

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°: 3 ANALYSE DE CIRCUITS A
COURANT ALTERNATIF**

SECTEUR : ELECTROTECHNIQUE

SPECIALITE : MMOAMPA

NIVEAU : TS

ANNEE 2007

Document élaboré par :

Nom et prénom

EFP

DR

DINCA CARMEN

CDC Génie
Electrique

DRIF

Révision linguistique

-
-
-

Validation

-
-
-

SOMMAIRE

Présentation du Module.....	8
RESUME THEORIQUE.....	9
1. PRODUCTION D'UNE ONDE SINUSOÏDALE.....	10
1.1. Induction électromagnétique.....	10
1.2. Alternateur élémentaire.....	10
2. TERMES ASSOCIES AU COURANT ALTERNATIF.....	14
2.1. Types de courants alternatifs.....	14
2.2. Caractéristiques d'un courant alternatif sinusoïdal.....	15
2.3. Déphasage.....	17
2.4. Caractéristiques d'une onde sinusoïdale.....	17
3. EFFET DES INDUCTANCES.....	20
3.1. Inductance d'une bobine.....	20
3.2. Inductance mutuelle.....	21
3.3. Réactance inductive.....	21
3.4. Déphasage entre le courant et la tension.....	22
3.5. Groupements d'inductances.....	23
3.5.1. Groupement en série.....	23
3.5.2. Groupement en parallèle.....	23
4. EFFET DES CONDENSATEURS.....	24
4.1. Constitution.....	24
4.2. Capacité d'un condensateur plan.....	25
4.3. Types de condensateurs.....	25
4.4. Groupements de condensateurs.....	25
4.4.1. Groupement en série.....	25
4.4.2. Groupement en parallèle.....	26
4.5. Réactance capacitive.....	26
4.6. Déphasage entre courant et tension.....	27
5. LOIS DE ELECTROMAGNETISME.....	28
5.1. Champ magnétique créé par un courant électrique.....	28
5.1.1. Forme et sens du champ.....	28
5.1.2. Densité du flux.....	29
5.1.3. Force magnétomotrice (f.m.m.).....	30
5.1.4. Champ magnétique d'une bobine longue.....	30
5.2. Force électromagnétique.....	31
5.3. Induction électromagnétique.....	31
5.3.1. Loi de Lenz.....	32
5.3.2. Tension induite dans un conducteur.....	32
6. CARACTERISTIQUES DES TRANSFORMATEURS.....	34
6.1. Structure élémentaire du transformateur.....	34
6.2. Rapport de transformation.....	36
6.3. Polarité de transformateur.....	38
6.4. Problèmes d'isolement.....	38
6.5. Autotransformateur.....	39

7. CARACTERISTIQUES DES CIRCUITS A COURANT ALTERNATIF	40
7.1. Représentation vectorielle des grandeurs sinusoïdales	41
7.2. Diagramme vectoriel d'un circuit à courant alternatif.....	45
7.2.1. Circuit R – L – C série.....	45
7.2.2. Circuit R – L – C parallèle.....	48
7.3. Calcul des valeurs aux différents points d'un circuit à courant alternatif	51
7.3.1. Circuit R – L – C série.....	51
7.3.2. Circuit R – L – C parallèle.....	53
8. PUISSANCE.....	57
8.1. Calcul de la puissance active	57
8.2. Calcul de la puissance réactive.....	58
8.3. Puissance apparente.....	58
8.4. Facteur de puissance	59
9. CARACTERISTIQUES DES CIRCUITS EN RESONANCE	60
9.1. Résonance série	60
9.1.1. Caractéristiques de la résonance série.....	62
9.1.2. Courbes de la résonance série.....	62
9.1.3. Facteur de qualité du circuit Q.....	63
9.2. Résonance parallèle.....	63
9.2.1. Caractéristiques de la résonance parallèle.....	65
9.2.2. Courbes de la résonance parallèle	65
10. CIRCUITS TRIPHASES	66
10.1. Système triphasé.....	66
10.1.1. Systèmes mono et polyphasés.....	66
10.1.2. Alternateur triphasé	66
10.1.3. Système direct et système inverse	67
10.1.4. Propriétés du système monté en « Etoile »	68
10.1.5. Charges montées en « Etoile ».....	69
10.1.6. Charges montées en « Triangle ».....	72
10.2. Puissance en régime triphasé	73
10.2.1. Puissance en régime triphasé quelconque	73
10.2.2. Puissance en régime triphasé équilibré.....	73
11. VERIFICATION DE L'ETAT DES COMPOSANTS D'UN CIRCUIT A COURANT ALTERNATIF.....	74
11.1. Multimètre analogique	75
11.1.1. Présentation.....	75
11.1.2. Utilisation comme ohmmètre	75
11.2. Ohmmètre	75
11.2.1. Ohmmètre série.....	75
11.2.2. Ohmmètre parallèle (dérivation)	76
11.3. Mégohmmètre	77
11.4. Vérification des composants	78
11.4.1. Vérification des résistances	78
11.4.2. Vérification des bobines.....	79
11.4.3. Vérification des condensateurs.....	79
11.4.4. Vérification des transformateurs	80

12.	MESURES DANS UN CIRCUIT A COURANT ALTERNATIF	80
12.1.	Instrumentes de mesure en courant alternatif	80
12.1.1.	Ampèremètres et voltmètres magnétoélectriques.....	81
12.1.2.	Ampèremètres et voltmètres ferromagnétiques	82
12.1.3.	Ampèremètres et voltmètres électrodynamiques.....	83
12.2.	Interprétation des lectures des instruments de mesure à courant alternatif	84
12.2.1.	Echelle	84
12.2.2.	Gammes (Calibres).....	84
12.2.3.	Interprétation des lectures des appareils de mesure	86
12.3.	Mesures en courant alternatif.....	87
12.3.1.	Branchement des appareils de mesure	87
12.3.2.	Mesure des valeurs aux différents points d'un circuit	88
12.3.3.	Mesure des courants alternatifs.....	89
12.3.4.	Mesure des tensions alternatives	90
12.4.	Erreurs de mesure.....	91
12.4.1.	Définition des erreurs.....	91
12.4.2.	Types d'erreurs.....	92
12.4.3.	Caractéristiques métrologiques des appareils de mesure	93
13.	DEFINITION DES ELEMENTS DES SCHEMAS DE LIAISON A LA TERRE.....	95
13.1.	Définition selon les normes NF C 15-100 et CE 479-1/2.....	97
13.1.1.	Effets du courant passant par le corps humain.....	97
13.1.2.	Protection contre les contacts directs quel que soit le régime de neutre	99
13.1.3.	Protection contre les contacts indirects	102
13.2.	Schémas de liaison à la terre	104
13.2.1.	Neutre à la terre.....	106
13.2.2.	Neutre isolé IT	107
13.2.3.	Régime TN.....	109
13.3.	Définition de la protection.....	111
13.3.1.	Conditions générales de protection	111
13.3.2.	Principe de la protection dans le régime TT	113
13.3.3.	Conducteur de protection	114
13.3.4.	Élévation du potentiel des masses	116
13.3.5.	Déclencheur à courant résiduel	117
13.4.	Définition de la prise de terre	122
13.4.1.	Organisation du circuit de terre.....	122
13.4.2.	Valeur de la résistance de terre	124
13.5.	Liaisons équipotentielles	125
13.5.1.	Liaison équipotentielle principale	126
13.5.2.	Liaison équipotentielle supplémentaire.....	128
13.5.3.	Liaison équipotentielle supplémentaire locale de la salle d'eau.....	129
13.5.4.	Liaison équipotentielle locale non reliée à la terre	130
14.	TRAVAUX DE REALISATION D'UNE PRISE DE TERRE	131
14.1.	Identification de l'emplacement d'une prise de terre	132
14.2.	Modes de réalisation d'une prise de terre	133
14.2.1.	Boucle à fond de fouille	133
14.2.2.	Un ou plusieurs piquets	134
14.2.3.	Autres solutions	135

14.3. Vérification des installations lors de mise en service.....	136
14.3.1. Nature des vérifications	136
14.3.2. Mesure des résistances d'isolement.....	137
14.3.3. Vérification de la résistance d'une prise de terre	138
14.3.4. Vérification de la continuité des circuits de protection (terre).....	139
14.4. Outils de travail.....	139
14.5. Règles de sécurité au travail	141
TP1.....	143
TP 2.....	145
TP3.....	147
TP4.....	149
TP5.....	151
TP6.....	153
TP7.....	156
TP8.....	161
TP9.....	163
TP10.....	165
TP11.....	173
TP12.....	176
TP 13.....	179
TP14.....	181
TP15.....	184
 EVALUATION DE FIN DE MODULE.....	 188
 Liste des références bibliographiques	 191

MODULE :3 ANALYSE DE CIRCUITS A COURANT ALTERNATIF

Durée : 90 heures

**OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU
DE COMPORTEMENT**

COMPORTEMENT ATTENDU

Pour démontrer sa compétence le stagiaire doit
**analyser des circuits à courant alternatif et choisir les
moyens de protection appropriés selon le régime du
neutre**
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**

A. Analyser les circuits de base à courant alternatif

B. Choisir les moyens de protection appropriés selon le régime du neutre

**CRITERES PARTICULIERS DE
PERFORMANCE**

- ✓ *Interprétation correcte des relations de base en courant alternatif*
- ✓ *Identification et exploitation du système triphasé*
- ✓ *Identification des caractéristiques des différents dipôles*
- ✓ *Utilisation correcte et sécuritaire des appareils de mesure*

- ✓ *Description des effets physiologiques*
- ✓ *Interprétation des différents schémas du régime du neutre*
- ✓ *Analyse comparative des contacts indirects dans les différents régimes du neutre*
- ✓ *Choix judicieux des éléments de protection selon le régime du neutre*
- ✓ *Protection de l'environnement*

Présentation du Module

Ce module de compétence générale est enseigné en premier semestre du programme. Son enseignement ne devra débuter que lorsque le module 2 « Analyse de circuits à courant continu » sera complété. Il s'appuiera sur les notions fondamentales de l'électricité vues en module 2.

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.

Différencier les régimes du neutre et étudier les moyens de protection contre les contacts directs et indirects pour chaque régime et choisir de façon optimale le régime pour une installation donnée.

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. Bien que ce module présente des aspects théoriques importants, des efforts doivent être faits pour en dynamiser les apprentissages.

***Module 3 : 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).

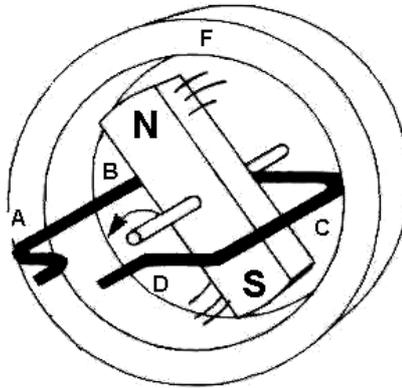


Fig. 1 - 1

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 de champs sont parallèles avec la surface de la spire mais la variation du flux est maximum. Les conducteurs AB et CD de la spire coupent un maximum de ligne de champ et la force électromotrice induite dans la spire est maximum.

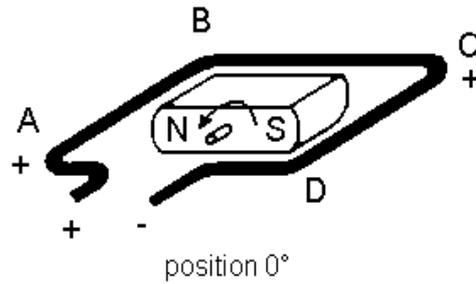


Fig. 1 - 2

- 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.

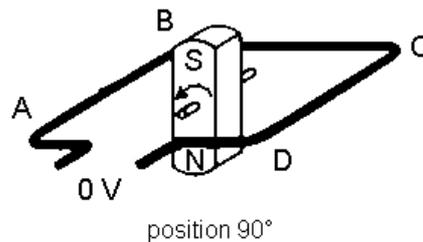


Fig. 1 - 3

- 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° .

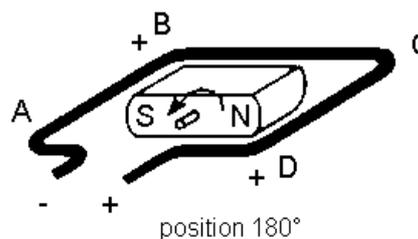


Figure 1 - 4

- 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.

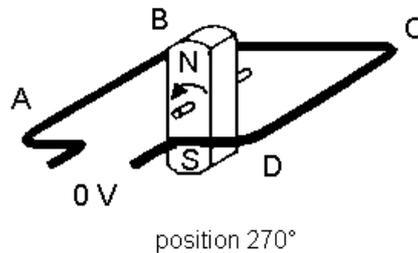


Figure 1 - 5

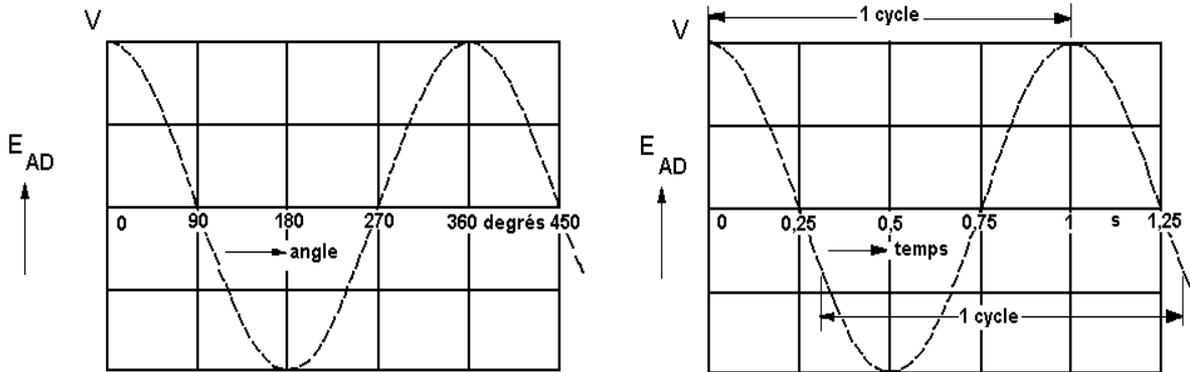
- A la position 360° l'aimant reprend sa position initiale et le cycle recommence.

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)



Forme d'onde de la tension induite en fonction de l'angle de rotation.

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

Fig. 1 - 6

2. TERMES ASSOCIES AU COURANT ALTERNATIF

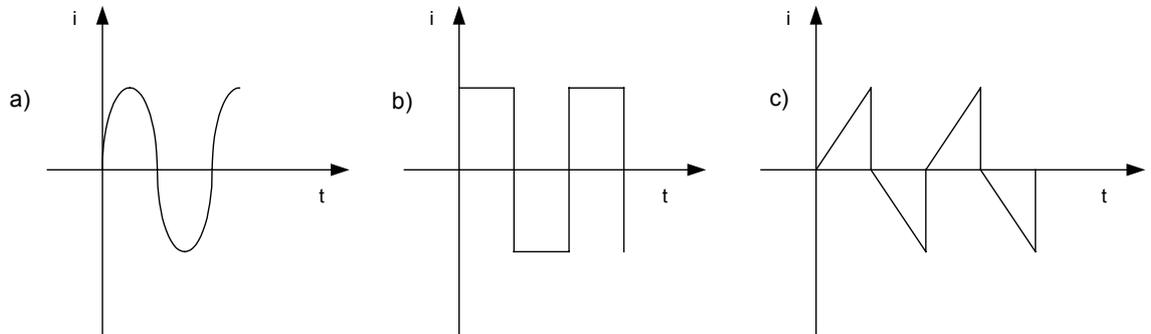
Dans le chapitre précédent on a étudié la production d'une tension induite sinusoïdale dans un alternateur élémentaire et on l'a représenté dans un système de référence en fonction de temps. Dans les circuits électriques alimentés avec des tensions alternatives circulent des courant alternatifs. Une 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) :

- a) **Sinusoïdaux (se sont les plus utilisés);**
- b) **Carrés;**
- c) **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).

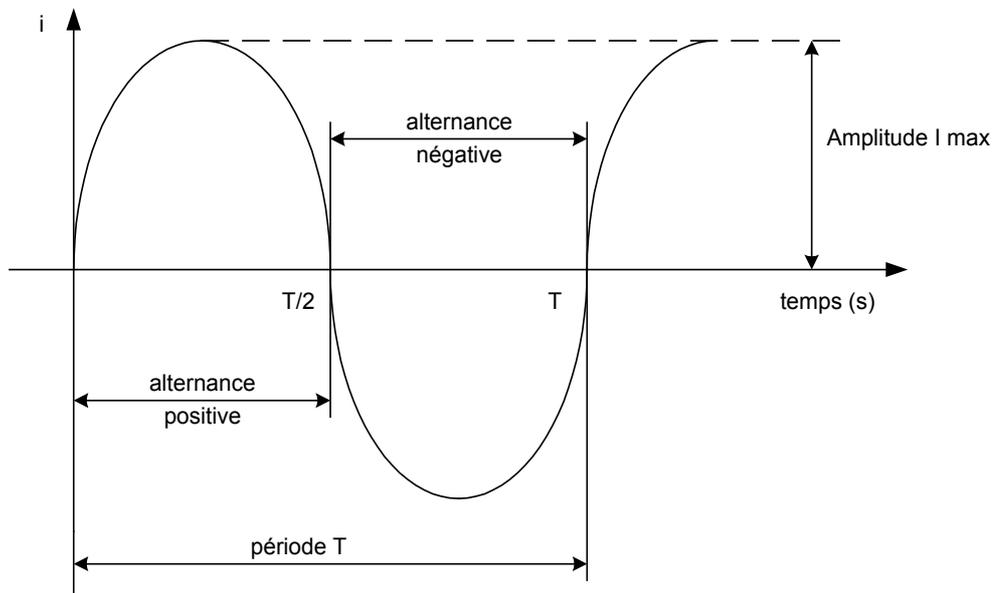


Fig. 2 - 2

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.

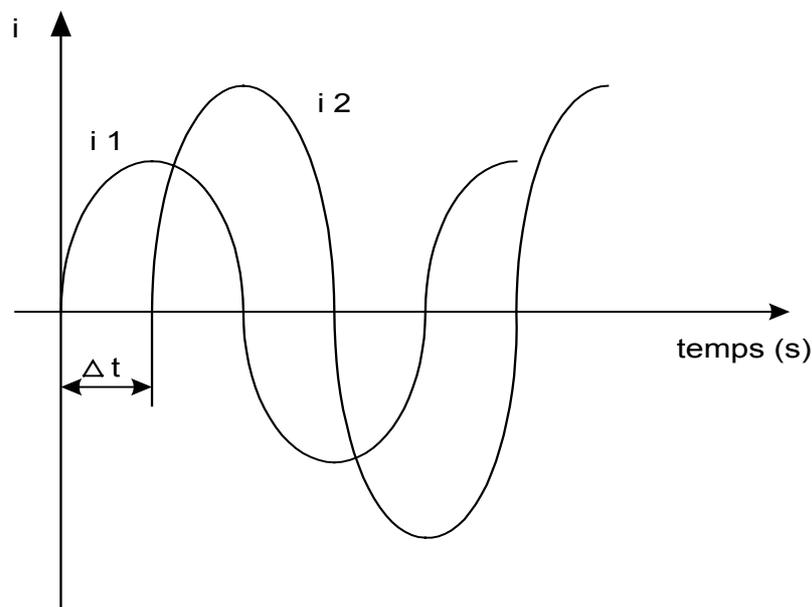
2.3. Déphasage

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.

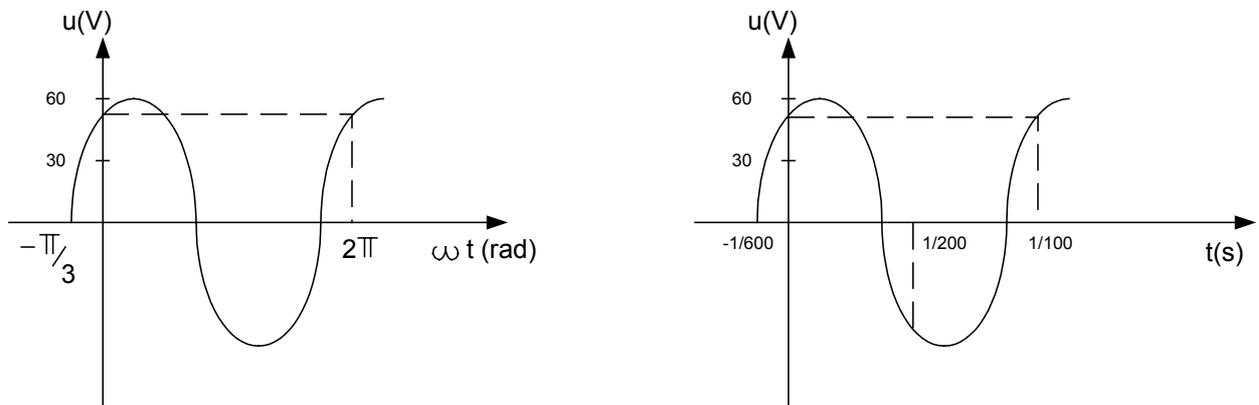
Prenons le cas d'une tension alternative sinusoïdale ayant l'expression :

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

- 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 :

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

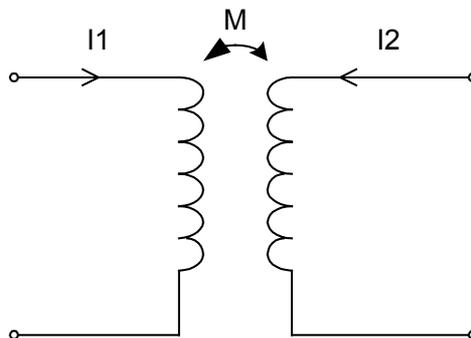
$$\Phi_2 = L_2 I_2 + M I_1$$

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 :

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

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 :

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

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.

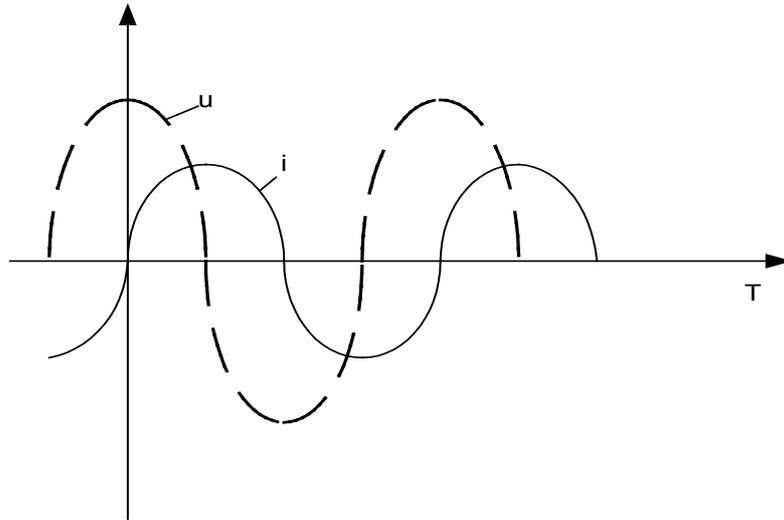


Fig. 3 - 2

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 μ 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 :

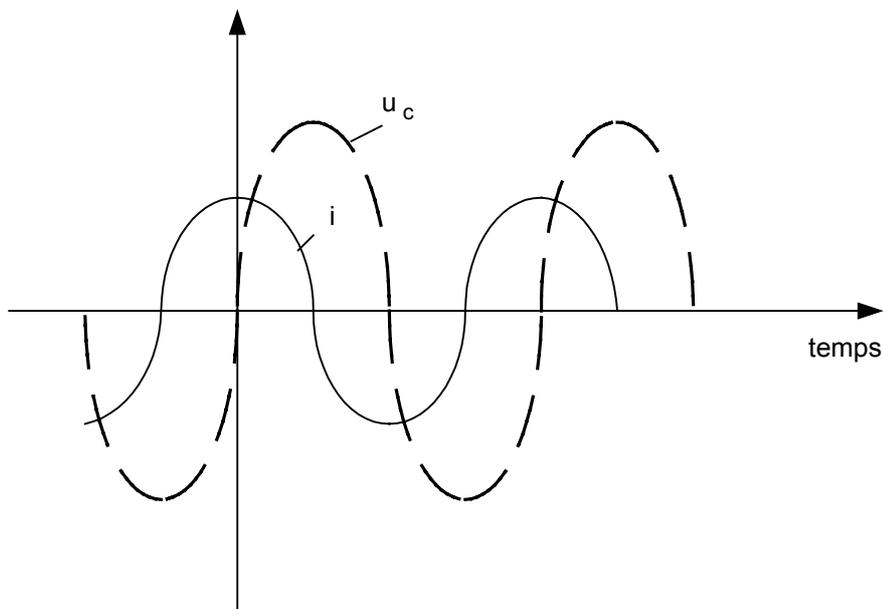
$$I = U / X_c ; I = U.C \omega$$

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 saupoudré 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.

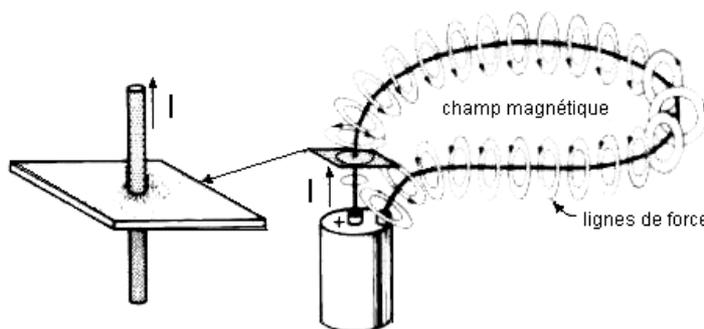


Fig. 5 - 1

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).

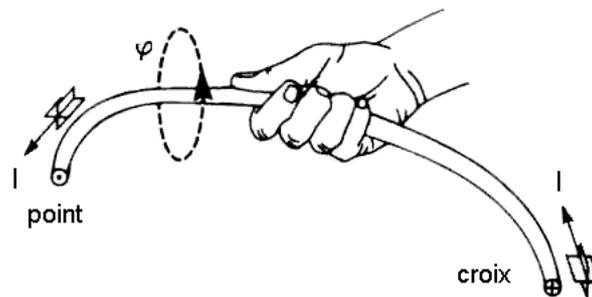


Fig. 5 - 2

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.)

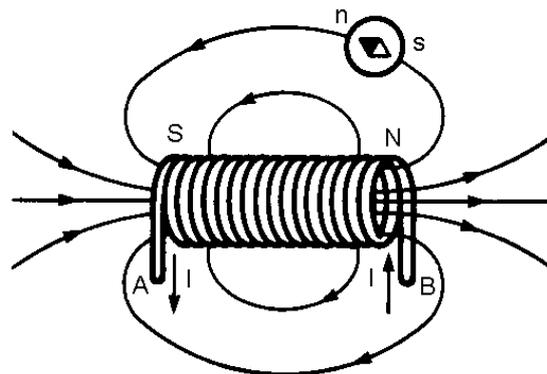
On appelle la *force magnétomotrice* d'une bobine le produit du courant qui la traverse par le nombre de spires. L'unité de la force magnétomotrice en SI est l'ampère [A].

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 déterminée 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.

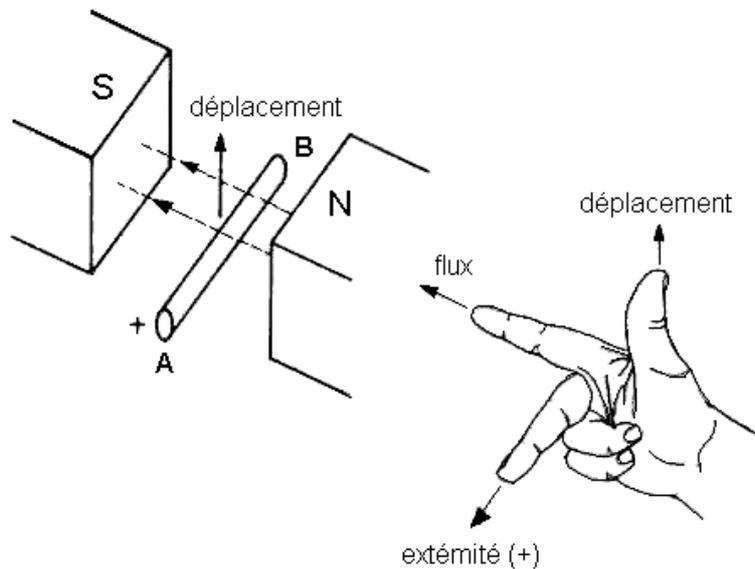


Fig. 5 - 4

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).

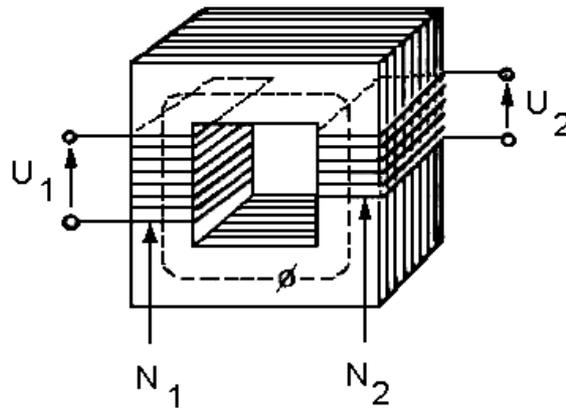


Fig. 6 - 1

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.

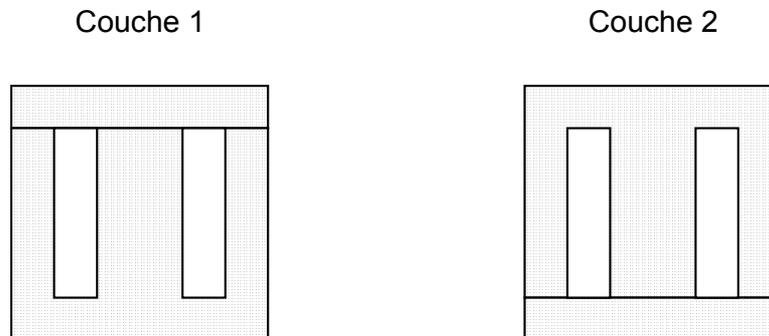


Fig. 6 - 2

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).

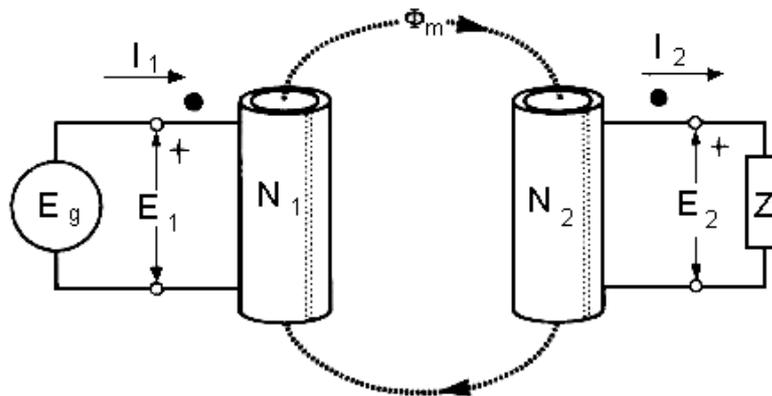


Fig. 6 - 3

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 :

$$S_1 = U_1 \times I_1 \qquad S_2 = U_2 \times I_2$$

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-versé.

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.

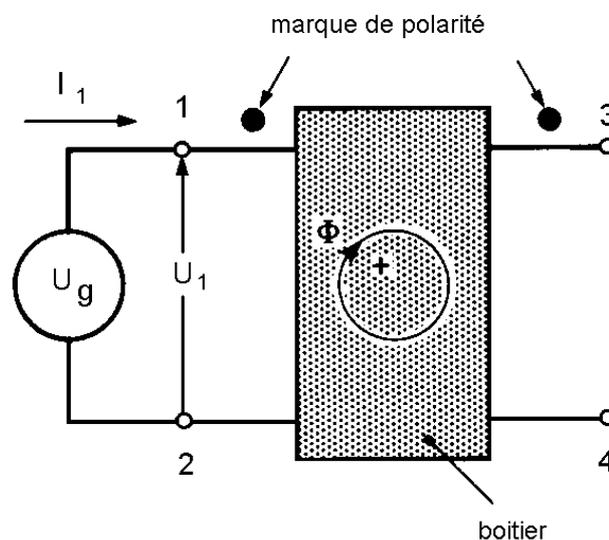


Fig. 6 - 4

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 enroulements 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.

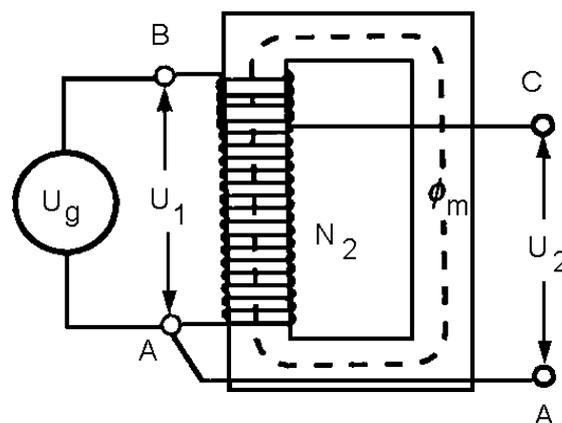


Fig. 6 - 5

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 précédents 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 connaissances 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.

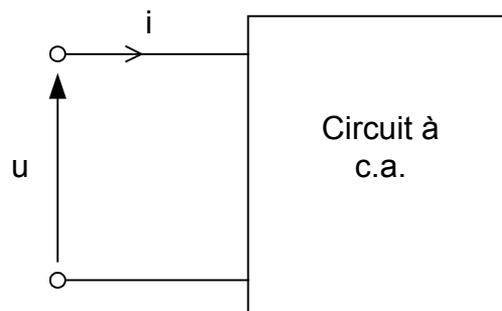


Fig. 7 - 1

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 précédents 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.

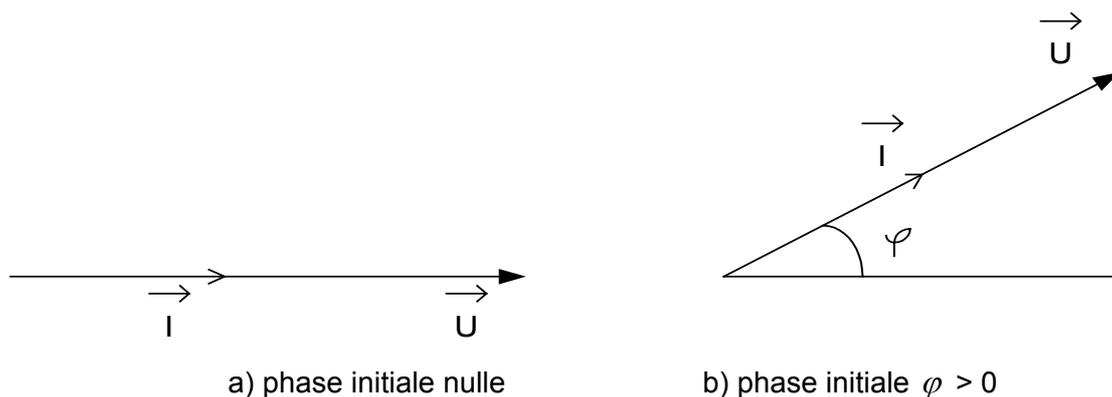
Dans le cas d'une bobine (inductance pure), la tension est déphasée de 90° en avant sur le courant.

Dans le cas d'un condensateur (capacité pure), la tension est déphasée 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.

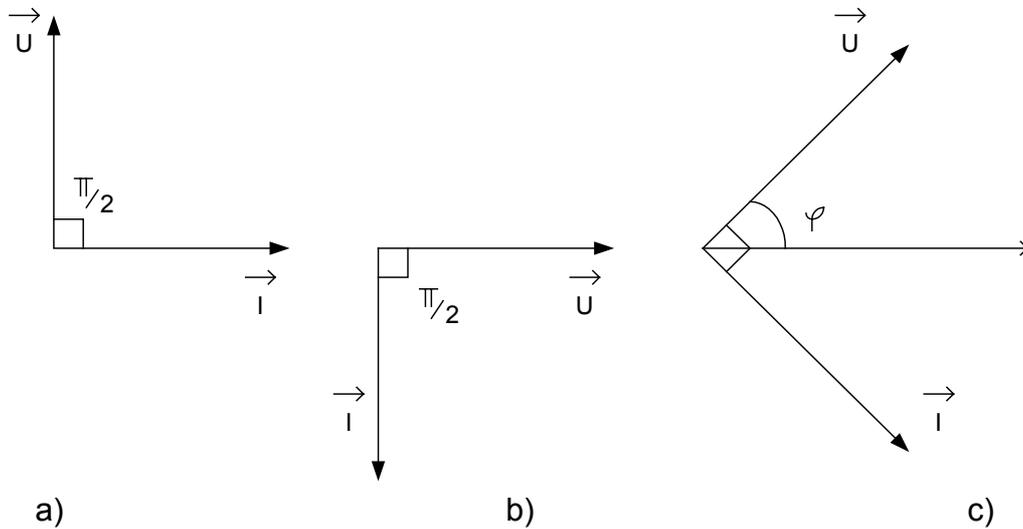


Représentation des vecteurs de la tension et du courant dans le cas d'une résistance pure

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),

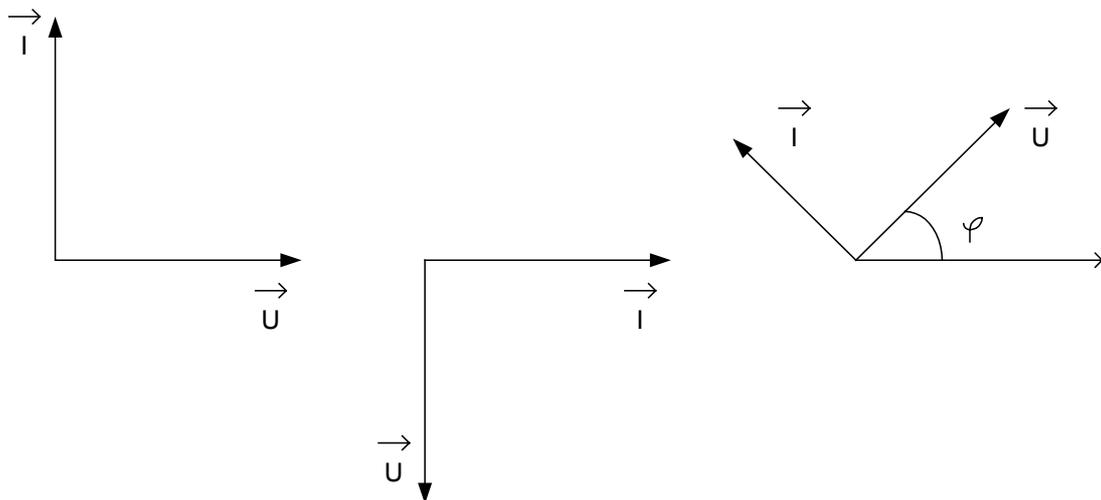
inductance pure (fig. 7 – 3) et capacité pure (fig. 7 - 4), ainsi qu'à des éléments réels caractérisés par l'impédance (fig. 7 - 5).



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

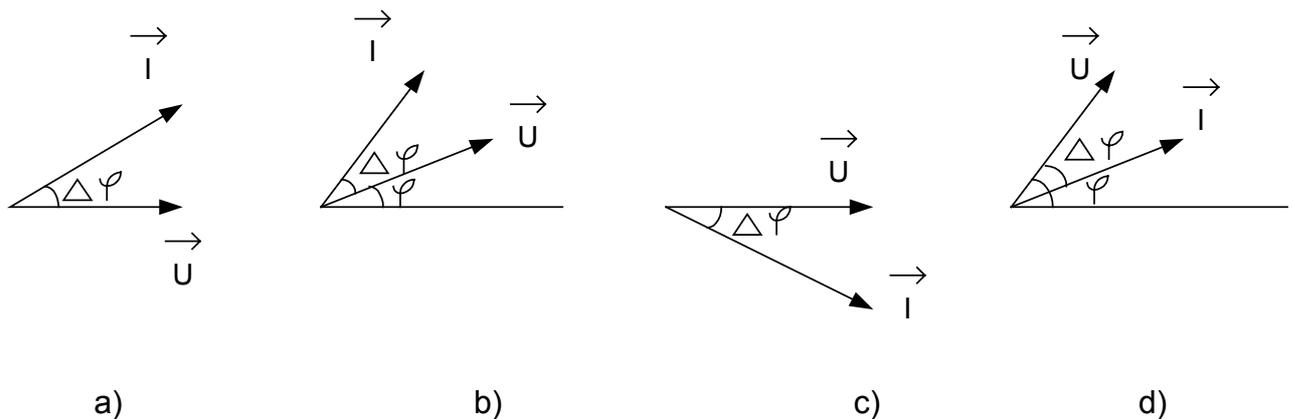
Fig. 7 - 3



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 :

- Récepteur à caractère capacitif (le courant de phase $\Delta\varphi < 90^\circ$ en avant sur la tension), vecteur tension comme référence (phase nulle) ;
- Récepteur à caractère capacitif (le courant est déphasé de $\Delta\varphi < 90^\circ$ en avant sur la tension), vecteur tension de phase $\varphi > 0$;
- Récepteur à caractère inductif (le courant est déphasé de $\Delta\varphi < 90^\circ$ en arrière sur la tension), vecteur tension comme référence (plan nulle)
- 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 alternative 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 $\omega = 2\pi f$

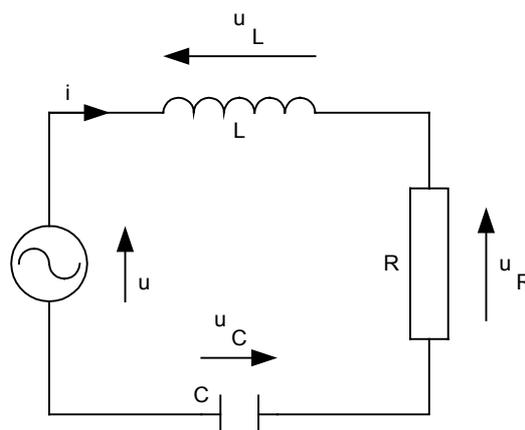


Fig. 7 - 6

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

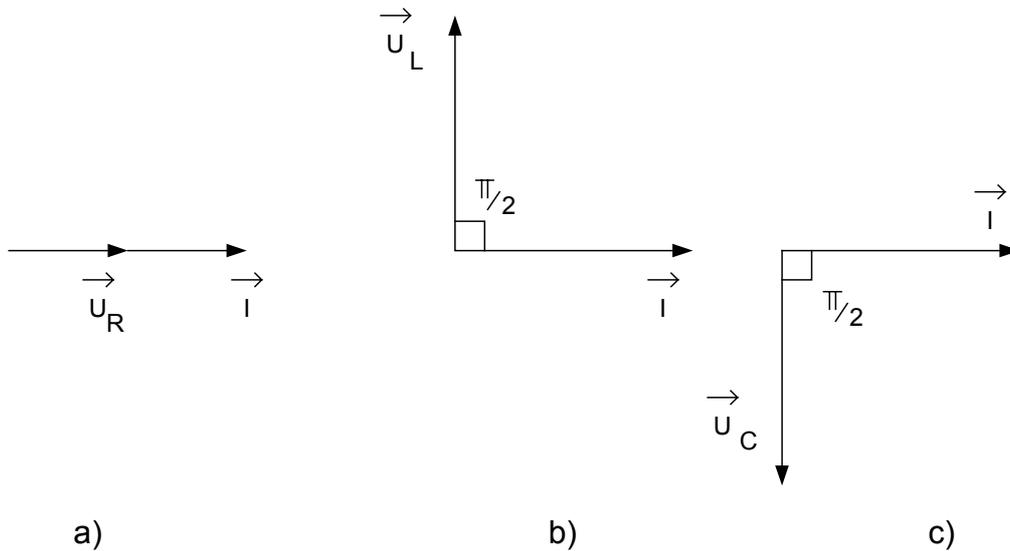


Fig. 7 - 7

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.

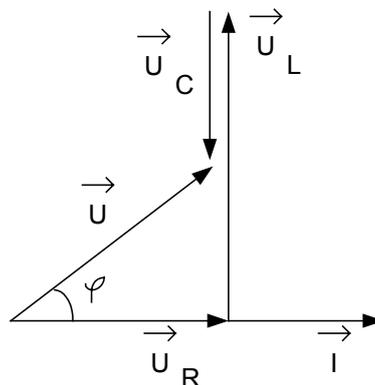


Fig. 7 - 8

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.

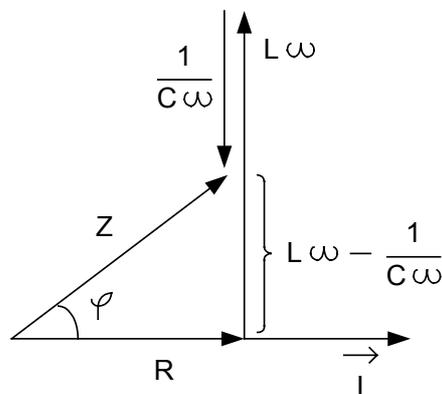


Fig. 7 - 9

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 :

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

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

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

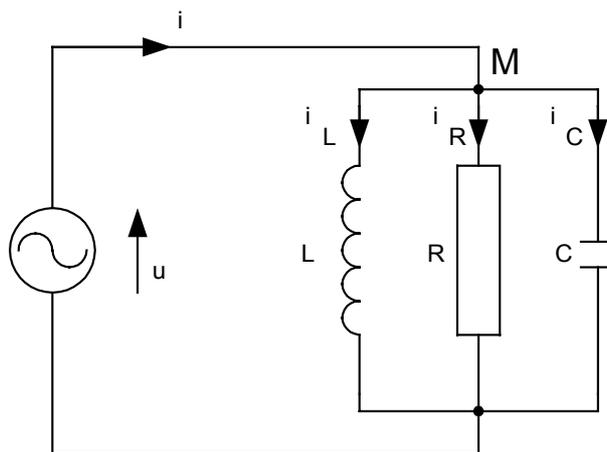


Fig. 7 - 10

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

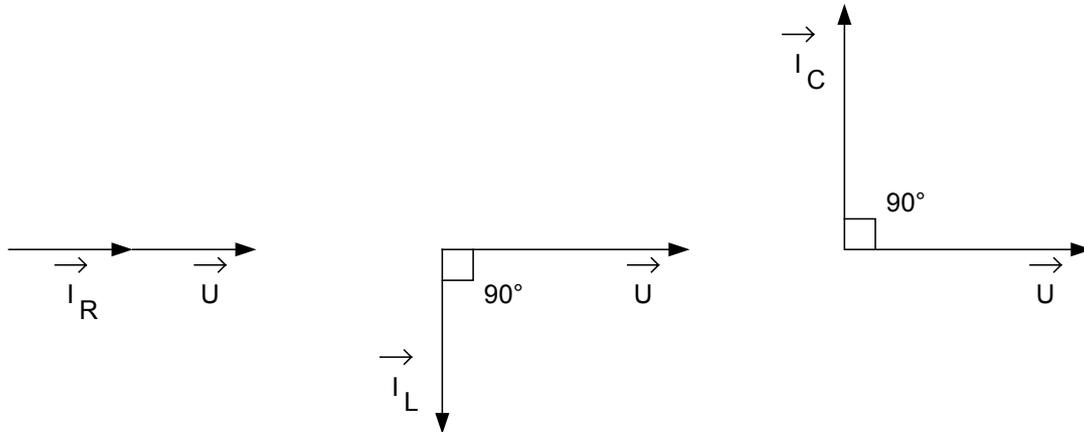


Fig. 7 - 11

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).

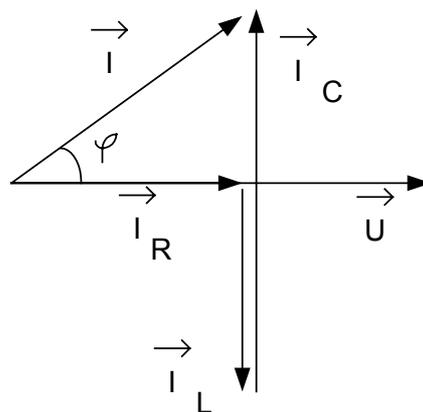


Fig. 7 - 12

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).

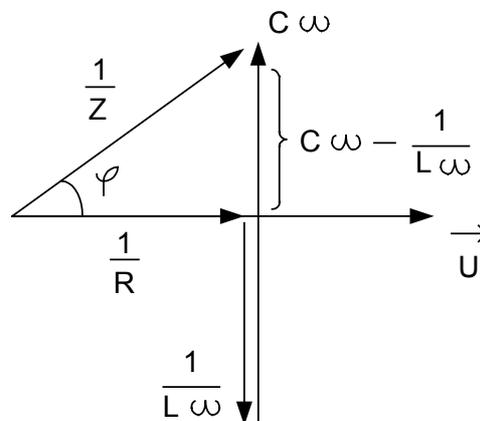


Fig. 7 – 13

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 :

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

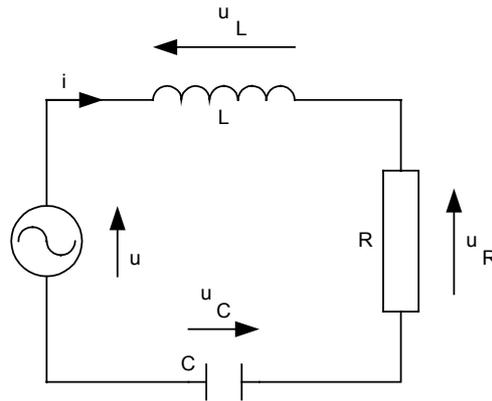


Fig. 7 - 14

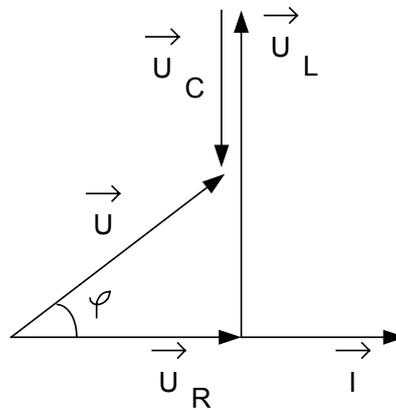


Fig. 7 - 15

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.

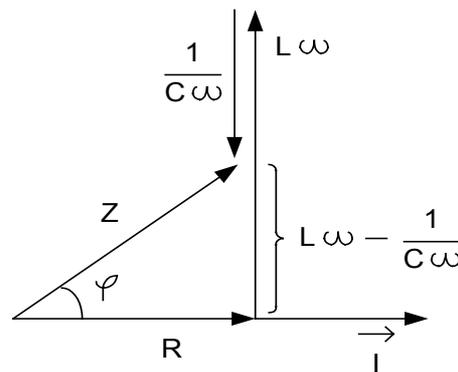


Fig. 7 - 16

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.

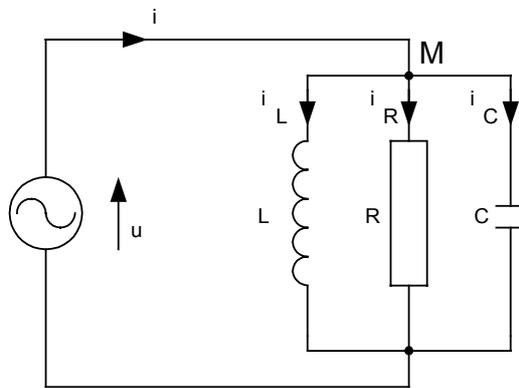


Fig. 7 - 17

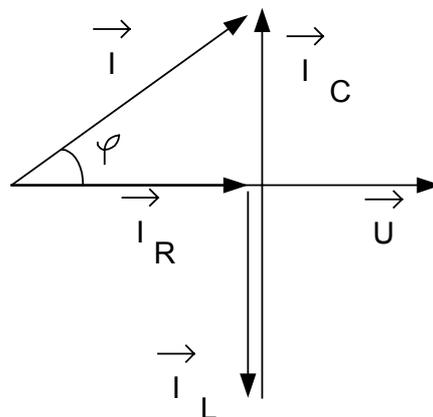


Fig. 7 - 18

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):

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

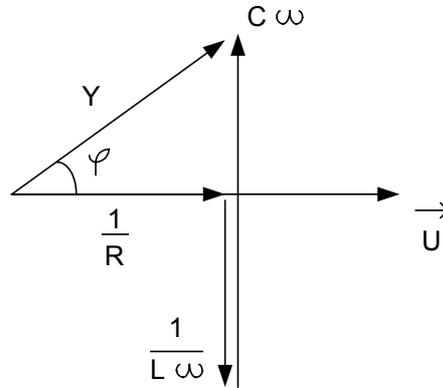


Fig. 7 - 19

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 :

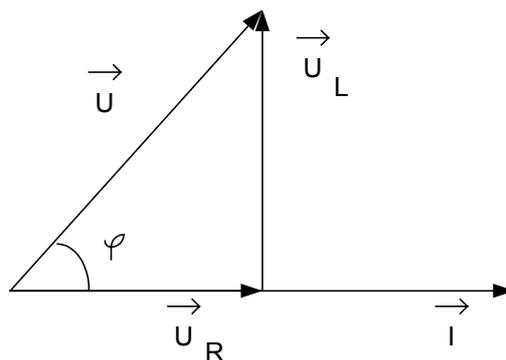


Fig. 8 - 1

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.

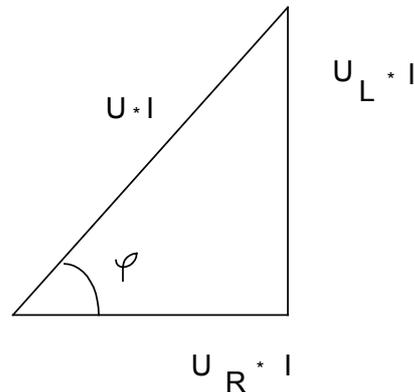


Fig. 8 - 2

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 :

$$P = S \cos \varphi$$

$$Q = S \sin \varphi$$

$$P \operatorname{tg} \varphi = Q$$

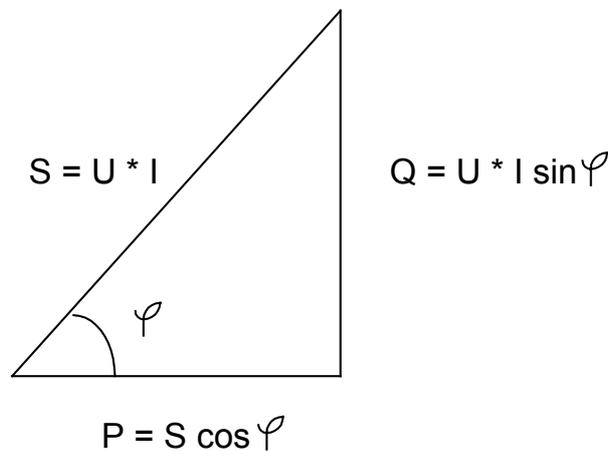


Fig. 8 – 3

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 :

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

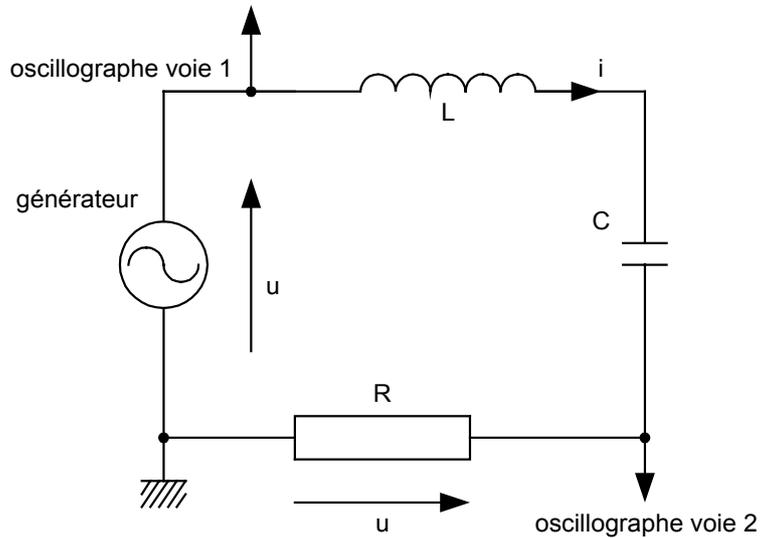


Fig. 9 - 1

Le diagramme vectoriel associé au circuit pour cette situation est décrit 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.

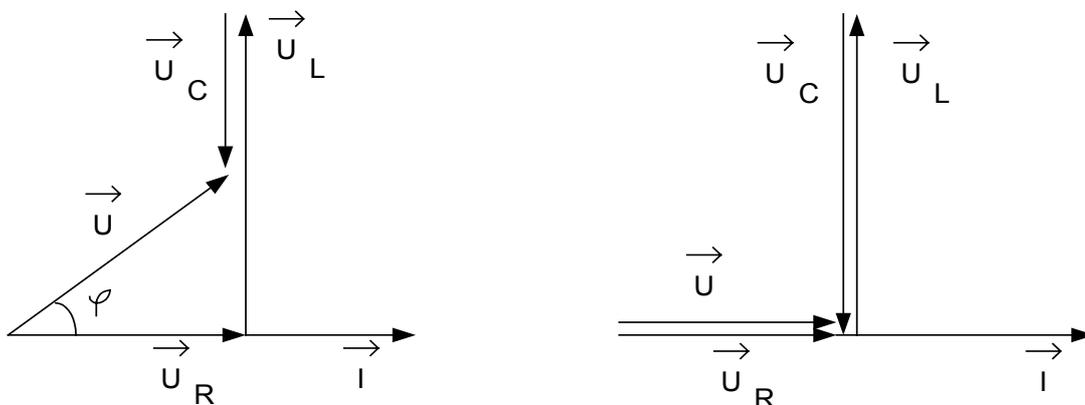


Diagramme de Fresnel pour $f \neq f_0$

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.

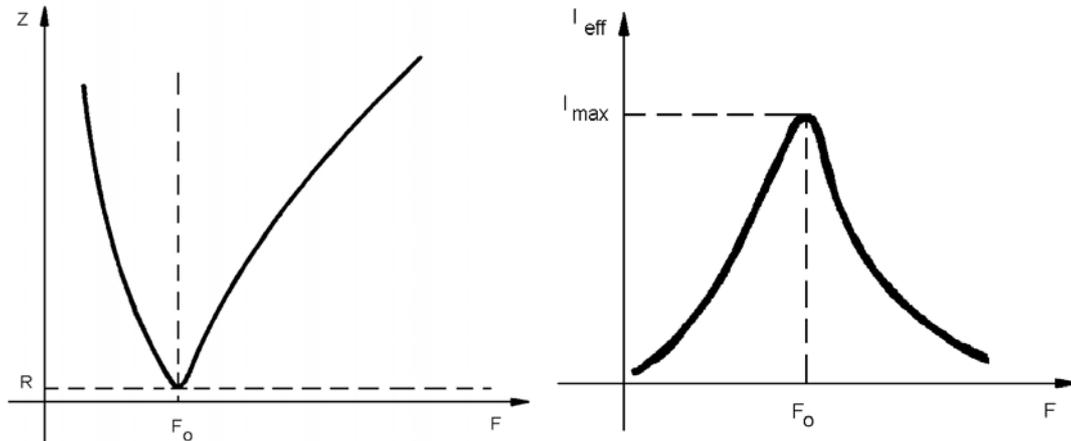


Fig. 9 - 3

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).

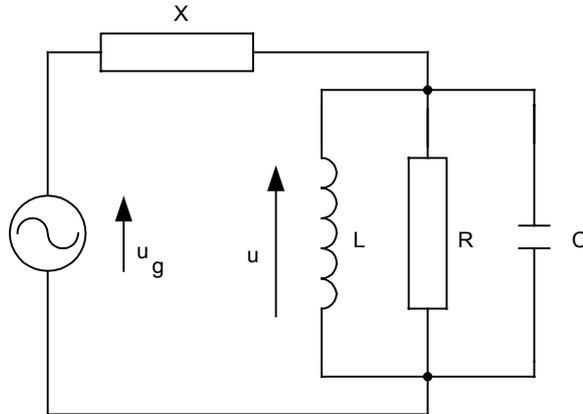


Fig. 9 - 4

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.

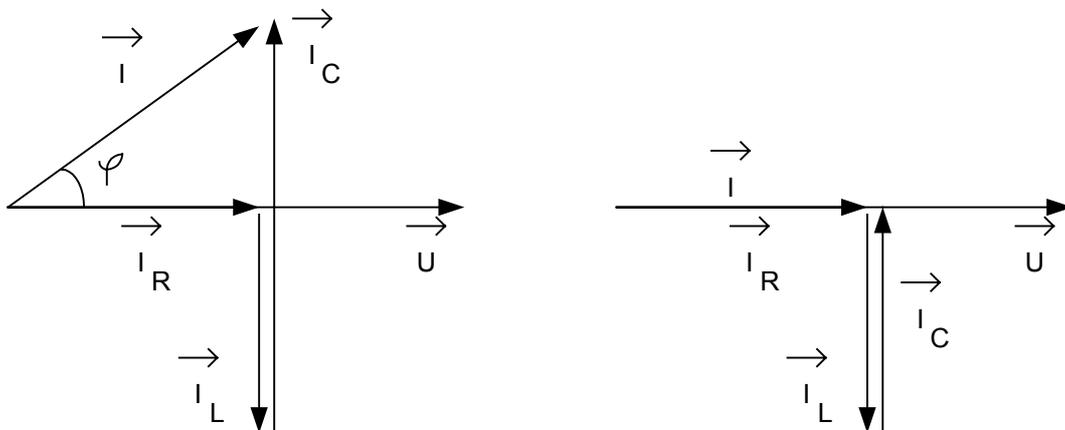


Diagramme de Fresnel pour $f \neq f_0$

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.

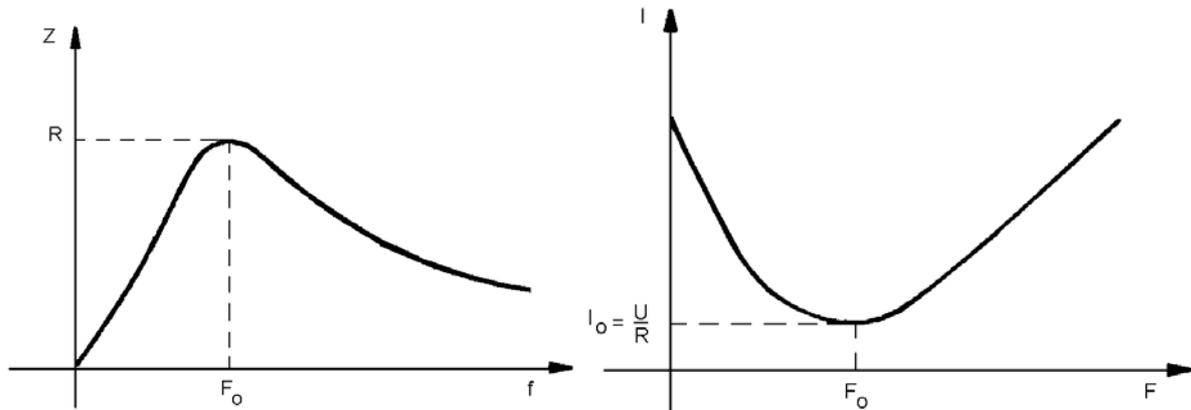


Fig. 9 – 6

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) :

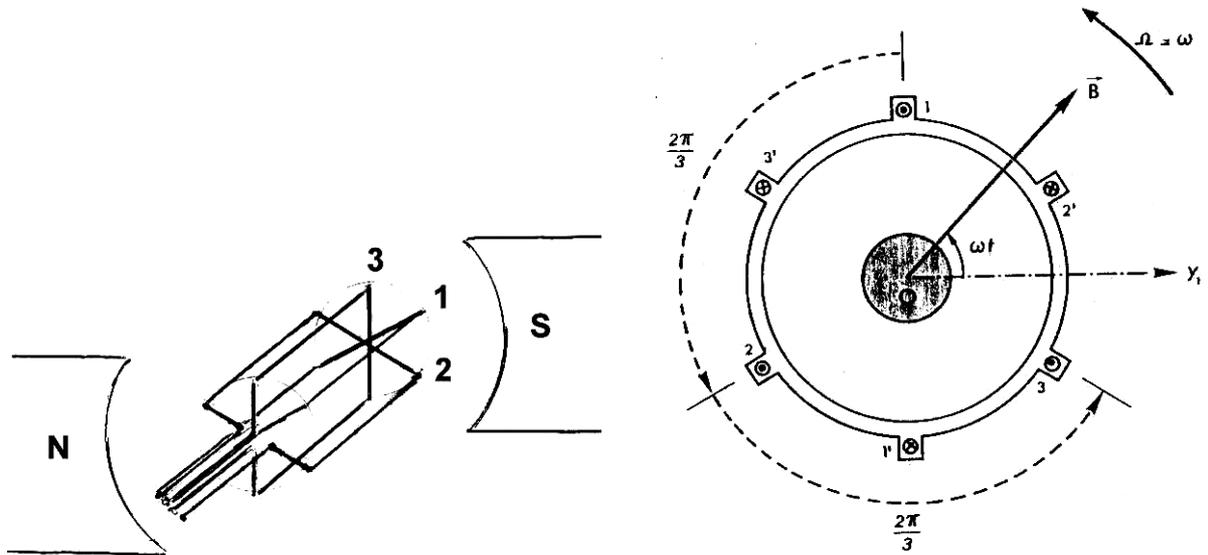


Fig. 10 - 1

$$e_1 = N.S.B.\omega.\sin \omega t = E_m . \sin \omega t$$

$$e_2 = N.S.B.\omega.\sin (\omega t - 2\pi/3) = E_m . \sin (\omega t - 2\pi/3)$$

$$e_3 = N.S.B.\omega.\sin (\omega t - 4\pi/3) = E_m . \sin (\omega t - 4\pi/3)$$

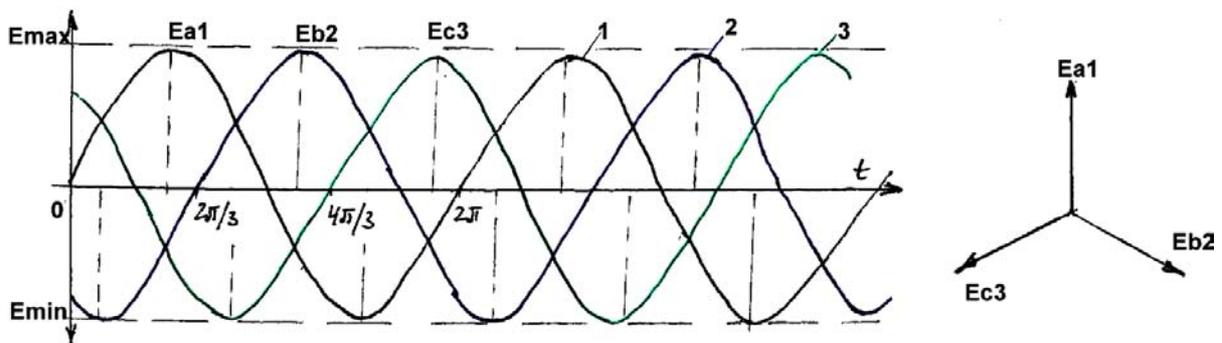


Fig. 10 - 2

10.1.3. Système direct et système inverse

Les trois enroulements d'un alternateur triphasé pourraient alimenter trois circuits monophasés distincts. Cet arrangement exigerait 6 fils pour alimenter la charge totale constituée par trois charges monophasées.

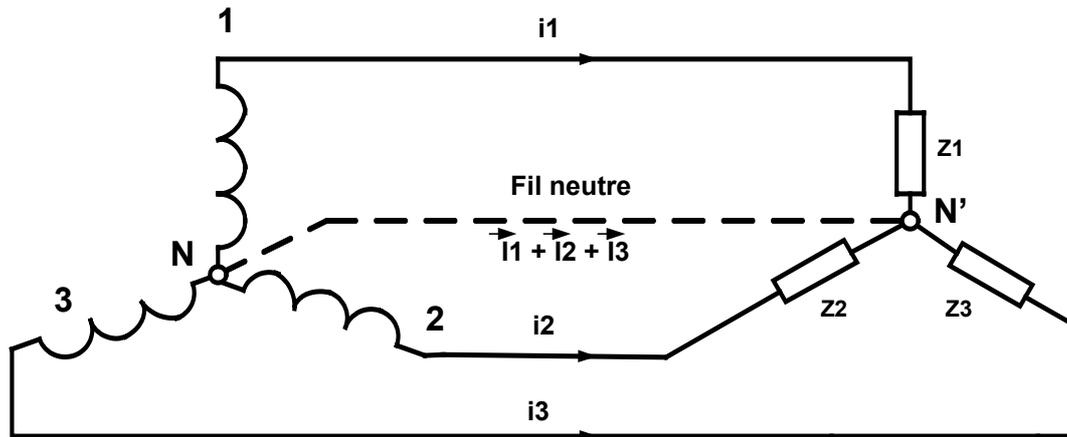


Fig. 10 - 3

Le nombre de fils de ligne peut être réduit en groupant les trois fils de retour en un seul (fig. 10 – 3). Ce fil de retour est appelé **fil neutre** (ou *phase neutre*) et il porte la somme des trois courants de ligne.

$$\vec{I}_n = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3$$

Si les vecteurs de Fresnel des trois phases se succèdent « en tournant » dans le sens *positif* le système est **direct**. Si les vecteurs des trois phases se succèdent dans le sens *néгатif*, le système est **inverse**.

Si le système triphasé alimente une charge équilibrée (les impédances de mêmes valeurs, $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$), $I_N = 0$ et le fil neutre est absent. Le système est à 3 fils.

Si les charges ne sont pas identiques ($Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$), courant dans le fil neutre est différent de zéro ($\vec{I}_n = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 \neq 0$) et le fil neutre est indispensable. Le système est à 4 fils.

10.1.4. Propriétés du système monté en « Etoile »

Si les trois enroulements de l'alternateur sont branchés en « Etoile » on peut obtenir deux types de systèmes des f.é.m. (fig. 10 – 4) :

$$E_{1N} = E_{2N} = E_{3N} = V \quad \Rightarrow \quad \text{Tension simple}$$

$$\vec{E}_{1n} + \vec{E}_{2n} + \vec{E}_{3n} = 0$$

$$\vec{E}_{12} = \vec{E}_{1n} - \vec{E}_{2n} = U \quad \Rightarrow \quad \text{Tension composée}$$

$$U = 2.V.\cos 30^\circ = \sqrt{3}.V$$

Dans un système triphasé équilibré la somme des grandeurs qui le constituent est nulle à tout instant.

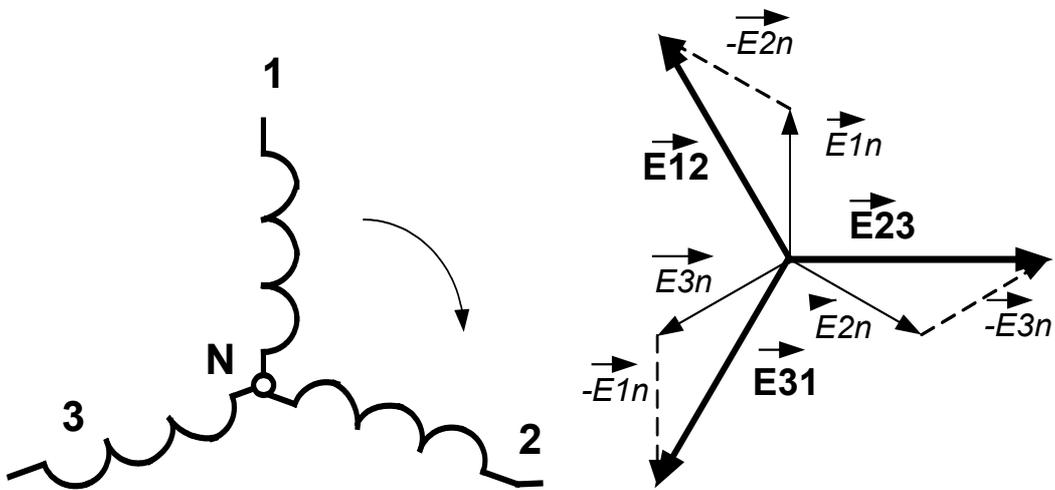


Fig. 10 - 4

10.1.5. Charges montées en « Etoile »

Charge équilibrée

Une charge est équilibrée si elle est constituée de trois impédances identiques $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$ (fig. 10 – 5). Le courant dans chaque élément est égal au courant I_L dans la ligne ($I_1 = I_2 = I_3 = I_L$).

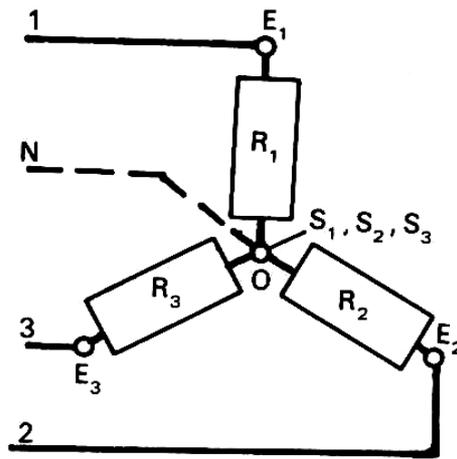


Fig. 10 - 5

La tension aux bornes de chaque élément est égale à la tension simple V . Les tensions aux bornes des éléments (fig. 10 – 6a) et les courants qui les traversent (fig. 10 – 6b) sont déphasées à 120° ($2\pi/3$).

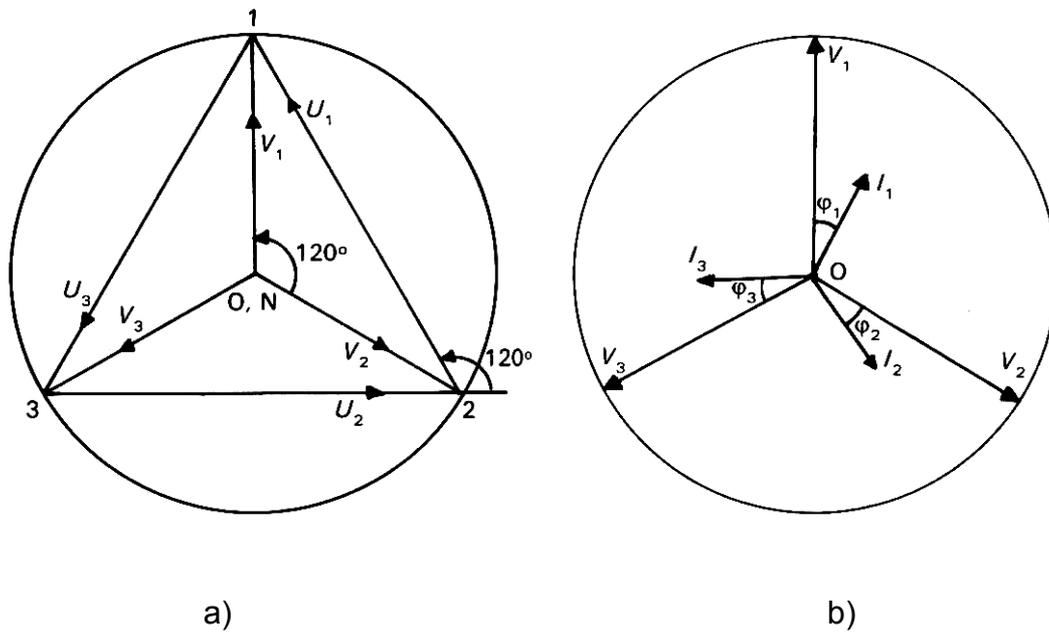


Fig. 10 - 6

Note : Si le récepteur est équilibré, le courant dans le fil neutre étant nul à tout instant, la différence de potentiel $V_{NN'}$ est nulle et le fil neutre peut être supprimé.

Charge déséquilibrée

Une charge est déséquilibrée si elle est constituée de trois impédances non identiques $Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$ (fig. 10 – 5). Le courant dans chaque élément est égal au courant de ligne, mais différent dans chacune des phases ($I_1 \neq I_2 \neq I_3$). Le courant dans le fil neutre n'est pas nul et la différence de potentiel $V_{NN'}$, non nulle apparaît entre les points N et N' (fig. 10 – 7). Le fil neutre ne peut pas être supprimé.

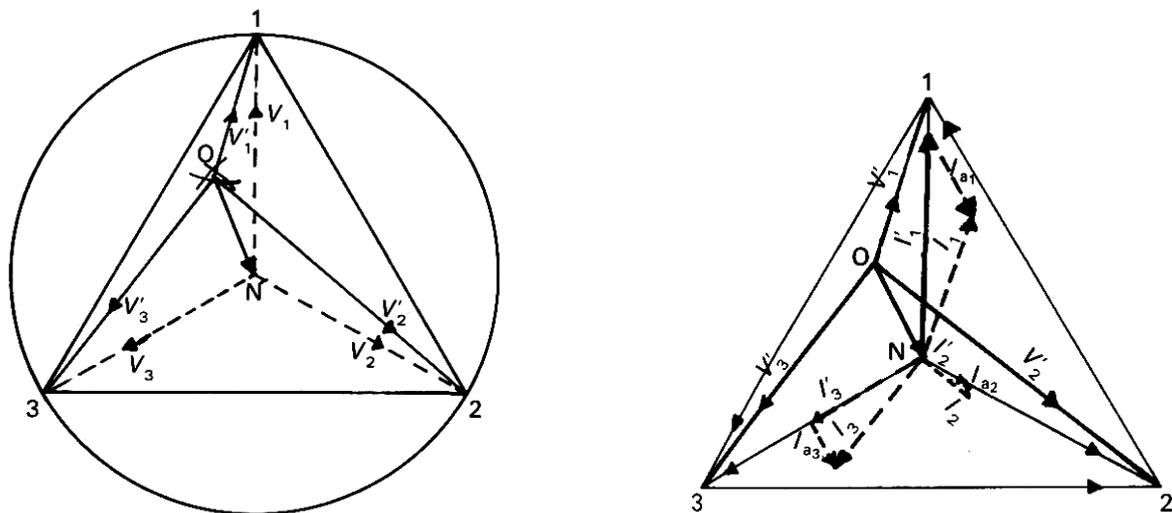


Fig. 10 - 7

Importance du fil neutre : La présence du fil neutre assure une tension constante aux bornes des récepteurs élémentaires que le récepteur soit équilibré ou non. La moindre dissymétrie provoque un déséquilibre des tensions efficaces aux bornes des récepteurs élémentaires. Il en résulte, soit une surtensions, soit une sous tension et une modification de fonctionnement des récepteurs.

Remarque : Le fil neutre est indispensable dans une installation d'alimentation triphasée afin de récupérer l'intensité éventuelle due à un déséquilibre accidentel ou pas.

10.1.6. Charges montées en « Triangle »

Trois récepteurs élémentaires sont associés en série et chaque fil de ligne est relié à un sommet du triangle (fig. 10 – 8).

Chaque récepteur élémentaire est soumis à la tension composée U et est traversé par un courant appelé courant de branche J :

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

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

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

- Charge équilibrée:

$$J_1 = J_2 = J_3 = J;$$

$$\vec{J}_1 + \vec{J}_2 + \vec{J}_3 = 0;$$

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

- Charge déséquilibrée : $J_1 \neq J_2 \neq J_3$

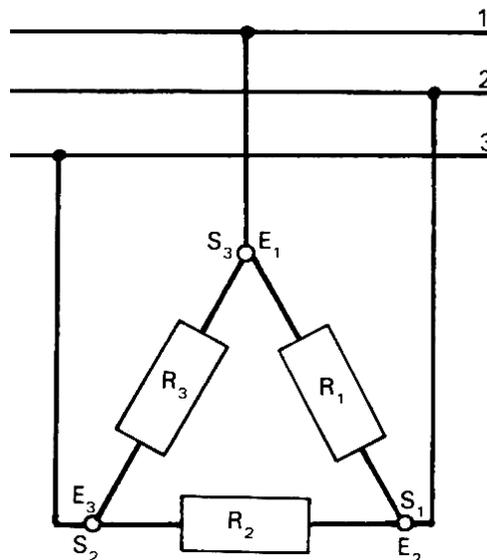


Fig. 10 - 8

10.2. Puissance en régime triphasé

10.2.1. Puissance en régime triphasé quelconque

Montage « Etoile » avec neutre

$$P_k = V_{kN} \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k$$

$$Q_k = V_{kN} \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k$$

Puissance active totale absorbée par le circuit:

$$P = \sum P_k = \sum V_{kN} \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k = V \cdot \sum I_k \cdot \cos \varphi_k$$

Puissance réactive totale absorbée par le circuit:

$$Q = \sum Q_k = \sum V_{kN} \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k = V \cdot \sum I_k \cdot \sin \varphi_k$$

Montage « Triangle »

$$P_k = U_k \cdot J_k \cdot \cos \varphi_k$$

$$Q_k = U_k \cdot J_k \cdot \sin \varphi_k$$

Puissance active totale absorbée par le circuit:

$$P = \sum P_k = \sum U_k \cdot J_k \cdot \cos \varphi_k = U \cdot \sum J_k \cdot \cos \varphi_k$$

Puissance réactive totale absorbée par le circuit:

$$Q = \sum Q_k = \sum U_k \cdot J_k \cdot \sin \varphi_k = U \cdot \sum J_k \cdot \sin \varphi_k$$

10.2.2. Puissance en régime triphasé équilibré

Montage « Etoile » (avec ou sans fil neutre)

$$V_1 = V_2 = V_3 = V \quad \text{et} \quad I_1 = I_2 = I_3 = I$$

$$P_k = V \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$Q_k = V \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Puissance active totale absorbée par le circuit:

$$P = \Sigma P_k = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Puissance réactive totale absorbée par le circuit:

$$Q = \Sigma Q_k = 3 \cdot V \cdot I \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Montage « Triangle »

$$U_1 = U_2 = U_3 = U \quad \text{et} \quad J_1 = J_2 = J_3 = J = \sqrt{3} \cdot I$$

$$P_k = U \cdot J_k \cdot \cos \varphi$$

$$Q_k = U \cdot J \cdot \sin \varphi$$

Puissance active totale absorbée par le circuit:

$$P = \Sigma P_k = 3 \cdot U \cdot J \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Puissance réactive totale absorbée par le circuit:

$$Q = \Sigma Q_k = 3 \cdot U \cdot J \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

11. VERIFICATION DE L'ETAT DES COMPOSANTS D'UN CIRCUIT A COURANT ALTERNATIF

Dans ce chapitre seront présentées les procédures de vérification des composants de circuit à courant alternatif : bobine, résistance, condensateur, ainsi que les transformateurs. Les appareils utilisés dans ce but sont : le multimètre et le mesureur de tension d'isolement. Une courte présentation de ces appareils ainsi que quelques conseils sur leurs utilisations s'avèrent non seulement utiles mais aussi nécessaires.

11.1. Multimètre analogique

11.1.1. Présentation

Sur le terrain ou dans un atelier il s'impose fréquemment le besoin de déterminer et d'évaluer rapidement les résultats d'un test. Un multimètre analogique peut répondre parfaitement à cette atteinte.

Le multimètre analogique est construit à partir d'un appareil de mesure de type magnétoélectrique. Muni d'un dispositif de redressement (couplé automatiquement suite à une sélection convenable effectuée avec le commutateur rotatif de gamme) il permet d'effectuer des mesures des courants et des tensions, ainsi que des mesures des résistances, en courant alternatif ou en courant continu.

11.1.2. Utilisation comme ohmmètre

L'ohmmètre est un appareil de mesure des résistances. Un multimètre possède dans son répertoire la fonction d'ohmmètre et peut être utilisé comme tel.

11.2. Ohmmètre

L'ohmmètre est un appareil pour la mesure des résistances avec une lecture directe. Son fonctionnement est basé sur la loi d'Ohm. Bien qu'il y a une grande variété d'ohmmètres analogiques on peut citer les deux variantes les plus utilisées : ohmmètre série et ohmmètre parallèle (dérivation).

11.2.1. Ohmmètre série

Un ohmmètre série est caractérisé par une échelle inversement graduée et fortement non uniforme.

Les valeurs extrêmes de l'échelle sont :

- ∞ , pour les bornes de l'ohmmètre à vide ;
- 0, pour les pointes du touches en court-circuit.

L'ohmmètre série est utilisé pour la mesure des résistances de grandes valeurs. Un multimètre est muni d'au moins deux domaines de mesures qu'on peut choisir avec le commutateur rotatif.

Exemple :

Le domaine de mesure est indiqué par un facteur de multiplication : $\times 1 \text{ K}\Omega$ ou $\times 100 \text{ K}\Omega$. La valeur de la résistance mesurée est obtenue suite à la multiplication de la lecture avec le facteur de multiplication indiqué par le commutateur rotatif.

Réglage de l'ohmmètre. Un problème particulier des ohmmètres est leur alimentation par des piles. Celles-ci vieillissent, ce qui conduit à des indications erronées. Pour éviter la diminution de la précision, avant l'utilisation, il est nécessaire d'effectuer le réglage des indications des extrémités de l'échelle.

Le réglage de l'indication pour résistance ∞ (l'ohmmètre à vide) est effectué à l'aide du correcteur de zéro du multimètre.

Le réglage de l'indication pour résistance 0 (pointe de touche de l'ohmmètre en court-circuit) est effectué à l'aide d'un potentiomètre rotatif placé sur le boîtier de l'appareil.

11.2.2. Ohmmètre parallèle (dérivation)

Les multimètres modernes et performants permettent aussi la mesure des résistances de valeurs réduites avec assez grande précision. A cette fin les multimètres peuvent fonctionner en mode ohmmètre dérivation.

L'échelle d'un ohmmètre parallèle est normale (le 0 à gauche de l'échelle) et à la base non uniforme.

En utilisant des dispositifs adéquats on a réalisé des multimètres avec des échelles linéaires et de calibres finis.

Exemple :

Le multimètre MX 430 a 2 gammes linéaires de mesure pour les résistances de calibres 50Ω et 500Ω .

La valeur de la résistance mesurée correspond à la lecture effective sur l'échelle marquée avec le symbole Ω ayant 50 graduation, lorsque le calibre utilisé est 50Ω . Lorsque le calibre utilisé est 500Ω il faut multiplier par 10 la lecture relevée en utilisant la même échelle.

Réglage de l'ohmmètre dérivation. Le réglage de l'indication pour la résistance à mesurer 0 (pointes de touche de l'ohmmètre en court-circuit) s'effectue à l'aide du correcteur zéro du multimètre.

Remarque :

Pour les ohmmètres dérivation ayant la plage de mesure infini, le réglage de l'indication correspondant à cette extrémité de l'échelle s'effectue en laissant les bornes à vide et en utilisant le potentiomètre rotatif placé sur le boîtier de l'appareil.

Lorsque la plage en mode ohmmètre est limitée (*exemple* : le multimètre MX 430 de calibre 50Ω et 500Ω), ce réglage n'est plus faisable.

Note importante : Après avoir effectué les mesures avec un ohmmètre (série ou dérivation) il faut changer la position du commutateur sur une position différente. Si non, le circuit reste alimenté et la pile se décharge inutilement.

11.3. Mégohmmètre

Ce sont des appareils à lecture directe destinés à mesurer des résistances de très grandes valeurs (de l'ordre de mégohms). Les mégohmmètres fonctionnent d'après le même principe que les ohmmètres.

Une mégohmmètre (ou bien contrôleur d'isolation; *exemple* : MX 435 Métrix) permet la mesure d'isolement et de continuité.

Avant d'effectuer une mesure avec le mégohmmètre il faut faire le réglage de l'appareil (appelé aussi, tarage).

Le réglage de l'indication 0 est effectué en agissant sur un potentiomètre rotatif, les bornes de l'appareil en court circuit; ce qu'on peut également réaliser en introduisant une fiche banane dans une douille de tarage (l'extrémité droite de l'échelle).

Le réglage de l'indication maximum de l'aiguille (l'extrémité gauche de l'échelle) est effectué avec le correcteur de zéro de l'appareil.

11.4. Vérification des composants

Les résistances, les bobines et les condensateurs comme tous les autres composants, peuvent être endommagés ou déclassés suite à une utilisation abusive impliquant le non-respect des paramètres nominaux : la puissance maximale et la tension nominale pour les résistances, la tension nominale pour les bobines et les condensateurs.

La vérification d'un composant s'avère nécessaire dans toutes activités pratiques de maintenance. En outre, il faut faire une différence entre la vérification d'un composant et la mesure d'un paramètre du composant.

11.4.1. Vérification des résistances

La vérification des résistances peut s'effectuer avec un multimètre fonctionnant en mode ohmmètre. Une résistance en état de défaut ne permet plus le passage du courant électrique. Elle présente une interruption dans sa continuité et sa résistance est infinie ou au moins très grande.

La résistance infinie, mise en évidence avec le multimètre, équivaut à l'interruption de la résistance dans sa structure et relève un composant défectueux.

Remarque :

Avant de faire une vérification avec l'appareil de mesure de résistance, on peut faire une vérification visuelle. Une résistance défectueuse peut montrer des déformations de sa forme, des traces noires de la fumée, ce qui témoigne un possible état défectueux.

11.4.2. Vérification des bobines

La vérification des bobines peut s'effectuer avec un multimètre fonctionnant en mode ohmmètre. Les bobines ont une résistance très faible (*exemple* : les bobines d'un moteur triphasé de 4,5 CV ont une résistance qui ne dépasse pas un ohm). Cette résistance peut être assimilée avec une valeur zéro, même pour un multimètre de sensibilité élevé.

Une bobine défectueuse présente une interruption qui augmente beaucoup sa résistance.

On peut supposer la vérification de l'état d'une bobine comme une vérification de sa continuité prouvée par l'indication «0 » d'un multimètre en mode ohmmètre.

Remarque :

Avant de faire la vérification avec l'ohmmètre il est recommandé de faire une vérification visuelle. Une bobine défectueuse peut présenter des déformations, des traces de brûlures ou de fumée, etc.

11.4.3. Vérification des condensateurs

Le condensateur bloque le passage du courant continue. La vérification avec un ohmmètre est basée sur ce principe. Lorsqu'on branche les pointes de touche du multimètre en mode ohmmètre aux bornes d'un condensateur déchargé, on enregistre un mouvement de l'aiguille d'une valeur presque « 0 », vers l'infini qui

traduit sa charge progressive. Une fois le condensateur chargé, l'ohmmètre indique « absence de continuité » ou résistance infinie.

Un condensateur défectueux ne se charge pas. Il présente toujours la résistance infinie et l'aiguille ne bouge pas au cours de la vérification.

Remarque :

Il ne faut pas oublier à décharger le condensateur en court-circuitant ses armatures avant d'effectuer la vérification.

Avant la vérification avec l'ohmmètre il est recommandé d'effectuer une vérification visuelle afin d'identifier l'état physique du composant ainsi que des traces de brûlure ou de fumée.

11.4.4. Vérification des transformateurs

La vérification des bobines des transformateurs a été présentée au paragraphe précédent (10.4.2.).

Pour la vérification de la résistance d'isolement on utilise un contrôleur de tension d'isolement ou encore en mégohmmètre. La valeur de cette résistance d'isolement dépasse en générale l'ordre des mégohms ($10^6 \Omega$).

12. MESURES DANS UN CIRCUIT A COURANT ALTERNATIF

12.1. Instruments de mesure en courant alternatif

En courant alternatif on utilise les ampèremètres et les voltmètres de courant alternatif pour mesurer les courants et les tensions.

Les appareils analogiques de courant alternatif les plus utilisés sont :

- appareils magnétoélectriques;
- appareils ferromagnétiques;
- appareils électrodynamiques.

12.1.1. Ampèremètres et voltmètres magnétoélectriques

Les symboles sont présentés sur la fig. 12 - 1 :

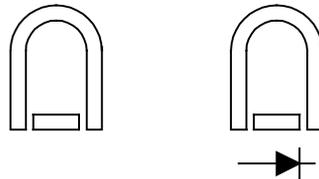


Fig. 12 - 1

Ils sont réalisés à la base d'un élément central du type magnétoélectrique. A l'absence des dispositifs supplémentaires on peut les utiliser seulement pour la mesure en courant continu. Munis d'un dispositif de redressement les ampèremètres ou les voltmètres peuvent mesurer aussi en courant alternatif. Le couplage du dispositif de redressement à l'appareil magnétoélectrique est réalisé à l'aide d'un bouton ou d'un commutateur situé sur le boîtier de l'appareil. C'est le sélecteur du type du courant à mesurer.

Remarque importante :

Lorsqu'on effectue une mesure avec un ampèremètre ou un voltmètre magnétoélectrique en courant alternatif il faut bien faire l'attention au type du courant et au choix du calibre. L'équipage mobile réagit à la valeur moyenne de la grandeur mesurée qui est égale à zéro en courant alternatif. Si les caractéristiques de l'appareil ne sont pas correctement sélectionnées, l'aiguille indicateur peut montrer la graduation 0 pendant que le courant dans l'appareil n'est pas nul (le dispositif de redressement n'étant branché) ou bien « taper » très fort à droite vers la fin de l'échelle (parce que le courant est plus grand que le calibre utilisé). La conséquence peut être l'endommagement de l'appareil.

Il est évident combien il est important de sélectionner correctement le type de courant lorsqu'on fait une mesure de courant. Un ampèremètre ou un voltmètre magnétoélectrique présentent aussi d'habitude des échelles différentes correspondant au type du courant.

La présence du dispositif de redressement influence de façon négative la précision de l'appareil. Souvent on peut voir marquées sur le cadran de l'ampèremètre ou de voltmètre magnétoélectrique deux classes de précisions différentes, correspondant au type du courant : celle en courant alternatif est toujours plus grande que celle en courant continu.

Les bornes de l'ampèremètre et du voltmètre magnétoélectrique, ainsi que les calibres (sauf de rares exception), restent les mêmes en courant continu et en courant alternatif.

12.1.2. Ampèremètres et voltmètres ferromagnétiques

Le symbole est présenté sur la fig. 12 - 2 :



Fig. 12 - 2

Les appareils sont réalisés à la base d'un organe de mesure ferromagnétique et ils peuvent fonctionner en même temps en courant continu et courant alternatif sans un dispositif supplémentaire comme dans le cas d'un appareil magnétoélectrique.

Les erreurs de mesure augmentent avec la fréquence ce qui limite leur fonctionnement jusqu'à quelques centaines de hertz.

Ce sont des appareils à performances réduites mais robustes, simples et au coût réduit. On les utilise comme appareils de tableau. Les ampèremètres ferromagnétiques peuvent mesurer directement des courants allant jusqu'à 1A ou même 5A sans avoir de shunts dans leurs construction.

12.1.3. Ampèremètres et voltmètres électrodynamiques

Le symbole est présenté sur la fig. 12 - 3 :

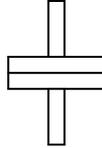


Fig. 12 - 3

Ils sont fondés sur les actions électrodynamiques développées entre un circuit inducteur fixe (généralement constitué par deux demi bobines) créant un champ magnétique à l'intérieur duquel se déplace un cadre mobile de faible inertie monté sur des pivots et entraînant une aiguille.

Les appareils électrodynamiques peuvent fonctionner avec la même précision en courant continu ainsi qu'en courant alternatif. Ils sont utilisés surtout comme wattmètres.

Leur construction est très compliquée, ce qui augmente leur coût. Les ampèremètres et les voltmètres de grande précision (classe 0,5 et moins) sont les appareils préférés dans les laboratoires de mesure.

Comme conclusion on rappelle que le branchement de **l'ampèremètre** dans le circuit est effectué en **série**. Le branchement en parallèle peut conduire à son endommagement (à cause de sa faible résistance un courant de forte intensité traverserait l'appareil). Ce branchement défectueux est considéré comme une grave erreur dans la technologie des mesures.

Quant au branchement du **voltmètre**, il est fait en **parallèle** entre les deux points où on veut déterminer la tension. Le branchement incorrect du voltmètre, c'est à dire en série, conduit à une chute brutale du courant dans le circuit, à cause de sa grande résistance, mais ne conduit pas à l'endommagement de l'appareil.

12.2. Interprétation des lectures des instruments de mesure à courant alternatif

Dans ce chapitre on présente deux caractéristiques essentiels pour tous les appareils de mesure analogiques : les échelles et les gammes.

12.2.1. Echelle

L'échelle représente un ensemble de graduations sur le cadran de l'appareil. Avec l'aiguille elle réalise le dispositif de lecture de l'appareil de mesure.

La lecture d'un appareil de mesure au cours d'une mesure ne présente pas (dans la plupart des cas) directement la valeur mesurée. On effectue d'habitude cette lecture comme un nombre de graduations et ensuite par un calcul simple on obtient la valeur de la grandeur mesurée.

Pour la plupart des appareils de mesure multicalibres on remarque la présence de plusieurs échelles sur le cadran. Chaque échelle est destinée à un ou plusieurs calibres précis.

Exemple :

- Un ampèremètre magnétoélectrique, réalisé à effectuer de mesures en courant continu ainsi qu'en courant alternatif, présente deux échelles différentes correspondantes aux types du courant.
- Un multimètre conçu pour la mesure du courant, de la tension et des résistances comprend des échelles appropriées aux types de grandeurs mesurées.

12.2.2. Gammes (Calibres)

La gamme (le calibre) d'un appareil de mesure représente l'intervalle constitué par les valeurs minimale et maximale qui peuvent être mesurées par celui-ci. Pour la

plupart des appareils de mesure une gamme (un calibre) commence de zéro. Sa limite supérieure représente le calibre. Pour une grandeur ayant la valeur égale au calibre l'aiguille de l'appareil dérive de toutes les graduations de l'échelle appropriée.

Les appareils de mesure portables (ampèremètre, voltmètre, wattmètre, ohmmètre) sont réalisés généralement avec plusieurs gammes de mesure, donc avec plusieurs calibres. Les appareils de mesure de tableau possède un seul calibre.

Choisir un certain calibre c'est accéder à une gamme de valeurs mesurables. Un appareil à plusieurs gammes est plus performant et plus efficace.

Adapter la gamme de mesure (le calibre) à la grandeur mesurée, permet de bénéficier de la qualité de l'appareil reflétée par sa classe de précision.

L'exemple suivant va faire bien comprendre cet aspect très important visant l'utilisation des appareils de mesure.

On suppose que les résultats obtenus suite à la mesure de deux courants effectuée avec un ampèremètre de classe de précision $C = 1,5$ sont $I_1 = 0,85 \text{ A}$ et $I_2 = 3,65 \text{ A}$.

Le calibre utilisé pour les mesures était $\text{Cal} = 5 \text{ A}$.

L'incertitude absolue est donnée par la relation :

$$\Delta I = \frac{C \times \text{Cal}}{100} \Rightarrow \Delta I = \frac{5 \times 1,5}{100} = 0,075 \text{ A}$$

L'incertitude relative qui exprime la précision de la mesure est déterminée par la relation :

$$\Delta I_r = \frac{\Delta I}{I} \times 100$$

Pour le premier courant I_1 on a :

$$\Delta I_1 = \frac{0,075}{0,85} \times 100 = 8,82\%$$

Pour le deuxième courant I_2 on a :

$$\Delta I_2 = \frac{0,075}{3,65} \times 100 = 2,06\%$$

La qualité de la deuxième mesure est nettement plus élevée et cette mesure est plus précise que la première. On peut dire que le calibre utilisé dans le premier cas n'a pas été adapté correctement.

Un calibre approprié à la grandeur mesurée est celui qui permet d'obtenir des déviations dans le dernier tiers (voir deuxième moitié) de l'échelle de lecture. C'est donc le plus petit calibre supérieur à la grandeur mesurée.

Ce n'est qu'en utilisant les calibres appropriés au cours des mesures qu'on bénéficie des qualités des appareils de mesure afin d'obtenir de mesure de bonne précision.

12.2.3. *Interprétation des lectures des appareils de mesure*

Lorsqu'on effectue une mesure on utilise évidemment un calibre approprié, symbolisé C. L'aiguille prendra une position exprimée par un certain nombre de divisions lu par le manipulateur, symbolisé L. Cette lecture est effectuée sur une échelle comportant un certain nombre de divisions, symbolisée E.

On définit le coefficient de lecture K de l'appareil comme le rapport :

$$K = \frac{\text{calibre}}{\text{nombre de divisions de l'échelle}}$$

ou avec la relation :

$$K = \frac{C}{E}$$

La valeur de la grandeur mesurée avec son unité (qui est celle du calibre) est alors égale au produit du coefficient K par la lecture L. Donc :

$$V = K.L,$$

où V est la valeur de la grandeur mesurée.

L'échelle peut être uniforme (c'est le cas des appareils magnétoélectriques) ou non uniforme (c'est le cas des appareils ferromagnétiques ou électrodynamiques).

Des solutions constructives convenables peuvent rendre uniforme l'échelle graduée des appareils modernes, à l'exception des graduations dans la première partie.

12.3. Mesures en courant alternatif

Dans ce chapitre on apporte des précisions sur les activités liées à la prise de mesures et sur les mesures de sécurité qui les concernent.

12.3.1. Branchement des appareils de mesure

Au cours du branchement des instruments de mesure doivent être suivies les règles de prévention citées ci-dessous. Leur respect assure en même temps la sécurité des personnes et la protection de l'équipement.

Les règles du câblage de la source d'énergie vers le récepteur en essai exigent l'isolation du secteur :

- Câbler d'abord le circuit de puissance en série (le circuit d'intensité), puis les circuits de dérivation (de tension).
- Prévoir les sections de conducteurs conformes aux normes industrielles et tenir compte de leur isolement.

- Vérifier le serrage des connexions (cosses, fiches, connecteurs) et leur état d'isolement pour la sécurité de l'opération et la protection des contacts aux borniers.
- S'assurer de l'existence des dispositifs de protection de surcharge (fusible) correctement calibrés.
- Remplacer les fusibles défectueux avec des fusibles calibrés de valeurs appropriés et ne pas essayer de les « refaire ».

12.3.2. Mesure des valeurs aux différents points d'un circuit

Effectuer avec le respect des certaines consignes la prise de mesure assure l'utilisation correcte de l'appareil de mesure et conduit à des déterminations exactes et sécuritaires des grandeurs électriques.

- Une bonne posture de travail permet une manipulation correcte des appareils de mesure et une lecture exacte de leurs indications.
- S'assurer du fonctionnement correct de l'appareil utilisé pour la prise de mesure et de sa propriété à la grandeur visée. Le choix convenable de la gamme de mesure est un impératif qu'il faut envisager toujours pour ne pas mettre en danger le fonctionnement des appareils de mesure.
- S'assurer que le calibre choisi pour l'appareil au cours d'une mesure est suffisamment grand par rapport à la grandeur à mesurer.
- Lorsqu'on n'a pas une idée de la valeur de la grandeur à mesurer, choisir toujours le plus grand calibre de l'appareil utilisé.
- Choisir pour la lecture des indications des appareils l'échelle appropriée.

Exemple : Pour un appareil de mesure permettant des mesures en courant alternatif et en courant continu les échelles peuvent être différentes. Utiliser donc l'échelle correspondante au type du courant.

- Manipuler de façon sécuritaire les sondes utilisées, lorsqu'il y a le cas, et les pointes de touche.
- Vérifier la mise à la terre en un seul point.

12.3.3. Mesure des courants alternatifs

Lorsqu'on veut mesurer des courants alternatifs dans un circuit il faut utiliser un ampèremètre convenable. Sur son cadran doit être marqué le symbole « alternatif », « ~ », qui exprime sa capacité d'être utilisé pour les mesures en courant alternatif. L'ampèremètre doit être branché en série dans le circuit où on veut déterminer le courant alternatif. Il faut que le courant à mesurer passe à travers l'appareil.

Le point d'insertion de l'ampèremètre doit être convenablement choisi afin de ne pas nuire à l'intégrité du circuit et de pouvoir assurer sa continuité après le branchement et, en suite, après l'enlèvement de l'ampèremètre.

Les ampèremètres, ayant de faibles résistances, sont des appareils très sensibles.

L'ampèremètre doit être branché seulement dans le circuit hors l'alimentation. Le branchement incorrect en parallèle, peut aboutir à l'endommagement de l'ampèremètre.

Avant de commencer la mesure vérifier si le commutateur qui réalise la sélection du type du courant est en position correcte (fonctionnement en courant alternatif). Le choix incorrect du type du courant représente une autre erreur grave de manipulation car elle peut conduire de même à l'endommagement de l'appareil.

Le choix du calibre est aussi très important. Il faut s'assurer que le calibre est suffisamment grand pour permettre la mesure, c'est-à-dire il est supérieur à la valeur du courant. Il est recommandé de commencer la mesure en choisissant un calibre élevé et de l'adapter convenablement en suite et à petit pas au courant de la mesure. De cette manière on évite le déplacement brutal de l'équipage mobile suite auquel l'aiguille peut se déformer ou même se briser en frappant l'arrêt de fin d'échelle.

Pour la mesure il faut rédiger toujours un tableau d'enregistrement dans lequel on spécifie le calibre utilisé pour la mesure et l'échelle.

Le tableau comprendra une colonne pour le coefficient de lecture K, une colonne pour inscrire le résultat de la lecture et une dernière colonne pour inscrire la valeur de la grandeur mesurée. N'oublier jamais à inscrire dans chaque colonne l'unité de mesure !

Tableau d'enregistrement pour la mesure d'un courant

Calibre [A] C	Echelle [div] E	Coefficient K [A / div] $K = C / E$	Lecture [div] L	Intensité [A] I

Les calculs associés aux processus de mesure sont élémentaires :

- Calculer le coefficient de la lecture $K = \frac{C}{E}$, exprimé en A/div pour une mesure de courant.
- Calculer la valeur du courant : $I = L.K$.

12.3.4. Mesure des tensions alternatives

Lorsqu'on veut mesurer une tension alternative (une différence de potentiels) aux bornes d'un composant ou entre deux points d'un circuit électrique il faut utiliser un voltmètre convenable. Le marquage du type du courant (alternatif, dans ce cas) doit figurer sur son cadran, ce qui prouve la possibilité d'utilisation de l'appareil en courant alternatif.

Le voltmètre doit être branché en parallèle avec le composant aux bornes duquel on veut déterminer la tension ou directement aux points entre lesquelles on veut mesurer la différence de potentiels.

Avant de commencer le processus de mesure il faut s'assurer de la correcte sélection du type du courant. Le choix incorrect du type du courant peut conduire à des fausses conclusions sur la mesure et peut mettre en danger l'appareil.

Le branchement incorrect (en série) ne conduit pas à l'endommagement du voltmètre, à cause de sa grande résistance, mais diminue fortement le courant dans le circuit.

Au cas de manque d'informations sur la grandeur approximative de la tension à mesurer il est recommandé de commencer le processus de mesure en utilisant un grand calibre qu'on adaptera en suite à la valeur de la tension. Cette approche permet de protéger l'aiguille de détérioration suite au coup brusque sur l'arrêt de fin d'échelle et de profiter de la précision de l'appareil.

Le tableau d'enregistrement comprendra les mêmes cinq colonnes et les calculs associés aux processus de mesure sont analogues à ceux présentés pour la mesure des courants.

Tableau d'enregistrement pour la mesure d'une tension

Calibre [V] C	Echelle [div] E	Coefficient K [V / div] $K = C / E$	Lecture [div] L	Tension [V] U

Remarque :

Au cours du processus de mesure il faut se préoccuper seulement de la correcte manipulation de l'appareil (le choix du calibre et de l'échelle utilisés) et de l'inscription des résultats de la mesure dans le tableau d'enregistrement. Une fois le processus de mesure achevé on s'occupe des calculs des valeurs des grandeurs mesurées (courant, tension, puissance).

12.4. Erreurs de mesure

12.4.1. Définition des erreurs

Une grandeur à mesurer possède sa valeur réelle. Le résultat obtenu pour la valeur de cette grandeur suite à un processus de mesure peut différer plus ou moins de sa valeur réelle et cela en dépit des moyens et des méthodes de mesure utilisés, ainsi que des soins de la manipulation.

Soit X_0 la valeur de référence de la grandeur et X_m la valeur obtenue pour la grandeur suite à la mesure.

L'*erreur absolue* est définie comme la différence :

$$\varepsilon = X_m - X_0$$

L'*erreur absolue* exprime de combien on s'est « trompé » lors de la mesure mais elle ne donne pas des informations sur la précision de la mesure.

L'*erreur relative* ε_r est exprimée par le pourcentage définie comme :

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{X_0} \cdot \frac{X_m - X_0}{X_0} \cdot 100 [\%]$$

L'*erreur relative* permet d'apprécier la précision d'une mesure.

12.4.2. Types d'erreurs

D'après les causes qui les produisent, les erreurs sont classifiées comme:

- *Erreurs subjectives* : dues aux manipulations et produites par l'attention, l'habilité et l'acuité visuelle de l'opérateur.

Les *erreurs subjectives* les plus fréquentes sont :

- La mauvaise appréciation des fractions des graduations de l'échelle.
- Le choix incorrect de l'échelle de lecture.
- Le défaut de parallaxe (l'axe de la visée n'est pas perpendiculaire à l'aiguille et au cadran en même temps lorsqu'on fait la lecture).

- *Erreurs objectives* : dues aux imperfections des appareils de mesure, aux influences de l'environnement ou encore à la méthode utilisée.

12.4.3. Caractéristiques métrologiques des appareils de mesure

Les appareils de mesure sont définis par des caractéristiques qui sont en effet des critères de qualité des ceux-ci. Ces caractéristiques font l'objet des normes internationales et nationales qui imposent aussi les vérifications périodiques de conformité. L'utilisation et le vieillissement ont pour conséquence une possible diminution des qualités initiales d'où la nécessité de contrôle régulier.

- *La sensibilité* est l'aptitude de l'appareil de mesure (à aiguille) à déceler de petites variations de la grandeurs à mesurer.

Note : Il ne faut pas oublier qu'un appareil de mesure peut avoir plusieurs calibres, mais il est incorrect de dire qu'il a plusieurs sensibilités!

- *La résolution* est la valeur du pas de quantification dans la gamme d'un appareil numérique. Elle correspond au coefficient de lecture des appareils électromécaniques. C'est la plus petite variation de la valeur de la grandeur que l'appareil peut détecter dans une gamme.

La résolution de l'appareil de mesure est caractéristique pour chacun de son calibre. On peut accepter pour résolution d'un appareil la valeur qui correspond à une graduation (la plus petite) d'une gamme de mesure.

Exemples :

- 1) Soit un voltmètre électromagnétique ayant une échelle $E = 120$ graduations. Lorsqu'on utilise une gamme (un calibre) $C = 60$ V, la résolution de l'appareil est égale à :
 $60 / 120 = 0,5$ V.
- 2) Un appareil numérique a 100000 points de mesure. Dans la gamme 1 V, la résolution est égale à 10 μ V.

- La *précision* d'un appareil de mesure est une caractéristique globale. Elle exprime la propriété de l'appareil de mesure de donner des indications les plus rapprochées possibles de la valeur de la grandeur à mesurer.

La précision d'un appareil de mesure électromécanique est caractérisée par la classe de précision (la norme C 42 100).

Les valeurs utilisées pour la classe de précision des appareils de mesure sont :

- Classes 0,05 ; 0,1 ; 0,2 : pour les appareils étalons (utilisés en laboratoire) ;
- Classes 0,5 ; 1 ; 1,5 : pour les appareils de contrôles techniques (utilisés pour contrôle et vérifications) ;
- Classes 0,5 et 1 (rarement), 1,5 ; 2,5 et 5 : pour les appareils de tableau.

Remarque : La classe de précision caractérise l'appareil et pas la mesure. Elle peut être définie comme l'erreur relative due à l'appareil quand on mesure une grandeur dont la valeur est égale au calibre. Pour obtenir une bonne précision de la mesure il faut utiliser l'appareil de manière que l'indication obtenue soit la plus proche au calibre (au moins dans la deuxième partie de l'échelle).

La précision des appareils de mesure numériques n'est pas exprimée par une classe de précision. Elle est généralement donnée en pourcentage de la lecture pour chaque gamme et l'exactitude du dernier chiffre, donc elle représente une erreur absolue. La précision ne dépend pas que de sa résolution. Il faut prendre en considération la qualité des composants, la précision des références de la tension et de temps, etc.

Exemple :

Pour la gamme 2 V la résolution est 1 mV et la précision est :

$\pm 0,1\% L \pm 2d$ (L : Lecture ; d : digit ou unité).

Si on mesure $L = 1 V$ la précision sera : $\pm 0,1\% \cdot 1V \pm 2 \cdot 1 mV = \pm 3 mV$

La précision d'un appareil de mesure implique deux autres caractéristiques :

- *La fidélité* : la propriété de l'appareil de donner des indications les plus rapprochées lorsqu'on répète la mesure dans les mêmes conditions .

Différents facteurs intérieurs et extérieurs peuvent perturber ces indications : les chocs sur les organes mobiles, les champs magnétiques terrestres ou produits par un appareil voisin générateur de champs parasites, les phénomènes électrostatiques, la diminution de la valeur des résistances d'isolement des circuits électriques de l'appareil due à l'humidité, la diminution du champ magnétique des aimants permanents dans les appareils magnétoélectriques, la dilatation des pièces mécaniques et la résistance des conducteurs subissant des variations de température.

- *La justesse* : c'est la qualité d'un appareil à traduire la vraie valeur de la grandeur qu'il mesure.

Dans les performances d'efficacité de mesure il faut aussi citer :

- pour les appareils électromécaniques : *la rapidité d'indication* (c'est la qualité que possède un appareil à donner dans un temps minimal la valeur de la grandeur à mesurer ou ses variations) ;
- pour les appareils numériques : *la cadence de lecture* (elle indique le nombre de mesures qu'effectue l'appareil en une seconde).

13. DEFINITION DES ELEMENTS DES SCHEMAS DE LIAISON A LA TERRE

L'utilisation de l'énergie électrique a pratiquement débuté en 1900. Aujourd'hui les normes d'installation électrique sont très développées et traitent tous les aspects importants pour la réalisation d'une installation correcte. En BT, la norme de référence est la CEI 364 et en France la NF C 15-100.

- Elle définit les règles d'établissement et de maintien des installations BT de façon à assurer :
 - ⇒ La sécurité des personnes et des animaux.
 - ⇒ La conservation des biens.
 - ⇒ La non perturbation du réseau de distribution publique.

- Elle comprend six parties :
 - 1- Domaine d'application, objets, prescriptions fondamentales.
 - 2- Définitions des termes utilisés.
 - 3- Détermination des caractéristiques générales des installations.
 - 4- Protection pour assurer la sécurité.
 - 5- Choix et mise en œuvre du matériels.
 - 6- Vérification et entretien des équipements.

Les normalisateurs ont porté une attention toute particulière aux dispositions à mettre en œuvre pour assurer la protection des personnes et des biens (partie 4 des normes suscitées). Cette préoccupation a conduit à la normalisation de trois **Schémas de Liaisons à la Terre - SLT** – encore appelés régimes du neutre. Avant de rappeler ce que sont ces trois schémas, il est intéressant de faire un petit rappel historique.

Dans tous les pays industrialisés, les réseaux et récepteurs BT sont mis à la terre pour des raisons de sécurité face au danger que représente le courant électrique pour les personnes. Les objectifs sont toujours les mêmes :

- Fixer le potentiel des conducteurs actifs par rapport à la terre en fonctionnement normal ;
- Limiter la tension entre les masses des matériels électriques et la terre en cas de défaut d'isolement ;
- Mettre en œuvre des dispositifs de protection qui suppriment le risque d'électrisation, voire d'électrocution des personnes; limiter les montées en potentiel dues aux défauts d'origine MT.

13.1. Définition selon les normes NF C 15-100 et CE 479-1/2

13.1.1. Effets du courant passant par le corps humain

Les dangers encourus par les personnes traversées par un courant électrique dépendent essentiellement de son intensité et du temps de passage. Ce courant dépend de la tension de contact qui s'applique sur cette personne, ainsi que de l'impédance rencontrée par ce courant lors de son cheminement au travers du corps humain. Cette relation n'est pas linéaire, car cette impédance dépend du trajet au travers du corps, de la fréquence du courant et de la tension de contact appliquée, ainsi que de l'état de l'humidité de la peau.

On spécifie les valeurs suivantes :

- *seuil de perception* : la valeur minimale du courant qui provoque une sensation pour une personne à travers laquelle le courant passe. Il est de l'ordre de 0,5 mA.
- *seuil de non lâcher* : la valeur maximale du courant pour laquelle une personne tenant des électrodes peut les lâcher. Généralement il est considéré à 10 mA.
- *seuil de fibrillation ventriculaire du cœur humain* : ce seuil dépend de la durée de passage du courant. Il est considéré égal à 400 mA pour une durée d'exposition inférieure à 0,1 s.

Les effets physiologiques du courant électrique sont récapitulés dans le graphique ci-dessous (fig. 13-1).

Résumé des conséquences du passage
du courant dans l'organisme

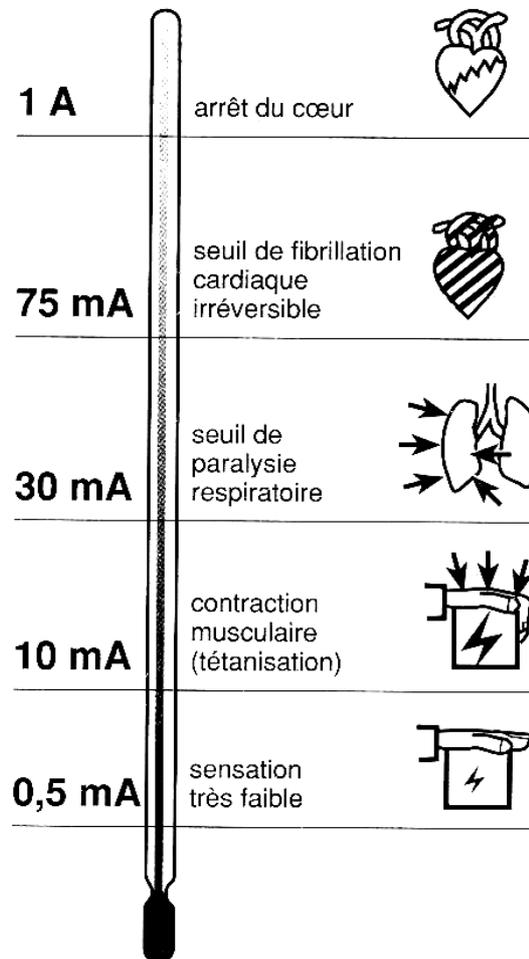


Fig. 13-1

Plus la fréquence du courant augmente, plus les risques de fibrillation ventriculaire diminuent : par contre, les risques de brûlure augmentent. Mais, plus la fréquence du courant augmente (entre 200 et 400 Hz), plus l'impédance du corps humain diminue. Il est généralement considéré que les conditions de protection contre les contacts indirects sont identiques à 400 Hz et à 50/60 Hz.

Le courant continu apparaît comme moins dangereux que le courant alternatif : en effet, il est moins difficile de lâcher des parties tenues à la main qu'en présence de courant alternatif. En courant continu, le seuil de fibrillation ventriculaire est beaucoup plus élevé.

Le développement des commandes électroniques risque de créer, en cas de défaut d'isolement, des courants dont la forme est composée de courant alternatif auquel se superpose une composante continue (courants de formes d'onde spéciales). Les effets de ces courants sur le corps humain sont intermédiaires entre ceux du courant alternatif et ceux du courant continu.

Les courants d'impulsion unique de courte durée sont issus des décharges de condensateurs et peuvent présenter certains dangers pour les personnes en cas de défaut d'isolement. Le facteur principal qui peut provoquer une fibrillation ventriculaire est la valeur de la quantité d'électricité $I.t$ ou d'énergie $I^2.t$ pour des durées de choc intérieures de 10 ms. Le seuil de douleur dépend de la charge de l'impulsion et de sa valeur de crête.

13.1.2. Protection contre les contacts directs quel que soit le régime de neutre

Les parties actives peuvent être les conducteurs actifs, les enroulements d'un moteur ou transformateur ou les pistes de circuits imprimés.

Le courant peut circuler soit d'un conducteur actif à un autre en passant par le corps humain, soit d'un conducteur actif vers la terre puis la source, en passant par le corps humain. Dans le premier cas, la personne doit être considérée comme une charge monophasé, et dans le deuxième cas comme un défaut d'isolement.

Ce qui caractérise le contact direct est l'absence ou la non-influence d'un conducteur de protection dans l'analyse des protections contre les contacts directs à mettre en œuvre (fig. 1-2). Quel que soit le régime de neutre dans le cas d'un contact direct, le courant qui retourne à la source est celui qui traverse le corps humain.

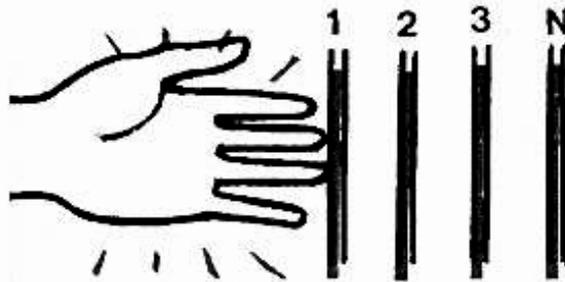


Fig. 13-2

Les moyens à mettre en œuvre pour protéger les personnes contre les contacts directs sont de plusieurs types selon la norme NF C 15-100 :

- a) *Dispositifs rendant non dangereux le contact direct* : utilisation de la Très Basse Tension (TBTS, TBTP), limitée à 25 V (contraintes de mise en œuvre, puissances véhiculées faibles).
- b) *Moyens préventifs* :
 - isolation des parties actives : boîtier isolant d'un disjoncteur, isolant extérieur d'un câble, etc.

Lors du choix d'un matériel isolant, il faut s'assurer aussi qu'il convient du point de vue de la protection contre les contacts indirects, qu'il possède les caractéristiques correspondant aux risques auxquels il peut être soumis. La classification ci-dessous ne s'applique qu'aux appareils d'utilisation à usage domestique ou analogue, aux transformateurs de sécurité et à certains matériels d'utilisation à usage industriel.

- *Classe 0* : matériels ayant une isolation sur toutes les parties accessibles ;
- *Classe 0I* : matériels isolés comme ceux de la classe 0, mais comportant une borne de terre ;
- *Classe I* : matériels ayant une isolation fonctionnelle en toutes leurs parties et permettant de relier les pièces métalliques accessibles à un conducteur de protection branché à une borne de terre ;
- *Classe II* : Si ces matériels comportent des parties métalliques accessibles, celles-ci ne doivent pas être mises à la terre. Les parties actives de ces matériels sont séparées des parties accessibles par une double isolation.

Du point de vue de la protection contre les contacts directs, la norme C 15-100 répartit les outils portatifs à main en trois classe :

- Outils de la *classe I*, ayant une isolation fonctionnelle en toutes ses parties ;
 - Outils de la *classe II*, dont les parties accessibles sont séparées des parties actives par une isolation renforcée ;
 - Outils de la *classe III*, prévus pour être alimentés sous une tension n'excédant pas 50 V, soit 42 V de tension nominale maximale, pour ceux destinés à être alimentés en très basse tension.
- barrières ou enveloppes (coffrets ou armoires de degré de protection minimum IP 2x ou IP xx.B). L'ouverture de ces enveloppes ne se fait qu'avec une clé ou un outil, ou après mise hors tension des parties actives, ou encore avec interposition automatique d'un autre écran.

Dans la norme NF C 20-010, les degrés de protection divers sont symbolisés par 3 chiffres précédés des lettres IP (fig. 13-3).

Les trois dessins extraits de la norme NF C20-010 concernent les degrés de protection des enveloppes des matériels électriques, jusqu'à 1000 V en courant alternatif et 1500 V en courant continu : à gauche, essai IP 1, au centre IP *4, à droite essai IP **9 (voir le tableau ci-dessous). Un appareil répondant à ces 3 essais aurait la référence IP 149.

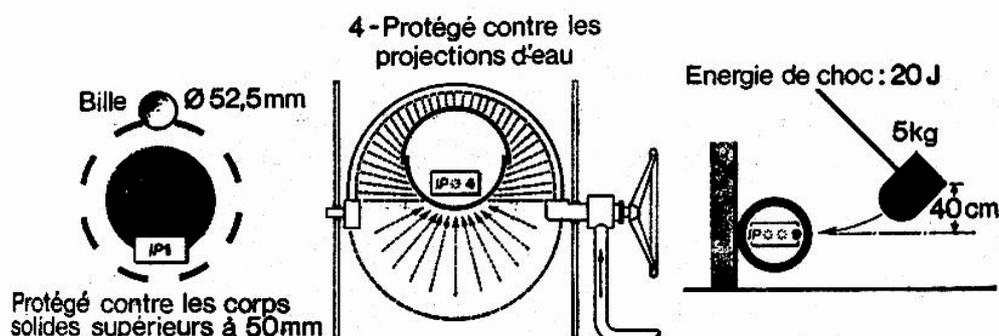


Fig. 13-3

- éloignement ou obstacles pour mise hors de portée : protection partielle utilisée principalement dans les locaux de services électriques.

c) *Protection complémentaire*

Cependant certaines installations peuvent présenter des risques particuliers, malgré la mise en œuvre des dispositions précédentes : isolation risquant d'être défectueuse (chantiers, enceintes conductrices), conducteur de protection absent ou pouvant être coupé, etc.

Dans ce cas, la norme NF C 15-100 définit une protection complémentaire : c'est l'utilisation de dispositifs différentiels à courant résiduel (DDR) à haute sensibilité ($I_{\Delta n} \leq 30 \text{ mA}$). Ces DDR assurent la protection des personnes en décelant et coupant le courant de défaut dès son apparition.

13.1.3. Protection contre les contacts indirects

La norme NF C 15-100 définit le contact indirect comme suit : « contact de personnes ou d'animaux domestiques ou d'élevage avec des masses mises sous tension par suite d'un défaut d'isolement ».

Les masses sous tension peuvent être l'enveloppe extérieure d'un moteur, d'un tableau électrique, d'un appareillage domestique (fig. 13-4). Elles sont métalliques ou conductrices renfermant des parties actives sous tension. Elles ne doivent pas être confondues avec les masses électriques propres au fonctionnement des ensembles électriques et sont reliées à la terre par l'intermédiaire d'un conducteur de protection (PE). En l'absence d'un défaut d'isolement, ces masses électriques doivent être à un potentiel nul par rapport à la terre, car elles sont accessibles normalement à toute personne non habilitée. En cas de défaut d'isolement, cette masse est en contact avec une partie active, et le courant circulant au travers du défaut et de la masse rejoint la terre, soit par le conducteur de protection, soit par une personne en contact. *La caractéristique d'un contact indirect est que le courant de défaut ne circule jamais intégralement au travers du corps humain.*

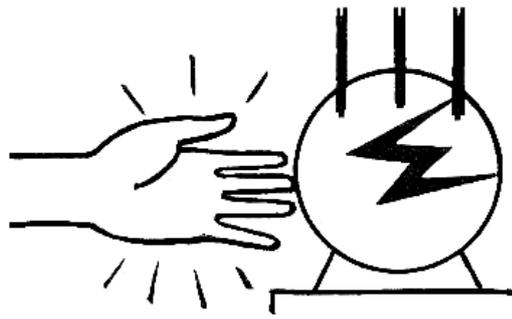


Fig. 13-4

Elles sont de deux types selon la NF C 15-100 :

- protection sans coupure de l'alimentation : emploi de la très basse tension (TBTS, TBTP), séparation électrique des circuits, emploi de matériel de classe II, isolation supplémentaire de l'installation, éloignement ou interposition d'obstacles, liaisons équipotentielles locales non reliées à la terre.
- protection par coupure automatique de l'alimentation : elle s'avère nécessaire, car les mesures de protection précédentes ne sont en pratique que locales.

Cette protection par coupure automatique n'est réelle que si deux conditions suivantes sont réalisées :

- *1ère condition* : toutes les masses et les éléments conducteurs accessibles doivent être interconnectés et reliés à la terre. Deux masses simultanément accessibles doivent être reliées à une même prise de terre.
- *2ème condition* (quand la première est réalisée) : la coupure doit s'effectuer par mise hors tension automatique de la partie de l'installation où se produit un défaut d'isolement, de manière à ne pas soumettre une personne à une tension de contact U_c (fig. 1-5) pendant une durée telle qu'elle soit dangereuse. Plus cette tension est élevée, plus la mise hors tension de cette partie d'installation en défaut doit être rapide. Cette mise hors tension de l'installation se fait différemment selon le schémas des liaisons (régimes de neutre TT, TN ou IT).

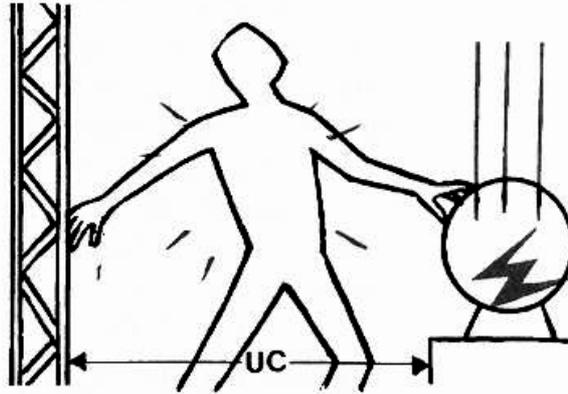


Fig. 13-5

La norme NF C 15-100 définit le temps de coupure maximal du dispositif de protection dans les conditions normales ($U_L = 50 \text{ V}$) et dans les conditions mouillées ($U_L = 25 \text{ V}$). U_L est la tension de contact la plus élevée qui peut être maintenue indéfiniment sans danger pour les personnes.

13.2. Schémas de liaison à la terre

Après avoir rappelé les risques liés aux défauts d'isolement des installations portant atteinte à la sécurité des personnes et des biens, ce paragraphe présente les trois SLT définis par les normes CEI 364 et NF C 15-100. Chaque schéma de liaison à la terre (SLT), encore appelé régime de neutre, est examiné en terme de sécurité et de disponibilité, ainsi que vis-à-vis de la protection contre les surtensions et les perturbations électromagnétiques.

Le schéma de liaison à la terre (SLT) en BT caractérise le mode de raccordement à la terre du secondaire du transformateur HT/BT et les manières de mettre à la terre les masses de l'installation.

L'identification des types de schémas est ainsi définie au moyen de 2 lettres :

- la première pour le raccordement du neutre du transformateur :
 - T - pour "raccordé à la terre",
 - I - pour "isolé de la terre".

- la deuxième pour le type de raccordement des masses d'utilisation :

T - pour "raccordé directement" à la terre ;

N - pour "raccordé au neutre" à l'origine de l'installation, lequel est raccordé à la terre.

Il existe, pour les réseaux BT, trois types de schémas des liaisons à la terre, communément appelés régimes de neutre (fig. 1-6) :

- neutre à la terre **TT**
- mise au neutre **TN** avec deux variantes :
 - TN - S** : neutre et PE séparés ;
 - TN - C** : neutre et PE confondus.
- neutre isolé (ou impédant) **IT**.

Ils diffèrent par la mise à la terre ou non du point neutre de la source de tension et le mode de mise à la terre des masses. La combinaison de ces deux lettres donne trois configurations possibles :

si **T** > **T** ou **N**,
si **I** > **T**

soit : **TT, TN et IT.**

neutre du transformateur > masse

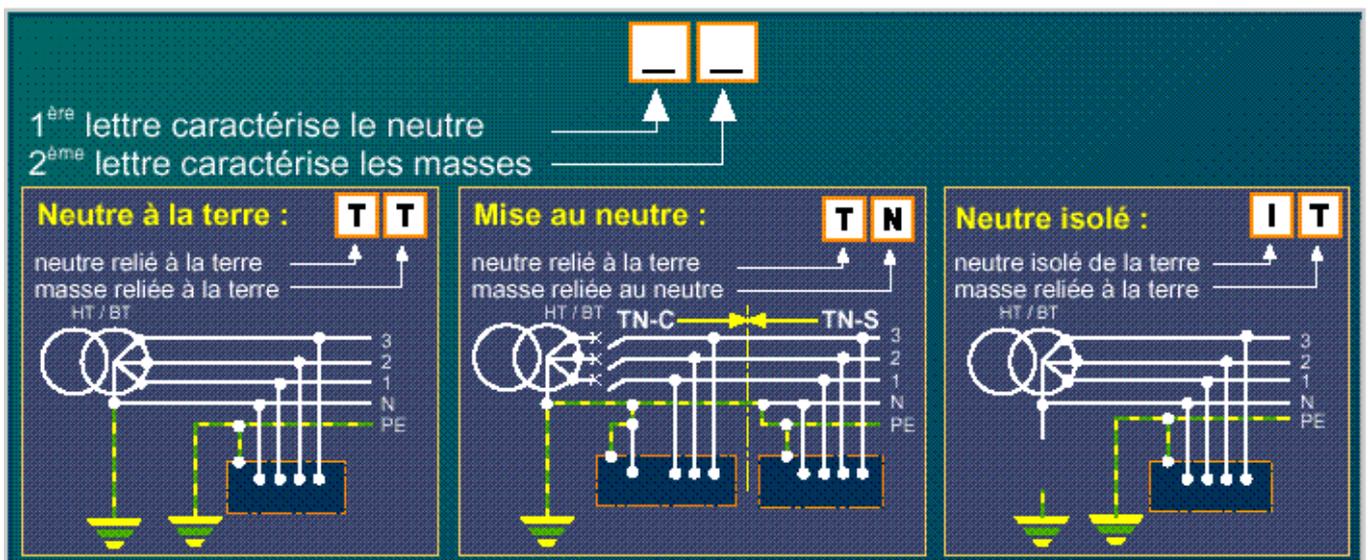


Fig. 13-6

La troisième lettre donne la situation respective du conducteur neutre et du conducteur de protection (TN – S et TN – C).

Le schéma **TN**, selon la CEI 364 et la norme NF C 15-100, comporte plusieurs sous-schémas :

- **TN - C** : si les conducteurs du neutre N et du PE sont confondus (PEN) ;
- **TN - S** : si les conducteurs du neutre N et du PE sont distincts ;
- **TN – C - S** : utilisation d'un TN - S en aval d'un TN - C, (l'inverse est interdit).

A noter que le TN - S est obligatoire pour les réseaux ayant des conducteurs de section 10 mm² en cuivre.

Chaque SLT peut s'appliquer à l'ensemble d'une installation électrique BT; mais plusieurs SLT peuvent coexister dans une même installation.

Les règles de protection des personnes contre les contacts directs sont indépendantes des Systèmes de Liaison à la terre.

Par contre ils ont des avantages et des inconvénients qu'il faut adapter aux besoins de l'installation. Que ce soit dans le tertiaire ou l'industrie, les besoins évoluent et il devient fondamental de faire le choix du bon schéma de liaison à la terre, dans la stricte application des règles de l'art, pour assurer la coexistence "courants forts / courants faibles" et la satisfaction de l'exploitant.

13.2.1. Neutre à la terre

Le point neutre du transformateur est relié directement à la terre. Les masses d'utilisation sont reliées à la prise de terre de l'installation (fig. 13-7).

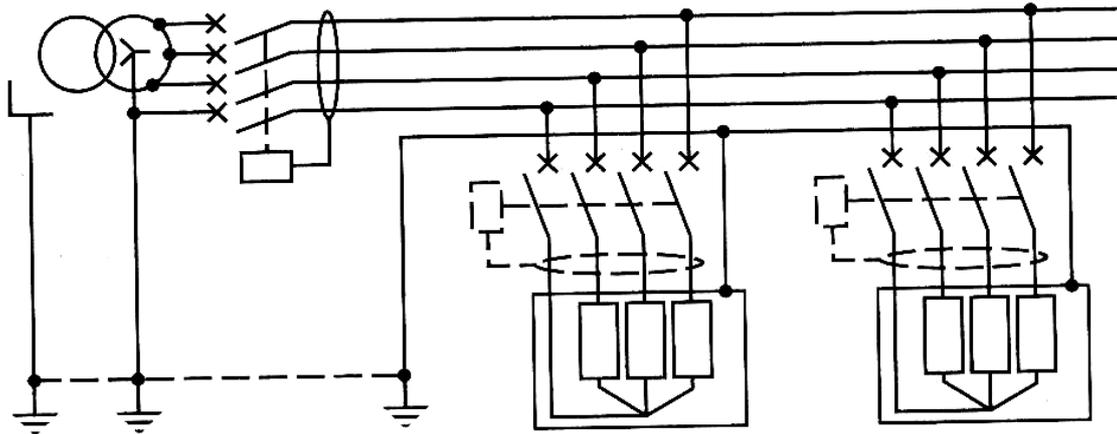


Fig. 13-7

L'intensité du courant de défaut d'isolement est limitée par les résistances de prise de terre. Les masses d'utilisation sont mises à la terre par le conducteur PE distinct du conducteur neutre. Ce schéma représente la solution la plus simple à l'étude et à l'installation.

La protection est assurée par déclenchement obligatoire au premier défaut d'isolement, éliminé par un dispositif différentiel à courant résiduel situé en tête de l'exploitation (et/ou éventuellement sur chaque départ pour améliorer la sélectivité).

Il n'existe aucune exigence particulière sur la continuité du conducteur neutre. Les extensions peuvent se faire sans calcul des longueurs de canalisation.

Ce schéma ne nécessite pas une permanence de surveillance en exploitation, il suffit de prévoir seulement un contrôle périodique des dispositifs différentiels résiduels.

13.2.2. Neutre isolé IT

Le point neutre du transformateur est isolé de la terre ou impédant (fig. 13-8). Les masses d'utilisation sont interconnectées et reliées à une même prise de terre (si la prise de terre des masses du poste est séparée des masses d'utilisation ou s'il y a

plusieurs prises de terre pour les masses d'utilisation, il faut installer un dispositif différentiel à courant résiduel en tête d'installation).

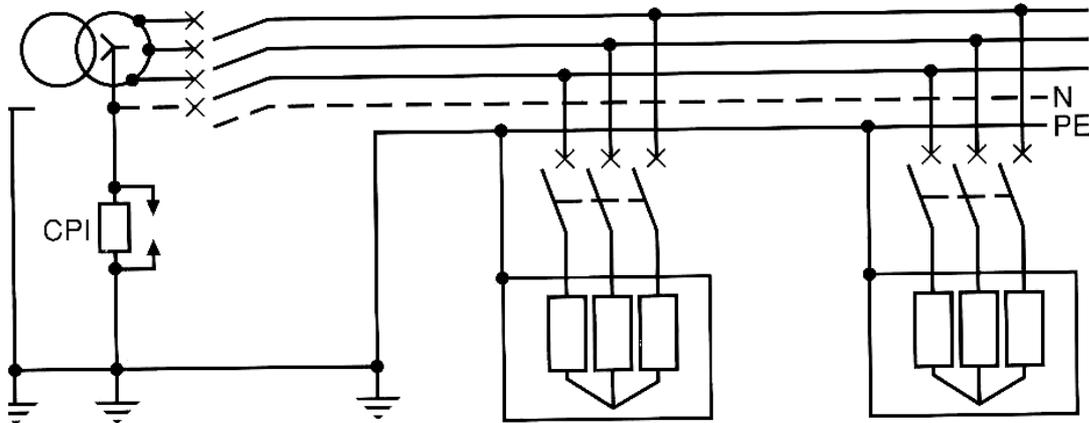


Fig. 13-8

Les masses d'utilisation sont mises à la terre par le conducteur PE distinct du conducteur de neutre.

L'intensité du courant de 1^{er} défaut d'isolement ne peut pas créer une situation dangereuse. Le premier défaut d'isolement n'est ni dangereux, ni perturbateur et il n'est pas obligatoire de déclencher au premier défaut ce qui permet d'assurer une meilleure continuité de service.

Il est obligatoire de prévoir une signalisation du premier défaut d'isolement suivie de sa recherche et de son élimination réalisée par un Contrôleur Permanent d'Isolément (CPI) installé entre le neutre et la terre.

L'intensité du courant de double défaut d'isolement est importante. Au deuxième défaut d'isolement le déclenchement est obligatoire par les dispositifs de protection contre les surintensités et il faut effectuer une vérification de ce fait.

Le schéma IT est la solution assurant la meilleure continuité de service d'exploitation, mais il nécessite un personnel d'entretien disponible pour la recherche et l'élimination du 1^{er} défaut d'isolement.

Il existe une nécessité d'installer des récepteurs de tension d'isolement phase / masse supérieure à la tension composée (cas du 1^{er} défaut).

Les récepteurs à faible résistance d'isolement (fours à induction) impliquent une fragmentation du réseau.

13.2.3. Régime TN

Le point neutre du transformateur est relié directement à la terre. Les masses d'utilisation sont reliées au neutre du transformateur avec un conducteur de protection (PE), d'où avec la prise de terre (fig. 13-9).

Le point de neutre du transformateur et le conducteur PE sont reliés directement à la terre. Les masses d'utilisation sont reliées au conducteur PE et lui-même est relié à la terre. Les conducteurs de neutre N et de protection PE sont séparés (régime TN-S).

L'intensité des courants de défaut d'isolement est importante, d'où les perturbations et des risques d'incendie accrus. Le déclenchement est obligatoire au premier défaut d'isolement par les dispositifs de protection contre les surintensités.

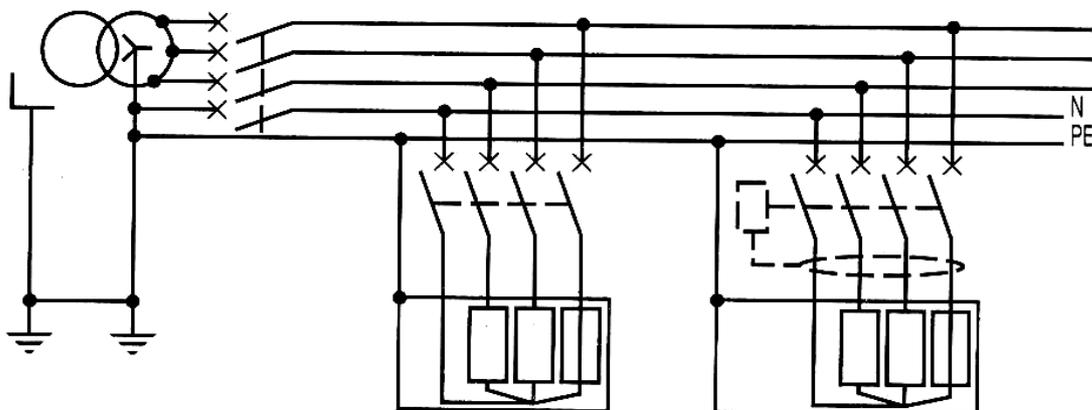


Fig. 13-9

Il est délicat de tester le bon état de fonctionnement des protections. L'utilisation des DDR pallie cette difficulté. L'usage des DDR est toujours recommandé pour la protection des personnes contre les contacts indirects, en particulier en distribution terminale, où l'impédance de boucle ne peut pas être maîtrisée.

La vérification des déclenchements doit être effectuée :

- à l'étude par le calcul ;
- obligatoirement à la mise en service ;
- périodiquement (tous les ans) par des mesures.

En cas d'extension ou de rénovation ces vérifications de déclenchement sont à refaire.

Le point de neutre du transformateur et le conducteur PE peuvent être aussi reliés directement à la terre (fig. 13-10). Les masses d'utilisation sont reliées au conducteur PE et lui-même est relié à la terre. Les conducteurs de neutre N et de protection PE sont **confondus** (régime TN-C).

L'intensité des courants de défaut d'isolement est importante, d'où les perturbations et des risques d'incendie accrus. Le déclenchement est obligatoire au premier défaut d'isolement par les dispositifs de protection contre les surintensités.

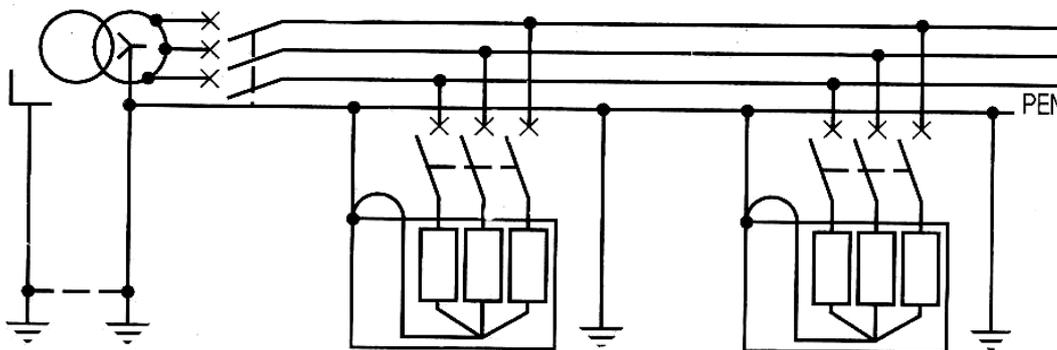


Fig. 13-10

La circulation des courants de neutre dans les éléments conducteurs du bâtiment et les masses, est à l'origine d'incendies et pour les matériels sensibles (médical, informatique, télécommunications) de chutes de tension perturbatrices.

L'usage des DDR est toujours recommandé pour la protection des personnes contre les contacts indirects, en particulier en distribution terminale, où l'impédance de boucle ne peut pas être maîtrisée (passage en TN-S).

La vérification des déclenchements doit être effectuée :

- à l'étude par le calcul ;
- obligatoirement à la mise en service ;
- périodiquement (tous les ans) par des mesures.

En cas d'extension ou de rénovation ces vérifications de déclenchement sont à refaire. Il est délicat de tester le bon fonctionnement des protections (l'utilisation des DDR pallie cette difficulté, mais demande un passage en TN-S).

13.3. Définition de la protection

13.3.1. Conditions générales de protection

La mesure de protection par coupure automatique de l'alimentation est destinée à empêcher qu'à la suite d'un **défaut d'isolement**, une personne puisse se trouver soumise à une **tension de contact** dangereuse pendant un temps tel qu'il puisse en résulter des dommages organiques.

Pour respecter cette règle, tout défaut, survenant dans un matériel électrique provoque la circulation d'un courant qui doit être interrompu dans un temps compatible avec la sécurité des personnes.

Il en résulte que cette mesure de protection repose sur l'association de deux conditions :

- la réalisation ou l'existence d'un circuit dénommé boucle de défaut pour permettre la circulation du courant de défaut.
- la coupure du courant de défaut par un dispositif de protection approprié dans un temps dépendant de certains paramètres tels que :
 - la tension de contact à laquelle peut être soumise une personne,
 - la probabilité de défauts et de contacts avec les parties en défaut.

La constitution de la boucle de défaut dépend du schéma des liaisons à la terre : TT, TN ou IT.

Pour toute valeur de tension de contact présumée supérieure :

- à 50 V en courant alternatif (valeur efficace) ou à 120 V en courant continu lisse (taux d'ondulation non supérieur à 10% en valeur efficace), dans des locaux secs ;
- à 25 V en courant alternatif ou à 60 V en courant continu lisse, dans des locaux mouillés,

le dispositif de protection doit séparer automatiquement de l'alimentation le circuit ou le matériel protégé dans un temps au plus égal aux valeurs du tableau 1-1.

Tableau 1-1

Tension de contact présumée, V	Temps de coupure maximal du dispositif de protection, s	
	$U_L = 50 \text{ V}$	$U_L = 25 \text{ V}$
25	5	5
50	5	0,48
75	0,60	0,30
90	0,45	0,25
110	-	0,18
120	0,34	-
150	0,27	0,12
220	0,17	-
230	-	0,05
280	0,12	0,02
350	0,08	-
500	0,04	-

Le **temps de coupure** est basé sur la connaissance des effets du courant électrique sur le corps humain.

13.3.2. Principe de la protection dans le régime TT

Le régime TT est imposé dans les installations alimentées directement par un réseau de distribution publique à basse tension.

Dans une installation électrique l'ensemble des parties métalliques des récepteurs, normalement isolés des conducteurs électriques, constitue les **masses d'utilisation**.

Dans le régime **TT toutes les masses** des matériels électriques de l'installation et tous les éléments conducteurs accessibles doivent être respectivement **reliés à la terre, par un conducteur de protection PE** (protection équipotentielle).

Deux masses, ou une masse et un élément conducteur, simultanément accessibles doivent être reliés à même prise de terre (fig. 13-11).

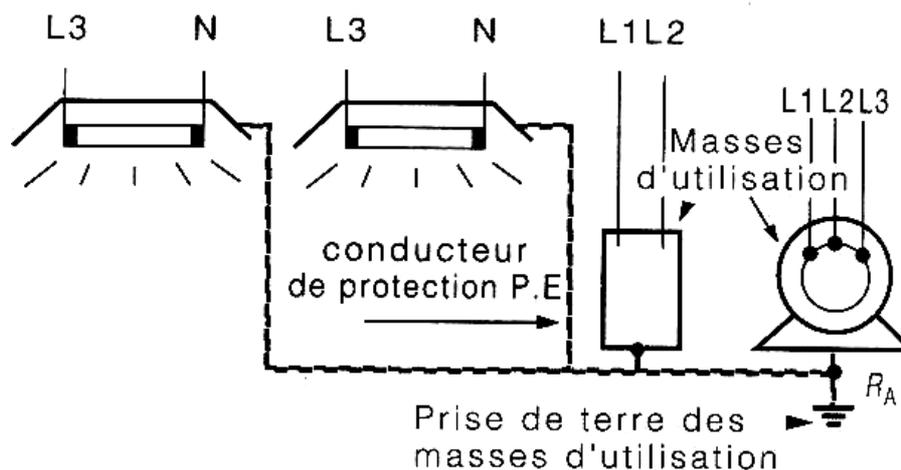


Fig. 13-11

Tous les conducteurs de protection des masses, les conducteurs de terre et éventuellement les conducteurs de liaisons équipotentielles sont reliés au **conducteur principal de protection**.

13.3.3. Conducteur de protection

Les conditions d'emploi des différents types de conducteur de protection dépendent des régimes de neutre.

Les conducteurs de protection doivent :

- ne pas comporter d'appareillage ou d'organe de coupure (coupe-circuit, disjoncteurs, relais, etc.) ;
- être protégés contre les risques de coupure par détériorations mécaniques ou chimiques ;
- être repérés par la double coloration vert/jaune ;
- assurer l'interconnexion des masses en parallèle et non en série ;
- être toujours raccordés sur la borne masse d'un récepteur en particulier pour un conducteur PEN.

De la section des conducteurs PE ou PEN dépend la valeur de l'impédance de la boucle de défaut dans le cas du régime TN et IT. Cette impédance doit rester la plus faible possible pour assurer une bonne protection.

Le tableau 1-2 précise ces sections :

- dans le cas général ;
- avec une formule de calcul qui ne peut s'appliquer que si les conditions de sécurité restent confirmées.

Formules de calcul pour PE :

- PE fait partie de la canalisation d'alimentation :

$$S_{PE} = \frac{I}{k} \sqrt{t}$$

Avec : S_{PE} – section du conducteur PE en mm^2 ;

I – intensité efficace, en ampères, du courant de défaut franc ; en pratique, $I = I$ de court-circuit au point d'installation du dispositif de protection.

k – coefficient qui dépend des caractéristiques du conducteur :

⇒ âme en cuivre : $k = 115$ (PVC) ; $k = 135$ (PRC)

⇒ âme en aluminium : $k = 74$ (PVC) ; $k = 87$ (PRC)

- PE ne fait pas partie de la canalisation d'alimentation :

$$S_{PE} = \frac{I}{\alpha} \sqrt{\frac{t}{\Delta\theta}}$$

Avec : S_{PE} – section du conducteur PE en mm^2 ;

I – intensité efficace, en ampères, du courant de défaut franc ;

α – coefficient qui dépend de la nature du métal :

Cu = 13 ; Al = 8,5 ; Fe = 4,5 ; Pb = 2,5

t – temps d'élimination du défaut en secondes ;

$\Delta\theta$ - échauffement admissible : conducteur isolé = 160°C ;

conducteur nu = 180°C

Tableau 1-2

NATURE DES CONDUCTEURS	CONDUCTEUR DE PHASE Sph (mm^2)	CONDUCTEUR PEN (mm^2)	CONDUCTEUR PE	
			Fait partie de la canalisation d'alimentation (mm^2)	Ne fait pas partie de la canalisation d'alimentation (mm^2)
CAS GÉNÉRAL	≤ 16	= Sph avec mini : • 10 si Cu • 16 si Al	= Sph	= Sph, avec mini : • 2,5 si protection mécanique; • 4 sans protection mécanique.
	$16 < \text{Sph} \leq 35$	16	16	16
	> 35	Sph/2 Prendre la section normalisée la plus proche	Sph/2	Sph/2
FORMULES DE CALCUL	Quelconque	Sph/2 avec mini : • 10 si Cu • 16 si Al	$\frac{I}{k} \sqrt{t}$ (avec I égal au courant de court-circuit)	$\frac{I}{\alpha} \sqrt{\frac{t}{\Delta\theta}}$ avec I égal au courant de défaut avec mini : • 2,5 si protection mécanique; • 4 sans protection mécanique.

13.3.4. Elévation du potentiel des masses

La présence d'un défaut d'isolement provoque un **courant de défaut**. Sa valeur, limitée par l'**impédance de la boucle de défaut à la terre** ne peut être détectée par les dispositifs de protection contre les surintensités (disjoncteur ou fusible).

L'intensité I_d de ce courant de défaut est néanmoins suffisante pour élever la tension de défaut U_d de la masse à une valeur $U_d = I_d \times R_A$ (avec R_A résistance de prise de terre des masses d'utilisation). Par un contact entre cette masse et une autre simultanément accessibles (fig. 1-12), une personne est soumise à une tension de contact U_c qui peut être dangereuse dans la mesure où elle est supérieure à la valeur limite U_L . Cette tension est égale à 50 V ou 25 V, selon le type de local.

Exemple :

$R_A = 15 \Omega$ (résistance de la prise de terre des masses d'utilisation)

$R_N = 10 \Omega$ (résistance de la prise de terre du neutre)

$$I_d = \text{courant de défaut} = \frac{V}{R_A + R_N} = \frac{230}{15 + 10} = 9,2 \text{ A}$$

$$U_d = \text{tension de défaut} = R_A \times I_d = 15 \Omega \times 9,2 \text{ A} = 138 \text{ V}$$

Dans le cas d'un contact simultané avec une autre masse accessible ou d'un contact avec le sol conducteur, cette tension de défaut est une tension de contact dangereuse pour une personne.

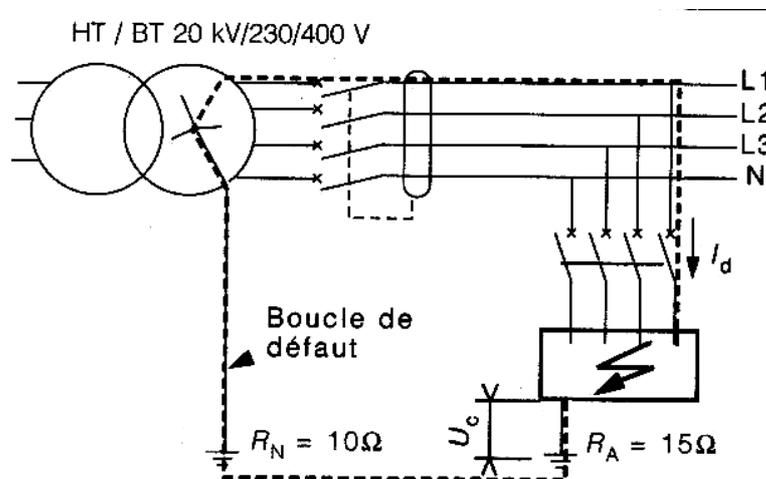


Fig. 13-12

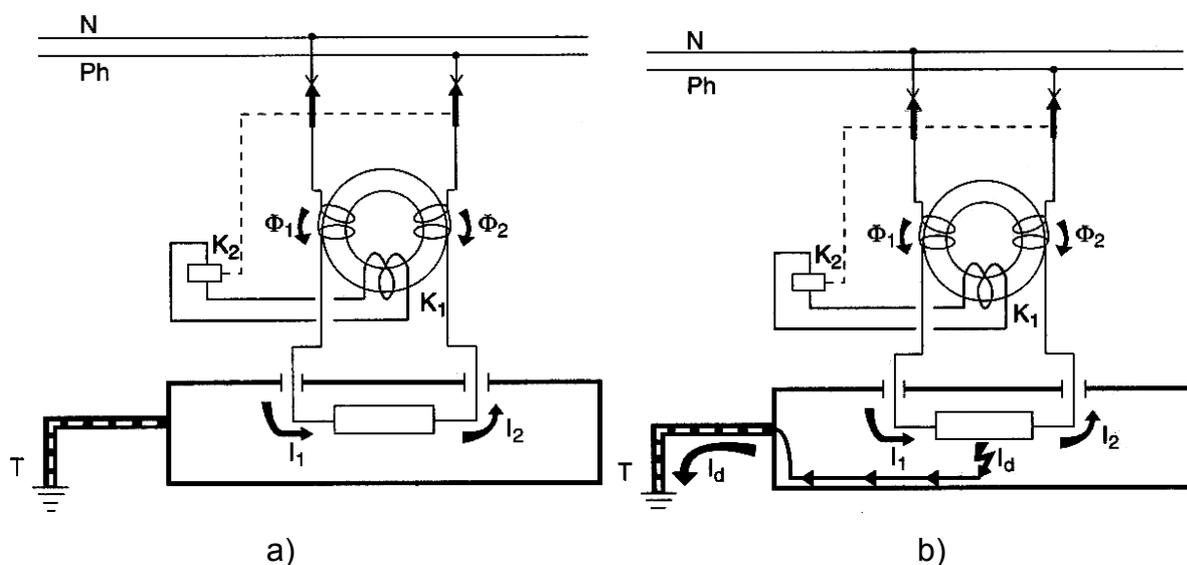
13.3.5. Déclencheur à courant résiduel

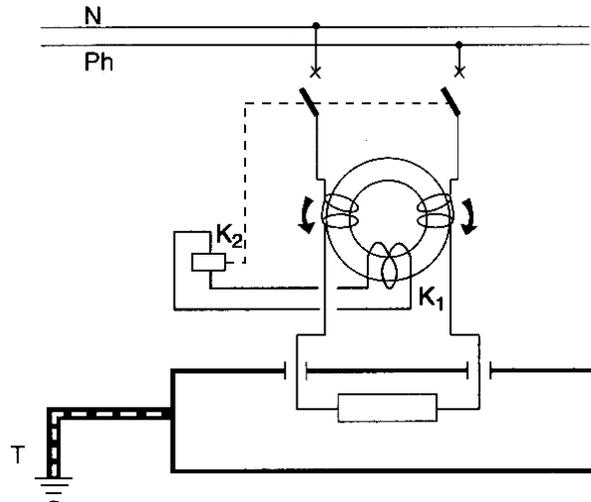
Le déclenchement au **premier défaut** est obligatoire. Il est obtenu par un **déclencheur à courant différentiel résiduel** agissant sur un appareil de coupure.

Le principe de fonctionnement du déclencheur différentiel est basé sur la détection du courant de défaut par un **transformateur toroïdal** au travers duquel passent tous les **courants actifs** du circuit à protéger.

Pour un déclencheur différentiel monophasé (fig. 1-13) au cas d'absence du défaut le courant $I_d = 0$, donc $I_1 = I_2$. Les flux engendrés par ces deux courants sont égaux $\Phi_1 = \Phi_2$ et $\Phi_1 - \Phi_2 = 0$. Aucun flux ne circule dans le tore. Pas de courant induit dans K_1 , pas de tension aux bornes de K_2 , le dispositif fonctionne normalement (fig. 1-13a).

L'existence d'un courant de défaut $I_d \neq 0$, d'où $I_1 > I_2$, ce qui entraîne $\Phi_1 > \Phi_2$ et $\Phi_1 - \Phi_2 \neq 0$ (fig. 1-13b). Un flux circule dans le tore, **un courant est induit** dans K_1 et la bobine K_2 est excitée, les contacts s'ouvrent, le dispositif est mis **automatiquement hors tension** (fig. 1-13c).





c)

Fig. 13-13

Le déclencheur à courant différentiel résiduel, associé avec un appareil de coupure – disjoncteur, équipé d'un déclencheur thermique pour les surcharges et d'un déclencheur magnétique pour les courts-circuits, présente l'appareil de protection appelé **disjoncteur différentiel monophasé** (fig. 13-14).

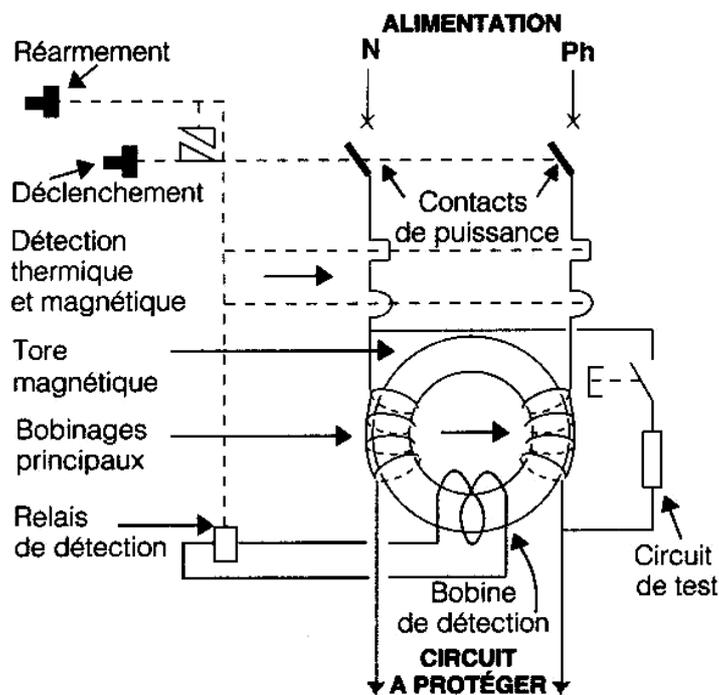


Fig. 13-14

La structure interne d'un disjoncteur différentiel tétrapolaire (fig. 13-15) est plus compliquée.

Dans ce type de disjoncteur en absence de défaut :

$$\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 = \vec{I}_N$$

et le flux dans le tore est nul. Le dispositif fonctionne normalement.

En présence de défaut :

$$\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 \neq \vec{I}_N$$

un flux circule dans le tore, un courant est induit dans la bobine K_1 de détection qui excite la bobine K_2 et le disjoncteur s'ouvre.

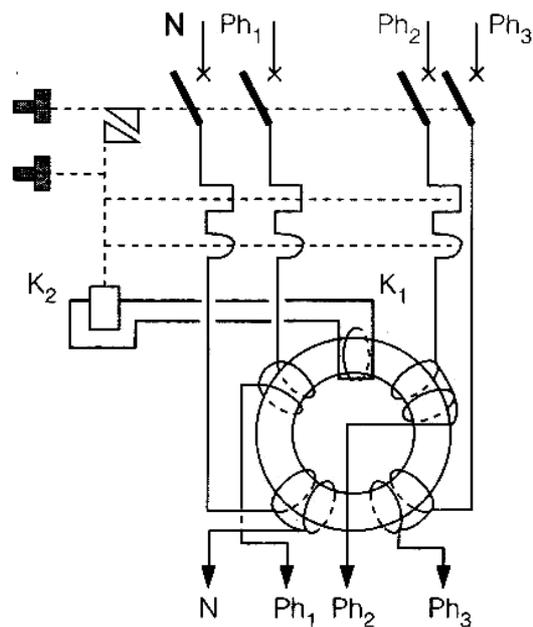


Fig. 13-15

Les caractéristiques techniques d'un disjoncteur différentiel sont déterminées pour les deux parties – l'appareil de coupure (disjoncteur) et le dispositif différentiel :

- tension nominale U_N , selon le réseau de branchement;
- courant nominal I_N , selon la puissance de l'appareil protégé ;

- *sensibilité* du dispositif différentiel $I_{\Delta n}$: La sensibilité d'un dispositif différentiel s'exprime par la valeur du courant résiduel de défaut pour lequel le dispositif s'ouvre obligatoirement. Le tableau 1-3 présente les valeurs de la sensibilité et la plage de déclenchement des dispositifs différentiels les plus utilisés.
- *temps de fonctionnement* : Le temps nécessaire à la coupure est la somme du temps de fonctionnement du dispositif différentiel à courant résiduel et du temps de coupure de l'organe de protection associé (25 ms dans le cas d'un disjoncteur).

Tableau 1-3

Sensibilité, $I_{\Delta n}$	Plage de déclenchement $I_{\Delta n} / 2$ à $I_{\Delta n}$
10 mA	entre 5 et 10 mA
30 mA	entre 15 et 30 mA
300 mA	entre 150 et 300 mA
500 mA	entre 250 et 500 mA

La **sélectivité de protection** représente la coordination des protections d'un réseau revient à placer aux points clés de l'installation, arrivée, dérivations, circuits terminaux, des appareils capables en cas de défaut de réagir de façon telle que la *surface perturbée du réseau soit la plus petite possible*. Une bonne coordination doit entraîner le fonctionnement de l'appareil de protection, situé immédiatement en amont du défaut, et lui seul, le disjoncteur D2 avant le disjoncteur D1 (fig. 1-16). Cette capacité conférée au réseau par le choix judicieux de ses dispositifs de protection, est concrétisée par la *sélectivité*.

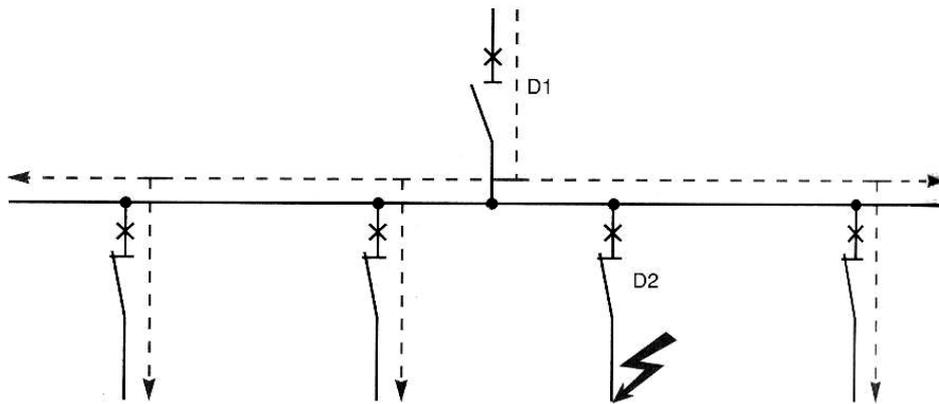


Fig. 13-16

Mais si dans le circuit à protéger sont branchés en série deux disjoncteurs différentiels instantanés de sensibilité différente (fig. 13-17), il est possible qu'ils ne permettent pas d'assurer la protection, dès que le courant de défaut dépasse leur plages de déclenchement (par exemple, dans ce cas pour $I_d > 150 \text{ mA}$).

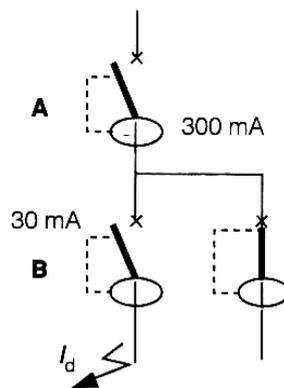


Fig. 1-17

De plus en plus, dans la pratique, on utilise des disjoncteurs (A) conçus pour fonctionner avec un retard prédéterminé (fig. 13-18) (par exemple, 50 ms). Dans ce cas et quelque soit la valeur du courant de défaut seul le disjoncteur (B) fonctionnera car son temps de déclenchement est bien inférieur à 50 ms.

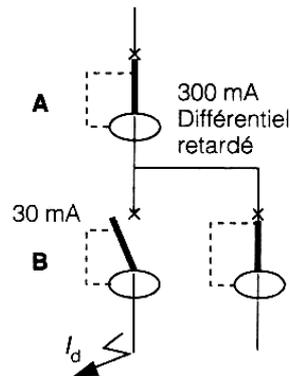


Fig. 13-18

Un **différentiel retardé**, encore désigné par **appareil sélectif**, ne peut être placé en tête d'une installation que dans la mesure où tous les *départs divisionnaires* sont protégés par des **différentiels instantanés**.

13.4. Définition de la prise de terre

La protection par des dispositifs à courant résiduels différentiel impose un circuit de terre qui assure une tension de défaut dans les normes de sécurité indiquées dans les chapitres précédentes.

13.4.1. Organisation du circuit de terre

Un circuit de terre comporte les parties principales suivantes (fig. 13-19) :

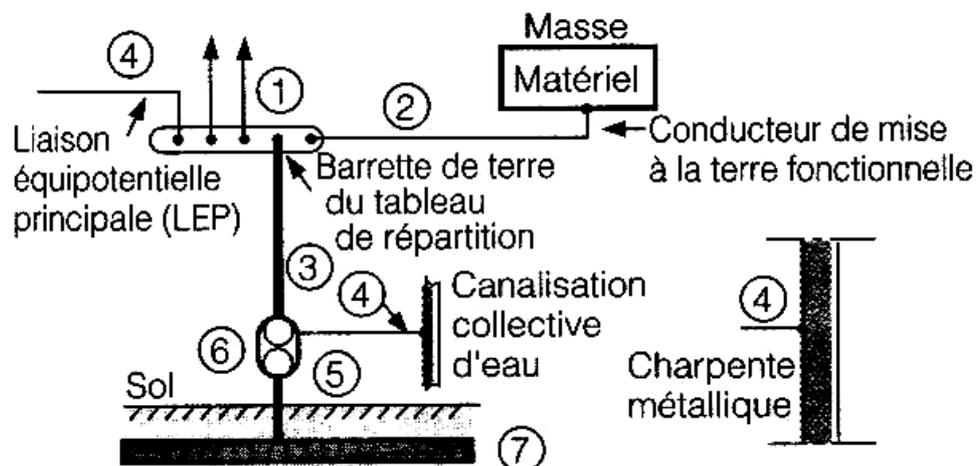


Fig. 13-19

- **Conducteur de protection des circuits PE (1)** : Chaque canalisation doit comporter un conducteur de protection (terre), même si elle est destinée à alimenter un appareil de classe II. Les conducteurs de protection (terre) doivent avoir une section égale à celle des conducteurs actifs. Si le conducteur de protection est commun à plusieurs circuits, sa section doit être égale à la plus grande section des conducteurs actifs.
- **Conducteur de mise à la terre fonctionnel (2)** : La mise à la terre pour la sécurité électrique ne doit pas être confondue avec une mise à la terre fonctionnelle. Cette dernière a pour fonction de mettre des matériels au potentiel de la terre pour assurer leur fonctionnement. Les conducteurs assurant la sécurité électrique sont exclusivement de la couleur **vert – et - jaune**. Les conducteurs assurant une mise à la terre fonctionnelle ne doivent être de la même couleur et sont raccordés à la terre sur la borne principale.
- **Conducteur principal de protection (3)** : Il relie la borne de terre à la barre de terre du tableau de répartition et dont la section par rapport à la section du conducteur de branchement est présentée dans le tableau 1-4.

Tableau 1-4

Section du conducteur de branchement mm ²	Cuivre	10	16	25	35	2x25
	Alu	16	25	35	50	70
Section du conducteur de protection mm ²	Cuivre	10	16	16	16	25

- **Liaison équipotentielle principale (LEP) (4)** : Liaison électrique spéciale destinée à mettre au même potentiel , ou à des potentiels voisins, des masses et des éléments conducteurs.
- **Conducteur de terre (5)** : Le conducteur de terre (appelé encore canalisation principale de terre) relie la prise de terre à la barre principale ou barrette de mesure. Sa section doit être au moins de :
 - 16 mm² cuivre ou acier galvanisé protégé contre la corrosion et non protégé des chocs;

- 25 mm² cuivre ou 50 mm² acier galvanisé non protégé contre la corrosion.

La connexion du conducteur de terre à la prise de terre doit être accessible, sauf si elle est effectuée dans une boîte remplie de matière de remplissage ou dans des joints scellés.

- **Borne principale de terre (ou barrette de mesure) (6)** : Une borne principale de terre doit être prévue dans toute installation. Le dispositif (barrette de mesure) doit être :

- prévu sur le conducteur de terre;
- démontable seulement à l'aide d'un outil;
- mécaniquement sûr et assurer la continuité électrique.

L'ouverture de la barrette permet de mesurer la résistance de la prise de terre en éliminant les prises de terre de canalisation dont la pérennité n'est pas assurée. La barrette de mesure peut être combinée avec la borne principale de terre.

- **Prise de terre (7)** : Toute pièce ou tout ensemble de pièces conductrices enfouies dans le sol assurant une liaison électrique efficace avec la terre.

13.4.2. Valeur de la résistance de terre

L'efficacité d'une prise de terre est une fonction de sa résistance qui dépend :

- des conditions locales du terrain (tableau 1-5) ;

Tableau 1-5

NATURE DU TERRAIN	Valeur moyenne de la résistivité (en $\Omega \cdot m$)
Terrains arables gras, remblais compacts humides.	50
Terrains arables maigres, gravier, remblais grossiers.	500
Sols pierreux nus, sable sec, rochés imperméables.	3 000

- de la qualité de la réalisation.

La valeur maximale de la résistance de terre est donnée par la relation suivante :

$$R_A \leq U_L / I_{\Delta n}$$

Avec: R_A - résistance de prise de terre des masses d'utilisation;
 U_L - tension limite conventionnelle : $U_L = 50$ V dans les locaux secs et $U_L = 25$ V dans les locaux mouillés;
 $I_{\Delta n}$ - seuil de sensibilité du dispositif de protection à courant résiduel différentiel.

Le tableau 1-6 récapitule les valeurs maximales de la sensibilité :

Tableau 1-6

SENSIBILITÉ DU DIFFÉRENTIEL	RÉSISTANCE MAXIMALE DE LA PRISE DE TERRE	
	$U_L = 50$ V	$U_L = 25$ V
20 A	2,5	1,25
10 A	5	2,5
5 A	10	5
3 A	17	8
Moyenne sensibilité		
1 A	50	25
500 mA	100	50
300 mA	167	84
100 mA	500	250
Haute sensibilité		
30 mA	} > 500	> 250
12 mA		
6 mA		

13.5. Liaisons équipotentielles

De telles liaisons ont pour but d'éviter qu'une différence de potentiel n'apparaisse entre divers éléments dans le bâtiment.

Parmi les liaisons équipotentielles, on distingue notamment :

- celles qui sont reliées à la terre : liaison équipotentielle principale, liaison équipotentielle supplémentaire, liaison équipotentielle supplémentaire locale de la salle d'eau ;
- celles qui ne sont pas reliées à la terre.

13.5.1. Liaison équipotentielle principale

La liaison équipotentielle principale dans un *bâtiment collectif* (fig. 13-20) doit relier à la borne principale de terre les éléments conducteurs suivants :

- canalisations d'alimentation à l'intérieur du bâtiment, par exemple eau, gaz, etc. ;
- canalisations métalliques de chauffage central ;
- les éléments accessibles de construction. Lorsque de tels éléments conducteurs proviennent de l'extérieur du bâtiment, ils doivent être reliés aussi près que possible de leur pénétration dans le bâtiment

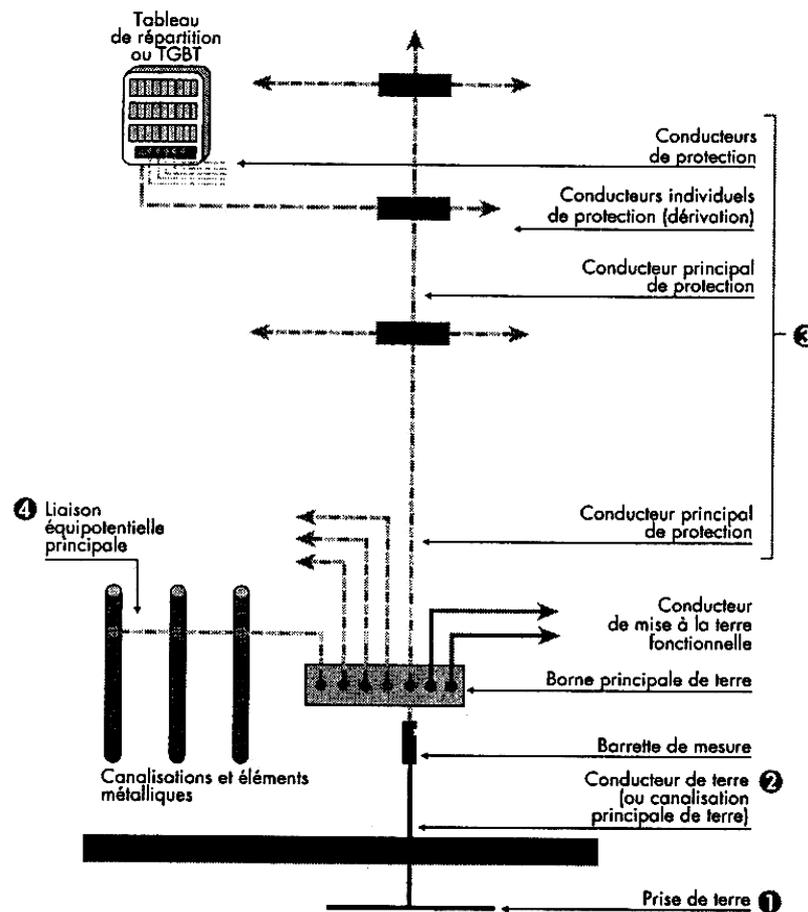


Fig. 13-20

Une canalisation métallique, reliée localement à un conducteur de protection et pénétrant dans un bâtiment à un endroit très éloigné du tableau principal (TGBT), peut ne pas être reliée à la liaison équipotentielle principale.

En *maison individuelle* (fig. 13-21), ne sont pas à raccorder à la liaison équipotentielle principale :

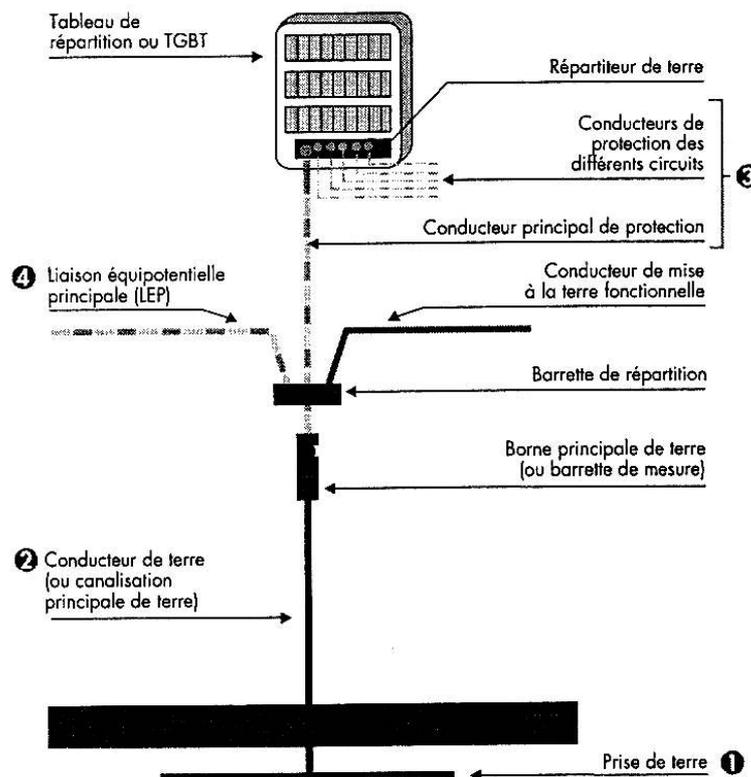


Fig. 13-21

- les canalisations en matériaux isolants provenant de l'extérieur ;
- tout réseau intérieur d'un même fluide (eau, gaz, fioul, etc.) constitué partiellement de canalisation en matériaux isolants.

La *section minimale* doit être au moins égale à la moitié de la plus grande section des conducteurs de protection de l'installation avec un minimum de 6 mm² en cuivre et un maximum de 25 mm² cuivre. Ces conducteurs sont de couleur vert-et-jaune.

13.5.2. Liaison équipotentielle supplémentaire

Si dans une installation (ou partie d'installation), les conditions prescrites pour l'application des mesures de protection contre les contacts in directs faisant intervenir la coupure, ne peuvent être respectées, il y a lieu d'assurer une liaison équipotentielle dite « supplémentaire ».

La section des conducteurs de liaison équipotentielle supplémentaire doit satisfaire les règles suivantes :

- si le conducteur relie une masse à un élément conducteur, sa section est égale à la moitié de celle du conducteur de protection relié à cette masse ;
- si le conducteur relie deux masses, sa section est égale à la plus petite de celles des conducteurs de protection reliés à ces masses.

La section des conducteurs doit être la suivante :

- 2,5 mm², si les conducteurs sont en cuivre, et de 4 mm², s'ils sont en aluminium, lorsque ces conducteurs de protection sont protégés mécaniquement ;
- 4 mm², si les conducteurs sont en cuivre, et 6 mm², s'ils sont en aluminium, lorsque ces conducteurs ne sont pas protégés mécaniquement.

La vérification de l'efficacité d'une telle liaison revient à s'assurer que la résistance R entre toute masse considérée et toute autre masse ou tout autre élément conducteur simultanément accessibles est inférieure ou égale à :

$$U_c / I_a,$$

avec : U_c – tension de contact présumée ;

I_a – courant assurant le fonctionnement du dispositif de protection dans le temps prescrit par les courbes de sécurité.

13.5.3. Liaison équipotentielle supplémentaire locale de la salle d'eau

Cette liaison équipotentielle supplémentaire locale (fig. 13-22) consiste, à l'aide de conducteurs, à relier entre eux les éléments conducteurs situés dans les volumes 1, 2 et 3 :

- les canalisations métalliques (eau froide, eau chaude, vidange, chauffage, gaz, etc.) ;
- les corps des appareils sanitaires métalliques ;
- les huisseries ;
- les conducteurs de protection.

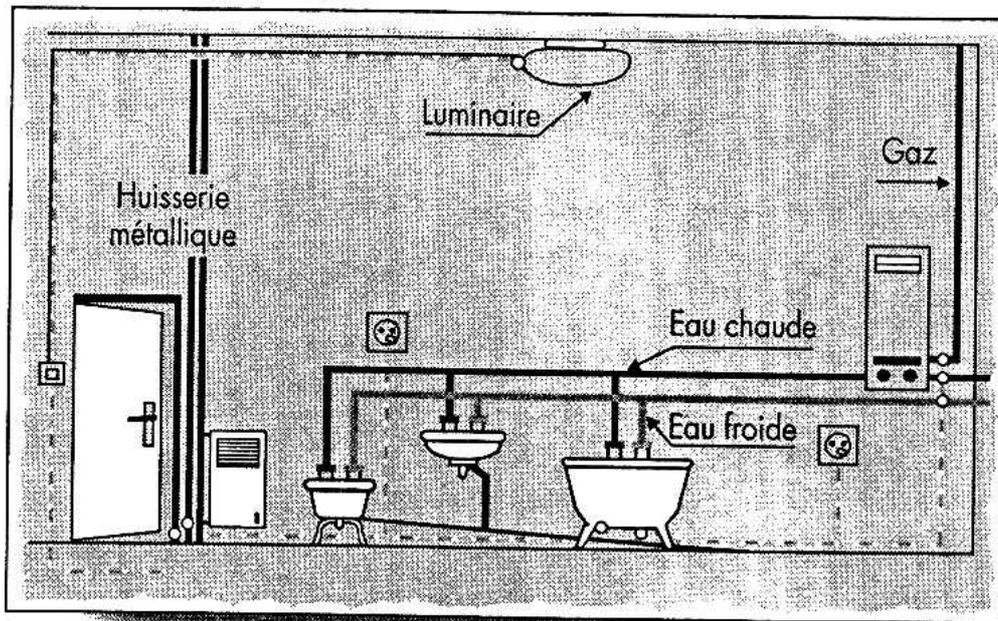


Fig. 13-22

Il n'y a pas lieu de mettre en œuvre un conducteur de protection supplémentaire entre cette liaison équipotentielle et le répartiteur de terre du tableau de répartition, du fait que la liaison équipotentielle est mise de fait à la terre par les conducteurs de protection situés dans les volumes 1, 2 et 3.

La liaison équipotentielle locale doit être réalisée dans la salle d'eau. S'il n'est pas possible de relier certains éléments conducteurs à l'intérieur de la salle d'eau, cette liaison peut être réalisée dans les locaux contigus.

Le conducteur de la liaison équipotentielle locale, de couleur vert-et-jaune, ne peut en aucun cas être noyé directement sans conduit dans les parois. Sa section est de 2,5 mm² s'il est protégé contre les chocs (sous baignoire avec tablier, sous conduit ou sous profilé plastique) ou de 4 mm² s'il est posé directement aux parois sans protection mécanique.

Une *huisserie métallique* peut constituer une partie de la liaison équipotentielle locale si sa continuité électrique est assurée. Il n'en est pas de même pour tout autre élément conducteur (canalisation d'eau, etc.).

Il **est interdit** de relier à la liaison équipotentielle locale la carcasse métallique des appareils de classe II.

Il n'est pas nécessaire de relier à la liaison équipotentielle locale :

- les radiateurs, équipés ou non d'une résistance électrique, alimentés en eau chaude par des canalisations isolantes ;
- les porte-serviettes métalliques non chauffants ;
- les robinets reliés à des canalisations isolantes ;
- les bondes et les siphons ;
- les bouches métalliques de ventilation si le conduit, la dérivation ou le piquage ne sont pas tous métalliques ;
- les pare-douches.

Il n'est pas nécessaire de shunter les raccords filetés des canalisations métalliques d'eau, du fait que le filetage avec un élément de bourrage assure une continuité suffisante.

13.5.4. Liaison équipotentielle locale non reliée à la terre

Les liaisons équipotentielles ainsi réalisées ne doivent pas être en liaison avec la terre, ni directement, ni par l'intermédiaire de masses ou d'éléments conducteurs.

L'application de cette mesure de protection est limitée en pratique à certaines portes de travail de faible étendue où les autres mesures de protection ne peuvent être réalisées.

Les liaisons sont réalisées à l'aide de conducteurs de protection répondant aux mêmes conditions que celles spécifiées pour les liaisons équipotentielles supplémentaires.

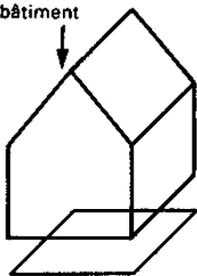
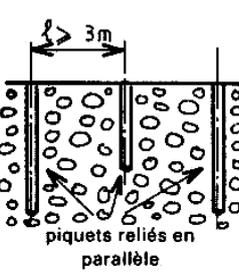
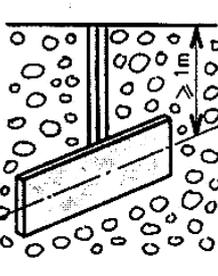
C'est notamment le cas lorsqu'un même transformateur de séparation alimente deux appliques de classe I dans le volume 2 des salles d'eau. Les masses de ces appliques doivent être reliées entre elles, avec un conducteur d'équipotentialité de couleur vert et jaune, mais non relié à la liaison équipotentielle de la salle d'eau.

14. TRAVAUX DE REALISATION D'UNE PRISE DE TERRE

La qualité d'une prise de terre (résistance aussi faible et stable que possible) est essentiellement fonction de deux facteurs :

- nature de sol ;
- mode de réalisation.

Tableau 2-1

BOUCLE A FOND DE FOUILLES	PIQUETS	PLAQUES VERTICALES
 <p>bâtiment</p>	 <p>3 m</p> <p>piquets reliés en parallèle</p>	 <p>TE</p>
<p>L : longueur de la boucle</p> $R = \frac{2\rho}{L}$ <ul style="list-style-type: none"> ● Conducteur en : ● Cu : câble ou feuillard de 25 mm²; ● Al : S ≥ 35 mm²; galvanisé : S ≥ 95 mm² 	<p>L ≥ 2 m : longueur du piquet</p> $R = \frac{\rho}{L}$ <p>pour n piquets :</p> $R = \frac{\rho}{Ln}$ <ul style="list-style-type: none"> ● Piquet en Cu ou acier galvanisé Ø ≥ 15 mm. 	<p>L : périmètre de la plaque</p> $R = 0,8 \frac{\rho}{L}$ <ul style="list-style-type: none"> ● Plaque en Cu (ép. = 2 mm) ou en acier galvanisé (ép. = 3 mm).

Le tableau 2-1 présente les trois types de réalisation d'une prise de terre spécialement établies (avec R : résistance de la prise de terre ; ρ : résistivité du sol).

14.1. Identification de l'emplacement d'une prise de terre

La valeur de la résistance de la prise de terre dépend de la forme et des dimensions de la prise de terre et de la nature du terrain.

Le tableau 2-2 donne des ordres de grandeur de la résistivité des différents terrains.

Tableau 2-2

NATURE DU TERRAIN	RÉSISTIVITÉ (en $\Omega \cdot m$)
Terrains marécageux	1 à 30
Limon	20 à 100
Humus	10 à 150
Tourbe humide	5 à 100
Argile plastique	50
Marnes et argiles compactes	100 à 200
Marnes du jurassique	30 à 40
Sable argileux	50 à 500
Sable siliceux	200 à 3 000
Sol pierreux nu	1 500 à 3 000
Sol pierreux recouvert de gazon	300 à 500
Calcaires tendres	100 à 300
Calcaires compacts	1 000 à 5 000
Calcaires fissurés	500 à 1 000
Schistes	50 à 300
Micaschistes	800
Granits et grès suivant altération	1 500 à 10 000
Granits et grès très altérés	100 à 600

L'humidité du sol diminue la résistivité ρ . L'eau devient conductrice en se chargeant de sels minéraux au contact des terres.

En outre, le gel et la sécheresse qui peuvent se faire sentir jusqu'à plus de 2 m de profondeur augmentent la résistance : il convient d'établir la prise de terre dans des endroits abrités.

Les agents corrosifs provenant d'eaux usées ou polluées rongent la surface des éléments métalliques et augmentent leur résistivité. Le même effet est obtenu des courants de retour des lignes de traction (les courants vagabonds) qui détruisent les surfaces par électrolyse.

Le tableau 2-3 donne les ordres de grandeur de résistances de prises de terre compte tenu de la nature du terrain et du type de constitution.

Tableau 2-3

CONSTITUTION DE LA PRISE DE TERRE	NATURE DU TERRAIN		
	ARABLES GRAS REMBLAIS HUMIDES	ARABLES MAIGRES REMBLAIS GROSSIERS	PIERREUX SECS SABLE SEC
MAISON INDIVIDUELLE 8 x 7m • boucle à fond de fouille • 1 piquet vertical de 2 m • 4 piquets verticaux (un à chaque angle) • 1 tranchée de 10 m	3 à 10 6 à 75 2 à 18 8 à 30	30 à 60 220 à 300 60 à 120 90 à 120	100 à 200 750 à 1500 220 à 450 300 à 600
IMMEUBLE COLLECTIF 10 x 40 m • boucle à fond de fouille • 10 piquets verticaux de 2 m régulièrement répartis à la périphérie	1 à 3 3 à 8	10 à 20 23 à 45	50 à 100 120 à 220

*Un ensemble de poteaux métalliques enterrés interconnectés répartis sur le pourtour d'un bâtiment présente une résistance du même ordre de grandeur que celle de la boucle à fond de fouille.
L'enrobage éventuel de béton ne s'oppose pas à l'utilisation de poteaux comme prises de terre et ne modifie pas sensiblement la valeur de la résistance de la prise de terre.*

14.2. Modes de réalisation d'une prise de terre

14.2.1. Boucle à fond de fouille

La meilleure solution consiste à réaliser une boucle à fond de fouille (fig. 14-1) établie pendant la construction des bâtiments avec généralement un câble de cuivre nu de 25 mm² de section (ou 95 mm² en acier galvanisé).

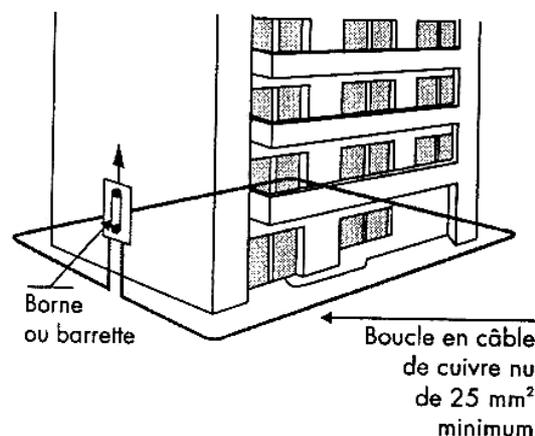


Fig. 14-1

Cette solution est pratiquement imposée pour les bâtiments soumis au Code du travail (Arrêté du 4 août 1992).

Pour la réaliser il faut placer sous le béton de propreté ou contre les murs extérieurs à au moins un mètre de profondeur un conducteur qui peut être :

- en cuivre : câble (25 mm^2) ou feuillard ($S \geq 25 \text{ mm}^2$, $e \geq 2 \text{ mm}$) ;
- en aluminium gainé de plomb : câble ($S \geq 35 \text{ mm}^2$) ;
- en acier galvanisé : câble ($S \geq 95 \text{ mm}^2$) ou feuillard ($S \geq 100 \text{ mm}^2$, $e \geq 3 \text{ mm}$).

14.2.2. Un ou plusieurs piquets

Une autre solution très couramment employée consiste à réaliser la prise de terre avec un ou plusieurs piquets (fig. 14-2) enfoncés verticalement au-dessous du niveau permanent d'humidité, à une profondeur minimale de 2 m. Des piquets de 1,50 m sont donc insuffisants.

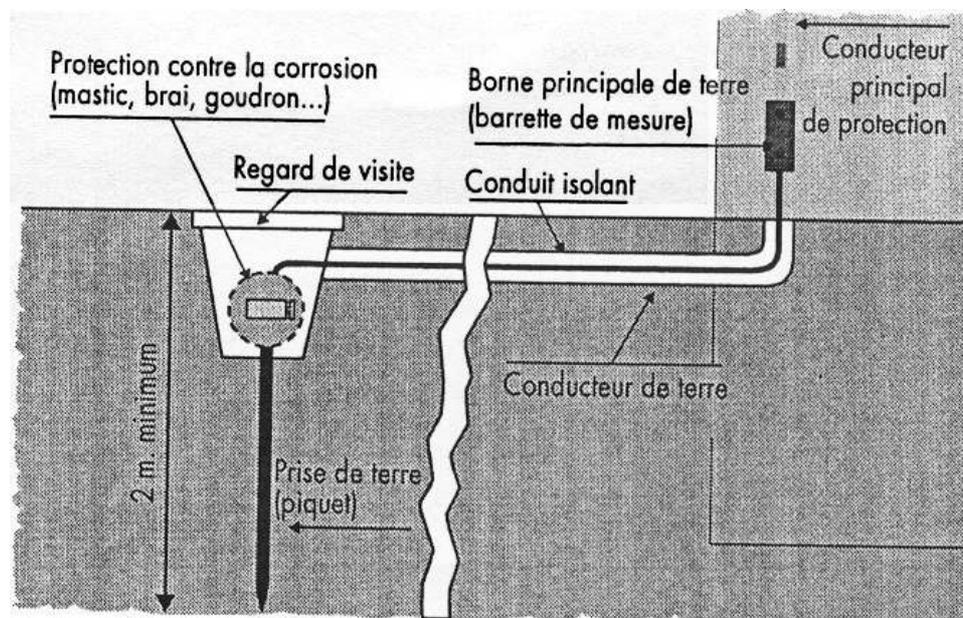


Fig. 14-2

Cette disposition est généralement retenue pour les bâtiments existants ou pour améliorer une prise de terre existante. Le piquet peut être :

- barre en cuivre rond ou en acier recouvert de cuivre ou galvanisé de diamètre $\varnothing \geq 15$ mm ;
- tube en acier galvanisé de diamètre $\varnothing \geq 25$ mm ;
- profilé en acier doux galvanisé d'au moins 60 mm de côté.

Il est souvent nécessaire d'utiliser plusieurs piquets. Ceux-ci doivent être toujours distants 2 à 2 de plus de 2 à 3 fois la profondeur du piquet. La résistance résultante est alors égale à la résistance unitaire divisée par le nombre de piquets.

14.2.3. Autres solutions

Comme d'autres solutions peuvent être utilisées :

- conducteurs enfouis à une profondeur d'environ 1 m dans des tranchées (fig. 14-3) ;

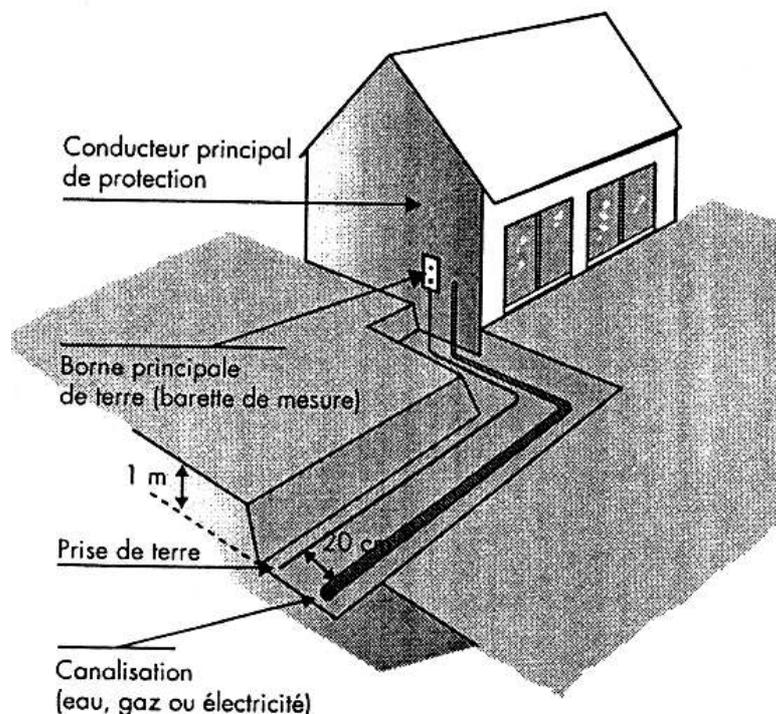


Fig. 14-3

- plaques minces enterrées verticalement (fig. 14-4) de sorte que le centre de la plaque soit à une profondeur d'environ 1 m.

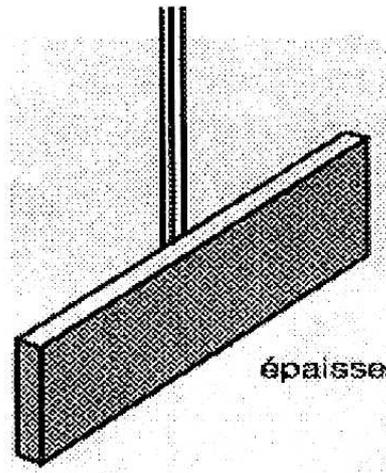


Fig. 14-4

Ces plaques sont soit carrées, soit rectangulaires ($l \geq 0,5$ m). Elles peuvent être :

- en cuivre de 2 mm d'épaisseur ;
 - en acier galvanisé de 3 mm d'épaisseur.
- poteaux métalliques enterrés.

14.3. Vérification des installations lors de mise en service

14.3.1. Nature des vérifications

Les installations électriques doivent être vérifiées lors de leur mise en service ainsi qu'à l'occasion de modifications importantes, puis périodiquement à des intervalles convenables.

A la mise en service, cette vérification comporte :

- des contrôles :
 - de l'efficacité des dispositifs de protection contre les contacts indirects et contre les surintensités ;

- de continuité des conducteurs de protection et du bon serrage des connexions qui jalonnent leur circuit ;
 - du bon serrage des connexions des conducteurs actifs sur l'appareillage et les appareils ;
 - du choix des classes des appareils installés par rapport aux conditions d'influences externes des locaux ;
 - éventuellement du choix des conduits qui doivent faciliter le passage des conducteurs.
- des mesures :
- de résistance d'isolement ;
 - de la résistance de la prise de terre.

14.3.2. Mesure des résistances d'isolement

Pendant ces mesures, l'installation est mise hors tension par sectionnement à l'origine de tous les conducteurs actifs, y compris le neutre.

Ces mesures doivent porter sur l'ensemble de l'installation, aucune portion ne doit y échapper. A cet effet, avant de procéder à une mesure globale, il y a lieu de s'assurer :

- que les coupe-circuits à fusibles sont garnis ;
- que les appareils de commande sont en position « fermée ».

Dans certains cas, il faut effectuer cette mesure d'isolement par tronçons séparés.

La mesure d'isolement est fait :

- entre chaque conducteur de phase après avoir, éventuellement, débranché les appareils triphasés ;
- entre chaque conducteur de phase et le neutre, appareils monophasés non raccordés ;
- entre les conducteurs actifs (phase + neutre) et le conducteur de terre.

La résistance d'isolement doit être d'au moins 1000 ohms par volt de tension de régime avec un minimum de 250000 ohms. La mesure s'effectue avec un ohmmètre à magnéto, 500 V continu.

14.3.3. Vérification de la résistance d'une prise de terre

Tout installateur doit mesurer la résistance de prise de terre avec un « ohmmètre de terre » (telluromètre) capable de réaliser des mesures de faible et très faible valeur sans être perturbé par la présence dans le sol de nombreux « courants telluriques ». La mesure avec un contrôleur universel n'est pas valable.

Cette méthode est la plus utilisée pour les locaux d'habitation. Le contrôleur est relié à la terre à mesurer et à deux prises de terre auxiliaires. Il faut éloigner les terres auxiliaires de la terre à mesurer et disposer les piquets de façon à former un triangle équilatéral avec la prise de terre à mesurer, si cette dernière est un piquet vertical ou une plaque enterrée. Dans le cas d'une prise de terre réalisée par une boucle à fond de fouilles, les piquets de terre auxiliaires doivent être placés en alignement.

La mesure de la résistance de la prise de terre doit être effectuée durant les conditions climatiques les plus défavorables :

- période sèche ;
- gel prolongé.

Quelle que soit la méthode employée, la valeur trouvée doit être inférieure à :

- 37 ohms, avec un disjoncteur différentiel de sensibilité 650 mA ;
- 48 ohms, avec un disjoncteur différentiel de sensibilité 500 mA.

Lorsque la mesure de cette résistance ne peut pas être réalisée avec des prises de terre auxiliaires, on peut, en zone urbaine, mesurer l'impédance de la boucle de défaut phase – terre qui donne une valeur par excès. Cette méthode peut se révéler imprécise lorsque le poste de distribution publique est éloigné et si les terrains sont de nature hétérogène.

14.3.4. Vérification de la continuité des circuits de protection (terre)

Cette vérification doit être effectuée avec un appareil de sensibilité appropriée en faisant circuler un courant d'au moins 2 A sous une tension au plus égale à 12 V.

14.4. Outils de travail

L'outillage de base nécessaire pour réaliser une installation électrique devra comporter :

- un jeu de tournevis plats de différentes tailles à manche isolé (impérativement) (fig. 14-5, position 1) ;
- au moins deux tournevis Philips de différentes tailles (moyens) ;
- une pince universelle (à manche isolé) (fig. 14-5, position 2) ;
- une pince coupante diagonale (à manche isolé) ;
- une pince à dénuder à vis ;

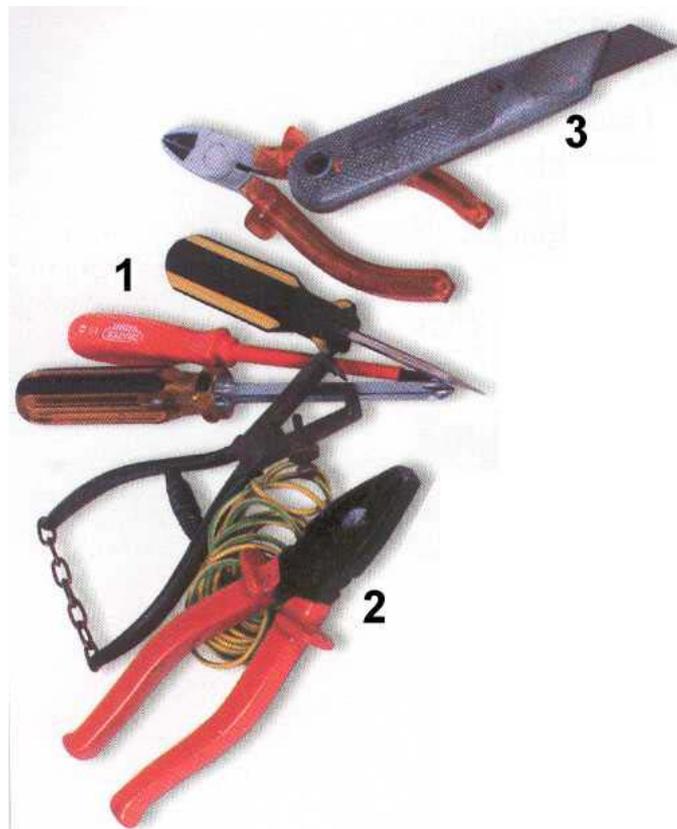


Fig. 14-5

- une pince à bec étroit ;
- un couteau d'électricien (fig. 14-5, position 3) ;
- un marteau de menuisier ;
- un ciseau à bois de taille moyenne ;
- un mètre ;
- un crayon à papier ;
- un niveau à bulle ;
- une lime et une râpe à bois ;
- une scie à métaux ;
- une scie à bois (fig. 14-6) ;
- un traceur à cordeau (qui pourra servir de fil à plomb) ;
- divers ciseaux et pointerolles de maçon ;
- un ciseau à briques ;
- une massette ;



Fig. 14-6

- une truelle de plâtrier (fig. 14-7, position 4) ;
- une langue de chat ;
- une truelle Berthelet (fig. 14-7, position 5) ;
- une auge de maçon (fig. 14-7, position 3) ;
- une pelle ;
- une pioche.

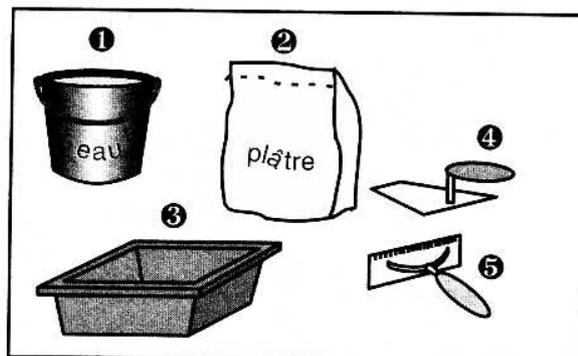


Fig. 14-5

14.5. Règles de sécurité au travail

La manipulation de lourds objets est la principale source des *efforts violents*. Le type de manipulation et les caractéristiques de l'objet lui-même déterminent l'effort et les risques qui peuvent en découler. Il faut remarquer que pour des poids égaux, l'effort à fournir sera d'autant plus élevé que le volume de l'objet sera important.

L'utilisation d'outils à main implique un certain potentiel de risques d'origines diverses. Parmi les outils à main, il faut mentionner premièrement les *outils à frapper* : marteau, masse, massette, pioche, hache, hachette, etc. Les risques proviennent du démanchement de l'outil et de la rupture du manche. Les manches en bois sont principalement faits de frêne ou de cornouiller, dont les fibres doivent être parallèles à l'axe du manche. Le manche doit être emboîté soigneusement dans l'œil de l'outil et la tête de l'outil, assurée contre le démanchement par un coin de dimension adaptée à l'œil.

***Module 3 : ANALYSE DE CIRCUITS A
COURANT ALTERNATIF
GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES***

TP1 – Définition des termes associés au courant alternatif

1.1. Objectif visé

Sensibiliser les stagiaires à définir les termes associés au courant alternatif.

1.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

1.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Dessins des graphiques de courants sinusoïdaux de même fréquence

1.4. Description du TP

Sur la fig. TP1-1 ci-dessous sont représentés les graphiques de deux courants alternatifs sinusoïdaux de même fréquence.

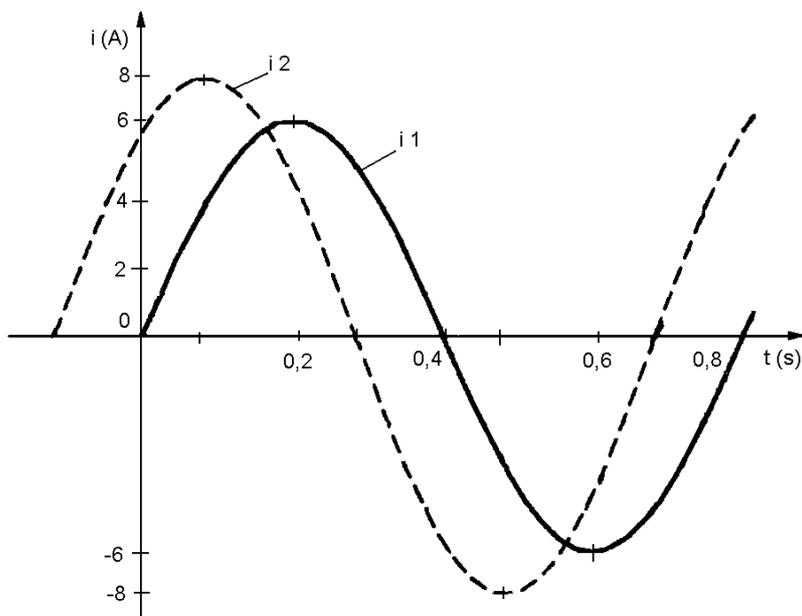


Fig. TP1-1

1.5. Déroulement du TP

- Identifier pour chaque courant les alternances positives et négatives.
- Identifier l'amplitude de chaque courant.
- Identifier la période des deux courants.
- Calculer la fréquence des deux courants.
- Calculer la valeur efficace de chaque courant.
- Indiquer le déphasage entre les deux courants.
- Représenter un courant alternatif sinusoïdal i_3 de même fréquence déphasé d'un quart de période an avant par rapport au courant i_1 , et d'amplitude $I_3 \text{ max} = 4 \text{ A}$.
- Représenter sur la fig. TP1-2 un courant alternatif sinusoïdal i_4 de même fréquence, déphasé d'un quart de période derrière le courant i_1 et dont l'amplitude $I_4 \text{ max} = 8 \text{ A}$.

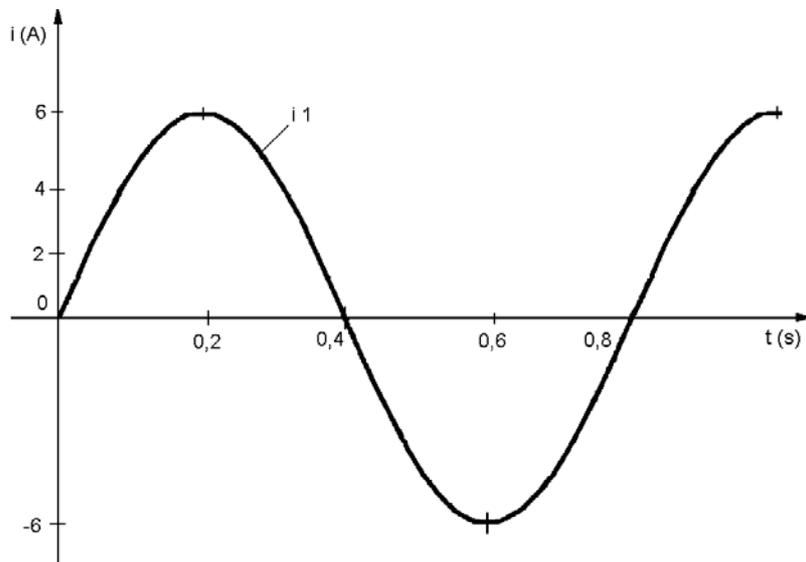


Fig. TP1-2

TP 2 – Description des effets des inductances dans un circuit à courant alternatif

2.1. Objectif visé

Apprendre aux stagiaires à calculer les caractéristiques d'un circuit à courant alternatif comportant une bobine réelle à partir des oscillogrammes des graphiques du courant et de la tension.

2.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

2.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Plusieurs oscillogrammes du courant et de la tension aux bornes d'une bobine alimentée en courant alternatif

2.4. Description du TP

Calculer individuellement à partir des graphiques les différentes caractéristiques d'un circuit comportant une bobine alimentée en courant alternatif.

2.5. Déroulement du TP

A. A partir des graphiques présentées sur la fig. TP2-1 de la tension et du courant d'une bobine alimentée en courant alternatif :

- Identifier le graphique qui correspond à la tension et celui qui correspond au courant, en expliquant votre choix.
- Déterminer l'amplitude de la tension et sa valeur efficace.
- Déterminer l'amplitude du courant et sa valeur efficace.
- Déterminer la fréquence de la tension.
- Calculer la réactance inductive de la bobine.

- Calculer l'inductance de la bobine.

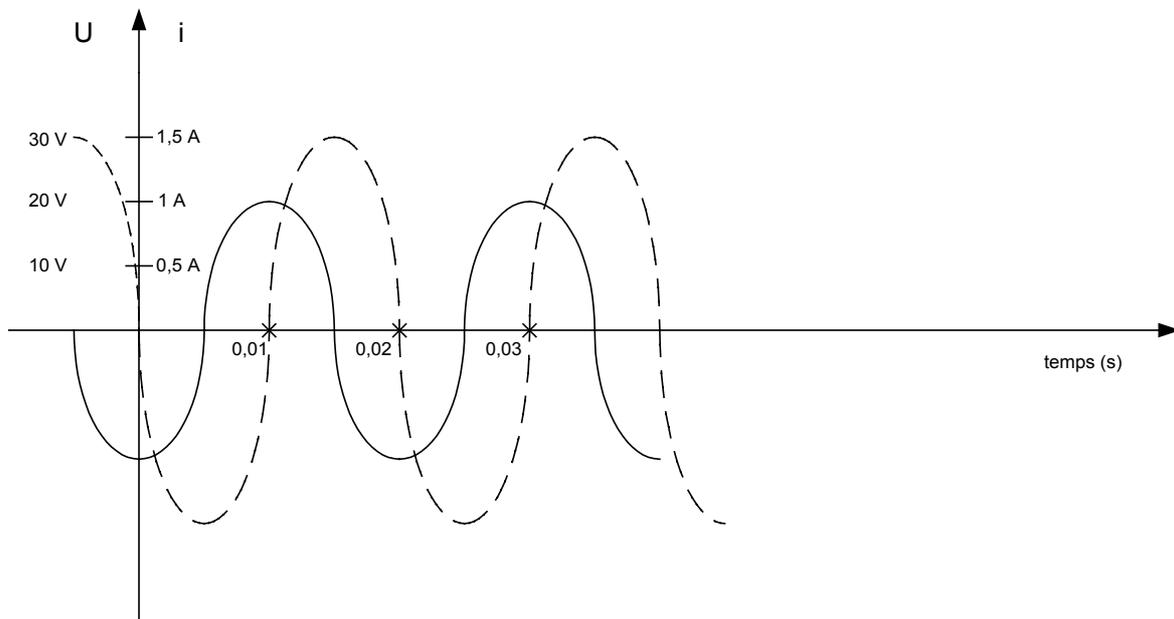


Fig. TP2-1

B. Trois bobines d'inductances $L_1 = 0,2 \text{ H}$, $L_2 = 0,4 \text{ H}$ et $L_3 = 0,8 \text{ H}$ sont connectées en série et sont alimentées sous une tension de valeur efficace $U = 50 \text{ V}$ et de fréquence $f = 50 \text{ Hz}$:

- Déterminer la réactance de chaque bobine.
- Déterminer la réactance de l'ensemble.
- Déterminer le courant effectif dans le circuit.
- Déterminer la tension effective pour chaque bobine.

C. Les mêmes trois bobines d'inductances $L_1 = 0,2 \text{ H}$, $L_2 = 0,4 \text{ H}$ et $L_3 = 0,8 \text{ H}$ sont connectées en parallèle et sont alimentées sous la même tension de valeur efficace $U = 50 \text{ V}$ et de fréquence $f = 50 \text{ Hz}$:

- Déterminer la réactance de l'ensemble.
- Déterminer le courant dans chaque bobine.
- Déterminer le courant principal du circuit.

TP3 – Description des effets des condensateurs dans un circuit à courant alternatif

3.1. Objet du TP :

Apprendre aux stagiaires à calculer les caractéristiques d'un circuit à courant alternatif comportant un condensateur à partir des oscillogrammes des graphiques du courant et de la tension.

3.2. Durée :

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

3.3. Equipement :

- Plusieurs oscillogrammes du courant et de la tension aux bornes d'un condensateur alimenté en courant alternatif

3.4. Description du TP :

Calculer individuellement à partir des graphiques les différentes caractéristiques d'un circuit comportant un condensateur alimenté en courant alternatif.

3.5. Déroulement du TP :

A. A partir des graphiques présentées sur la fig. TP3-1 de la tension et du courant d'un condensateur alimenté en courant alternatif :

- Identifier le graphe qui correspond à la tension et celui qui correspond au courant et expliquer votre choix.
- Déterminer l'amplitude de la tension et sa valeur efficace.
- Déterminer l'amplitude du courant et sa valeur efficace.
- Déterminer la fréquence et la période de la tension.
- Calculer la réactance capacitive des condensateurs.

- Calculer la capacité du condensateur.

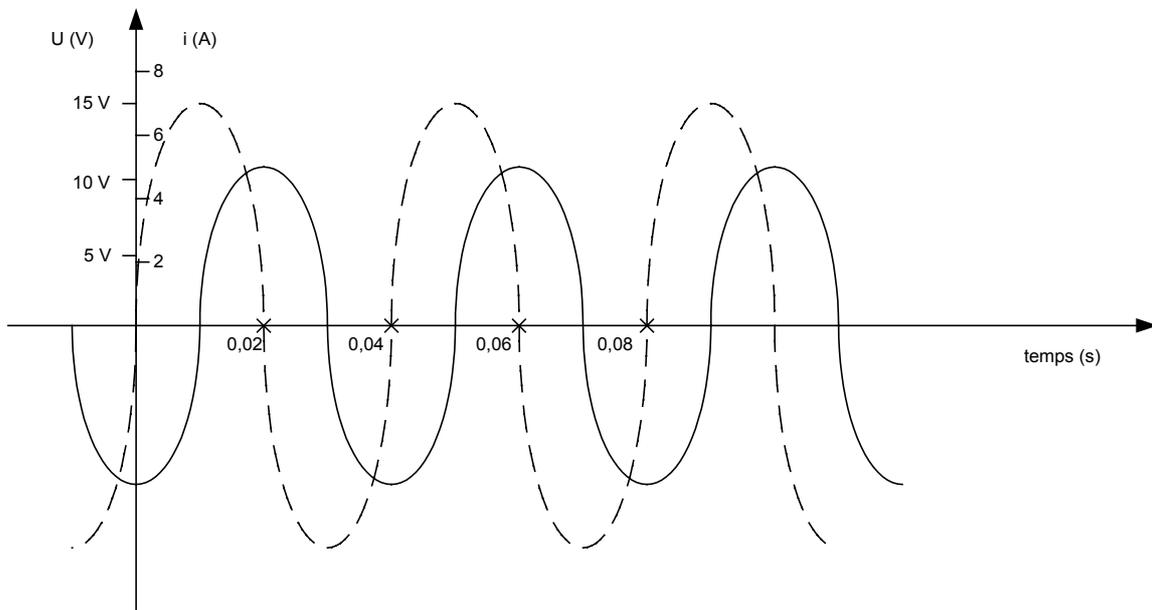


Fig. TP3-1

B. **Trois condensateurs des capacités : $C_1 = 0,2 \mu F$, $C_2 = 0,3 \mu F$ et $C_3 = 0,6 \mu F$ sont connectés en série et sont alimentés sous une tension de valeur efficace $U = 60 V$ et de fréquence $f = 50 Hz$:**

- Déterminer la réactance capacitive de chaque condensateur.
- Déterminer la capacité de l'ensemble et sa réactance capacitive.
- Déterminer le courant efficace dans le circuit.
- Déterminer la tension efficace aux bornes de chaque condensateur.

C. **Les mêmes trois condensateurs des capacités : $C_1 = 0,2 \mu F$, $C_2 = 0,3 \mu F$ et $C_3 = 0,6 \mu F$ sont connectés en parallèle et sont alimentés sous une tension de valeur efficace $U = 60 V$ et de fréquence $f = 50 Hz$:**

- Déterminer la capacité de l'ensemble et sa réactance capacitive.
- Déterminer le courant dans chaque condensateur.
- Déterminer le courant principal du circuit.

TP4 – Calcul des valeurs d'une onde sinusoïdale

4.1. Objectif visé

Apprendre aux stagiaires à calculer à partir d'un oscillogramme les caractéristiques d'une onde sinusoïdale : l'amplitude, la période, les valeurs instantanées pour des moments de temps choisis, la valeur efficace, la fréquence et la pulsation.

4.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

4.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Oscillogramme des ondes sinusoïdales

4.4. Description du TP

Calculer individuellement à partir des graphiques les différentes caractéristiques d'une onde sinusoïdale.

4.5. Déroulement du TP

A. Calcul des valeurs caractéristiques d'une onde sinusoïdale

Un courant et une tension alternative de même fréquence ont les expressions suivantes :

$$i = 6\sqrt{2} \sin 100 \pi t \quad (A)$$

$$u = 70,5 \sin (100 \pi t + \pi / 2) \quad (V)$$

- Préciser la pulsation et la phase initiale de chaque grandeur.
- Calculer la période et la fréquence des deux grandeurs.
- Spécifier la valeur efficace et la valeur de crête (l'amplitude) de chaque grandeur.

- Calculer les valeurs instantanées des deux grandeurs sinusoïdales pour les moments de temps : $t = 0$ $t = \frac{1}{50}$ s $t = \frac{1}{100}$ s

B. Pour l'oscillogramme de la fig. TP4-1 représentant l'onde d'une tension sinusoïdale :

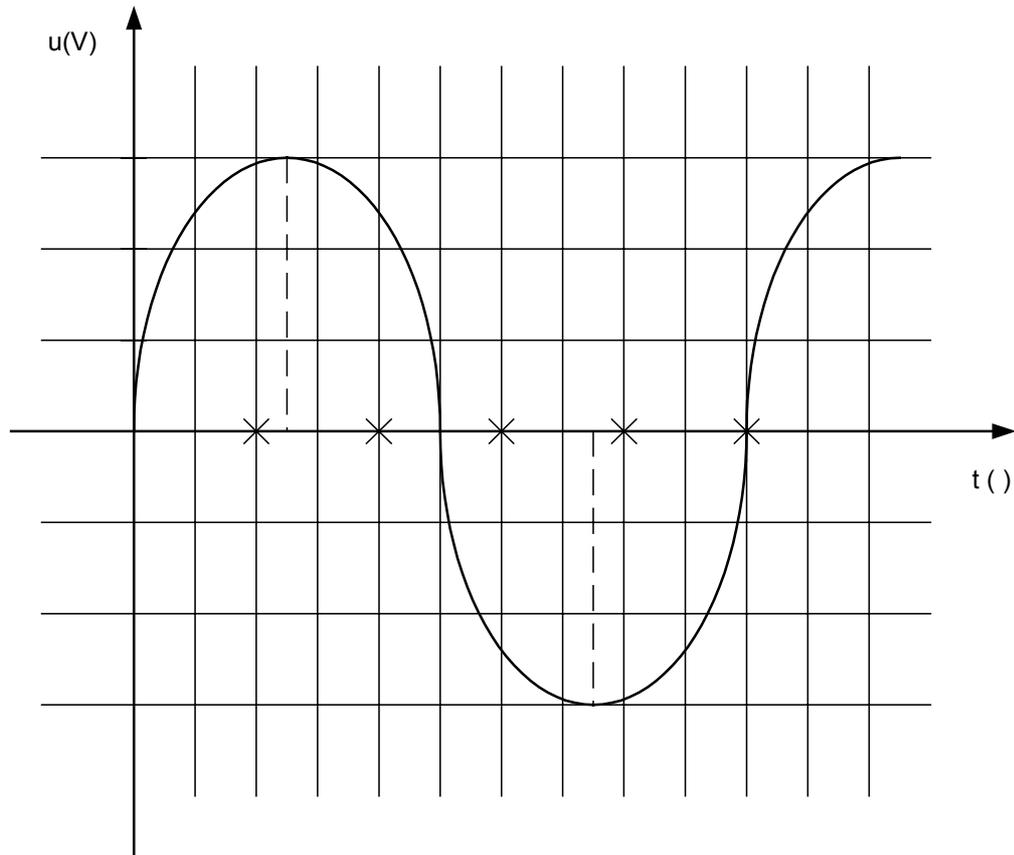


Fig. TP4-1

Les échelles de l'oscillogramme sont : 100 V/carreau et 4 ms/carreau.

- Calculer la valeur de crête et l'amplitude de la tension visualisée.
- Relever la période de la tension visualisée.
- Calculer la fréquence et la pulsation.
- Déterminer la valeur instantanée de la tension alternative pour $t_1 = 5$ ms ; $t_2 = 10$ ms ; $t_3 = 15$ ms et $t_4 = 20$ ms.
- Écrire l'expression de l'onde sinusoïdale correspondante à cette tension.

TP5 – Schéma d'un circuit

5.1. Objectif visé

Apprendre aux stagiaires à calculer à identifier les symboles des composants et leurs groupements dans un schéma d'un circuit à courant alternatif.

5.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

5.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Schémas des circuits à courant alternatif

5.4. Description du TP

Identifier individuellement à partir des schémas les différents symboles des composants et leurs groupements.

5.5. Déroulement du TP

Chaque composant du circuit (fig. TP5 – 1) symbolisé dans le circuit est repéré avec une lettre : R, L ou C, suivie d'un indice. A côté se trouve sa valeur nominale.

- Identifier chaque composant du schéma et indiquer la valeur codée. (Exemple : R1 = une résistance de 7,5 k Ω , soit 7500 Ω).
- Identifier tous les groupements série en indiquant leurs composants.
- Identifier tous les groupements parallèles en indiquant leurs composants.
- Identifier chaque groupement série de composants de la même nature et calculer sa valeur équivalente.
- Identifier chaque groupement parallèle de composants de la même nature et calculer sa valeur équivalente.

- Identifier les groupes de condensateurs parcourus par le même courant.

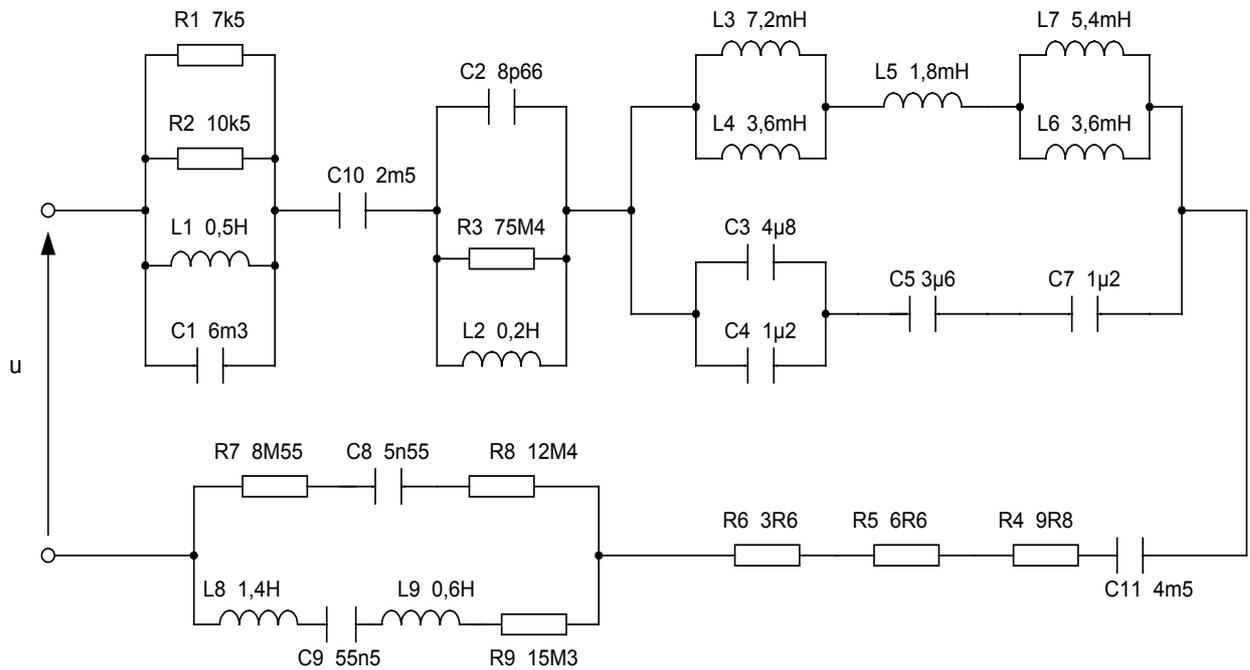


Fig. TP5-1

- Redessiner le circuit en remplaçant tout groupement de composants du même type. Marquer en suite les composant équivalents conformément au code des lettres et des chiffres.

TP6 – Diagrammes vectoriels

6.1. Objectif visé

Apprendre aux stagiaires à dessiner le diagramme vectoriel d'un circuit série et d'un circuit parallèle comprenant une résistance, une bobine et un condensateur. Sur le diagramme doivent être représentés les vecteurs de la tension et du courant pour chaque composant et le vecteur tension du circuit série et courant principal pour le circuit parallèle. A partir des résultats il doit relever le triangle d'impédances dans les deux cas, d'identifier et de calculer le déphasage.

6.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

6.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Données techniques de plusieurs circuits

6.4. Description du TP

Chaque stagiaire doit effectuer indépendamment l'exercice. Il est recommandé d'effectuer les diagrammes vectoriels en respectant une échelle choisie.

6.5. Déroulement du TP

A. Circuit série

Un circuit de courant alternatif comprend les éléments suivants associés en série : deux résistances R_1 et R_2 , deux bobines L_1 et L_2 et un condensateur C . Les tensions relevées aux bornes de chaque élément ont les valeurs efficaces suivantes :

$$U_{R1} = 10 \text{ V} ; U_{R2} = 30 \text{ V} ; U_{L1} = 15 \text{ V} ; U_{L2} = 25 \text{ V} ; U_C = 10 \text{ V}$$

- Dessiner le diagramme vectoriel associé au circuit en utilisant une échelle appropriée.
- Déterminer graphiquement la tension d'alimentation du circuit.
- Indiquer le caractère du circuit (capacitif ou inductif).
- Estimer le déphasage entre le courant et la tension aux bornes du circuit.
- Pour une valeur efficace du courant principal $I = 4 \text{ A}$ déterminer l'impédance du circuit.
- Dessiner le triangle des impédances.

Considérons maintenant que le circuit décrit ci-dessus comprend des éléments réels de circuit : deux bobines, de résistance R_1 et inductance L_1 pour la première et de résistance R_2 et inductance L_2 pour la deuxième, et un condensateur de capacité C et résistance négligeable. Les valeurs efficaces des tensions sont celles indiquées avant.

- Redessiner le diagramme vectoriel du circuit afin de mettre en évidence la tension aux bornes de chaque bobine.
- Déterminer graphiquement la tension aux bornes de chaque bobine.
- Indiquer et ensuite estimer le déphasage entre le courant et la tension aux bornes de chaque bobine.
- Pour une valeur efficace du courant principal $I = 4 \text{ A}$ déterminer l'impédance de chaque bobine.
- Spécifier la tension d'alimentation du circuit et le déphasage entre le courant et la tension aux bornes du circuit.

B. Circuit parallèle

Un circuit de courant alternatif comprend les composants suivants associés en parallèle : deux résistances R_1 et R_2 , une bobine L et deux condensateurs C_1 et C_2 . Les courants relevés à travers chaque élément ont les valeurs efficaces suivantes :

$$I_{R1} = 6 \text{ A} ; I_{R2} = 3 \text{ A} ; I_L = 15 \text{ A} ; I_{C1} = 2 \text{ A} ; I_{C2} = 7 \text{ A}$$

- Dessiner le diagramme vectoriel associé au circuit en utilisant une échelle appropriée.
- Déterminer graphiquement le courant principal du circuit.
- Indiquer le caractère du circuit (inductif ou capacitif).
- Estimer le déphasage entre le courant principal et la tension aux bornes du circuit.
- Pour une valeur efficace de la tension d'alimentation du circuit $U = 50 \text{ V}$, déterminer l'impédance du circuit.
- Dessiner le triangle d'admittances.

TP7 – Mesure des valeurs aux différents points d'un circuit

7.1. Objectif visé

Apprendre au stagiaire à brancher les appareils de mesure de courant alternatif (un ampèremètre et un voltmètre) dans un circuit comprenant un groupement mixte afin de mesurer le courant et la tension pour chaque élément du circuit.

7.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 5 heures.

7.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Ampèremètre de courant alternatif magnétoélectrique à plusieurs calibres ;
- Voltmètre de courant alternatif magnétoélectrique à plusieurs calibres ;
- Deux résistances de valeurs de l'ordre des $K\Omega$;
- Une bobine d'inductance 0,5H ;
- Un condensateur de capacité de l'ordre de 6 μF ;
- Conducteurs de raccordements.

7.4. Description du TP

Le travail s'effectue en groupe de 2 stagiaires. Chaque stagiaire doit brancher les appareils de mesure dans le circuit.

Chaque stagiaire doit rédiger un tableau d'enregistrement qu'il complétera au cours du TP. Le traitement des données doit être effectué séparément par chaque stagiaire.

Pour personnaliser les tableaux d'enregistrement il est nécessaire soit de modifier la tension d'alimentation pour chaque groupe de stagiaires, soit de modifier les valeurs

des composants (par exemple, on peut utiliser à la place de la résistance et du condensateur une boîte à résistance et une boîte à condensateurs).

7.5. Déroulement du TP

Le stagiaire doit mesurer la tension et le courant pour tous les éléments d'un circuit simple alimenté en courant alternatif comportant un ensemble parallèle et un ensemble série.

Le schéma du circuit à étudier est présenté sur la fig. TP7 - 1 :

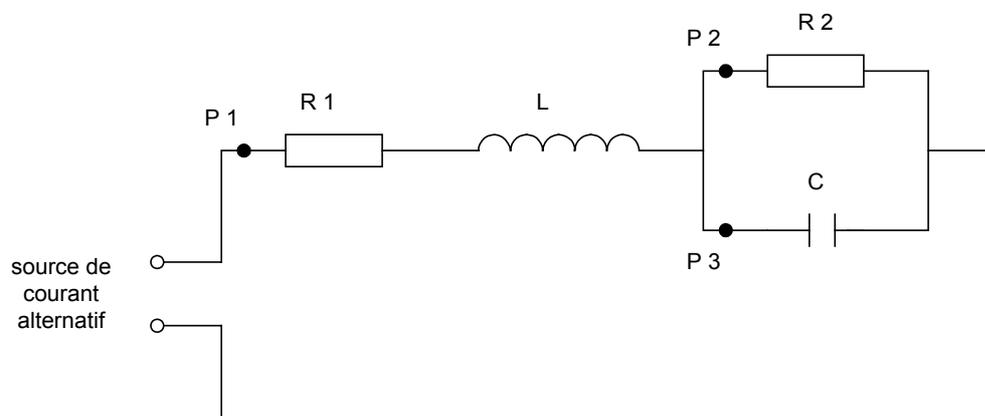


Fig. TP7 - 1

Le circuit doit être réalisé par le groupe de stagiaire. Le tableau d'enregistrement dans lequel seront inscrites les lectures des appareils de mesure est présenté ci-dessous :

Le travail pratique se déroule en trois étapes :

- Mesurer la tension aux bornes de chaque élément et compléter le tableau d'enregistrement avec les relevés pris, ainsi qu'avec les données caractérisant la prise de mesure : calibre et échelle utilisés.
- Mesurer le courant dans chaque élément et compléter le tableau d'enregistrement avec les relevés pris avec les conditions dans lesquelles la mesure a été effectuée : calibre et échelle utilisés.
- Interprétation des résultats.

	N°	Ampèremètre					Voltmètre				
		Calibre [A] E	Echelle [grd] E	Coef. K[A/grd] K=C/E	Lecture [grd] L	Intensité [A] I=K.L	Calibre [V] C	Echelle [grd] E	Coef. K[V/grd] K=C/E	Lecture [grd] L	Tension [V] U=K.L
Résistance R1	1 2 3										
Bobine L	1 2 3										
Résistance R2	1 2 3										
Condensateur C	1 2 3										
Valeur globale du circuit	1 2 3										

Remarque : Il est nécessaire d'effectuer au moins trois mesures pour la même grandeur.

A. Mesure de la tension aux bornes de chaque élément

Avant d'alimenter le circuit en courant alternatif :

- Vérifier que le commutateur du type du courant du voltmètre est sur la position C.A.
- Choisir un grand calibre (même le plus grand) pour l'appareil de mesure.
- Effectuer la mise à zéro de l'aiguille de l'appareil utilisé en agissant sur son correcteur de zéro.

Mesurer en suite la tension pour chaque élément en suivant les étapes :

- Brancher le voltmètre aux bornes de l'élément ;
- Alimenter le circuit ;
- Prendre la mesure et inscrire dans le tableau d'enregistrement dans les colonnes correspondantes le calibre et l'échelle utilisés ainsi que l'indication en graduation du voltmètre.
- Si l'indication reste dans le premier tiers de l'échelle, effectuer une nouvelle mesure pour un calibre inférieur.

- Couper l'alimentation du circuit.

Remarque : L'alimentation du circuit doit être faite avec une tension alternative de préférence de valeur efficace réduite ($30 \div 50V$) qu'on gardera constante au cours du TP).

B. Mesure du courant dans chaque élément

Avant d'alimenter le circuit en courant alternatif :

- Vérifier que le commutateur du type du courant de l'ampèremètre est sur la position C.A. ;
- Choisir un grand calibre (même le plus grand) pour l'ampèremètre ;
- Effectuer la mise à zéro de l'aiguille de l'ampèremètre en agissant sur le correcteur de zéro (seulement s'il y a le cas).

Mesurer en suite le courant à travers chaque élément du circuit en suivant les étapes :

- Brancher l'ampèremètre dans le circuit en P_1 premièrement (en P_2 et P_3 en suite), donc en série avec l'élément où on veut mesurer le courant.
- Alimenter le circuit.
- Prendre la mesure et inscrire dans le tableau d'enregistrement, dans les colonnes correspondantes, le calibre et l'échelle utilisés ainsi que l'indication en graduation de l'ampèremètre.
- Si l'indication reste dans le premier tiers de l'échelle effectuer une nouvelle mesure pour un calibre inférieur ;
- Après avoir effectué la mesure la plus exacte couper l'alimentation, et passer au branchement suivant de l'ampèremètre.

Attention : Le branchement de l'ampèremètre s'effectue seulement dans le circuit hors de tension. La continuité du circuit doit être refaite après l'enlèvement de l'ampèremètre et son emplacement en vue d'une nouvelle mesure.

C. Interprétation des lectures des appareils de mesure

Calculer pour chaque prise de mesure le coefficient de lecture K de l'appareil utilisé en utilisant la formule connue :

$$K = C / E$$

La valeur K ainsi calculée sera inscrite dans le tableau dans la position appropriée.

Calculer pour chaque mesure effectuée la valeur de la grandeur mesurée : courant ou tension, en utilisant les données du tableau : lecture inscrite et coefficient K (calculer au paravent)

Le courant vaut : $I = K \cdot L$

La tension vaut : $U = K \cdot L$

où K : le coefficient correspondant à la mesure.

L : la valeur lue en graduations au cours de la mesure.

Compléter le tableau d'enregistrement avec les valeurs calculées.

Remarque : Les valeurs du courant et de la tension du circuit seront mesurées au cours du TP et la valeur de l'impédance du circuit sera calculée à l'aide des résultats de mesure.

TP8 – Justification des résultats de mesure

8.1. Objectif visé

Le stagiaire doit effectuer un exercice par écrit concernant le calcul de l'incertitude à partir du tableau des résultats du TP précédent.

8.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

8.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Résultats des mesures effectuées du TP7.

8.4. Description du TP

Chaque stagiaire doit effectuer indépendamment le travail exigé. Le formateur doit vérifier si les stagiaires ont effectué correctement le calcul d'incertitude.

8.5. Déroulement du TP

Le travail à effectuer portera sur les données comprises dans le tableau d'enregistrement rédigé et complété au cours du travail pratique correspondant. On a les mesures de chaque grandeur (tension et courant) plusieurs fois avec le même appareil mais utilisant des calibres différents.

A. Calcule d'incertitude pour chaque mesure effectuée.

- Établir l'incertitude absolue en fonction du calibre et classe de précision de l'appareil.

$$\Delta \varepsilon = \frac{C.Cp}{100} \text{ [en unités dont le calibre est exprimé]}$$

- Établir l'intervalle d'incertitude de la grandeur mesurée.
- Indiquer la plus exacte de mesure de chaque série concernant la détermination d'une grandeur.

B. Calcul d'incertitude pour une grandeur déterminée indirectement.

Calculer l'impédance du circuit

$$Z = U / I$$

Où :

Z : impédance en ohm.

U : tension aux bornes du circuit en V (valeur présentée dans le tableau).

I : courant principal du circuit en A (valeur présentée dans le tableau).

- Établir l'intervalle d'incertitude de l'impédance.

L'incertitude de l'impédance est due aux appareils. On a alors :

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

Les incertitudes relatives pour les valeurs (tension et courant) étant déterminées au paravent, on trouve :

$$\Delta Z = Z \left(\frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} \right)$$

et l'intervalle d'incertitude $Z \in [Z \text{ min. } ; Z \text{ max.}]$,

Où : $Z_{\text{min}} = Z - \Delta Z$, et $Z_{\text{max}} = Z + \Delta Z$.

C. Calculer l'erreur absolue et relative pour l'impédance et comparer-la avec la tolérance de sa valeur.

TP9 – Définition des termes : puissance active, puissance réactive, puissance apparente et facteur de puissance

9.1. Objectif visé

Le stagiaire doit effectuer un exercice sur papier reposant sur le calcul de la puissance active, réactive et apparente dans un circuit de courant alternatif, et mettre en évidence le triangle des puissances et le facteur de puissance du circuit.

9.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

9.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Données techniques de plusieurs circuits à courant alternatif

9.4. Description du TP

Chaque stagiaire doit effectuer le travail indépendamment après avoir consulté attentivement les notions théoriques présentées dans le résumé de théorie.

9.5. Déroulement du TP

A. Dans un circuit à courant alternatif alimenté sous une tension efficace de 220V, un wattmètre (le wattmètre est un appareil de mesure de puissance active) indique 660 W. Le courant efficace absorbé par le circuit vaut 8 A.

- Calculer la puissance apparente absorbée par le circuit ;
- Calculer la puissance réactive du circuit ;
- Calculer le facteur de puissance de l'installation ;
- Calculer la capacité d'une batterie de condensateur branchée en parallèle avec l'installation afin de compenser la puissance réactive du circuit.

B. Un circuit qui comporte une bobine et une résistance branchées en série absorbe une puissance active $P = 600 \text{ W}$ et une puissance réactive $Q = 800 \text{ VAR}$.

- Déterminer le facteur de puissance du circuit ainsi que la puissance apparente ;
- Exprimer le facteur de puissance en fonction de la résistance R et de la réactance X de la bobine ;

C. On associe après la bobine et la résistance en parallèle :

- Exprimer le facteur de puissance du circuit parallèle en fonction de la résistance R et de la réactance X de la bobine ;
- Calculer la valeur numérique du facteur de puissance du circuit parallèle.

TP10 – Mesure de la puissance active et du facteur de puissance dans des circuits mono et triphasé

10.1. Objectif visé

Apprendre aux stagiaires à mesurer la puissance active et de calculer le facteur de puissance des circuits mono et triphasé.

10.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 3 heures.

10.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Wattmètre électrodynamique
- Ampèremètre magnétoélectrique à courant alternatif
- Voltmètre magnétoélectrique à courant alternatif
- Résistances
- Inductances
- Condensateur
- Transformateur monophasé 220 V / 24 V
- Transformateur triphasé 3 x 380 V / 220 V

10.4. Description du TP

Le travail s'effectue en groupe de 2 stagiaires. Chaque stagiaire doit brancher les appareils de mesure dans le circuit.

10.5. Déroulement du TP

A. Mesure des puissances d'un système monophasé

On retrouve les deux montages de base : amont (fig. TP10 - 1a) et aval (fig. TP10 - 1b).

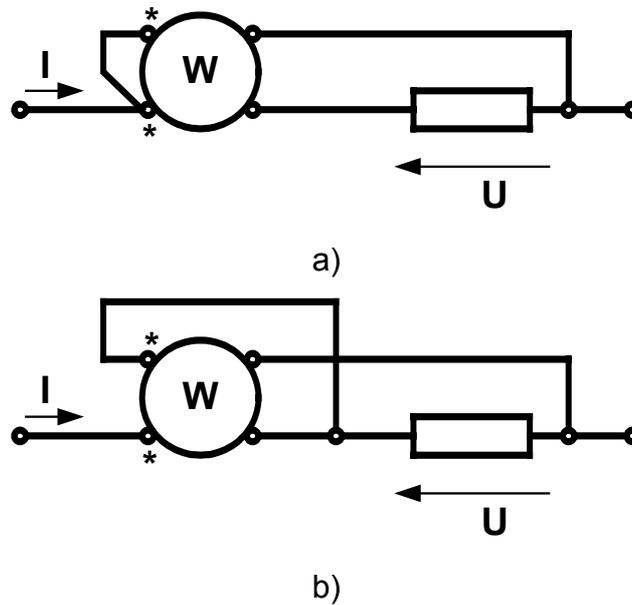


Fig. TP10 - 1

Dans le cas général, la tension d'alimentation du récepteur varie peu. Par contre, la variation d'intensité du courant peut être très importante. Ainsi, en fonction de la valeur du facteur de puissance ($\cos \varphi$), l'intensité peut prendre une valeur dangereuse pour le calibre choisi sur le wattmètre (fig. TP10 - 2).

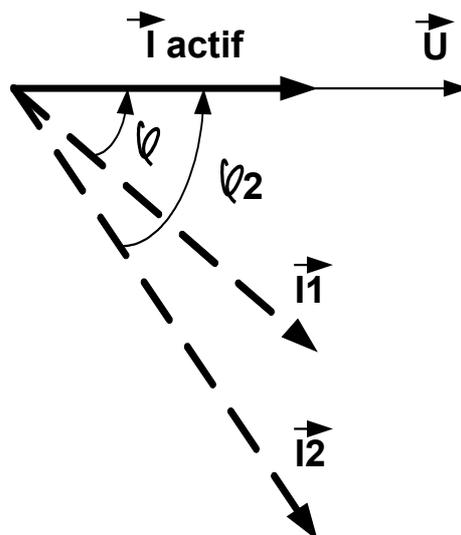


Fig. TP10 - 2

Les corrections de consommations des appareils peuvent être faites comme en courant continu. Dans le cas général, les puissances mises en cause étant importantes, plusieurs centaines de watts, la correction de consommation est négligeable devant l'incertitudes d'étalonnage et de lecture. La correction n'intervenant pas, on choisira le montage (amont ou aval) en tenant compte de la disposition des bornes de wattmètre (fig. TP10 - 3).

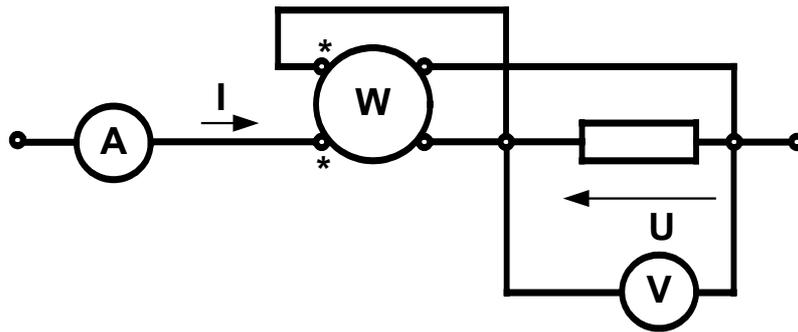


Fig. TP10 - 3

Remarque : Pour les faibles puissances, il faut effectuer les corrections ou utiliser un wattmètre ferro-dynamique compensé.

B. Mesure des puissances d'un système triphasé

Pour placer un récepteur dans une situation optimale de fonctionnement, il faut déterminer son facteur de puissance $\cos \varphi = P / S$, donc effectuer des mesures de puissances active et apparente.

D'autre part, tout système de distribution équilibré ou non, doit fonctionner avec un rendement optimal, qu'il faut évaluer par des mesures de puissance.

Mesure de la puissance active dans un système à 4 fils

Un tel montage correspond à un système des récepteurs couplés en « Etoile » avec le point commun O raccordé au neutre du réseau. On dit aussi que ce montage correspond à un *neutre sorti*, appellation vraie uniquement dans le cas d'une alimentation à quatre fils.

Dans le cas de **ystème équilibré** les trois récepteurs sont identiques, mêmes impédances et mêmes déphasages, et il suffit de mesurer la puissance consommée dans une seule phase $P_1 = U_{1N} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$ (fig. TP10 - 4).

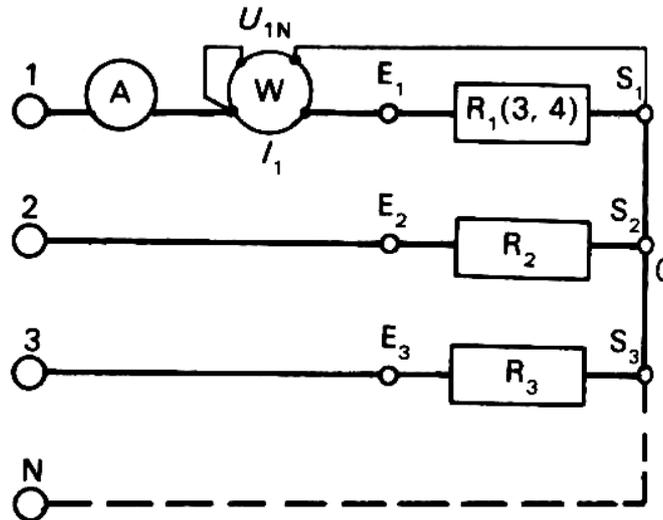


Fig. TP10 - 4

La puissance totale du récepteur triphasé vaut $P = 3 \cdot (U_{1N} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1)$, puisque $U_{1N} = U_{2N} = U_{3N} = V$ et $I_1 = I_2 = I_3 = I$. Il n'y a pas de courant dans le fil neutre.

Dans un **ystème non équilibré** chaque récepteur est alimenté sous la même tension grâce au fils neutre, mais pour les courants on a :

$$\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 = \vec{I}_n \neq 0$$

La puissance absorbée par l'ensemble vaut :

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

Il faut donc monter trois wattmètres monophasés pour mesurer la puissance totale (fig. TP10 - 5).

Comme dans toute utilisation du wattmètre, on place systématiquement un ampèremètre, précédant le wattmètre. En mesurant l'intensité on peut déterminer le

facteur de puissance propre à chaque récepteur
($\cos \varphi_2 = \dots$ etc.).

$$(\cos \varphi_1 = P_1 / V_1 \cdot I_1 ,$$

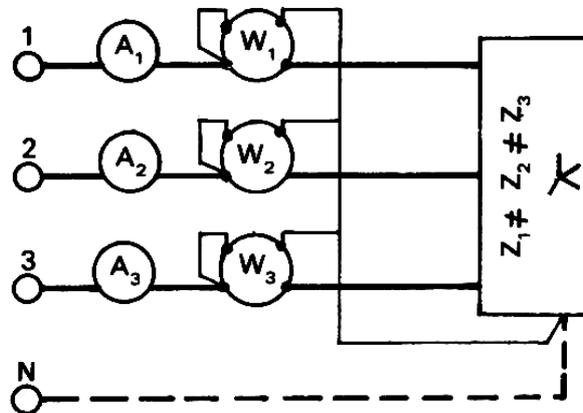


Fig. TP 10 - 5

Remarque : Une puissance active totale est toujours positive. Si dans les montages une déviation devient négative, il faut permuter les deux fils du circuits de tension. Il faut prendre en considération le repérage des bornes d'entrée.

Mesure de la puissance active dans un système à 3 fils

Les récepteurs peuvent être couplés en « Etoile » ou en « Triangle ». Dans le dernier cas le point commun (O) du montage est inaccessible et toutes les mesures doivent être effectuées au niveau de la ligne.

Dans un **système équilibré** (trois récepteurs identiques) on peut utiliser deux méthodes de mesure :

- *Méthode du neutre artificiel*

On utilise trois wattmètres identiques (fig. TP10 - 6) qui possèdent pour le même calibre en tension des résistances internes identiques.

En conséquence, la liaison côté sorties des circuits de tension des wattmètres forment un point neutre, appelé *neutre artificiel*. Ce point neutre N' jouit de mêmes propriétés qu'un point neutre réel (celui du réseau ou du couplage « Etoile ») ou qu'un point neutre fictif (celui du couplage « Triangle »).

$$P_1 = U_{1N} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi ; P_2 = U_{2N} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi ; P_3 = U_{3N} \cdot I_3 \cdot \cos \varphi$$

La puissance active totale est égale:

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

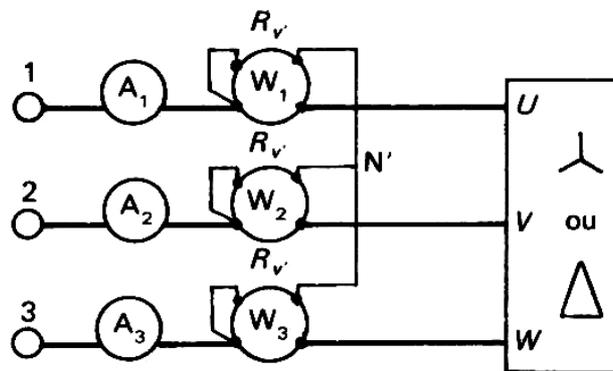


Fig. TP10 - 6

- *Méthode des deux wattmètres*

Dans ce montage on utilise le même principe que dans le précédent : on raccorde le point neutre artificiel N' au potentiel du fil de ligne 3. En conséquence, le wattmètre W₃ n'indique plus rien et il peut être supprimé (fig. TP10 - 7).

Le wattmètre W₁ a son circuit d'intensité parcouru par le courant de ligne I₁ et son circuit de tension soumis à la tension composée U₁₃, d'où :

$$P_1 = U_{13} \cdot I_1 \cdot \cos (\overline{U_{13}}, \overline{I_1})$$

Le wattmètre W₂ indique:

$$P_2 = U_{23} \cdot I_2 \cdot \cos (\overline{U_{23}}, \overline{I_2})$$

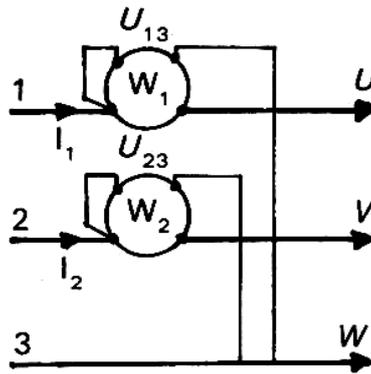


Fig. TP10 - 7

Justification du montage : La puissance instantanée mise en jeu dans les couplage est :

$$\text{En « Etoile » : } P = P_1 + P_2 + P_3 = v_1 \cdot i_1 + v_2 \cdot i_2 + v_3 \cdot i_3$$

$$\text{En « Triangle » : } P = P_1 + P_2 + P_3 = u_{12} \cdot j_3 + u_{23} \cdot j_1 + u_{31} \cdot j_2$$

On démontre dans les deux cas que :

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = u_{13} \cdot i_1 + u_{23} \cdot i_2$$

Donc les puissances moyennes actives indiquées par les deux wattmètres donnent en valeurs algébriques la puissance totale du montage :

$$P = P_1 \pm P_2 = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi$$

Que mesurent en réalité les deux wattmètres? Le diagramme vectoriel d'un montage « Etoile » (fig. TP10 – 8) montre que :

$$W_1 \text{ mesure } P_1 = U_{13} \cdot I_1 \cdot \cos (\pi/6 - \varphi)$$

$$W_2 \text{ mesure } P_2 = U_{23} \cdot I_2 \cdot \cos (\pi/6 + \varphi)$$

La distribution étant équilibrée $U_{13} = U_{23} = U$ et $I_1 = I_2 = I_3 = I$, d'où :

$$P_1 + P_2 = U \cdot I \cdot [\cos (\pi/6 - \varphi) + \cos (\pi/6 + \varphi)] = U \cdot I \cdot 2 \cdot \cos \pi/6 \cdot \cos \varphi$$

et $\cos \pi/6 = \sqrt{3} / 2$, donc :

$$P = P_1 + P_2 = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi$$

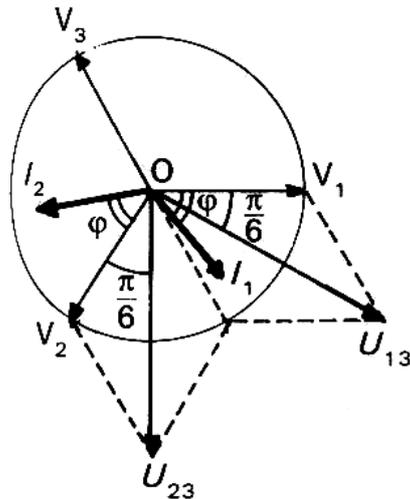


Fig. TP10 - 8

Les récepteurs peuvent être inductifs (φ positif) et capacitifs (φ négatif). L'évolution du déphasage, de $-\pi/2$ à $+\pi/2$, entraîne un changement du signe pour les indications des wattmètres W_1 et W_2 .

Pour les **récepteurs déséquilibrés** est utilisée la méthode des deux wattmètres.

Pour les montages du TP peuvent être utilisés les circuits primaires et secondaires des transformateurs mono et triphasés, des bobines, des condensateurs et des résistances.

TP11 – Description des caractéristiques des transformateurs

11.1. Objet du TP :

Apprendre aux stagiaires à identifier la structure élémentaire et les caractéristiques d'un transformateur monophasé.

11.2. Durée :

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

11.3. Equipement :

- Transformateur monophasé de faible puissance ;
- Transformateur triphasé de faible puissance
- Autotransformateur
- Conducteurs
- Alimentation 220 V / 380 V

11.4. Description du TP :

Le travail pratique doit être effectué par groupe de deux stagiaires. Chaque stagiaire doit avoir à sa disposition un transformateur monophasé, sur lequel il identifiera les composants. A la fin chaque stagiaire doit effectuer les calculs exigés par le TP.

11.5. Déroulement du TP

A. Transformateur monophasé

Identifier la structure élémentaire du transformateur

- **Le circuit magnétique :**
 - La forme du circuit magnétique.
 - Le matériel du circuit magnétique.
- **Les enroulements :**
 - Enroulement de basse tension ;
 - Enroulement de haute tension ;
 - Différencier les deux enroulements d'après le diamètre du fil utiliser pour leur réalisation ;
 - Différencier les deux enroulements d'après le nombre de spires de chaque enroulement ;
 - Pour le transformateur à circuit magnétique de forme cuirassé, différencier les deux enroulements d'après leur disposition sur la colonne centrale.
- **Les bornes:**
 - Repérer les bornes de l'enroulement basse tension et leur marquage s'il y en a.
 - Repérage des bornes de l'enroulement haute tension et leur marquage s'il y en a.
 - Repérage des marques de polarité pour chaque enroulement.

Exercice

Les deux enroulement d'un transformateur monophasé compte $N_1=1696$ spires et $N_2 = 424$ spires.

- Calculer le rapport de transformation du transformateur.
- Calculer la tension aux bornes du secondaire lorsqu'il est utilisé comme abaisseur de tension et il est alimenté sous la tension du secteur (tension primaire 220 V).
- Calculer la tension aux bornes du secondaire lorsqu'il est utilisé comme éleveur de tension et il est alimenté sous la tension du secteur (tension primaire 220 V).
- Calculer le courant absorbé du réseau, si le courant dans un récepteur branché dans le secondaire et $I_2 = 2,5$ A, pour les deux cas : transformateur abaisseur et transformateur éleveur.

B. Transformateur triphasé

Différencier un transformateur triphasé d'un transformateur monophasé par :

- La forme du circuit magnétique.
- Le nombre des bobines qui réalisent chaque enroulement.
- Le nombre des bornes.

TP12 – Définition selon les normes NF C 15-100 et CE 479-1/2

12.1. Objectif visé

Sensibiliser les stagiaires à connaître et à utiliser les normes concernant les installations électriques de BT (dans la partie de protection des personnes et des biens).

12.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 1 heure.

12.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Documents de normalisation et supports pédagogiques

12.4. Description du TP

Définir les notions selon les normes NF C 15-100 et CE 479-1/2

- Fixer le potentiel des conducteurs actifs par rapport à la terre en fonctionnement normal ;
- Limiter la tension entre les masses des matériels électriques et la terre en cas de défaut d'isolement ;
- Mettre en œuvre des dispositifs de protection qui suppriment le risque d'électrisation, voire d'électrocution des personnes; limiter les montées en potentiel dues aux défauts d'origine MT.

12.5. Déroulement du TP

- Nommer les effets du courant passant par le corps humain;
- Commenter les trois courbes de sécurité (fig. TP12-1);
- Définir les notions de : contact direct, de contact indirect, tension de contact (fig. TP12-2);

Distribution basse tension : protections des
personnes

■ Protection contre les contacts indirects

La norme NF C 15 - 100 présente une classification très détaillée des différents locaux en fonction de nombreux paramètres, prenant en compte des conditions d'environnement et d'utilisations.

Selon le type de local, elle définit trois tensions de sécurité, (12, 25, 50 V) ces tensions dites non dangereuses écoulent dans le corps humain un courant inférieur à 25 mA. Le danger du courant électrique étant fonction de la durée de sa durée de passage, il a été établi trois courbes de sécurité.

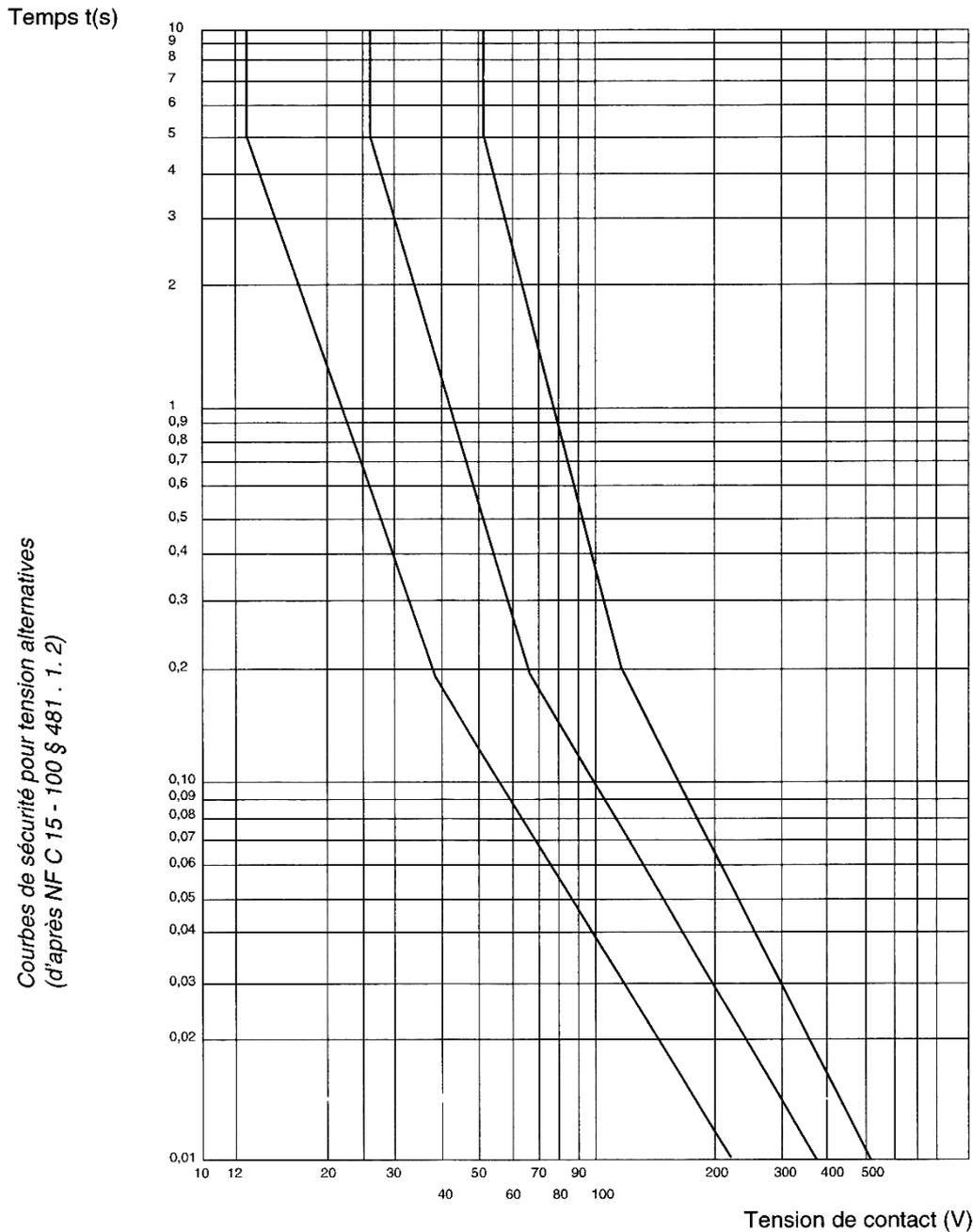
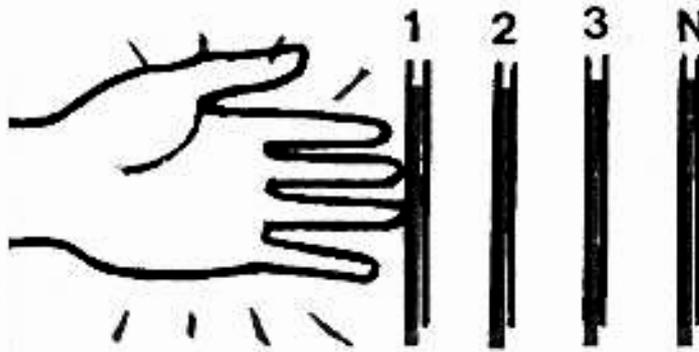
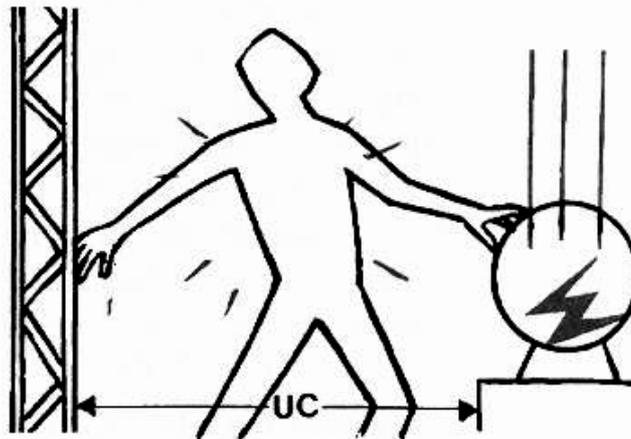


Fig. TP12-1

- Définir et dessiner les schémas de liaison à la terre (SLT).



a)



b)

Fig. TP12-2

TP 13 – Organisation du circuit de terre

13.1. Objectif visé

Apprendre aux stagiaires l'organisation d'un circuit de terre complet.

13.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

13.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Documents et supports pédagogiques

13.4. Description du TP

Commenter et indiquer les différentes parties d'un circuit de mise à la terre.

13.5. Déroulement du TP

- Indiquer, expliquer et commenter les différentes parties d'un circuit de mise à la terre ;
- Noter les caractéristiques des éléments ;
- Compléter le schéma sur la fig. TP13-1.

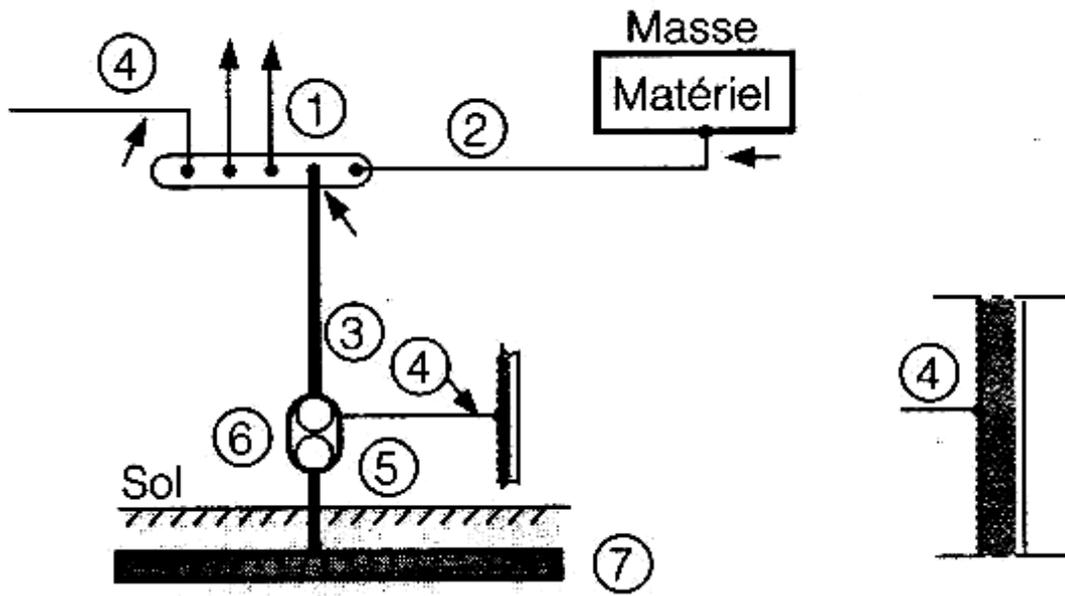


Fig. TP13-1

TP14 – Liaisons équipotentielles

14.1. Objet du TP :

Etudes des différents types de liaisons équipotentielles.

14.2. Durée :

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

14.3. Equipement :

- documentations
- schémas

14.4. Description du TP :

Sur un schéma donné reconnaître les différentes parties d'un système de liaisons équipotentielles.

14.5. Déroulement du TP :

A. Maison privée

Sur la fig. TP14-1 sont présentées les liaisons équipotentielles normalisées d'une maison privée – type. Demander aux stagiaires d'explorer les installations et les canalisations dans leurs maisons respectives (familiale ou résidence) pour élaborer un système de liaisons équipotentielles en s'inspirant de la norme.

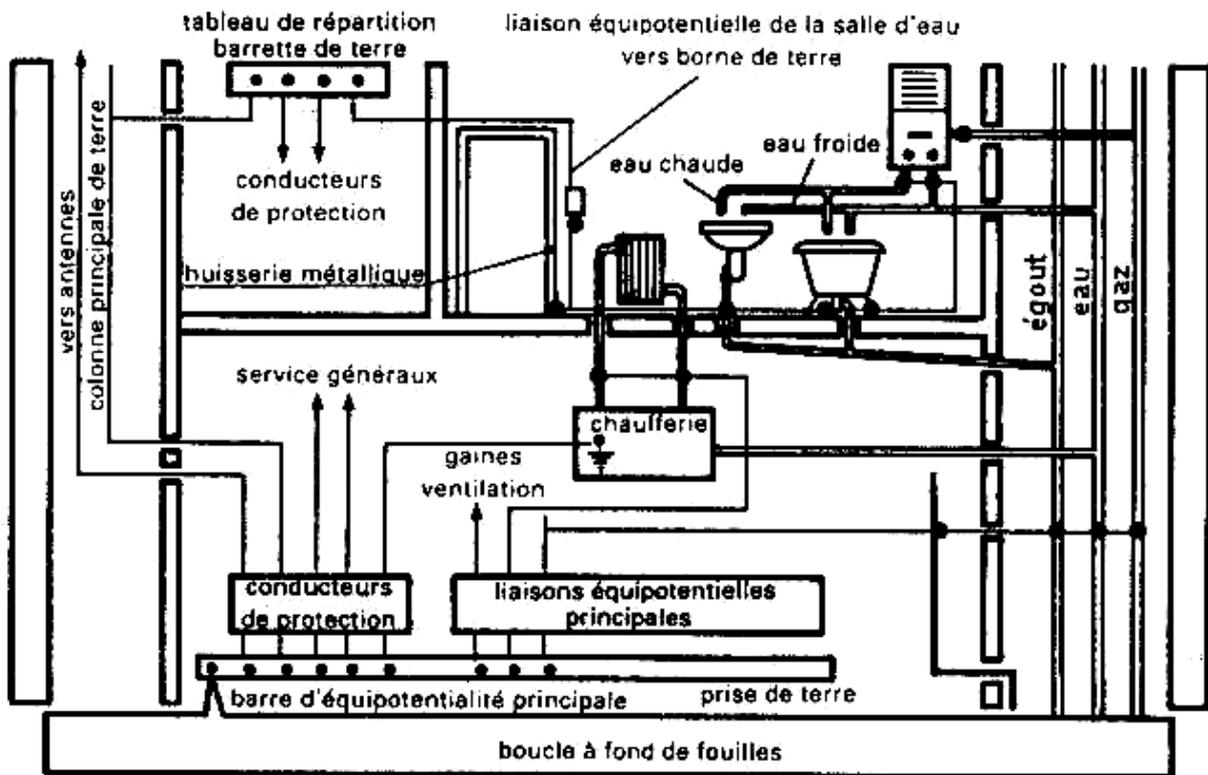


Fig. TP14-1

B. Borne principale de terre

Effectuer une étude d'une borne principale de terre (fig. TP14-2) (selon la disponibilité dans l'établissement).

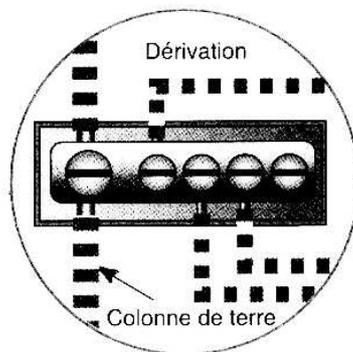


Fig. TP14-2

C. Entreprise industrielle

Sur la fig. TP14-3 sont présentées les liaisons équipotentielles normalisées d'une entreprise. Demander aux stagiaires d'explorer les installations et les canalisations dans l'établissement de formation professionnelle pour élaborer un système de liaisons équipotentielles en s'inspirant de la norme.

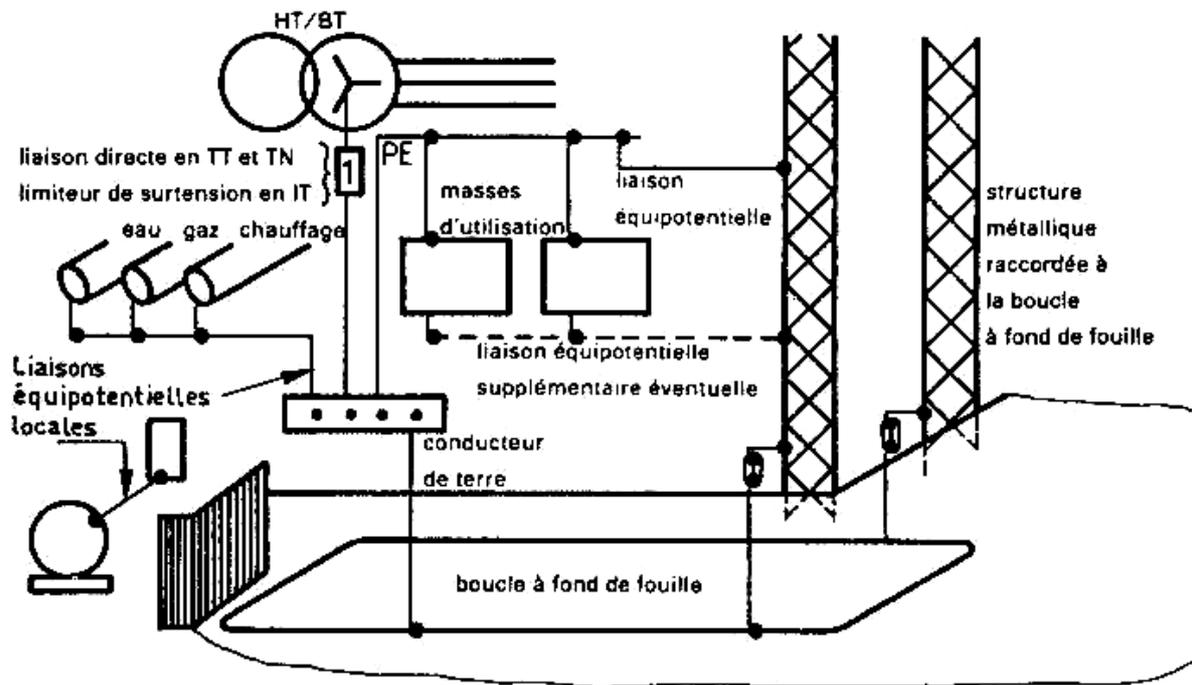


Fig. TP14-3

TP15 – Mode de réalisation d'une prise de terre

15.1. Objectif visé

Réaliser par les stagiaires des différents types de prise de terre.

15.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 8 heures.

15.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Outils de travail
- Eléments des prises de terre : piquets, conducteurs, bornes de prise de terre, etc.
- Matériaux de construction : sable, ciment, eau, etc.

15.4. Description du TP

Effectuer les travaux de réalisation des différents types de prises de terre. Selon les conditions dans l'établissement le résultat peut être sous forme de maquette en échelle.

15.5. Déroulement du TP

A. Boucle à fonds de fouille

Le TP peut être effectué en collaboration avec un entrepreneur qui dirige les travaux de construction d'un immeuble ou d'une maison familiale où est prévue la réalisation d'une prise de terre du type « Boucle à fond de fouille » (fig. TP15-1). Dans ce cas les stagiaires peuvent profiter des connaissances des techniciens et des ouvriers sur le chantier.

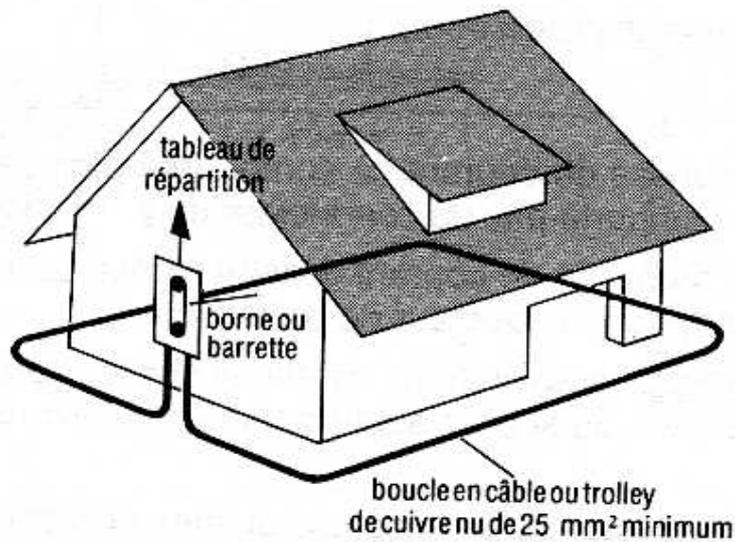


Fig. TP15-1

B. Conducteurs enfouis dans des tranchées

Le TP peut être effectué en collaboration avec un entrepreneur qui dirige les travaux de reconstruction d'un immeuble ou d'une maison familiale où est prévue la réalisation d'une prise de terre du type « Conducteur enfoui dans une tranchée » (fig. TP15-2).

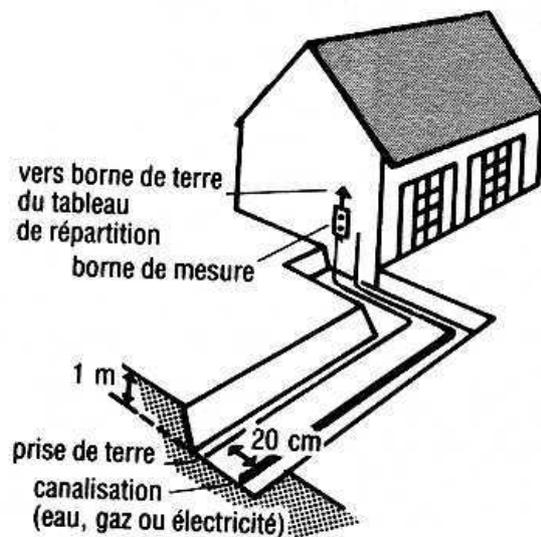


Fig. TP15-2

C. Un ou plusieurs piquets

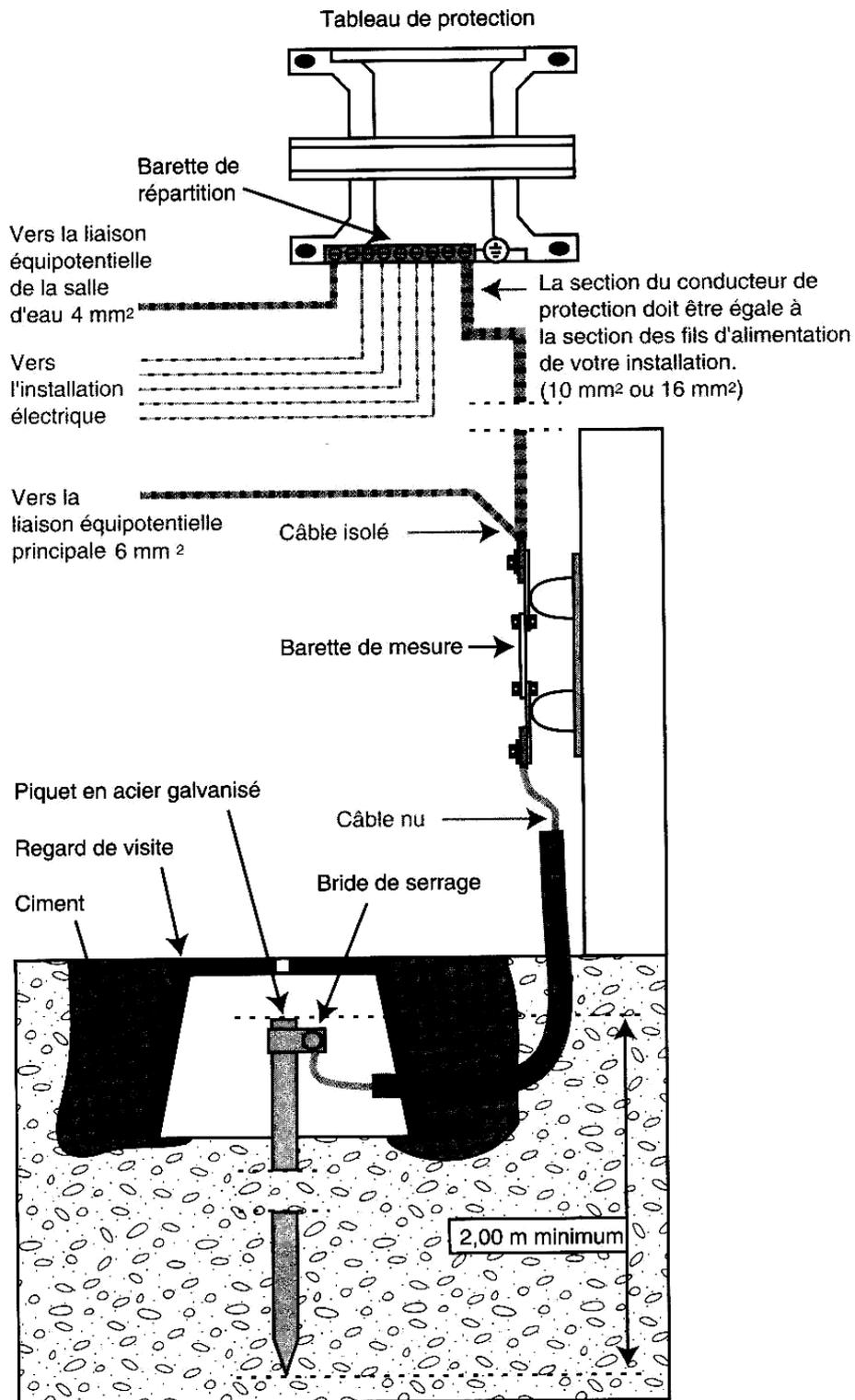


Fig. TP15-3

Le TP peut être effectué dans l'établissement, lui-même, pour améliorer sa propre prise de terre ou pour un autre établissement dans les cadres de l'O.F.P.P.T. comme une réalisation d'une prise de terre inexistante.

A la fin de chaque travail les stagiaires doivent effectuer une vérification nécessaire pour s'assurer :

- que l'isolement est bon, les protections sont efficaces ;
- que les règles et les prescriptions sont respectées ;
- que les travaux sont correctement exécutés.

Ensuite, les vérifications périodiques doivent être faites sous la responsabilité de l'utilisateur :

- de la valeur des isollements ;
- de l'état des matériels et des connexions ;
- de la continuité de l'efficacité des protections et du respect de la réglementation.

Les vérifications doivent être effectuées après chaque extension ou modification, puis tous les 1, 3 ou 10 ans suivant la rigueur des influences externes.

***Module 3 : ANALYSE DE CIRCUITS A
COURANT ALTERNATIF***

EVALUATION DE FIN DE MODULE

O.F.P.P.T.
EFP

MODULE 3 : ANALYSE DE CIRCUITS A COURANT ALTERNATIF

FICHE DE TRAVAIL

Stagiaire : _____ Code : _____
Formateur : _____

Durée : 4 heures

(Exemple)

1. Tracer le diagramme de Fresnel (tension, intensité) d'un dipôle d'impédance $Z = 14 \Omega$ alimenté sous tension $u(t) = 99 \sin(\omega t + \pi/4)$ qui introduit un déphasage $\Phi_{u/i} = 60^\circ$. Ecrire l'équation de l'intensité $i(t)$.

.../6

2. L'association parallèle de deux dipôles (L, R_L) et (C, R_C) est alimentée par une installation de tension efficace $U = 50 \text{ V}$. Donner les caractéristiques (valeur efficace et phase d'origine) des courants i_1, i_2 et i , si $R_L = 100 \Omega$; $L\omega = 100 \Omega$.

.../7

3. Un récepteur triphasé équilibré formé de trois bobines identiques (réactance $L\omega = 70 \Omega$, résistance série $R_s = 70 \Omega$) est couplé en triangle à une installation triphasé équilibrée 127 / 220 V.

- d) Dessiner le schéma de mesure de la puissance par la méthode des deux wattmètres et déterminer les indications des deux appareils.
- e) Que deviennent ces indications si l'on place un élément de résistance $R = 100 \Omega$ entre les bornes (1) et (2) et entre les bornes (2) et (3) du récepteur ?

.../7

Liste des références bibliographiques

Ouvrage	Auteur	Edition
Mesures et essais d'électricité	Dupart B. Le Gall A. Prêt R. Floc'h J.	Dunod, 1997
Lois générales de l'Electricité	F. Lucas P. Charruault	Delagrave, 1987
Les Installations électriques	Frayssé R. Deprez A.M.	Edition Casteilla, 1985
MEMOTECH – Equipements et installations électriques	René Bourgeois Denis Cogniel Bernard Lehalle	Edition Casteilla, 2002
Technologie d'Electricité	Henri NEY	Nathan, 1996
Technologie d'Electricité	R. Pustelnik, B. Deriquehem	Dunod, 1989
Module 8 : Analyse de circuits a courant alternatif	KISSIOVA-TABAKOVA Raynitchka	OFPPT / DRIF / CDC GM 2006