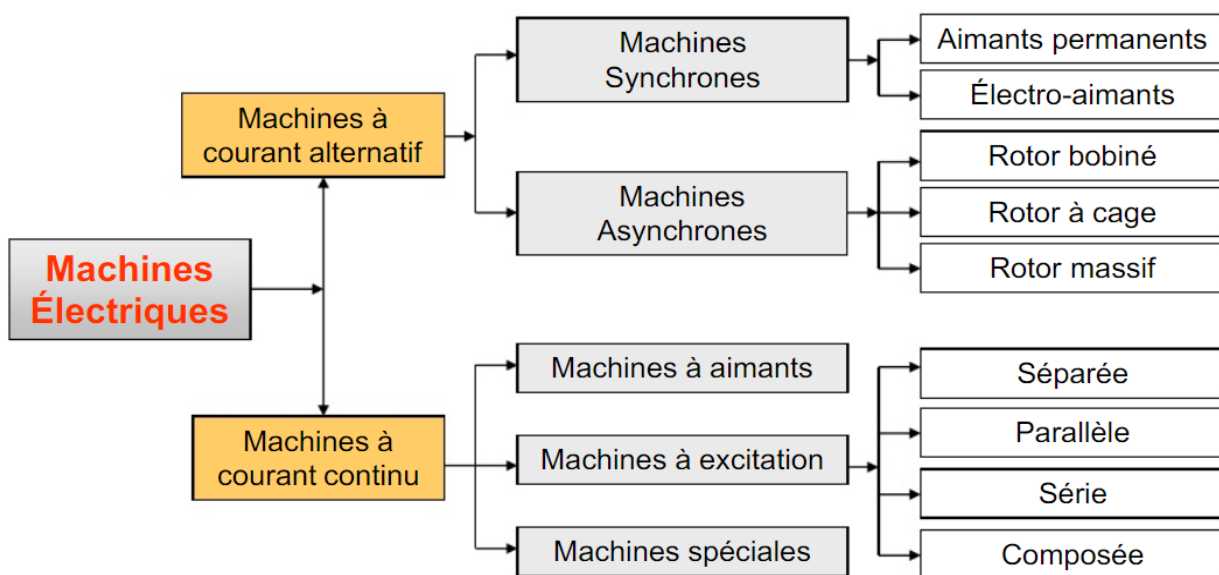


Fig 3 : Classification des machines électriques

D'après le schéma de figure 3, on peut classer les machine électriques comme suit :

1) Machines à courant alternatif (ca)

- ❖ **Machines synchrones** : utilisées comme alternateurs (production de l'énergie électrique) ou comme compensateurs de l'énergie réactive.
- ❖ **Machines Asynchrones** : de construction simple , ces moteur sont les plus utilisés en industrie, mais leur réglage est complexe.

2) Machines à courant continu (cc)

Elles offrent des performances remarquables avec des réglages simples et efficaces. Cependant leur cout élevé et leur maintenance difficile limitent leur champ d'application.

3) Machines Spéciales :

Ces machines de construction spéciale, sont essentiellement utilisées en robotique et dans les procédés d'automatisation et de régulation.

V. Constitution de base :

La construction se réalise sur deux armatures cylindriques et coaxiales (figure 4) , contenant des enroulements inducteurs tournant.

- ❖ L'armature mobile est appelée **rotor** : elle transmet ou reçoit une puissance mécanique en présence d'un champ d'induction tournant.
- ❖ L'armature fixe est appelée **stator** : elle assure la fermeture des lignes d'induction canalisées par l'armature d'induit.

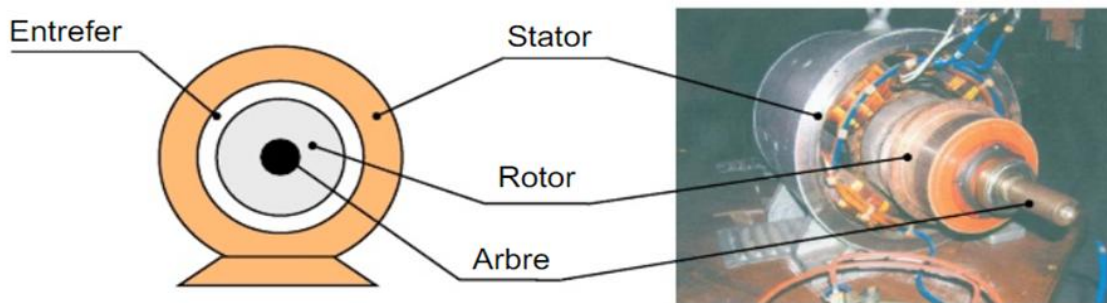


Fig 3 : Constitution d'une machine tournante

IV. Bilan de puissance et rendement :

IV.1 Machines à courant continu :

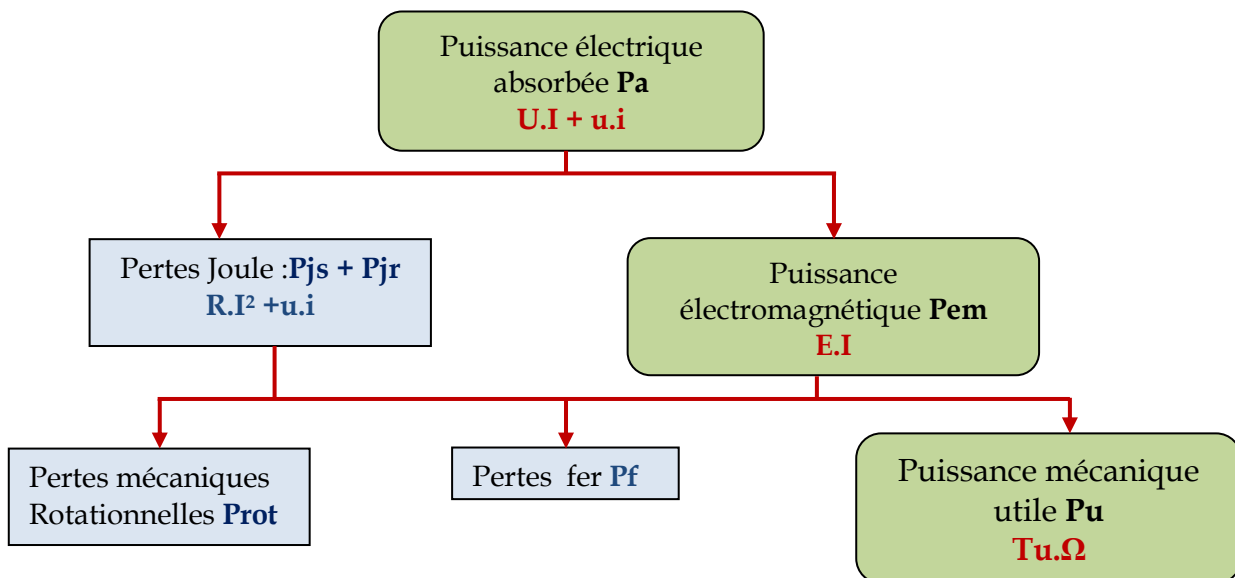


Fig 4: Bilan des puissances et des pertes dans un moteur à courant continu

➤ **La puissance absorbé Pa:**

La puissance absorbé par un moteur à courant continue correspond à la puissance électrique consommée par l'inducteur et par l'induit. Comme l'énergie électrique est ici continue, la puissance Pa se calcule par la relation :

$$P_a = U.I + u.i_e$$

➤ **La puissance utile Pu:**

Le moteur déploie sur l'arbre de transmission un couple appelé couple utile, que l'on note Tu. Ce couple peut être mesuré soit à l'aide d'une dynamo balance soit à l'aide d'un capteur de couple .

Le moteur tourne à la vitesse n, c'est-à-dire à une vitesse angulaire Ω . La puissance mécanique utile Pu que le moteur transmet à sa charge mécanique vérifie alors la relation :

$$P_u = T_u \cdot \Omega = \frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot T_u$$

➤ **La puissance électromagnétique Pem:**

Elle est définie comme étant le produit de la force contre électromotrice E fois le courant d'induit I.

$$P_{em} = E.I$$

➤ **Les différentes pertes:**

a) **Les pertes Joule :**

Ce sont les pertes par échauffement dans les circuits de l'induit et de l'inducteur. Elles sont dissipées par les résistances équivalentes des circuits, et sont de fait mesurables (grâce à un essai court circuit) par un multimètre électrique. En effet au stator inducteur : $P_{js} = r_i e^2 = u.i_e$ et au rotor induit $P_{jr} = R.I^2 \Rightarrow$ les pertes joule $P_j = R.I^2 + u.i_e$

b) **Les pertes collectives :**

On classe avec les pertes collectives les pertes qui contrairement aux pertes Joule ne sont pas directement mesurables, on ne peut donc pas connaître leurs valeurs à chaque instant. Il s'agit:

- ❖ des pertes mécaniques rotationnelles Prot qui sont due aux frottements et à la résistance de l'air et qui augmentent par conséquent avec la vitesse de rotation.
- ❖ des pertes fer par hystérésis et par courant de Foucault Pf qui sont des défauts d'aimantation de la machine et qui augmentent avec l'excitation.

L'expression des pertes collectives est par conséquent: $P_c = P_{rot} + P_f$

Il est possible, mais délicat de calculer les pertes collectives d'une machines tournante. Il est bien plus simple de les déterminer expérimentalement même s'il n'est pas possible d'avoir une mesure instantanée de leur valeur. On les évalue au travers du couple des pertes collectives Tc

➤ Rendement du moteur à courant continue:

Le rendement η d'une machine quelconque est le rapport entre sa puissance utile et la puissance

qu'elle consomme:
$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + P_{jr} + P_{js} + P_{rot} + P_f}$$

IV.2 Machines synchrone (alternateur) :

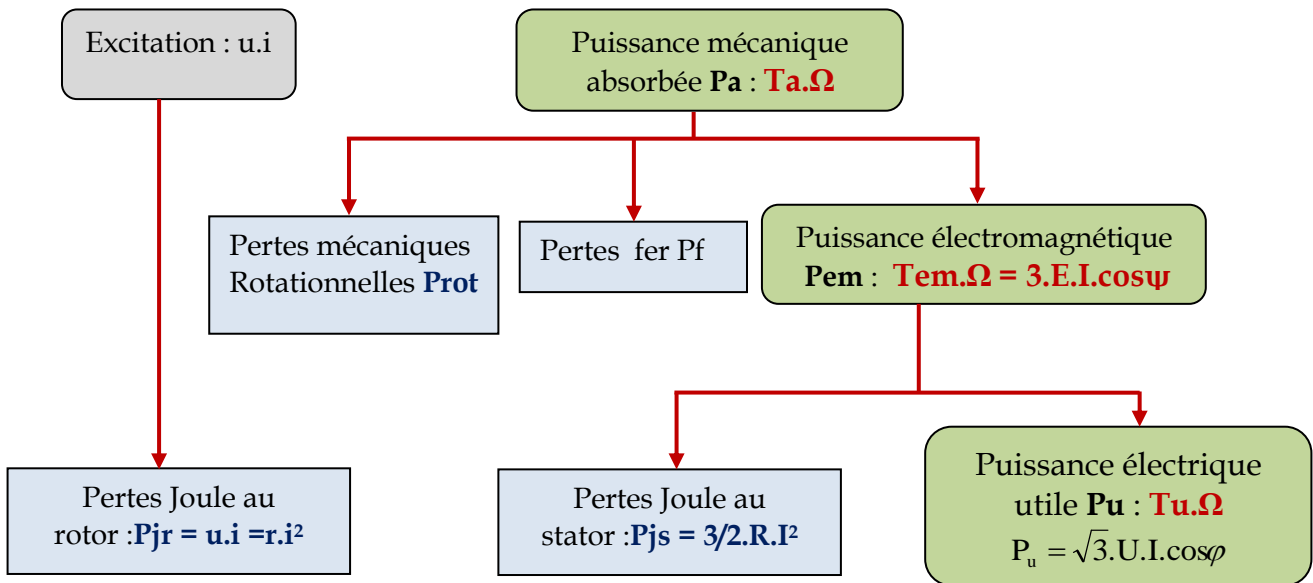


Fig 5 : Bilan des puissances et des pertes dans un alternateur synchrone

➤ Couple appliqué et puissance absorbée:

Dans un alternateur la puissance absorbée P_a est une puissance mécanique. Elle correspond au couple appliqué par l'arbre de transmission sur le rotor T_a multiplié par la vitesse

angulaire de rotation:
$$P_a = T_a \cdot \Omega_s = \frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot T_a$$

➤ Puissance et couple électromagnétique:

La puissance électromagnétique est à la fois mécanique et électrique. Elle permet la création des grandeurs E et J déphasé de ψ de sorte que: $P_{em} = T_{em} \cdot \Omega_s = 3 \cdot E \cdot J \cdot \cos\psi$.

➤ Puissance utile:

La puissance utile d'un alternateur synchrone est la puissance électrique fournie aux bornes du stator induit. Puisque l'induit fournit une puissance triphasée, celle ci s'exprime

comme :
$$P_u = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

➤ Les pertes:

On trouve dans l'alternateur des pertes constantes et des pertes variables. Comme dans le cas de la génératrice à courant continu, ces pertes peuvent être classées en deux familles.

a) **Les pertes Joule:** Ce sont les pertes par échauffement dans les circuits de l'induit et de l'inducteur.

❖ Au stator-induit, l'énergie électrique est triphasé. Les pertes Joule au stator P_{js} sont alors calculables par la relation: $P_{js} = (3/2).R.I^2$ (R la résistance entre deux bornes de l'induit et la relation entre R et r_s , dépend du câblage de l'alternateur.

❖ Au rotor inducteur, l'énergie électrique est continue. Les pertes Joule au rotor se calculent donc selon l'expression: $P_{jr} = u.i = r.i^2$.

b) **Les pertes collectives P_c :**

Ce sont les pertes fer et les pertes rotationnelles, elles sont considérées comme constantes et on les détermine au travers d'un essai à vide. $P_c = P_f + P_{rot}$

➤ Le rendement:

On établit les relations permettant de déterminer le rendement par une mesure directe:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a + u.i} = \frac{P_u}{P_u + p_{js} + p_f + p_{rot} + ui}$$

IV.3 Machines Asynchrone (Moteur Asynchrone triphasée) :

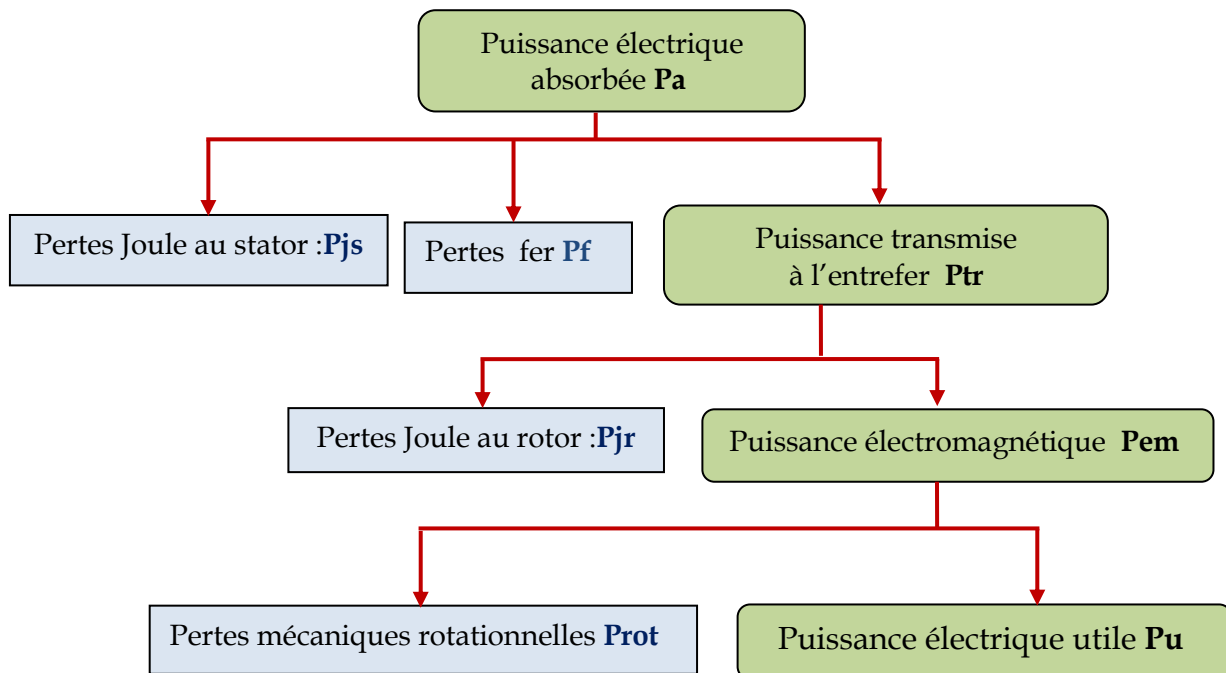


Fig 5 : Bilan des puissances et des pertes d'un moteur asynchrone triphasée

Tout d'abord le moteur absorbe sur le réseau une puissance électrique active triphasée P_a . Une partie P_{js} de cette puissance est dissipée par effet joule dans les enroulements du stator. Par la suite le champ magnétique inducteur entraîne des pertes dans le fer P_f , par hystérésis et par courant de Foucault. Le reste de la puissance P_{tr} est transmis au rotor à travers l'entrefer. La majeure partie de cette puissance est alors utilisée pour produire une puissance électromécanique P_{em} , tandis que la présence d'un courant induit dans le rotor provoque des pertes par effet Joule P_{jr} .

La puissance électromagnétique fournie par le stator est responsable de la mise en mouvement du rotor, qui produit la puissance mécanique utile P_u qui sera par la suite transmise à la charge par le biais d'un arbre de transmission. Toutefois dans le mouvement du rotor une partie de la puissance est perdue par divers mécanismes de frottements, c'est ce que l'on appelle les pertes rotationnelles P_{rot}

➤ **Rendement:**

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - P_{js} - P_f - P_{jr} - P_{rot}}{P_a}$$

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES



Références bibliographiques

- [1] D.Barielle. L.Mossion. C.Garnieur, « l'Essentielle d'électrotechnique » , Dunod, 2018.
- [2] L.Lasne, « Électrotechnique et énergie électrique» , Dunod, 2014.
- [3] C.Palermo, « Électrotechnique – parcours IUT », Dunod, 2012.
- [4] V.Léger, « Physique appliquée », Ellipes, 2010.
- [5] C.Francois, « Génie électrique : électrotechnique & électronique de puissance », Ellipes, 2005.
- [6] F.Milsant, « Machines électriques – transformateurs et réseaux électriques », Berti, 1992.
- [7] F.Milsant, « Machines électriques – machines synchrones et asynchrone, commande électronique », Berti, 1993.
- [8] M.Jufer. Y.Perriard, « Électrotechnique –base de l'électricité », Presses polytechniques et universitaires romandes- suisse, 2014.
- [9] R.Mérat. R.Moreau. L.Allay. J.Lafargue, « Électrotechnique – manuel de cours et exercices corrigés », Berti, 2014.
- [10] C.Francois, « Mémento de génie électrique – 50 fiches de synthèse », Ellipes, 2008.
- [11] H.Djelouah, « Électromagnétisme et ondes électromagnétiques », Page bleues, 2019.
- [12] P.Mayé, « Aide mémoire d'électrotechnique » , Dunod, 2008.
- [13] B.Grabowski. C.Ripoll , «Aide mémoire d'électronique » , Dunod, 2008.
- [14] H.Largeaud, « Schéma électrique » , Eyrolles, 2010.
- [15] M.Lamara, « Électronique fondamentale – cours et exercices corrigés » , Page bleues , 2017.
- [16] A. Fouillé, « Électrotechnique à l'Usage des Ingénieurs », 10e édition, Dunod, 1980
- [17] D. Hong, « Circuits et mesures électriques, Dunod », 2009.
- [18] A. Fitzgerald, « Electric Machinery », McGraw-Hill Higher Education, 2003.
- [19] J. Lesenne, « Introduction à l'électrotechnique approfondie », Technique et Documentation, 1981.
- [20] P. MAYE, « Moteurs électriques industriels », Dunod, 2005