



OFPPT

ROYAUME DU MAROC

مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل

Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail

DIRECTION RECHERCHE ET INGENIERIE DE FORMATION

**RESUME THEORIQUE
&
GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES**

**MODULE N°: 8 ANALYSE DE CIRCUITS A
COURANT ALTERNATIF**

SECTEUR : ELECTROTECHNIQUE

**SPECIALITE : ELECTRICITE DE
MAINTENANCE
INDUSTRIEL**

NIVEAU : TECHNICIEN

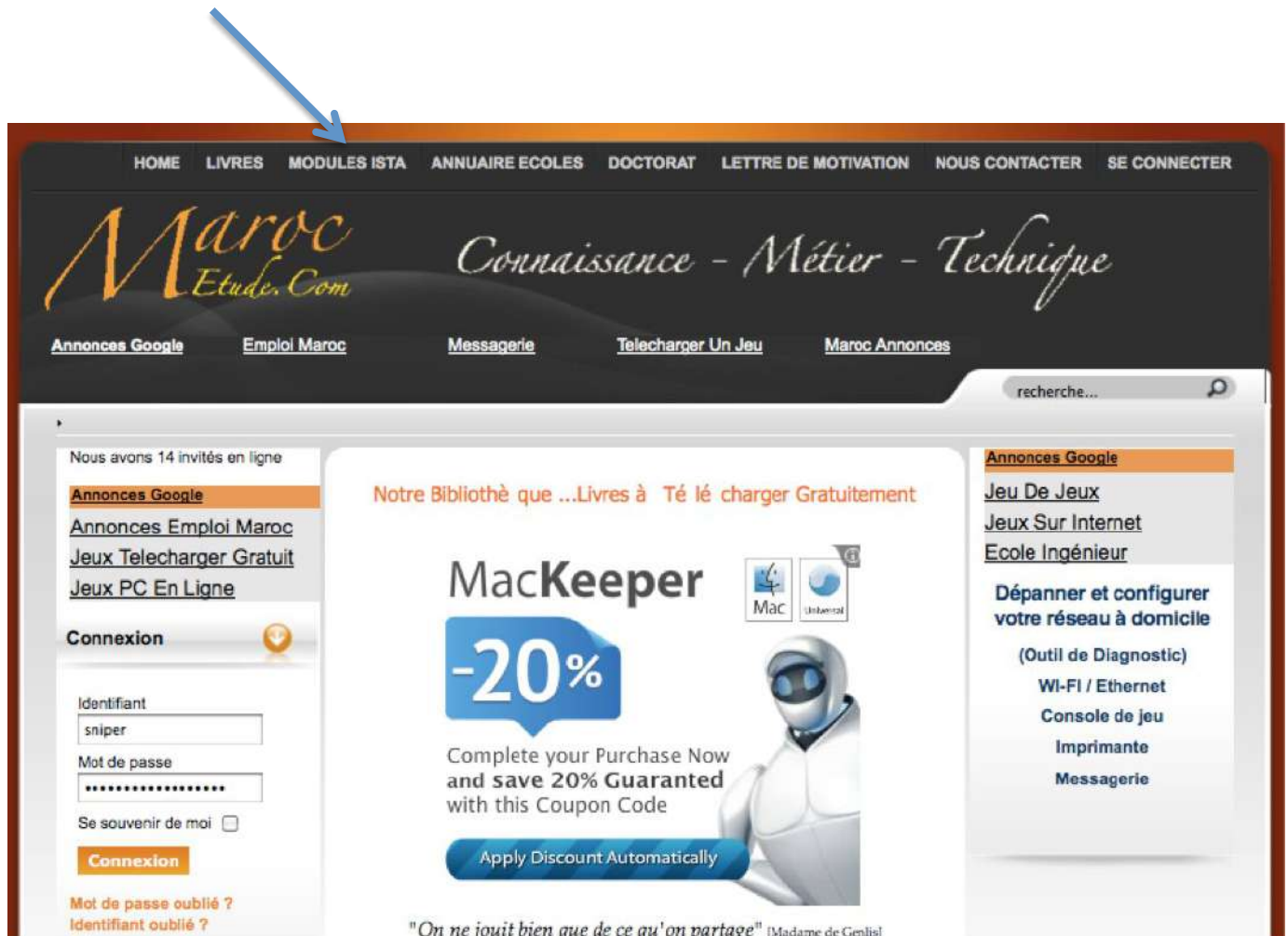
ANNEE 2006

PORTAIL DE LA FORMATION PROFESSIONNELLE AU MAROC

Télécharger tous les modules de toutes les filières de l'OFPPT sur le site dédié à la formation professionnelle au Maroc : www.marocetude.com

Pour cela visiter notre site www.marocetude.com et choisissez la rubrique :

MODULES ISTA



The screenshot shows the homepage of MarocEtude.Com. At the top, a navigation bar contains links: HOME, LIVRES, **MODULES ISTA**, ANNUAIRE ECOLES, DOCTORAT, LETTRE DE MOTIVATION, NOUS CONTACTER, and SE CONNECTER. Below this is a header with the site logo 'Maroc Etude.Com' and the tagline 'Connaissance - Métier - Technique'. A secondary navigation bar includes links for 'Annonces Google', 'Emploi Maroc', 'Messagerie', 'Telecharger Un Jeu', and 'Maroc Annonces'. A search bar is located on the right. The main content area features a large advertisement for MacKeeper with a '-20%' discount. On the left sidebar, there is a 'Connexion' section with fields for 'Identifiant' (containing 'sniper') and 'Mot de passe', and a 'Connexion' button. Below this are links for 'Mot de passe oublié ?' and 'Identifiant oublié ?'. The right sidebar contains a list of links under 'Annonces Google': 'Jeu De Jeux', 'Jeux Sur Internet', 'Ecole Ingénieur', 'Dépanner et configurer votre réseau à domicile', '(Outil de Diagnostic)', 'Wi-Fi / Ethernet', 'Console de jeu', 'Imprimante', and 'Messagerie'.

Document élaboré par :

Nom et prénom

EFP

DR

KISSIOVA-TABAKOVA
Raynitchka

CDC Génie
Electrique

DRIF

Révision linguistique

-
-
-

Validation

-
-
-

SOMMAIRE

Présentation du Module.....	7
RESUME THEORIQUE.....	8
1. PRODUCTION D'UNE ONDE SINUSOÏDALE.....	9
1.1. Induction électromagnétique	9
1.2. Alternateur élémentaire	9
2. TERMES ASSOCIES AU COURANT ALTERNATIF.....	13
2.1. Types de courants alternatifs.....	13
2.2. Caractéristiques d'un courant alternatif sinusoïdal.....	14
2.3. Déphasage	16
2.4. Caractéristiques d'une onde sinusoïdale.....	16
3. EFFET DES INDUCTANCES.....	19
3.1. Inductance d'une bobine	19
3.2. Inductance mutuelle	20
3.3. Réactance inductive	20
3.4. Déphasage entre le courant et la tension.....	21
3.5. Groupements d'inductances.....	22
3.5.1. Groupement en série.....	22
3.5.2. Groupement en parallèle	22
4. EFFET DES CONDENSATEURS	23
4.1. Constitution.....	23
4.2. Capacité d'un condensateur plan	24
4.3. Types de condensateurs	24
4.4. Groupements de condensateurs	24
4.4.1. Groupement en série.....	24
4.4.2. Groupement en parallèle	25
4.5. Réactance capacitive	25
4.6. Déphasage entre courant et tension.....	26
5. LOIS DE ELECTROMAGNETISME	27
5.1. Champ magnétique créé par un courant électrique.....	27
5.1.1. Forme et sens du champ.....	27
5.1.2. Densité du flux.....	28
5.1.3. Force magnétomotrice (f.m.m.)	29
5.1.4. Champ magnétique d'une bobine longue	29
5.2. Force électromagnétique.....	30
5.3. Induction électromagnétique	30
5.3.1. Loi de Lenz	31
5.3.2. Tension induite dans un conducteur.....	31
6. CARACTERISTIQUES DES TRANSFORMATEURS.....	33
6.1. Structure élémentaire du transformateur	33
6.2. Rapport de transformation.....	35
6.3. Polarité de transformateur	37
6.4. Problèmes d'isolement	37
6.5. Autotransformateur.....	38
7. CARACTERISTIQUES DES CIRCUITS A COURANT ALTERNATIF.....	39
7.1. Représentation vectorielle des grandeurs sinusoïdales	40
7.2. Diagramme vectoriel d'un circuit à courant alternatif.....	44
7.2.1. Circuit R – L – C série.....	44
7.2.2. Circuit R – L – C parallèle.....	47
7.3. Calcul des valeurs aux différents points d'un circuit à courant alternatif.....	50
7.3.1. Circuit R – L – C série.....	50

7.3.2. Circuit R – L – C parallèle	52
8. PUISSANCE	56
8.1. Calcul de la puissance active	56
8.2. Calcul de la puissance réactive	57
8.3. Puissance apparente	57
8.4. Facteur de puissance	58
9. CARACTERISTIQUES DES CIRCUITS EN RESONANCE	59
9.1. Résonance série	59
9.1.1. Caractéristiques de la résonance série	61
9.1.2. Courbes de la résonance série	61
9.1.3. Facteur de qualité du circuit Q	62
9.2. Résonance parallèle	62
9.2.1. Caractéristiques de la résonance parallèle	64
9.2.2. Courbes de la résonance parallèle	64
10. CIRCUITS TRIPHASES	65
10.1. Système triphasé	65
10.1.1. Systèmes mono et polyphasés	65
10.1.2. Alternateur triphasé	65
10.1.3. Système direct et système inverse	66
10.1.4. Propriétés du système monté en « Etoile »	67
10.1.5. Charges montées en « Etoile »	68
10.1.6. Charges montées en « Triangle »	71
10.2. Puissance en régime triphasé	72
10.2.1. Puissance en régime triphasé quelconque	72
10.2.2. Puissance en régime triphasé équilibré	72
11. VERIFICATION DE L'ETAT DES COMPOSANTS D'UN CIRCUIT A COURANT ALTERNATIF	73
11.1. Multimètre analogique	74
11.1.1. Présentation	74
11.1.2. Utilisation comme ohmmètre	74
11.2. Ohmmètre	74
11.2.1. Ohmmètre série	74
11.2.2. Ohmmètre parallèle (dérivation)	75
11.3. Mégohmmètre	76
11.4. Vérification des composants	77
11.4.1. Vérification des résistances	77
11.4.2. Vérification des bobines	78
11.4.3. Vérification des condensateurs	78
11.4.4. Vérification des transformateurs	79
12. MESURES DANS UN CIRCUIT A COURANT ALTERNATIF	79
12.1. Instruments de mesure en courant alternatif	79
12.1.1. Ampèremètres et voltmètres magnétoélectriques	80
12.1.2. Ampèremètres et voltmètres ferromagnétiques	81
12.1.3. Ampèremètres et voltmètres électrodynamiques	82
12.2. Interprétation des lectures des instruments de mesure à courant alternatif	83
12.2.1. Echelle	83
12.2.2. Gammes (Calibres)	84
12.2.3. Interprétation des lectures des appareils de mesure	85
12.3. Mesures en courant alternatif	86
12.3.1. Branchement des appareils de mesure	86
12.3.2. Mesure des valeurs aux différents points d'un circuit	87
12.3.3. Mesure des courants alternatifs	88
12.3.4. Mesure des tensions alternatives	89
12.4. Erreurs de mesure	91

12.4.1. Définition des erreurs.....	91
12.4.2. Types d'erreurs.....	91
12.4.3. Caractéristiques métrologiques des appareils de mesure.....	92
TP1 – Définition des termes associés au courant alternatif	96
TP 2 – Description des effets des inductances dans un circuit à courant alternatif	98
TP3 – Description des effets des condensateurs dans un circuit à courant alternatif	100
TP4 – Calcul des valeurs d'une onde sinusoïdale.....	102
TP5 – Schéma d'un circuit.....	104
TP6 – Diagrammes vectoriels	106
TP7 – Mesure des valeurs aux différents points d'un circuit	109
TP8 – Justification des résultats de mesure.....	114
TP9 – Définition des termes : puissance active, puissance réactive, puissance apparente et facteur de puissance	116
TP10 – Mesure de la puissance active et du facteur de puissance dans des circuits mono et triphasé.....	118
TP11 – Description des caractéristiques des transformateurs	126
EVALUATION DE FIN DE MODULE.....	129
Liste des références bibliographiques	132

MODULE :8 ANALYSE DE CIRCUITS A COURANT ALTERNATIF

Durée : 60 heures

**OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU
DE COMPORTEMENT**

COMPORTEMENT ATTENDU

Pour démontrer sa compétence le stagiaire doit
analyser des circuits à courant alternatif
selon les conditions, les critères et les précisions qui
suivent.

CONDITIONS D'EVALUATION

- À partir :
 - de directives ;
 - d'un circuit comprenant une résistance, une inductance et un condensateur raccordés en série ou en parallèle ;
 - du schéma du circuit.
- À l'aide :
 - d'outils et d'instruments de mesure et d'équipements appropriés.

CRITERES GENERAUX DE PERFORMANCE

- Respect des règles de santé et de sécurité.
- Utilisation appropriée des instruments et de l'équipement.
- Travail soigné et propre.
- Démarche de travail structuré.
- Respect des normes d'isolation du réseau électrique.

OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU DE COMPORTEMENT	
PRECISIONS SUR LE COMPORTEMENT ATTENDU	CRITERES PARTICULIERS DE PERFORMANCE
A) <i>Interpréter le schéma d'un circuit.</i>	✓ Utilisation appropriée de la terminologie. ✓ Décodage correct des symboles et des conventions.
B) <i>Calculer les valeurs aux différents points d'un circuit.</i>	✓ Application correcte des lois. ✓ Exactitude des calculs.
C) <i>Mesurer les valeurs aux différents points d'un circuit.</i>	✓ Exactitude des mesures. ✓ Respect systématique des mesures de protection. ✓ Exactitude du branchement aux points de mesure.
D) <i>Justifier les résultats.</i>	✓ Calcul exact des écarts. ✓ Justification correcte des causes d'écarts.

Présentation du Module

Ce module de compétence générale est enseigné en premier semestre du programme. Son enseignement ne devra débiter que lorsque le module 5 « Analyse de circuits à courant continu » sera complété. Il s'appuiera sur les notions fondamentales de l'électricité vues en module 5.

L'objectif de module est de faire acquérir les connaissances nécessaires à l'interprétation de schémas, au calcul de différents paramètres (tension, fréquence, etc.) et à l'utilisation de composants tels que des inductances et des condensateurs afin d'analyser un circuit à courant alternatif.

La compréhension des concepts à l'étude exige l'adoption d'une approche privilégiant l'alternance entre la théorie et les activités réalisées en laboratoire. L'utilisation à outrance de matériel audiovisuel peut générer les situations d'apprentissage statiques. Bien que ce module présente des aspects théoriques importants, des efforts doivent être faits pour en dynamiser les apprentissages. La réalisation progressive de différents montages de base s'avère une stratégie pédagogique utile à l'atteinte de la compétence visée.

Module 8 : ANALYSE DE CIRCUITS A COURANT ALTERNATIF

RESUME THEORIQUE

1. PRODUCTION D'UNE ONDE SINUSOÏDALE

1.1. Induction électromagnétique

Le phénomène de l'induction électromagnétique est à la base du fonctionnement d'un grand nombre d'appareils électrique parmi lesquels on peut citer comme les plus importants : les transformateurs et les moteurs à courant alternatif. Ce phénomène fut découvert par Michel Faraday en 1831.

La loi de l'induction électromagnétique énonce que :

- a) Si le flux magnétique varié avec le temps à l'intérieur d'une spire (voire circuit électrique) une tension appelée force électromotrice est induite entre ses bornes.
- b) La valeur de cette tension induite est proportionnelle au taux de variation du flux.

On obtient l'équation suivante :

$$E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad , \text{ où : } E = \text{Tension induite, en volt [V]}$$

$\Delta \Phi$ = Variation du flux à l'intérieur de la spire ou du circuit, en weber [Wb]

Δt = Intervalle de temps correspondant à la variation du flux, en seconde [s].

1.2. Alternateur élémentaire

Considérons un aimant permanent N - S tournant autour d'un axe à l'intérieur d'un anneau de fer F fixe (fig. 1 - 1).

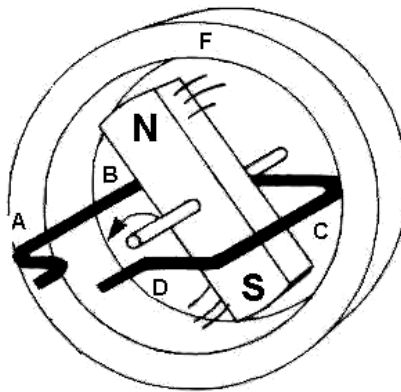


Fig. 1 - 1

Construction d'un alternateur élémentaire

Une spire métallique en forme de cadre ouverte est logée à l'intérieur de l'anneau. L'axe de la spire est celui de l'aimant permanent tournant. Lorsque l'aimant tourne avec une vitesse uniforme, soit 1 tour/s, le flux magnétique dans la spire varie et conformément au phénomène de l'induction électromagnétique il y induit une force électromotrice.

Si on détermine la valeur et la polarité de la tension induite pour les positions sensibles de l'aimant au cours de la rotation : 0° , 90° , 180° , 270° (les valeurs des angles sont exprimées par rapport à la position initiale), on obtient :

- A la position 0° (fig. 1 - 2) le flux dans la spire est nul car les lignes du champs sont parallèle avec la surface de la spire mais la variation du flux est maximum. Les conducteur AB et CD de la spire coupent un maximum de ligne de champ et la force électromotrice induite dans la spire est maximum.

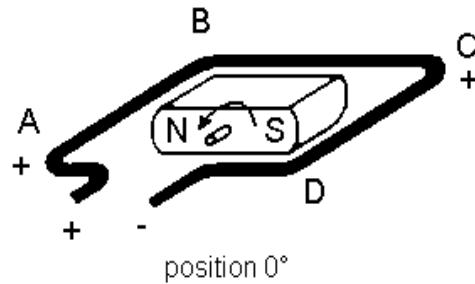


Fig. 1 - 2

- A la position 90° (fig. 1 - 3) le flux dans la spire est maximum car les lignes du champ sont perpendiculaires par rapport à la surface de la spire, mais la variation du flux dans la spire est nulle. Par conséquent la f.é.m. induite en celle-ci est nulle.

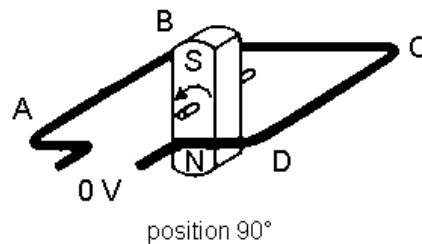


Fig. 1 - 3

- A la position 180° (fig. 1 - 4) les conditions sont identiques à celles de la position 0° (flux nul dans la spire et variation de flux maximum), sauf que les conducteurs AB et CD sont coupés par les lignes de champ d'orientation inverse. Il s'ensuit que la tension induite dans la spire sera identique mais de polarité contraire à celle de la position 0° .

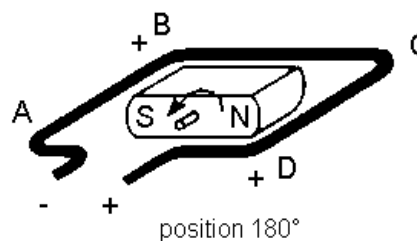


Figure 1 - 4

- A la position 270° (fig. 1 – 5) les conditions sont identiques à celle de la position 90° et pour les mêmes raisons la tension induite dans la spire est nulle.

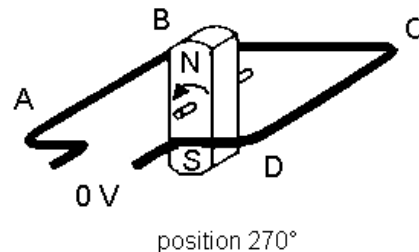


Figure 1 - 5

- A la position 360° l'aimant reprend sa position initiale et le cycle recommence.

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

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

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

Les figures ci-dessous présentent la forme d'onde de la tension induite en fonction de l'angle de rotation de la spire et en fonction de temps (fig. 1 – 6)

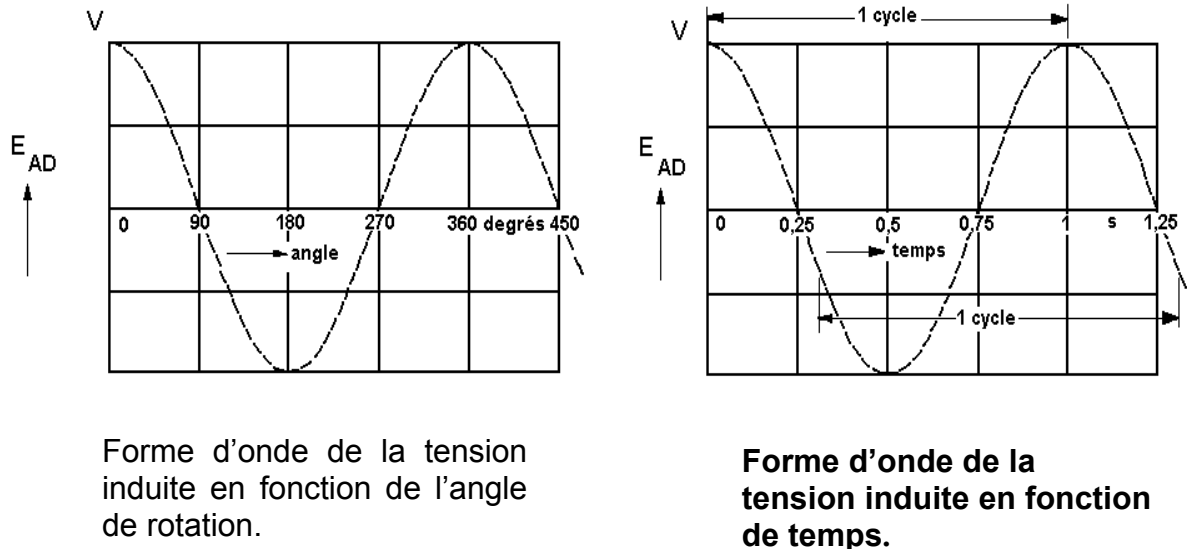


Fig. 1 - 6

2. TERMES ASSOCIES AU COURANT ALTERNATIF

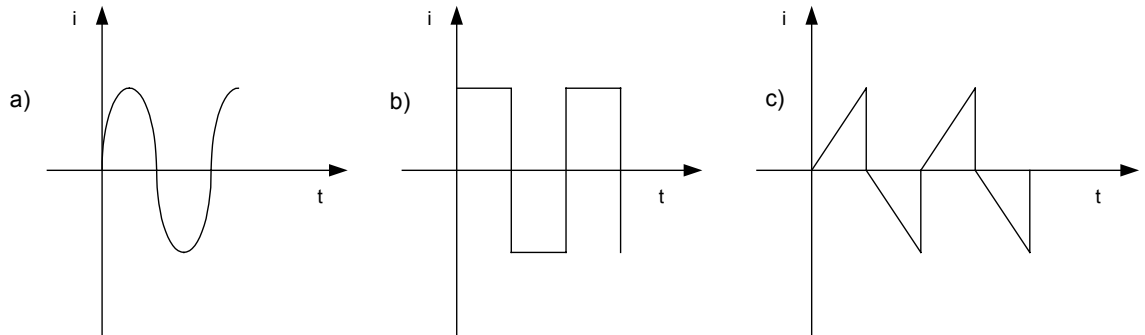
Dans le chapitre précédent on a étudié la production d'une tension induite sinusoïdale dans un alternateur élémentaire et on l'a représenté dans un système de référence en fonction de temps. Dans les circuits électriques alimentés avec des tensions alternatives circulent des courant alternatifs. Une large gamme de récepteurs utilise le courant alternatif, c'est pourquoi l'étude des grandeurs alternatives s'avère de grande importance pour l'électricien.

2.1. Types de courants alternatifs

Ce sont des courants qui changent de sens dans le temps. Les courants alternatifs les plus connus sont (fig. 2 – 1) :

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

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



a) Courant (signal) sinusoïdal b) Courant (signal) carré c) Courant (signal) en dent de scie

Fig. 2 - 1

2.2. Caractéristiques d'un courant alternatif sinusoïdal

La période représente la durée minimum après laquelle une grandeur alternative reprend les mêmes valeurs. La période est exprimée en seconde et on la symbolise par T .

La fréquence représente le nombre de périodes par seconde. On désigne la fréquence par f et on l'exprime en hertz (Hz).

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

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

Un courant alternatif présente deux **alternances** :

- une alternance positive, représentée au-dessus de l'axe du temps, qui correspond à un certain sens du courant,

- une alternance négative, figurée au-dessous de l'axe horizontal, qui correspond au sens opposé de circulation du courant.

Au cours d'une alternance le sens du courant alternatif reste le même.

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

Un courant alternatif sinusoïdal est caractérisé par une variation sinusoïdale en fonction du temps (fig. 2 – 2).

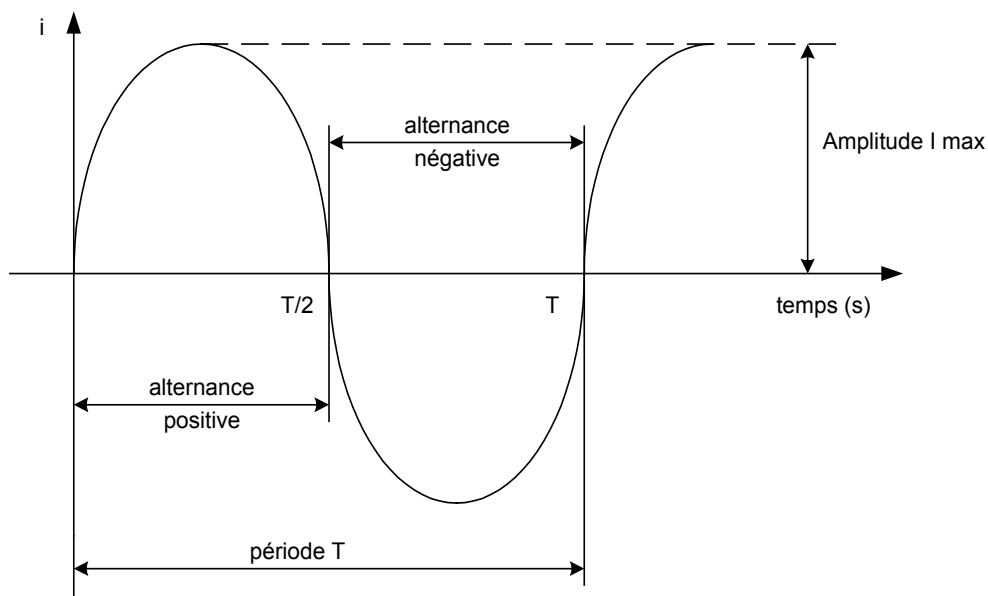


Fig. 2 - 2

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

$$I = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}, \quad I \text{ est la valeur efficace du courant et } I_{\max} \text{ l'amplitude.}$$

La valeur efficace d'un courant alternatif est égale à la valeur du courant continu qui provoquerait le même échauffement dans une même résistance.

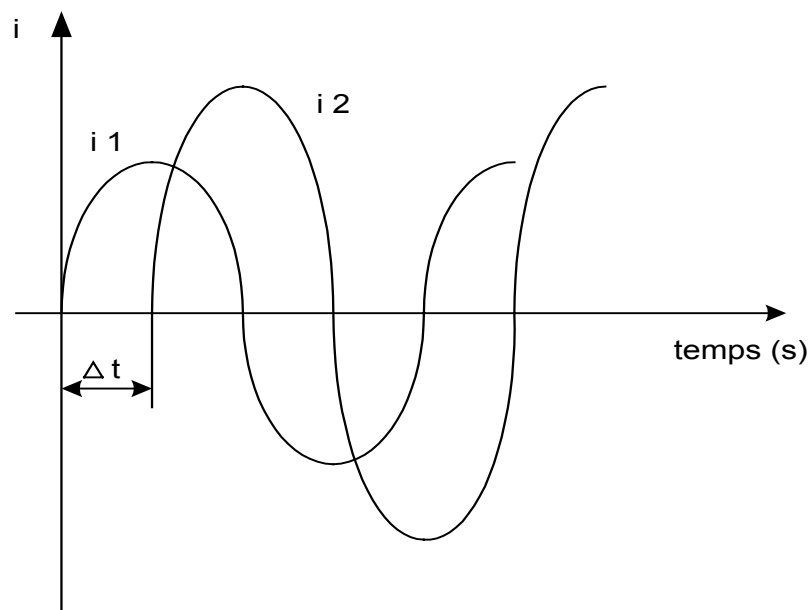
2.3. Déphasage

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

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

L'origine du déphasage peut être :

- un décalage du temps (fig. 2 – 3) ;
- un décalage d'amplitude.



Le déphasage dans le temps de deux grandeurs sinusoïdales

Fig. 2 - 3

2.4. Caractéristiques d'une onde sinusoïdale

L'expression mathématique d'une onde (ou bien grandeur) sinusoïdale est :

$$a = A_m \sin (\omega t + \varphi)$$

où les symboles ont les significations suivantes :

a : la valeur instantanée de la grandeur, correspondant au moment de temps quelconque t .

A_m : l'amplitude, appelée aussi valeur de crête de la grandeur. C'est la plus grande valeur que puisse atteindre l'onde sinusoïdale.

$\omega t + \varphi$: la phase de la grandeur sinusoïdale exprimé en radian.

φ : la phase initiale ; elle comprend la valeur du temps $t = 0$, c'est donc la phase à l'origine du temps, au début de l'onde. La phase s'exprime en radian, symbole rad.

ω : la pulsation de l'onde sinusoïdale exprimé en radian par seconde (rad/s).

Une onde sinusoïdale est une grandeur périodique, donc chaque onde sinusoïdale a sa période (T) et sa fréquence (f).

La pulsation de l'onde sinusoïdale s'exprime en fonction de la période par la formule :

$$\omega = 2 \pi f \quad \text{et comme } f = \frac{1}{T} \quad \text{on a également } \omega = \frac{2 \pi}{T}$$

En plus on définit la valeur efficace (symbole A) de la grandeur sinusoïdale :

$$A = \frac{A_m}{\sqrt{2}} = 0,707 A_m$$

La représentation graphique d'une onde sinusoïdale peut être effectuée soit en fonction du temps, soit en fonction de la phase.

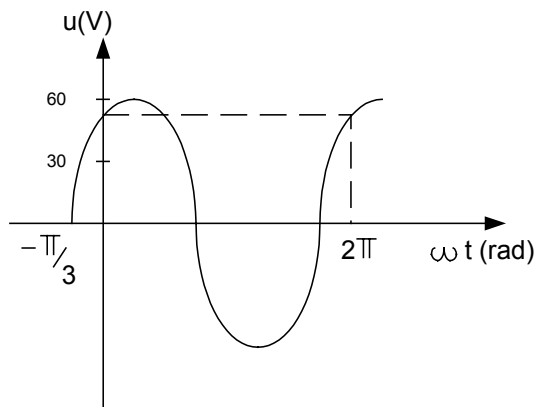
Prenons le cas d'une tension alternative sinusoïdale ayant l'expression :

$$u = 60 \sin (200 \pi t + \pi / 3) \quad (V)$$

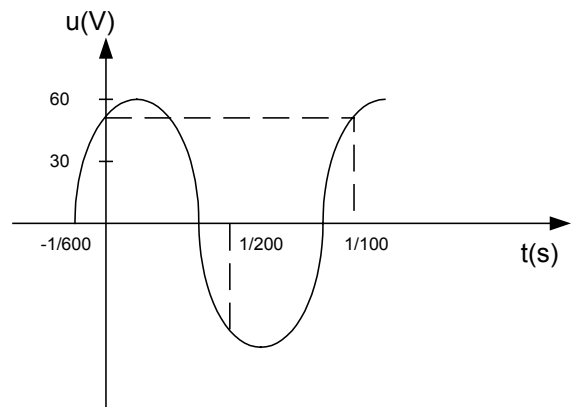
- La valeur de crête est $U_m = 60V$
- La pulsation est $\omega = 200 \pi \text{ rad}$
- La période est calculée d'après la formule :

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \text{ donc } T = \frac{2\pi}{200} = \frac{1}{100} \text{ s}$$
- La fréquence est : $f = \frac{1}{T} = 100 \text{ Hz}$
- La phase initiale : $\varphi = \pi / 3$

La représentation graphique de cette onde (fig. 2 – 4) est présentée en 2 variantes :



a) en fonction de l'angle (phase)



b) en fonction du temps

Fig. 2 - 4

Remarque : La valeur efficace d'une grandeur sinusoïdale a une importance particulière pour l'étude des circuits de courant alternatif. Souvent on la met en évidence dans l'expression de la grandeur de la manière suivante :

$$a = A \sqrt{2} \sin (\omega t + \varphi)$$

A - est la valeur efficace de la grandeur alternative,

$A \sqrt{2}$ - c'est l'amplitude A_m de celle-ci.

3. EFFET DES INDUCTANCES

Dans cette partie on étudie le comportement des bobines en courant alternatif, mais au début il faut faire un rappel de leurs propriétés les plus importantes.

3.1. Inductance d'une bobine

Lorsqu'un courant continu passe dans une bobine, celle-ci produit un champ magnétique. Le flux magnétique dans la bobine et le courant sont reliés par la relation :

$$\Phi = L \times I$$

Φ : la valeur du flux en Weber (symbole Wb);

L : l'inductance de la bobine en Henry (symbole H);

I : le courant en Ampère (symbole A).

L'inductance de la bobine est une grandeur qui dépend de ces caractéristiques constructives. On prend pour exemple le cas d'une bobine longue, pour laquelle l'expression de l'inductance est :

$$L = \mu \frac{N^2 S}{l}$$

Où :

μ : perméabilité magnétique du noyau de la bobine en Henry sur mètre (H/m);

N : nombre de spire de la bobine;

S : aire de la section de la bobine en m²;

l : longueur de la bobine en m.

3.2. Inductance mutuelle

Par définition l'inductance mutuelle des deux bobines représente le rapport entre la tension induite dans une bobine et le taux de variation du courant dans l'autre.

Le symbole de l'induction mutuelle est M . Elle est exprimée aussi en Henry (H).

Lorsque deux bobines réalisent un couplage inductif (fig. 3 – 1), les équations des flux mutuelles Φ_1 et Φ_2 sont :

$$\Phi_1 = L_1 I_1 + M I_2$$

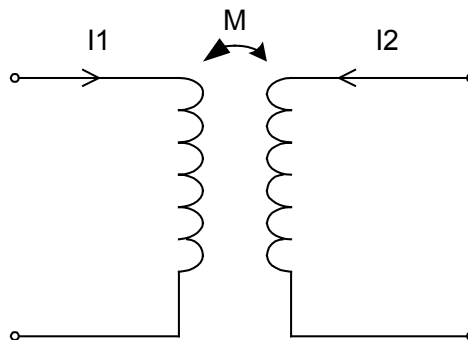
$$\Phi_2 = L_2 I_2 + M I_1$$

Où :

I_1, I_2 : les courant dans les deux bobines;

L_1, L_2 : les inductances des deux bobines;

M : l'inductance mutuelle.



Couplage mutuel de deux bobines

Fig. 3 - 1

3.3. Réactance inductive

Si une bobine est alimentée avec une tension alternative sinusoïdale de fréquence f .
On constate l'apparition dans la bobine d'un courant alternatif de même fréquence.

En plus la tension effective est proportionnelle au courant effectif dans la bobine. Leur rapport est une caractéristique de la bobine, la **réactance inductive** X_L .

L'expression de la réactance inductive est :

$$X_L = L \omega, \text{ où } \omega = 2\pi f$$

X_L : réactance inductive en Ohm (Ω);

L : inductance de la bobine en Henry (H);

f : la fréquence en Hertz (Hz).

La loi d'Ohm pour une bobine alimentée en courant alternatif prend la forme :

$$I = \frac{U}{X_L}, \quad X_L = L 2\pi f$$

Où :

I : le courant efficace en A;

U : la tension efficace en V;

X_L : la réactance inductive de la bobine en Ω .

3.4. Déphasage entre le courant et la tension

Lorsqu'on visualise à l'aide d'un oscilloscope bicourbe les graphes de la tension alternative aux bornes d'une bobine et du courant alternatif engendré on obtient l'oscillogramme suivant (fig. 3 – 2) :

Les graphes mettent en évidence le déphasage d'un quart de période ($T/4$) de la tension en avant sur le courant.

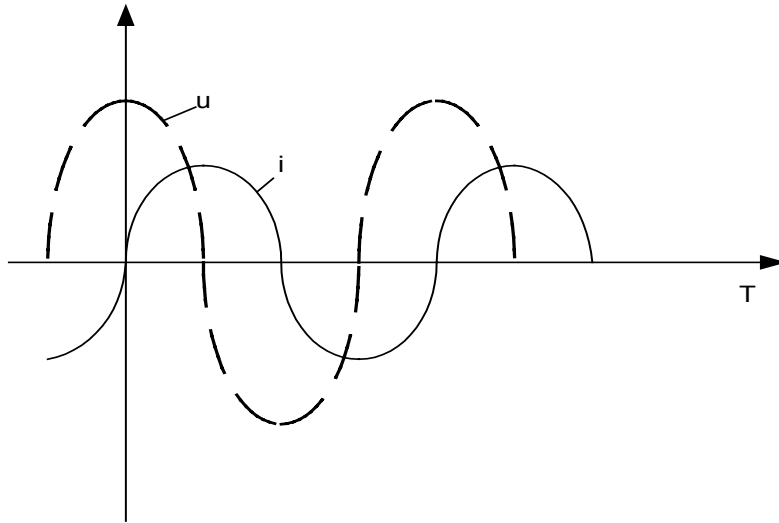


Fig. 3 - 2

3.5. Groupements d'inductances

3.5.1. Groupement en série

Si deux bobines d'inductance L_1 et L_2 sont reliées en série dans un circuit de courant alternatif, l'inductance équivalente est la somme des inductances des deux bobines.

Donc :

$$L_e = L_1 + L_2$$

On peut généralisé pour plusieurs bobines :

$$L_e = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n$$

3.5.2. Groupement en parallèle

Si deux bobines d'inductance L_1 et L_2 sont reliées en parallèle dans un circuit de courant alternatif, l'inverse de l'inductance équivalente est la somme des inverses des inductances des bobines :

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}$$

Ce résultat peut être généralisé pour plusieurs bobines en parallèle.

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n}$$

4. EFFET DES CONDENSATEURS

Dans cette partie on étudie le comportement des condensateurs en courant alternatif, mais au début il faut faire un rappel de leurs propriétés les plus importantes.

4.1. Constitution

Un condensateur est constitué par deux surfaces métalliques appelées *armatures* séparées par un isolant ou *diélectrique*. Lorsqu'il est relié à une tension électrique le condensateur se charge.

Soit Q la quantité d'électricité emmagasinée, la charge prise par le condensateur est proportionnelle à la tension appliquée à ses bornes.

$$Q = C U$$

Où :

U : la tension aux bornes en volt, (V)

C : la capacité du condensateur en farad, (F)

Q : la charge en coulomb, (C).

Le **Farad** c'est une unité trop grande, voilà pourquoi on utilise les sous-multiples suivants :

Le microfarad $1\mu F = 10^{-6} F$

Le nanofarad $1nF = 10^{-9} F$

Le picofarad $1pF = 10^{-12} F$

4.2. Capacité d'un condensateur plan

La capacité d'un condensateur est proportionnelle à la surface des plaques, inversement proportionnel à la distance entre les armatures et elle dépend également de la nature de l'isolant. Pour un condensateur plan la formule de la capacité est :

$$C = \varepsilon \frac{S}{d}$$

Où :

C : la capacité du condensateur en farad, (F)

S : la surface des plaques en m²

d : la distance entre les armatures en m

ε : la permittivité électrique de l'isolant en F/m.

4.3. Types de condensateurs

Il y a une large gamme de condensateurs industriels qui peuvent être classifiés d'après la forme des armatures, la nature de l'isolant, etc. On distingue :

- Condensateurs aux armatures fixes :
 - Condensateurs au papier
 - Condensateurs au plastique
 - Condensateurs à l'huile
 - Condensateurs électrochimiques
- Condensateurs variables (utilisant l'air comme isolant).

4.4. Groupements de condensateurs

4.4.1. Groupement en série

Soit deux condensateurs de capacité C_1 et C_2 reliés en série, l'inverse de la capacité équivalente C_e est égale à la somme des inverses des capacités.

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Ce résultat peut être généralisé pour plusieurs condensateurs en série :

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

4.4.2. Groupement en parallèle

La capacité équivalente des deux condensateurs en parallèle est égale à la somme des capacités

$$C_e = C_1 + C_2$$

Ce résultat peut être généralisé pour plusieurs condensateurs en parallèle :

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

Remarque importante: Le condensateur arrête le passage du courant continu

4.5. Réactance capacitive

Lorsqu'on applique aux bornes d'un condensateur une tension alternative à fréquence f on constate l'apparition d'un courant alternatif de même fréquence. En plus la tension efficace est proportionnelle au courant efficace dans le condensateur. Leur rapport est une caractéristique du condensateur qu'on appelle la **réactance capacitive** (symbole X_c).

L'expression de la réactance capacitive est :

$$X_c = \frac{1}{C\omega} \quad \text{ou} \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Où :

X_c : la réactance capacitive en ohm (Ω)

C : la capacité du condensateur en Farad (F)

f : la fréquence en Hertz (Hz)

ω : la pulsation en radian par seconde, rad/s

La loi d'Ohm pour un condensateur alimenté en courant alternatif prend la forme :

$$I = U / X_c ; I = U.C \omega$$

Où:

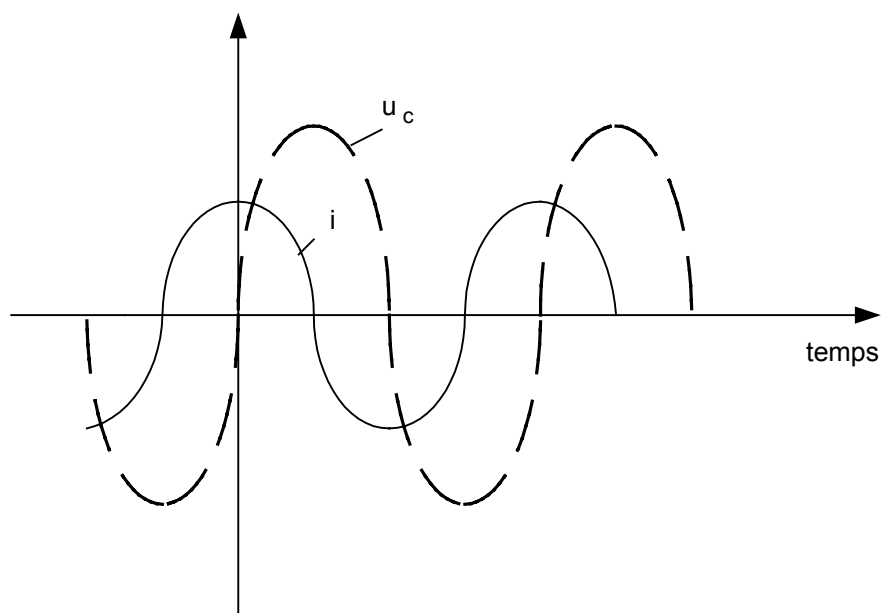
I : le courant efficace en A

U : la tension efficace en V

X_c : la réactance capacitive en Ω

4.6. Déphasage entre courant et tension

Lorsqu'on visualise à l'aide d'un oscilloscope bicourbe les graphes de la tension alternative aux bornes d'un condensateur et du courant alternatif qui le traverse, on obtient l'oscillogramme présenté ci-dessous (fig. 4 – 1) :



Déphasage de la tension par rapport au courant d'un condensateur

Fig. 4 - 1

Les graphes mettent en évidence le déphasage du courant, en avance d'un quart de période ($T/4$) sur la tension.

5. LOIS DE ELECTROMAGNETISME

Cette partie présente quelques phénomènes et les lois importantes de l'électromagnétisme qui sont à la base d'un grand nombre d'applications reposant sur l'utilisation de l'énergie électrique.

5.1. Champ magnétique créé par un courant électrique

Un conducteur parcouru par un courant électrique crée un champ magnétique ayant de lignes de champ fermées autour de celui-ci (fig. 5 – 1).

5.1.1. *Forme et sens du champ*

On peut mettre en évidence la forme du champ en utilisant la limaille de fer saupoudrée sur un carton traversé par le conducteur parcouru par le courant. La limaille se dispose autour du conducteur en une série de cercles concentriques relevant la présence et la forme de lignes du champ.

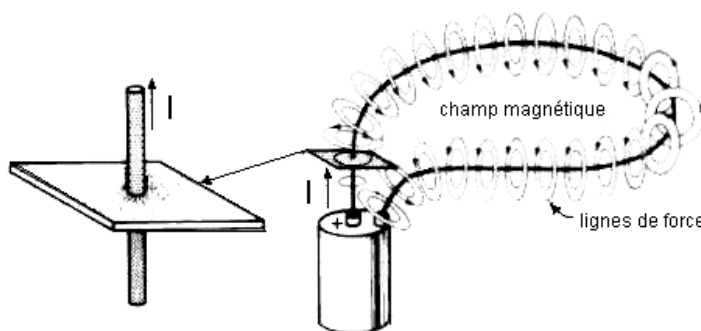


Fig. 5 - 1

Le sens des lignes du champ peut être déterminé à l'aide d'une boussole mais il est plus simple d'utiliser une des 2 règles suivantes :

- *Règle du tire-bouchon* : le sens de ligne du champ est le sens de rotation du tire-bouchon qui avance dans le sens du courant.
- *Règle de la main droite* : on tient le conducteur dans la main droite, le pouce étant orienté dans le sens du courant les doigts pointeront dans le sens du flux (fig. 5 – 2).

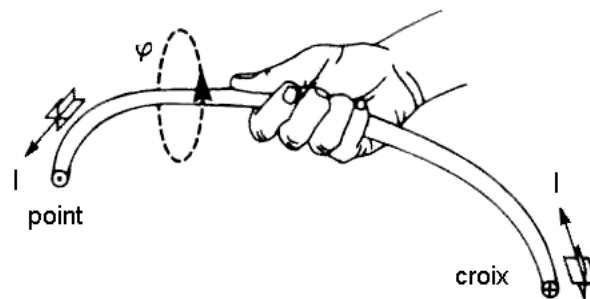


Fig. 5 - 2

5.1.2. Densité du flux

Lorsque on s'éloigne du conducteur on remarque la diminution de la densité du flux magnétique. En effet, les lignes de force qui entourent le conducteur deviennent de plus en plus espacées. A quelques centimètres du conducteur le champ devient si faible qu'il réussit à peine à faire dévier l'aiguille d'une boussole.

On peut calculer la valeur de la densité du flux autour d'un conducteur rectiligne par la formule :

$$B = 2 \times 10^{-7} \times \frac{I}{d}$$

Où :

- B : la densité du flux en tesla, (T)
- I : le courant en ampère, (A)
- d : la distance au centre du conducteur en mètre.

2×10^{-7} : la constante tenant compte des unités

5.1.3. Force magnétomotrice (f.m.m.)

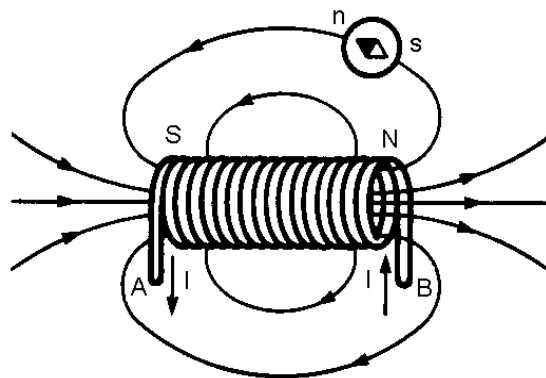
On appelle la *force magnétomotrice* d'une bobine le produit du courant qui la traverse par le nombre de spires. L'unité de la force magnétomotrice en SI est l'ampère [A].

5.1.4. Champ magnétique d'une bobine longue

Un courant qui parcourt une bobine produit autour un champ magnétique. A l'intérieur de la bobine les lignes de force sont parallèles à son axe, à l'extérieur elles se referment d'une extrémité vers l'autre (fig. 5 – 3).

On appelle le pôle Nord l'extrémité de la bobine par laquelle sortent les lignes de force et le pôle Sud l'extrémité par laquelle elles rentrent.

Le sens des lignes de force peut être déterminé avec la règle de la main droite : lorsque les doigts indiqueront le sens du courant dans la bobine, le pouce est pointé vers le pôle Nord. Par ailleurs on peut mettre en évidence le sens des lignes du champ avec une boussole.



Champ magnétique créé par une solénoïde

Fig. 5 - 3

5.2. Force électromagnétique

Lorsqu'un conducteur parcouru par un courant est placé dans un champ magnétique, une force appelée électromagnétique s'exerce sur celui-ci. La valeur maximale de la force électromagnétique correspond à une orientation perpendiculaire du conducteur par rapport aux lignes du champ. Elle est donnée par l'équation :

$$F = B \times I \times l$$

où :

- F : la force électromagnétique agissant sur le conducteur [N]
- B : densité du flux en tesla [T]
- l : longueur du conducteur placé dans le champ en [m]
- I : courant circulant dans le conducteur [A]

Remarque : Lorsque le conducteur est parallèle au champ, la force électromagnétique est nul.

Le sens de la force électromagnétique peut être déterminé avec la *règle des trois doigts* :

- 1 - Orienter le pouce, l'index et le majeur de la main droite afin qu'ils soient à 90° l'un sur l'autre.**
- 2 - Pointer le majeur dans la direction du flux**
- 3 - Pointer l'index dans la direction du courant**
- 4 - Le pouce indiquera le sens de la force électromagnétique**

5.3. Induction électromagnétique

Le phénomène de l'induction électromagnétique fut découvert par Michael Faraday en 1831. Il consiste en l'apparition d'une tension induite appelée force électromotrice (f.é.m.) induite dans un circuit électrique à l'intérieur duquel le flux varie avec le temps.

La valeur de cette tension induite est proportionnelle au taux de variation du flux. La loi de l'induction électromagnétique a pour l'expression :

$$E = \frac{\Delta \phi}{\Delta T}$$

où :

E : tension induite en volt

$\Delta \phi$: variation du flux à l'intérieur du circuit en (Wb)

ΔT : intervalle de temps en secondes (s)

On peut facilement mettre en évidence le phénomène de l'induction électromagnétique. Il suffit de déplacer un aimant à l'intérieur d'une bobine aux bornes de laquelle on branche un voltmètre. L'indication de l'appareil coïncide avec le mouvement de l'aimant et cesse une fois que celui-ci est en état de repos.

5.3.1. Loi de Lenz

La polarité de la tension induite est telle qu'elle tend à faire circuler un courant dont le flux s'oppose à la variation du flux inducteur à l'intérieur du circuit.

La loi de l'induction électromagnétique a un grand nombre d'applications pratiques dont la plupart repose sur son action génératrice. Parmi les plus répandues il faut citer les dynamos et les alternateurs qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.

5.3.2. Tension induite dans un conducteur

Lorsqu'on déplace un conducteur rectiligne dans un champ magnétique de façon à couper les lignes de force, il apparaît une différence de potentiel entre ses extrémités. On dit qu'une tension est induite dans le conducteur. La valeur de la

tension induite dépend seulement du flux coupé par seconde conformément à la loi de l'induction électromagnétique.

$$E = \frac{\Delta \phi}{\Delta T}$$

Si le conducteur rectiligne coupe les lignes du flux à l'angle droit, la valeur de la tension induite prend la forme :

$$E = \frac{B}{v}$$

car la variation du flux est due à la surface balayée par le conducteur :

$$\Delta \phi = B \times \Delta S = B \times l \times v \times \Delta T$$

- E : la tension induite en volts [V]
B : la densité de flux en teslas [T]
l : la longueur du conducteur dans le champ en mètres [m]
v : la vitesse de déplacement en mètre/secondes [m/s]

La polarité de la tension induite peut être déterminé par la règle des trois doigts (la règle de Fleming) (fig. 5 – 4) :

- 1 - Éteindre les doigts de la main droite de sorte que le pouce soit perpendiculaire aux doigts index et majeur écartés à 90°.
- 2 - Pointer le pouce dans la direction du déplacement du conducteur.
- 3 - Pointer l'index dans la direction du flux.
- 4 - Le majeur indiquera l'extrémité (+) du conducteur.

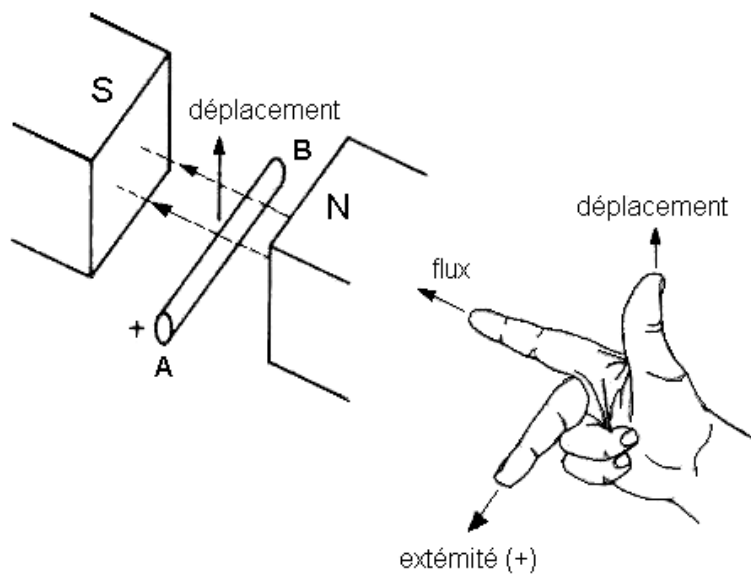


Fig. 5 - 4

6. CARACTERISTIQUES DES TRANSFORMATEURS

Dans ce chapitre seront présentées les notions élémentaires sur le transformateur qui est par ailleurs un des plus simples et utiles appareils électriques.

Le transformateur permet de modifier les paramètres tension et courant de la puissance d'un circuit électrique en courant alternatif. De cette manière il assure les meilleurs performances économiques pour le transport de l'énergie électrique à grandes distances et sa distribution dans les récepteurs.

6.1. Structure élémentaire du transformateur

Les éléments constitutifs principaux d'un transformateur sont :

- le circuit magnétique ;
- les deux enroulements : l'un appelé primaire de N_1 spires et l'autre secondaire de N_2 spires (fig. 6 – 1).

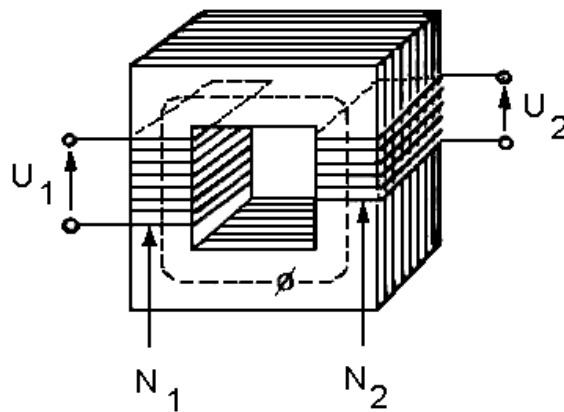


Fig. 6 - 1

Lorsque l'enroulement primaire est alimenté avec une tension alternative U_1 , un flux magnétique est créé par celle-ci. Le flux variable se renferme par le circuit magnétique et il induit dans l'enroulement secondaire, conformément à la loi de l'induction électromagnétique, une force électromotrice (f.é.m.).

Si on branche aux bornes de ce secondaire un récepteur il sera parcouru par un courant alternatif, ayant pour cause la f.é.m. induite. La puissance électrique passe du primaire par l'intermédiaire de la variation du flux au circuit secondaire où elle peut être consommée par un récepteur.

Le flux créé par le courant dans le circuit primaire peut être divisé en deux parties : un flux mutuel Φ_{m1} qui embrasse les spires du secondaire et produit la f.é.m. et un flux de fuite qui ne les embrasse pas.

Pour obtenir une grande f.é.m. et un bon couplage entre les bobines on dispose le secondaire par dessus le primaire. Ainsi le flux de fuite n'est plus qu'une fraction négligeable du flux total et le flux mutuel atteint presque la valeur du flux créé par le primaire.

Dans ce cas le circuit magnétique est dit de forme cuirassée. Les enroulements sont disposés sur la colonne centrale et le flux se renferme à travers les deux colonnes latérales de section réduite à la moitié par rapport à celle de la colonne centrale.

La fig. 6 - 2 présente les formes des tôles pour un circuit magnétique d'un transformateur monophasé de forme cuirassée.

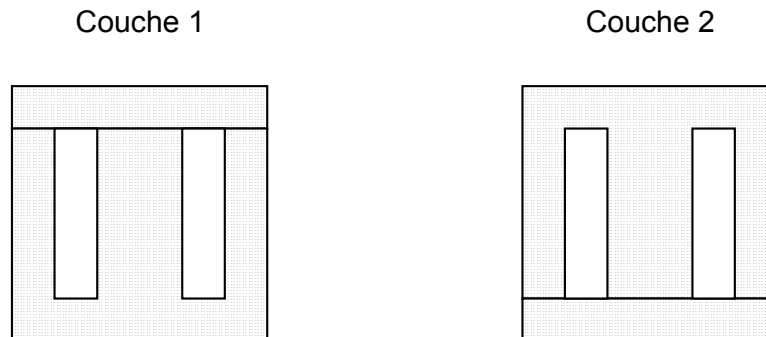


Fig. 6 - 2

6.2. Rapport de transformation

La relation entre la tension inductrice dans le primaire et la f.é.m. induite dans le secondaire constitue le rapport de transformation du transformateur et son expression est :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Ou :

U_1 : la tension inductrice au primaire en [V]

U_2 : la f.é.m. au secondaire

N_1 : le nombre de spires du primaire

N_2 : le nombre de spires du secondaire

Le rapport de transformation dépend des nombres de spires et il est indépendant de la charge.

Lorsqu'une charge est raccordée au secondaire d'un transformateur, un courant I_2 s'établit tout de suite. (fig. 6 - 3).

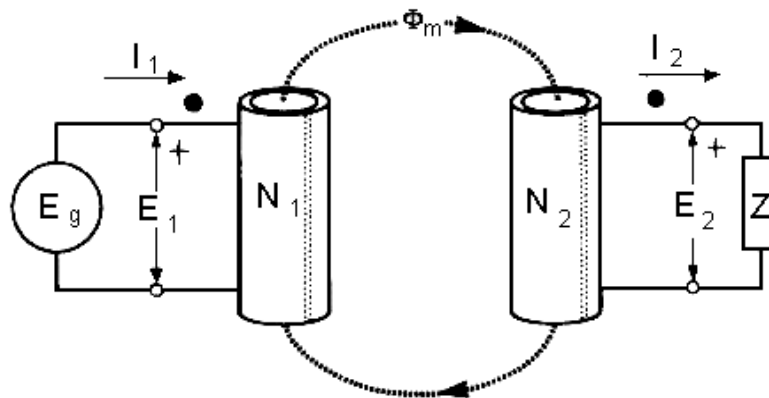


Fig. 6 - 3

Dans le cas d'un transformateur idéal il n'y a aucune perte de puissance, donc les puissances apparentes dans le primaire et le secondaire sont égales :

$$S_1 = S_2$$

Les expressions des puissances apparentes sont :

$$S_1 = U_1 \times I_1$$

$$S_2 = U_2 \times I_2$$

On a $U_1 \times I_1 = U_2 \times I_2$ ou encore $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$

Remarque : L'épaisseur du fils de l'enroulement dépend de l'intensité du courant.

Ainsi pour un transformateur élévateur de tension, la tension primaire U_1 sera inférieure à celle du secondaire, le courant primaire I_1 sera supérieur à celui du secondaire. L'enroulement primaire comprendra un petit nombre de spires en fil épais et l'enroulement secondaire, un grand nombre de spires en fil fin.

Si le transformateur est abaisseur de tension le fil sera plus gros au secondaire. Il faut mentionner que le transformateur est parfaitement réversible en ce sens que le primaire peut agir comme un secondaire et vice-versa.

6.3. Polarité de transformateur

Dans un transformateur monophasé alimenté par une tension alternative U_1 les bornes de l'enroulement primaire sont repérées par les nombre 1 et 2 et les bornes du secondaire sont repérées par 3 et 4 (fig. 6 - 4). Au secondaire on obtient la f.é.m. induite U_2 . Supposant qu'au moment où les tensions atteignent leur maximum la borne 1 est positive par rapport à la borne 2 et que la borne 3 est positive par rapport à la borne 4, on dit que les bornes 1 et 3 possèdent la même polarité.

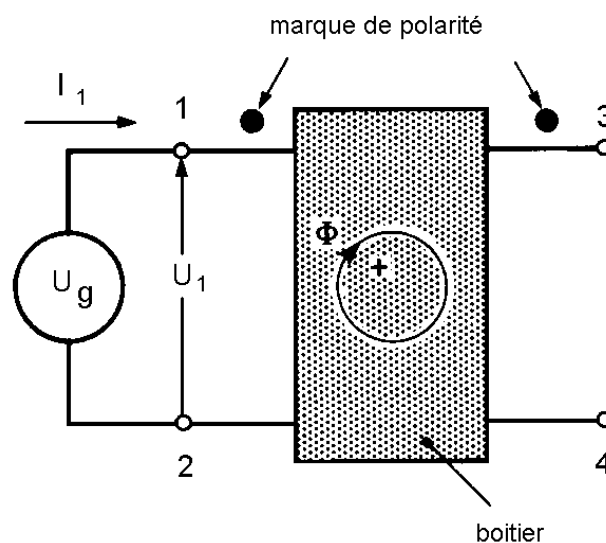


Fig. 6 - 4

On indique la polarité en plaçant un point noir vis-à-vis de la borne 1 et un autre vis-à-vis de la borne 3. Ces points sont appelés des marques de polarité.

Remarque : On pourrait aussi bien placer les marques de polarité à côté des bornes 2 et 4 car elles deviennent à leur tour simultanément positives.

6.4. Problèmes d'isolement

Il est nécessaire de bien isoler les enroulements entre eux et par rapport à la masse. On utilise des écrans isolants placés entre la masse et les bobinages ou entre les bobinages primaire et secondaire.

Pour le transformateur de forme cuirassée l'enroulement de basse tension est disposé sur la colonne. Elle est plus facile à bobiner et à isoler.

6.5. Autotransformateur

C'est un transformateur composé d'un enroulement unique sur lequel on réalise une prise qui peut être fixe ou réglable. L'enroulement est monté sur un noyau d'acier.

La haute tension comprend tout l'enroulement et la basse tension est obtenue entre une extrémité de l'enroulement haute tension et une prise intermédiaire.

La tension induite est proportionnelle au nombre de spires. Ainsi pour une tension d'alimentation U_1 dans la primaire comprenant N_1 spires et une prise C (fig. 6 - 5), donnant accès à une section de N_2 spires, la tension induite U_2 accessible dans le secondaire est :

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} \times U_1$$

Cette relation est la même que celle obtenue avec un transformateur à 2 enroulement séparés N_1 et N_2 . Cependant l'enroulement secondaire fait partie de l'enroulement primaire. Il suit que l'autotransformateur est plus petit, moins lourd et moins coûteux qu'un transformateur conventionnel de même puissance.

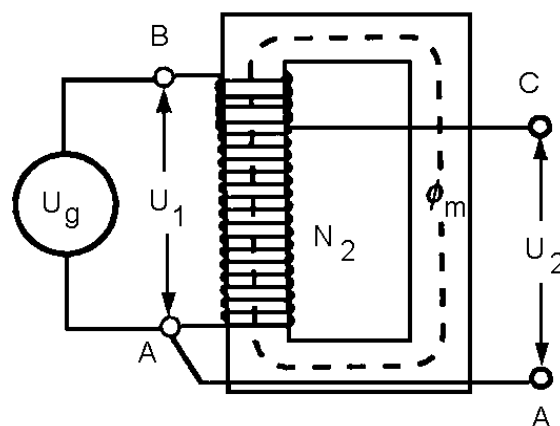


Fig. 6 - 5

Par contre l'absence d'isolation entre les enroulements de la basse tension et de la haute tension peut constituer un grand inconvénient et même être dangereux.

7. CARACTERISTIQUES DES CIRCUITS A COURANT ALTERNATIF

Dans les chapitres précédentes on a vu que les composants linéaires et passifs qu'on peut trouver dans les circuits de courant alternatif sont : les résistances, les bobines et les condensateurs et on a pris connaissance de leurs caractéristiques.

Un circuit de courant alternatif peut comprendre un, deux ou plusieurs composants des types mentionnés, groupés d'une certaine façon, ou identifier l'association série, l'association parallèle ou l'association mixte des composants.

L'alimentation d'un circuit à courant alternatif est réalisée avec une tension alternative sinusoïdale qui s'applique aux bornes du circuit.

Quelque soit la structure du circuit on peut identifier le courant principal du circuit : c'est le courant qui sort d'une borne d'alimentation et entre dans l'autre borne d'alimentation.

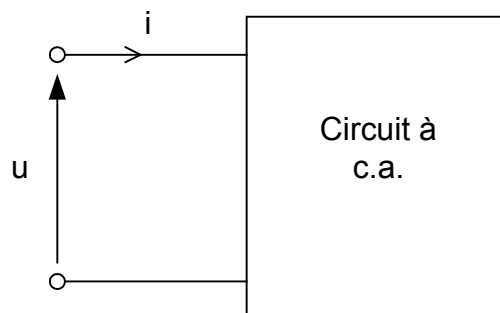


Fig. 7 - 1

La fig. 7 - 1 présente symboliquement un circuit à courant alternatif, d'une structure quelconque, alimenté avec la tension alternative de valeur efficace U et parcourue par le courant principal de valeur efficace I .

Par définition, l'impédance d'un circuit à courant alternatif est le rapport entre la tension efficace appliquée aux bornes et le courant efficace principal de celui-ci.

L'impédance est une caractéristique très importante du circuit à courant alternatif. Elle est symbolisée par la lettre majuscule Z. Alors :

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

Où :

- U : la tension efficace en Volt.
- I : le courant efficace en Ampère.**
- Z : l'impédance en Ohm (Ω).

La puissance apparente d'un circuit à courant alternatif est exprimée par le produit entre la tension efficace aux bornes du circuit et le courant efficace principal.

Le symbole de la puissance apparente est S, donc :

$$S = U \times I$$

Où :

- U : la tension en volts (V)
- I : le courant en ampères (A)**
- S : la puissance apparente en volt-ampères (VA).

On remarque que l'unité de la puissance apparente n'est pas le watt, par ailleurs l'unité de mesure de la puissance. En fait, la puissance apparente n'est pas la puissance consommée dans le circuit respectif. La puissance efficace consommée dans le circuit est appelée puissance active et elle est exprimée en watts (W).

7.1. Représentation vectorielle des grandeurs sinusoïdales

Dans une des chapitres précédentes on a mis en évidence l'existence d'un déphasage entre les grandeurs - tension et courant alternatif - associées à un élément de circuit.

Dans le cas d'une résistance pure la tension et le courant sont en phase.

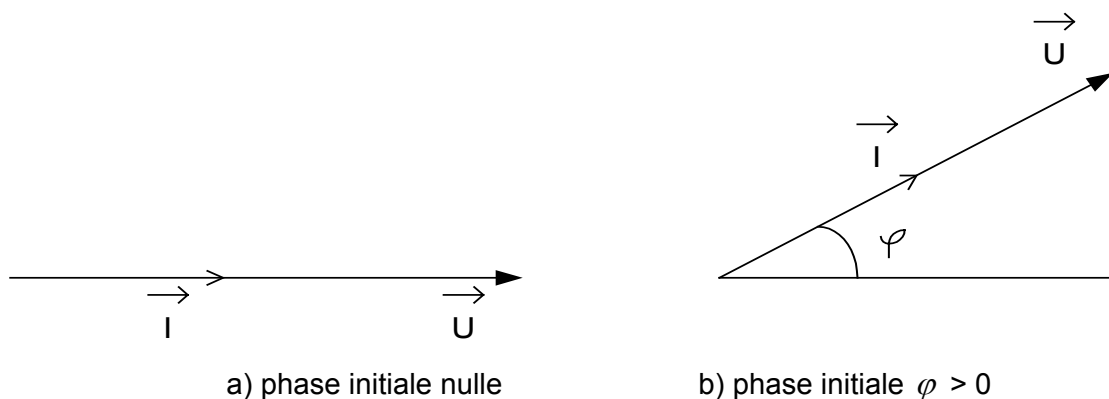
Dans le cas d'une bobine (inductance pure), la tension est déphasé de 90° en avant sur le courant.

Dans le cas d'un condensateur (capacité pure), la tension est déphasé de 90° en arrière sur le courant.

La plus part des récepteurs ne sont pas des éléments purs de circuit, la tension et le courant associés sont déphasé d'un angle différent de 90° . La grandeur qui caractérise dans ce cas le récepteur est l'impédance.

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

La représentation vectorielle permet de mettre en évidence le déphasage entre les grandeurs sinusoïdales de même fréquence, associées à un élément ou à un circuit.

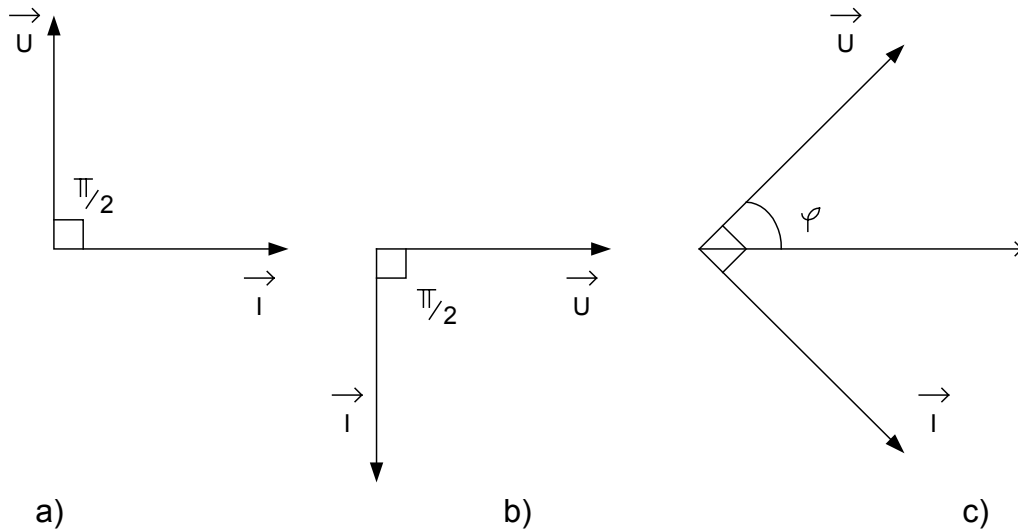


Représentation des vecteurs de la tension et du courant dans le cas d'une résistance pure

Fig. 7 - 2

Les figures ci-dessus donnent la représentation des vecteurs de la tension et du courant associés à chaque élément idéal de circuit : résistance pure (fig. 7 – 2),

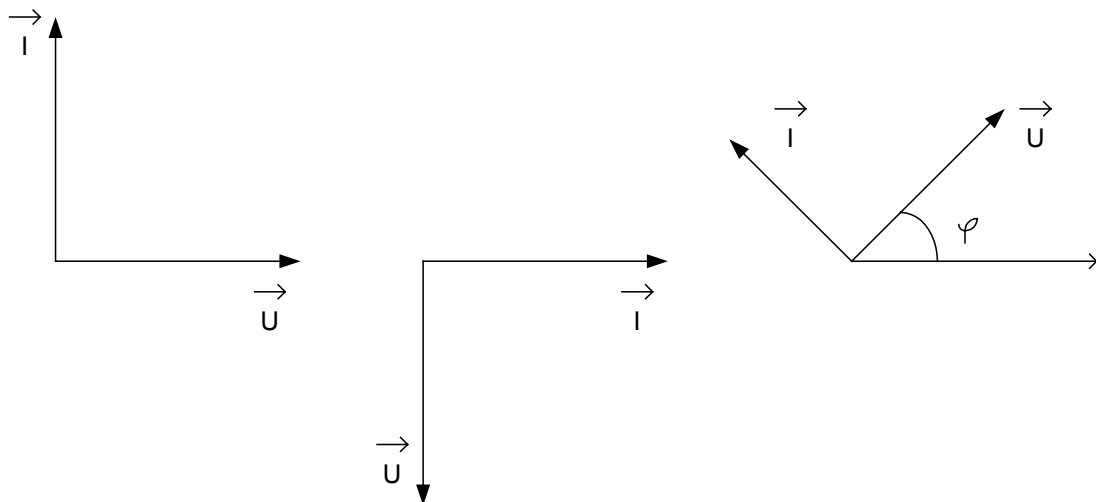
inductance pure (fig. 7 – 3) et capacité pure (fig. 7 - 4), ainsi qu'à des éléments réels caractérisés par l'impédance (fig. 7 - 5).



Représentation des vecteurs de la tension et du courant dans le cas d'une inductance pure

a) Le vecteur du courant est pris comme référence ; b) Le vecteur de la tension pris comme référence ; c) Le vecteur d'origines des phases pris comme référence

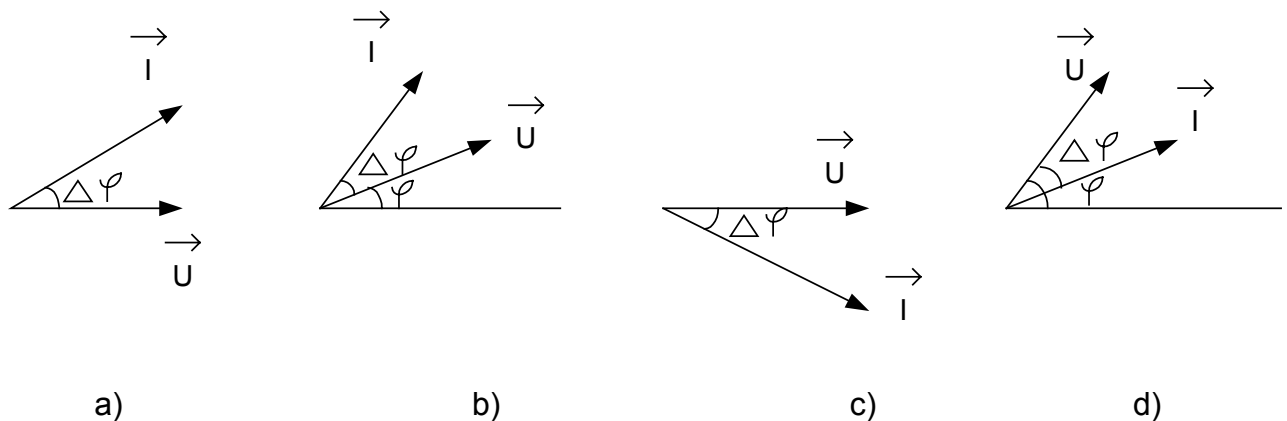
Fig. 7 - 3



Représentation des vecteurs de la tension et du courant dans le cas d'une capacité pure

a) Le vecteur du courant est pris comme référence ; b) Le vecteur de la tension pris comme référence ; c) Le vecteur d'origines des phases pris comme référence

Fig. 7 - 4



Représentation des vecteurs de la tension et du courant dans le cas d'un récepteur réel :

- a) Récepteur à caractère capacitif (le courant de phase $\Delta\varphi < 90^\circ$ en avant sur la tension), vecteur tension comme référence (phase nulle) ;
- b) Récepteur à caractère capacitif (le courant est déphasé de $\Delta\varphi < 90^\circ$ en avant sur la tension), vecteur tension de phase $\varphi > 0$;
- c) Récepteur à caractère inductif (le courant est déphasé de $\Delta\varphi < 90^\circ$ en arrière sur la tension), vecteur tension comme référence (phase nulle)
- d) Récepteur à caractère inductif (le courant est déphasé de $\Delta\varphi < 90^\circ$ en arrière sur la tension), vecteur tension de phase $\varphi > 0$.

Fig. 7 - 5

Conclusion :

Le comportement des composants en courant alternatif, visant le déphasage entre le courant et la tension qui leurs sont associés, peut être mis en évidence avec la représentation vectorielle :

- Un déphasage de 0° indique que le composant est une résistance.
- Un déphasage de 90° caractérise une réactance (donc une bobine ou un condensateur).
- Un déphasage compris entre 0° et 90° indique une impédance (donc un récepteur réel).

7.2. Diagramme vectoriel d'un circuit à courant alternatif

Le chapitre étudie les combinaisons en série et en parallèle des éléments passifs des circuits en courant alternatif : la résistance, la bobine et le condensateur, en utilisant les diagrammes vectoriels.

7.2.1. Circuit R – L – C série

Soit un circuit constitué d'une résistance de valeur R , d'une bobine d'inductance L et d'un condensateur de capacité C associés en série et alimentés avec une tension alternatif de valeur efficace U et de fréquence f . Un courant alternatif de valeur efficace I s'établit dans le circuit. Les tensions aux bornes de chaque composant seront U_R , U_L et U_C (fig. 7 - 6).

Les valeurs efficaces de ces tensions ont pour l'expression :

$U_R = R I$ la tension efficace aux bornes de la résistance.

$U_L = X_L I$ la tension efficace aux bornes de la bobine avec X_L la réactance inductive de la bobine, où $X_L = L \omega$, et $\omega = 2\pi f$

$U_C = X_C I$ la tension efficace aux bornes du condensateur, avec X_C la réactance capacitive du condensateur, ou $X_C = \frac{1}{C\omega}$ et $\omega = 2\pi f$

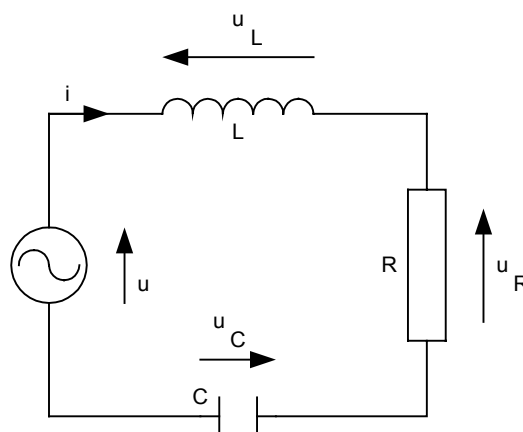


Fig. 7 - 6

Les représentations des vecteurs de la tension et du courant pour chaque composant : résistance, inductance et condensateur, sont présentées sur la fig. 7 – 7.

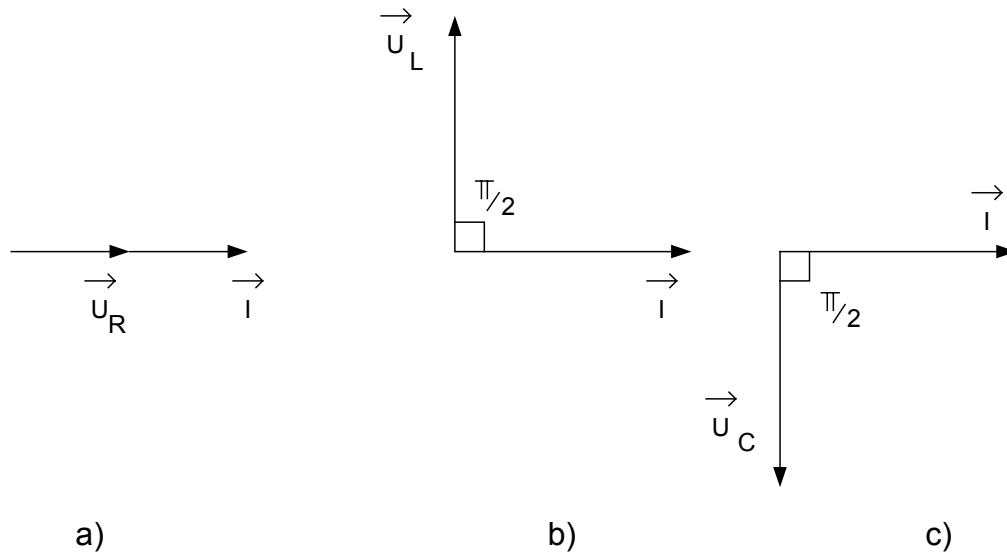


Fig. 7 - 7

Le vecteur représentant la tension U est donné par la somme vectorielle des vecteurs : U_R , U_L et U_C (la loi des mailles pour un circuit en série). On obtient graphiquement le vecteur U en traçant le diagramme vectoriel du circuit.

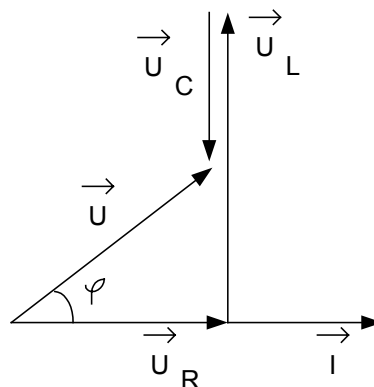


Fig. 7 - 8

En effet, le diagramme vectoriel est obtenu suite à la combinaison des représentations des vecteurs de la tension et du courant pour chaque composant. On choisit le courant comme référence des phases car il est commun pour tous les composants (fig. 7 – 8)

Les vecteurs des tensions U_R , U_L et U_C sont disposés de sorte qu'ils réalisent une ligne polygonale (l'extrémité du U_R coïncide avec l'origine du U_L , l'extrémité du U_L coïncide avec l'origine du U_C) tout en présentant leurs déphasages sur le vecteur du courant I : 0° pour U_R et 90° pour U_L et -90° pour U_C . Le vecteur U referme la ligne polygonale réalisée par les vecteurs des tensions.

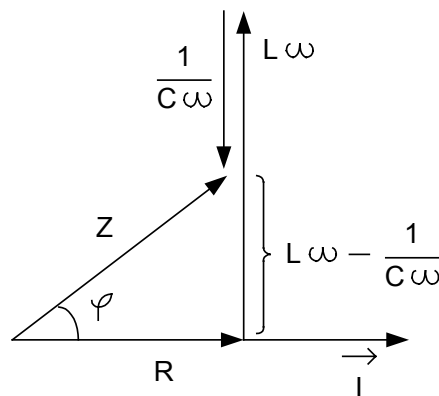


Fig. 7 - 9

Le diagramme vectoriel réalisé (appelé aussi le diagramme de Fresnel) permet d'obtenir graphiquement les phases et les modules des vecteurs représentés. Ainsi on a marqué le déphasage φ entre la tension aux bornes du circuit et le courant.

Il est possible de tracer le diagramme de Fresnel à l'échelle des impédances. Il suffit de diviser par I le module de chacun des vecteurs représentant les tensions aux bornes des éléments U_R , U_L et U_C pour obtenir une représentation homologue qu'on appelle **le triangle des impédances** (fig. 7 – 9).

7.2.2. Circuit R – L – C parallèle

Soit un circuit constitué d'une résistance R, d'une bobine d'inductance L et d'un condensateur de capacité C associés en parallèle et alimentés avec tension alternative de valeur efficace U et fréquence f. Les trois composants associés en parallèle sont soumis à cette même tension U. Dans chaque composant s'établit un courant alternatif de valeur efficace I_R pour la résistance, I_L pour la bobine et I_C pour le condensateur et I c'est la valeur efficace du courant principal dans le circuit (fig. 7 – 10).

Les valeurs efficaces de ces courants ont les expressions suivantes :

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

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

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

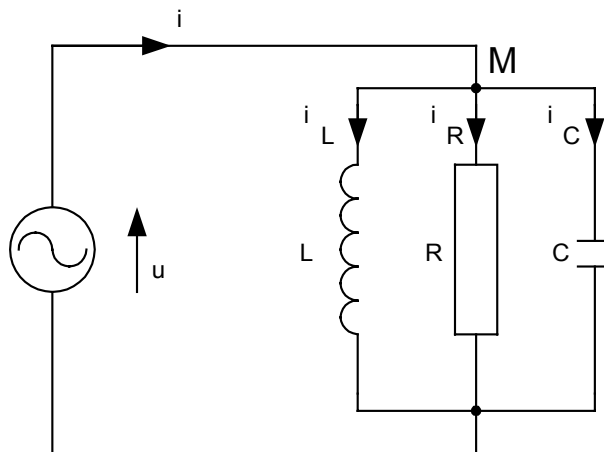


Fig. 7 - 10

Les représentations des vecteurs de la tension et du courant pour chaque composant : résistance, bobine et condensateur, sont présentées sur la fig. 7 - 11 :

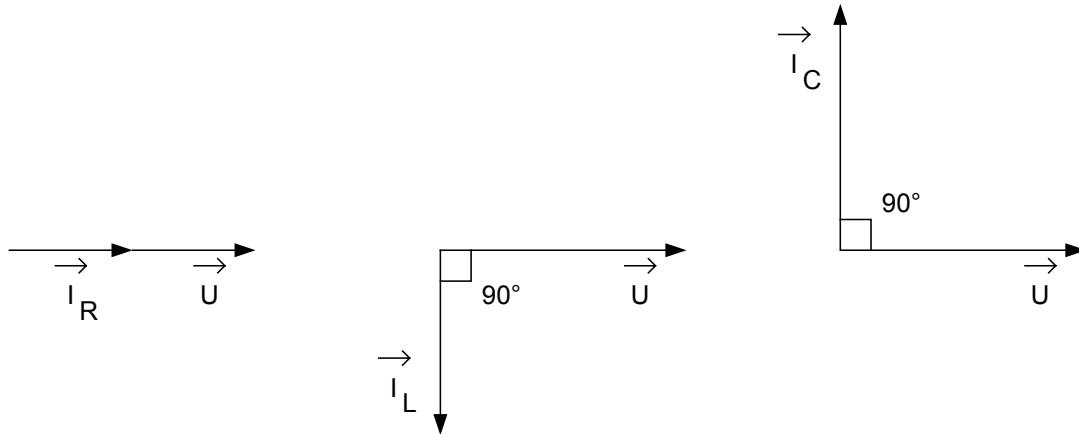


Fig. 7 - 11

Le vecteur I représentant le courant principal du circuit est donné par la somme vectorielle des vecteurs I_R , I_L et I_C .

On obtient graphiquement le vecteur I en rassemblant les représentations des vecteurs tension – courant pour chaque composant du diagramme vectoriel (fig. 7 – 12).

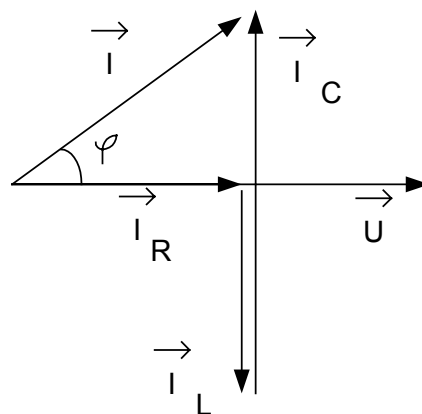


Fig. 7 - 12

Il est commode de choisir le vecteur de la tension comme référence des phases car pour le groupement parallèle la tension est commune pour tous les composants (la loi des nœuds).

Les vecteurs I_R , I_L , et I_C sont disposés de sorte qu'ils réalisent une ligne polygonale (l'extrémité du I_R coïncide avec l'origine du I_L ; l'extrémité du I_L coïncide avec l'origine du vecteur I_C) tout en préservant leur déphasage sur le vecteur de la tension U : 0 pour la résistance, -90° pour la bobine et 90° pour le condensateur. Le vecteur I referme la ligne polygonale réalisée par les vecteurs des courants.

Le diagramme vectoriel réalisé (appelé aussi le diagramme de Fresnel) permet d'obtenir graphiquement les phases et les modules des vecteurs représentés. L'angle marqué correspond au déphasage entre la tension aux bornes du circuit et le courant principal.

L'admittance représente l'inverse de l'impédance. Cette grandeur est symbolisé par Y :

$$Y = \frac{1}{Z}$$

Lorsqu'on divise par U le module de chacun des vecteurs représentant les courants dans chaque composant : I_R , I_L et I_C , on obtient une représentation homologue qu'on appelle **le triangle d'admittances** (fig. 7 – 13).

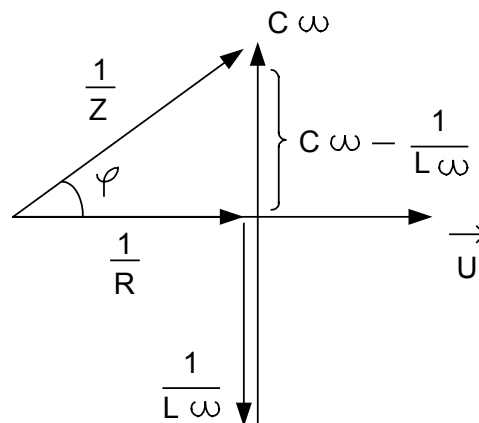


Fig. 7 – 13

7.3. Calcul des valeurs aux différents points d'un circuit à courant alternatif

Dans ce chapitre on complète l'étude des circuits simples série et parallèle en courant alternatif avec le calcul des grandeurs caractéristiques : l'impédance, le déphasage, le facteur de puissance, le courant principal.

7.3.1. Circuit R – L – C série

Rappelons les significations des symboles utilisés (fig. 7 – 14) :

U : la tension efficace aux bornes du circuit

I : le courant efficace dans le circuit

Les expressions des tensions efficaces aux bornes de chaque élément sont :

$U_R = I R$, pour la résistance

$U_L = I X_L$, pour la bobine, $X_L = L \omega$ étant sa réactance inductive.

$U_C = I X_C$, pour le condensateur ; $X_C = \frac{1}{C \omega}$ étant sa réactance capacitive

Dans le triangle rectangle des tensions, mis en évidence dans le diagramme de Fresnel (fig. 7 – 15), on peut appliquer le théorème de Pythagore :

$$U^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2$$

Lorsqu'on remplace les tensions aux bornes des éléments par leurs expressions, on trouve :

$$U^2 = (I R)^2 + (I X_L - I X_C)^2 \text{ et } U^2 = I^2 [R^2 + (X_L - X_C)^2]$$

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

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

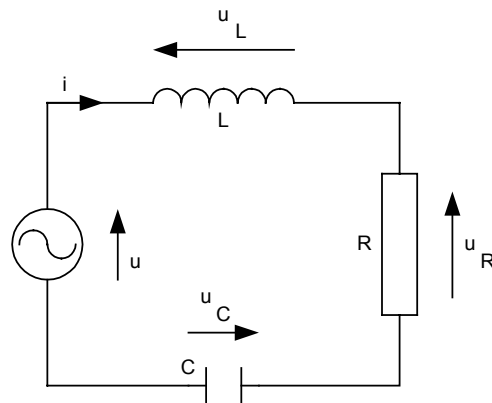


Fig. 7 – 14

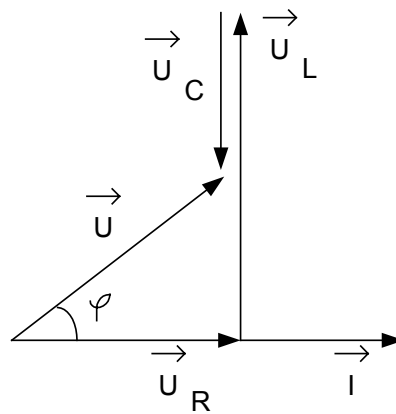


Fig. 7 - 15

soit également :

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

L'impédance du circuit R - L - C série (définie comme le rapport entre la tension et le courant aux bornes du circuit) :

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

Remarque : On pourrait déterminer l'impédance à partir du triangle d'impédances présenté auparavant et redessiné ci-dessous (fig. 7 – 16).

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

L'angle de déphasage φ entre la tension et le courant est compris entre -90° et 90° , tel que :

$$\text{tg } \varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}$$

- Pour $L\omega > 1/C\omega$, $90 > \varphi > 0$ et le circuit est appelé à caractère inductif.
- Pour $L\omega < 1/C\omega$, $-90 > \varphi < 0$ et le circuit est appelé à caractère capacitif.
- Pour $L\omega = 1/C\omega$, $\varphi = 0$ et le circuit est en résonance.

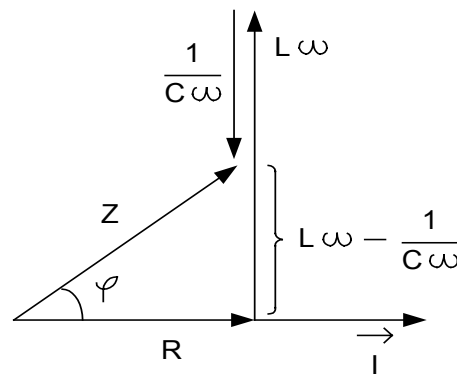


Fig. 7 - 16

Le triangle d'impédance permet aussi l'évaluation du facteur de puissance en fonction des caractéristiques des composants.

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

7.3.2. Circuit R – L – C parallèle

Rappelons les significations des symboles utilisés (fig. 7 – 17) :

- U : la tension efficace aux bornes du circuit et en même temps aux bornes de chaque élément.
- I : le courant principal dans le circuit.

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

$I_R = U / R$ pour la résistance.

$I_L = U / X_L$ pour la bobine, où $X_L = L \omega$ étant sa réactance inductive.

$I_C = U / X_C$ pour le condensateur, où $X_C = \frac{1}{C \omega}$ étant sa réactance capacitive.

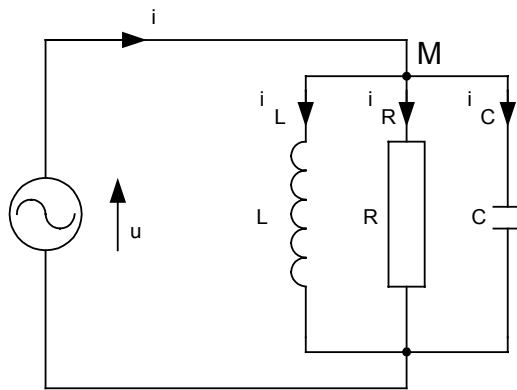


Fig. 7 - 17

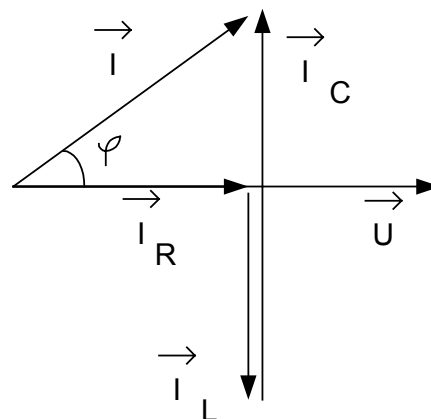


Fig. 7 - 18

Si on applique le théorème de Pythagore dans le triangle rectangle mis en évidence par le diagramme de Fresnel (fig. 7 – 18) :

$$I^2 = I_R^2 + (I_C - I_L)^2$$

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

$$I^2 = \left(\frac{U}{R}\right)^2 + \left(\frac{U}{X_C} - \frac{U}{X_L}\right)^2$$

soit également :

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

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

$$I = U \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right)^2}$$

Soit :

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

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

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

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

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

Remarque : On pourrait déterminer l'admittance du circuit à partir du triangle d'admittances, associé au circuit, présenté auparavant et redessiné ci-dessous (fig. 7 – 19):

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

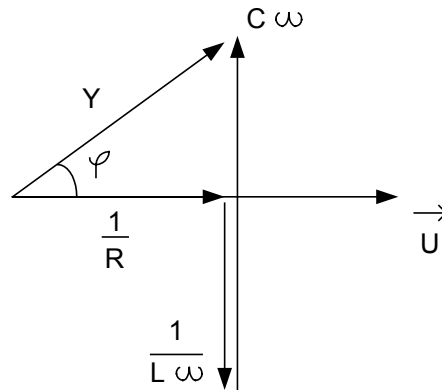


Fig. 7 - 19

L'angle de déphasage φ entre la tension et le courant est compris entre -90° et 90° .

Il peut être exprimé tel que :

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

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

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

$$\cos \varphi = \frac{1}{RY}, \quad \text{ou} \quad \cos \varphi = \frac{Z}{R} \quad \text{ou} \quad \text{encore}$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{R \sqrt{\frac{1}{R^2} - (C\omega - \frac{1}{L\omega})^2}}$$

8. PUISSANCE

Ce chapitre a pour l'objectif l'étude de la puissance absorbée par un récepteur dans le cas du régime alternatif et sinusoïdal. On introduit les notions : les puissances active, réactive et apparente et l'importance du facteur de puissance.

8.1. Calcul de la puissance active

Soit un récepteur réel alimenté en courant alternatif sous une tension efficace U . La valeur efficace du courant qui le traverse est I . On considère un caractère inductif pour le récepteur. Le diagramme vectoriel associé au circuit est présenté sur la fig. 8 - 1 :

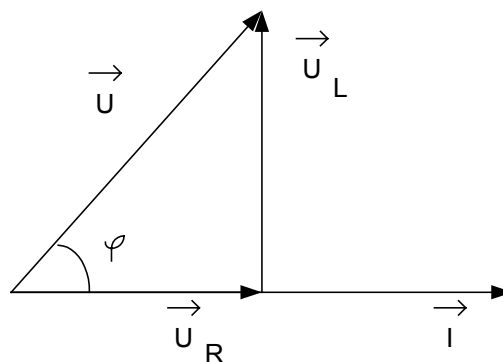


Fig. 8 - 1

Si on multiplie par I les côtés du triangle des tensions on peut obtenir un triangle des puissances (fig. 8 - 2) :

Le produit $U_R \cdot I$ exprime une *puissance réelle*. Elle est effectivement consommée dans le récepteur. Pour une puissance réelle les vecteurs du courant et de la tension sont en phase.

La puissance réelle, appelée la **puissance active**, correspond à un apport net d'énergie électromagnétique. La puissance active (réelle) est exprimée en W.

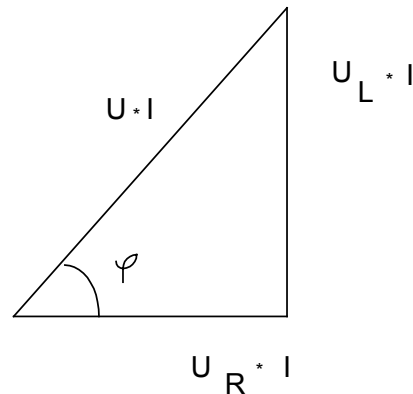


Fig. 8 - 2

8.2. Calcul de la puissance réactive

Le produit $U_L \cdot I$ (fig. 8 – 2) exprime une **puissance réactive**. Pour une puissance réactive les vecteurs de la tension et du courant sont déphasés de 90° , donc elle est associée aux éléments de circuit réactifs : la bobine et le condensateur.

La puissance réactive caractérise l'échange d'énergie que les éléments réactifs font avec l'extérieur.

La puissance réactive est exprimée en var (Volt Ampère Réactif) .

Pour un déphasage de la tension sur le courant de 90° la puissance réactive est positive (le cas de la bobine idéale).

Pour un déphasage du courant sur la tension de 90° la puissance réactive est négative (le cas d'un condensateur idéal).

8.3. Puissance apparente

Le produit $U \cdot I$ exprime une **puissance apparente** résultante d'une puissance réelle et une puissance réactive. La puissance apparente est exprimée en volt ampère (VA).

Les puissances active, réactive et apparente sont reliées entre elles par la relation :

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

Où :

- S : la puissance apparente en VA
- P : la puissance active (réelle) en W
- Q : la puissance réactive en var

8.4. Facteur de puissance

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

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

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

Conclusion :

On peut construire le triangle de puissances ayant les trois puissances pour côtés pour tous les récepteurs, les circuits ou les installations en courant alternatif (fig. 8 – 3).

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

- pour la puissance apparente :

$$S = U I$$

- pour la puissance active :

$$P = U I \cos \varphi$$

- pour la puissance réactive :

$$Q = U I \sin \varphi$$

Où :

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

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

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

ou bien :

$$P = S \cos \varphi$$

$$Q = S \sin \varphi$$

$$P \tan \varphi = Q$$

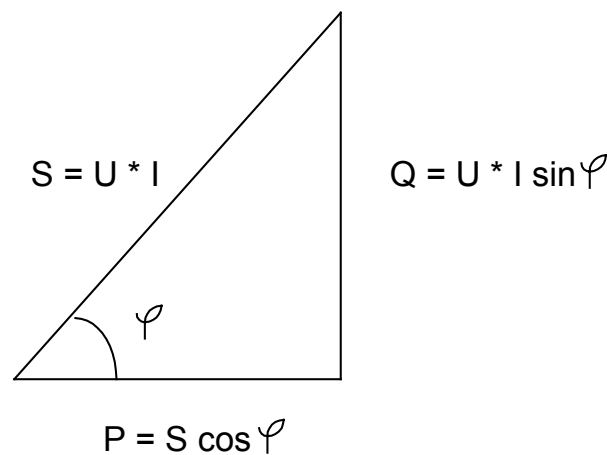


Fig. 8 – 3

9. CARACTERISTIQUES DES CIRCUITS EN RESONANCE

9.1. Résonance série

Soit le circuit composé d'une résistance R , une bobine L et un condensateur C , associés en série et alimentés avec un générateur basse fréquence (fig. 9 - 1).

La tension efficace du générateur est maintenue constante tout en modifiant la valeur de la fréquence. On peut trouver alors, une fréquence particulière pour laquelle les réactances des deux éléments réactifs sont égales :

$$X_L = X_C, \quad \text{soit : } L\omega = \frac{1}{C\omega}, \quad \text{soit : } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

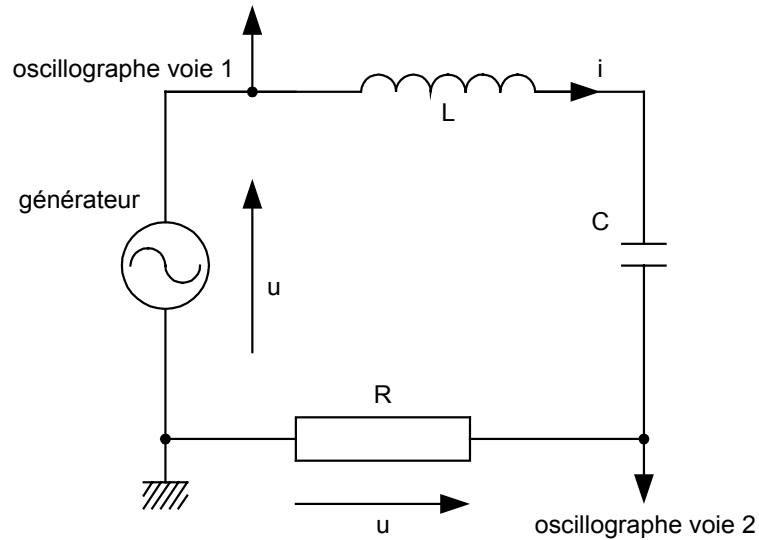


Fig. 9 - 1

Le diagramme vectoriel associé au circuit pour cette situation est décrite sur la fig. 9 – 2 :

On dit qu'à cette fréquence il y a la résonance du courant I dans le circuit R-L-C, ou que le circuit se trouve à la résonance.

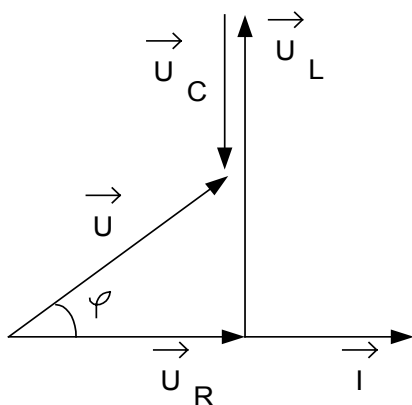


Diagramme de Fresnel pour $f \neq f_0$

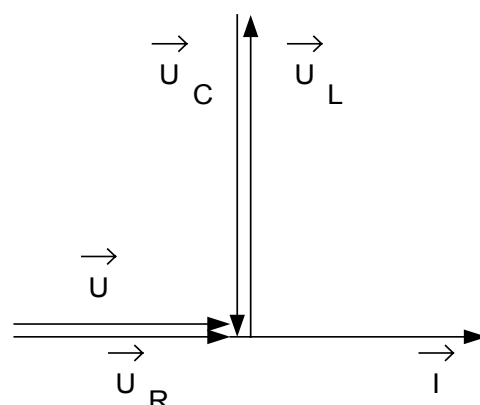


Diagramme de Fresnel pour $f = f_0$

Fig. 9 - 2

9.1.1. Caractéristiques de la résonance série

La tension U_R aux bornes de la résistance devient égale à la tension d'alimentation U du circuit R-L-C. Ces deux tensions sont en phase. Le caractère du circuit est résistif. Le courant I et la tension U sont en phase.

Pour la fréquence de résonance :

- **le courant atteint un maximum dans le circuit, de même que la tension U_R ;**
- l'impédance du circuit devient égale à la résistance ;

$$Z = R$$

L'impédance d'un circuit R-L-C à la résonance est minimum.

La fréquence de résonance ne dépend que des caractéristiques des éléments réactifs :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

9.1.2. Courbes de la résonance série

Les graphiques sur la fig. 9 - 3 présentent :

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

Remarque :

A la résonance la tension d'alimentation est égale à la tension aux bornes de la résistance. Cela ne signifie pas que la bobine et le condensateur n'ont pas de tensions aux bornes. Les tensions aux bornes des éléments réactifs sont égales en valeur efficace mais déphasées de 180° une sur l'autre.

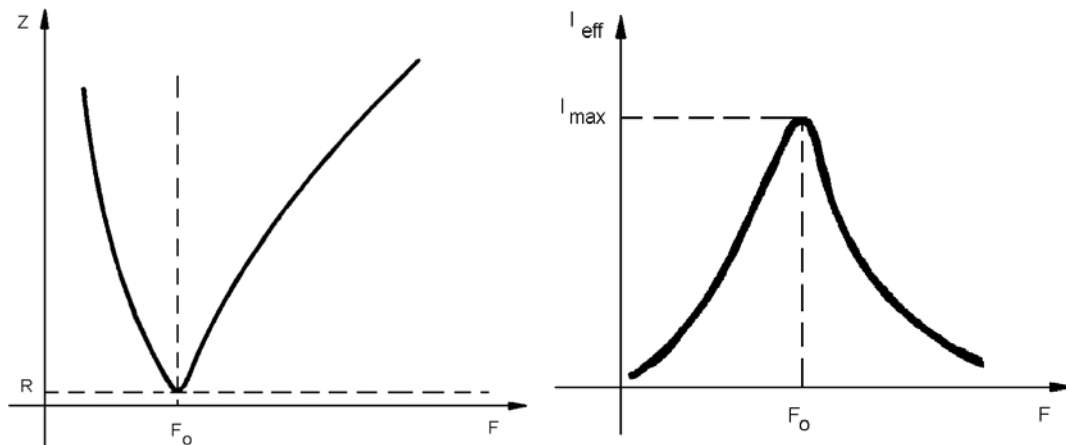


Fig. 9 - 3

9.1.3. Facteur de qualité du circuit Q

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

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

$$Q = \frac{U_{Lo}}{U} = \frac{U_{Co}}{U} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R}$$

Comme $\omega_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ou trouve :

$$Q = \frac{L}{2\pi R \sqrt{LC}} \quad \text{et} \quad Q = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

9.2. Résonance parallèle

Le circuit est composé d'une résistance R , d'une bobine L et d'un condensateur C associés en parallèle et alimentés par le générateur basse fréquence. La tension du

générateur est considérée de valeur efficace constante, mais sa fréquence peut être modifiée (fig. 9 - 4).

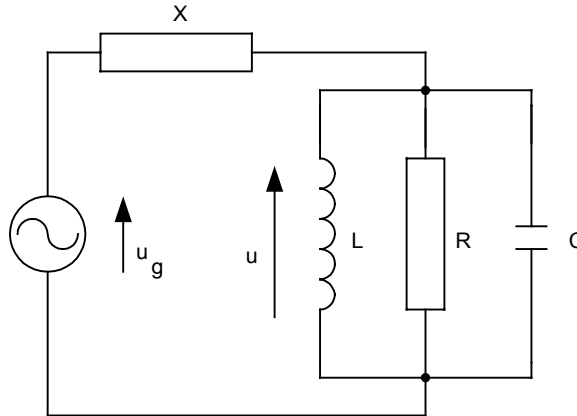


Fig. 9 - 4

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

$$X_L = X_C \quad \text{et} \quad L\omega = \frac{1}{C\omega} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

La condition de résonance ainsi que l'expression de la fréquence de résonance sont les mêmes que celles associées au circuit R-L-C série. Les diagrammes vectoriels associés sont présentés sur la fig. 9 - 5.

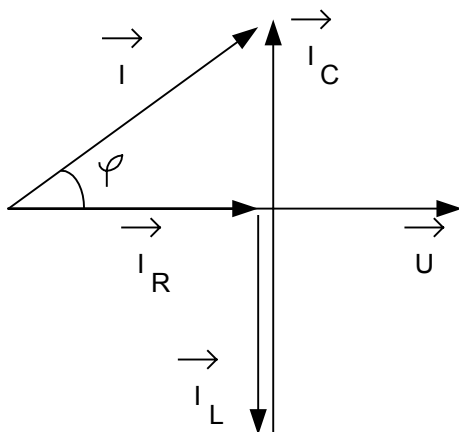


Diagramme de Fresnel pour $f \neq f_0$

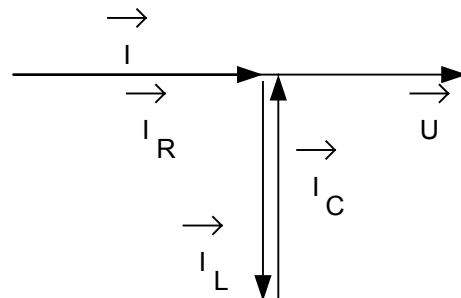


Diagramme de Fresnel pour $f = f_0$

Fig. 9 - 5

On dit que pour cette fréquence f_0 il y a la résonance de la tension U ou aussi que le circuit R-L-C se trouve à la résonance.

9.2.1. Caractéristiques de la résonance parallèle

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

Pour la fréquence de résonance :

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

$$Z = R$$

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

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

9.2.2. Courbes de la résonance parallèle

Les graphiques sur la fig. 9 - 6 présentent :

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

Remarque :

A la résonance d'un circuit R-L-C parallèle le courant total du groupement est égal au courant dans la résistance. Cela ne signifie pas que les éléments réactifs ne seraient pas

parcourus par des courants. On observe dans le diagramme vectoriel que les courants dans les éléments réactifs sont égaux en valeur efficace, mais déphasés de 180° un sur l'autre.

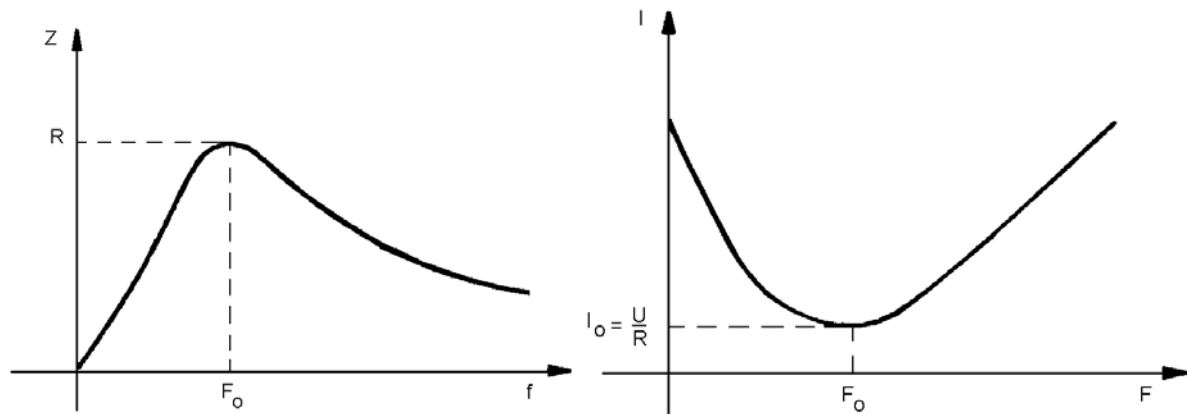


Fig. 9 – 6

10. CIRCUITS TRIPHASES

10.1. Système triphasé

10.1.1. Systèmes mono et polyphasés

Le système *monophasé* est un circuit simple à courant alternatif qui comporte 2 fils.

Le système *polyphasé* est un système de plusieurs circuits monophasés dont les f.é.m. possèdent la même fréquence, la même valeur maximale et sont décalées l'une par rapport à l'autre de même angle électrique.

10.1.2. Alternateur triphasé

Le système comportant trois circuits monophasés est produit par les alternateurs dont les bobines sont décalées l'une par rapport à l'autre à un angle électrique de $2\pi/3$ (fig. 10-1). Les expressions des f.é.m. induites sont (fig. 10 – 2) :