

16 Alternateur

ÉLECTROTECHNIQUE

1 Organisation générale

Un alternateur comporte deux parties essentielles (fig. 16.01) :

- l'inducteur,
- l'induit.

■ INDUCTEUR

Le plus souvent, l'inducteur est le **rotor** de l'alternateur. Il est aussi appelé **roue polaire**.

Ses enroulements, alimentés en courant continu, par l'intermédiaire de bagues et de balais réalisent un électro-aimant à plusieurs pôles, alternativement nord et sud.

Le flux créé est constant ce qui n'impose pas de feuilletter le circuit magnétique.

■ INDUIT

L'induit est disposé sur le **stator**.

Il est formé d'un anneau fixe portant dans des encoches les enroulements induits.

Dans ces enroulements prend naissance la f.e.m. induite.

L'induit est soumis au flux tournant du rotor.

Il est le siège de courants de Foucault et de phénomènes d'hystérésis. Il est constitué de tôles feuilletées.

2 Force électromotrice induite

Le flux tournant de l'inducteur crée dans les enroulements du stator une f.e.m. d'induction alternative sinusoïdale (fig. 16.02).

La valeur efficace E de la f.e.m. est proportionnelle :

- à la fréquence n de rotation du rotor,
- au nombre p de paires de pôles du rotor,
- au flux maximal Φ embrassé par une spire,
- au nombre N de conducteurs de l'enroulement du stator.

$$E = KpNn\Phi$$

E en volts,
 n en tours par seconde,
 Φ en webers.

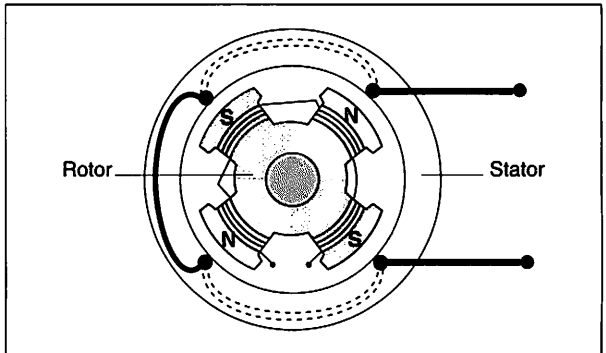


Fig. 16.01 : Alternateur monophasé à quatre pôles.

Remarque :

Il existe deux types de rotor :

- les rotors à pôles lisses pour une fréquence de rotation élevée (> 1000 tr/min),
- les rotors à pôles saillants.

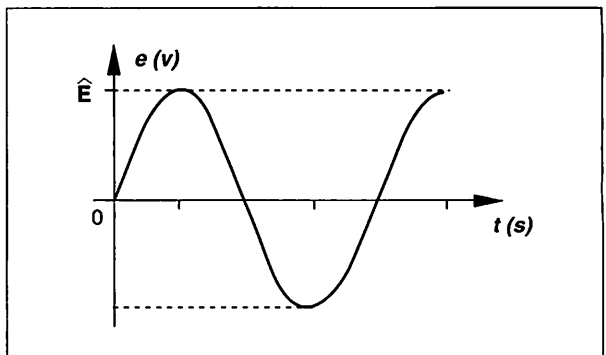


Fig. 16.02 : Force électromotrice induite.

Remarque :

Le coefficient K , appelé **coefficient de Kapp** dépend des caractéristiques constructives de la machine. Il varie de 1,9 à 2,6.

ESSENTIEL À RETENIR

ALTERNATEUR

FORCE ÉLECTROMOTRICE

$$E' = K\rho Nn\Phi \qquad f = pn$$

E' f.e.m. (V),
 K coefficient de Kapp,
 n fréquence de rotation (tr/s),
 Φ flux inducteur (Wb),
 N nombre de conducteurs actifs.
 ρ nombre de paires de pôles

RENDEMENT

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + \text{pertes}}$$

P_u puissance utile (W),
 P_a puissance absorbée (W).

TEST RAPIDE

T.1 Un alternateur tétrapolaire tourne à 1 500 tr/min. Calculer la fréquence de la tension produite.

Réponse : 25 Hz; 50 Hz; 100 Hz.

T.2 Un alternateur produit une f.e.m. de fréquence $f = 50$ Hz en tournant à 1 000 tr/min.

Déterminer son nombre de pôles.

Réponse : 2; 3; 6.

T.3 Un alternateur à 6 paires de pôles fournit une tension de fréquence $f = 100$ Hz.

Calculer sa fréquence de rotation.

Réponse : 1 000 tr/min; 1 500 tr/min; 3 000 tr/min.

T.4 Un alternateur hexapolaire tourne à 1 000 tr/min. L'induit comporte 90 conducteurs. Le flux sous un pôle est de 25 mWb et son coefficient Kapp de 2,15. Calculer sa f.e.m.

Réponse : 112 V; 242 V; 380 V.

T.5 Un alternateur fonctionne à la fréquence de 50 Hz. Le flux sous un pôle est $\Phi = 0,1$ Wb. Il comporte 100 conducteurs et son coefficient de Kapp est 2. Calculer sa f.e.m.

Réponse : 100 V; 250 V; 500 V; 1 000 V.

T.6 Un alternateur triphasé étoile a une tension entre phases de 380 V. Il débite un courant de 20 A avec un facteur de puissance de 0,8. Calculer la puissance fournie.

Réponse : 7 600 W; 10 530 W; 13 160 W.

16 Alternateur

ÉLECTROTECHNIQUE

1 Organisation générale

Un alternateur comporte deux parties essentielles (fig. 16.01) :

- l'inducteur,
- l'induit.

■ INDUCTEUR

Le plus souvent, l'inducteur est le **rotor** de l'alternateur. Il est aussi appelé **roue polaire**.

Ses enroulements, alimentés en courant continu, par l'intermédiaire de bagues et de balais réalisent un électro-aimant à plusieurs pôles, alternativement nord et sud.

Le flux créé est constant ce qui n'impose pas de feuilletter le circuit magnétique.

■ INDUIT

L'induit est disposé sur le **stator**.

Il est formé d'un anneau fixe portant dans des encoches les enroulements induits.

Dans ces enroulements prend naissance la f.e.m. induite.

L'induit est soumis au flux tournant du rotor.

Il est le siège de courants de Foucault et de phénomènes d'hystérésis. Il est constitué de tôles feuilletées.

2 Force électromotrice induite

Le flux tournant de l'inducteur crée dans les enroulements du stator une f.e.m. d'induction alternative sinusoïdale (fig. 16.02).

La valeur efficace E de la f.e.m. est proportionnelle :

- à la fréquence n de rotation du rotor,
- au nombre p de paires de pôles du rotor,
- au flux maximal Φ embrassé par une spire,
- au nombre N de conducteurs de l'enroulement du stator.

$$E = KpNn\Phi$$

E en volts,
 n en tours par seconde,
 Φ en webers.

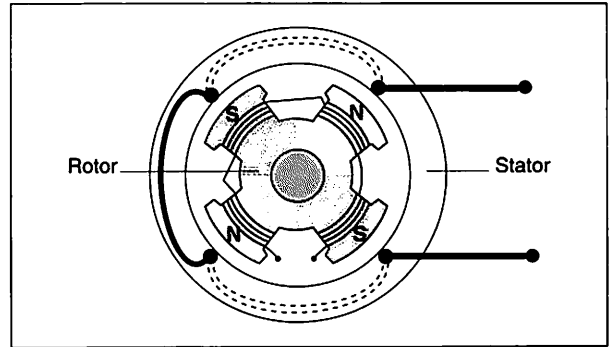


Fig. 16.01 : Alternateur monophasé à quatre pôles.

Remarque :

Il existe deux types de rotor :

- les rotors à pôles lisses pour une fréquence de rotation élevée (> 1000 tr/min),
- les rotors à pôles saillants.

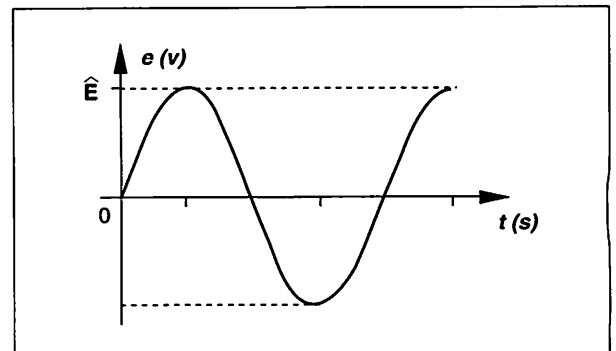


Fig. 16.02 : Force électromotrice induite.

Remarque :

Le coefficient K , appelé **coefficient de Kapp** dépend des caractéristiques constructives de la machine. Il varie de 1,9 à 2,6.

Le rotor de l'alternateur comportant un nombre p de paires de pôles, la fréquence de la f.e.m. induite est proportionnelle à la fréquence de rotation n .

$$f = p \cdot n$$

f en hertz,
 n en tours par seconde.
 p nombre de paires de pôles.

Ainsi, pour obtenir la fréquence de 50 Hz utilisée dans la plupart des réseaux de distribution européens, un alternateur de production doit être entraîné, à la fréquence de rotation de :

- 3 000 tr/min s'il est bipolaire ($p = 1$),
 - 1 500 tr/min s'il est tétrapolaire ($p = 2$),
 - 1 000 tr/min s'il est hexapolaire ($p = 3$),
- et ainsi de suite...

Exemple :

Un alternateur monophasé hexapolaire est entraîné à une fréquence de rotation de 1000 tr/min. Le flux utile par pôle est de 25 mWb.

L'enroulement induit comporte 72 conducteurs actifs en série. Le coefficient de Kapp est $K = 2,22$.

La fréquence de la tension fournie par l'alternateur est :

$$f = pn = 3 \times \frac{1000}{60} = 50 \text{ Hz.}$$

La f.e.m. a pour valeur efficace :

$$E = KpNn\Phi = KNf\Phi$$

soit : $E = 200 \text{ V.}$

3 Chute de tension en charge

Lorsqu'un alternateur débite un courant dans un circuit extérieur, il est, comme tout générateur, le siège d'une chute de tension interne ΔU due :

- à la résistance des conducteurs d'induit,
- à l'inductance L , définie à partir du flux traversant les enroulements de l'induit.

Le modèle équivalent d'un enroulement est donné à la figure 16.03. La réactance $X = L\omega$ est appelée **réactance synchrone**.

Les tensions et intensités étant sinusoïdales, la loi d'Ohm pour un générateur s'applique vectoriellement à l'alternateur : $\vec{U} = \vec{E} - \vec{Z} \cdot \vec{i}$.

Le diagramme des tensions correspondant est donné figure 16.04.

La tension disponible aux bornes de l'alternateur chargé par un récepteur inductif est d'autant plus réduite que :

- le courant débité est grand,
- le facteur de puissance de la charge est faible.

Pour une charge capacitive, la réaction magnétique d'induit est telle que la tension augmente lorsque le courant débité augmente.

Les variations de la tension délivrée par l'alternateur en fonction de l'intensité débitée sont données par la **caractéristique externe** (fig. 16.05). La fréquence de rotation et le courant d'excitation sont maintenus constants.

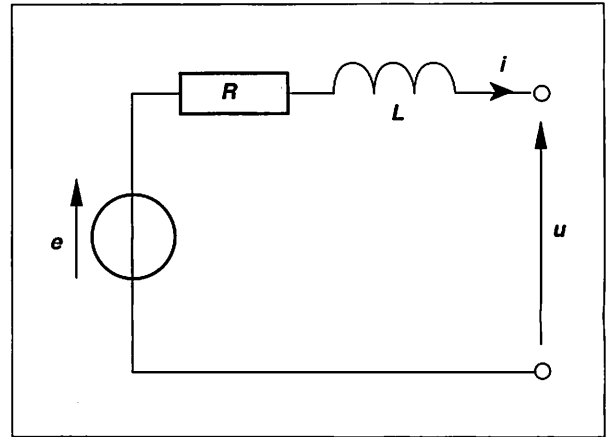


Fig. 16.03 : Modèle équivalent d'un enroulement.

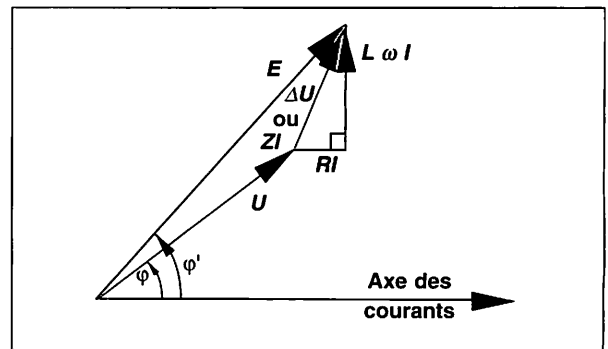


Fig. 16.04 : Diagramme des tensions.

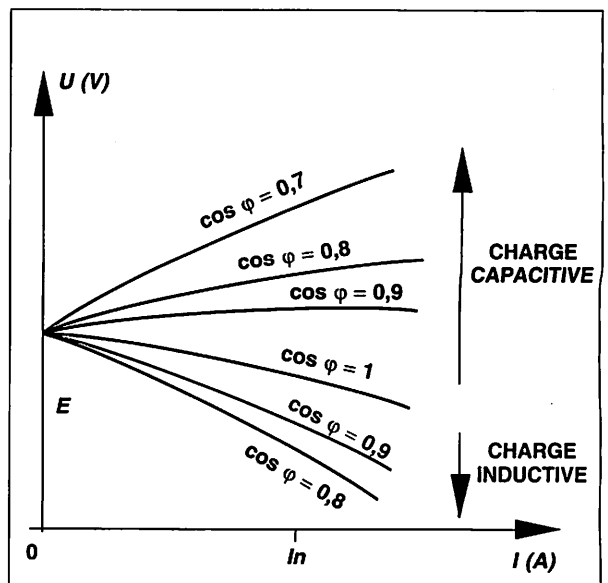


Fig. 16.05 : Caractéristique externe.

4 Pertes et rendement

Le rendement de l'alternateur est le rapport de la puissance utile P_u à la puissance absorbée P_a .

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + \text{pertes}}$$

Les pertes se répartissent en deux catégories :

- les **pertes constantes ou pertes à vide**, constituées par les pertes mécaniques, les pertes fer et les pertes par effet Joule dans le circuit d'excitation,
- les **pertes variables, ou pertes en charge**, constituées par les pertes Joule dans le circuit induit.

Les variations du rendement en fonction de la puissance utile sont représentées figure 16.06. Le rendement diminue avec le facteur de puissance.

Remarque :

Le rendement des alternateurs est élevé. De l'ordre de 85 % pour les alternateurs de quelques kVA, il atteint 98 % pour les alternateurs triphasés de forte puissance.

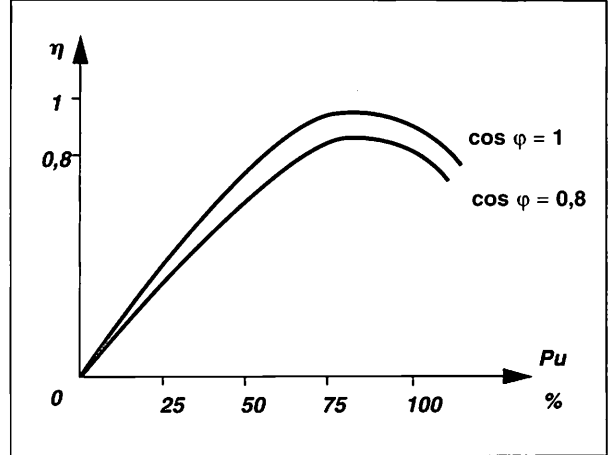


Fig. 16.06 : Courbe $\eta = f(P_u)$.

5 Alternateur triphasé

L'alternateur triphasé est principalement utilisé en production d'énergie.

L'**inducteur** est identique à celui de l'alternateur monophasé.

L'**induit** est constitué de trois enroulements indépendants ayant le même nombre de conducteurs actifs, disposés chacun dans un tiers des encoches de l'induit et décalés entre eux d'un angle électrique de 120° .

Ces enroulements peuvent être couplés soit en **triangle**, soit en **étoile** (fig. 16.07).

À dimensions égales, pour un même courant inducteur, la puissance de l'alternateur triphasé est de 20 à 30 % plus élevée que l'alternateur monophasé.

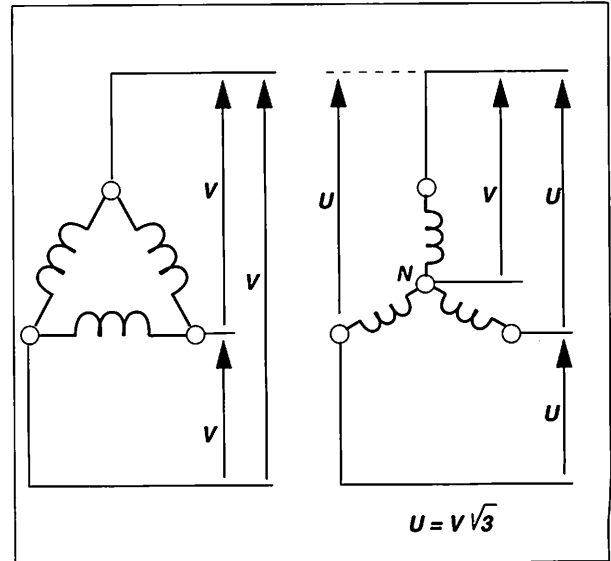


Fig. 16.07 : Couplage d'un alternateur triphasé.

6 Modes d'excitation

L'inducteur est un électro-aimant tournant qui doit être alimenté par une source de courant continu réglable.

La source d'excitation peut être :

- une **génératrice à courant continu** placée en bout d'arbre de l'alternateur,
- un **redresseur tournant** alimenté par un petit alternateur dont l'inducteur à aimant permanent est monté sur l'arbre.

Remarque :

L'alternateur peut être à **auto-excitation**. La tension délivrée par l'alternateur est alors redressée et réinjectée dans le circuit inducteur.

ESSENTIEL À RETENIR

ALTERNATEUR

FORCE ÉLECTROMOTRICE

$$E' = Kp Nn\Phi \qquad f = pn$$

E f.e.m. (V),
 K coefficient de Kapp,
 n fréquence de rotation (tr/s),
 Φ flux inducteur (Wb),
 N nombre de conducteurs actifs.
 p nombre de paires de pôles

RENDEMENT

$$\eta = \frac{P_u}{P_a + \text{pertes}}$$

P_u puissance utile (W),
 P_a puissance absorbée (W).

TEST RAPIDE

T. 1. Un alternateur tétrapolaire tourne à 1 500 tr/min. Calculer la fréquence de la tension produite.

Réponse : 25 Hz; 50 Hz; 100 Hz.

T. 2. Un alternateur produit une f.e.m. de fréquence $f = 50$ Hz en tournant à 1 000 tr/min.

Déterminer son nombre de pôles.

Réponse : 2; 3; 6.

T. 3. Un alternateur à 6 paires de pôles fournit une tension de fréquence $f = 100$ Hz.

Calculer sa fréquence de rotation.

Réponse : 1 000 tr/min; 1 500 tr/min; 3 000 tr/min.

T. 4. Un alternateur hexapolaire tourne à 1 000 tr/min. L'induit comporte 90 conducteurs. Le flux sous un pôle est de 25 mWb et son coefficient Kapp de 2,15. Calculer sa f.e.m.

Réponse : 112 V; 242 V; 380 V.

T. 5. Un alternateur fonctionne à la fréquence de 50 Hz. Le flux sous un pôle est $\Phi = 0,1$ Wb. Il comporte 100 conducteurs et son coefficient de Kapp est 2. Calculer sa f.e.m.

Réponse : 100 V; 250 V; 500 V; 1 000 V.

T. 6. Un alternateur triphasé étoile a une tension entre phases de 380 V. Il débite un courant de 20 A avec un facteur de puissance de 0,8. Calculer la puissance fournie.

Réponse : 7 600 W; 10 530 W; 13 160 W.

ESSAI À VIDE D'UN ALTERNATEUR TRIPHASÉ

■ TRAVAIL À EFFECTUER

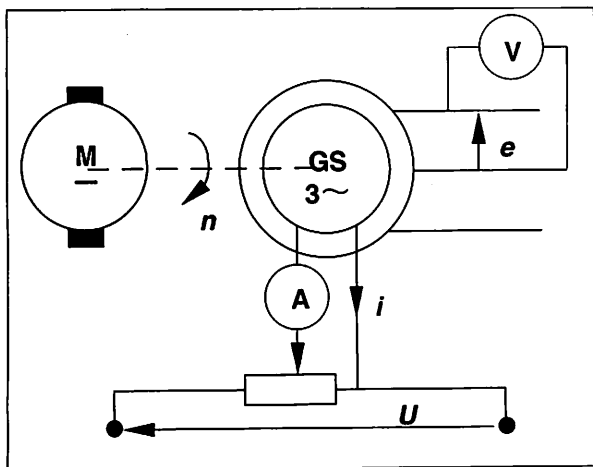
Mesurer la f.e.m. E entre deux phases en faisant varier le courant inducteur i . La fréquence de rotation est maintenue constante.

Tracer la caractéristique à vide : $E = f(i)$.

■ SCHÉMA DU MONTAGE ET EXEMPLE DE RÉSULTATS

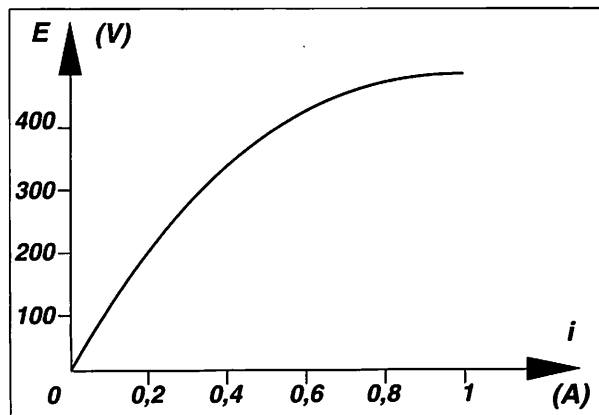
L'alternateur a pour caractéristique :

$U = 380 \text{ V}$; $S = 2 \text{ kVA}$; $N = 1\,500 \text{ tr/min}$.



L'alternateur est entraîné par un moteur courant continu dont la fréquence de rotation est maintenue constante.

L'inducteur est alimenté par un montage potentiométrique.



La courbe obtenue correspond à la magnétisation du circuit inducteur.

La saturation du circuit magnétique se traduit par un coude sur la courbe.

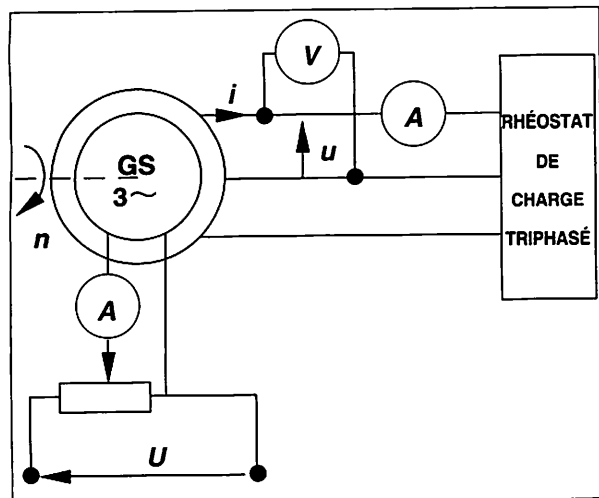
Le point de fonctionnement nominal de la machine doit se trouver juste avant ce coude.

ESSAI EN CHARGE D'UN ALTERNATEUR TRIPHASÉ

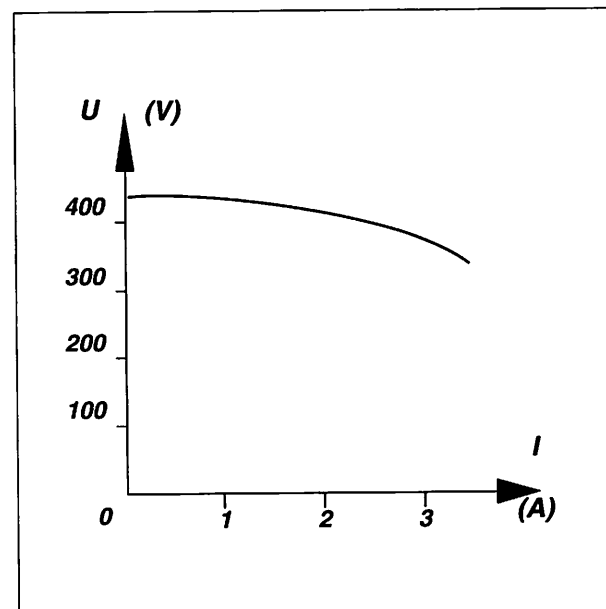
■ TRAVAIL À EFFECTUER

Mesurer la tension entre deux phases en faisant varier le courant dans la charge. Tracer la caractéristique en charge $U = f(I)$.

■ SCHÉMA DU MONTAGE ET EXEMPLE DE RÉSULTATS



La tension en charge diminue lorsque la charge augmente.



APPLICATIONS

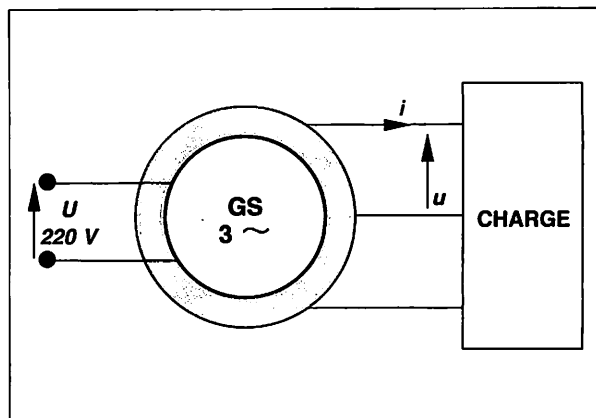
EXERCICE RÉSOLU

Énoncé

L'alternateur triphasé représenté ci-contre débite un courant de 20 A avec une tension entre phases de 220 V et un facteur de puissance de 0,85. L'inducteur présente une résistance de 100 Ω. Il est alimenté par une source de tension continue $U = 220$ V. L'alternateur reçoit une puissance mécanique de 7 600 W.

Calculer :

- la puissance utile fournie au circuit extérieur,
- la puissance absorbée,
- le rendement.



Méthode :

- Utiliser la formule :

$$P_u = UI\sqrt{3} \cos \varphi.$$

- Faire la somme de la puissance mécanique et de la puissance absorbée par l'inducteur.

- Effectuer le rapport de la puissance utile à la puissance absorbée.

Solution proposée :

- La puissance utile est égale à :

$$P_u = UI\sqrt{3} \cos \varphi = 220 \times 20 \times \sqrt{3} \times 0,85$$

$$\text{soit } P_u = 6\,478 \text{ W.}$$

- L'inducteur absorbe une puissance de :

$$P_{\text{inducteur}} = \frac{U^2}{R} = 484 \text{ W.}$$

La puissance totale absorbée est égale à :

$$P_a = P_{\text{meca}} + P_{\text{inducteur}} = 8\,084 \text{ W.}$$

- Le rendement est égal à :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{6\,478}{8\,084} \text{ soit } \eta = 80 \text{ \%.}$$

Remarques :

La puissance utile est une puissance électrique en triphasé.

L'inducteur se comporte comme une résistance pure.

EXERCICES À RÉSOUDRE

E. 1 Une machine synchrone bipolaire de 5 kVA, 230 V/400 V est reliée au réseau triphasé, 230 V/400 V, 50 Hz.

- Donner le couplage du stator.
- Calculer la valeur du courant nominal.
- Déterminer la fréquence de synchronisme.

E. 2 Un alternateur triphasé porte les indications suivantes : couplage triangle :

$$230 \text{ V} - 5 \text{ A}; N = 1\,500 \text{ tr/min}; f = 50 \text{ Hz.}$$

Calculer :

- sa puissance apparente nominale,
- son nombre de pôles.

E. 3 Un alternateur de voiture est couplé en triangle. En charge sur une résistance pure, il débite 10 A en ligne pour une tension de 14 V entre deux bornes de l'induit.

La résistance d'un enroulement de l'induit est 0,1 Ω, celle de l'inducteur, 5 Ω. Le courant d'excitation est de 2 A.

Calculer :

- la puissance utile,
- la puissance absorbée par l'inducteur,
- les pertes Joule dans l'induit,
- le rendement en négligeant les pertes autres que par effet Joule.

MESURES SUR DES APPLICATIONS PROFESSIONNELLES

MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ VARIATEUR DE VITESSE

■ CONTEXTE TECHNIQUE

L'évolution des conditions d'exploitation d'un tapis transporteur élévateur, piloté par un moteur asynchrone triphasé à cage, a nécessité l'installation d'un variateur de vitesse électronique.

On dispose d'un moteur asynchrone de caractéristiques identiques.

Il est accouplé à un dispositif de charge. Un variateur permet sa commande en vitesse.

Afin d'établir un dossier de maintenance de l'ensemble moto-variateur, il est demandé d'effectuer les mesures nécessaires.

■ TRAVAIL DEMANDÉ

1. Préparation de l'essai

Relever les caractéristiques du moteur sur sa plaque signalétique.

Prévoir le couplage des enroulements en fonction du réseau disponible.

Calculer le couple nominal du moteur.

2. Schéma du montage

Le schéma devra comporter les appareils permettant de mesurer :

a. sur le variateur :

- la tension d'entrée U_E ,
- la tension de sortie U_S ,
- la puissance absorbée au réseau;

b. sur le moteur :

- la fréquence de rotation.

3. Essai en charge

Le couple est maintenu constant à $T_{N/2}$.

Relever la tension d'alimentation du moteur et la fréquence de rotation pour les fréquences d'alimentation suivantes : 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 Hz.

Mesurer la puissance absorbée au réseau à la fréquence de rotation nominale.

4. Exploitation des relevés

Tracer la caractéristique U_S en fonction de la fréquence d'alimentation f .

Calculer le rapport $\frac{U_S}{f}$.

Pour la vitesse nominale du moteur, déterminer la puissance utile du moteur et le rendement de l'ensemble.

Exemple de résultats

1. Préparation de l'essai

1.1. Caractéristiques du moteur utilisé :

Tensions : 230 V/400 V

Intensités : 5,4 A/3,1 A

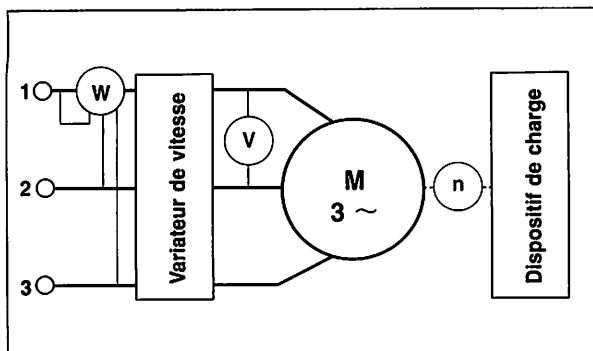
$P_u = 1,5$ kW

$N = 1\,460$ tr/min

1.2. Sur le réseau 230 V/400 V, le moteur est couplé en étoile.

1.3. $T_u = \frac{P_u}{\Omega}$ avec $\Omega = \frac{2\pi N}{60}$ soit $T_u = 9,8$ Nm.

2. Schéma du montage

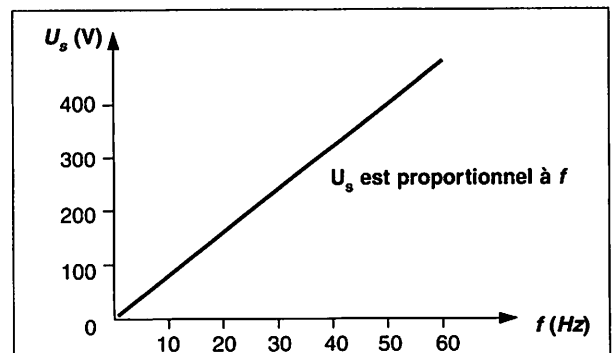


La mesure de tension U_S s'effectue avec un voltmètre à valeur efficace vraie (TRMS).

Les mesures de puissance, tension et intensité d'entrée sont effectuées à la pince multifonction.

Le couple, fixé à $T_{N/2} = 5$ Nm est contrôlé par un mesureur de couple associé à la charge.

4. Exploitation des relevés



$N = 1\,460$ tr/min, $T_u = \frac{T_N}{2}$ soit $P_u = 750$ W

$P_a = 1\,050$ W d'où le rendement $\eta = 0,71$

MESURES SUR DES APPLICATIONS PROFESSIONNELLES

MOTEUR À COURANT CONTINU RENDEMENT ET RÉGLAGE DE VITESSE

■ CONTEXTE TECHNIQUE

Dans une chocolaterie, le brassage de la pâte est effectué, dans des cuves chauffées, par des bras agitateurs. Ces bras sont entraînés par un moteur à courant continu. La rénovation de l'installation a conduit à remplacer le rhéostat de démarrage et la régulation de vitesse par un convertisseur alternatif/continu variable.

Afin de vérifier le bon fonctionnement du groupe moteur-variateur et notamment celui du moteur qui n'a pas été changé, il est demandé de procéder à un certain nombre de relevés et d'essais.

■ TRAVAIL DEMANDÉ

1. Observation du moteur

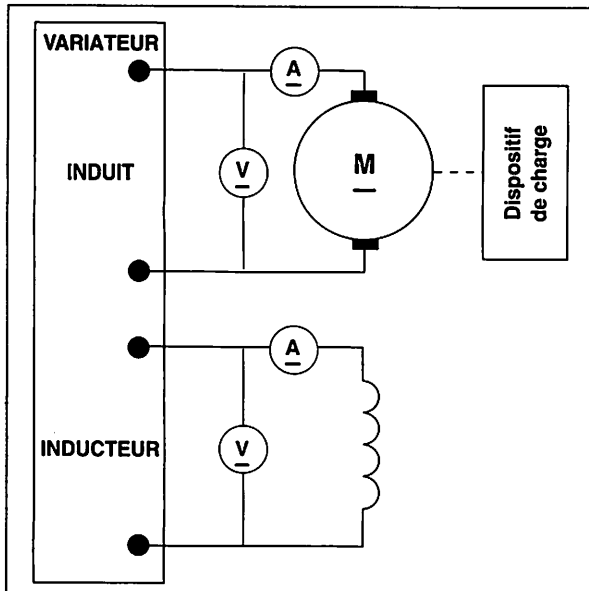
- 1.1. Relever les données de la plaque signalétique du moteur.
- 1.2. Repérer et identifier les enroulements sur la plaque à bornes.

Exemple de résultats

1. Observation du moteur

Caractéristiques du moteur utilisé.
 Induit : $U_N = 220 \text{ V}$; $I_N = 7,8 \text{ A}$.
 Inducteur : $u_N = 220 \text{ V}$; $i_N = 0,5 \text{ A}$.
 Puissance utile : $P_u = 1,5 \text{ kW}$.
 Fréquence de rotation : $n = 1\,500 \text{ tr/min}$.

2. Schéma du montage



2. Schéma du montage

Alimenter le moteur par le variateur de vitesse en plaçant les appareils de mesure permettant de mesurer les valeurs moyennes de :

- la tension d'induit U ,
- l'intensité dans l'induit I ,
- la tension inducteur u ,
- l'intensité dans l'inducteur i .

3. Rendement du moteur

La fréquence de rotation est maintenue constante à sa valeur nominale. Mesurer U , I , u , i et le couple utile T_u à demi charge ($I = \frac{I_N}{2}$) et à pleine charge ($I = I_N$).

Calculer le rendement du moteur à demi charge et à pleine charge.

4. Régulation de vitesse

- 4.1. Tracer la courbe $U = f(I)$ pour n constant.
- 4.2. Indiquer la grandeur sur laquelle agit le variateur pour maintenir la fréquence de rotation constante lorsque la charge varie.

Les intensités peuvent être mesurées à la pince ampèremétrique pour courant continu. La fréquence de rotation du moteur est contrôlée par une dynamo tachymétrique.

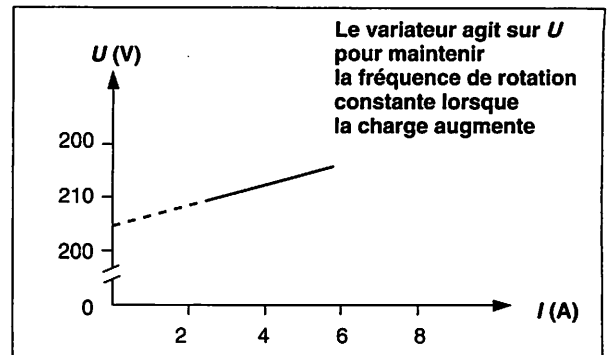
3. Rendement du moteur

À demi charge : $U = 212 \text{ V}$; $I = 3,9 \text{ A}$.
 $u = 220 \text{ V}$; $i = 0,5 \text{ A}$.
 $T_u = 4,7 \text{ Nm}$.
 À pleine charge : $U = 221 \text{ V}$; $I = 7,8 \text{ A}$.
 $u = 220 \text{ V}$; $i = 0,5 \text{ A}$.
 $T_u = 9,5 \text{ Nm}$.

$$P_a = UI + ui; P_u = T_u \Omega; \eta = \frac{P_u}{P_a}$$

D'où le rendement :
 à demi charge : $\eta = 79 \%$
 à pleine charge : $\eta = 81 \%$

4. Régulation de vitesse



COMPLÉMENTS TECHNOLOGIQUES

■ Comparaison des différents procédés de démarrage des moteurs asynchrones triphasés

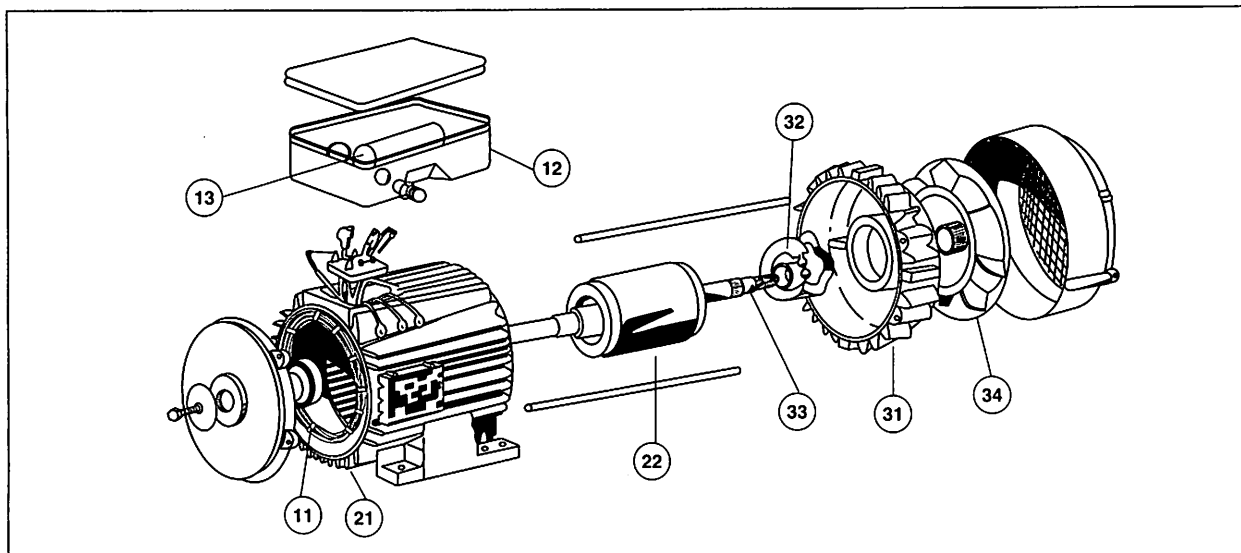
	MOTEURS À ROTOR À CAGE				MOTEURS À ROTOR BOBINE
	DÉMARRAGE DIRECT	DÉMARRAGE ÉTOILE-TRIANGLE	DÉMARRAGE STATORIQUE	DÉMARRAGE PAR AUTO-TRANSFORMATEUR	DÉMARRAGE ROTORIQUE
COUPLE DE DÉMARRAGE	Imposé par le moteur T_D	Imposé par le moteur $T'_D = \frac{1}{3} \times T_D$	Suivant demande de l'utilisateur $T'_D < T_D$	Suivant demande de l'utilisateur $T'_D < T_D$	Suivant demande de l'utilisateur $T'_D < T_{Max}$
INTENSITÉ DE DÉMARRAGE	Imposé par le moteur I_D	Imposé par le moteur $\frac{1}{3} \times I_D$	Suivant le couple demandé $I_D \times \sqrt{\frac{T'_D}{T_D}}$	Suivant le couple demandé $I_D \times \frac{T'_D}{T_D}$	Suivant le couple demandé $1,2 I_n \times \frac{T_D}{T_n}$
DURÉE DU DÉMARRAGE (valeur typique)	2 à 3 s.	3 à 7 s.	7 à 12 s.	7 à 12 s.	3 temps : 2,5 s, 4 et 5 temps : 5 s.
AVANTAGES	<ul style="list-style-type: none"> - Appareillage simple. - Bon marché 	<ul style="list-style-type: none"> - Relativement économique 	<ul style="list-style-type: none"> - Démarrage progressif. - Pas de courants transitoires pendant le démarrage. - Choix du couple en fonction de la machine entraînée. - Couple moteur croissant pendant le démarrage. 	<ul style="list-style-type: none"> - Démarrage progressif. - Choix du couple en fonction de la machine entraînée. - Prix intéressant pour les puissances > 75 kW. - Appel de courant réduit. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pour un couple donné la pointe de courant est nettement plus faible que dans les autres types de démarrage. - Démarrage progressif. - Prix intéressant pour les puissances > 75 kW.
INCONVÉNIENTS	<ul style="list-style-type: none"> - Démarrage brutal. - Pointe de courant élevée au démarrage. 	<ul style="list-style-type: none"> - Limité aux démarrages à vide ou sous faible charge. - Courants transitoires importants au moment du passage d'étoile en triangle. 	<ul style="list-style-type: none"> - À couple égal, appel de courant plus élevé qu'avec les démarrages étoile-triangle et par autotransformateur. 	<ul style="list-style-type: none"> - Prix élevé pour les puissances < 35 kW. 	<ul style="list-style-type: none"> - Prix élevé du moteur. - Entretien des balais et des bagues.
EMPLOI PRÉCONISÉ	<ul style="list-style-type: none"> - Petites machines. 	<ul style="list-style-type: none"> - Machine démarant à vide. 	<ul style="list-style-type: none"> - Machine à forte inertie ne présentant pas de problème de couple. 	<ul style="list-style-type: none"> - Machine de forte puissance ou à forte inertie nécessitant une réduction impérative de l'appel de courant au démarrage. 	<ul style="list-style-type: none"> - Machines démarant en charge ou en démarrage progressif.

T'_D : couple de démarrage sous tension réduite.

COMPLÉMENTS TECHNOLOGIQUES

Moteurs asynchrones monophasés

■ CONSTITUTION

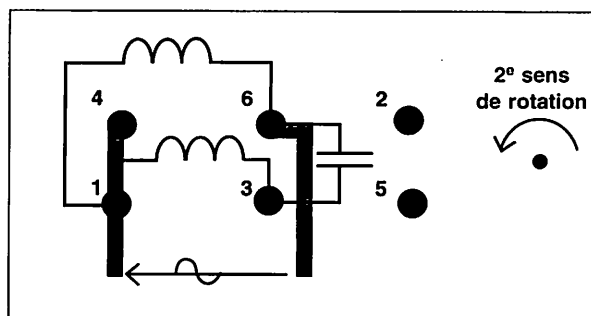
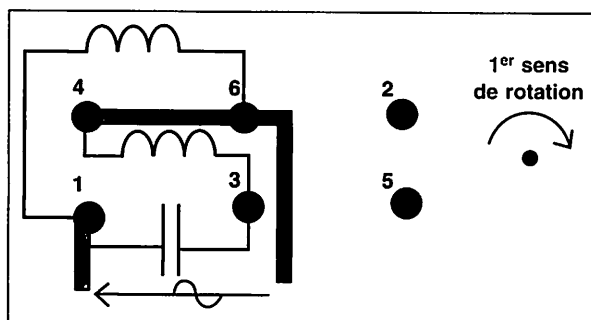


PARTIE ÉLECTRIQUE	PARTIE MAGNÉTIQUE	PARTIE MÉCANIQUE
11 – Enroulements statoriques (principal et de démarrage)	21 – Stator	31 – Flasque palier
12 – Boîte à bornes	22 – Rotor	32 – Roulement
13 – Condensateur de démarrage		33 – Arbre
		34 – Ventilation

■ CARACTÉRISTIQUES

PUISSANCE (kW)	TYPE	FRÉQUENCE DE ROTATION (tr/min)	INTENSITÉ NOMINALE (A)	RENDEMENT (%)	$\cos \varphi$	DÉMARRAGE I_b/I_n	CONDENSATEUR μF
0,25	LS 71 P	2 750	2	60	0,91	3,4	8
1,1	LS 90 P	1 400	8,5	73	0,96	3,5	40

■ BRANCHEMENT



Transformateurs

17 Transformateur monophasé

18 Transformateur triphasé

17 Transformateur monophasé

ÉLECTROTECHNIQUE

1 Transformateur monophasé

Un transformateur monophasé comporte (fig. 17.01) :

- un **circuit magnétique** fermé constitué par un empilage de tôles afin de réduire les courants de Foucault,
- **deux enroulements** disposés sur les noyaux et isolés l'un de l'autre et du circuit magnétique.

L'enroulement primaire est alimenté par le réseau d'énergie, il est récepteur.

L'enroulement secondaire fournit une tension au circuit d'utilisation, il est générateur.

Les deux types de symboles utilisés pour la représentation du transformateur monophasé sont donnés à la figure 17.02.

2 Fonctionnement à vide

Un transformateur fonctionne à vide lorsqu'aucune charge n'est connectée au secondaire.

Quand une tension alternative sinusoïdale est appliquée aux bornes de l'enroulement primaire, elle produit un courant alternatif dans cet enroulement (fig. 17.03).

Le courant primaire engendre un flux variable dans le circuit magnétique. Selon la loi de Lenz (cf. chapitre 10), ce flux induit dans chaque spire une f.e.m. de valeur :

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

L'ensemble des spires est soumis à cette variation de flux, il en résulte la création.

- dans l'enroulement primaire d'une force contre électromotrice $E_1 = N_1 E$ sensiblement égale à la tension U_1 ,
- dans l'enroulement secondaire d'une force électromotrice $E_2 = N_2 E$.

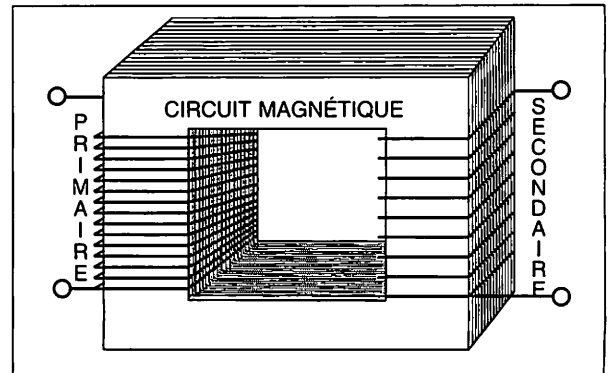


Fig. 17.01 : Éléments constitutifs du transformateur.

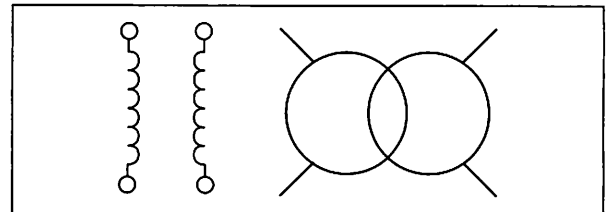


Fig. 17.02 : Symboles pour transformateurs monophasés.

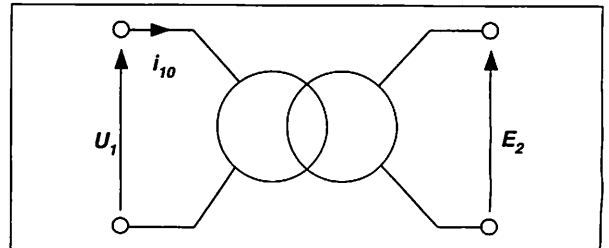


Fig. 17.03 : Transformateur à vide.

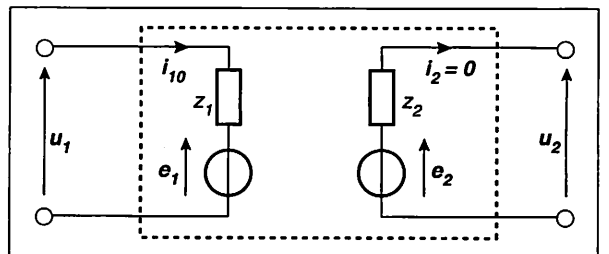


Fig. 17.04 : Modèle équivalent du transformateur à vide.

■ RAPPORT DE TRANSFORMATION

Le rapport de transformation, m , est le rapport de la tension secondaire à la tension primaire.

$$m = \frac{U_2}{U_1}$$

À vide, existent les égalités ci-dessous :

$$U_1 \approx E_1 = N_1 E,$$

$$U_2 \approx E_2 = N_2 E.$$

Le rapport de transformation à vide, m_v , est égal au rapport des nombres de spires primaires et secondaires.

$$m_v = \frac{N_2}{N_1}$$

■ PUISSANCE ABSORBÉE À VIDE

La puissance absorbée à vide, P_o , correspond aux pertes dans le circuit magnétique et dans l'enroulement primaire.

Les pertes dans le circuit magnétique sont dues aux phénomènes d'hystérésis et de courants de Foucault. Ce sont les pertes fer (p_F).

Les pertes dans l'enroulement primaire sont dues à l'effet Joule : $p_J = r_1 I_{10}^2$. La résistance du primaire, r_1 , et le courant primaire à vide, I_{10} , sont très faibles. Ces pertes joule sont négligeables devant les pertes fer.

Il en résulte que :

$$P_o = P_F$$

L'enroulement primaire du transformateur à vide se comporte comme une inductance pratiquement pure. Il en résulte que le facteur de puissance à vide est faible.

Remarques

Si $m < 1$, la tension secondaire est plus faible que la tension primaire, le transformateur est abaisseur.

Si $m > 1$, le transformateur est élévateur.

Si $m = 1$, les tensions primaire et secondaire sont égales, le transformateur est un transformateur d'isolement.

Exemple :

Un transformateur alimenté sous 230 V, comporte 200 spires au primaire et 118 spires au secondaire. La puissance absorbée à vide est $P_o = 12$ W pour un courant $I_{10} = 0,5$ A.

Le rapport de transformation à vide est :

$$m_v = \frac{N_2}{N_1} = \frac{118}{200} = 0,59.$$

La tension secondaire à vide est :

$$U_2 = m_v U_1 = 0,59 \times 230 = 136 \text{ V.}$$

Le facteur de puissance à vide est :

$$\cos \varphi = \frac{P_o}{U_1 I_{10}} = \frac{12}{230 \times 0,5} = 0,10.$$

3 Fonctionnement en charge d'un transformateur parfait

Un transformateur est parfait si la puissance absorbée au primaire est égale à celle fournie par le secondaire.

Les pertes d'un transformateur parfait sont considérées comme nulles. Cela entraîne l'égalité des puissances actives, réactives et apparentes :

$$P_1 = P_2 \quad S_1 = S_2 \quad Q_1 = Q_2$$

Les facteurs de puissance :

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad \text{et} \quad \cos \varphi_2 = \frac{P_2}{S_2}$$

sont donc égaux ainsi que les déphasages primaires et secondaires :

$$\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2$$

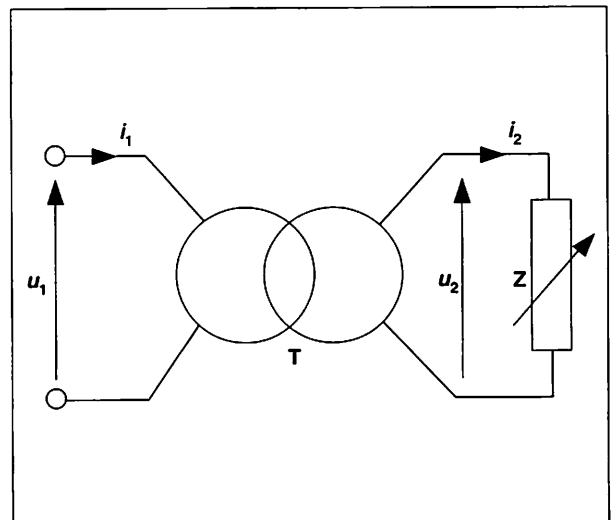


Fig. 17.05 : Transformateur parfait en charge.

■ RAPPORT DE TRANSFORMATION

Les chutes de tension au primaire et au secondaire étant nulles, le rapport de transformation en charge est égal au rapport de transformation à vide.

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

Les puissances apparentes S_1 et S_2 sont égales, d'où :

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad \text{soit} \quad \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

Le rapport des courants est égal à l'inverse du rapport de transformation.

$$m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

Exemple :

La plaque signalétique d'un transformateur porte les indications suivantes : 230 V/127 V - 5 kVA.

Le courant absorbé par le primaire en charge nominale est égal à :

$$I_1 = \frac{S}{U_1} = \frac{5000}{230} = 21,7 \text{ A.}$$

Le courant nominal secondaire est :

$$I_2 = \frac{S}{U_2} = \frac{5000}{127} = 39,3 \text{ A.}$$

Le rapport de transformation a pour valeur :

$$m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{127}{230} = 0,55.$$

ou

$$m = \frac{I_1}{I_2} = \frac{21,7}{39,3} = 0,55.$$

4 Fonctionnement en charge d'un transformateur réel

Dans un transformateur réel, la puissance absorbée au primaire est légèrement supérieure à la puissance fournie au secondaire.

$$P_1 > P_2$$

$$S_1 > S_2$$

$$Q_1 > Q_2$$

■ RAPPORT DE TRANSFORMATION

La tension U_2 en charge résistive ou inductive est inférieure à la tension U_{20} à vide.

Le rapport de transformation en charge est donc inférieur au rapport de transformation à vide.

$$m < m_v$$

■ RENDEMENT

Le rendement est le rapport de la puissance utile fournie au secondaire, P_2 , à la puissance absorbée par le primaire P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Les pertes sont dues au circuit magnétique, **pertes fer**, p_F , et à l'effet Joule, **pertes Joule**, p_J .

Les **pertes fer** sont sensiblement égales aux pertes à vide : $p_F \approx p_0$.

Les **pertes Joule** sont dues aux résistances r_1 et r_2 des enroulements primaire et secondaire.

$$p_J = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2.$$

Le rendement peut aussi s'écrire :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \text{pertes}}$$

Exemple :

Les mesures effectuées sur un transformateur comportant 200 spires au primaire et 118 spires au secondaire sont les suivantes :

$$U_1 = 230 \text{ V} \quad U_2 = 125 \text{ V}$$

$$I_1 = 12 \text{ A} \quad I_2 = 20 \text{ A}$$

$$P_1 = 2590 \text{ W} \quad P_2 = 2500 \text{ W}$$

Le rapport de transformation en charge est :

$$m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{125}{230} = 0,54.$$

Il est inférieur au rapport de transformation à vide :

$$m_v = \frac{N_2}{N_1} = \frac{118}{200} = 0,59.$$

Les pertes sont la différence des puissances actives :

$$\text{pertes} = P_1 - P_2 = 90 \text{ W.}$$

Le rendement est égal à :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 0,97 \quad \text{ou} \quad 97 \text{ \%}.$$

Le rendement d'un transformateur est proche de l'unité.

5 Autotransformateur

Un autotransformateur, monophasé ou triphasé, comporte un circuit magnétique identique à celui d'un transformateur mais ne possède qu'un **seul enroulement** par phase (fig. 17.06).

L'autotransformateur est réversible, il peut-être :

- soit élévateur de tension,
- soit abaisseur de tension.

Les circuits primaire et secondaire d'un autotransformateur ne sont pas isolés électriquement l'un de l'autre. Il convient de ne pas dépasser un rapport de transformation de deux.

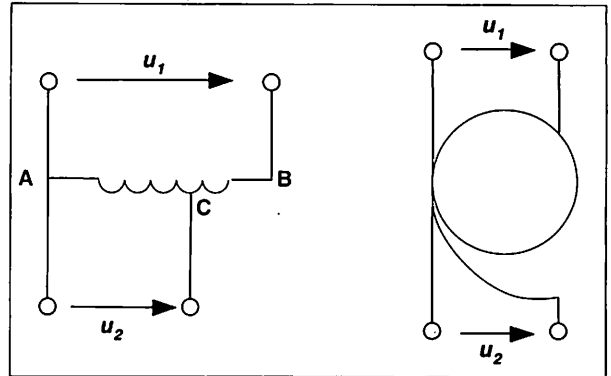


Fig. 17.06 : Structure et symbolisation de l'autotransformateur monophasé.

6 Transformateurs de mesure

On distingue deux catégories de transformateurs de mesure :

- les transformateurs de tension ou transformateurs de potentiel notés **TP** (fig. 17.07a),
- les transformateurs de courant notés **TI** (fig. 17.07b).

■ TRANSFORMATEURS DE TENSION

Ces transformateurs, destinés à réduire la tension pour alimenter les circuits tension des appareils de mesure (voltmètre, wattmètre) ou de comptage (compteurs d'énergie), ont toujours un **rapport de transformation $m_v < 1$** .

L'appareil de mesure branché aux bornes du secondaire indique la tension U_2 ; connaissant la valeur du rapport de transformation il est aisé de connaître la tension primaire :

$$U_1 = m_v U_2$$

■ TRANSFORMATEURS DE COURANT

Ces transformateurs, destinés à réduire le courant pour alimenter les circuits courants des appareils de mesure (ampèremètre, wattmètre) ou de comptage (compteurs d'énergie), ont toujours un **rapport de transformation > 1** (ce qui correspond bien à un abaissement du courant).

Leur emploi exige quelques précautions. En effet le circuit primaire, en série dans le circuit principal, est parcouru par le courant normal.

Le secondaire fermé sur l'appareil de mesure est pratiquement en court-circuit.

Ceci impose que le circuit secondaire ne doive jamais rester ouvert au risque de :

- provoquer un échauffement excessif du circuit magnétique,
- générer des tensions au secondaire dangereuses pour l'utilisateur et le transformateur.

Les transformateurs d'intensité sont toujours constitués par un tore ferromagnétique sur lequel est bobiné l'enroulement secondaire, le primaire, quant à lui, est tout simplement assuré par l'une des barres ou l'un des conducteurs de l'installation.

Remarque :

Une application intéressante est l'autotransformateur à tension secondaire variable ou **alternostat**. La prise secondaire se déplace sur les spires et permet d'obtenir une tension u_2 réglable (fig. ci-dessous).

L'alternostat permet de réaliser, en courant alternatif, la même fonction que le montage potentiométrique tout en réduisant les pertes par effet Joule.

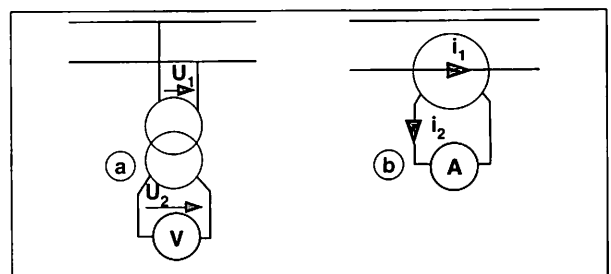
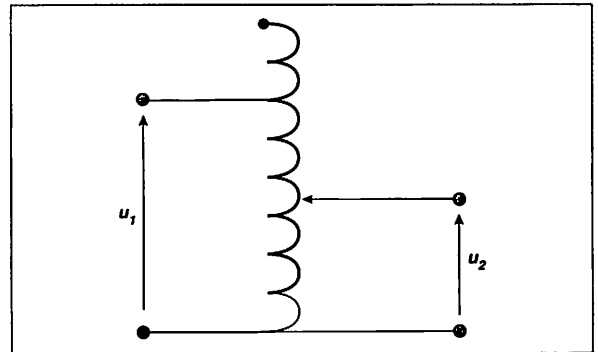


Fig. 17.07 : Transformateur de tension (a) et transformateurs de courant (b).

Remarques :

- Pour que le résultat de la mesure soit le moins possible entaché d'erreur il faut que les tensions primaire et secondaire soient proportionnelles; ceci implique une construction soignée des enroulements.
- Pour éviter d'avoir à ouvrir le circuit principal on utilise, en basse tension, des transformateurs de courant dont le tore magnétique peut s'entrouvrir : ce sont les pinces ampèremétriques.

ESSENTIEL À RETENIR

RAPPORT DE TRANSFORMATION

$$m = \frac{U_2}{U_1}$$

m rapport de transformation,
 U_2 tension secondaire (V),
 U_1 tension primaire (V).

$$m_v = \frac{N_2}{N_1}$$

m_v rapport de transformation à vide,
 N_2 nombre de spires au secondaire,
 N_1 nombre de spires au primaire.

TRANSFORMATEUR PARFAIT

Dans un transformateur parfait, la puissance absorbée au primaire est égale à la puissance restituée au secondaire.

$$P_1 = P_2$$

$$S_1 = S_2$$

$$Q_1 = Q_2$$

$$\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2$$

Le rapport de transformation en charge est égal au rapport de transformation à vide.

$$m = m_v = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

I_1 courant dans le primaire (A),

I_2 courant dans le secondaire (A).

TRANSFORMATEUR RÉEL

$$P_2 < P_1 \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \text{pertes}}$$

P_1 puissance active absorbée par le primaire (W),
 P_2 puissance active fournie par le secondaire (W),
 η rendement.

$$\text{Pertes fer} : p_F \approx P_o$$

P_o puissance absorbée à vide (W).

$$\text{Pertes Joule} : p_J = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2$$

r_1 résistance de l'enroulement primaire (Ω),

r_2 résistance de l'enroulement secondaire (Ω).

TEST RAPIDE

Pour les applications ci-dessous, on considère les transformateurs comme étant parfaits.

T. 1 Un transformateur monophasé comporte 200 spires au primaire et 50 spires au secondaire. Calculer son rapport de transformation à vide.

Réponse : 0,25; 1; 4.

T. 2 Une tension de 230 V est appliquée au primaire d'un transformateur dont le rapport de transformation est 0,21.

Déterminer la tension secondaire.

Réponse : 1 000 V; 230 V; 48 V.

T. 3 La puissance nominale d'un transformateur 230 V – 24 V est 300 VA.

Calculer le courant primaire nominal.

Réponse : 0,9 A; 1,3 A; 30 A.

T. 4 Un transformateur alimente un récepteur consommant un courant de 1,5 A; son rapport de transformation est égal à 3.

Calculer le courant absorbé au primaire.

Réponse : 0,5 A; 1,5 A; 4,5 A.

T. 5 La puissance apparente absorbée par le transformateur précédent (test T4) est de 600 VA.

Calculer les tensions primaire et secondaire.

Réponse : 133 V; 400 V; 600 V; 1 200 V.

EXPÉRIMENTATION

ESSAI À VIDE D'UN TRANSFORMATEUR MONOPHASÉ

■ TRAVAIL À EXÉCUTER

Pour des valeurs de la tension primaire U_1 , variant de zéro à sa valeur nominale :

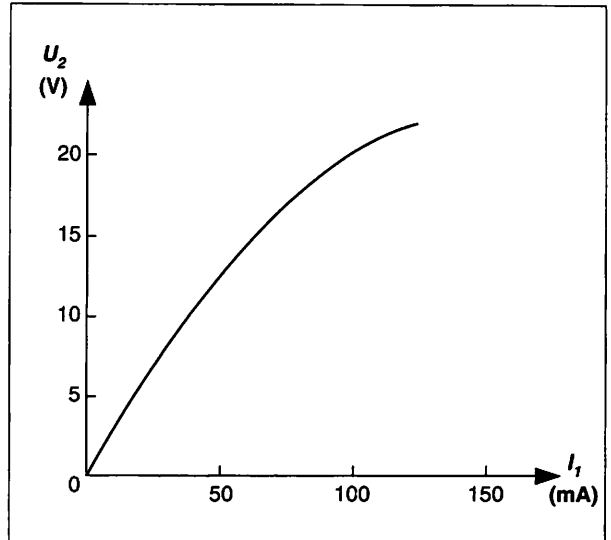
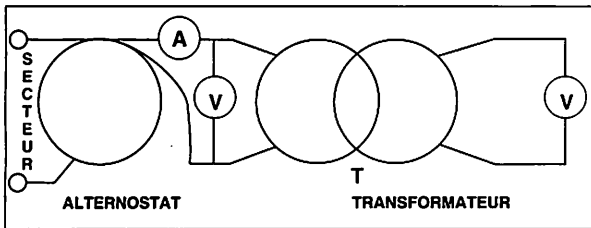
- mesurer U_1 , U_2 et le courant primaire I_1 ,
- déterminer le rapport de transformation à vide,
- représenter graphiquement U_2 en fonction de I_1 .

■ SCHÉMA DU MONTAGE ET EXEMPLES DE RÉSULTATS

Le primaire du transformateur est alimenté par un autotransformateur variable (alternostat) permettant de faire varier la tension U_1 .

Le transformateur utilisé a pour caractéristiques :

$$U_{1n} = 230 \text{ V} ; U_{2n} = 24 \text{ V} ; S_n = 300 \text{ VA.}$$



Le rapport $\frac{U_2}{U_1}$ est constant, environ égal à 0,11.

La courbe $U_2 = f(I_1)$ correspond à la magnétisation du circuit magnétique du transformateur.

MESURE DU RENDEMENT PAR LA MÉTHODE DIRECTE

■ TRAVAIL À EFFECTUER

Mesurer la puissance P_1 absorbée, par le primaire et la puissance P_2 fournie par le secondaire.

Calculer le rapport $\eta = \frac{P_2}{P_1}$.

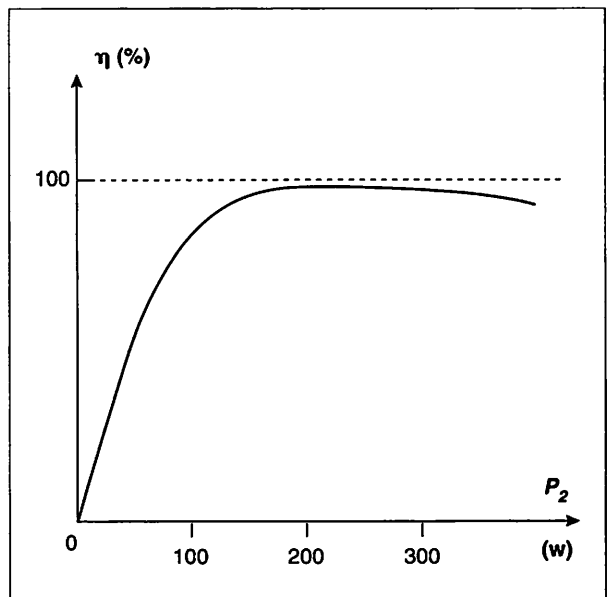
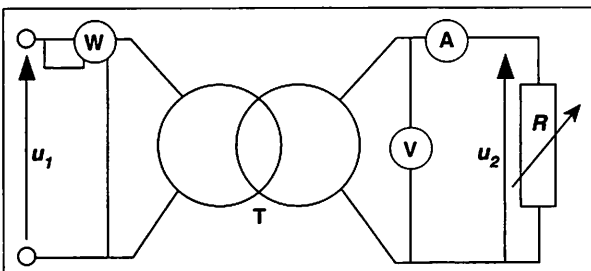
Représenter graphiquement $\eta = f(P_2)$.

■ SCHÉMA DU MONTAGE ET EXEMPLE DE RÉSULTATS

La charge est constituée par un rhéostat de lampes ($\cos \varphi = 1$).

La puissance au secondaire P_2 se mesure avec un voltmètre et un ampèremètre.

$$P_2 = U_2 I_2.$$



Lorsque P_2 augmente, le rendement croît et passe par une valeur maximale.

Le rendement maximal est proche de l'unité.

MESURE DU RENDEMENT PAR LA MÉTHODE DES PERTES SÉPARÉES

■ PRINCIPE

La méthode des pertes séparées consiste à mesurer :

- les pertes fer, par un essai à vide : $p_F = P_o$,
- les pertes Joule par un essai en court-circuit au courant nominal I_{2n} .

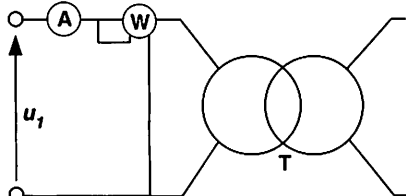
Le rendement est alors égal au rapport :

$$\eta = \frac{P_{2n}}{P_{2n} + p_F + p_J}$$

■ SCHÉMA DES MONTAGES

ESSAI À VIDE

Le primaire est alimenté sous sa tension nominale. La mesure du wattmètre correspond aux pertes fer.

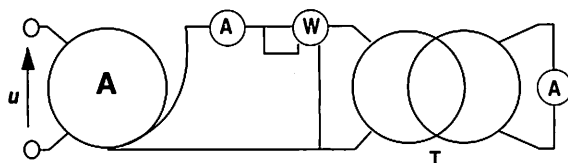


Remarque

Cette méthode permet de déterminer le rendement en charge nominale d'un transformateur, même de forte puissance. Le rendement étant voisin de 1, elle est, dans ce cas, plus précise que la méthode directe.

ESSAI EN COURT-CIRCUIT

Le secondaire est court-circuité sur un ampère-mètre. Le primaire est alimenté par une tension réduite, réglable par un alternostat. La mesure du wattmètre correspond aux pertes Joule.



APPLICATIONS

EXERCICES RÉSOLUS

Énoncé 1

Un transformateur, considéré comme parfait, comporte 1 000 spires au primaire et 150 spires au secondaire. La puissance apparente nominale est de 500 VA pour une tension primaire de 230 V.

Calculer :

- le rapport de transformation et la tension secondaire,
- les intensités des courants primaire et secondaire en fonctionnement nominal.

Méthode :

- Utiliser la relation :

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

- Utiliser l'égalité des puissances :

$$S_1 = S_2 = S$$

avec : $S = U_1 I_1 = U_2 I_2$

Solution proposée :

- Le rapport de transformation est :

$$m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{150}{1000} \text{ soit } m = 0,15.$$

La tension secondaire est égale à :

$$U_2 = m U_1 = 0,15 \times 230 \text{ soit } U_2 = 34,5 \text{ V.}$$

- Les intensités sont égales à :

$$I_1 = \frac{S}{U_1} = \frac{500}{230} \text{ soit } I_1 = 2,17 \text{ A.}$$

$$I_2 = \frac{S}{U_2} = \frac{500}{34,5} \text{ soit } I_2 = 14,5 \text{ A.}$$

Remarques :

Le rapport de transformation est le même, à vide et en charge, puisque le transformateur est parfait.

Les intensités vérifient l'égalité :

$$m = \frac{I_1}{I_2}$$

Énoncé 2

Les caractéristiques nominales d'un transformateur monophasé sont les suivantes :

$$S = 15 \text{ kVA} ; U_1 = 1\,500 \text{ V} ; U_2 = 230 \text{ V}.$$

La mesure des pertes fer par un essai à vide donne : $p_F = 450 \text{ W}$.

La mesure des pertes Joule au primaire et au secondaire, pour le courant I_2 nominal, donne $p_J = 220 \text{ W}$.

Déterminer :

- le rapport de transformation en charge nominale,
- le rendement du transformateur avec une charge nominale de facteur de puissance :
 - $\cos \varphi_2 = 1$;
 - $\cos \varphi_2 = 0,8$.

Méthode :

- Calculer :

$$m = \frac{U_2}{U_1}.$$

- Déterminer la puissance active secondaire :

$$P_2 = S_2 \cos \varphi_2$$

- Utiliser la relation :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \text{pertes}}$$

Solution proposée :

- Le rapport de transformation est égal à :

$$m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{230}{1\,500} \text{ soit } m = 0,15.$$

- La puissance active secondaire dépend du facteur de puissance :

$$\text{pour } \cos \varphi_2 = 1 : P_2 = S_2 = 15\,000 \text{ W} ;$$

$$\text{pour } \cos \varphi_2 = 0,8 : P_2 = S_2 \cos \varphi_2 = 12\,000 \text{ W}.$$

Le rendement est alors :

$$\text{pour } \cos \varphi_2 = 1 : \eta = \frac{P_2}{P_2 + p_J + p_F} = 0,96.$$

$$\text{pour } \cos \varphi_2 = 0,8 : \eta = \frac{12\,000}{12\,000 + 450 + 220} = 0,95.$$

Remarques :

Les pertes Joule, fonctions des courants I_1 et I_2 sont indépendantes du facteur de puissance.

Le rendement dépend du facteur de puissance de la charge.

EXERCICES À RÉSOUDRE

E. 1 Un transformateur considéré comme parfait est tel que ses tensions nominales sont :

$$U_{1N} = 5 \text{ kV} \text{ et } U_{2N} = 230 \text{ V}.$$

Il comporte 1 200 spires au primaire et son secondaire fournit, à une charge inductive, un courant de 20 A avec un facteur de puissance $\cos \varphi_2 = 0,7$.

Déterminer :

- le rapport de transformation,
- le nombre de spires au secondaire,
- le courant absorbé par le primaire,
- les puissances active, réactive et apparente en fonctionnement.

E. 2 Les caractéristiques d'un transformateur monophasé sont :

$$U_1 = 230 \text{ V} ; U_{2V} = 1\,500 \text{ V} ; S = 3 \text{ kVA}.$$

Le courant à vide est égal à 5 % du courant nominal et la chute de tension au secondaire en fonctionnement normal est égale à 2 % de la tension à vide.

Calculer :

- les courants primaire et secondaire nominaux,
- le courant primaire à vide,
- la tension secondaire en charge.

E. 3 Le secondaire d'un transformateur supposé parfait, de rapport de transformation 0,5 alimente une charge résistive de 50Ω sous 120 V. Calculer le courant absorbé par le primaire du transformateur.

E. 4 La plaque d'un transformateur monophasé porte les indications suivantes : **1 500 V/250 V ; 30 kVA**.

Le secondaire (250 V) débite en charge nominale dans un circuit dont le facteur de puissance est 0,8.

Les résistances des enroulements primaire et secondaire sont respectivement : $r_1 = 2,15 \Omega$; $r_2 = 0,1 \Omega$.

Lors d'un essai à vide, la puissance absorbée à vide est égale à $P_o = 700 \text{ W}$.

Calculer, en charge nominale :

- les intensités primaire et secondaire (pour ce calcul, le transformateur est supposé parfait),
- les pertes Joule dans le primaire et le secondaire,
- le rendement du transformateur.

E. 5 Un transformateur monophasé, élévateur de tension porte les indications du constructeur suivantes :

$$115 \text{ V/230 V} ; 50 \text{ H}_2 ; 1\,000 \text{ VA}.$$

- Que représentent ces indications ?
- Un essai à vide sous la tension $U_1 = 115 \text{ V}$ donne une intensité primaire de 0,64 A et une puissance absorbée $P_o = 34 \text{ W}$. Faire le schéma du montage permettant de réaliser cet essai à vide.
- La résistance du primaire est $r_1 = 0,2 \Omega$. Calculer les pertes par effet Joule lors de l'essai à vide.
- Comparer ces pertes par effet Joule à la puissance P_o mesurée lors de l'essai à vide. Quel type de pertes représente P_o ?

18 Transformateur triphasé

ÉLECTROTECHNIQUE

1 Organisation générale

Un transformateur triphasé peut être constitué (fig. 18.01) :

- soit par l'association de trois transformateurs monophasés identiques,
- soit en bobinant les enroulements sur trois colonnes d'un circuit magnétique commun.

C'est le plus souvent, la deuxième solution qui est retenue car offrant, sur le plan de la construction, un prix de revient plus faible.

2 Couplage des enroulements

Sur chacune des colonnes sont disposés un enroulement primaire et un enroulement secondaire. Les trois enroulements primaires peuvent être couplés en **triangle** ou en **étoile**.

Les trois enroulements secondaires peuvent être couplés en **triangle**, en **étoile** ou en **zig-zag**.

Dans ce dernier cas le bobinage secondaire est constitué de deux bobines comportant chacune une moitié des spires secondaires (fig. 18.02).

Chaque mode de couplage est symbolisé par une lettre :

étoile : **Y** ou **y**; **triangle** : **D** ou **d**; **zig-zag** : **Z** ou **z**.

Il en résulte six combinaisons possibles de couplage :

Y-y; Y-d; Y-z; D-y; D-d; D-z.

3 Repérage de la plaque à bornes

Les bornes **HT** sont repérées par les lettres capitales **A, B** et **C** et les bornes **BT** par les minuscules **a, b** et **c**.

Dans le cas où le neutre est disponible et distribué, on trouve une borne supplémentaire repérée **n** (fig. 18.03).

4 Rapport de transformation

Il est égal au rapport de la tension U_1 entre deux fils de phase de la ligne primaire à la tension U_{20} entre deux fils de phase de la ligne secondaire à vide.

$$m_T = \frac{U_{20}}{U_1}$$

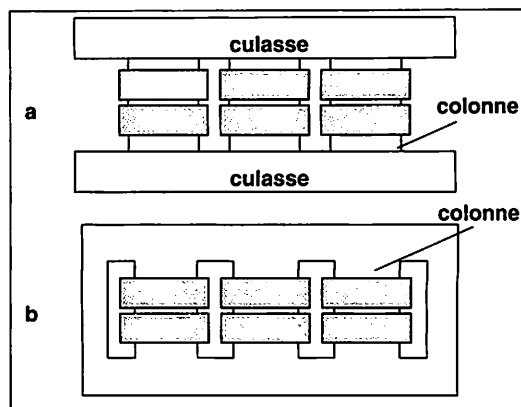


Fig. 18.01 : Transformateurs triphasés; (a) à simples colonnes; (b) blindé à colonnes.

Remarque :

La lettre majuscule correspond à la plus haute tension (le plus souvent le primaire) et la lettre minuscule à la plus basse tension.

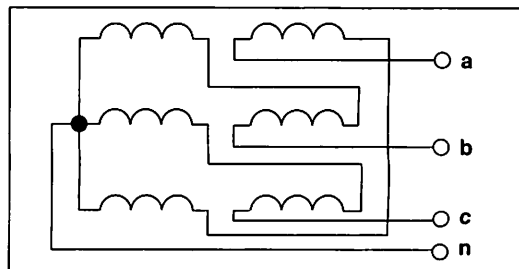


Fig. 18.02 : Couplage zig-zag.

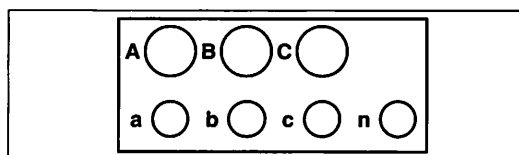


Fig. 18.03 : Plaque à bornes.

Les tensions U_{20} et U_1 ne sont égales aux tensions aux bornes des enroulements que pour un couplage triangle.

Le rapport de transformation est étroitement lié au type de couplage retenu pour le primaire et le secondaire.

Le tableau de la figure 18.04 donne les valeurs de m_T en fonction de m_V (rapport de transformation du transformateur monophasé à vide) pour les différents types de couplages.

On peut observer que seuls les transformateurs présentant un couplage primaire analogue au couplage secondaire offrent un rapport de transformation à vide identique à celui du transformateur monophasé :

- couplage étoile-étoile,
- couplage triangle-triangle.

Exemple :

Le transformateur de la figure ci-contre présente un couplage D - y.

En notant par V_1 et V_{20} les tensions aux bornes des enroulements et par U_1 et U_{20} les tensions entre fils de phases :

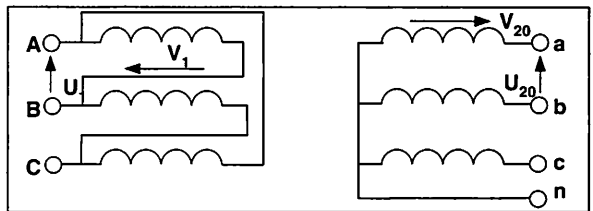
$$U_1 = V_1 \quad ; \quad U_{20} = V_{20} \sqrt{3}$$

Le rapport de transformation en monophasé à vide aurait pour valeur :

$$m_V = \frac{V_{20}}{V_1}$$

couplage	U_{20}	U_1	m_T
Y - y	$V_{20} \sqrt{3}$	$V_1 \sqrt{3}$	m_V
Y - d	V_{20}	$V_1 \sqrt{3}$	$\frac{m_V}{\sqrt{3}}$
D - y	$V_{20} \sqrt{3}$	V_1	$m_V \sqrt{3}$
D - d	V_{20}	V_1	m_V

Fig. 18.04 : Rapports de transformation selon les couplages.



Le rapport de transformation en triphasé à vide est alors égal à :

$$m_T = \frac{U_{20}}{U_1} = \frac{V_{20} \sqrt{3}}{V_1}$$

$$\text{soit : } m_T = m_V \sqrt{3}$$

5 Rendement

Quel que soit le couplage retenu, le rendement du transformateur triphasé a pour expression :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \text{pertes}} < 1$$

6 Règles de branchement des transformateurs de puissance

■ DÉPHASAGE ENTRE ENROULEMENTS

C'est l'écart angulaire qui existe entre les vecteurs représentatifs des forces électromotrices entre les points neutres et les bornes homologues de deux enroulements lorsqu'un système direct de tensions est appliqué aux bornes de l'enroulement haute tension.

■ INDICE HORAIRE

Cet indice est exprimé par l'heure qu'indique une horloge dont (fig. 18.05) :

- la grande aiguille est placée sur 12 h et qui coïncide avec le vecteur représentatif de la tension entre le point neutre (réel ou fictif) et une borne de ligne de l'enroulement haute tension.
- la petite aiguille est placée sur l'heure coïncidant avec le vecteur représentatif de la tension entre le

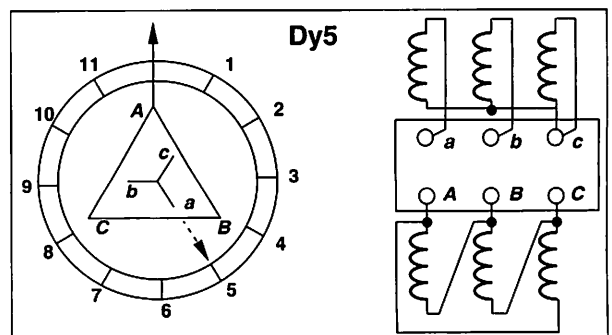


Fig. 18.05 : Exemple de repérage de l'indice horaire.

L'indice horaire définit le déphasage entre tensions primaire et secondaire, il dépend des couplages respectifs des enroulements.

point neutre (réel ou fictif) et une borne de ligne homologue de l'enroulement basse tension.

■ COUPLAGES USUELS

Ils sont représentés sur le tableau de la figure 18.06.

Parmi ceux-ci, sont recommandés :

- pour les puissances comprises entre 25 et 160 kVA :
 - les couplages Yzn 11 et Dyn 11,
- pour les puissances supérieures :
 - les couplages Yyn0, Yd 11 et Dyn 11.

Les couplages Dyn 11 et Yzn 11 permettent une distribution déséquilibrée.

Exemple :

Sur la figure 18.05 ci-avant, les enroulements haute tension sont couplés en triangle (D), les enroulements basse tension en étoile (y) :

- l'indice horaire caractérisant le déphasage entre haute et basse tension est égal à 5,
- le symbole de couplage de ce transformateur a pour expression : Dy5.

■ COUPLAGE EN PARALLÈLE DES TRANSFORMATEURS TRIPHASÉS

Pour répartir, entre plusieurs transformateurs alimentés par une même source et débitant sur un même circuit d'utilisation, la puissance totale il faut satisfaire aux conditions ci-après :

- les rapports de transformation des transformateurs doivent être égaux afin d'assurer une égalité des tensions secondaires et ainsi éviter tout courant de circulation entre enroulements,
- leurs tensions de court-circuit doivent être égales (il est admis une tolérance de $\pm 10\%$),
- leurs couplages doivent être compatibles entre eux, c'est-à-dire :
 - soit, que leurs indices horaires sont identiques,
 - soit, si ce n'est pas le cas, qu'ils appartiennent à l'un des quatre groupes de couplage suivants :

GROUPE I : indices horaires 0, 4 et 8;

GROUPE II : indices horaires 6, 10 et 2;

GROUPE III : indices horaires 1 et 5;

GROUPE IV : indices horaires 7 et 11.

- le rapport des puissances nominales des transformateurs doit être compris entre 0,5 et 2, ceci afin que la répartition des charges soit acceptable.

Les couplages des transformateurs triphasés sont représentés à la figure 18.06, ci-après.

Exemple :

- un transformateur Dy 11 peut fonctionner avec un transformateur Yz 11 : même indice horaire,
- un transformateur Yd 1 peut fonctionner avec un transformateur Dy 5 : indice horaire différent mais appartenant au même groupe (groupe III),
- un transformateur Yz 11 ne peut pas fonctionner avec un transformateur Yy 0 : indice horaire et groupe différents.

SYMBOLE	DIAGRAMME VECTORIEL	SCHÉMAS DES CONNEXIONS	SYMBOLE	DIAGRAMME VECTORIEL	SCHÉMAS DES CONNEXIONS	SYMBOLE	DIAGRAMME VECTORIEL	SCHÉMAS DES CONNEXIONS
Dd0			Yy0			Dz0		
Dy1			Yd1			Yz1		
Dy5			Yd5			Yz5		
Dd6			Yy6			Dz6		
Dy11			Yd11			Yz11		

Fig. 18.06 : Couplages usuels des transformateurs triphasés (en bleu les couplages recommandés).

ESSENTIEL À RETENIR

TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ

MODE DE COUPLAGES

Y-y; Y-d; Y-z; D-y; D-d; D-z

Y ou y : couplage étoile,
D ou d : couplage triangle,
z : couplage zig-zag

RENDEMENT

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \text{pertes}}$$

P_2 puissance utile fournie au secondaire (W).

APPLICATIONS

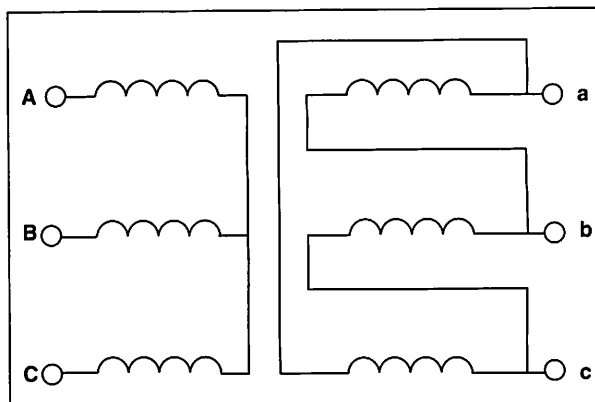
EXERCICE RÉSOLU

Énoncé

Un transformateur triphasé, couplé en étoile au primaire, en triangle au secondaire selon le schéma de la figure ci-contre, comporte 1 000 spires par phase au primaire et 150 spires par bobine au secondaire. Il est alimenté par une tension $U_1 = 4\,500\text{ V}$ et sa puissance nominale est de 100 kVA.

Calculer :

- le rapport de transformation à vide en monophasé,
- le rapport de transformation à vide en triphasé,
- la tension aux bornes du secondaire,
- l'intensité nominale du courant primaire.



Méthode :

Appliquer la relation

$$m = N_2/N_1$$

Calculer les tensions primaire et secondaire et appliquer à nouveau la relation donnant le rapport de transformation.

Solution proposée :

a. Le rapport de transformation à vide en monophasé est :

$$m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{150}{1\,000} \quad \text{soit } m = 0,15$$

b. La tension aux bornes de chaque enroulement primaire est égale à la tension simple V_1 :

$$V_1 = \frac{U_1}{\sqrt{3}} \quad \text{soit } U_1 = V_1 \sqrt{3}$$

La tension entre deux bornes de sortie à vide est égale à la tension aux bornes des enroulements secondaires :

$$U_{20} = V_2$$

ce qui donne un rapport de transformation triphasé égal à :

$$m_T = \frac{U_{20}}{U_1} \quad \text{soit } m_T = 0,087$$

c. La tension aux bornes du secondaire est égale à :

$$U_{20} = m_T U_1 = 0,087 \times 4\,500 = 391\text{ V}$$

d. L'intensité nominale du primaire a pour valeur :

$$I = \frac{S}{U_1 \sqrt{3}} = 12,8\text{ A.}$$

Remarques :

Ne pas oublier de prendre en compte le type de couplage au primaire et au secondaire.

On a bien à faire à un transformateur abaisseur.

EXERCICES À RÉSOUDRE

E.1 Un transformateur triphasé dont le primaire est couplé en triangle est alimenté sous une tension composée de 400 V.

Le nombre de spires par noyau est de $N_1 = 200$ au primaire et de $N_2 = 347$ au secondaire.

a. Calculer les tensions disponibles au secondaire du transformateur lorsqu'il est couplé :

- en étoile,
- en triangle.

b. La puissance nominale étant de 20 kVA, calculer pour chaque couplage secondaire :

- le courant dans la ligne,
- le courant dans un enroulement.

E.2 1. Un transformateur triphasé a été soumis à trois essais au cours desquels on a mesuré la puissance absorbée au primaire :

- Puissance à vide : 300 W,
- Puissance avec secondaire en court-circuit : 350 W,
- Puissance à charge nominale : 6,5 kW.

Calculer le rendement du transformateur.

2. Ce transformateur est couplé en Dy_n . Le rapport de bobinage N_2/N_1 est 0,046. La tension au primaire est 5 000 V.

Calculer :

- a. les tensions V_2 et U_2 disponibles au secondaire,
- b. l'intensité secondaire débitée dans une charge de $\cos \varphi = 0,8$ utilisée pour l'essai du 1.

E.3 Le primaire d'un transformateur triphasé, couplé en étoile, est alimenté par une tension composée de 20 kV. Le rapport du nombre de spires primaire et secondaire est $m_v = 0,035$.

a. Calculer la tension entre phases disponible au secondaire pour le couplage du secondaire en triangle.

b. La puissance apparente du transformateur est de 50 kVA. Calculer l'intensité du courant nominal au secondaire, en ligne et dans chaque enroulement.

E.4 Les enroulements primaires d'un transformateur triphasé comportent chacun 1 000 spires. Chaque enroulement secondaire en comporte 60.

Ce transformateur est alimenté par le réseau 230 V/ 400 V-50 Hz.

Déterminer la tension secondaire pour les couplages suivants :

- a. étoile-étoile,
- b. étoile-triangle,
- c. triangle-triangle,
- d. triangle-étoile.

E.5 Une installation triphasée alimentée par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé Dy est composée de :

- 30 lampes de 230 V/100 W, également réparties sur les trois phases,
- un moteur asynchrone triphasé de 3 kW ayant un rendement de 80 % et un facteur de puissance de 0,82.

Le transformateur a pour caractéristiques principales :

- Rapport de transformation à vide : $m_v = 0,0115$,
- Puissance absorbée à vide : $P_{1V} = 140$ W,
- Puissance absorbée en court-circuit : $P_{1CC} = 210$ W,
- Tension primaire : $U_1 = 20$ kV.

1. Étude de l'installation.

La tension secondaire nominale est de 400 V.

Calculer :

- a. la puissance active absorbée par le réseau d'éclairage P_L ,
- b. la puissance active absorbée par le moteur $P_{M'}$,
- c. la puissance réactive absorbée par le moteur $Q_{M'}$,
- d. la puissance apparente absorbée par l'installation S ,
- e. le facteur de puissance moyen de l'installation $\cos \varphi_2$,
- f. le courant en ligne en sortie du transformateur I_2 .

2. Étude du transformateur.

Calculer :

- a. les tensions secondaires à vide du transformateur U_{2V} et V_{2V} ,
- b. le rendement η du transformateur.

MESURES SUR DES APPLICATIONS PROFESSIONNELLES

TRANSFORMATEUR MONOPHASÉ MESURES DE RENDEMENT

■ CONTEXTE TECHNIQUE

Pour rénover une machine à commande numérique et augmenter sa puissance, le moteur triphasé d'entraînement ainsi que son contacteur ont été remplacés. Après quelques jours, le contacteur présente un dysfonctionnement.

Pour déterminer si ce dysfonctionnement provient du transformateur qui alimente la platine de commande de la machine, il est demandé d'effectuer des mesures sur ce transformateur.

■ TRAVAIL DEMANDÉ

1. Caractéristiques du transformateur

Relever sur la plaque signalétique les tensions nominales au primaire et au secondaire et la puissance apparente.

2. Fonctionnement à vide

Mesurer la puissance absorbée à vide P_{1V} et la tension secondaire à vide U_{2V} .

3. Fonctionnement avec charge résistive

La charge est un rhéostat à régler à I_{2N} .

3.1. Mesurer la puissance absorbée au primaire P_1 , au secondaire P_2 et la tension secondaire U_2 .

3.2. Calculer le rendement et la chute de tension secondaire en pourcentage.

4. Fonctionnement avec charge inductive

La charge est constituée d'une bobine expérimentale et d'un rhéostat en série afin d'obtenir $\cos \varphi = 0,45$.

4.1. Mesurer les puissances P_1 et P_2 et la tension U_2 .

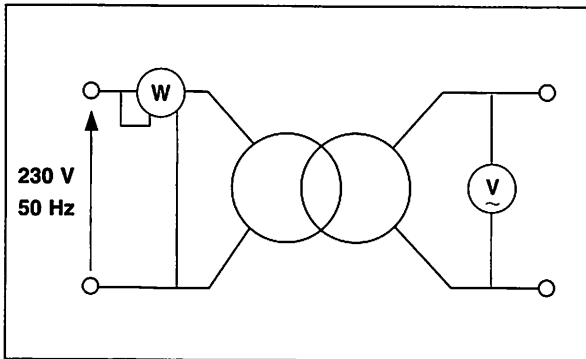
4.2. Calculer le rendement et la chute de tension secondaire.

Exemple de résultats

1. Caractéristiques du transformateur

$U_{1N} = 230 \text{ V}$; $U_{2N} = 115 \text{ V}$;
 $S = 100 \text{ VA}$.

2. Fonctionnement à vide



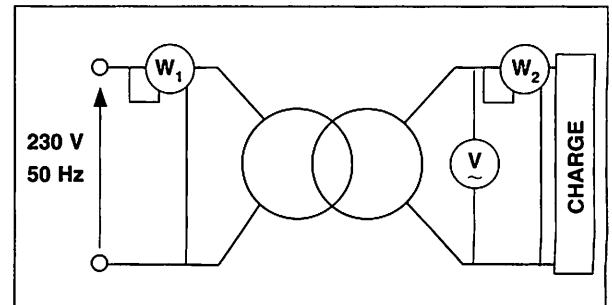
Mesures : $P_{1V} = 14 \text{ W}$, $U_{2V} = 123 \text{ V}$.

3. Fonctionnement avec charge résistive

L'intensité nominale au secondaire est :

$$I_{2N} = \frac{S}{U_{2N}} \text{ soit } I_{2N} = 0,87 \text{ A}$$

Pour obtenir cette valeur il faut régler le rhéostat de charge à $R = 132 \Omega$.



3.1. $P_1 = 111 \text{ W}$; $P_2 = 100 \text{ W}$; $U_2 = 116 \text{ V}$.

3.2. Rendement : $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ soit $\eta = 90 \%$

Chute de tension : $\frac{U_{2V} - U_2}{U_2}$ soit 6%

Remarque

En charge résistive $P_2 = U_2 I_2$. Le wattmètre W_2 peut être remplacé par un ampèremètre.

4. Fonctionnement avec charge inductive

L'inductance est réglée à $0,37 \text{ H}$, la charge est réglée à I_{2N} par action sur le rhéostat ($R \approx 60 \Omega$)

4.1. $P_1 = 65 \text{ W}$; $P_2 = 51 \text{ W}$; $U_2 = 119 \text{ V}$.

4.2. Rendement : $\eta = 78 \%$

Chute de tension : $3,3 \%$

COMPLÉMENTS TECHNOLOGIQUES

1 Transformateurs de sécurité

La caractéristique fonctionnelle principale d'un transformateur de sécurité est le **grand isolement électrique entre le circuit primaire et les circuits secondaires**.

Le tableau ci-contre est établi pour une tension primaire nominale ne dépassant pas 500 V.






Dans ces transformateurs :

- la **tension nominale secondaire** ne doit pas dépasser 48 V (6, 12, 24, 42 et 48 V),
- la **tension primaire nominale** est limitée à 500 V (127, 230, 400 V),
- la **puissance** s'échelonne de 25 à 10 000 VA pour les monophasés, de 630 à 10 000 VA pour les triphasés.

EMPLOI ET CARACTÉRISTIQUES	CLASSES		
	0	I	II
LIEU D'EMPLOI	en armoire	Sur tableaux	Portatifs ou dans des locaux exposés
PROTECTION	nu	Masses métalliques mises à la terre R borne $\leq 0,1 \Omega$	Par capot isolé
ISOLEMENT :			
	● entre enroulements ● entre enroulements et masse	4 000 V 2 000 V	4 000 V 2 000 V

Caractéristiques fonctionnelles des transformateurs de sécurité.

■ APPLICATIONS DES TRANSFORMATEURS DE SÉCURITÉ (suivant l'INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SÉCURITÉ INRS)

Usage du transformateur	Mode de pose	Limites supérieures			Classe d'isolation	Degré de protection	Symbole	Observations
		de tension primaire (V)	de tension secondaire à vide (V)	de puissance (VA)				
GÉNÉRAL	fixe	1 x 500 ou 3 x 500	1 x 50 ou 3 x 50	10 000	I (⚡) ou II (⊞)		Ne doit pas comporter de poignée. Doit résister aux courts-circuits : - soit par construction symbole :  - soit par dispositifs incorporés (ouvrant le circuit primaire ou le circuit secondaire).	
	mobile	1 x 500 ou 3 x 500	1 x 50 ou 3 x 50	10 000	Obligatoirement : II (⊞)			Doit être adapté aux conditions d'emploi.
ALIMENTATION DE BALADEUSE	fixe ou mobile	1 x 500	1 x 50	10 000	Obligatoirement : II (⊞)		- Un transformateur peut alimenter une ou plusieurs baladeuses. - Limites inférieures de puissance : 25 VA pour tension secondaire ≤ 12 V 63 VA pour tension secondaire > 12 V. - Les transformateurs mobiles doivent résister aux courts-circuits.	
ALIMENTATION DE SONNERIE	fixe	1 x 250	1 x 33	100	I (⚡) ou II (⊞)		Transformateur résistant aux courts-circuits : - soit par construction ; - soit par dispositif incorporé autre que coupe circuit à fusibles. Doit résister aux surcharges en usage normal.	
ALIMENTATION DE JOUETS	mobile	1 x 250	1 x 33	200	Obligatoirement : II (⊞)		Comme les transformateurs mobiles d'usage général, les transformateurs d'alimentation de jouets doivent résister aux courts-circuits : - soit par construction ; - soit par dispositif incorporé autre que coupe circuit à fusibles.	

COMPLÉMENTS TECHNOLOGIQUES

2 Production, transport et distribution de l'énergie électrique

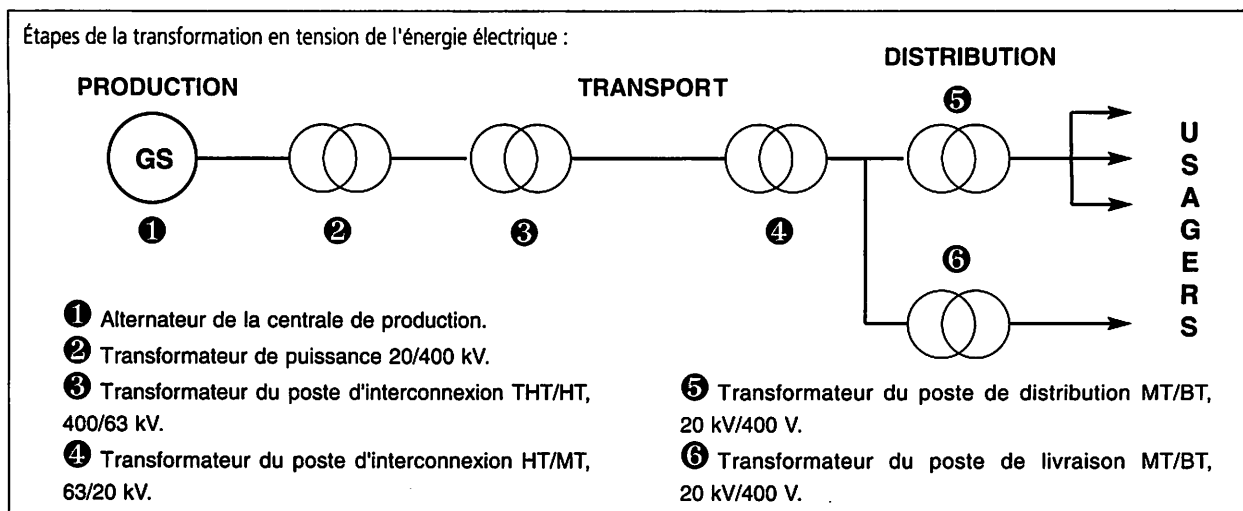
■ LE RÉSEAU GÉNÉRAL

Les centrales de production de l'énergie électrique sont le plus souvent éloignées des zones de forte consommation car leur implantation dépend :

- **des conditions géographiques** : centrales hydrauliques, centrales marémotrices,
- **des contraintes d'approvisionnement en combustible** : centrales thermiques classiques,
- **des contraintes d'alimentation en eau de refroidissement** : centrales thermiques classiques et nucléaires.

Pour assurer :

- la mise en commun de tous les moyens de production,
- le transit de puissance entre ces moyens de production et l'ensemble des utilisateurs, il faut mettre en œuvre un réseau de lignes électriques et de postes de transformation : c'est le **réseau général**.



■ RÉSEAU DE TRANSPORT ET D'INTERCONNEXION

À la sortie des centrales de production, l'énergie électrique est portée à très haute tension (THT) afin de limiter les pertes par effet Joule et satisfaire les demandes de plus en plus importantes en quantité d'énergie.

Les lignes de transport se répartissent en deux niveaux principaux de tension :

- la très haute tension à 225 kV et 400 kV ; ces lignes constituent le **réseau national dit de grand transport et d'interconnexion**,
- la haute tension à 90 kV et 63 kV dont les lignes servent à répartir l'énergie au niveau régional à partir des grands postes THT.

Les lignes THT du réseau national de transport sont interconnectées au sein de postes dont les transforma-

teurs assurent la continuité entre lignes de tensions différentes. Ces postes, dits postes d'interconnexion : assurent le **maillage du réseau** ce qui permet à l'énergie d'arriver à son point de destination quel que soit l'itinéraire emprunté, et permettent les **échanges d'énergie** entre les régions, entre la France et l'étranger.

■ RÉSEAU DE DISTRIBUTION

Les abonnés d'EDF utilisent l'énergie électrique en basse tension (BT). Ils peuvent être livrés :

- **directement en BT** (230/400V), c'est le cas des utilisateurs dont la puissance n'excède pas 250 kVA,
- **par l'intermédiaire d'un poste de livraison MT/BT** (20 kV/400 V), utilisateurs dont la taille s'échelonne de 250 à 10 000 kVA.

Fonctions

- 19 Principe de la conversion d'énergie**
- 20 Redressement**
- 21 Modulation d'énergie. Redresseur commandé et gradateur**
- 22 Commutation. Amplification**
- 23 Saisie des informations. Traitement des données**

19 Principe de la conversion d'énergie

ÉLECTROTECHNIQUE

1 Convertisseurs statiques d'énergie

Il existe quatre familles de convertisseurs (fig. 19.02) :

- les convertisseurs alternatif-continu : **redresseurs simples et commandés**,
- les convertisseurs continu-alternatif : **onduleurs**,
- les convertisseurs alternatif-alternatif : **gradateurs**,
- les convertisseurs continu-continu : **hacheurs**.

Un convertisseur modifie tout ou partie des grandeurs électriques de l'énergie disponible pour l'adapter à l'utilisation (fig. 19.01).

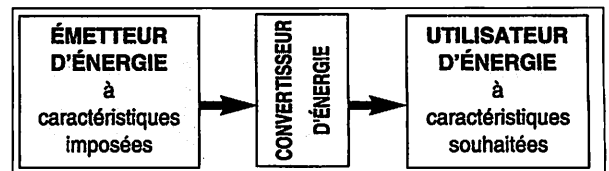


Fig. 19.01 : Fonction conversion d'énergie.

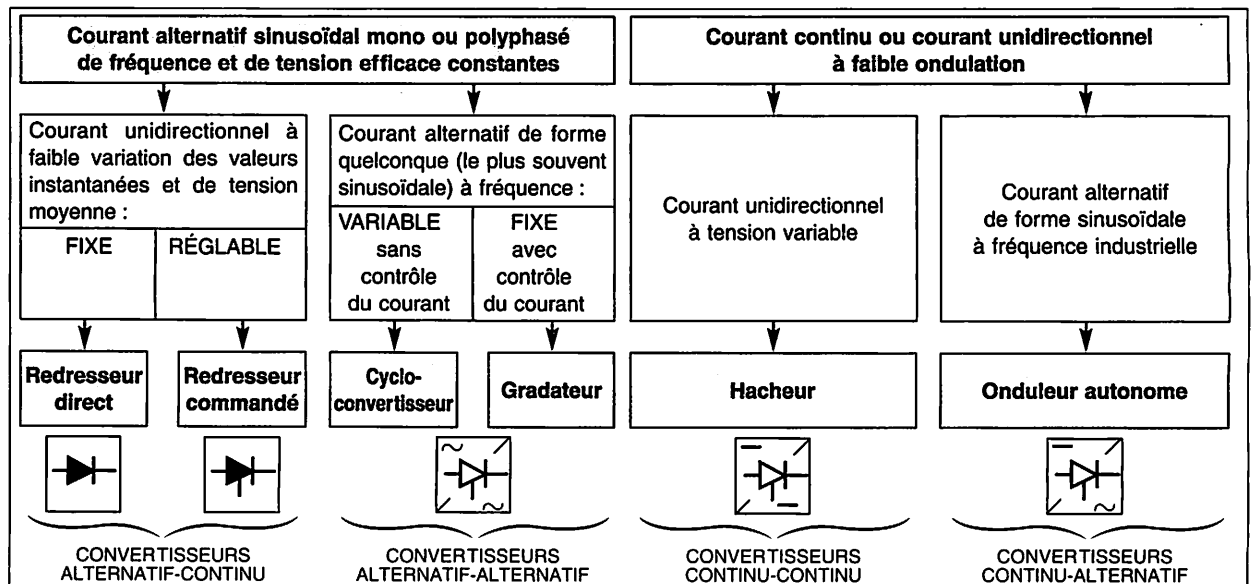


Fig. 19.02 : Panorama des convertisseurs statiques.

2 Structure générale d'un convertisseur

Un convertisseur statique d'énergie est constitué par :

- un dispositif de commutation de puissance,
- un circuit de commande (fig. 19.03).

Le dispositif de commutation met en jeu des composants électroniques capables d'établir ou d'interrompre statiquement une connexion entre deux points d'un montage.

Ces commutateurs électroniques sont : **la diode, le transistor, le thyristor et le triac.**

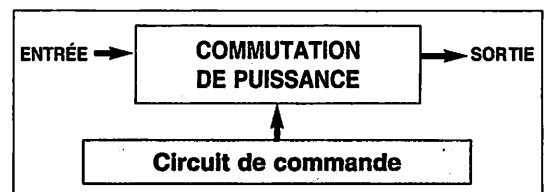


Fig. 19.03 : Structure d'un convertisseur.

20 Redressement

ÉLECTROTECHNIQUE

1 Diode à jonction

Une diode à jonction est un dipôle constitué par la jonction d'une zone P et d'une zone N créées dans un cristal de semi-conducteur.
L'électrode reliée à la zone P est l'anode (A).
L'électrode reliée à la zone N est la cathode (K).

La figure 20.01 représente le symbole et la caractéristique $I = f(U_{AK})$ d'une diode à jonction.

• Diode polarisée en direct ($U_{AK} > 0$)

Pour $U_{AK} < 0,5$ V, le courant I est nul, la diode est bloquée.

Pour $0,5$ V $< U_{AK} < 0,7$ V, la diode commence à conduire. Cette partie courbe de la caractéristique est appelée **zone du coude**.

Pour $U_{AK} > 0,7$ V, la diode est débloquée, la caractéristique est linéaire et a pour équation :

$$U_{AK} = U_0 + r_D I$$

U_{AK}, U_0 en volts,
 r_D en ohms,
 I en ampères.

La tension U_0 est la **tension de seuil de la diode**.

r_D est la résistance dynamique, c'est le quotient :

$$r_D = \frac{\Delta U_{AK}}{\Delta I}$$

• Diode polarisée en inverse ($U_{AK} < 0$)

Le courant I est pratiquement nul, la diode est bloquée.

■ DIODE IDÉALE

Une diode idéale possède les qualités suivantes :

- **polarisée en direct**, la tension à ses bornes est nulle, elle est équivalente à un **interrupteur fermé**;
- **polarisée en inverse**, elle n'est parcourue par aucun courant, elle est équivalente à un **interrupteur ouvert**.

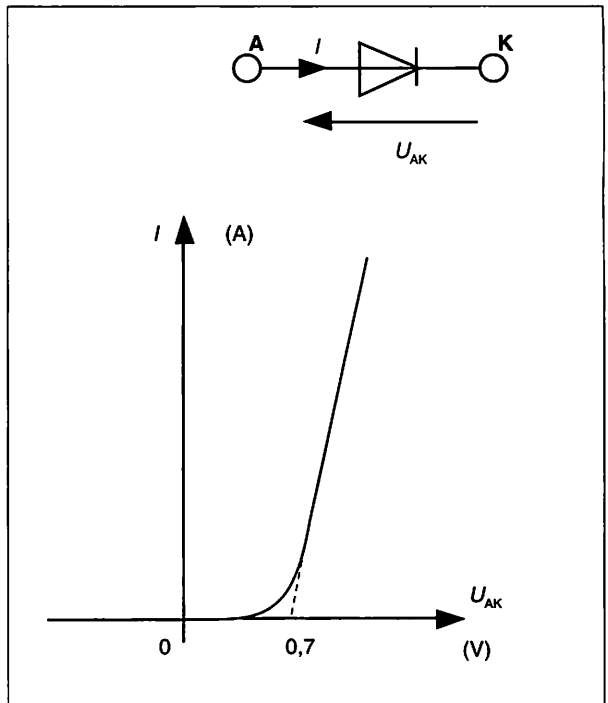


Fig. 20.01 : Symbole et caractéristique d'une diode.

Remarques :

- La valeur du seuil de tension U_0 est d'environ :
 - 0,7 V pour le silicium,
 - 0,3 V pour le germanium.

• Lorsqu'une diode est polarisée en inverse, à partir d'une certaine tension, le courant, qui était nul, croît brusquement.

Ce phénomène est appelé **claquage inverse**.

Le claquage n'est pas forcément destructif si le courant inverse est limité par une résistance insérée dans le circuit.

La **tension de claquage inverse** est une caractéristique de la diode.

2 Diode Zéner

Une diode Zéner, polarisée en direct, est équivalente à une diode à jonction. Polarisée en inverse, la diode Zéner conduit lorsque la tension inverse est supérieure à la tension de Zéner U_Z .

La caractéristique et le symbole d'une diode Zéner sont représentés à la figure 20.02.

Lorsque la diode conduit en inverse, sa caractéristique est linéaire, d'équation :

$$U_{KA} = U_Z + r_z I$$

U_{KA}, U_Z en volts,
 r_z en ohms,
 I en ampères.

r_z est la résistance dynamique inverse.

Remarques

- La valeur de la résistance r_z est généralement indiquée par les constructeurs. Sa valeur est relativement faible, de l'ordre de quelques ohms.
- Si la résistance dynamique r_z est négligée, la tension aux bornes de la diode est constante, quel que soit le courant qui la traverse. La diode Zéner est alors idéale.

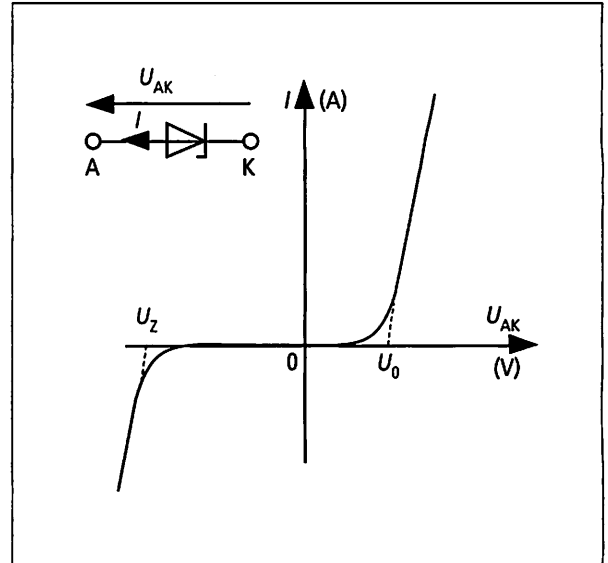


Fig. 20.02 : Caractéristique et symbole d'une diode Zéner.

3 Redressement monophasé

Le redressement consiste à transformer la tension alternative du réseau d'alimentation en une tension unidirectionnelle appelée tension redressée.

La fonction redressement (fig. 20.03) est utilisée dans différents domaines :

- en **faible puissance**, quelques centaines de watts, pour l'alimentation de montages électroniques,
- en **puissance moyenne**, jusqu'à une dizaine de kW, à partir du secteur monophasé, pour l'alimentation des systèmes de l'électronique de puissance,
- en **forte puissance**, plusieurs dizaines de kW, à partir du secteur triphasé, pour des applications métallurgiques ou ferroviaires.

■ REDRESSEUR À UNE DIODE (FIG. 20.04)

Un redresseur à une diode permet d'obtenir une tension redressée monoalternance.

La diode laisse passer le courant dans la charge durant l'alternance positive de u , le bloque durant l'alternance négative. Aux bornes de la charge, on obtient une tension redressée monoalternance (fig. 20.05).

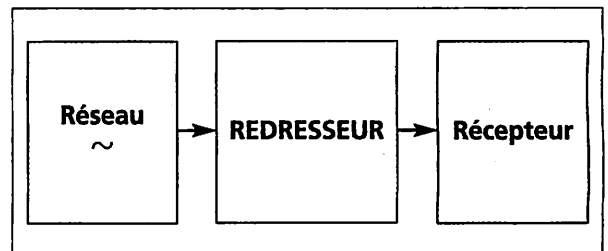


Fig. 20.03 : Fonction redressement.

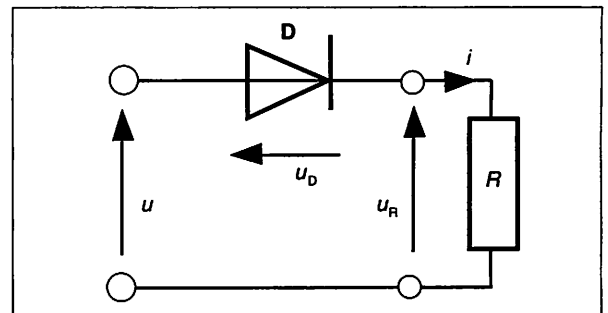


Fig. 20.04 : Redresseur monoalternance.

Les tensions obtenues après redressement sont inférieures aux valeurs de u . Cette différence est due à la chute de tension dans la diode :

$$U_{AK} = U_0 + r_D I.$$

En négligeant la valeur de r_D , $U_{AK} = U_0$, et la valeur de u_R est égale, durant l'alternance positive, à (fig. 20.05) :

$$u_R = u - U_0.$$

En négligeant le seuil de la diode, la tension redressée a la même valeur maximale que la tension d'alimentation.

$$\hat{U}_R \approx \hat{U}$$

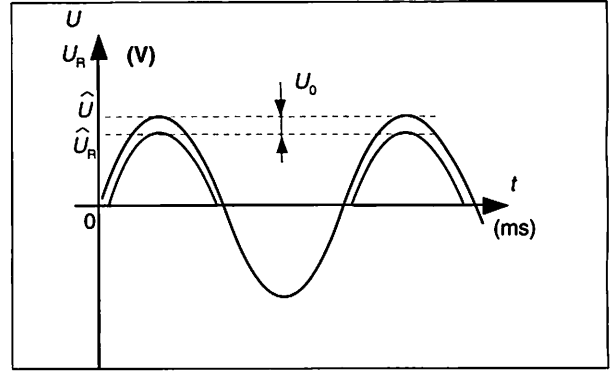


Fig. 20.05 : Tension redressée monoalternance.

■ REDRESSEUR À DEUX DIODES ET TRANSFORMATEUR À POINT MILIEU

Le redresseur à deux diodes et transformateur à point milieu permet d'obtenir une tension redressée bialternance.

Le secondaire du transformateur possède trois bornes, les deux extrémités **A** et **B** et le point milieu **M**.

Soit u la tension totale entre **A** et **B** :

- la tension entre **M** et **A** vaut : $u_1 = \frac{u}{2}$
- la tension entre **M** et **B** vaut : $u_2 = -\frac{u}{2} = -u_1$.

Les deux tensions obtenues u_1 et u_2 sont en **opposition de phase**.

Durant l'**alternance positive** de u : (fig. 20.06).

- u_1 est positive, **D₁ conduit**;
- u_2 est négative, **D₂ est bloqué**.

La tension aux bornes de la charge R est égale à :

$$u_R \approx u_1 = \frac{u}{2}.$$

Durant l'**alternance négative** de u :

- u_1 est négative, **D₁ est bloqué**;
- u_2 est positive, **D₂ conduit**.

$$u_R \approx u_2 = -\frac{u}{2}.$$

Pendant cette alternance négative de u la tension aux bornes de la charge reste toujours positive.

En négligeant la tension de seuil de la diode, la tension aux bornes de la charge peut s'écrire :

$$u_R = \left| \frac{u}{2} \right|$$

La tension u_R est redressée bialternance (fig. 20.07).

Remarque :

À chaque alternance, la diode qui ne conduit pas est soumise à la tension inverse u . Celle-ci ne doit pas dépasser la tension de claquage de la diode.

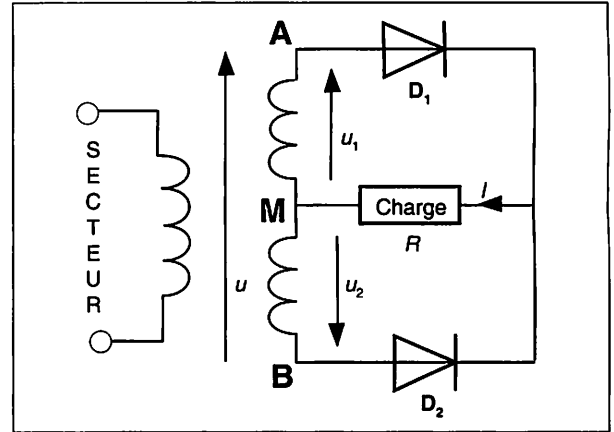


Fig. 20.06 : Redresseur bi-alternance.

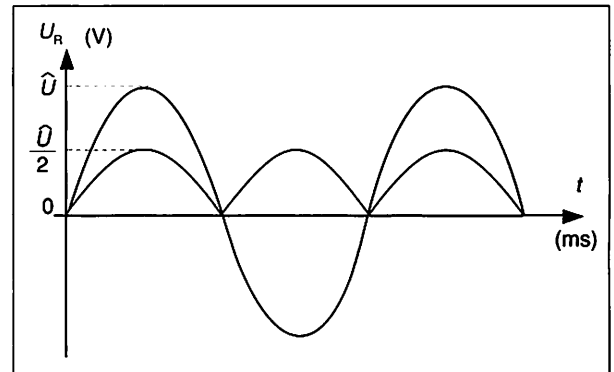


Fig. 20.07 : Tension redressée bi-alternance.

Exemple :

Le secondaire du transformateur à point milieu délivre une tension de 2×230 V.

La valeur maximale de la tension redressée est au seuil de tension des diodes près égale à :

$$\hat{U}_R = \hat{U}_1 = 230 \sqrt{2} \text{ soit } \hat{U}_R = 325 \text{ V.}$$

Chaque diode doit supporter une tension inverse égale à :

$$\hat{U}_{INV} = \hat{U} = 2\hat{U}_1 \text{ soit } \hat{U}_{INV} = 650 \text{ V.}$$

■ REDRESSEUR EN PONT DE GRAËTZ OU PONT PD2

Le redresseur en pont de Graëtz permet d'obtenir une tension redressée bialternance.

Le redresseur en pont de Graëtz nécessite quatre diodes.

Pendant l'alternance positive de u (fig. 20.08), les diodes D_1 et D_4 conduisent, les diodes D_2 et D_3 sont bloquées.

La tension aux bornes de la charge vaut pratiquement u . $u_R = u$.

Pendant l'alternance négative de u , l'inverse se produit : D_1 et D_4 sont bloquées, D_2 et D_3 conduisent. La tension aux bornes de la charge, égale à $-u$ reste toujours positive :

$$u_R = -u.$$

La tension aux bornes de la charge R peut s'écrire, en négligeant le seuil de tension des diodes :

$$u_R = |u|$$

Le redressement obtenu est bialternance.

La différence de tension entre la tension redressée et la tension d'alimentation u de la figure 20.09 est due aux seuils de tension des diodes :

$$u_R = |u| - 2U_0.$$

Remarque :

La tension inverse supportée par chaque diode lorsqu'elle est bloquée est égale à la tension u .

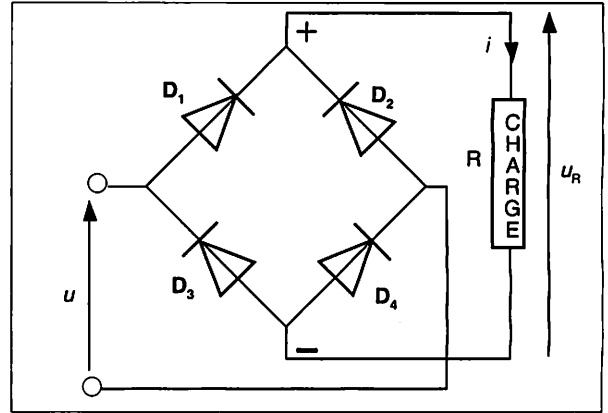


Fig. 20.08 : Redresseur en pont de Graëtz.

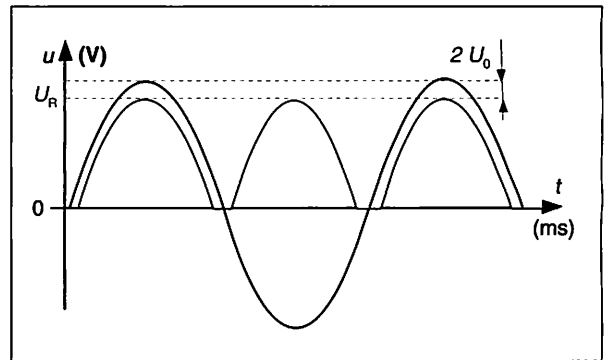


Fig. 20.09 : Tension redressée bialternance.

4 Redressement triphasé

■ REDRESSEMENT SIMPLE ALTERNANCE

Un redresseur triphasé simple alternance est constitué de trois diodes montées sur chaque fil de phase (fig. 20.10).

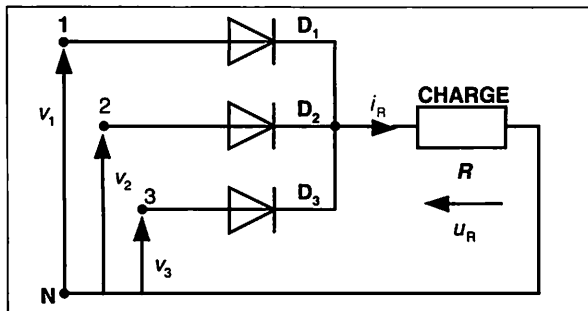


Fig. 20.10 : Redressement triphasé simple alternance.

Chaque diode conduit lorsque le potentiel de son anode est supérieur à celui de sa cathode, soit, comme l'indique la figure 20.11, durant le tiers de la période.

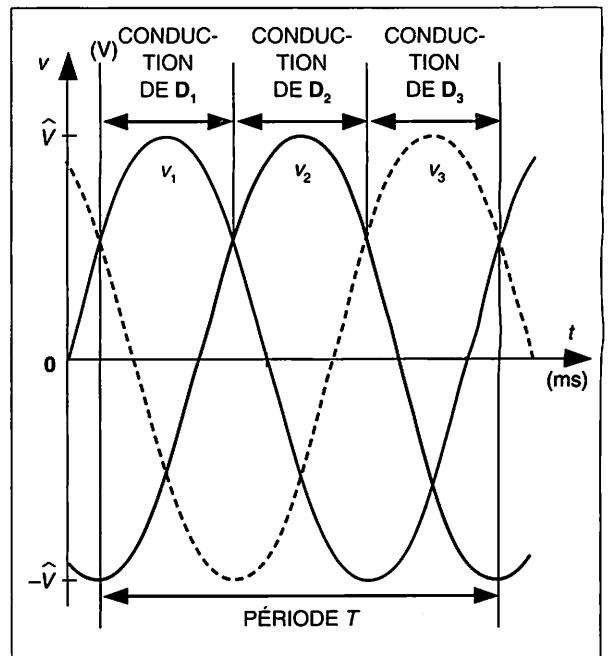


Fig. 20.11 : Conduction des diodes.

Comme l'indique la figure 20.12, la tension aux bornes de la charge varie entre les valeurs :

$$\hat{U}_R = \hat{V} \text{ et } \check{U}_R = \frac{\hat{V}}{2}$$

avec \hat{V} : valeur maximale de la tension simple.
La période du courant redressé est le tiers de la période initiale.
Ainsi le redressement d'une tension de fréquence 50 Hz produit un courant redressé de fréquence 150 Hz.

■ REDRESSEMENT PAR PONT

Le montage en pont de Graëtz triphasé, appelé pont PD3, comporte six diodes.

Dans ce montage (fig. 20.13) :

- trois diodes (D_1, D_2, D_3) ont leur cathode commune correspondant à la borne d'entrée du courant dans la charge,
- trois diodes (D_4, D_5, D_6) ont leur anode commune correspondant à la borne de sortie du courant de la charge.

Les diodes conduisent deux par deux durant le **sixième de la période**.
La tension redressée représentée figure 20.14 varie entre les valeurs :

$$\hat{U}_R = \hat{U} = \hat{V}\sqrt{3} \text{ et } \check{U}_R = 1,5 \hat{V}$$

La période du courant redressé est le sixième de la période initiale.

Exemple :

Le redressement d'une tension triphasée 230 V/400 V fournit à la charge une tension U_R telle que :

$$\hat{U}_R = \hat{U} = 400 \sqrt{2} \text{ soit } \hat{U}_R = 566 \text{ V.}$$

$$\check{U}_R = 1,5 \hat{V} = 1,5 \times 230 \sqrt{2} \text{ soit } \check{U}_R = 488 \text{ V.}$$

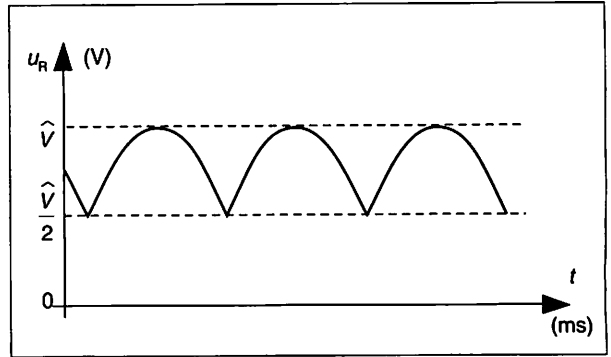


Fig. 20.12 : Tension redressée.

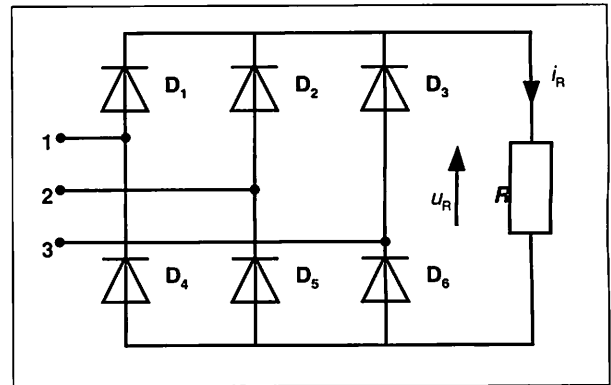


Fig. 20.13 : Redressement par pont triphasé.

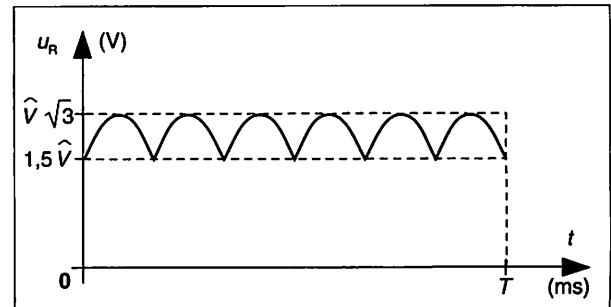


Fig. 20.14 : Tension triphasée redressée par pont PD3.

5 Filtrage d'une tension redressée

Le filtrage d'une tension redressée permet d'augmenter sa valeur moyenne et de diminuer son ondulation.

Après redressement, la tension aux bornes du récepteur de charge est loin d'être continue. Le filtrage a pour but de transformer cette tension redressée en une tension aussi constante que possible.

Un système de filtrage consiste à brancher, à la sortie du redresseur, un condensateur en parallèle avec la charge selon le schéma de la figure 20.15.

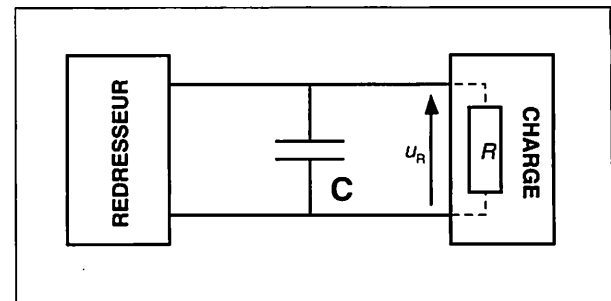


Fig. 20.15 : Condensateur de filtrage.

Dès la première alternance, le condensateur C se charge puis, dès que la tension à ses bornes est supérieure à la tension de sortie du redresseur, il se décharge dans R , ce cycle recommence à chaque alternance. La figure 20.16 illustre ce filtrage avec un condensateur n'atteignant pas la décharge complète entre deux alternances.

La tension filtrée u_R varie entre deux valeurs notées \hat{U} et \check{U} .

La qualité du filtrage est mesurée par l'ondulation :

$$\Delta U = \frac{\hat{U} - \check{U}}{2}$$

L'ondulation dépend des valeurs de C , de R et de la période T de la tension redressée. Elle est d'autant plus faible que le produit $R.C$ est grand devant la période T .

La tension u_R aux bornes de C est toujours positive, un condensateur chimique polarisé mais de forte valeur, peut être utilisé pour C .

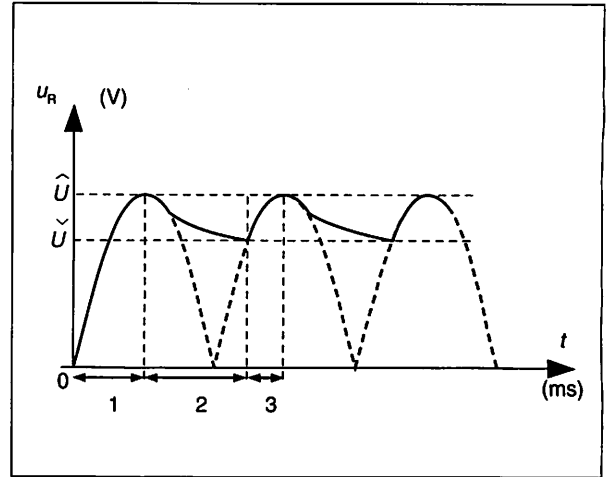


Fig. 20.16 : Phase 1 : Charge de C à la première alternance.
Phase 2 : Décharge de C .
Phase 3 : Charge de C aux alternances suivantes.

6 Stabilisation de tension

Stabiliser une tension consiste à la maintenir constante quelle que soit la consommation de la charge qu'elle alimente.

Les propriétés de la diode Zéner sont utilisées pour réaliser cette fonction.

Le montage de la figure 20.17 est constitué d'une diode Zéner polarisée en inverse et d'une résistance R_p .

Lorsque la diode conduit, la tension à ses bornes reste pratiquement constante et la tension appliquée à la charge R_C est ainsi stabilisée.

La résistance R_p limite l'intensité du courant dans la diode.

■ DOMAINE DE STABILISATION

La diode Zéner utilisée est ici considérée comme parfaite soit $r_z = 0$.

Dans le montage de la figure 20.17, il n'y a pas de stabilisation tant que U_{SM} est inférieure à U_Z . Dans ce cas la diode Zéner ne conduit pas, R_p et R_C forment un diviseur de tension.

$$U_{SM} = U_A \frac{R_C}{R_p + R_C} \quad \text{soit} \quad U_A = U_{SM} \frac{R_p + R_C}{R_C}$$

Il n'y a pas stabilisation tant que :

$$U_{SM} < U_Z \quad \text{soit} \quad U_A < U_Z \cdot \frac{R_p + R_C}{R_C}$$

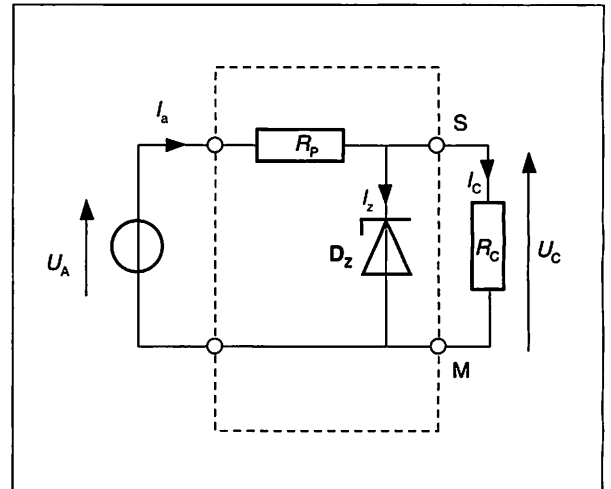


Fig. 20.17 : Montage stabilisateur de tension.

Remarque :

Le courant dans la diode ne doit pas dépasser une certaine valeur $I_{Z\text{MAX}}$ sous peine de destruction de la diode Zéner. Ce courant dans la diode est maximal lorsque la charge est déconnectée.

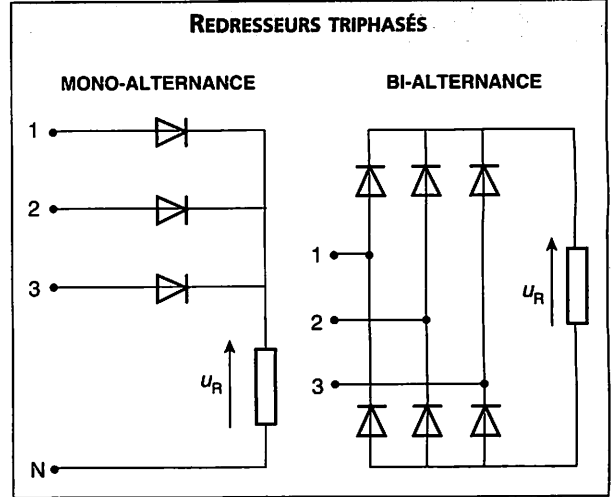
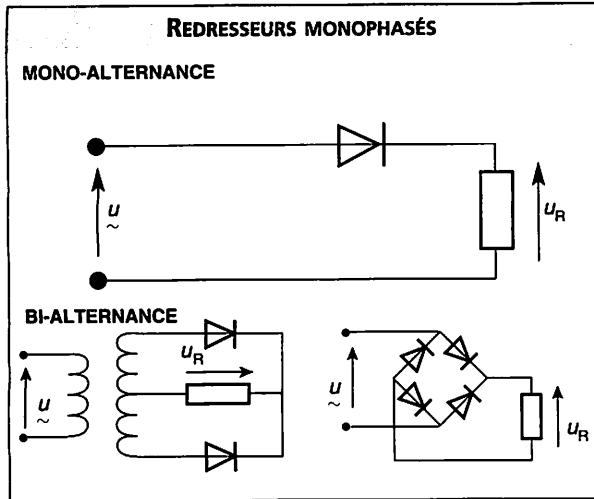
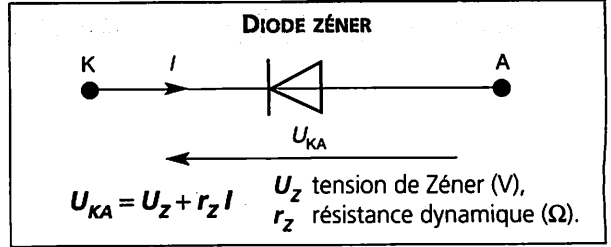
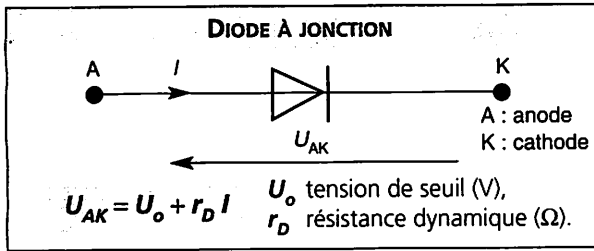
Le courant dans la diode est égal à :

$$I_Z = \frac{U_A - U_Z}{R_p}$$

Il y a risque de destruction lorsque

$$U_A > U_Z + R_p I_{Z\text{MAX}}$$

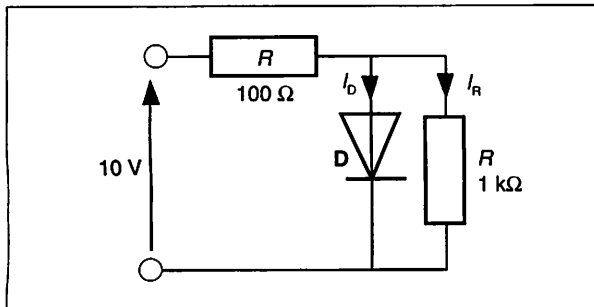
ESSENTIEL À RETENIR



TEST RAPIDE

Les diodes utilisées dans ces applications sont considérées comme parfaites : $U_0 = 0$; $r_D = r_Z = 0$.

T.1 Calculer le courant I_D circulant dans la diode du montage de la figure ci-dessous.



Réponse : 0 mA; 100 mA; 10 mA; 90 mA.

T.2 Calculer le courant I circulant dans chaque résistance du montage de la figure ci-dessus.

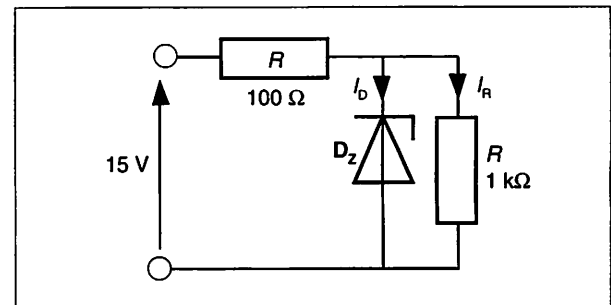
Réponse : 0 mA; 100 mA; 10 mA; 90 mA.

T.3 Un redresseur monophasé à pont de Graëtz est alimenté par une tension alternative de valeur efficace 230 V.

Calculer la tension maximale aux bornes de la charge.

Réponse : $\frac{230}{\sqrt{2}}$ V; 230 V; $230\sqrt{2}$ V.

T.4 Calculer le courant I circulant dans chaque résistance du montage de la figure ci-dessous.



D_Z : diode zéner 10 V.

Réponse : 15 mA; 5 mA; 0 mA; 10 mA.

T.5 Calculer l'intensité I_D circulant dans la diode figure ci-dessus.

Réponse : 40 mA; 5 mA; 0 mA; 50 mA.

EXPÉRIMENTATION

RELEVÉ DE LA CARACTÉRISTIQUE D'UNE DIODE

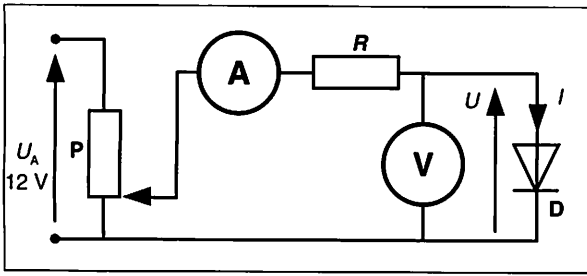
■ TRAVAIL À EFFECTUER

Relever le courant dans une diode de redressement, polarisée en direct, en fonction de la tension à ses bornes. Tracer les caractéristiques : $I = f(U)$

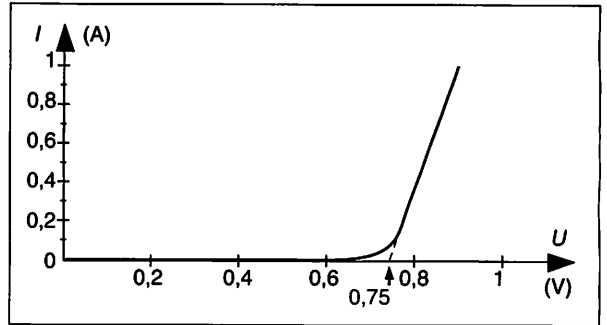
■ SCHÉMA DU MONTAGE ET EXEMPLE DE RÉSULTATS

La diode utilisée est de type 1N4004. D'après le fabricant, le courant qui la traverse ne doit pas dépasser $I_{MAX} = 1 \text{ A}$. Dans le schéma ci-dessous, la résistance R limite le courant dans la diode :

$$R \geq \frac{U_A}{I_{MAX}} \quad \text{soit} \quad R \geq 12 \Omega.$$



$U_{(V)}$	0,67	0,71	0,75	0,79	0,83	0,87	0,91	0,95
$I_{(A)}$	0,02	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1



Le prolongement de la partie rectiligne de la caractéristique coupe l'axe horizontal à la valeur du seuil de tension :

$$U_D = 0,75 \text{ V.}$$

La résistance dynamique, dans la partie linéaire est égale à :

$$r_D = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{0,95 - 0,83}{1 - 0,4} \quad \text{soit} \quad r_D = 0,2 \Omega.$$

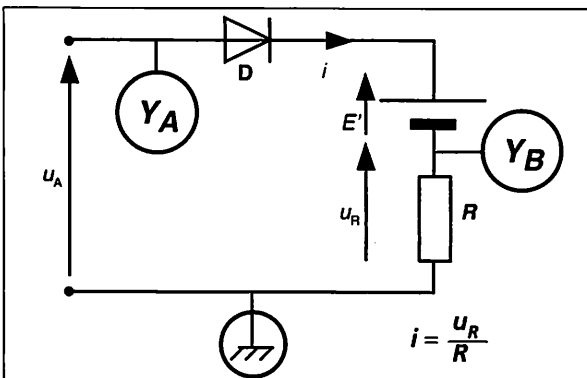
REDRESSEMENT SUR F.C.E.M.

■ TRAVAIL À EFFECTUER

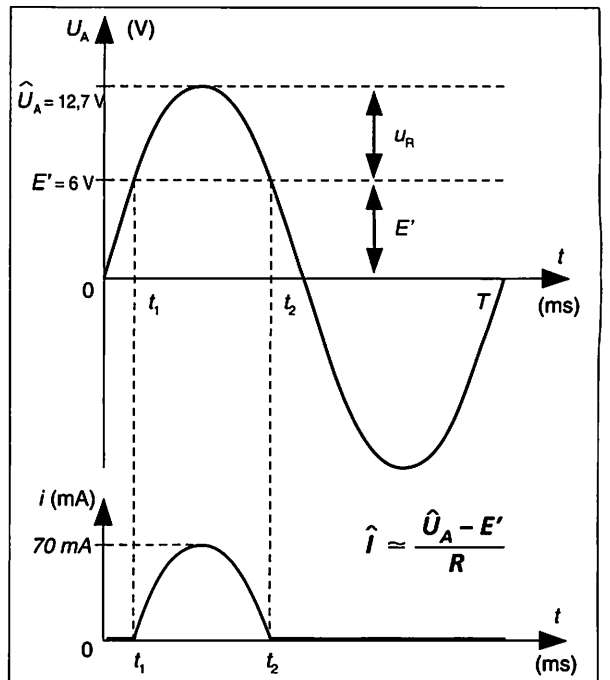
Alimenter un récepteur actif de type batterie d'accumulateurs en charge par un redresseur mono-alternance. Relever l'oscillogramme représentant le courant de charge en fonction du temps.

■ SCHÉMA DU MONTAGE ET EXEMPLE DE RÉSULTATS

La batterie d'accumulateurs en charge a pour f.c.e.m. 6 V et une résistance interne négligeable. Elle est alimentée par le redresseur à une diode à travers la résistance $R = 100 \Omega$.



La tension d'alimentation est alternative, de valeur efficace 9 V.



APPLICATIONS

EXERCICE RÉSOLU

Énoncé

Dans le montage stabilisateur ci-contre, la diode Zéner est considérée comme parfaite, de tension de Zéner $U_z = 5 \text{ V}$.

a. On fixe :

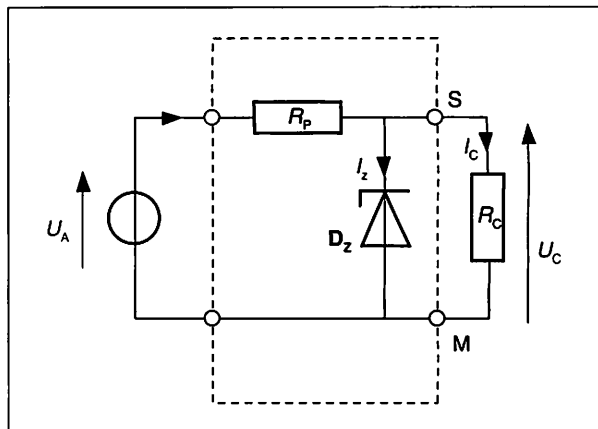
$$U_A = 12 \text{ V}; R_p = 100 \Omega; R_c = 100 \Omega.$$

Calculer le courant dans R_p , R_c et la diode.

Déterminer la valeur minimale de U_A pour qu'il y ait stabilisation.

b. On fixe : $U_A = 12 \text{ V}; R_p = 100 \Omega$.

Calculer la valeur minimale de R_c qui maintient U_c stabilisée.



Méthode :

a. Appliquer la loi d'ohm aux résistances R_p et R_c .

• Appliquer la loi des nœuds pour calculer I_z .

b. Rechercher la tension U_A qui annule I_z .

• Rechercher la valeur de R_c qui annule I_z .

Solution proposée :

a. Le courant dans R_p est égal à :

$$I_A = \frac{U_A - U_z}{R_p} \text{ soit } I_A = 70 \text{ mA.}$$

Dans R_c : $I_c = \frac{U_z}{R_c}$ soit $I_c = 50 \text{ mA}$.

D'où : $I_z = I_A - I_c$ soit $I_z = 20 \text{ mA}$.

La stabilisation disparaît lorsque la diode zéner ne conduit plus : $I_z = 0$

On a alors : $I_c = I_A$ soit $\frac{U_A - U_z}{R_p} = 50 \text{ mA}$.

D'où : $U_A = 10 \text{ V}$.

b. Lorsque $U_A = 12 \text{ V}$, le courant dans R_p est égal à $I_A = 70 \text{ mA}$.

La stabilisation cesse lorsque $I_c = I_A$.

soit : $\frac{U_z}{R_c} = 70 \text{ mA}$ d'où $R_c = 71 \Omega$.

Remarques :

Le courant I_A se divise en I_c et I_z .

La tension U_A doit maintenir un courant I_A supérieur ou égal à I_c .

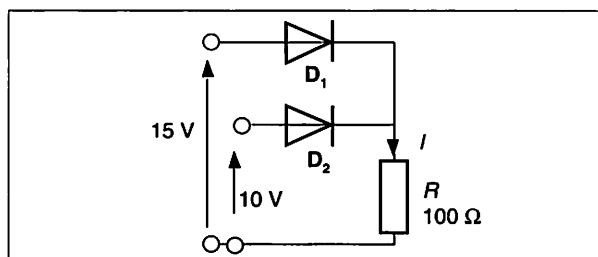
EXERCICES À RÉSOUDRE

E. 1 La tension au secondaire d'un transformateur a pour valeur efficace 24 V. Elle est redressée par un pont de diodes (ou pont de Graëtz) afin d'alimenter une résistance $R = 100 \Omega$.

- Représenter le schéma du montage.
- Calculer la valeur maximale de la tension redressée.
- La tension redressée est-elle mono ou bi-alternance ?

E. 2 Une diode Zéner idéale de tension de zéner 10 V est placée en série avec un voltmètre de calibre 5 V. Une tension de 12 V est appliquée aux bornes de l'ensemble. Déterminer l'indication du voltmètre.

E. 3 Dans le montage de la figure ci-après, les diodes sont considérées comme parfaites. Déterminer l'intensité du courant dans la résistance R.



21 Modulation d'énergie. Redresseur commandé et gradateur

ÉLECTROTECHNIQUE

1 Le thyristor

Le thyristor est un redresseur dont la conduction peut être commandée.

Le thyristor comporte 3 électrodes (fig. 21.01) :

- l'anode **A**,
- la cathode **K**,
- la gâchette **G**.

Le montage de la figure 21.02 illustre le fonctionnement du **thyristor polarisé en direct**.

À la mise sous tension, le poussoir K étant relâché, la charge n'est pas alimentée. **Le thyristor ne conduit pas.**

Une pression sur le poussoir K injecte un **courant dans la gâchette** qui entraîne la **conduction du thyristor**.

En relâchant le poussoir K, **le thyristor reste passant** même après la disparition du courant de gâchette.

Polarisé en inverse, le thyristor ne conduit pas.

L'amorçage est le passage du thyristor de l'état bloqué à l'état passant.

L'amorçage par courant de gâchette consiste à **injecter une impulsion de courant dans la gâchette du thyristor** (fig. 21.03).

L'impulsion de courant doit présenter un flanc de montée raide et une durée suffisante pour que le courant principal puisse atteindre la valeur du courant d'accrochage.

Remarque :

La commutation du thyristor de l'état passant vers un de ses deux états bloqués s'effectue grâce à la **fonction extinction** ou **désamorçage**.

Désamorcer un thyristor consiste à **supprimer son courant principal I_A** .

La suppression du courant principal peut être obtenue de **manière naturelle**; ainsi en courant alternatif, le thyristor se bloque spontanément à l'**alternance négative**.

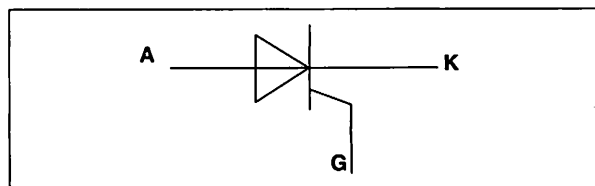


Fig. 21.01 : Constitution et symbole d'un thyristor.

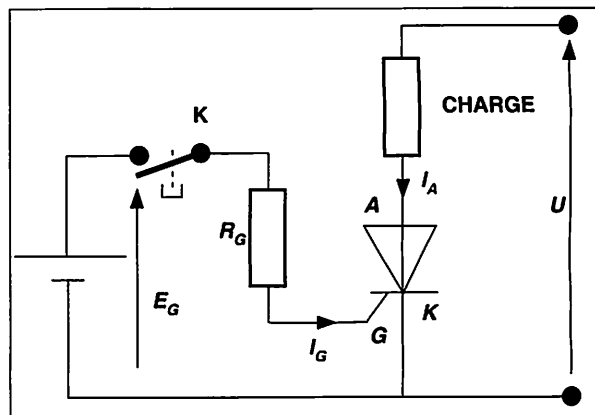


Fig. 21.02 : Fonctionnement du thyristor.

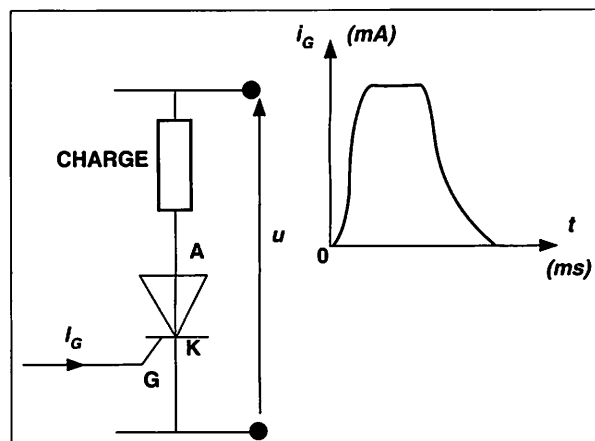


Fig. 21.03 : Amorçage par courant de gâchette.

2 Redresseur commandé

Le redresseur commandé assure la conversion et la modulation de l'alternatif au continu.

Le redresseur commandé s'intercale entre le réseau alternatif et un récepteur de courant continu : moteur, accumulateur en charge, ... (fig. 21.04).

Un redresseur commandé est réalisé en substituant des **thyristors** aux diodes d'un montage redresseur.

L'action sur la **durée de conduction** des thyristors permet la **variation de la tension moyenne redressée**.

La commande d'un tel redresseur est constituée par un **générateur d'impulsion**. Ces impulsions de courant, appliquées à la gâchette produisent l'**amorçage** des thyristors.

■ REDRESSEUR MONO-ALTERNANCE

Dans le montage de la figure 21.05, le générateur de commande injecte une **impulsion de courant dans la gâchette** à chaque alternance de la tension à redresser.

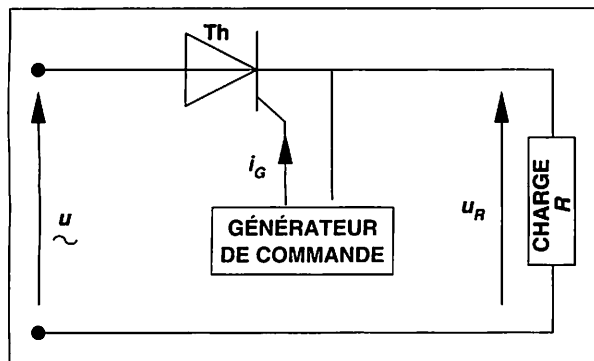


Fig. 21.05 : Redressement commandé mono-alternance.

Le thyristor **Th s'amorce** durant l'alternance positive, à l'instant t_1 , date de l'impulsion.

Il se désamorce à la fin de l'alternance positive et reste bloqué durant l'alternance négative : l'impulsion de commande est sans effet durant cette alternance (fig. 21.06).

Ce cycle se reproduit à chaque période.

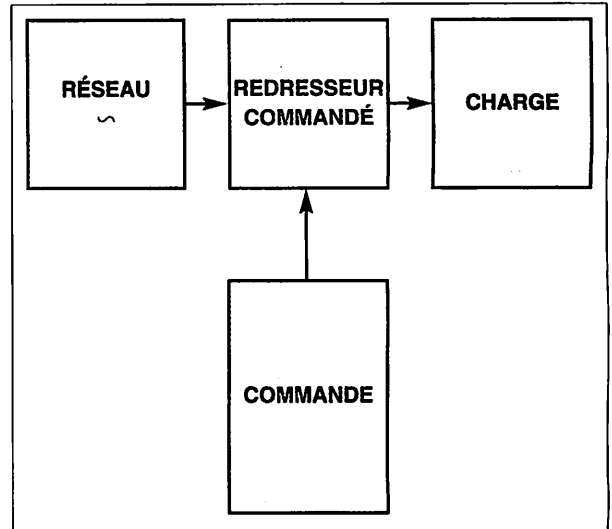


Fig. 21.04 : Utilisation du redresseur commandé.

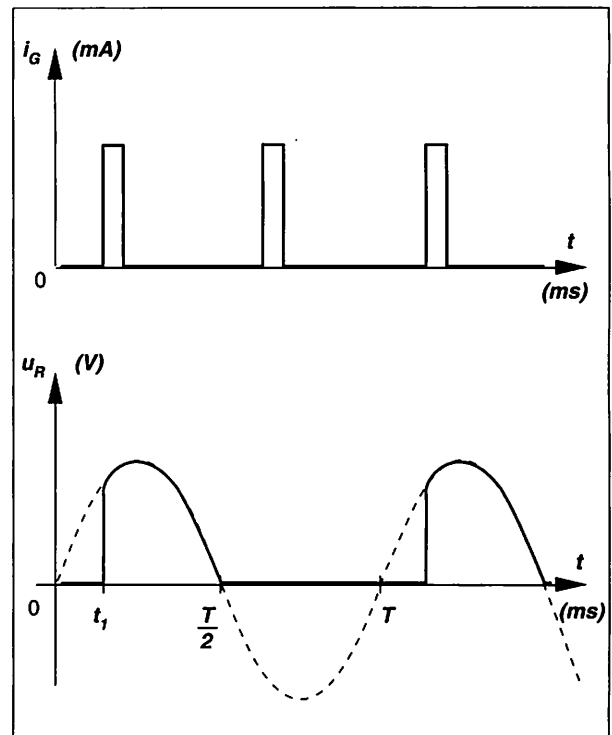


Fig. 21.06 : La conduction du thyristor est commandé par le courant de gâchette.

Le fonctionnement du redresseur commandé est défini par :

– l'angle de retard à l'amorçage α correspondant, à l'instant t_1 , à la relation :

$$\alpha = \omega t_1 = 2\pi f t_1$$

– l'angle d'ouverture φ correspondant à la durée $(T/2 - t_1)$ de conduction du thyristor :

$$\varphi = \pi - \alpha.$$

La tension moyenne aux bornes de la charge est fonction de l'angle de retard (fig. 21.07) :

$$\bar{U}_R = \frac{\hat{U}}{2\pi} (1 + \cos \alpha)$$

Exemples :

Le montage de la figure 21.05 est alimenté par le réseau 230 V, 50 Hz. L'impulsion d'amorçage est décalée de $t_1 = 2,5$ ms par rapport au début de la sinusoïde :

L'angle de retard à l'amorçage est :

$$\alpha = \omega t_1 = 2\pi \times 50 \times 2,5 \times 10^{-3}$$

$$\text{soit } \alpha = 0,25\pi = \frac{\pi}{4} \text{ rad}$$

La valeur moyenne de la tension redressée est égale à :

$$\bar{U}_R = \frac{\hat{U}}{2\pi} (1 + \cos \alpha) = \frac{230\sqrt{2}}{2\pi} \left(1 + \cos \frac{\pi}{4}\right)$$

$$\text{soit } \bar{U}_R = 88,4 \text{ V.}$$

■ REDRESSEUR BI-ALTERNANCE

Le redressement commandé bi-alternance s'effectue à partir d'un montage en pont de Graëtz dans lequel des diodes sont remplacées par des thyristors.

Le montage de la figure 21.08 représente un pont redresseur mixte PD2 symétrique où deux thyristors sont substitués à deux diodes.

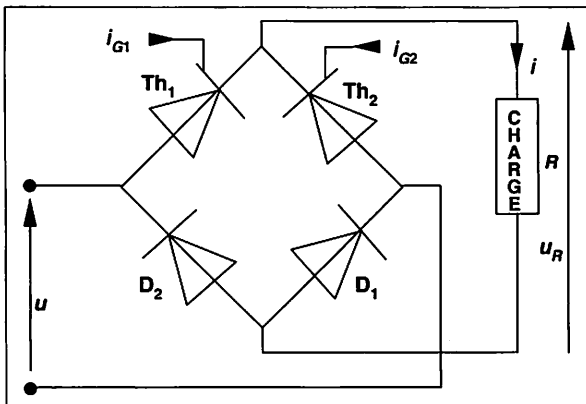


Fig. 21.08 : Pont mixte symétrique.

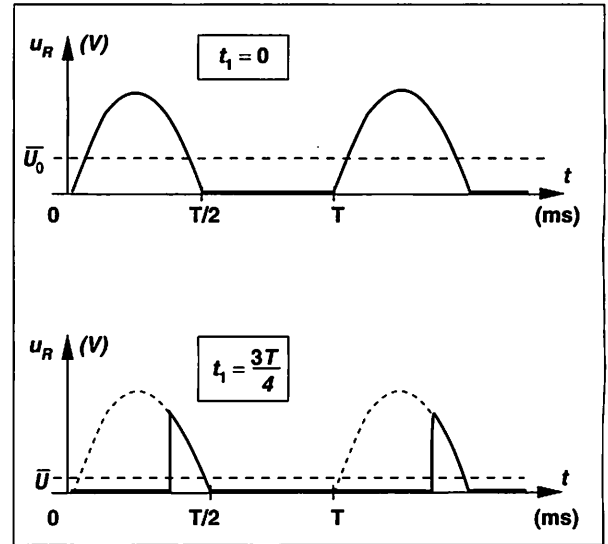


Fig. 21.07 : La valeur moyenne de la tension redressée dépend de l'instant d'amorçage.

Remarque :

Si $\alpha = 0$, la tension moyenne appliquée à la charge est la même que celle obtenue par un redressement mono-alternance à diodes :

$$\bar{U}_R = \frac{\hat{U}}{2\pi} (1 + \cos 0) \text{ soit } \bar{U}_R = \frac{\hat{U}}{\pi}.$$

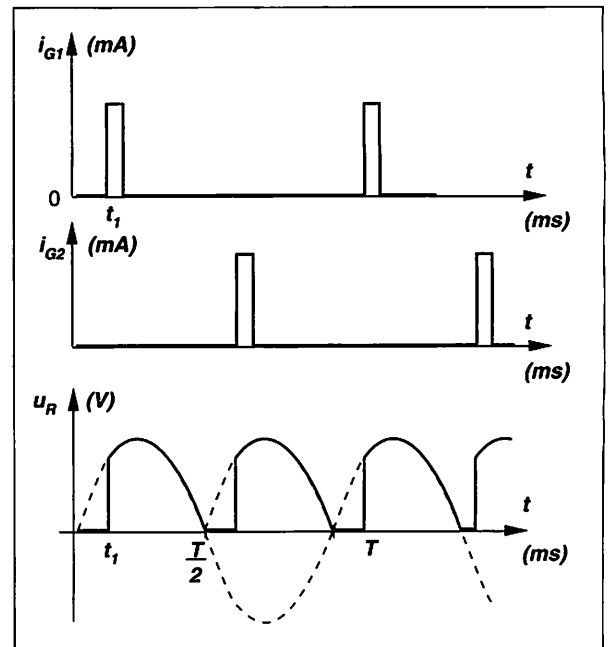


Fig. 21.09 : Les thyristors conduisent pendant une partie de chaque alternance.

Les thyristors sont amorcés par l'envoi d'une impulsion de courant dans la gâchette à chaque alternance.

Dans un pont symétrique :

– pendant l'alternance positive, Th_1 et D_1 conduisent après l'impulsion de gâchette, Th_2 et D_2 sont bloqués ;

– pendant l'alternance négative Th_2 et D_2 conduisent après l'impulsion de gâchette, Th_1 et D_1 sont bloqués.

Lorsque l'instant d'amorçage t_1 coïncide avec le début de la sinusoïde ($t_1 = 0$) la tension appliquée à la charge est identique à celle obtenue par un redressement bi-alternance à diodes. Sa valeur moyenne est alors :

$$\bar{U}_0 = \frac{2\hat{U}}{\pi}$$

Pour $0 < t_1 < \frac{T}{2}$, soit $0 < \alpha < \pi$, la valeur moyenne se calcule par la relation :

$$\bar{U}_R = \frac{\hat{U}}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

Cette relation est représentée figure 21.10.

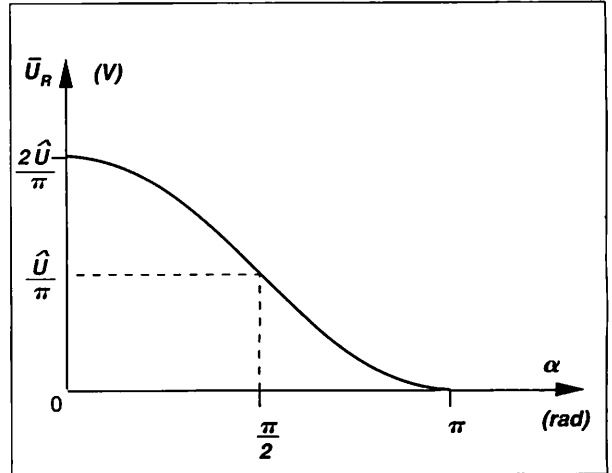


Fig. 21.10 : \bar{U} en fonction de α .

Exemple :

Soit à obtenir une tension moyenne de 50 V à partir du redressement commandé bi-alternance de la tension du réseau 230 V, 50 Hz.

L'angle de retard à l'amorçage est tel que :

$$1 + \cos \alpha = \frac{\bar{U} \pi}{\hat{U}} = \frac{50 \times \pi}{230 \times \sqrt{2}} = 0,48.$$

soit : $\cos \alpha = -0,52$ et $\alpha = 2,1$ rad.

L'impulsion de commande doit être décalée par rapport au début de la sinusoïde du temps t_1 :

$$t_1 = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{2,1}{314} \text{ soit } t_1 = 6,7 \times 10^{-3} \text{ s.}$$

3 Gradateur

Le gradateur assure la conversion et la modulation directe d'alternatif à alternatif.

Alimenté en courant alternatif par le réseau, le gradateur fournit à un récepteur un **courant alternatif de même fréquence mais de valeur efficace réglable** (fig. 21.11).

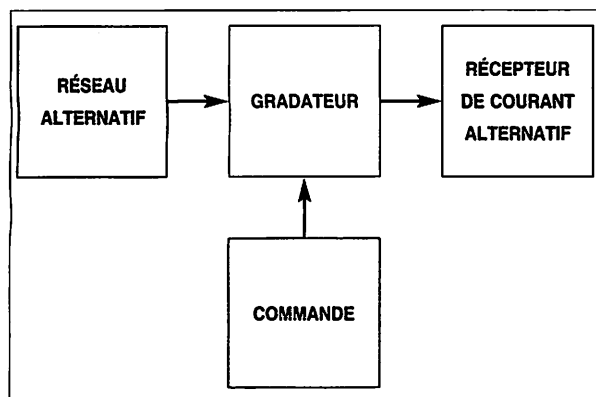


Fig. 21.11 : Utilisation du gradateur.

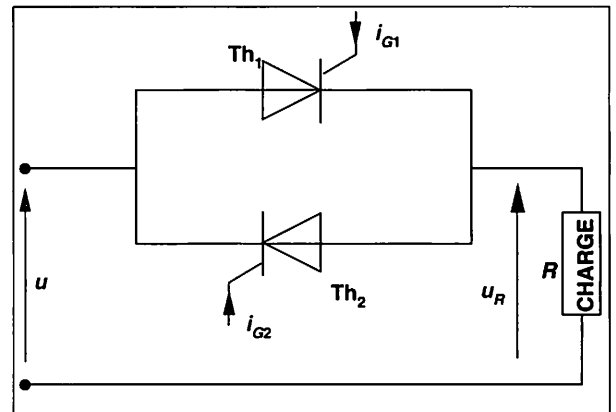


Fig. 21.12 : Gradateur monophasé à thyristor.

Le gradateur de la figure 21.12 utilise deux thyristors identiques montés en parallèle inverse.

■ GRADATEUR PAR DÉPHASAGE

Le réglage de la tension de sortie du gradateur s'effectue par déphasage. Le gradateur alimente la charge durant une partie de chaque alternance.

Pour faire fonctionner **par déphasage** le gradateur de la figure 21.02, le générateur de commande envoie sur la gâchette des thyristors **une impulsion de courant à chaque alternance**.

Le thyristor Th_1 s'amorce durant **l'alternance positive** à l'instant t_1 , date de l'impulsion. Il se désamorce à la fin de l'alternance positive.

Le thyristor Th_2 s'amorce durant **l'alternance négative**, à l'instant $(t_1 + T/2)$ et se désamorce à la fin de cette alternance. La tension aux bornes de la charge est représentée à la figure 21.13.

La **modification de l'instant d'amorçage t_1** entraîne la variation de la valeur efficace de la tension aux bornes de la charge. Comme pour le redressement commandé l'angle de retard à l'amorçage est tel que :

$$\alpha = \omega t_1$$

■ GRADATEUR À TRAINS D'ONDES ENTIÈRES

Un gradateur à trains d'ondes entières permet de régler la puissance moyenne absorbée par la charge en l'alimentant par un nombre entier de périodes durant un cycle.

La commande d'un gradateur **par trains d'ondes** s'effectue en alimentant simultanément les gâchettes des thyristors du montage de la figure 21.12.

Les thyristors Th_1 et Th_2 s'amorcent à chaque alternance **tant que leur gâchette est alimentée**.

La suppression du courant de gâchette entraîne le blocage des thyristors.

En agissant sur le **rapport cyclique du courant de commande**, on peut faire varier la valeur efficace de la tension appliquée à la charge.

Remarque :

Ce type de gradateur est surtout utilisé en **électrochimie** ou pour l'alimentation de **chauffages électriques**.

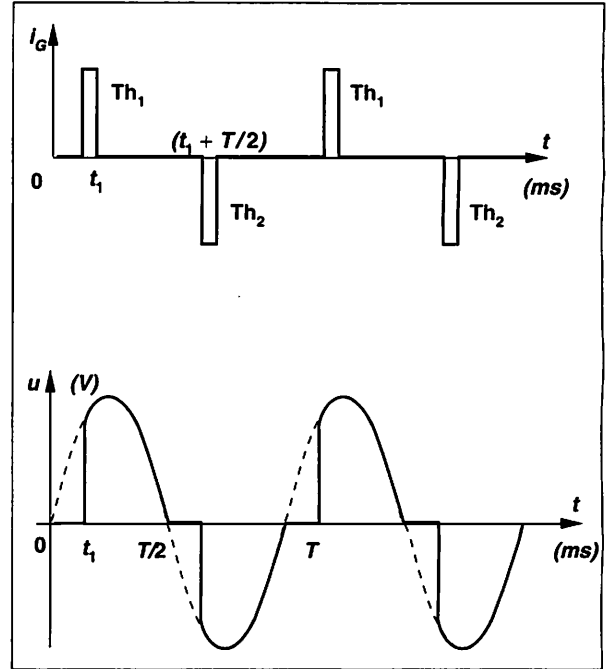


Fig. 21.13 : Tension de sortie et courants de commande d'un gradateur par déphasage.

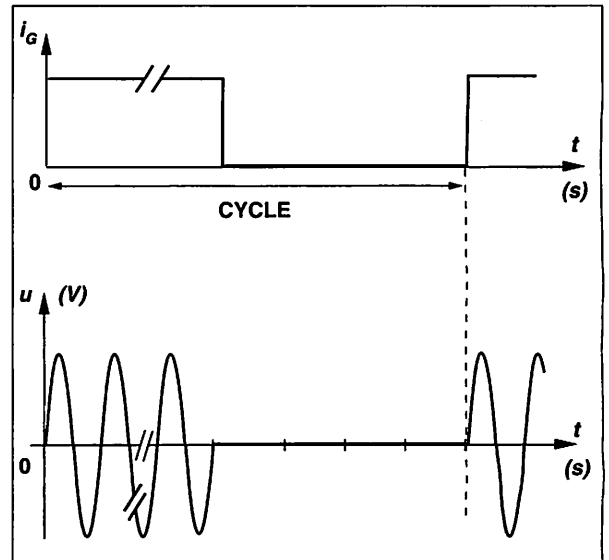


Fig. 21.14 : Tension de sortie et commande d'un gradateur à train d'ondes.

■ TRIAC

Le triac remplace le montage de deux thyristors en parallèle inverse dans les gradateurs de faible puissance.

Le montage tête-bêche ou **anti-parallèle de deux thyristors** classiques permet le contrôle d'un courant alternatif mais impose un système de commande distinct pour chacune des gâchettes des deux composants.

Le **TRIAC** (**TRI**ode for **AL**ternating **C**urrent) assure la même fonction tout en ne comportant qu'une seule gâchette qui permet son amorçage quel que soit le signe de la tension appliquée à ses bornes principales A_1 et A_2 (fig. 21.15).

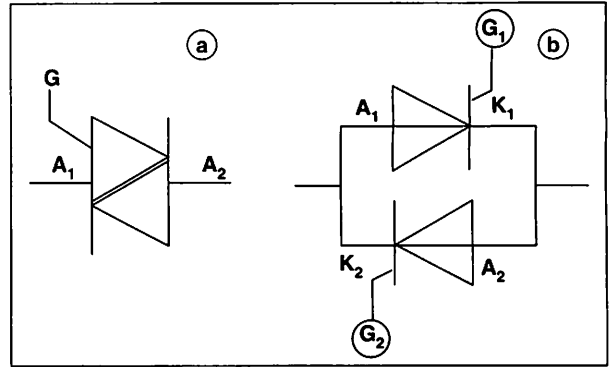


Fig. 21.15 : (a) : symbole du triac, (b) : montage parallèle inverse de deux thyristors.

L'amorçage normal du triac est assuré par des impulsions ou des trains d'impulsions envoyées sur la gâchette.

On distingue quatre modes de déclenchements possibles en fonction (fig. 21.16 et 21.17) :

- du signe de la tension appliquée aux bornes maîtresses A_2 et A_1 ,
- du sens du courant impulsionnel de gâchette.

QUADRANT	1	2	3	4
$V_{A_2-A_1}$	>0	>0	<0	<0
I_{GT}	>0	<0	>0	<0
QUALITÉ	Très bonne	Moyenne	Médiocre	Bonne

Fig. 21.16 : Conditions de signe des modes de déclenchement du TRIAC.

Il faut toujours prévoir le circuit de commande pour le cas le plus défavorable.

■ DIAC

Le **DIAC** (**DI**ode for **AL**ternating **C**urrent) n'est pas, à proprement parlé, un composant de puissance mais il est fréquemment utilisé dans les circuits d'amorçage des TRIACS.

Le DIAC est comparable à un TRIAC **sans gâchette** ; c'est un semi-conducteur à **seuil de tension** qui s'amorce symétriquement pour quelques dizaines de volts puis passe en **régime d'avalanche**.

La figure 21.18 représente le symbole du DIAC.

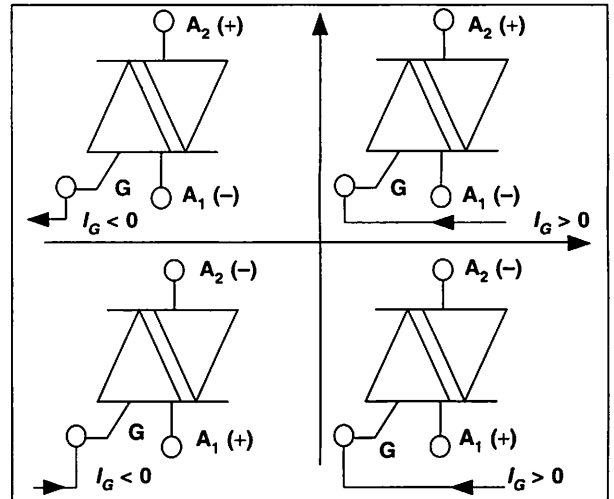


Fig. 21.17 : Modes d'amorçage du TRIAC.

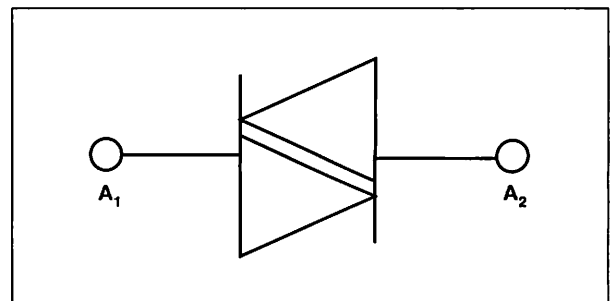


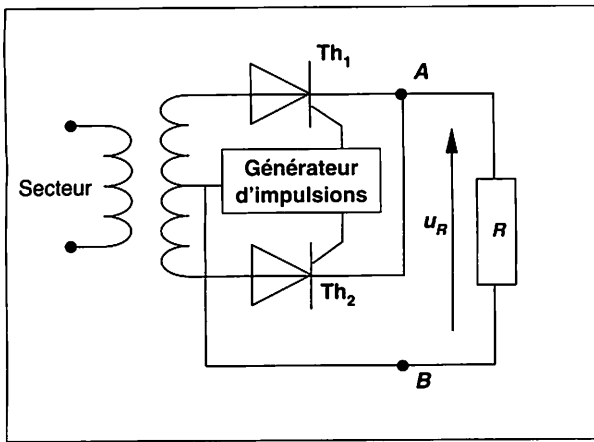
Fig. 21.18 : Symbole du DIAC.

EXPÉRIMENTATION

REDRESSEMENT COMMANDÉ SUR CHARGE RÉSIDIVE

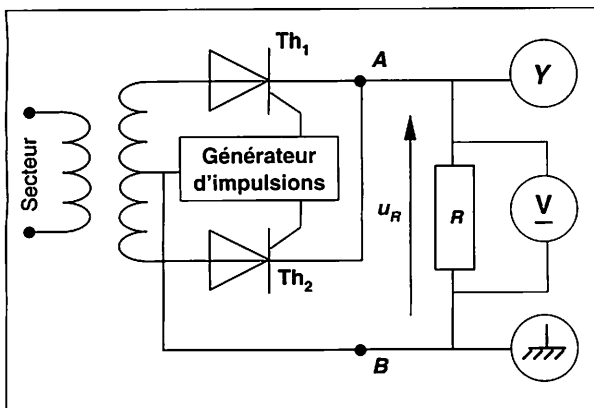
■ TRAVAIL À EFFECTUER

- Compléter le schéma ci-après d'un redresseur commandé à deux thyristors en représentant les appareils qui permettent de mesurer la tension moyenne \bar{U}_R et de visualiser la forme de la tension instantanée u_R aux bornes de la charge R .
- Relever l'oscillogramme de la tension aux bornes de la charge pour un angle de retard à la conduction $\alpha = 90^\circ$.
- Pour différentes valeurs de α , relever la valeur moyenne \bar{U}_R de la tension aux bornes de la résistance de charge. Tracer la courbe $\bar{U}_R = f(\alpha)$.

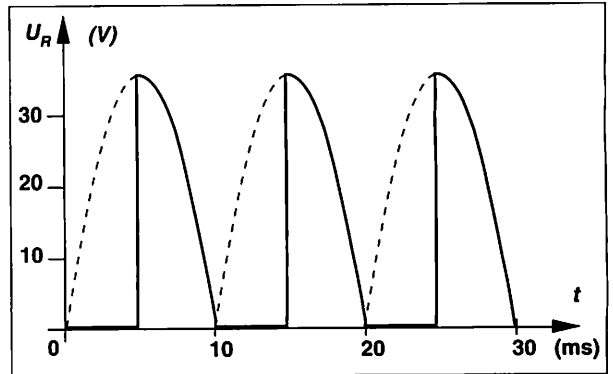


■ SCHÉMA DU MONTAGE ET EXEMPLE DE RÉSULTATS

- Le montage de la figure ci-dessous utilise deux thyristors et un transformateur à point milieu : 230 V – 2 × 24 V. Il permet le redressement commandé bi-alternance (voir exercice résolu).



- Pour $\alpha = 90^\circ$ les thyristors conduisent pendant la moitié de chaque alternance.



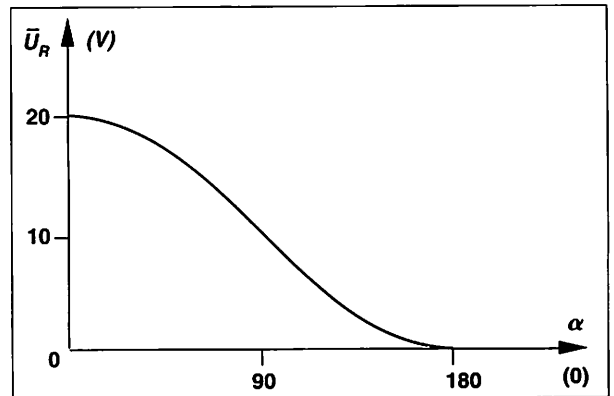
- La plus grande valeur de \bar{U}_R s'obtient pour $\alpha = 0$, elle est de l'ordre de 22 V,

$$\text{soit : } \bar{U}_0 = \frac{2\hat{U}}{\pi}$$

La valeur de \bar{U}_R s'annule pour $\alpha = 180^\circ$.

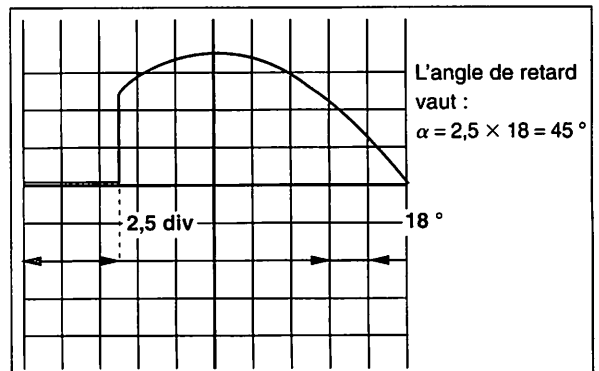
La figure ci-dessous donne l'allure de la courbe :

$$\bar{U}_R = f(\alpha)$$



Remarque :

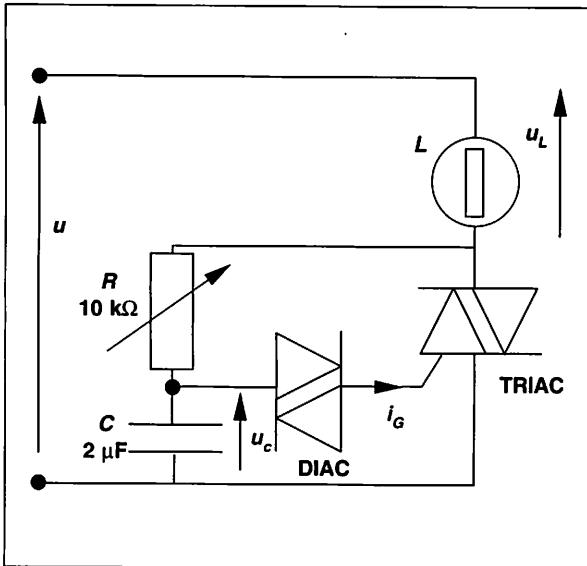
La mesure de l'angle de retard α s'effectue à l'oscilloscope. La méthode consiste à étaler une alternance sur tout l'écran. Si l'écran comporte dix divisions horizontales, chaque division correspond alors à un angle de 18° .



GRADATEUR À TRIAC

■ TRAVAIL À EFFECTUER

- a. Réaliser le gradateur à déphasage représenté à la figure ci-après :
- le composant de commutation est un triac,
 - le circuit de commande est constitué d'un diac et d'un circuit RC.
- b. Analyser le fonctionnement du montage.
- c. Relever la tension aux bornes de la charge pour un angle de retard à la conduction $\alpha = \frac{\pi}{4}$ rad.



Remarques :

La charge est constituée par une lampe 230 V – 100 W. Le montage est alimenté par le réseau 230 V, par l'intermédiaire d'un transformateur d'isolement.

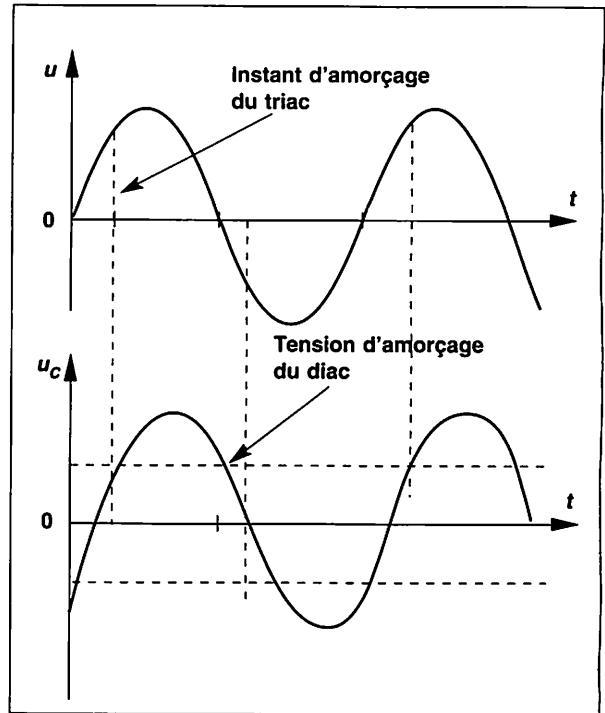
■ EXEMPLE DE RÉSULTATS

b. ANALYSE DU FONCTIONNEMENT

Le circuit RC introduit un **déphasage** entre la tension d'alimentation et la tension aux bornes du condensateur, u_c .

Lorsque la tension u_c atteint la **valeur de déclenchement du diac**, soit $u_c \approx 32$ V, celui-ci conduit et commande l'**amorçage du triac**.

L'instant d'amorçage peut être réglé en agissant sur le déphasage entre u et u_c par variation de la résistance R .

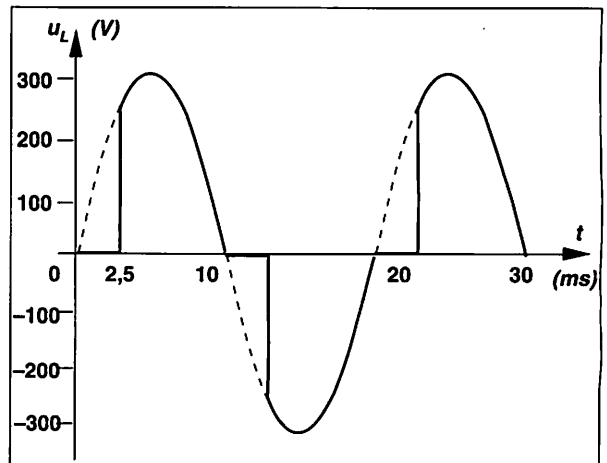


Principe de fonctionnement du circuit de commande.

c. TENSION AUX BORNES DE LA CHARGE

La tension de sortie u_L s'observe à l'oscilloscope.

En réglant R pour un angle de retard de $\frac{\pi}{4}$ rad, la tension obtenue est la suivante :



Tension aux bornes de la charge.

Remarque :

Le gradateur à triac est utilisé pour la commande de charges de faibles puissances. Il permet la **variation de la vitesse de rotation des moteurs universels** utilisés dans le petit outillage (perceuse, scie, ...) et dans l'appareillage électro-ménager.

APPLICATIONS

EXERCICE RÉSOLU

Énoncé

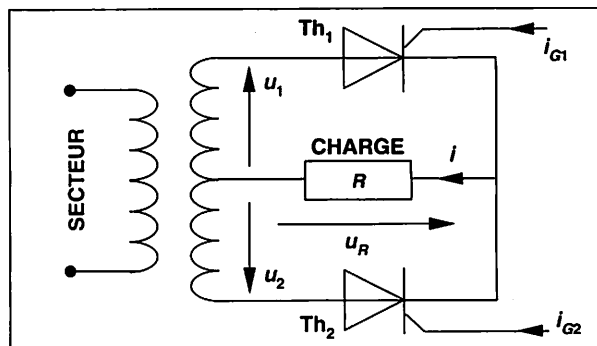
Le montage de la figure ci-contre fonctionne sur une charge résistive $R = 100 \Omega$.

Il est alimenté par l'intermédiaire d'un transformateur à point milieu, la tension efficace de chaque secondaire est de 110 V.

L'angle de retard à la conduction de chaque thyristor est de $\alpha = 60^\circ$.

a. Expliquer le fonctionnement du montage. Le redressement obtenu est-il mono ou bi-alternance ?

b. Représenter graphiquement la tension aux bornes de la charge.



Méthode :

a. Déterminer le thyristor pouvant conduire à chaque alternance de la tension u_1 .

b. Calculer l'instant t_1 ou le thyristor commence à conduire $\alpha = \omega t_1$.

Solution proposée :

a. Les tensions secondaires u_1 et u_2 sont en opposition de phase.

Durant l'alternance positive de u_1 , Th_1 conduit lorsqu'il est amorcé par le courant i_{G1} , Th_2 est bloqué.

Durant l'alternance négative de u_1 , u_2 est positive. Th_2 conduit lorsqu'il est amorcé, Th_1 est bloqué.

La tension u_R est redressée bi-alternance.

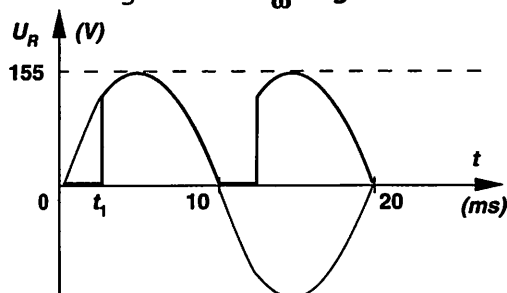
b. $\alpha = 60^\circ = \frac{\pi}{3} \text{ rad}$; $t_1 = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{10}{3} \text{ ms}$.

Remarques :

Un thyristor amorcé se comporte comme une diode.

Pour une tension de la fréquence du secteur :

$$\omega = 2\pi f = 100\pi \text{ rad/s.}$$



EXERCICES À RÉSOUDRE

E.1 Un redresseur mono-alternance commandé à thyristor, alimente une charge de résistance R à partir du secteur 230 V – 50 Hz.

L'impulsion de commande de gâchette est décalée de 2 ms par rapport au début de la sinusoïde.

a. Représenter graphiquement la tension $u_R = f(t)$ sur une période.

b. Calculer l'angle de retard à la conduction et en déduire la tension moyenne aux bornes de R .

E.2 Un pont mixte alimente une charge sous une tension de valeur moyenne 80 V.

L'angle de retard à l'amorçage est 30° .

a. Calculer la valeur maximale de la tension d'alimentation du pont.

b. Le montage est alimenté par le réseau 230 V par l'intermédiaire d'un transformateur.

Calculer le rapport de transformation de ce transformateur.

E.3 Un gradateur par déphasage fonctionne avec un

angle de retard à l'amorçage $\alpha = \frac{\pi}{2} \text{ rad}$ sur une tension de valeur efficace 230 V.

Déterminer la tension efficace de sortie.

22 Commutation. Amplification

ÉLECTROTECHNIQUE

1 Le transistor bipolaire

Un transistor bipolaire est constitué par un cristal semi-conducteur comportant trois zones dopées différemment de façon à former :

- soit deux zones N séparées par une zone P, c'est le transistor NPN (fig. 22.01);
- soit deux zones P séparées par une zone N, c'est le transistor PNP (fig. 22.02).

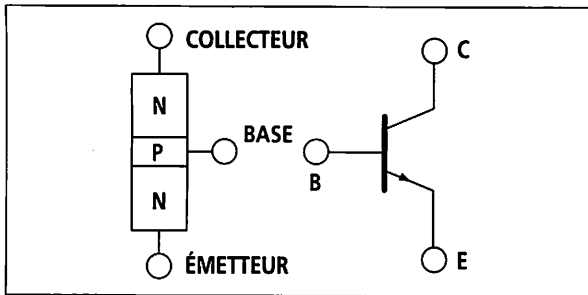


Fig. 22.01 : Transistor NPN.

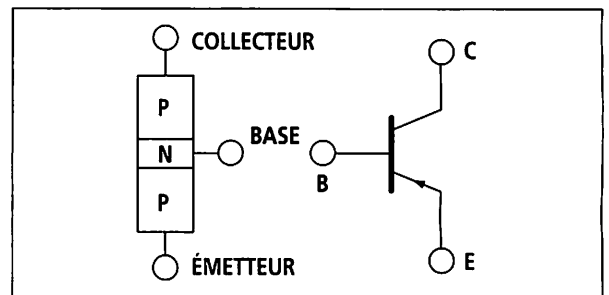


Fig. 22.02 : Transistor PNP.

Le transistor bipolaire présente **deux jonctions P-N** dont les sens passants sont opposés. La zone comprise entre les deux jonctions est très mince, c'est la **BASE** du transistor.

Une des zones extrêmes est **fortement dopée**, c'est l'**ÉMETTEUR** du transistor. L'autre zone extrême, **faiblement dopée**, est le **COLLECTEUR** du transistor. Sur le symbole du composant, l'**émetteur** est distingué du collecteur par une **flèche** indiquant le **sens passant de la jonction BASE-ÉMETTEUR**.

■ EFFET TRANSISTOR

L'effet transistor est la propriété de commander un important courant collecteur I_c à partir d'un faible courant de base I_b .

Le montage de la figure 22.03 illustre cet effet. Dans ce montage, qui utilise un **transistor NPN**, la jonction Base-Émetteur est polarisée dans le sens passant, la jonction Collecteur-Base est bloquée.

Exemple :

I_B (μA)	0	10	20	30	40	50	60	70
I_C (mA)	0	1,5	3	4,5	6	7,5	8	8

Le transistor est bloqué Le transistor est saturé
 Le transistor conduit, I_B commande I_C

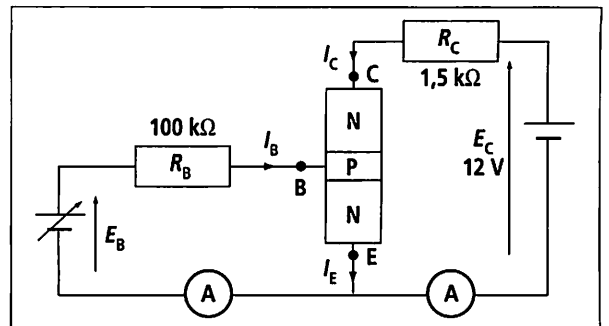


Fig. 22.03 : Effet transistor.

On peut distinguer trois modes de fonctionnement :

– **TRANSISTOR BLOQUÉ**

$$I_B = 0; I_C = 0$$

– **TRANSISTOR PASSANT**

I_C est proportionnel à I_B , le **coefficient de proportionnalité**, noté β , est appelé coefficient d'amplification en courant.

– **TRANSISTOR SATURÉ**

I_C est constant quel que soit I_B .

■ **CARACTÉRISTIQUES D'UN TRANSISTOR NPN**

Le transistor peut être considéré comme un **quadripôle** dont les bornes d'entrée sont la Base et l'Émetteur, les bornes de sortie, le Collecteur et l'Émetteur (fig. 22.04).

L'émetteur est commun à l'entrée et à la sortie, le montage est appelé **ÉMETTEUR COMMUN**.

Le réseau de caractéristiques est l'ensemble des courbes traduisant les relations entre les quatre grandeurs V_{BE} ; I_B ; V_{CE} ; I_C (fig. 22.05).

Le **coefficient d'amplification β** est une caractéristique du transistor :

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad \text{ou} \quad I_C = \beta I_B$$

Ce coefficient est un grand nombre, pouvant largement dépasser 100 selon le type de transistor.

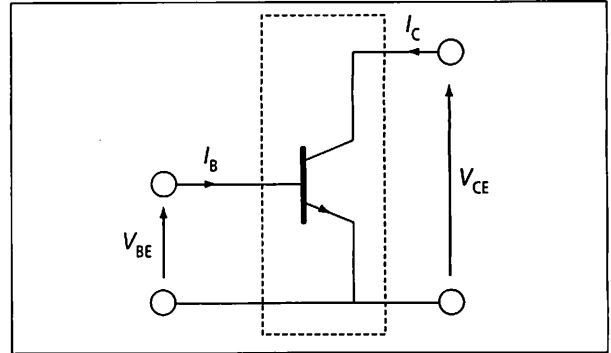


Fig. 22.04 : Montage Émetteur Commun.

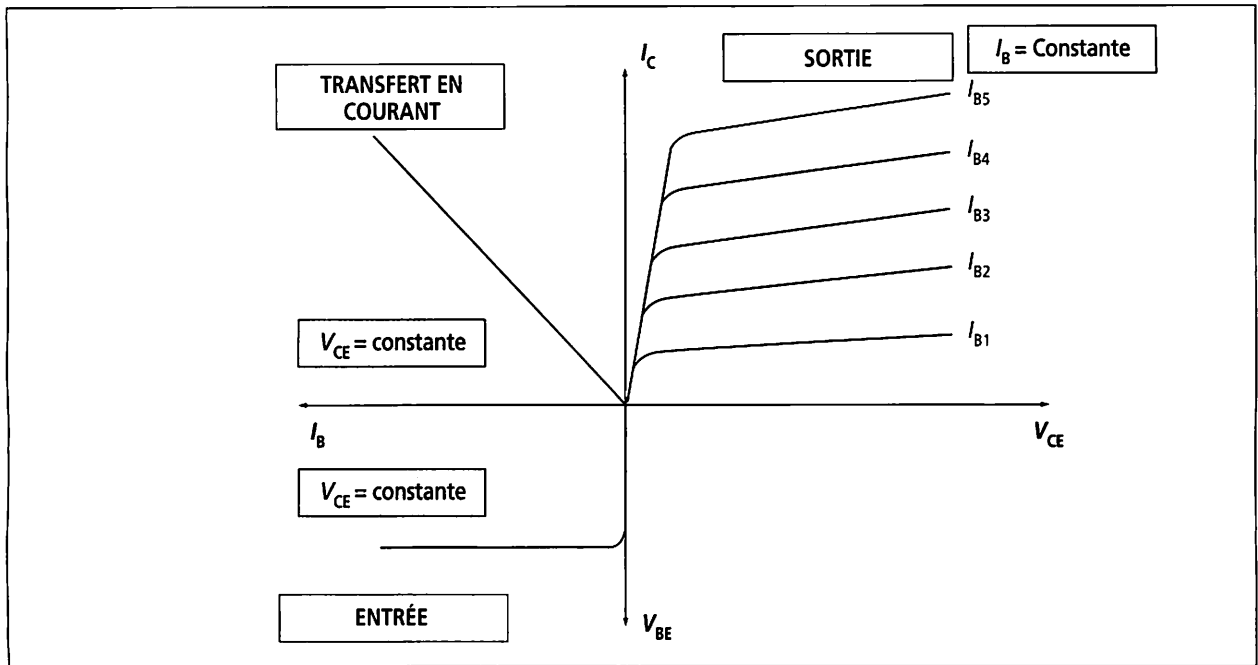


Fig. 22.05 : Réseau de caractéristiques d'un transistor NPN.

• **CARACTÉRISTIQUE D'ENTRÉE**

C'est la courbe $V_{BE} = f(I_B)$ lorsque V_{CE} est maintenue constante. Cette caractéristique est pratiquement celle d'une diode polarisée en direct, la tension V_{BE} est de l'ordre de 0,7 V lorsqu'un transistor au silicium conduit.

• **CARACTÉRISTIQUE DE SORTIE**

C'est la courbe $I_C = f(V_{CE})$ lorsque I_B est constant. Dans un transistor idéal, ces caractéristiques sont des droites horizontales puisque I_C ne dépend que de I_B ($I_C = \beta I_B$). Dans un transistor réel, ces caractéristiques sont légèrement inclinées sur l'horizontale.

• **CARACTÉRISTIQUE DE TRANSFERT EN COURANT**

C'est la courbe $I_C = f(I_B)$ lorsque V_{CE} est constante. Cette caractéristique est une droite passant par l'origine qui traduit la proportionnalité entre I_C et I_B .

POINT DE FONCTIONNEMENT

Le point de fonctionnement est caractérisé par l'ensemble de quatre valeurs :

$$V_{BE}, I_B, V_{CE}, I_C$$

Remarque :

Lorsque $I_C = 0$, le transistor est **bloqué**.

Le point de fonctionnement est en **B** dans la figure 22.06 : $V_{CE} = V_{CC}$.

Lorsque $V_{CE} = 0$ V, le transistor est **saturé**. Le point de fonctionnement

est en **S** : $I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$.

En amplification, le point de fonctionnement se déplace sur la droite de charge de la figure 22.06.

Pour une charge R_C et une tension d'alimentation V_{CC} données, la tension V_{CE} et le courant I_C sont liés par la relation :

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$$

Cette relation se traduit par une droite sur un repère d'axes V_{CE} et I_C comme l'indique la figure 22.06. Cette droite est appelée **droite de charge** du transistor.

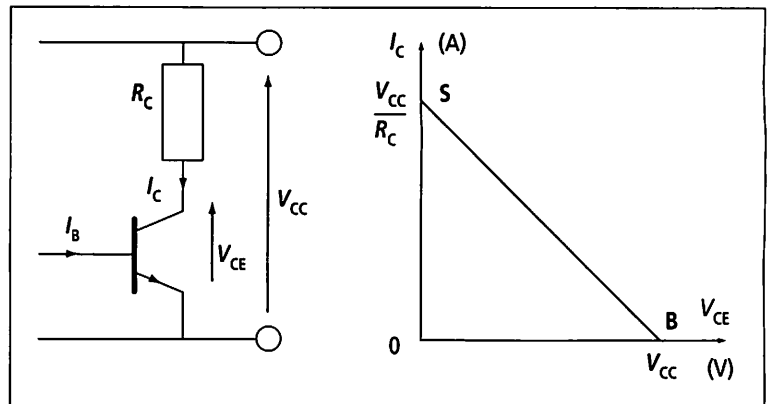


Fig. 22.06 : Droite de charge du transistor.

Lorsqu'un transistor est en fonctionnement, les limites indiquées par le fabricant ne doivent pas être dépassées, soit :

$V_{CE\text{MAX}}$: valeur maximale de la tension collecteur-émetteur,
 $I_{C\text{MAX}}$: valeur maximale du courant collecteur,
 P_{MAX} : valeur maximale de la puissance totale dissipée.

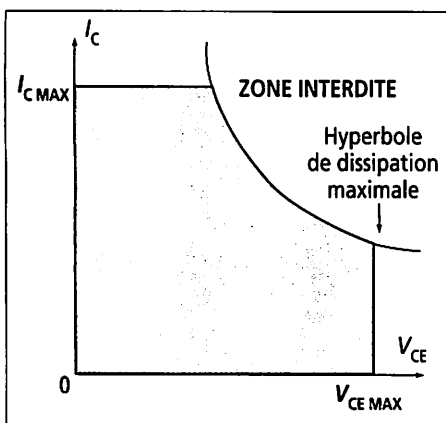


Fig. 22.07 : Limites de fonctionnement.

Ces valeurs reportées sur un repère d'axes V_{CE} et I_C , délimitent une zone de laquelle le point de fonctionnement ne doit pas sortir sous peine de **destruction thermique du transistor** (fig. 22.07).

La puissance dissipée est pratiquement égale à :

$$P = V_{CE} \cdot I_C$$

Une partie de la zone de fonctionnement est limitée par une courbe, appelée **hyperbole de dissipation maximale**, d'équation :

$$I_C = \frac{P_{\text{MAX}}}{V_{CE}}$$

2 Le transistor en commutation

En commutation, le transistor ne peut avoir que deux états de fonctionnement : bloqué ou saturé.

La transition d'un état à l'autre doit se faire le plus rapidement possible.

Dans le montage de la figure 22.08, le transistor est bloqué lorsque I_B est nul.

Condition de blocage : $I_B = 0$

Dans cet état, le courant I_C est nul, le **dipôle C-E** est équivalent à un **interrupteur ouvert**. (fig. 22.09).

Lorsque le transistor est saturé, le courant I_C est maximal et pratiquement égal à :

$$I_{C\text{sat}} = \frac{E_C}{R_C}$$

Pour obtenir cet état, le courant I_B doit être supérieur à la valeur :

$$I_{B\text{sat}} = \frac{I_{C\text{sat}}}{\beta}$$

Condition de saturation : $I_B > \frac{E_C}{\beta_{\text{mini}} R_C}$

En **saturation**, le **dipôle C-E** est pratiquement équivalent à un **interrupteur fermé** (fig. 22.09).

Exemple :

Un transistor a un gain en courant compris entre 75 et 200. $E_C = 12 \text{ V}$; $R_C = 10 \text{ } \Omega$.

Ce transistor est saturé lorsque :

$$I_B > \frac{12}{75 \cdot 10} \text{ soit } I_B > 16 \text{ mA.}$$

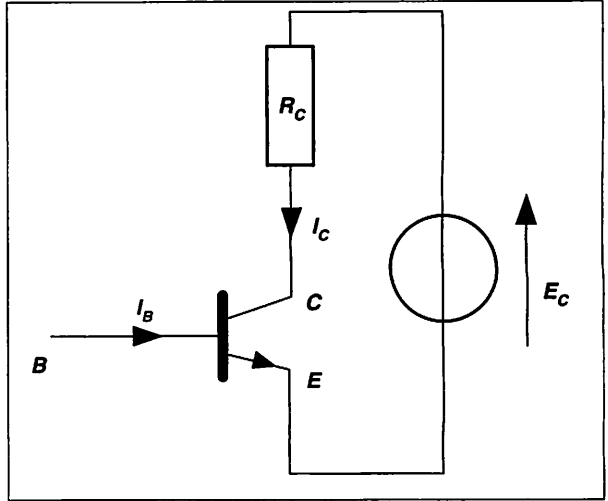


Fig. 22.08 : Transistor en commutation.

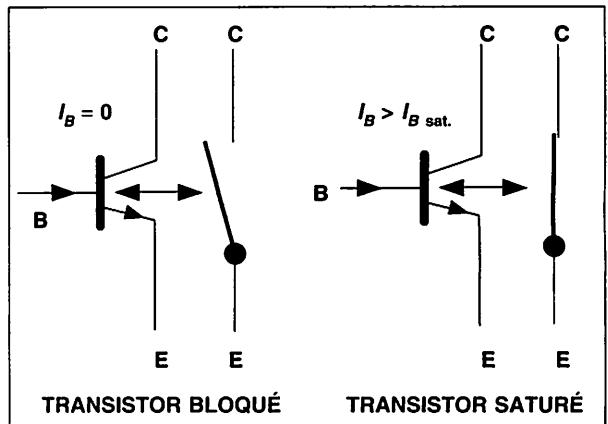


Fig. 22.09 : Modèles équivalents du transistor en commutation.

■ COMMUTATION D'UNE CHARGE INDUCTIVE

Lorsque la charge alimentée par le courant de collecteur est **inductive** (relais, enroulement de moteur...), la diminution rapide de I_C produit dans la charge l'apparition d'une **f.e.m. d'auto-induction**.

La f.e.m. d'auto-induction qui s'oppose à la disparition du courant I_C dans la bobine, peut être très importante.

Si elle dépasse la tension $V_{CE\text{MAX}}$ que peut supporter le transistor, celui-ci risque d'être détruit.

Pour éviter ce phénomène, on place en parallèle avec la bobine une **diode** dite de « **roue libre** » (fig. 22.10). Au **blocage** du transistor, la **diode D** limite à **0,7 V** la f.e.m. d'auto-induction. Les surtensions ne se produisent plus.

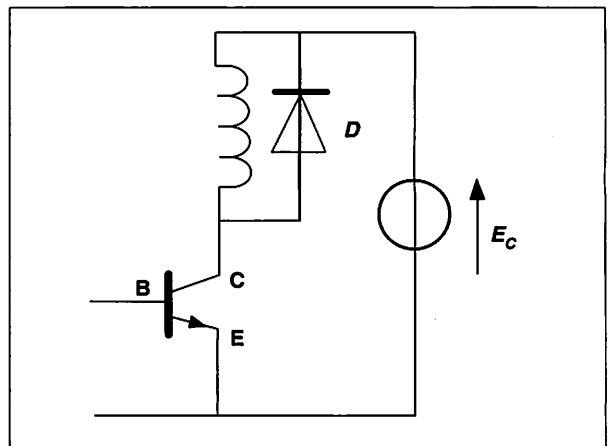


Fig. 22.10 : Protection du transistor.

Exemple :

Un enroulement de moteur de résistance 5Ω est alimenté en fonction des signaux issus d'une logique de commande fournissant une tension E_B pouvant prendre deux valeurs : 0 et 5 V.

Le moteur est alimenté sous une tension de 12 V et consomme un courant de 1,4 A.

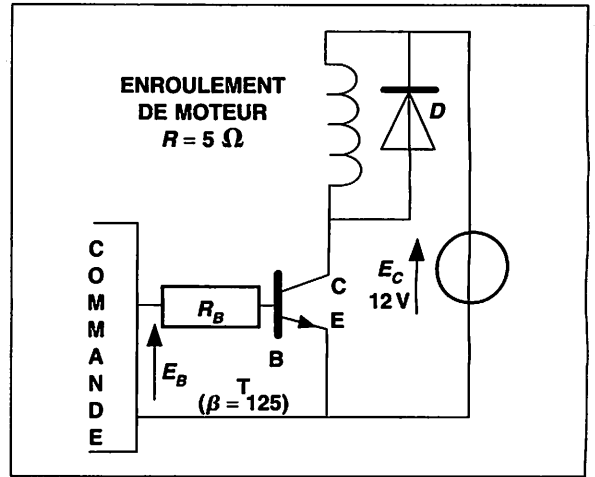
Lorsque E_B est nul, le transistor est bloqué, le moteur n'est pas alimenté.

Lorsque $E_B = 5 \text{ V}$, le transistor doit être saturé afin que le moteur soit alimenté sous la tension E_C de 12 V. Le transistor utilisé a un gain en courant $\beta = 125$. Le courant I_B nécessaire à la saturation est égal à :

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \text{ soit } I_B = 11,2 \text{ mA.}$$

La résistance R_B correspond à ce courant a pour valeur :

$$R_B = \frac{E_B - V_{BE}}{I_B} \text{ soit } R_B = 383 \Omega.$$



La valeur de R_B à utiliser sera nettement inférieure (souvent deux fois moindre) de manière à saturer sûrement le transistor.

3 Hacheur à transistor

Le hacheur est un convertisseur qui assure directement la conversion d'énergie de continu à continu.

Le hacheur est un **commutateur électronique** à fonctionnement périodique.

Comme indiqué à la figure 22.11, il s'intercale entre :

- un **générateur de courant continu** : batterie, alimentation stabilisée, redresseur, ...
- un **récepteur de courant continu** : moteur, accumulateur en charge, ...

À la sortie de ce convertisseur, la charge est soumise périodiquement :

- à **une tension constante** pendant une durée t_o ,
- à **une tension nulle** pendant le reste de la période, soit $T - t_o$ (fig. 22.12).

La tension moyenne \bar{U} appliquée à la charge dépend :

- de la **f.e.m. E** du générateur d'alimentation,
- du **rapport cyclique α** :

$$\alpha = \frac{t_o}{T}$$

Pour un hacheur série :

$$\bar{U} = E \frac{t_o}{T} = E \alpha$$

Le rapport $\frac{\bar{U}}{E}$ est appelé **facteur de transformation** du hacheur.

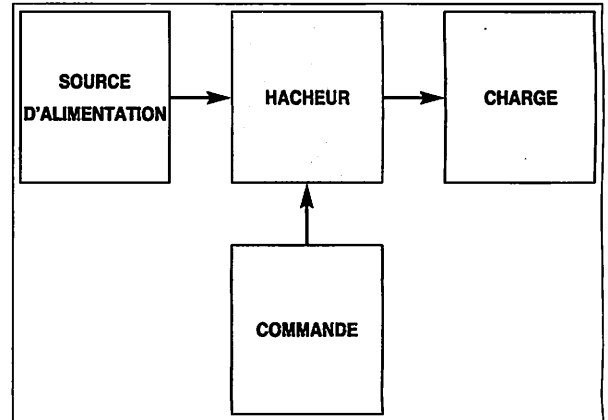


Fig. 22.11 : Utilisation du hacheur.

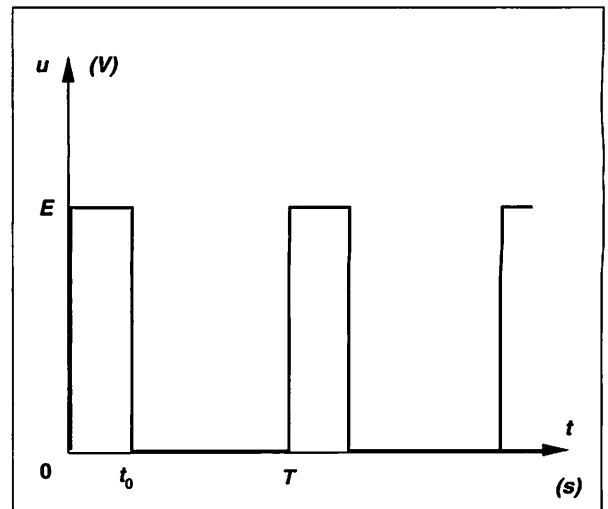


Fig. 22.12 : Tension aux bornes de la charge.

Exemple :

Le schéma de la figure 22.13 est celui d'un hacheur série à transistor alimentant une charge R . La tension d'alimentation E est de 24 V continu.

La période de hachage, définie par le générateur de commande G , est égale à 20 ms.

Le transistor T conduit pendant une durée $t_0 = 5$ ms puis est bloqué le reste de la période.

Le rapport cyclique est donc égal à :

$$\alpha = \frac{t_0}{T} = \frac{5}{20} \text{ soit } \alpha = 0,25.$$

La valeur moyenne de la tension u appliquée à la charge est égale à :

$$\bar{U} = E\alpha = 24 \times 0,25 \text{ soit } \bar{U} = 8 \text{ V.}$$

Le hacheur série permet d'abaisser une tension continue avec un rendement proche de l'unité.

La diode D , diode de roue libre, protège le transistor contre les surtensions lorsque le hacheur alimente un récepteur inductif.

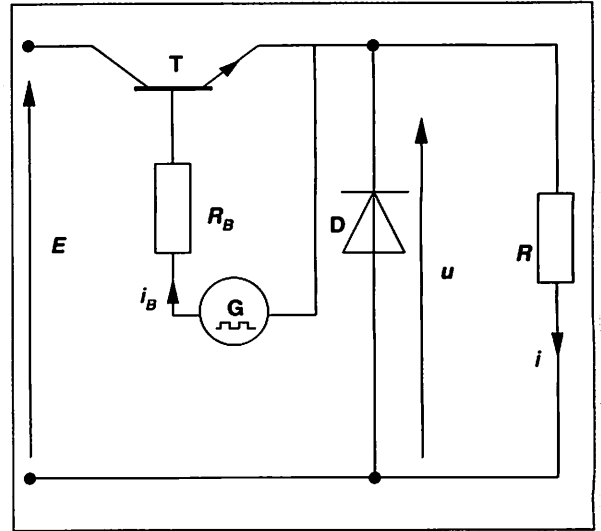


Fig. 22.13 : Hacheur à transistor.

5 Transistor en amplification

L'amplification consiste à augmenter les caractéristiques d'un signal sans le déformer.
Le transistor est un amplificateur de courant. C'est aussi un amplificateur de puissance.

■ AMPLIFICATION D'UN COURANT CONTINU

Un faible courant I_B permet d'obtenir dans le circuit de sortie un courant I_C beaucoup plus important.

$$I_C = \beta I_B.$$

La puissance P_1 fournie à l'entrée est (fig. 22.14) :

$$P_1 = V_{BE} I_B.$$

La puissance P_2 restituée à la sortie est :

$$P_2 = E_C I_C.$$

La puissance P_2 est nettement plus importante que P_1 .

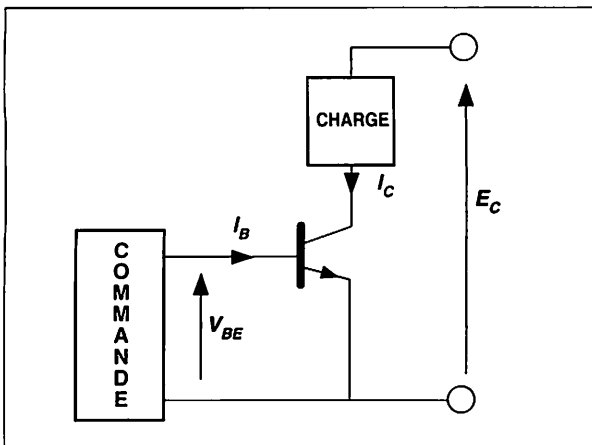


Fig. 22.14 : Le transistor est un amplificateur de puissance en courant continu.

■ AMPLIFICATION D'UN COURANT ALTERNATIF

Pour amplifier un courant alternatif, le transistor ne doit être ni bloqué, ni saturé.

Dans le montage de la figure 22.15, les résistances de polarisation R_B et R_C permettent de placer le point de fonctionnement vers le milieu de la droite de charge.

L'amplification en tension du montage dépend du gain β du transistor utilisé.

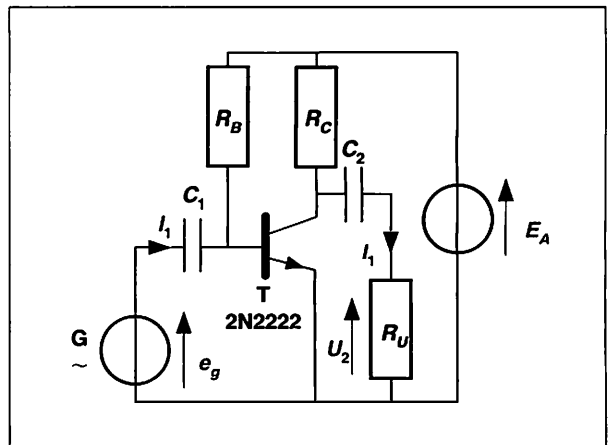
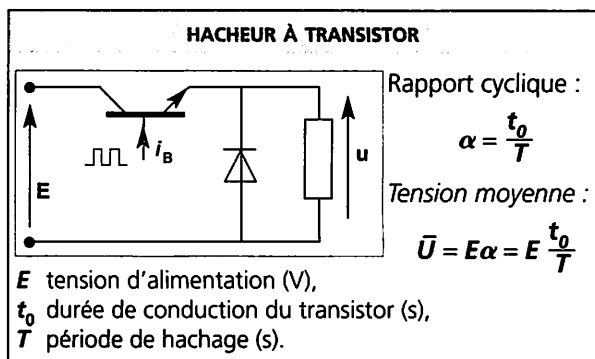
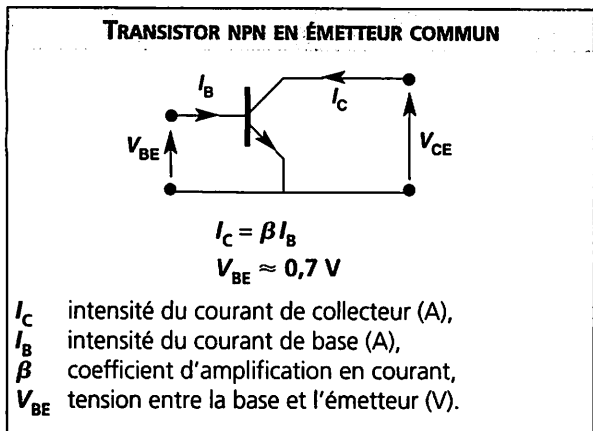
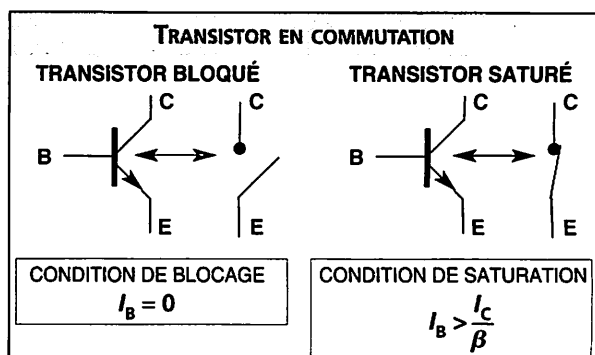
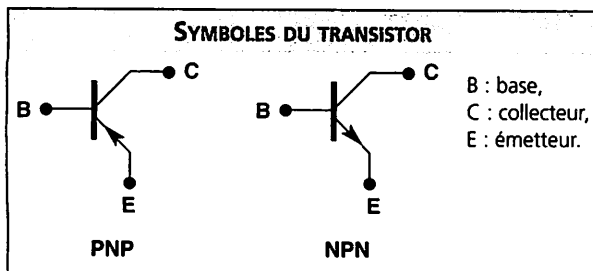


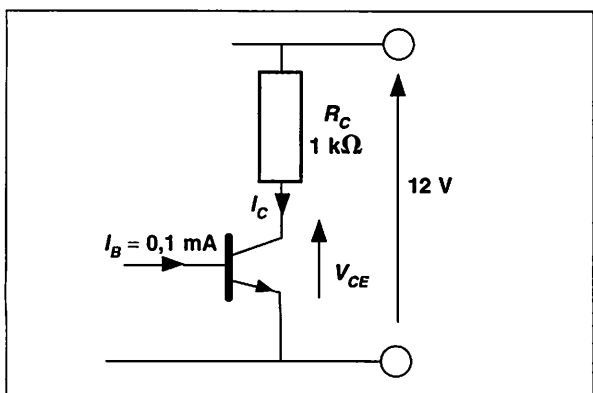
Fig. 22.15 : Amplification d'un courant alternatif.

ESSENTIEL À RETENIR



TEST RAPIDE

T.1 Dans le montage de la figure ci-dessous, le gain en courant du transistor est de 100, calculer le courant I_C .



Réponse : 10 mA ; 12 mA ; 0 mA.

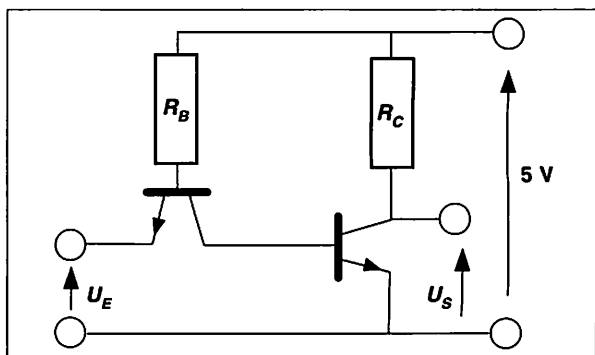
T.2 Quelle est la valeur de la tension V_{CE} dans le montage figure ci-dessus.

Réponse : 12 V ; 0 V ; 2 V.

T.3 Quelle est la puissance dissipée par un transistor bloqué ?

Réponse : 0 W ; 1 W ; 10 W.

T.4 Dans le montage de la figure ci-après, les transistors T_1 et T_2 fonctionnent en commutation. Calculer la valeur de U_S lorsque $U_E = 0 \text{ V}$.



Réponse : 0 V ; 5 V.

T.5 Un transistor pouvant dissiper une puissance maximale de 10 W fonctionne avec $V_{CE} = 5 \text{ V}$. Calculer le courant de collecteur maximal.

Réponse : 0,5 A ; 2 A ; 10 A.

T.6 Un hacheur série fonctionne avec un générateur de f.e.m. $E = 110 \text{ V}$ et un rapport cyclique $\alpha = 0,6$. Calculer la tension moyenne de sortie.

Réponse : 66 V ; 110 V ; 275 V.

EXPÉRIMENTATION

RELEVÉ DE CARACTÉRISTIQUES

TRAVAIL À EFFECTUER

Pour un transistor NPN donné, relever les caractéristiques :

- de transfert, $I_C = f(I_B)$ pour une valeur constante de V_{CE} ,
- de sortie, $I_C = f(V_{CE})$ pour trois valeurs de I_B données,
- d'entrée, $V_{BE} = f(I_B)$ pour une valeur constante de V_{CE} .

SCHÉMA DU MONTAGE ET EXEMPLE DE RÉSULTATS

Le montage nécessite deux alimentations variables de 0 à 10 V. La résistance R limite le courant dans la base :

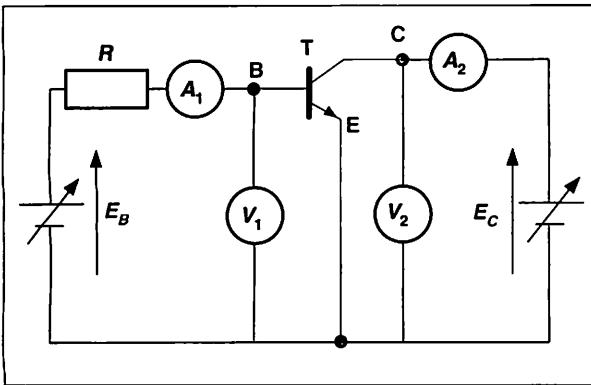
$$I_B \approx \frac{E_B}{R}$$

Le voltmètre V_1 mesure la tension V_{BE} . Il doit présenter une **grande résistance interne** pour ne pas fausser les mesures du courant I_B .

Le transistor utilisé est de type 2N1711.

La tension V_{CE} est fixée à 5 V pour les caractéristiques de transfert et d'entrée.

Le courant I_B est fixé à 0,1 mA, 0,2 mA, 0,3 mA pour la caractéristique de sortie.



Pour toutes les mesures, il faut veiller à **ne pas dépasser la puissance maximale** que peut dissiper le transistor.

Les limites d'utilisation du transistor 2N 1711 sont (voir renseignements techniques) :

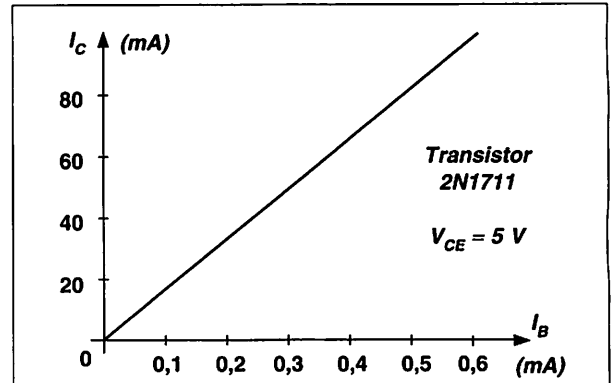
$$V_{CE0} = 50 \text{ V}; I_{C\text{MAX}} = 1 \text{ A}; P_{\text{TOT}} = 0,8 \text{ W.}$$

En limitant la puissance dissipée à $P = 0,5 \text{ W}$ pour les mesures, le courant I_C ne devra pas dépasser :

$$\text{pour } V_{CE} = 5 \text{ V}; I_C = \frac{P}{V_{CE}} = 0,1 \text{ A,}$$

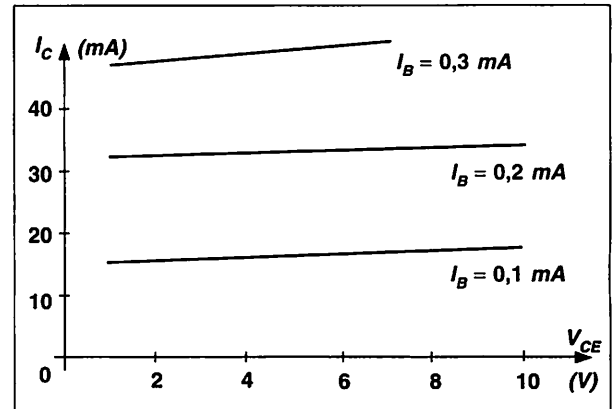
$$\text{pour } V_{CE} = 10 \text{ V}; I_C = \frac{P}{V_{CE}} = 0,05 \text{ A.}$$

La caractéristique $I_C = f(I_B)$ à V_{CE} constant est **une droite**.



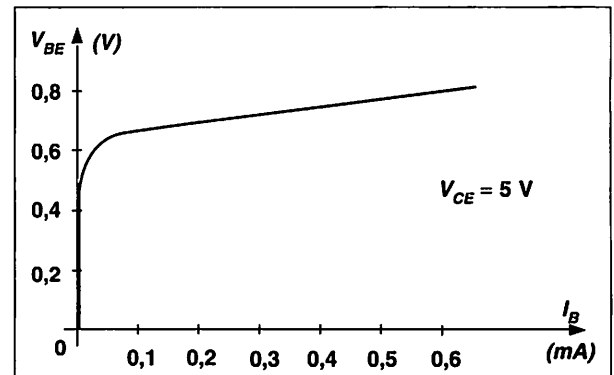
Caractéristique de transfert.

Les caractéristiques de sortie sont sensiblement des **droites légèrement inclinées sur l'horizontale**.



Caractéristique de sortie.

La caractéristique d'entrée est **semblable à celle d'une diode**.



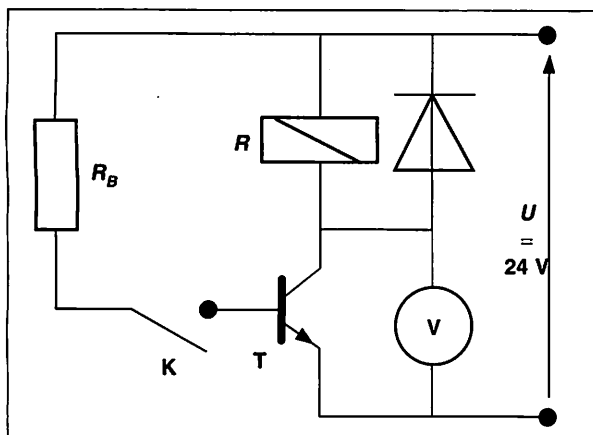
Caractéristique d'entrée.

TRANSISTOR EN COMMUTATION

■ TRAVAIL À EFFECTUER

Commander le fonctionnement d'un relais par l'intermédiaire d'un transistor n'ayant que deux états possibles de fonctionnement : bloqué ou saturé.

■ SCHÉMA DU MONTAGE ET EXEMPLE DE RÉSULTATS



La bobine du relais utilisé présente une résistance $R = 500 \Omega$ pour une tension $U = 24 \text{ V}$. L'intensité du courant qui la traverse en fonctionnement nominal est :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{24}{500} \text{ soit } I = 48 \text{ mA.}$$

Le transistor T est de type 2N 1711. Les renseignements techniques donnent la valeur minimale de son gain en courant : $\beta_{\text{mini}} = 100$.

Le courant I_B nécessaire pour saturer le transistor doit être supérieur à :

$$I_B = \frac{E_C}{\beta_{\text{mini}} R_C} = \frac{24}{100 \times 500} \text{ soit } I_B = 0,48 \text{ mA.}$$

En prenant pour I_B une valeur **deux fois supérieure** :

$$I_B = 2 \times 0,48 = 0,96 \text{ mA,}$$

la valeur de R_B est égale à :

$$R_B = \frac{E_C - V_{BE}}{I_B} = \frac{24 - 0,7}{0,96 \times 10^{-3}} \text{ soit } R_B = 24 \text{ k}\Omega.$$

La valeur normalisée immédiatement inférieure est :

$$R = 22 \text{ k}\Omega.$$

La **vérification du fonctionnement** s'effectue par la mesure de V_{CE} :

- K ouvert ; T est bloqué : $V_{CE} = 24 \text{ V}$.
- K fermé ; T est saturé : $V_{CE} \approx 0 \text{ V}$.

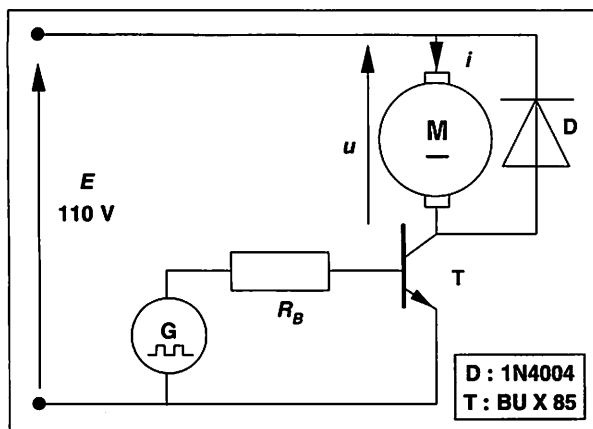
HACHEUR SÉRIE

■ TRAVAIL À EFFECTUER

Alimenter un moteur à courant continu par l'intermédiaire d'un hacheur série.

Mesurer la fréquence de rotation n en fonction du rapport cyclique α , le moteur fonctionnant à couple constant.

■ SCHÉMA DU MONTAGE ET EXEMPLE DE RÉSULTATS

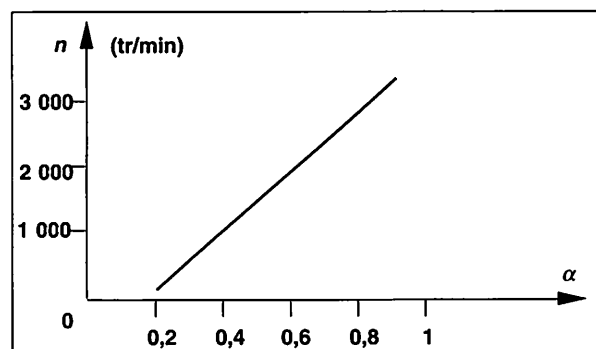


Le moteur de type série, a pour tension d'alimentation nominale 110 V. Il consomme un courant de 0,5 A dans les conditions de l'expérience.

Le transistor et la diode doivent supporter le courant et la tension d'alimentation du moteur.

Le générateur de commande G fournit des signaux rectangulaires, de fréquence $f = 1 \text{ kHz}$ et de rapport cyclique variable.

La fréquence de rotation est **sensiblement proportionnelle au rapport cyclique**.



Courbe $n = f(\alpha)$.

APPLICATIONS

EXERCICE RÉSOLU

Énoncé

Le transistor du montage de la figure ci-contre fonctionne en commutation. Ses caractéristiques sont :

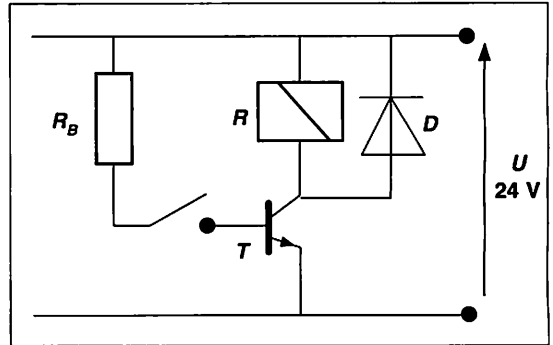
$$\beta = 150; V_{CEsat} = 0 \text{ V}; V_{BE} = 0,7 \text{ V}.$$

Dans son circuit de collecteur est placée la bobine d'un relais de résistance $R = 100 \Omega$.

a. Calculer le courant circulant dans la bobine du relais lorsqu'elle est alimentée sous 24 V.

Quel est alors l'état de fonctionnement du transistor ?

b. Déterminer le courant I_B nécessaire pour saturer le transistor. En déduire la valeur de la résistance de base R_B .



Méthode :

- Appliquer la loi d'Ohm.

- Déterminer I_C .

- Calculer $I_B = \frac{I_C}{\beta}$.

- Appliquer la loi d'Ohm pour calculer R_B .

Solution proposée :

a. Le courant dans la bobine est égal à :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{24}{100} \text{ soit } I = 0,24 \text{ A}.$$

Le transistor est alors saturé.

b. Le courant I_C est celui qui circule dans la bobine du relais. $I_C = 0,24 \text{ A}$.

Le courant de saturation I_B doit être supérieur à :

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{0,24}{150} \text{ soit } I_B = 1,6 \text{ mA}.$$

$$\text{D'où : } R_B = \frac{U - V_{BE}}{I_B} = \frac{24 - 0,7}{1,6 \times 10^{-3}} \text{ soit } R_B \geq 14 \text{ k}\Omega.$$

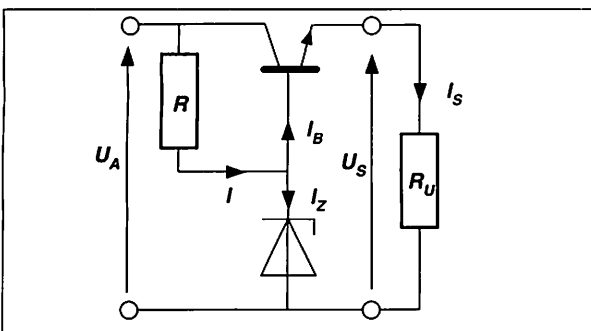
Remarques :

Lorsque le relais est alimenté, le transistor est équivalent à un interrupteur fermé entre collecteur et émetteur.

La diode D protège le transistor contre la surtension due à la f.e.m. d'auto-induction de la bobine.

EXERCICES À RÉSOUDRE

E. 1 La figure ci-dessous représente un montage stabilisateur de tension.



Le transistor T est tel que $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$; $\beta = 50$.

La diode zéner est supposée parfaite avec $U_Z = 6 \text{ V}$.

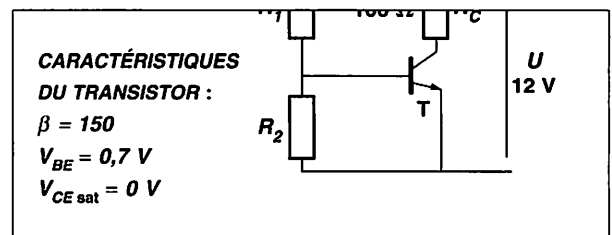
Dans le montage $U_A = 20 \text{ V}$; $R = 500 \Omega$; $R_U = 100 \Omega$.

a. Calculer la tension U_S et le courant I_S qui circule dans la charge R_U .

b. En déduire le courant de base I_B du transistor.

c. Déterminer le courant I circulant dans R , en déduire la valeur de I_Z .

E. 2 La base du transistor du montage de la figure ci-dessous est alimentée par un pont de deux résistances R_1 et R_2 .



CARACTÉRISTIQUES DU TRANSISTOR :

$$\beta = 150$$

$$V_{BE} = 0,7 \text{ V}$$

$$V_{CEsat} = 0 \text{ V}$$

a. Le transistor T étant saturé, calculer le courant de collecteur I_C , en déduire le courant de base I_B .

b. Le courant dans R_2 étant dix fois plus grand que le courant I_B , calculer la valeur de R_2 puis celle de R_1 .

23 Saisie des informations. Traitement des données

ÉLECTROTECHNIQUE

1 Organisation fonctionnelle d'un système automatisé

Un système automatisé comporte une partie opérative et une partie commande qui dialoguent ensemble (fig. 23:01).

■ PARTIE OPÉRATIVE

La partie opérative regroupe l'ensemble des opérateurs techniques qui assurent et contrôlent la **production des effets utiles**, pour lesquels le système automatisé a été conçu.

Les opérateurs techniques d'une partie opérative sont :

- les **actionneurs** qui transforment l'énergie reçue en énergie utile ;
- les **capteurs** qui transforment la **variation des grandeurs physiques** liées au fonctionnement de l'automatisme en **signaux**.

■ PARTIE COMMANDE

Cette partie transmet les **ordres** aux **actionneurs**.

Ces ordres peuvent être élaborés :

- à partir d'une **programmation chronologique**, c'est-à-dire une programmation dans laquelle chaque ordre a une durée de validité prédéterminée ;
- à partir des **informations** délivrées par les **capteurs** de la partie opérative et traitées suivant un programme bien défini ;
- à partir des **consignes** qui sont données par l'**opérateur** ou l'utilisateur du système automatisé.

Exemple

Dans une station de lavage de voitures :

- la partie opérative est constituée par les actionneurs : moteurs d'entraînement des brosses, électrovannes des jets de lavage et de rinçage, ... et les capteurs qui contrôlent le bon déroulement du lavage,
- la partie commande gère le cycle de lavage selon un programme préétabli à partir de la consigne donnée par l'utilisateur.

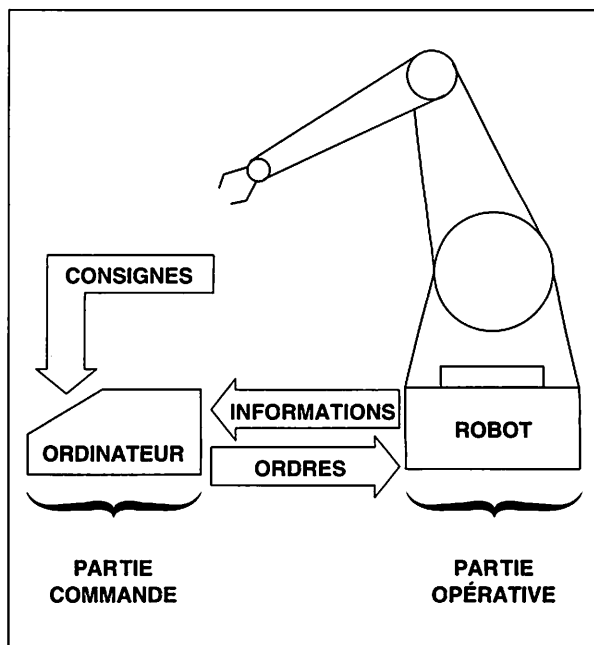


Fig. 23.01 : Système automatisé comprenant :
- un robot, comme partie opérative,
- un ordinateur, comme partie commande.

Remarque

La partie opérative transforme de l'énergie qui lui est fournie sous formes diverses : électrique, pneumatique, hydraulique...

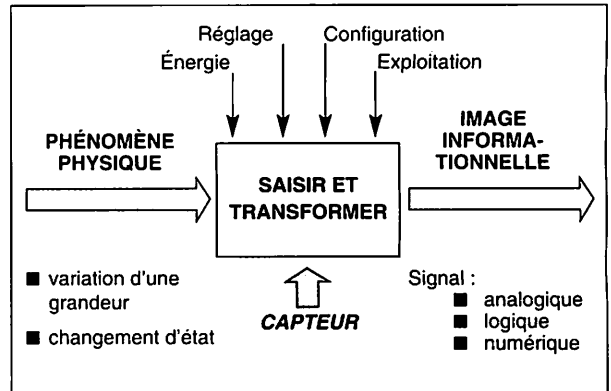
Ainsi, le moteur d'une machine-outil transforme l'énergie électrique qu'il reçoit en énergie mécanique.

2 Saisie de données : capteurs

Un capteur transforme les variations d'une grandeur physique en un signal dont la nature et les caractéristiques sont compatibles avec l'unité de traitement de la partie commandée du système automatisé.

Suivant la nature du signal exploitable les capteurs se classent en trois catégories :

- **capteurs analogiques**, le signal délivré est la traduction exacte de la loi de variation de la grandeur physique mesurée,
- **capteurs logiques**, le signal ne présente que deux niveaux, ou deux états, qui s'affichent par rapport au franchissement de deux valeurs, deux seuils; ces capteurs du type **tout-ou-rien** sont également désignés par **détecteurs**,
- **capteurs numériques**, le signal est codé au sein même du capteur par une électronique associée; ces capteurs sont également désignés par **codeurs** et **compteurs**.



23.02 : Représentation fonctionnelle d'un capteur.

Exemples :

INFORMATION	Types de CAPTEURS	SYMBOLES	CARACTÉRISTIQUES	APPLICATIONS
INFORMATION DE POSITION (par contact avec l'objet)	CAPTEUR PNEUMATIQUE DE POSITION	 rappel par ressort	<ul style="list-style-type: none"> ■ Commande par galet ■ Rappel par ressort ■ Vitesse et attaque maximale : 0,1 m/s ■ Force minimale nécessaire pour l'enclenchement à 6 bars : 2 daN 	Très nombreuses compte tenu : <ul style="list-style-type: none"> ■ de la robustesse, ■ de la bonne résistance aux agents extérieurs, huiles, acides, poussières,...
INFORMATION DE DÉPLACEMENT (par contact avec l'objet)	CODEUR OPTIQUE INCRÉMENTAL	 D : déplacement	<ul style="list-style-type: none"> ■ Tension d'alimentation 5 à 24 V continu ■ Vitesse de rotation de l'arbre : 6000 tr/min max. ■ Résolutions comprises entre 2500 et 7200. 	Le positionnement du mobile est entièrement maîtrisé par les systèmes de traitement associés au codeur ce qui convient à des bras de robots, des tables de machines-outils, ...
INFORMATION DE TEMPÉRATURE D'UN FLUIDE	SONDE À THERMISTANCE	 θ : température	<ul style="list-style-type: none"> ■ Variation de la résistivité d'un semi-conducteur avec température ■ Grande sensibilité ■ Temps de réponse très court 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Grand champ d'application de -100 à $+450$ °C ■ Utilisé pour la détection de la variation de température
INFORMATION DE PRESSION DANS UN CIRCUIT	PRESSOSTAT	 p : pression	<ul style="list-style-type: none"> ■ Nature du fluide ■ Fréquence de fonctionnement ■ Mode de fonctionnement des contacts ■ Endurance électrique 	Appareils très robustes ayant un champ d'application dans les circuits de fluide : huile, air, ...
INFORMATION DE PRESSION DE FORCE ET DE POIDS	JAUGE MÉTALLIQUE EXTENSOMÉTRIQUE	 F : force	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bonne précision ■ Plage d'utilisation en température étendue (de -30° à 120° C) ■ Haute limite de fatigue ■ Électronique de traitement simple. 	Le prix de revient de ces capteurs à transduction résistive fait que leurs applications sont nombreuses dans la recherche et dans l'industrie.

3 Conversion d'énergie : actionneurs

Un actionneur convertit une énergie d'entrée disponible sous une certaine forme en une énergie utilisatrice sous une forme différente (fig. 23.03).

Les actionneurs, objets techniques de puissance, ont une conception en rapport avec les phénomènes physiques qui régissent la conversion de l'énergie.

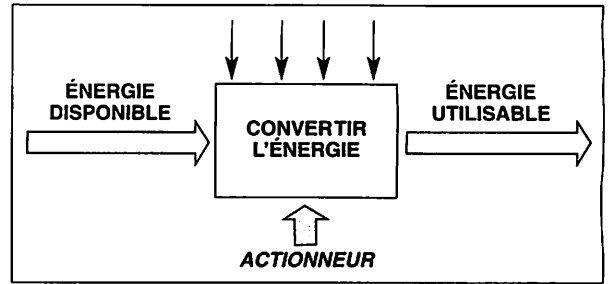


Fig. 23.03 : Représentation fonctionnelle d'un actionneur.

Exemples

Designation	Symboles	Caractéristiques et applications
TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE EN ÉNERGIE MÉCANIQUE DE ROTATION		
MOTEURS À COURANT ALTERNATIF : - ASYNCHRONES - triphasés - à bagues - à cage - monophasés - avec bague de déphasage - avec enroulement auxiliaire MOTEURS À COURANT CONTINU : - à excitation séparée - à excitation en dérivation		Les moteurs asynchrones sont très utilisés : - facilité de branchement, - simplicité de changement du sens de rotation, - vitesse dépendant peu de la charge, - rendement élevé. Ceux à bagues , ou à rotor bobiné , permettent d'adapter le couple de démarrage avec le couple résistant de la machine entraînée. Ceux à cage , ou à rotor en court-circuit sont plus robustes et demandent une forte intensité au démarrage. Les moteurs à courant continu sont employés dans beaucoup d'applications où ils doivent assurer : - des variations de vitesse, - des démarrages fréquents, - le freinage de la charge.
TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE EN ÉNERGIE MÉCANIQUE DE TRANSLATION		
ÉLECTROAIMANTS		Les électroaimants les plus utilisés sont à armature mobile . Ce sont des électroaimants de manœuvre qui font partie d'ensembles mécaniques complets tels que freins, embrayages...
TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE PNEUMATIQUE EN ÉNERGIE MÉCANIQUE DE TRANSLATION		
VÉRINS - simple effet - double effet		Les vérins sont des constituants très utilisés dans les automatismes : - grande robustesse, - montage facile, - gamme dimensionnelle très grande...
TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE EN ÉNERGIE THERMIQUE		
RÉSISTANCES	<p>Résistance non inductive, et non capacitive</p>	Les résistances électriques sont constituées avec des matériaux conducteurs, alliages de cuivre (mailechort, constantan) qui présentent une assez grande résistivité .

4 Traitement des données : constituants programmables de commande

Les constituants programmables de commande apportent une solution de logique programmée à la partie commande des systèmes automatisés.

Dans un système de traitement d'information le **processeur est l'unité fonctionnelle capable d'interpréter et d'exécuter les instructions du programme.**

Dans un constituant programmable le processeur gère l'ensemble des échanges informationnels en assurant :

- la lecture des informations d'entrée,
- l'exécution des instructions du programme stocké en mémoire,
- la commande ou l'écriture des sorties.

Les constituants programmables peuvent être classés en **deux familles** (fig. 23.05) selon qu'ils sont :

- orientés vers des applications spécifiques,
- à caractère universel.

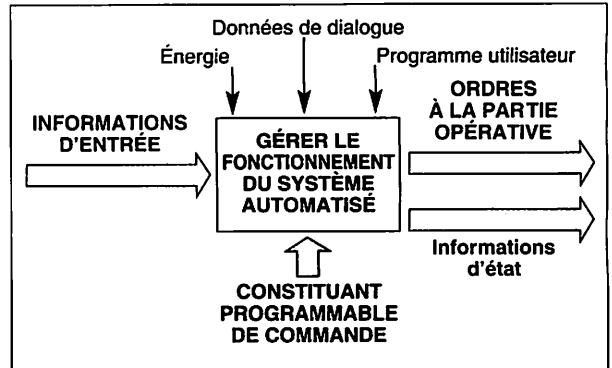


Fig. 23.04 : Constituant programmable de commande.

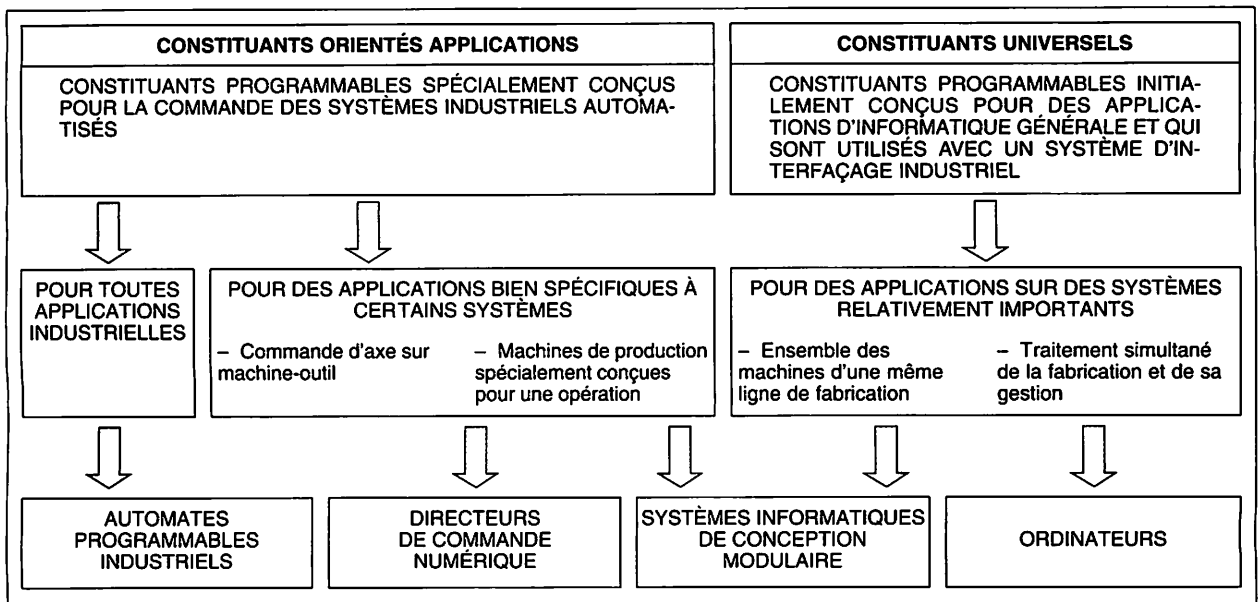


Fig. 23.05 : Classification des constituants programmables de commande.

Exemple

Dans une installation de manutention de sable, un transporteur à benne assure le remplissage en sable d'une trémie peseuse. Celle-ci sert à alimenter une centrale à béton (fig. 23.06).

À l'état initial

- la trémie est fermée et vide, affichage P_0 ,
- le transporteur est immobilisé dans l'axe de la trémie,
- la benne est ouverte en position haute.

Description du cycle

À partir de l'information de début de cycle la chronologie des actions est :

- déplacer la benne vers la gauche jusqu'à l'axe du tas de sable,
 - descendre la benne,
 - fermer la benne,
 - monter la benne,
 - déplacer la benne vers la droite jusqu'à l'axe de la trémie,
 - descendre la benne,
 - ouvrir la benne,
 - monter la benne,
- et ce cycle se répète jusqu'au moment où le poids P_1 est atteint, ce qui entraîne :
- démarrer le tapis roulant,
 - ouvrir la trémie,

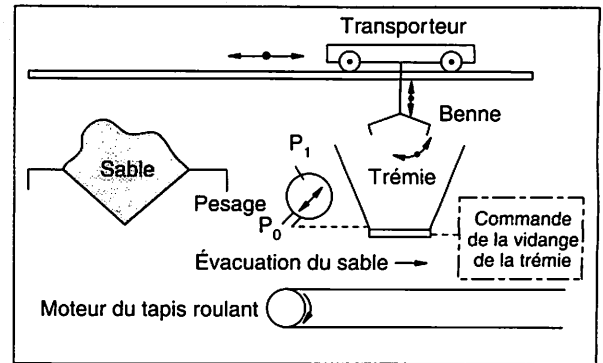


Fig. 23.06 : Alimentation en sable d'une centrale à béton.

jusqu'à l'affichage du poids P_0 qui provoque les actions :

- fermer la trémie,
- arrêter le tapis roulant, 30 secondes après.

L'ensemble de ces opérations est géré par la partie commande du système (fig. 23.07). Celle-ci fournit des instructions aux actionneurs en fonction des informations des différents capteurs et de l'opérateur et selon un programme préétabli.

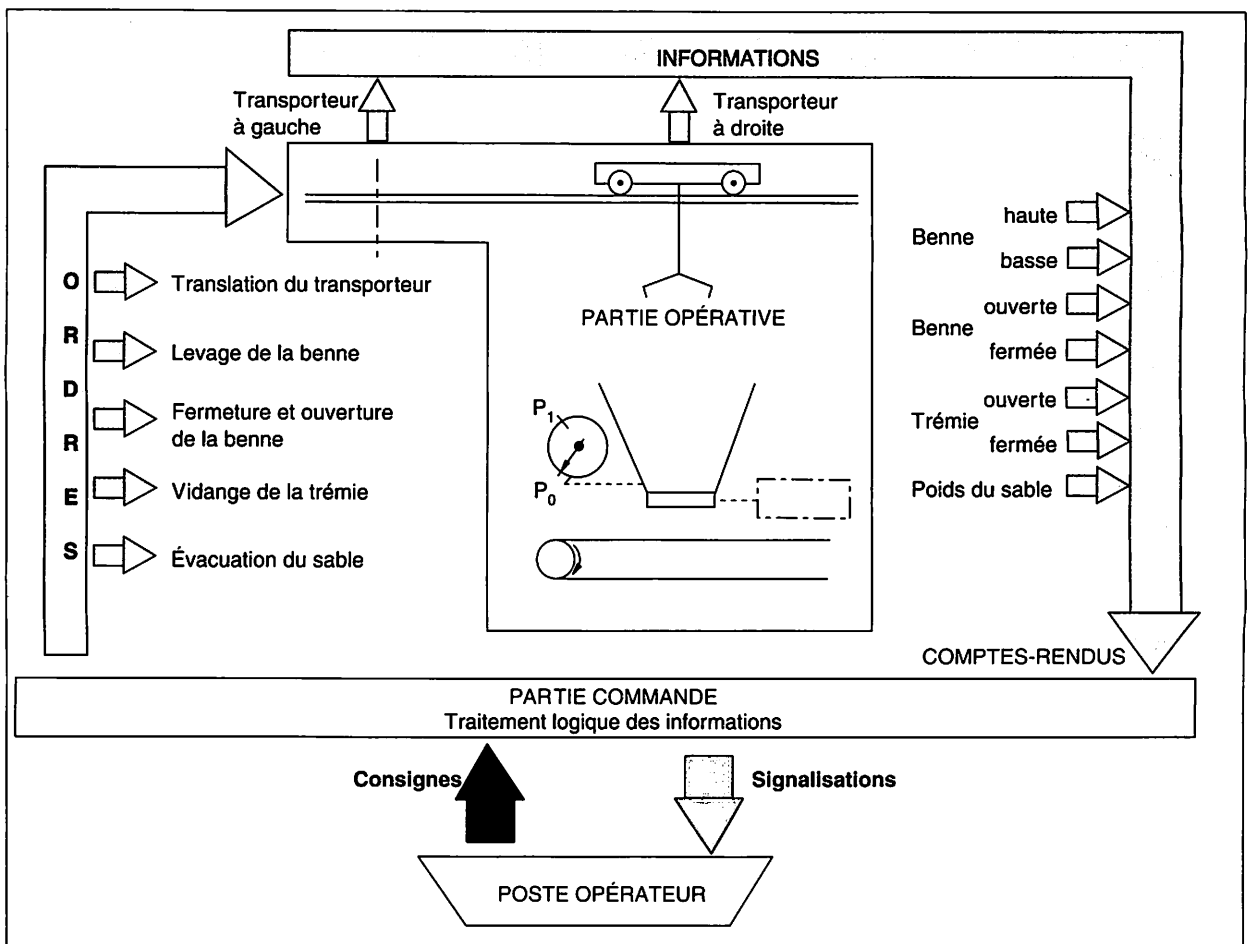


Fig. 23.07 : Gestion du système.

5 Automate programmable industriel

Un **automate programmable** est un appareil électronique qui comporte une **mémoire programmable** par un utilisateur automaticien à l'aide d'un langage adapté, pour le **stockage interne des instructions comportant les fonctions d'automatismes**, par exemple :

- logique séquentielle et combinatoire,
- temporisation,
- comptage, décomptage, comparaison,
- calcul arithmétique,
- réglage, asservissement, régulation, etc...

pour commander, mesurer et contrôler au moyen des modules d'entrée et de sortie (logiques, numériques ou analogiques) différentes sortes de machines ou de processus, en **environnement industriel**.

La compacité, la robustesse et la facilité d'emploi des automates programmables industriels (**A.P.I.**) font qu'ils sont très utilisés dans la partie commande des systèmes industriels automatisés.

La figure 23.08 représente, fonctionnellement, l'emploi d'un A.P.I. pour la partie commande d'un système industriel automatisé.

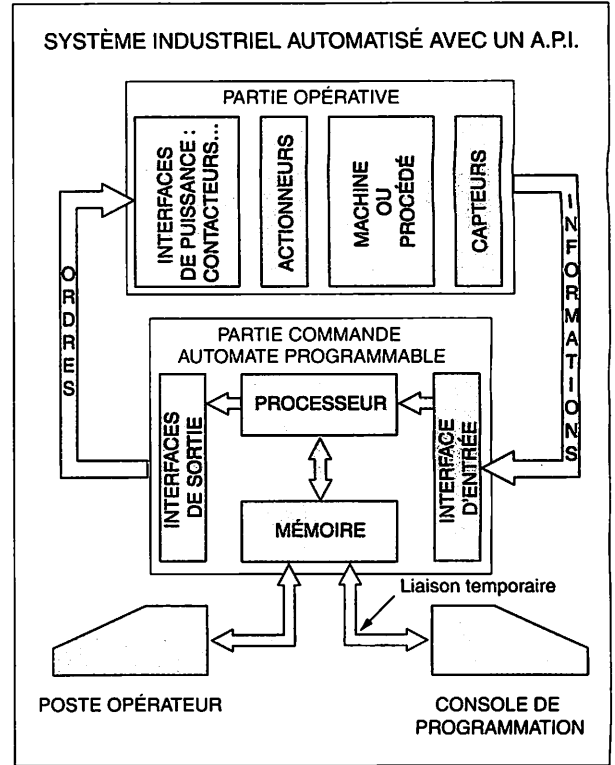


Fig. 23.08 : Schéma fonctionnel d'un système industriel automatisé avec un A.P.I. pour la partie commande.

ESSENTIEL À RETENIR

SYSTÈME AUTOMATISÉ

Un système automatisé comprend :

- une **partie opérative** qui consomme de l'énergie et produit les **effets utiles** du système,
- une **partie commande** qui élabore des **ordres** en fonction des informations générées par les capteurs de la partie opérative ou à partir des consignes affichées par l'opérateur.

CAPTEUR

Un capteur permet de saisir la variation d'une grandeur ou d'un état physique et de la convertir en un signal exploitable par la partie commande.

ACTIONNEUR

Un actionneur convertit l'énergie qu'il reçoit en une énergie utilisatrice sous une forme différente.

TEST RAPIDE

T.1 Indiquer la grandeur physique dont les variations sont détectées par une thermistance.

Réponse : Mouvement, Température, Pression.

T.2 Un capteur de vitesse, du type dynamo tachymétrique fournit une tension de 0,08 V par tr/min. À quelle fréquence de rotation est-elle entraînée lorsque la tension à ses bornes est de 116 V ?

Réponse : 1160 tr/min ; 228 tr/min ; 1450 tr/min.

T.3 Indiquer le type d'actionneur permettant la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique de translation.

Réponse : Vérin ; Résistance ; Electro-aimant.

T.4 Une résistance de chauffage porte les indications 230 V-2 000 W.

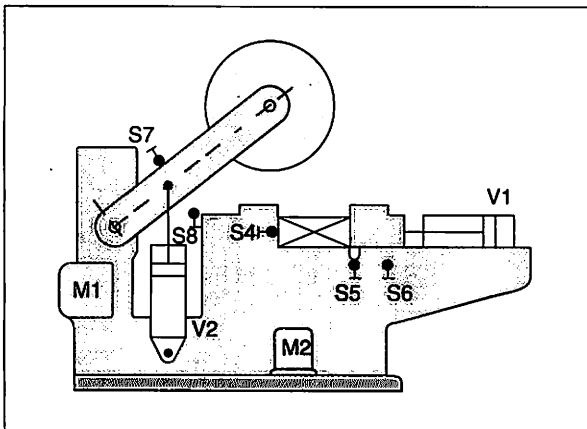
Quelle intensité de courant absorbe-t-elle ?

Réponse : 8,7 A ; 20 A ; 0,12 A.

APPLICATIONS

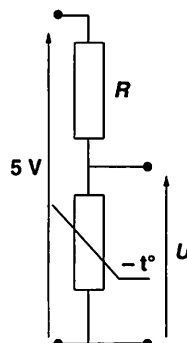
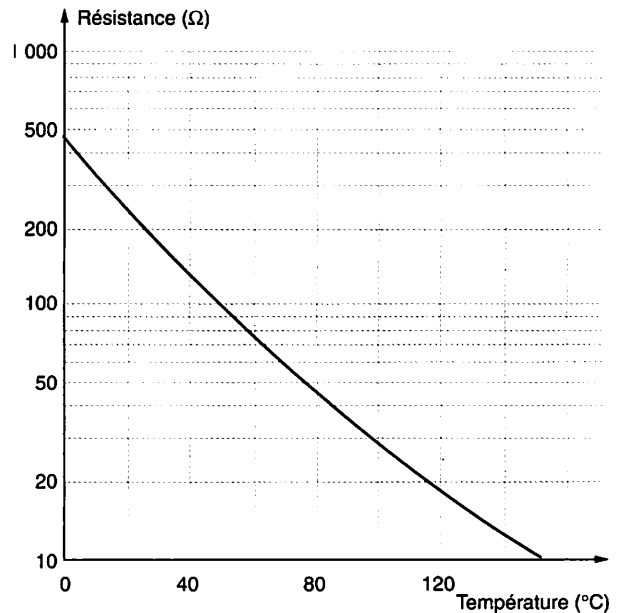
EXERCICES À RÉSOUDRE

E.1 Le schéma ci-dessous représente une scie automatisée avec le repérage des différents capteurs et actionneurs de sa partie opérative. Préciser pour chaque repère s'il s'agit d'un capteur ou d'un actionneur.



Repères	Fonction ou information	Repères	Fonction ou information
M1	Moteur scie	S3	Arrêt d'urgence
S1	Départ cycle	S4	Présence pièce
V1	Vérin de serrage	S5	Serrage pièce
M2	Moteur pompe d'arrosage	S6	Desserrage pièce
S2	Marche automatique	S7	Position haute de la scie
V2	Vérin de commande de la scie	S8	Position basse de la scie

E.2 Un capteur de température est constitué d'une résistance $R = 220 \Omega$ en série avec une thermistance CTN dont la valeur en fonction de la température est donnée par le graphique ci-dessous.



a. Donner la valeur de la résistance de la thermistance à 0 °C, 20 °C, 100 °C.

b. Calculer la tension U aux bornes de la thermistance à ces températures.

MESURES SUR DES APPLICATIONS PROFESSIONNELLES

MODULE D'ALIMENTATION REDRESSEMENT

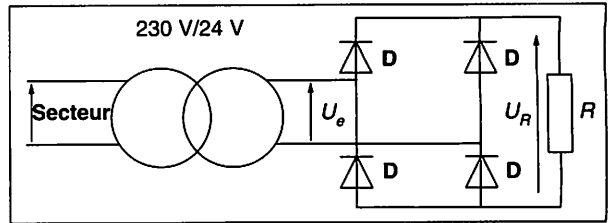
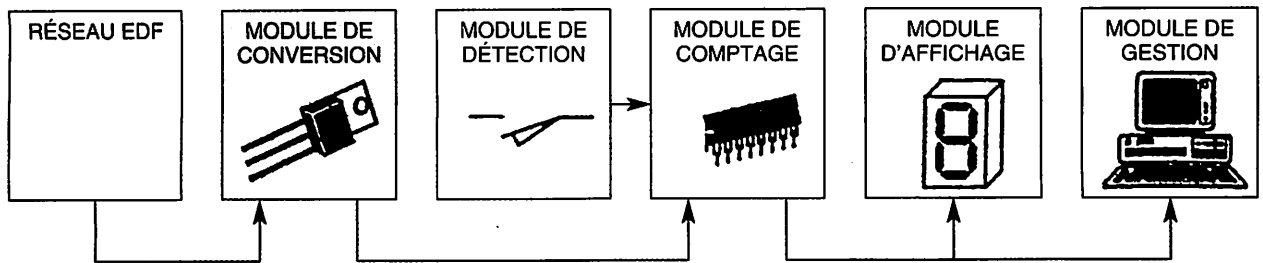
■ CONTEXTE TECHNIQUE

En fin de chaîne d'une production automatisée de bobines de fils, un poste assure le comptage des cartons contenant les bobines.

Ce comptage n'est plus effectué en raison d'une panne sur le module de conversion d'énergie.

Ce module permet l'alimentation du module de comptage (voir ci-dessous). La figure ci-contre représente le schéma de la fonction redressement du module de conversion d'énergie.

■ POSTE DE COMPTAGE

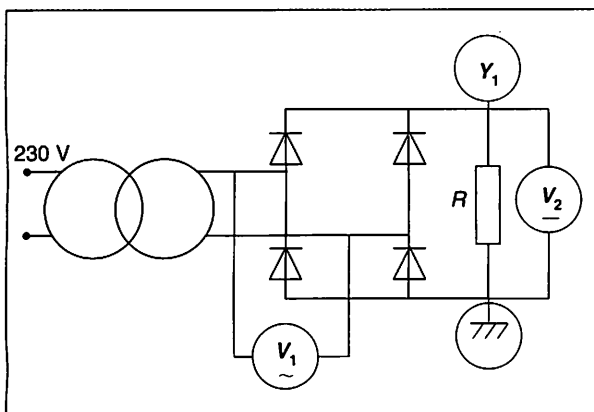


■ TRAVAIL DEMANDÉ

1. Mesurer la tension efficace U_e en sortie du transformateur et la tension moyenne \bar{U}_R aux bornes de la résistance R .
2. Relever l'oscillogramme de U_R et déterminer la valeur maximale de la tension aux bornes de R .

Exemple de résultats

1. Mesure des tensions



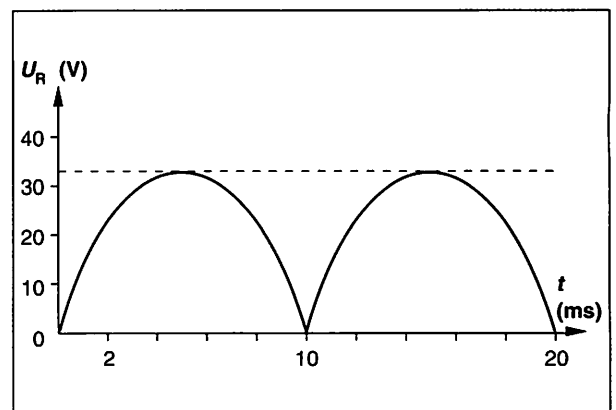
Le voltmètre V_1 , en position alternatif, mesure la valeur efficace de U_e .
 $U_e = 24,3 \text{ V}$

Le voltmètre V_2 , en position continu, mesure la valeur moyenne de U_R .
 $\bar{U}_R = 21,1 \text{ V}$

2. Relevé d'oscillogramme

Le branchement de l'oscilloscope est repéré par les bornes ⏏ et Y_1 sur le schéma.

Les calibres choisis sont :
Balayage : 2 ms/div
Sensibilité : 20 V/div



La valeur maximale de U_R est :
 $\hat{U}_R = 33 \text{ V}$

MESURES SUR DES APPLICATIONS PROFESSIONNELLES

RÉGLAGE DE PUISSANCE D'UN FOUR GRADATEUR À TRAIN D'ONDES

■ CONTEXTE TECHNIQUE

La variation de la température d'un four est assurée par un gradateur à trains d'ondes entières de courant alternatif monophasé.

Le gradateur par trains d'ondes permet de régler la puissance moyenne absorbée dans un cycle voisin de 2,5 s.

La conduction est commandée pour un nombre entier de périodes.

■ TRAVAIL DEMANDÉ

1. Étude du four

Déterminer par mesures la puissance maximale du four (charge purement résistive) sous 230 V/50 Hz.

2. Vérification du fonctionnement du gradateur

Régler le potentiomètre R_2 à mi-course. Visualiser à l'oscilloscope à mémoire l'intensité du courant dans la charge.

Déterminer la durée totale du cycle et le temps de conduction. En déduire la puissance moyenne absorbée.

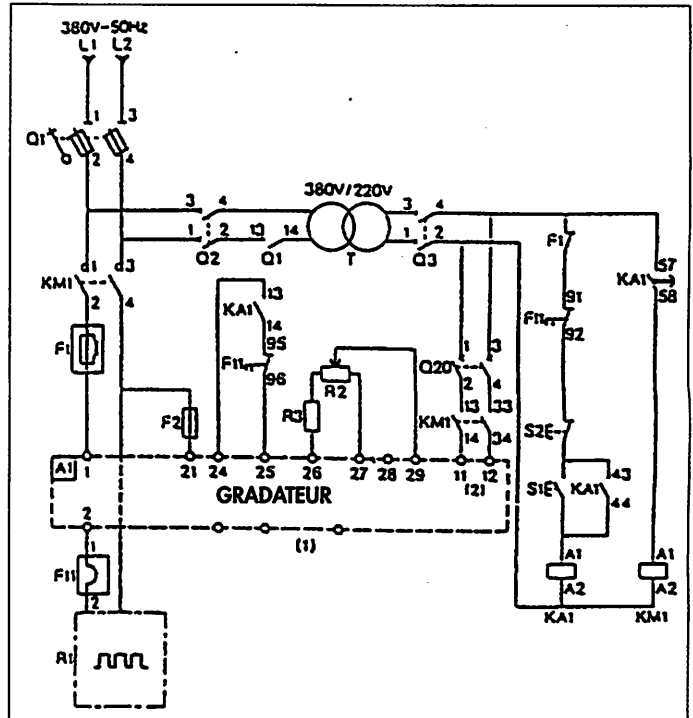


Schéma avec commande manuelle par potentiomètre extérieur R_2 (d'après SCHNEIDER-TÉLÉMÉCANIQUE).

Exemple de résultats

1. Étude du four

La charge étant purement résistive, la puissance absorbée se calcule par :

$$P = UI \quad (\cos \varphi = 1)$$

L'intensité pourra être mesurée à la pince ampèremétrique.

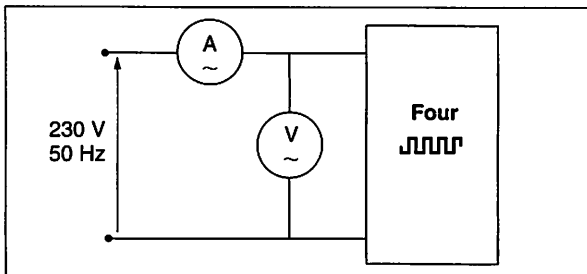


Schéma du montage.

Mesures : $U = 227 \text{ V}$ $I = 21,8 \text{ A}$

$$P_{\text{MAX}} = UI = 227 \times 21,8 \text{ soit } P_{\text{MAX}} = 4\,948 \text{ W}$$

2. Fonctionnement du gradateur

L'intensité est visualisée grâce à l'utilisation d'une sonde de courant avec un rapport de 10 mV/A.

Calibres choisis pour l'oscilloscope :

Balayage : 0,5 s/div (2 cycles)

Sensibilité : 0,1 V/div

Mesures :

Durée du cycle : $T = 2,4 \text{ s}$

Durée de conduction : $t = 1,3 \text{ s}$

La puissance moyenne se calcule par la relation :

$$P = P_{\text{MAX}} \frac{t}{T} \text{ soit } P = 2\,680 \text{ W.}$$

COMPLÉMENTS TECHNOLOGIQUES

COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES

1 Diodes de redressement

TYPE	V_{RRM} (V)	I_0 (A)	I_{FSM} (A)	V_F (V) / I_F (A)	I_R (μ A) / V_{RRM} (V)
1N 4001	50	1	30	1,1 1	5 50
1N 4004	400	1	30	1,1 1	5 400
1N 1585	400	3	40	1,5 3	5 400

V_{RRM} tension inverse de pointe répétitive maximale.
Cette valeur correspond à la tension de claquage inverse de la diode,

I_0 courant moyen,

I_{FSM} courant direct de pointe maximale,
 V_F/I_F tension aux bornes de la diode polarisée en direct et parcouru par le courant i_F ,

I_R courant inverse maximal.

Ces diodes sont prévues pour laisser passer des courants importants.

La puissance maximale qu'elles dissipent, polarisées en direct est donnée par le produit : $P = V_F I_F$.

Ainsi la **diode 1N 4004** en fonctionnement dissipe une puissance $P = 1,1 \text{ W}$.

Un ordre de grandeur de leur résistance dynamique, en supposant le **seuil de tension à $U_0 \approx 0,7 \text{ V}$** , est donné par la relation : $r = (V_F - U_0)/I_F$.

La résistance dynamique de la **diode 1 N 4004** est de l'ordre de $0,4 \Omega$, soit une très faible valeur.

2 Diodes de signal

TYPE	$V_R - V_{RM}$ (V)	I_0 (mA)	V_F (V) / I_F (mA)	I_R (nA) / V_R (V)	t_{rr} (ns)
1N 4148	75 - 100	75	1 10	25 20	4

Ces diodes sont prévues pour de faibles courants, leur résistance dynamique est beaucoup plus grande que celle des diodes de redressement.

Par contre, le temps de passage de l'état passant à l'état bloqué, donné par t_{rr} ou **temps de recouvrement** est très court.

3 Diodes de régulation de tension

TYPE	P_{TOT} (W)	V_{ZT} (V) / I_{ZT} (mA)	r_{ZT} (Ω)	I_R (μ A) / V_R (V)	I_{ZM} (mA)
BZ X55C 5 V1	0,5	5,1 5	55	0,1 1	80
BZ X85C 7 V5	1,3	7,5 35	03	1 4,5	140
BZ X85C 10	1,3	10 25	7	0,7 7	105

P_{TOT} puissance maximale dissipée,

V_{ZT}/I_{ZT} tension inverse aux bornes de la diode lorsqu'elle est parcourue par le courant I_{ZT} ,

r_{ZT} résistance dynamique inverse,

I_R/V_R courant inverse lorsque la diode est bloquée, la tension à ses bornes V_R étant inférieure au seuil de conduction,

I_{ZM} courant inverse maximal.

COMPLÉMENTS TECHNOLOGIQUES

4 Boîtiers de transistors

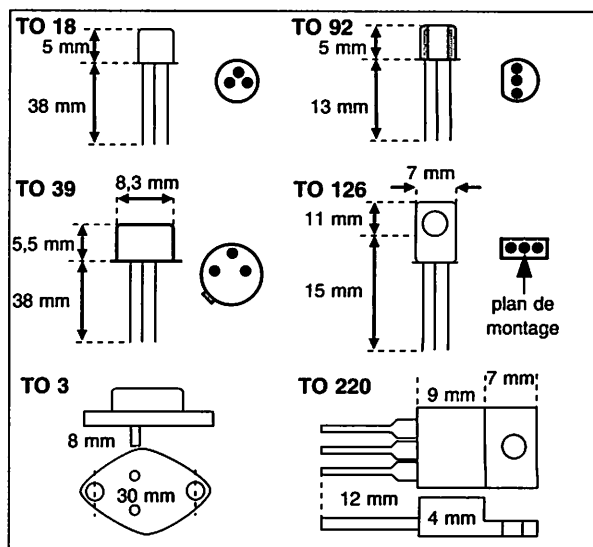
La figure ci-contre représente les types de boîtiers les plus répandus :

– les boîtiers **TO-18** (métalliques) et **TO-92** (plastiques) sont utilisés pour les transistors de petits signaux ou de commutation de faible puissance ;

– les boîtiers **TO-39** correspondent aux transistors de moyenne puissance ;

– les transistors de forte puissance, utilisent les boîtiers **TO-3** entièrement métalliques ou **TO-220** et **TO-126**, en plastique avec base métallique ; ces boîtiers sont prévus pour être montés sur un radiateur externe qui améliore l'évacuation de la chaleur.

Dans la plupart des cas, le collecteur est relié à la partie métallique du boîtier des transistors.



5 Transistors

RÉFÉRENCE	TYPE	BOÎTIER	P_{TOT} (w)	V_{CEO} (V)	V_{EBO}	$I_{C MAX}$ (A)	β	
							Mini	Maxi
2N 1711	NPN	TO-39	0,8	50	7	1	100	300
2N 2905	PNP	TO-39	0,5	40	5	0,6	100	300
BD 139	NPN	TO-126	12	80	5	1	40	100
BD 140	PNP	TO-126	12	80	5	1	40	100
2N 3055	NPN	TO-3	115	60	7	15	20	70
BU X85	NPN	TO-3	40	450	-	2	10	-
BD X65	Darlington NPN	TO-3	117	60	-	12	1 000	-

P_{TOT} puissance maximale dissipée,
 V_{CEO} tension maximale entre émetteur et collecteur,
 V_{EBO} tension de claquage de la jonction émetteur-base,
 $I_{C MAX}$ courant de collecteur maximal,
 β gain en courant.

6 Thyristors

RÉFÉRENCE	V_{RRM} (V)	I_T (A)	I_H (mA)	V_{GT} (V)	I_{GT} (mA)	$P_G MAX$ (W)
TIC 116 D	400	5	40	0,8	5	1
BTW 50-400	400	40	50	3	150	2

V_{RRM} tension inverse de pointe répétitive,
 I_T courant moyen à l'état passant,
 I_H courant hypostatique,
 V_{GT} tension d'amorçage par la gâchette,
 I_{GT} courant d'amorçage par la gâchette,
 $P_G MAX$ dissipation de puissance de gâchette.

COMPLÉMENTS TECHNOLOGIQUES

CONVERTISSEURS D'ÉNERGIE (D'APRÈS SCHNEIDER-TÉLÉMÉCANIQUE)

1 Variateurs de vitesse pour moteurs à courant continu

Les variateurs de vitesse sont destinés à l'alimentation des **moteurs à courant continu** à excitation séparée ou permanente.

Ce sont des **redresseurs commandés** à pont mixte unidirectionnel ou à pont complet réversible. Ils fournissent à partir du réseau alternatif monophasé ou triphasé une tension redressée de valeur moyenne variable.

SYMBOLE

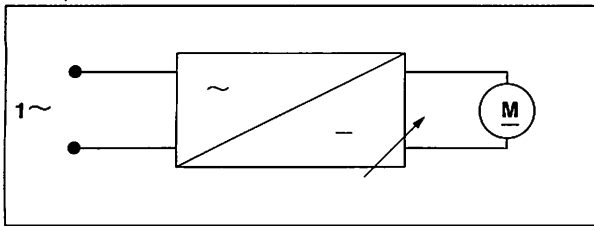
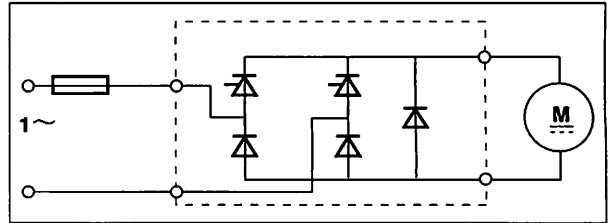
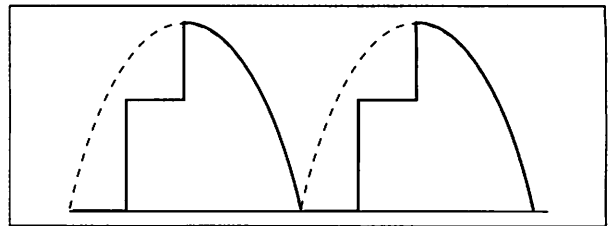


SCHÉMA (MONOPHASÉ UNIDIRECTIONNEL)



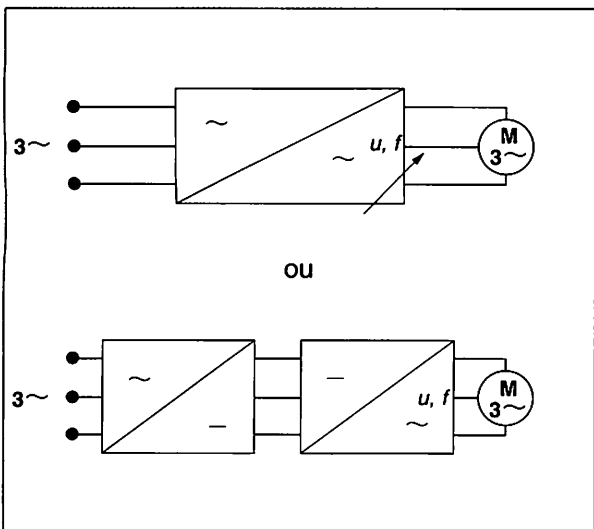
TENSION DÉLIVRÉE



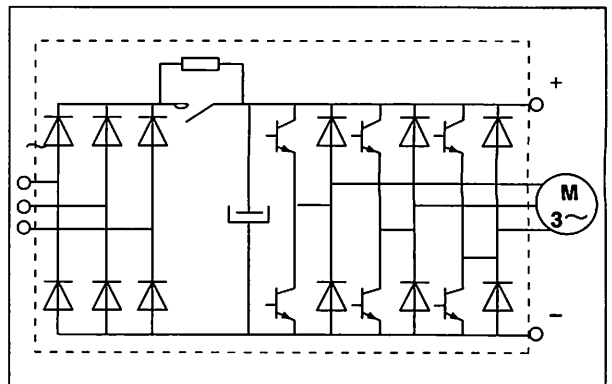
2 Variateurs de vitesse pour moteurs à courant alternatifs

Ces variateurs de vitesse sont des **convertisseurs de fréquence** pour moteurs synchrones ou asynchrones. Ils fournissent à partir du réseau alternatif monophasé ou triphasé, une tension alternative de **valeur efficace et de fréquence variable** suivant une loi pré-établie.

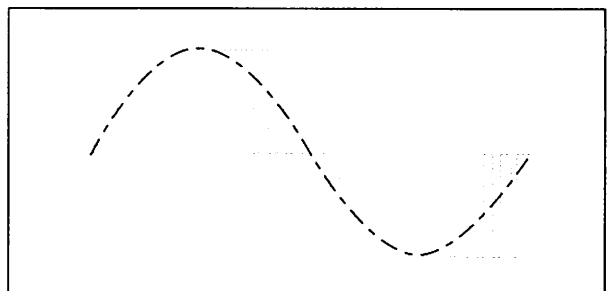
SYMBOLE



SCHÉMA



TENSION DÉLIVRÉE



COMPLÉMENTS TECHNOLOGIQUES

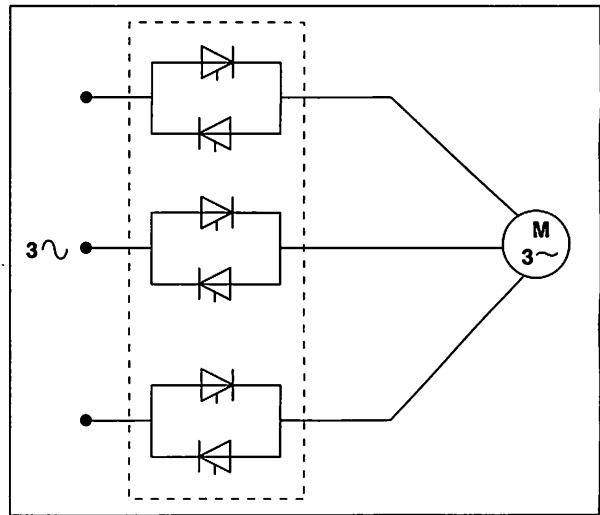
3 Démarreurs-ralentisseurs pour moteurs asynchrones

Les démarreurs-ralentisseurs sont des **gradateurs à thyristors**. Ils permettent de délivrer une tension, à fréquence fixe, dont la valeur augmente progressivement. **Ils assurent ainsi le démarrage et l'arrêt contrôlé** des moteurs asynchrones triphasés à cage avec :

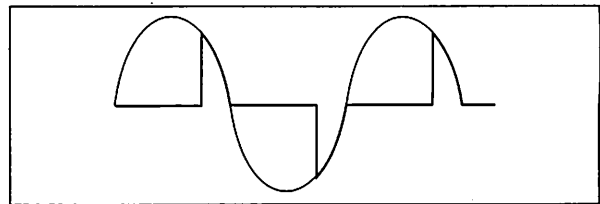
- la maîtrise des caractéristiques de fonctionnement notamment durant les périodes de démarrage et d'arrêt,
- la protection thermique du moteur et du démarreur,
- la protection mécanique de la machine entraînée par suppression des à-coups de couple.

Le moteur asynchrone associé au gradateur doit être capable de démarrer la charge à entraîner quand il est alimenté sous tension et courant réduits.

■ SCHÉMA



■ TENSION DÉLIVRÉE



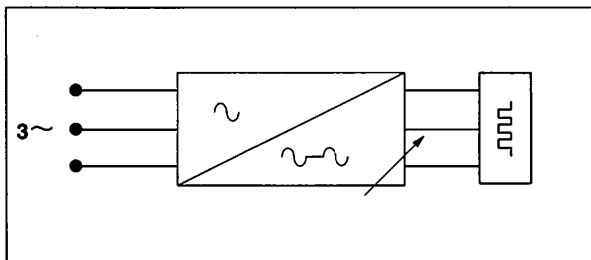
4 Gradateurs par trains d'ondes pour électrothermie résistive

Les **gradateurs à thyristors** permettent le réglage d'énergie par trains d'ondes entières principalement pour la commande automatique des charges résistives (fours à résistance par exemple).

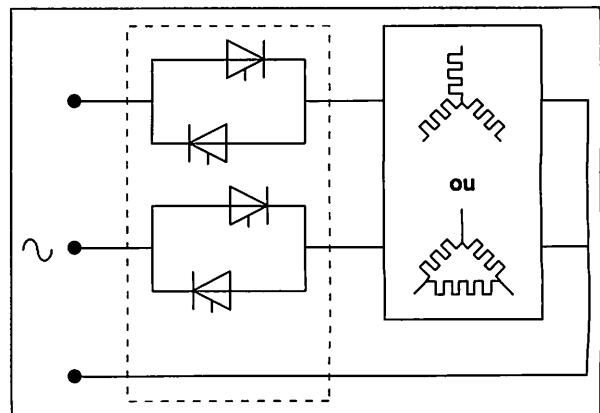
Ils permettent de régler la **puissance moyenne** absorbée dans un cycle de 2,5 s (soit 125 périodes sur le réseau 50 Hz). La conduction est commandée pour un **nombre entier de périodes**.

Ce procédé de variation d'énergie ne crée pas de perturbations radio-électriques et ne dégrade pas le facteur de puissance de l'installation.

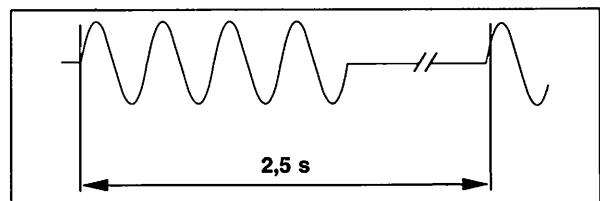
■ SYMBOLE



■ SCHÉMA



■ TENSION DÉLIVRÉE



Appareils de mesure

24 Multimètres

25 Oscilloscope

26 Pincés multifonctions

24 Multimètres

ÉLECTROTECHNIQUE

1 Appareils de mesure

L'appareil le plus couramment utilisé est le **multimètre** ou **contrôleur universel**.

Cet appareil a plusieurs fonctions : voltmètre, ampèremètre, ohmmètre.

On peut distinguer deux grandes familles de multimètres : **numériques** et **analogiques** (fig. 24.01).

L'utilisation d'un multimètre nécessite :

- la sélection de la fonction,
- le choix du calibre ou valeur maximale pouvant être mesurée par l'appareil,
- l'interconnexion de l'appareil au circuit,
- la lecture de la valeur mesurée.

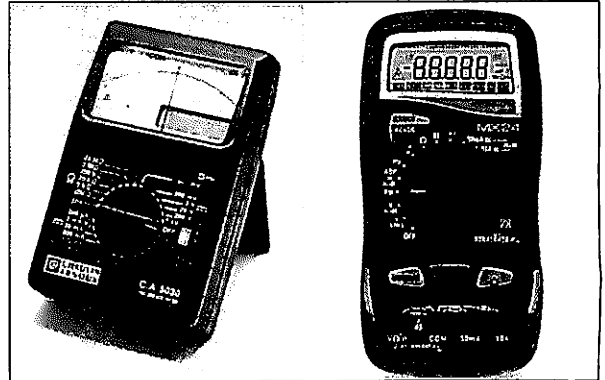


Fig. 24.01 : Différents types de multimètres.

2 Lecture de la valeur mesurée

Les multimètres à **affichage numérique** permettent la lecture directe de la valeur mesurée.

Les multimètres à **aiguille** nécessitent une conversion du déplacement de l'aiguille en valeur de la grandeur mesurée. La conversion à effectuer est fonction du calibre selon la relation :

$$\text{VALEUR MESURÉE} = \frac{\text{CALIBRE}}{\text{NOMBRE TOTAL DE DIVISIONS}} \times \text{NOMBRE DE DIVISIONS LUES}$$

Le plupart des multimètres à aiguille possèdent plusieurs échelles de lecture afin d'avoir une bonne concordance calibre-échelle.

3 Précision d'un appareil

Pour un appareil à affichage numérique, l'incertitude sur la mesure est donnée dans la notice de l'appareil sous forme d'un pourcentage de la valeur mesurée plus l'erreur due à l'affichage du dernier chiffre.

Le choix du calibre influe sur la précision, **plus le nombre de chiffres affichés est grand, meilleure est la précision** (fig. 24.03).

Exemple

Dans la figure 24.02 la mesure est faite avec un multimètre à aiguille :

Calibre 10 mA, Échelle : 100 divisions

- Lecture : 70 divisions.

$$I = \frac{10}{100} \times 70 = 7 \text{ mA}$$

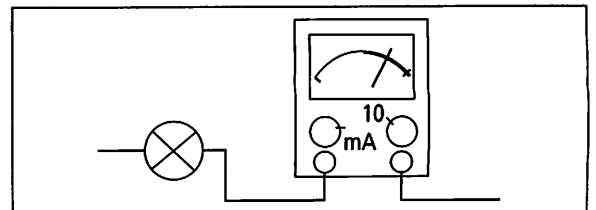
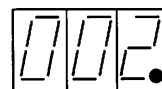
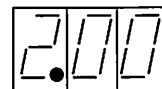


Fig. 24.02 : Mesure d'intensité.



La valeur mesurée est comprise entre 2 et 3 V.



La valeur mesurée est comprise entre 2 et 2,01 V.

Fig. 24.03 : Choix du calibre (appareil numérique).

Pour un appareil analogique, la précision de l'appareil dépend de sa classe. La classe représente l'incertitude de la mesure en pourcentage du calibre utilisé.

$$\text{INCERTITUDE} = \frac{\text{CLASSE}}{100} \times \text{CALIBRE}$$

Exemple

Dans la figure 24.04, le voltmètre est de classe 1,5 et la tension à mesurer de l'ordre de 2 V.

- Sur le calibre 10 V

$$\text{Incertitude} = \frac{1,5}{100} \times 10 = 0,15 \text{ V}$$

- Sur le calibre 3 V

$$\text{Incertitude} = \frac{1,5}{100} \times 3 = 0,045 \text{ V}$$

Plus la déviation de l'aiguille est grande, meilleure est la précision.

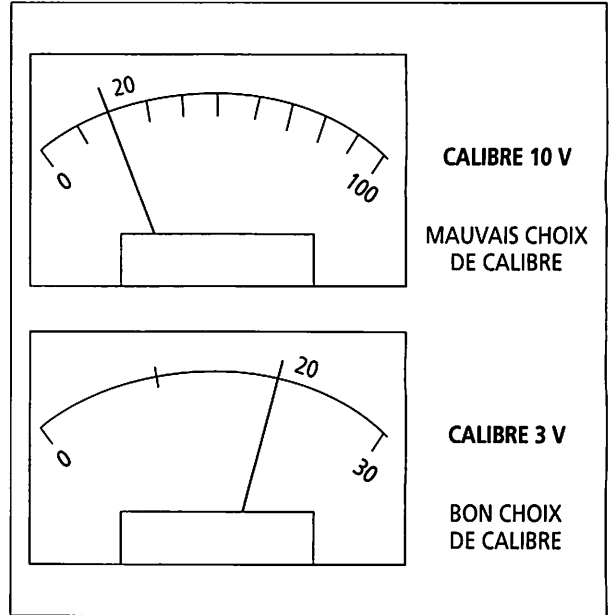


Fig. 24.04 : Choix du calibre (appareil à aiguille).

4 Mesures en alternatif

Un multimètre ordinaire, dit à valeur moyenne affiche, en position alternatif, la valeur efficace de la tension et de l'intensité si le courant mesuré est alternatif sinusoïdal.

Ce type de multimètre est avant tout un appareil de mesure de courant continu. En alternatif, la mesure se fait par l'intermédiaire d'un redresseur.

Le multimètre mesure la valeur moyenne redressée et affiche la valeur efficace qui lui est proportionnelle.

Le coefficient de proportionnalité entre valeur moyenne redressée et valeur efficace dépend de la forme du courant mesuré. La valeur affichée par ces multimètres est exacte lorsque le courant est alternatif sinusoïdal.

Un multimètre RMS ou TRMS affiche directement la valeur efficace de la tension ou de l'intensité quelle que soit la forme du courant mesuré.

Ce type de multimètre, dit à valeur efficace vraie, convient pour des courants non sinusoïdaux (variateurs de vitesse, gradateur...) et pour des charges non résistives.

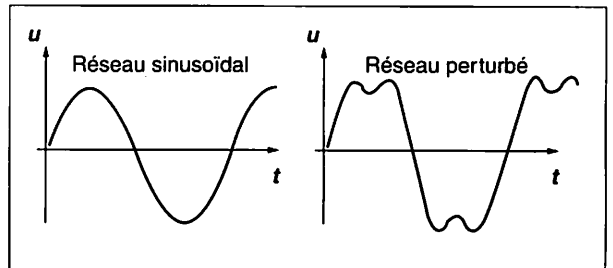


Fig. 24.05 : La valeur efficace dépend de la forme du courant.

Remarques

- Le multimètre ordinaire convient pour des mesures sur un réseau sinusoïdal non perturbé et pour des charges résistives.
- L'utilisation d'un appareil à valeur moyenne sur un courant non sinusoïdal peut totalement fausser les mesures.

5 Choix du calibre – Précautions d'emploi

Lorsque l'ordre de grandeur de la valeur à mesurer est connu, il faut choisir le **calibre immédiatement supérieur**, sinon choisir le **calibre le plus élevé** et procéder par ajustements successifs.

Lorsque le circuit est sous tension, le changement de calibre d'un voltmètre ne pose aucun problème. Par contre le changement de calibre d'un ampèremètre nécessite certaines précautions.

On peut :

- soit utiliser un appareil dont le commutateur de calibre est **manœuvrable en charge**,
- soit mettre en place un **commutateur d'intensité** à trois positions tel que représenté sur la figure 24.06 ; les positions 1 et 2 permettent l'insertion de l'ampèremètre dans deux circuits différents et la position intermédiaire (couteaux relevés) met l'ampèremètre hors circuit sans interrompre le passage du courant.
- soit encore placer aux bornes de l'ampèremètre un interrupteur qui sera fermé lors du changement de calibre (cf. fig. 24.07).
- soit utiliser une pince ampèremétrique (cf. chap. 26).

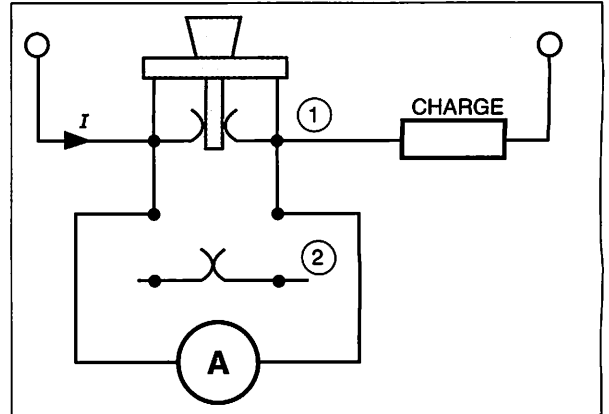


Fig. 24.06 : Commutateur d'intensité.

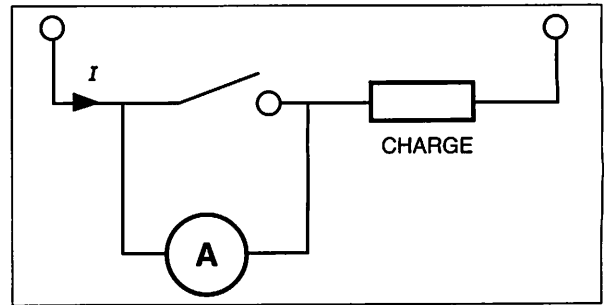


Fig. 24.07 : Protection lors du changement de calibre de l'ampèremètre.

6 Sécurité des appareils de mesure

Les appareils de mesure doivent être conformes aux normes de sécurité qui leur sont applicables et doivent porter le marquage **CE** qui atteste la conformité à la directive **CEM** et à la directive basse tension.

Le marquage de l'appareil doit comporter :

- la valeur assignée de la tension phase-terre,
- la catégorie d'installation,
- le degré de pollution.

Remarque :

Le sigle **CEM** signifie **Compatibilité Electro-Magnétique**.

Exemple

L'appareil de la figure 24.08 est conforme à la norme IEC 1010 avec :

- double isolation \square ,
- catégorie d'installation ou de surtension III (moteurs, machines...),
- degré de pollution 2 (non conductrice),
- tension phase-terre de 600 V.

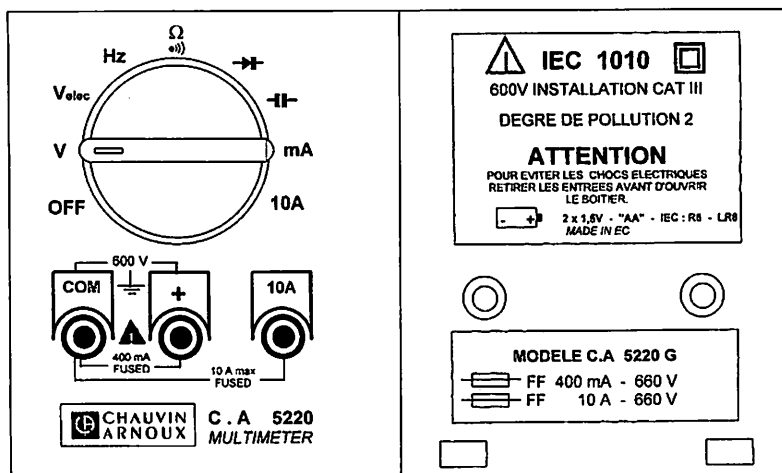


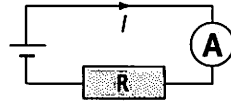
Fig. 24.08 : Face avant et arrière d'un multimètre (d'après Chauvin Arnoux).

ESSENTIEL À RETENIR

UTILISATION D'UN MULTIMÈTRE

MESURE D'INTENSITÉ

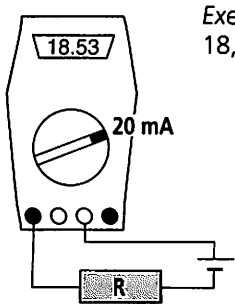
Pour mesurer l'intensité du courant dans un circuit le multimètre, utilisé dans sa fonction ampèremètre, se branche toujours en série dans le circuit.



• Le même courant traverse la résistance et l'ampèremètre.

MULTIMÈTRE NUMÉRIQUE

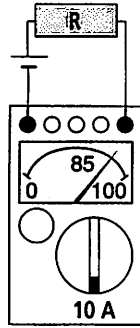
Pour un choix correct du calibre, dépassement non signalé, la lecture est directe.



Exemple :
18,53 mA

MULTIMÈTRE ANALOGIQUE

- Choisir le calibre, en commençant par le plus grand, qui permet la plus grande amplitude de déplacement de l'aiguille sans dépasser les limites du cadran.
- Lire sur l'échelle repérée par rapport au calibre le nombre de divisions correspondant à la position de l'aiguille.
- Calculer : Valeur mesurée =



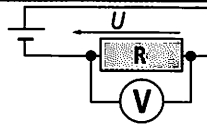
$$\frac{\text{Calibre choisi}}{\text{Nombre de divisions de l'échelle de lecture}} \times \text{Nombre de divisions lues}$$

Exemple : Calibre choisi 10 A. Échelle de lecture 100 divisions. Position de l'aiguille 85.

$$\text{Valeur mesurée} : \frac{10}{100} \times 85 = 8,5 \text{ A}$$

MESURE D'UNE TENSION

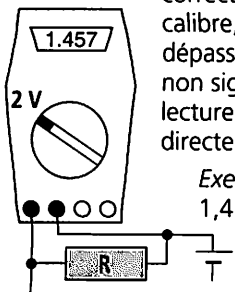
Pour mesurer la tension aux bornes d'un circuit le multimètre, utilisé dans sa fonction voltmètre, se branche toujours en parallèle, ou en dérivation avec le circuit.



La même tension est appliquée à la résistance et au voltmètre.

MULTIMÈTRE NUMÉRIQUE

Pour un choix correct du calibre, dépassement non signalé, la lecture est directe.



Exemple :
1,457 V

MULTIMÈTRE ANALOGIQUE

- La méthode de la lecture et le calcul reste la même que celle décrite pour la mesure d'une intensité.

Exemples :

- Calibre choisi 100 V. Échelle de lecture 100 divisions. Position de l'aiguille 63.

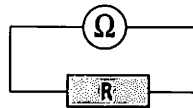
$$\text{Valeur mesurée} : \frac{100}{100} \times 63 = 63 \text{ V}$$

- Calibre choisi 3 volts. Échelle de lecture 30 divisions. Position de l'aiguille 27.

$$\text{Valeur mesurée} : \frac{3}{30} \times 27 = 2,7 \text{ V}$$

MESURE D'UNE RÉSISTANCE

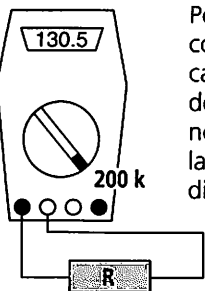
Pour mesurer avec un multimètre, utilisé dans sa fonction ohmmètre, la résistance d'un composant, ce dernier est branché directement aux bornes de l'appareil.



ATTENTION : La mesure d'une résistance doit se faire hors tension.

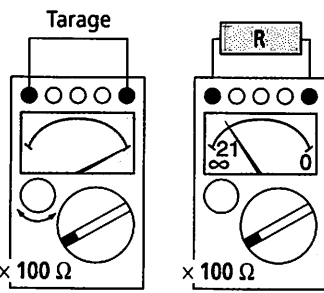
MULTIMÈTRE NUMÉRIQUE

Pour un choix correct du calibre, dépassement non signalé, la lecture est directe.



Exemple :
130,5 kΩ

MULTIMÈTRE ANALOGIQUE (AVEC DISPOSITIF DE TARAGE)



- Choisir le calibre
- l'appareil en court-circuit, agir sur le dispositif de tarage pour amener l'aiguille sur le zéro.
- Brancher le composant
- Lire sur l'échelle Ω la position de l'aiguille
- Calculer : Valeur mesurée = Valeur lue × Coefficient du calibre

Exemple :

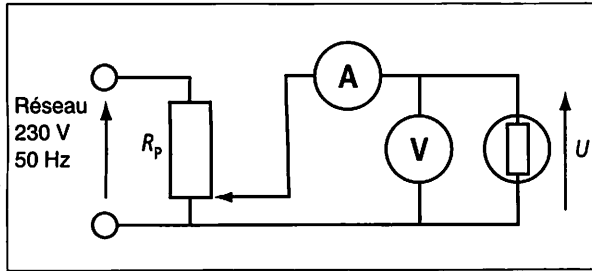
Coefficient du calibre 100. Valeur lue 21.

$$\text{Valeur mesurée} : 21 \times 100 = 2\ 100 \ \Omega$$

EXPÉRIMENTATION

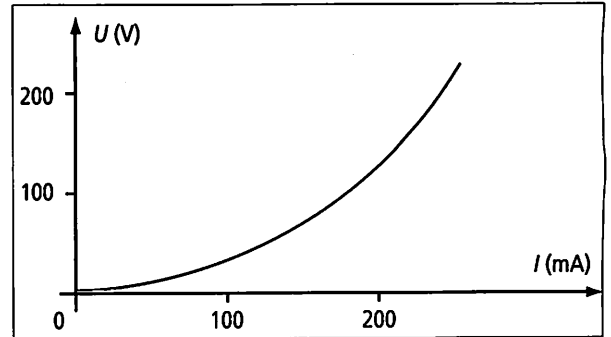
Relevé de la caractéristique d'une lampe

MONTAGE DE MESURES



La lampe (230 V-60 W) est alimentée à partir du réseau par un montage potentiométrique.

EXEMPLE DE RÉSULTATS

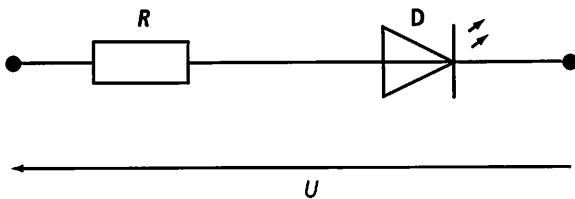


Caractéristique d'une lampe.

APPLICATIONS

EXERCICES À RÉSOUDRE

- E.1** Sur le schéma de la figure ci-dessous ajouter les appareils permettant de mesurer :
- l'intensité dans la diode D ,
 - la tension aux bornes de la résistance R .

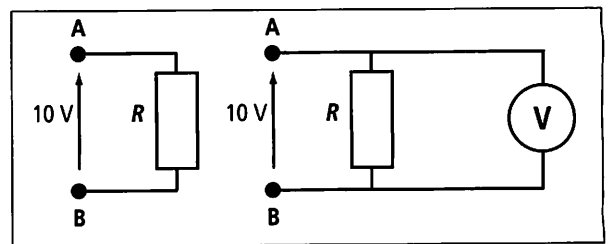


- E.2** L'intensité consommée par une lampe 230 V ; 100 W est mesurée par un ampèremètre. Déterminer le calibre le mieux adapté à la mesure parmi les suivants : 0,1 A ; 0,3 A ; 1 A ; 3 A.

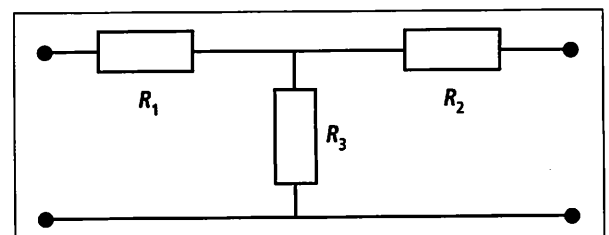
- E.3** Un voltmètre numérique affiche la valeur 5,15 V. Sa précision est de 1 %. Entre quelles limites est comprise la tension mesurée ?

- E.4** Une résistance de 470Ω est parcourue par un courant d'intensité 10 mA. Quel est le calibre le plus adapté à la mesure de tension à ses bornes ?
1 V ; 3 V ; 5 V ; 10 V.

- E.5** La tension aux bornes d'une résistance $R = 820 \text{ k}\Omega$ est mesurée par un voltmètre de résistance interne $R_V = 1 \text{ M}\Omega$ (voir figure ci-dessous). Calculer l'intensité du courant au point A du montage lorsque :
- la résistance R est alimentée seule,
 - le voltmètre est en parallèle avec la résistance R .



- E.6** Sur le schéma de la figure ci-dessous ajouter les appareils permettant de mesurer :
- la tension aux bornes de R_2 ,
 - l'intensité dans R_3 .



25 Oscilloscope

ÉLECTROTECHNIQUE

1 Tube cathodique

Le tube cathodique, organe essentiel de l'oscilloscope, se présente extérieurement sous forme d'un écran sur lequel s'affichent les variations des grandeurs électriques étudiées.

C'est un **tube à vide** en forme de cône terminé par un cylindre (fig. 25.01).

L'**écran** est la partie plane du tube, il est recouvert d'une **substance fluorescente** qui s'illumine quand elle reçoit des électrons. La tache lumineuse produite s'appelle le **spot**.

Le **canon à électrons** envoie sur l'écran un faisceau à grande vitesse. À l'intérieur de ce canon, les électrons sont accélérés au moyen d'anodes portées à des potentiels positifs élevés.

Les **plaques de déviation** servent à dévier le faisceau d'électrons dans deux directions, horizontale et verticale. Elles permettent ainsi de déplacer la position du spot sur l'écran.

ÉCRAN
FLUORESCENT

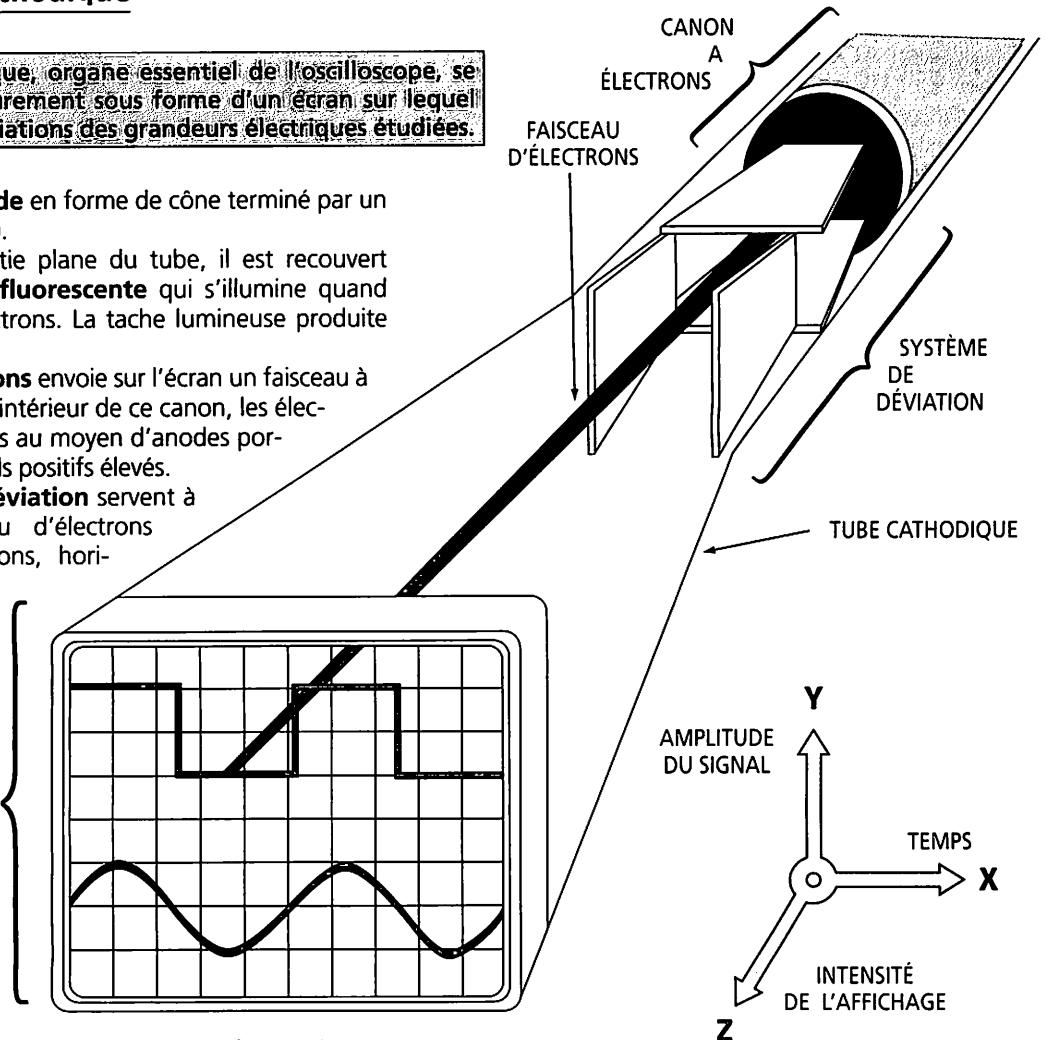


Fig. 25.01 : Principe de l'affichage des signaux en fonction du temps.

Le réglage du **nombre d'électrons** arrivant sur l'écran, donc de la **luminosité** du spot, est réalisé par le bouton **INTENSITÉ**.

Le réglage de la **concentration du faisceau**, donc de la finesse du spot s'effectue par le bouton **FOCUS**.

Les commandes de **CADRAGE VERTICAL ET CADRAGE HORIZONTAL** agissent sur les potentiels des plaques de déviation et permettent le réglage de la position du spot sur l'écran.

Tous ces réglages sont accessibles sur la face de l'oscilloscope (fig. 25.03).

2 Analyse fonctionnelle de l'oscilloscope

Le schéma fonctionnel d'un oscilloscope est représenté figure 25.02.

■ AMPLIFICATEURS VERTICAUX ET HORIZONTAUX

Les amplificateurs verticaux et horizontaux ainsi que les atténuateurs qui les précèdent (fig. 25.02) ont pour fonction d'adapter la déviation du spot à la tension appliquée à l'entrée de l'appareil.

Le réglage de la sensibilité exprimée en **VOLTS PAR DIVISION** (V/div) est effectué par un commutateur à plusieurs positions situé sur la face avant (fig. 25.03).

L'atténuateur vertical permet, par ailleurs, le choix du mode de couplage d'entrée au moyen d'un commutateur à trois positions (DC, AC, GD).

- En position **AC** seule la composante alternative est affichée sur l'écran.
- En position **DC** la totalité de la tension appliquée à l'entrée est visualisée sur l'écran.
- En position **GD** la tension étudiée est déconnectée de l'entrée, ce qui permet de placer le spot à un niveau qui sera la référence des mesures ultérieures.

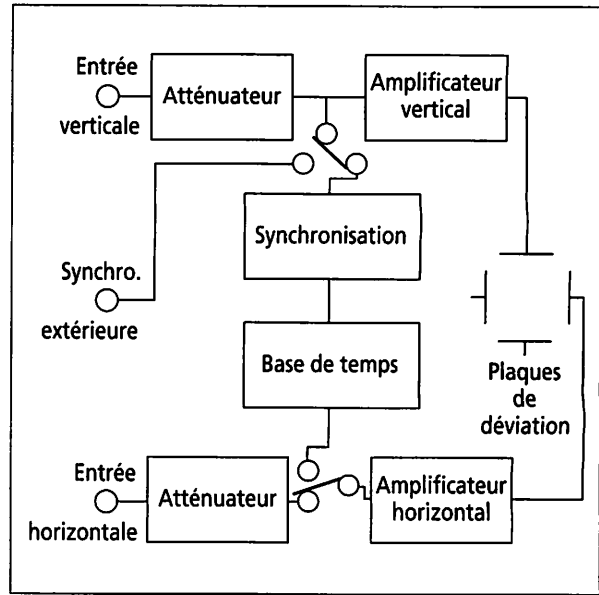


Fig. 25.02 : Schéma fonctionnel d'un oscilloscope.

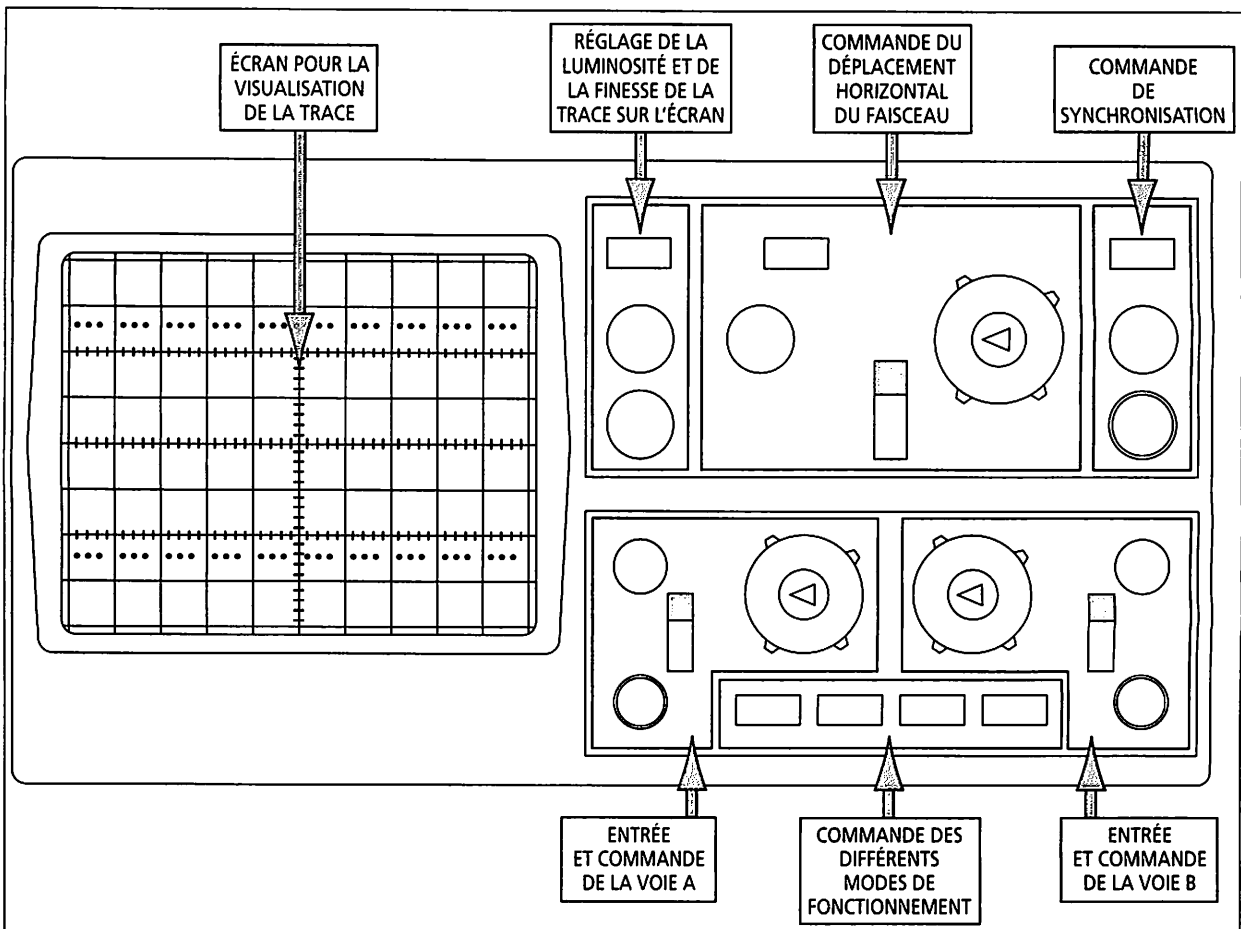


Fig. 25.03 : Face avant d'un oscilloscope.

■ BALAYAGE

La fonction balayage provoque le déplacement horizontal du spot à vitesse constante.

Un générateur interne, appelé **BASE DE TEMPS**, fournit une tension en dent de scie à l'entrée de l'amplificateur horizontal (fig. 25.04).

La position du spot sur l'écran dépend de la valeur instantanée u de la tension appliquée à l'entrée de l'amplificateur vertical et de la valeur de la tension de balayage qui est proportionnelle au temps. On peut ainsi observer sur l'écran la représentation graphique des variations de la tension u en fonction du temps.

La vitesse de déplacement horizontal du spot est réglable à partir de la face avant (fig. 25.04) par un commutateur étalonné en **SECONDES par DIVISION (s/div)**. Cet étalonnage n'est valable que lorsque le réglage progressif de la vitesse de balayage est dans une position déterminée (CAL).

Exemple

Dans la figure 25.05 la base de temps est en position étalonnée sur $50 \mu\text{s}/\text{div}$. Pour parcourir 4 divisions le spot met le temps t tel que :

$$t = 50 \times 4 = 200 \mu\text{s}.$$

Compte tenu de la graduation de l'axe horizontal de l'écran, la lecture se fait à 0,2 division près soit dans ce cas une incertitude sur t : $\Delta t = 0,2 \times 50 = 10 \mu\text{s}$.

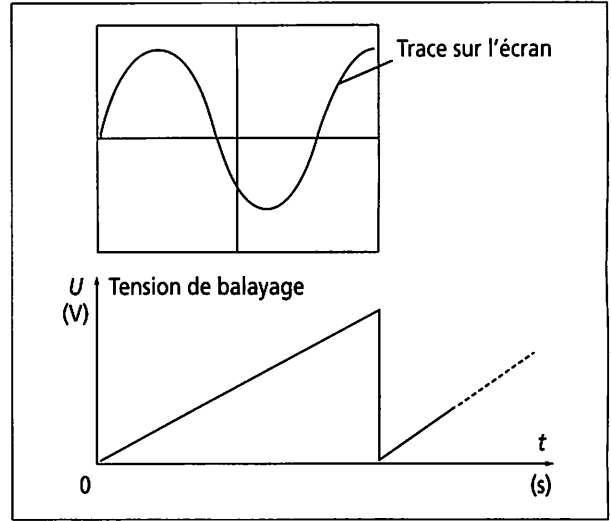


Fig. 25.04 : La tension de balayage provoque le déplacement du spot de la gauche vers la droite.

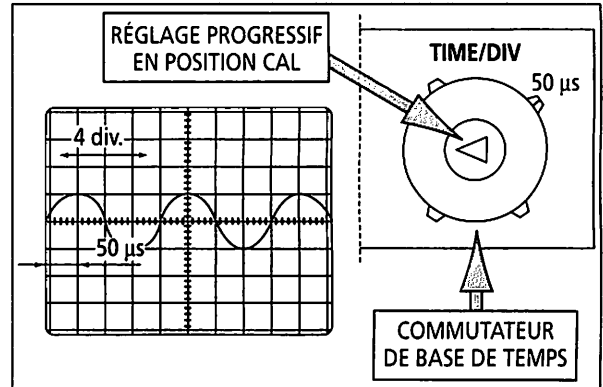


Fig. 25.05 : Réglage de la base de temps.

■ SYNCHRONISATION

La fonction synchronisation provoque le départ du balayage pour une valeur déterminée de la tension observée.

Cette valeur, appelée niveau de déclenchement, est réglable par un potentiomètre sur la face avant de l'oscilloscope.

Pour que l'image apparaisse **stable** sur l'écran, il faut que le spot décrive toujours la même figure à chaque balayage. Pour cela, son point de départ doit être toujours le même.

En position de synchronisation automatique, le niveau de déclenchement est zéro.

Sur un oscilloscope double trace, un commutateur permet de choisir la tension sur laquelle va se synchroniser le balayage.

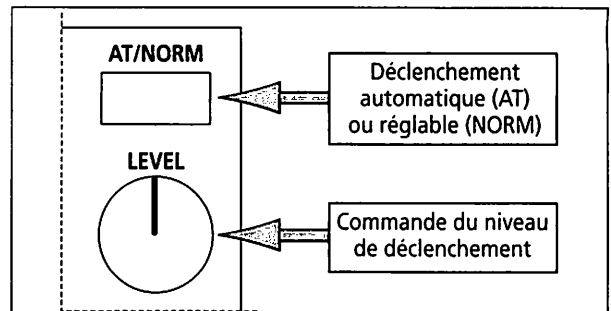


Fig. 25.06 : Commandes de synchronisation.

3 Mesures à l'oscilloscope

MESURE DE TENSION

L'oscilloscope permet de mesurer la valeur instantanée d'une tension et en particulier sa valeur maximale.

Pour que la mesure soit la plus précise possible, il faut amener le point correspondant sur l'axe vertical de l'écran où la graduation est plus fine. Ainsi dans la figure 25.07 la valeur maximale de la tension observée est de :

$$\hat{U} = 3 \times 10 = 30 \text{ V}$$

Remarque

La lecture de la tension se fait à 0,2 division près soit dans ce cas une incertitude sur \hat{U} :

$$\Delta \hat{U} = 0,2 \times 10 = 2 \text{ V.}$$

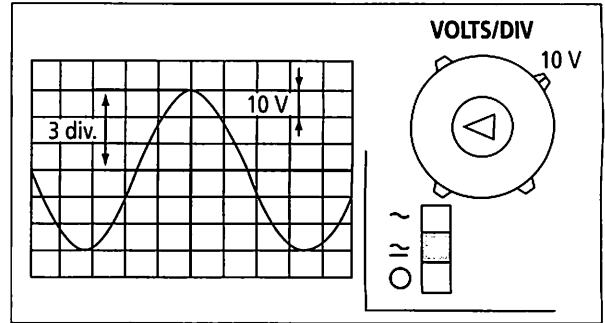


Fig. 25.07 : Mesure d'une tension maximale.

MESURE DE PÉRIODE

L'oscilloscope permet de visualiser une tension périodique et d'en mesurer la période.

La base de temps étant étalonnée, le temps est mesuré par lecture du nombre de divisions sur l'axe horizontal. Ainsi, à la figure 25.08, la période de la tension observée est égale à :

$$T = 50 \times 7 = 350 \mu\text{s.}$$

Remarque :

Pour que la base de temps soit étalonnée, le réglage progressif du balayage doit être en position calibrée (CAL).

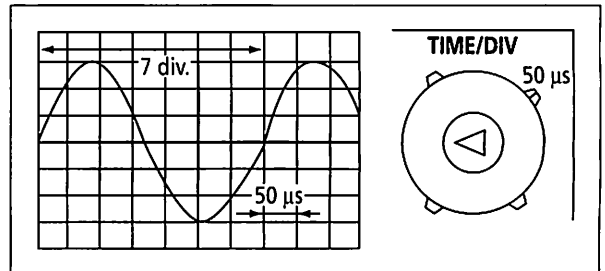


Fig. 25.08 : Mesure de période.

MESURE DE DÉPHASAGE

L'oscilloscope permet de visualiser et de mesurer le déphasage entre deux tensions de même période.

La méthode de mesure consiste à étaler l'alternance positive de la tension de référence sur tout l'écran. Si l'écran comporte 10 divisions horizontalement, **chaque division correspond alors à un angle de 18°**.

L'angle de déphasage est déterminé par la mesure du nombre de divisions séparant deux passages à zéro des deux tensions.

Exemples : (fig. 25.09 et 25.10)

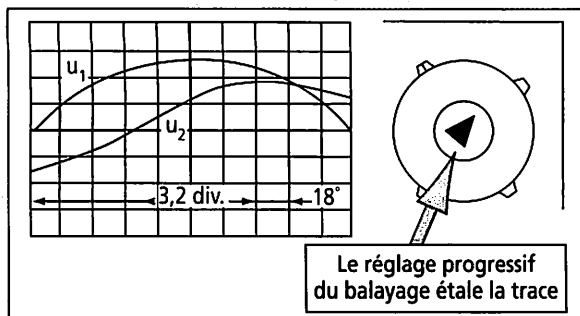


Fig. 25.09 : u_2 est en avance sur u_1 , le déphasage vaut : $\varphi = 18 \times 3,2 = 57,6^\circ$.

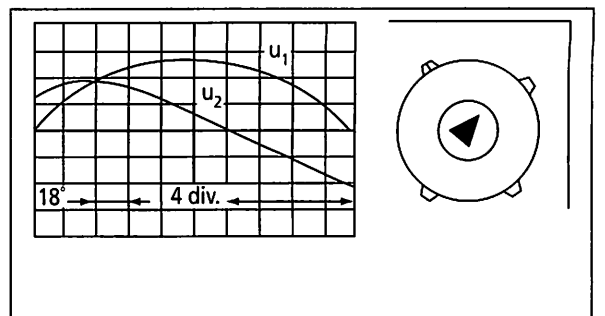


Fig. 25.10 : u_2 est en avance sur u_1 , le déphasage vaut : $\varphi = 18 \times 4 = 72^\circ$.

■ MESURE D'INTENSITÉ

Une sonde de courant effectue la conversion intensité/tension et permet d'observer la valeur instantanée d'une intensité et de mesurer sa valeur maximale.

Semblable à une pince ampèremétrique, une sonde de courant pour oscilloscope se place **autour du conducteur** où s'effectue la mesure d'intensité.

La sonde de courant est caractérisée par son **rapport de transformation** en volts par ampère (V/A) et par sa **bande passante** en hertz.

Remarque

L'utilisation d'une sonde de courant isole totalement l'oscilloscope de l'installation sur laquelle est pratiquée la mesure.

Cette installation peut être d'une catégorie de tension supérieure à celle de l'oscilloscope.

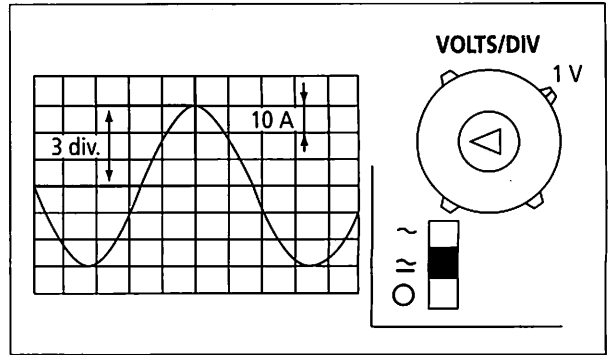


Fig. 25.11 : Mesure d'intensité maximale (sonde 100 mV/A).

Exemple

Avec une sonde de rapport 100 mV/A, la sensibilité de 1 V/div devient une sensibilité de 10 A/div. La valeur maximale de l'intensité observée à la figure est de :

$$\hat{I} = 3 \times 10 = 30 \text{ A.}$$

4 Sécurité des mesures à l'oscilloscope

La plupart des oscilloscopes sont des appareils de catégorie d'installation ou de surtension I. Ils peuvent être utilisés directement sur des appareils de même catégorie (fig. 25.12).

Remarque

Catégorie d'installation I : appareils alimentés par des batteries ou par un transformateur.

Catégorie d'installation II : appareils domestiques sur le réseau 230 V.

Catégorie d'installation III : installations industrielles.

Catégorie d'installation IV : postes de distribution EDF, lignes aériennes.

La mesure de tension par un oscilloscope sur une catégorie d'installation supérieure à I nécessite l'utilisation d'une **sonde différentielle**.

L'entrée différentielle de la sonde permet la mesure du signal **indépendamment de la terre** (fig. 25.13).

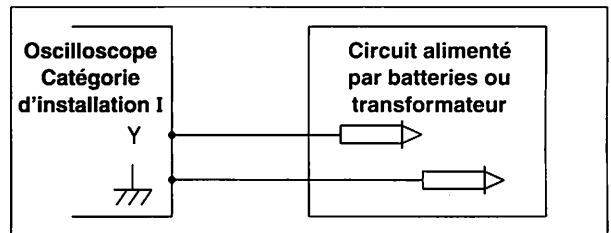


Fig. 25.12 : Mesure directe.

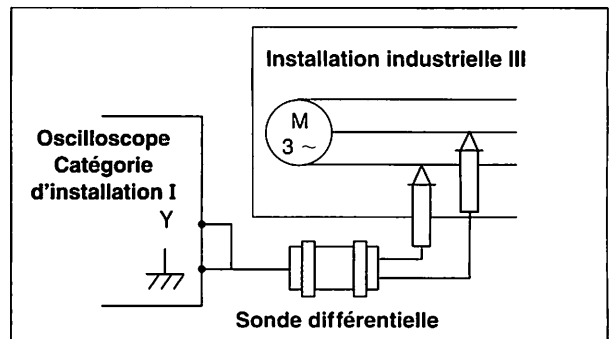
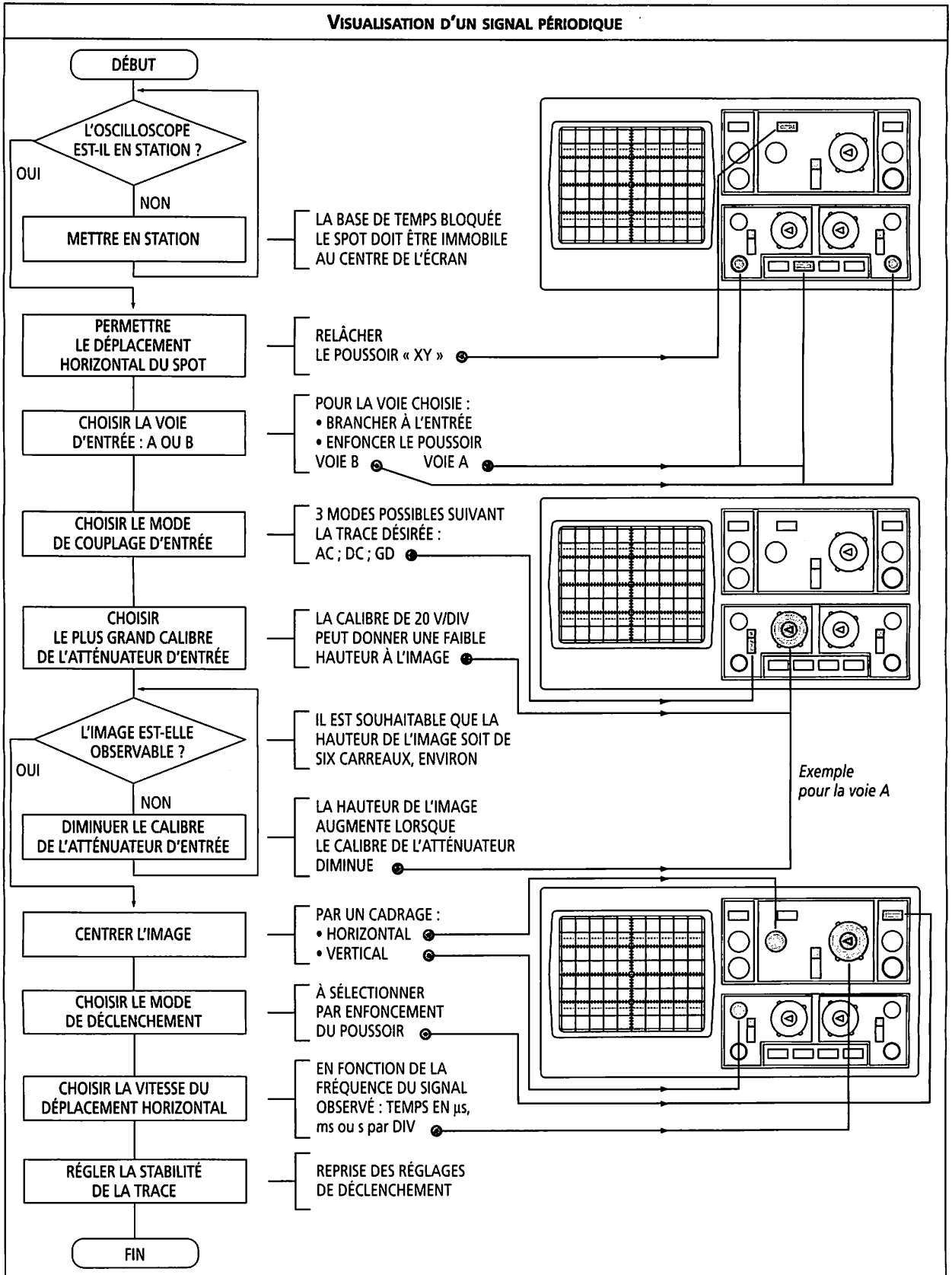


Fig. 25.13 : Utilisation d'une sonde différentielle.

ESSENTIEL À RETENIR

VISUALISATION D'UN SIGNAL PÉRIODIQUE



TEST RAPIDE

T. 1 Dans quelle position faut-il placer le commutateur d'entrée pour observer la composante alternative d'un signal ?

Réponse : AC ; DC ; GD.

T. 2 Un signal a une amplitude de 6 divisions sur l'écran.

Le réglage de la sensibilité verticale est de 0,5 V/div.

Déterminer l'amplitude de la tension.

Réponse : 0,5 V ; 3 V ; 6 V.

T. 3 Quelle fonction de l'oscilloscope permet d'observer un signal stable sur l'écran ?

Réponse : Balayage ; Synchronisation.

T. 4 Un signal a pour période 50 ms. Le calibre de balayage utilisé pour l'observer est de 20 ms/div. Combien de périodes sont-elles affichées sur l'écran qui comporte 10 divisions horizontales ?

Réponse : 20 ; 5 ; 2,5.

T. 5 Une tension alternative, de valeur maximale 10 V est observée sur l'écran.

Quel calibre faut-il utiliser pour observer cette tension si l'écran comporte 8 divisions verticales ?

Réponse : 2 V/div ; 1 V/div ; 5 V/div.

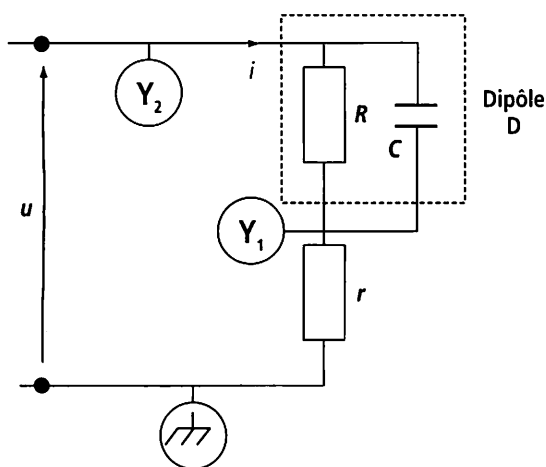
T. 6 Comment appelle-t-on la tache lumineuse sur l'écran de l'oscilloscope ?

Réponse : Le spot, le bip, la puce.

EXPÉRIMENTATION

OBSERVATION DE L'INTENSITÉ D'UN COURANT DANS UN CIRCUIT TBTS

■ MONTAGE DE MESURE



Le montage de la figure ci-dessus permet d'observer :

- sur la voie Y_2 , la tension u ,
- sur la voie Y_1 , la tension aux bornes de la résistance r soit $u_r = ri$

En choisissant une résistance $r = 1 \Omega$, la sensibilité de l'oscilloscope en volts par division devient une sensibilité en ampères par division.

■ EXEMPLE DE MESURE

Dans le montage de la figure ci-contre $R = 100 \Omega$; $C = 4,7 \mu\text{F}$.

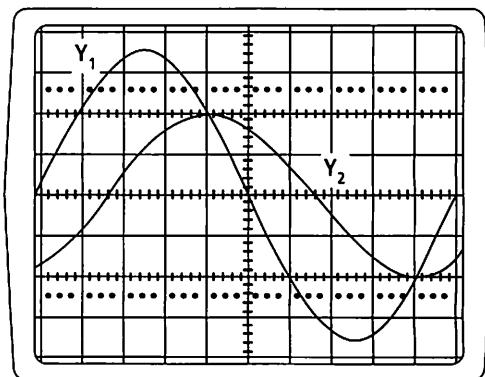
La tension u , alternative sinusoïdale a pour valeur maximale 10 V, pour fréquence 500 Hz.

La figure ci-dessous représente l'image observée sur l'écran de l'oscilloscope.

Sensibilité Y_1 : 50 mV/div soit 50 mA/div.

Sensibilité Y_2 : 5 V/div.

Balayage : 0,2 ms/div.



Les valeurs mesurées sont :

- valeur maximale de i : $I \approx 180 \text{ mA}$
- déphasage de u par rapport à i : $\varphi \approx -56^\circ$

26 Pincés multifonctions

ÉLECTROTECHNIQUE

1 Pincés ampèremétriques

Une pince ampèremétrique se place autour du conducteur et permet la mesure de l'intensité du courant qui le parcourt sans coupure du circuit.

■ MESURE D'UN COURANT ALTERNATIF

Les pincés pour courant alternatif sont basées sur le principe du transformateur (fig. 26.01). Le primaire est constitué par le conducteur sur lequel porte la mesure. Le secondaire est bobiné sur un circuit magnétique pouvant s'ouvrir pour enserrer ce conducteur.

Le rapport de transformation de la pince dépend du nombre de spires de l'enroulement secondaire. Il est caractéristique de la pince utilisée.

La sortie de mesure peut aussi s'effectuer en tension. Le rapport de transformation est alors donné en volts par ampère (V/A).

■ MESURE D'UN COURANT CONTINU

Les pincés pour courant continu utilisent le principe de l'effet Hall. Un capteur à effet Hall transforme le champ magnétique produit par l'intensité du courant dans le conducteur en une tension qui lui est proportionnelle.

Ces pincés permettent la mesure de tout type de courant. Leur rapport de transformation est donné en volts par ampère (V/A).

Le choix d'une pince ampèremétrique dépend :
 = de la nature du courant à mesurer et de son intensité,
 = du diamètre du conducteur à entourer,
 = du type d'appareil de mesure en sortie et de sa sensibilité.

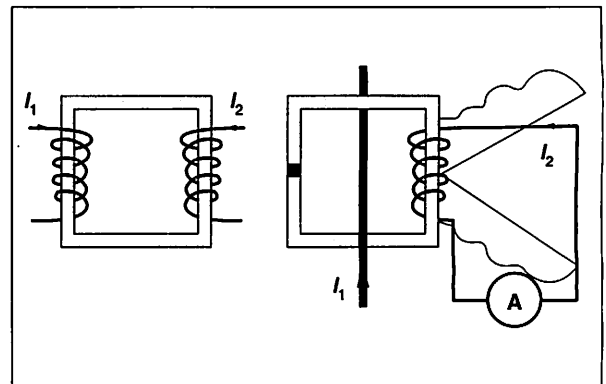


Fig. 26.01 : Principe d'une pince ampèremétrique.

Exemple

Une pince de rapport 500/1 fournit 1 A pour 500 A. Si l'intensité dans le conducteur est de 20 A, l'intensité de sortie sera de 0,04 A soit 40 mA.

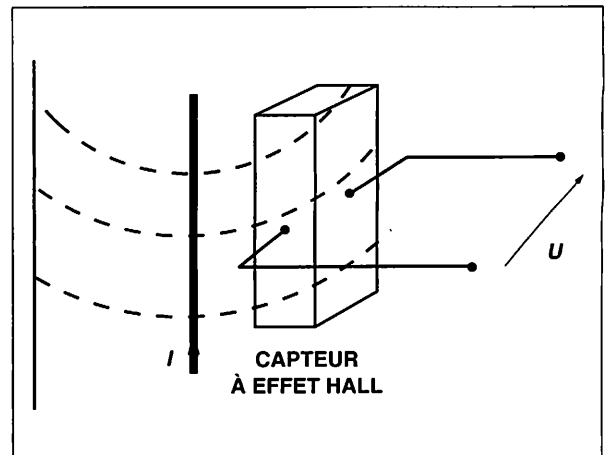


Fig. 26.02 : Sonde de Hall : U est proportionnel à I .

2 Pincés wattmétriques

Une **pince wattmétrique** permet le contrôle rapide d'un réseau électrique triphasé.

Elle permet la mesure de la **puissance absorbée**, du **facteur de puissance** mais aussi de l'**intensité** et de la **tension** et pour certains modèles de la **fréquence** du réseau. Son branchement est celui d'un wattmètre mono ou triphasé.

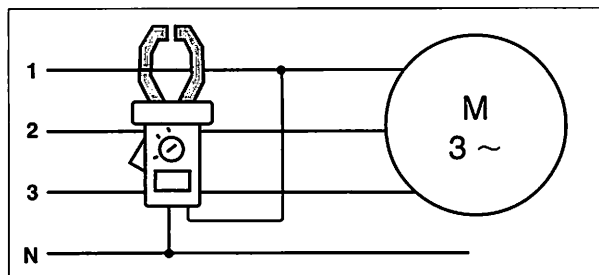


Fig. 26.03 : Mesure de puissance active et de facteur de puissance sur un moteur triphasé équilibré.

3 Sondes de courant pour oscilloscopes et acquisition de données

Une **sonde de courant** fonctionne de la même manière qu'une pince ampèremétrique mais avec une **bande passante** plus importante. Elle permet l'observation des formes d'ondes dans un conducteur et la **mesure des harmoniques** éventuels.

Une sonde de courant peut être connectée à un oscilloscope ou à **analyseur de réseau**.

Remarque

- La bande passante est l'ensemble des fréquences transmises par la sonde. Elle est de l'ordre de 20 Hz à 1 kHz.
- Un signal périodique non sinusoïdal peut être considéré comme la somme :
 - d'un signal fondamental de fréquence f ,
 - de signaux harmoniques de fréquences multiples de f : $2f$; $3f$; $4f$...Ainsi dans un réseau EDF perturbé, en plus du fondamental de 50 Hz peuvent apparaître des harmoniques à 100 Hz, 150 Hz...

ESSENTIEL À RETENIR

PINCES AMPÈREMÉTRIQUES

Une pince ampèremétrique se place autour du conducteur. Elle a la fonction d'un ampèremètre sans nécessiter de coupure de circuit.

PINCES WATTMÉTRIQUES

Le branchement d'une pince wattmétrique est semblable à celui d'un wattmètre sans coupure du circuit.

SONDES DE COURANT

Une sonde de courant permet une visualisation et des mesures sur l'intensité du courant dans un conducteur.

COMPLÉMENTS TECHNOLOGIQUES

1 Caractéristiques de multimètres

■ MULTIMÈTRE ANALOGIQUE CDA MAN'X02

■ TENSIONS CONTINUES

Calibres : 0,1 V – 3 V – 10 V – 30 V – 100 V – 300 V – 1 000 V.

Classe de précision : 2,5.

Résistance interne : 20 k Ω /V.

■ TENSIONS ALTERNATIVES

Calibres : 10 V – 30 V – 100 V – 300 V – 750 V.

Classe de précision : 2,5 de 20 Hz à 50 kHz.

Résistance interne : 20 k Ω /V.

■ INTENSITÉS CONTINUES

Calibres : 50 μ A à 10 A.

Classe de précision : 2,5

Chute de tension : 0,1 V à 1,7 V.

■ INTENSITÉS ALTERNATIVES

Calibres : 1 mA à 10 A.

Classe de précision : 2,5 de 40 Hz à 50 kHz.

Chute de tension : 0,9 à 1,7 V.

■ MULTIMÈTRE NUMÉRIQUE METRIX MX 56 C

■ TENSIONS CONTINUES

Calibres : 0,5 V à 1 000 V.

Classe de précision : > 0,025 %.

Résistance interne : 10 M Ω .

■ TENSIONS ALTERNATIVES

Calibres : 0,5 V à 750 V.

Classe de précision : 0,3 % – DC à 1 kHz.

Résistance interne : 10 M Ω .

■ INTENSITÉS CONTINUES

Calibres : 500 μ A à 10 A.

Classe de précision : 0,05.

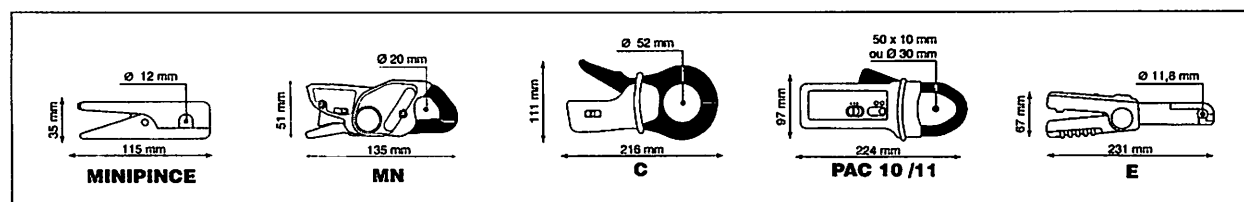
■ INTENSITÉS ALTERNATIVES

Calibres : 500 μ A à 10 A.

Classe de précision : 0,6 %.

2 Pinces ampèremétriques et pour oscilloscope (d'après Chauvin Arnoux)

Type	Entrée	Sortie	Rapport de transformation	Fréquence d'utilisation
Minipince 3	0,5 A – 150 A AC	0,3 A AC	500/1	45 – 400 Hz
Mn 10	0,5 A – 240 A AC	0,24 A AC	1000/1	40 Hz – 10 kHz
C 106	0,1 – 1200 A AC	1 V AC	1 A/1 mV	30 Hz – 5 kHz
PAC 11	0,5 – 400 A AC 0,5 – 600 A DC	600 mV AC/DC	1 A/1 mV	DC – 10 kHz
E3N (pour oscilloscope)	50 mA – 100 A AC/DC	1 V AC/DC	1 A/10 mV	DC – 100 kHz



Mesures sur des applications professionnelles spécifiques

- 27 Mesures de valeurs ohmiques**
- 28 Tests sur un départ terminal
en régime TT**

27 Mesures de valeurs ohmiques

ÉLECTROTECHNIQUE

1 Résistance de terre

La résistivité d'un terrain dépend de la nature de celui-ci. Elle varie avec la température et le taux d'humidité.

Le tableau de la figure 27.01 donne des valeurs moyennes de résistivités pour quelques terrains. La valeur de la résistivité peut être estimée par la mesure de la **résistance de prise de terre**.

Nature du terrain	Résistivité (Ω.m)
Tourbe humide	5 à 100
Argile compacte	100 à 200
Sable	200 à 3 000
Granits	1 500 à 10 000

Fig. 27.01 : Résistivité des sols.

Une prise de terre est constituée par une pièce ou un ensemble de pièces conductrices, enfouies dans le sol, et assurant une liaison électrique avec la terre. L'efficacité d'une prise de terre est fonction de sa résistance.

La valeur de la résistance de terre nécessaire pour assurer la **protection d'une installation** dépend de la **sensibilité du disjoncteur différentiel** auquel elle est associée (fig. 27.02).

Valeur maximale de la résistance de la prise de terre pour une tension limite $U_L = 50$ volts	Valeur maximale du courant différentiel résiduel assigné au dispositif de protection
100 ohms	500 mA
166 ohms	300 mA
500 ohms	100 mA
> 500 ohms	≤ 30 mA

Fig. 27.02 : Relation entre la valeur maximale de la résistance de terre et la valeur maximale du courant différentiel résiduel assigné au dispositif de protection.

La valeur de la résistance de prise de terre dépend :
 – des conditions locales du terrain,
 – de la qualité de la réalisation.

La figure 27.03 donne quelques exemples de réalisations de prises de terre.

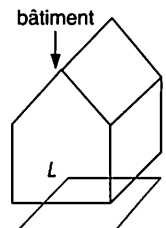
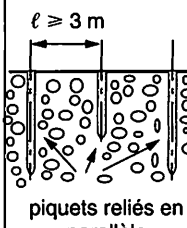
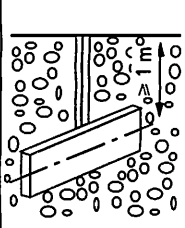
Boucle à fond de fouilles	Piquets	Plaques verticales
 <p>bâtiment</p> <p>L</p>	 <p>$l \geq 3$ m</p> <p>piquets reliés en parallèle</p>	 <p>L</p>
<p>L : longueur de la boucle (m)</p> $R = \frac{2\rho}{L}$	<p>$L \geq 2$ m : longueur du piquet (m)</p> $R = \frac{\rho}{L}$ <p>pour n piquets :</p> $R = \frac{\rho}{Ln}$	<p>L : périmètre de la plaque (m)</p> $R = \frac{0,8 \rho}{L}$
<ul style="list-style-type: none"> • Conducteur en : <ul style="list-style-type: none"> • Cu : câble ou feuillard de 25 mm²; • Al : $S \geq 35$ mm²; • Acier galvanisé : $S \geq 95$ mm² 	<ul style="list-style-type: none"> • Piquet en Cu ou acier galvanisé $\varnothing \geq 15$ mm. 	<ul style="list-style-type: none"> • Plaque en Cu (ép. = 2 mm) ou en acier galvanisé (ép. = 3 mm).

Fig. 27.03 : Exemples de prises de terre; ρ : résistivité du sol en Ω.m; R : résistance en Ω.

2 Mesure de résistance de terre

■ MÉTHODE DES TROIS PÔLES – TELLUROHMMÈTRE

Cette méthode nécessite l'utilisation de **deux prises de terre auxiliaires** (fig. 27.04). La prise de terre Y sert de référence de potentiel. La prise de terre Z reçoit un courant de valeur connue i .

Le voltmètre du tellurohmmètre mesure la chute de tension due à la résistance de terre et affiche directement la valeur de cette résistance.

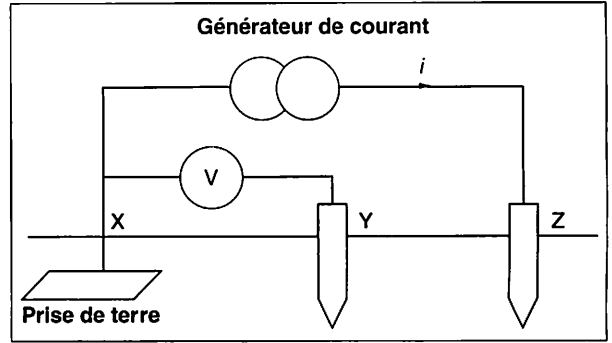


Fig. 27.04 : Mesure au tellurohmmètre.

■ MESURE DE LA RÉSISTANCE DE BOUCLE DE TERRE

Cette méthode est utilisable pour **les installations où le neutre est directement relié à la terre**. Elle consiste à mesurer, avec un **ohmmètre de boucle** la résistance entre le point de terre choisi et un conducteur du réseau, lui-même relié à la terre par l'intermédiaire du transformateur de distribution (fig. 27.05). Cette méthode est adaptée aux sites urbains où il est souvent difficile de placer des points de terre auxiliaires. Elle présente **une grande facilité de mise en œuvre**. Il suffit de connecter l'ohmmètre de boucle à une prise secteur et de lire le résultat.

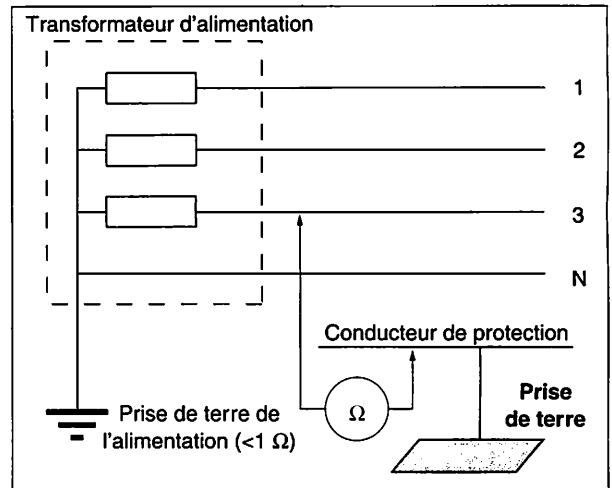


Fig. 27.05 : Mesure de résistance de boucle de terre.

■ MESURE À LA PINCE DE TERRE

Semblable à une pince ampèremétrique, la **pince de terre** mesure directement la **résistance de boucle de terre** en se plaçant autour du conducteur de protection, sans déconnexion de l'installation électrique.

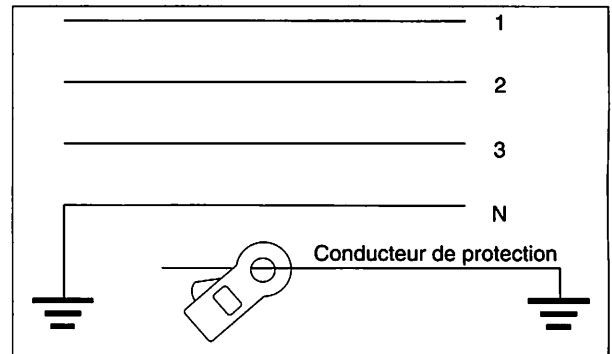


Fig. 27.06 : Mesure à la pince de terre.

3 Mesure d'isolement

La mesure de résistance d'isolement doit être faite :

- entre les conducteurs actifs pris deux à deux,
- entre chaque conducteur actif et la terre,
- entre tous les conducteurs actifs reliés ensemble et la terre.

La valeur minimale de résistance d'isolement dépend de la tension d'alimentation de l'installation (fig. 27.07).

Tension nominale de l'installation	Tension continue de test	Résistance d'isolement
TBTS	250 V	> 0,25 M Ω
< 500 V	500 V	> 0,5 M Ω
> 500 V	1 000 V	> 1 M Ω

Fig. 27.07 : Tensions de test et résistances d'isolement.

La mesure s'effectue au moyen d'un **contrôleur d'isolement** qui délivre la tension de 250 V, 500 V ou 1 000 V sous laquelle est faite la mesure de résistance (fig. 27.08).

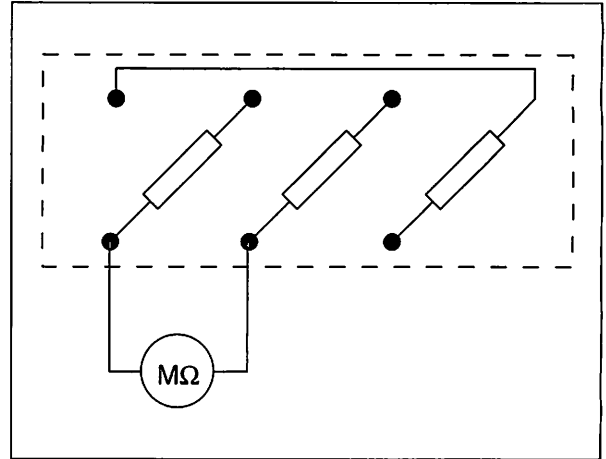


Fig. 27.08 : Mesure d'isolement entre les bobinages d'un moteur triphase.

Remarque

Dans certains contrôleurs d'isolement, appelés ohmmètres à magnéto, une magnéto actionnée par une manivelle fournit la haute tension nécessaire à la mesure.

ESSENTIEL À RETENIR

RÉSISTANCE DE PRISE DE TERRE

La valeur maximale de résistance dépend de la sensibilité du disjoncteur différentiel utilisé.
La résistance de prise de terre se mesure avec un tellurohmmètre. Dans les installations où le neutre est relié à la terre, un contrôleur de boucle de terre ou une pince de terre permet la mesure.

MESURE D'ISOLEMENT

La valeur minimale de la résistance d'isolement entre conducteurs et la terre dépend de la tension d'alimentation de l'installation.
La résistance d'isolement est mesurée sous une tension élevée par un contrôleur d'isolement.

28 Tests sur un départ terminal en régime TT

ÉLECTROTECHNIQUE

1 Dispositif de protection contre les contacts indirects

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

Un dispositif de protection nécessite :

- l'existence d'un circuit appelé **boucle de défaut** pour permettre la circulation du courant de défaut (fig. 28.01),
- la **coupe de l'alimentation** en cas de détection d'un courant de défaut.

Remarque

Dans un régime TT, le neutre est relié à la terre, les masses d'utilisation sont aussi reliées à une prise de terre.

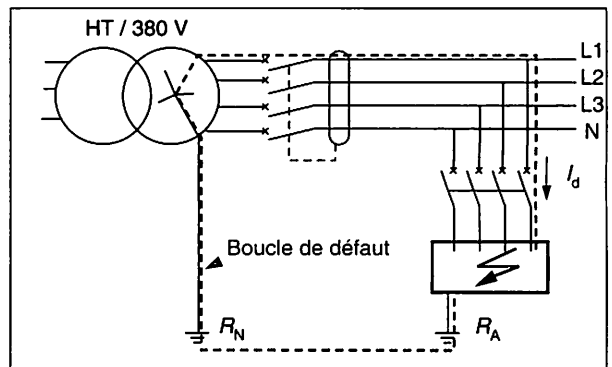


Fig. 28.01 : Boucle de défaut.

Un déclencheur à courant résiduel différentiel permet de détecter un courant de défaut et de mettre automatiquement l'installation hors tension.

Le schéma de la figure 28.02 représente le principe de fonctionnement d'un déclencheur différentiel monophasé.

La détection d'un courant de défaut s'effectue par un **transformateur toroïdal** au travers duquel passent tous les conducteurs actifs du circuit à protéger.

En l'absence de défaut l'intensité I_1 dans la phase est égale à l'intensité I_2 dans le neutre. Il n'y a pas de courant induit dans la bobine K_1 , pas de tension aux bornes de K_2 , l'équipement fonctionne normalement. En cas de défaut, I_2 est différent de I_1 . Cette différence induit un courant i dans K_1 , ce qui déclenche K_2 et met automatiquement l'équipement hors tension.

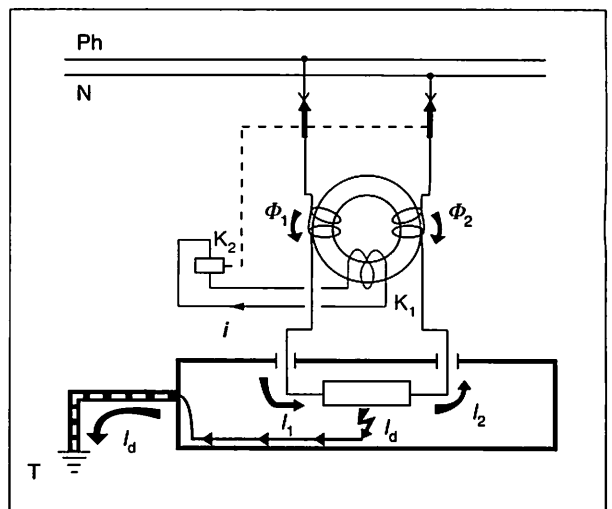


Fig. 28.02 : Présence d'un défaut d'isolement

2 Mesure de la valeur de déclenchement du dispositif de protection différentiel

La sensibilité d'un dispositif différentiel s'exprime par la valeur de l'intensité du courant résiduel de défaut pour lequel le dispositif s'ouvrira obligatoirement.

Le tableau de la figure 28.03 donne la sensibilité et la plage de déclenchement des dispositifs différentiels couramment installés.

Le test de fonctionnement d'un dispositif différentiel s'effectue en injectant un courant d'intensité i connue dans le conducteur de protection de l'installation pour **simuler un courant de défaut** (fig. 28.04). On vérifie alors la coupure de l'alimentation. Les **testeurs de disjoncteurs différentiels** réalisent cette fonction en mesurant le **temps de déclenchement** du dispositif de protection.

Remarque

Les courants de défauts à la terre peuvent être mesurés et localisés sans déconnecter les éléments alimentés par le réseau par l'utilisation d'une mini pince ampèremétrique ultra sensible pour courants de fuite.

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

Fig. 28.03 : Sensibilité et plage de fonctionnement des dispositifs différentiels.

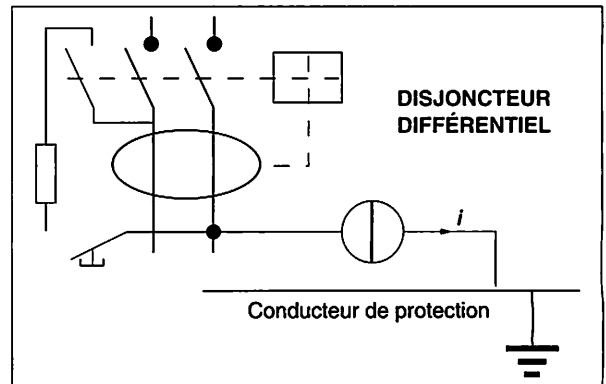


Fig. 28.04 : Test de déclencheur différentiel.

3 Ordre des phases

Dans une distribution triphasée équilibrée, les tensions disponibles ont même fréquence et même valeur efficace. De plus chaque tension est en retard de 120° sur la tension précédente.

Ainsi dans le réseau EDF, V_1 , V_2 et V_3 forment un **système équilibré**.

$$\vec{V}_1 + \vec{V}_2 + \vec{V}_3 = 0$$

Les tensions U_{12} , U_{23} et U_{31} forment aussi un système équilibré contrairement aux tensions U_{12} , U_{23} et U_{13} (fig. 28.05).

La vérification de l'ordre des phases s'effectue par un **contrôleur de rotation de phase**.

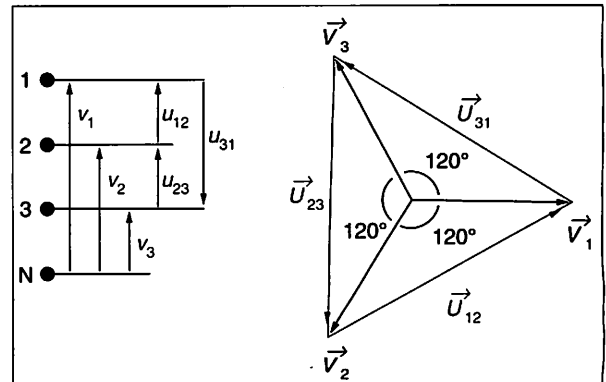


Fig. 28.05 : Ordre des phases.

ESSENTIEL À RETENIR

DISPOSITIF DE PROTECTION DIFFÉRENTIEL

Un dispositif de protection différentiel permet la détection des courants de défauts et la coupure de l'alimentation.

Le test du dispositif consiste à mesurer l'intensité nécessaire au déclenchement et le temps de déclenchement.

ORDRE DES PHASES

Dans un réseau triphasé équilibré, chaque tension est en retard de 120° sur la précédente.

Le repérage de cet ordre sur les fils de phase s'effectue en vérifiant la rotation des phases.

EXPÉRIMENTATION

SEUIL DE DÉCLENCHEMENT D'UN DISJONCTEUR DIFFÉRENTIEL

■ TRAVAIL À RÉALISER

Mesurer l'intensité du courant de défaut nécessaire au déclenchement d'un disjoncteur différentiel.

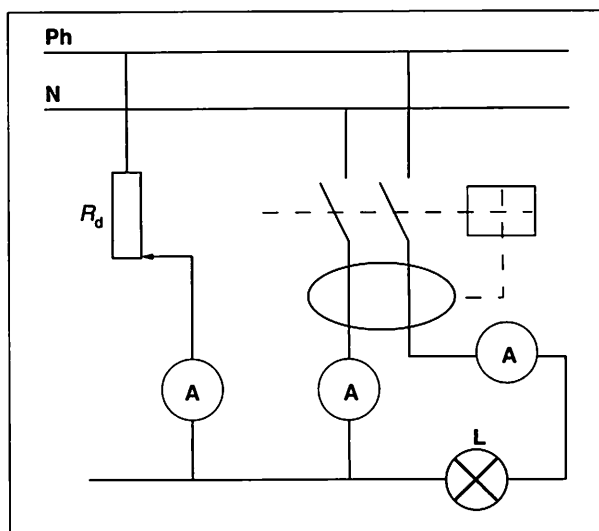
Le récepteur est une lampe à incandescence d'une puissance de 40 W. Elle est protégée par un disjoncteur différentiel 300 mA. Le courant de défaut est simulé à l'aide d'un interrupteur S et d'une résistance variable R_D .

Mesurer l'intensité en ligne I_L , l'intensité dans le neutre I_N et l'intensité du courant de défaut I_D .

Pour obtenir une intensité de courant de défaut de 300 mA à partir du réseau 230 V, la résistance R_D devra avoir pour valeur :

$$R_D = \frac{230}{0,3} \text{ soit } R_D = 767 \Omega.$$

■ SCHÉMA DU MONTAGE



■ EXEMPLE DE MESURES

$$I_L = 0,18 \text{ A}; I_N = 0,42 \text{ A}; I_D = 0,24 \text{ A}$$

L'intensité de déclenchement indiquée est $I_{\Delta N} = 300 \text{ mA}$. Le différentiel est conforme à la réglementation qui impose :

$$\frac{I_{\Delta N}}{2} < \text{déclenchement} < I_{\Delta N}$$

COMPLÉMENTS TECHNOLOGIQUES

1 Disjoncteurs différentiels (d'après Schneider-Merlin Gerin)

■ FONCTION ET UTILISATION

Les disjoncteurs monoblocs différentiels DPN vigi sont destinés :

- à la commande et la protection contre les surintensités de circuits, en distribution terminale tertiaire, agricole et industrielle, en régime de neutre à la terre (TT) ou de mise au neutre (TNS).
- à la protection contre les défauts d'isolement :
 - protection des personnes contre les contacts indirects (30 ou 300 mA) et les contacts directs (30 mA),
 - protection des installations contre le risque d'incendie (300 mA).

■ CARACTÉRISTIQUES

- Calibres : de 1 à 40 A réglés à 30°C.
- Tension d'emploi : 230 V CA.
- Dispositif à courant résiduel :
 - instantané et électromécanique, il fonctionne sans source auxiliaire,
 - sensibilité fixe pour tous les calibres :
 - $I_{\Delta N} = 30 \text{ mA}$ classe TO2
 - $I_{\Delta N} = 300 \text{ mA}$ classe T2.
- Visualisation du défaut différentiel en face avant.

2 Contrôleurs d'installation (d'après Métrix)

En plus des mesures de tension, courant (avec pince) et fréquence, un contrôleur d'installation regroupe toutes les fonctions nécessaires aux contrôles électriques : boucle, isolement, continuité, différentiels... Un commutateur central permet de sélectionner la fonction désirée.

■ CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES (MX 4940)

• Continuité

Gamme : 20 Ω

Courant de test > 200 mA (DC)

• Résistance d'isolement

Tensions de test : 250 V ; 500 V ; 1 000 V

Tension en circuit ouvert : 1,3 x tension de test

Gammes : 1,999 M Ω ; 19,99 M Ω ; 199,9 M Ω

Courant de mesure : 1 mA

• Résistance de terre

Gammes : 19,99 Ω ; 199,9 Ω ; 1999 Ω

Fréquence de mesure : 125 Hz

• Résistance de terre RE sans déclenchement du différentiel (DDR)

Gammes RE : 0,1 Ω à 10 k Ω

Courant de mesure : 0,5 $I_{\Delta N}$ du DDR

• Impédance de boucle : P/Phase ; P/neutre ; P/terre

Gammes : 19,99 Ω ; 199,9 Ω ; 1999 Ω

Courant de mesure maxi : 23 A

• Indicateur d'ordre de phases : L_1, L_2, L_3 ou L_2, L_1, L_3

• Tests de disjoncteurs différentiels

Courants de fuite nominaux : 10, 30, 100, 300, 500, 1 000 mA

• Temps de déconnexion

Gammes : 2 000 ms ; 200 ms ; 150 ms

Courants de test : form $I_{\Delta N}$; $I_{\Delta N}$; 2 $I_{\Delta N}$; 5 $I_{\Delta N}$.

• Courant de déconnexion

Gammes : (0,5 à 1,4) x $I_{\Delta N}$.



Annexes

- 1 Grandeurs et unités utilisées en électrotechnique**
- 2 Principales formules utilisées en électrotechnique**
- 3 Mémento**
- 4 Éléments de corrigé**
- 5 Index alphabétique**

GRANDEURS ET UNITÉS UTILISÉES EN ÉLECTROTECHNIQUE

Symbole de la grandeur	Nom de la grandeur	Symbole de l'unité	Nom de l'unité
α	Angle	rad	radian
B	Champ magnétique	T	tesla
C	Capacité	F	farad
E	Force électromotrice	V	volt
E'	Force contre électromotrice	V	volt
f	Fréquence	Hz	Hertz
φ	Angle de déphasage	rad	radian
Φ	Flux magnétique	Wb	weber
g	Glissement		
H	Excitation magnétique	A/m	ampère par mètre
I	Intensité	A	ampère
K	Coefficient de Kapp		
ℓ	Longueur	m	mètre
m	Rapport de transformation		
μ	Perméabilité magnétique		
n	Fréquence de rotation	tr/s	tours par seconde
n_s	Fréquence de synchronisme	tr/s	tours par seconde
N	Nombres de spires		
η	Rendement		
ω	Pulsation	rad/s	radians par seconde
Ω	Vitesse angulaire	rad/s	radians par seconde
p	Nombre de paires de pôles		
P	Puissance active	W	watt
Pa	Puissance absorbée	W	watt
Pu	Puissance utile	W	watt
Q	Quantité d'électricité	C	coulomb
Q	Puissance réactive	var	voltampère réactif
r	Résistance interne	Ω	ohm
R	Résistance	Ω	ohm
ρ	Résistivité	$\Omega \cdot m$	ohm-mètre
S	Aire	m^2	mètre-carré
S	Puissance apparente	VA	voltampère
t	Temps	s	seconde
T	Période	s	seconde
Tu	Couple utile	N.m	newton-mètre
τ	Constante de temps	s	seconde
u	Tension instantanée	V	volt
U	Tension efficace	V	volt
\hat{U}	Tension maximale	V	volt
V	Tension phase-neutre	V	volt
W	Énergie	J	joule
X	Réactance	Ω	ohm
Z	Impédance	Ω	ohm

PRINCIPALES FORMULES UTILISÉES EN ÉLECTROTECHNIQUE

LOIS GÉNÉRALES

$$I = \frac{Q}{t}$$

$$P = UI$$

$$W = Pt$$

RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE

$$W = RI^2t$$

$$P = RI^2$$

$$U = RI$$

$$R = \rho \frac{\ell}{S}$$

GÉNÉRATEURS ET RÉCEPTEURS

$$U = E - rI$$

$$U = E' + r'I$$

$$\Sigma E - \Sigma E' = \Sigma RI$$

CONDENSATEURS

$$Q = CU$$

$$W = \frac{1}{2} CU^2$$

$$\tau = RC$$

COURANT ALTERNATIF

$$f = \frac{1}{T}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$u = \hat{U} \sin \omega t$$

$$U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$$

DIPÔLES EN ALTERNATIF

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

$$Z_R = R$$

$$Z_L = L\omega$$

$$Z_C = \frac{1}{C\omega}$$

$$Z_{R-L} = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}$$

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

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

PUISSANCE

$$P = UI \cos \varphi$$

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

$$S = UI$$

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

$$Q = UI \sin \varphi$$

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P}$$

TRIPHASÉ

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

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

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

$$P = UI\sqrt{3} \cos \varphi$$

$$S = UI\sqrt{3}$$

$$Q = UI\sqrt{3} \sin \varphi$$

MAGNÉTISME

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

$$B = \mu_0 H$$

$$B = \mu_0 \frac{NI}{\ell}$$

$$E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

$$\Phi = LI$$

$$E = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$F = Bi\ell \sin \alpha$$

PRINCIPALES FORMULES UTILISÉES EN ÉLECTROTECHNIQUE

MOTEURS À COURANT CONTINU

$$E' = Nn\Phi$$

$$T_u = \frac{P_u}{\Omega}$$

$$U = E' + r'I$$

$$P_u = P_a - \text{pertes}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ

$$P_a = UI \sqrt{3} \cos \varphi$$

$$n_s = \frac{f}{p}$$

$$P_u = T_u \Omega$$

$$g = \frac{n_s - n}{n_s}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

ALTERNATEUR

$$E = Kp Nn \Phi$$

$$f = pn$$

TRANSFORMATEUR

$$m = \frac{U_2}{U_1}$$

$$m_v = \frac{N_2}{N_1}$$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \text{ (transformateur parfait)}$$

MULTIPLES ET SOUS MULTIPLES D'UNITÉS ET PRINCIPAUX SYMBOLES

Les multiples			Les sous-multiples		
Facteur	Préfixe	Symbole	Facteur	Préfixe	Symbole
10 ¹	deca	da	10 ⁻¹	deci	d
10 ²	hecto	h	10 ⁻²	centi	c
10 ³	kilo	k	10 ⁻³	milli	m
10 ⁶	méga	M	10 ⁻⁶	micro	μ
10 ⁹	giga	G	10 ⁻⁹	nano	n

Symbole	Nom	Symbole	Nom
α	alpha	η	éta
β	beta	π	pi
φ ; Φ	phi	ω ; Ω	omega
σ ; Σ	sigma	μ	mu
τ	tau	ρ	rho

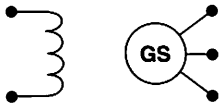
MÉMENTO

Actionneur

Un actionneur est un objet technique de puissance qui réalise une conversion d'énergie. L'actionneur appartient à la partie opérative d'un système automatisé. Moteurs, électro-aimants, vérins pneumatiques, résistances sont des actionneurs.

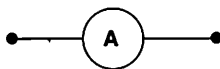
Alternateur

Un alternateur est un générateur de courant alternatif appelé aussi génératrice synchrone.



Ampèremètre

Un ampèremètre est un appareil de mesure de l'intensité du courant. Il se place en série dans le circuit où est mesurée l'intensité. Polarisé, le courant doit entrer par la borne \oplus de l'ampèremètre.



Amplificateur

Un amplificateur augmente les caractéristiques d'un signal sans les déformer.



Automate

Un automate programmable gère le fonctionnement d'un système automatisé. L'automate programmable appartient à la partie commande d'un système automatisé.

Auto-transformateur

Un auto-transformateur présente un circuit magnétique identique à celui d'un transformateur mais ne possède qu'un seul enroulement par phase. Les circuits primaire et secondaire d'un auto-transformateur ne sont pas isolés l'un par rapport à l'autre.

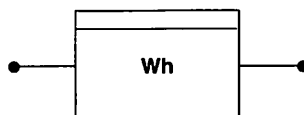


Capteur

Un capteur transforme les variations d'une grandeur physique en une information compatible avec l'unité de traitement du système automatisé. Le capteur appartient à la partie opérative du système automatisé.

Compteur d'énergie

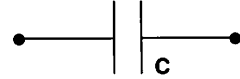
Un compteur d'énergie mesure l'énergie active délivrée par le réseau.



Condensateur

Un condensateur est constitué par deux armatures conductrices séparées par un isolant ou diélectrique.

Le condensateur est caractérisé par sa capacité exprimée en farad (F).

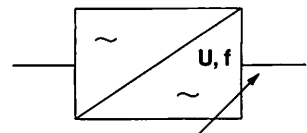


Convertisseur d'énergie

Un convertisseur modifie tout ou partie des grandeurs électriques disponibles pour les adapter à l'utilisation. Redresseurs simples et commandés, hacheurs, gradateurs, convertisseurs de fréquence sont des convertisseurs statiques d'énergie.

Convertisseur de fréquence

Un convertisseur de fréquence assure la conversion alternatif-alternatif. À partir du réseau alternatif mono ou triphasé, il fournit une tension alternative, de valeur efficace et de fréquence variable.



Diode

Une diode est un dipôle non symétrique dont les bornes sont appelées cathode K et anode A. Une diode idéale polarisée en direct ($U_{ak} > 0$) est équivalente à un interrupteur fermé. Polarisée en inverse ($U_{ak} < 0$) elle est équivalente à un interrupteur ouvert.



Diode Zener

Une diode Zener, polarisée en inverse, conduit lorsque la tension inverse est supérieure à la tension de Zener U_z .



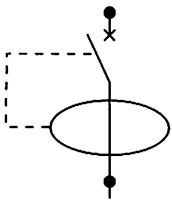
Dipôle

Un dipôle est une portion de circuit comprise entre deux bornes (pôles). Résistance, condensateur, diode, générateur... sont des dipôles.

Disjoncteur différentiel

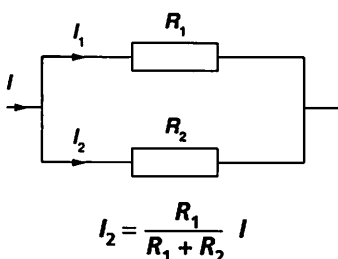
Un disjoncteur différentiel est un dispositif de protection qui assure la coupure de l'alimentation en cas de :

- surintensité ou court-circuit (fonction disjoncteur),
- défaut d'isolement (fonction différentiel).



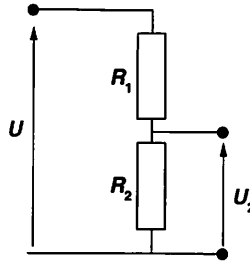
Diviseur de courant

Un diviseur de courant permet de diminuer l'intensité du courant circulant dans un dipôle. Le diviseur de courant est constitué par une résistance en parallèle sur le dipôle.



Diviseur de tension

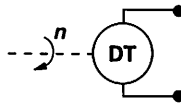
Un diviseur de tension permet de diminuer la tension d'une source d'alimentation. Le diviseur de tension est constitué de deux résistances en série.



$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U$$

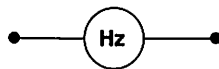
Dynamo tachymétrique

Une dynamo tachymétrique est un capteur de vitesse. La f.e.m. de la dynamo tachymétrique est proportionnelle à sa fréquence de rotation.



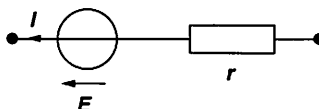
Fréquencemètre

Un fréquencemètre mesure la fréquence d'un courant alternatif.



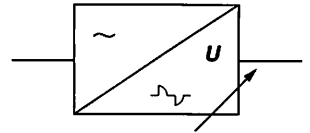
Générateur

Un générateur transforme l'énergie qu'il reçoit en énergie électrique. Le générateur est caractérisé par sa f.e.m. E et sa résistance interne r .



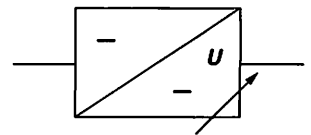
Gradateur

Un gradateur assure la conversion alternatif-alternatif. À partir du réseau alternatif mono ou triphasé, il fournit une tension alternative de même fréquence mais de valeur efficace réglable.



Hacheur

Un hacheur assure la conversion continu-continu. À partir d'une source de courant continu, il fournit un autre courant continu dont la valeur moyenne de la tension est réglable.

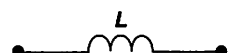


Impédance

L'impédance est le rapport des valeurs efficaces de la tension et de l'intensité dans un dipôle alimenté en courant alternatif sinusoïdal.

Inductance

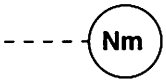
Une inductance pure est une bobine idéale dont le fil qui la constitue n'a aucune résistance. La valeur d'une inductance est exprimée en henry (H).



MÉMENTO

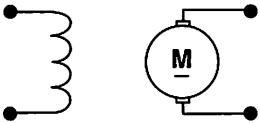
Mesureur de couple

La mesure du couple s'effectue par l'association de jauges de contrainte ou de capteurs piézo-électriques dont la tension aux bornes dépend des forces qui s'exercent sur eux.



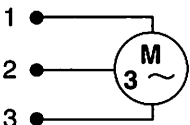
Moteur à courant continu

Un moteur à courant continu comporte trois éléments essentiels : l'inducteur, l'induit et le collecteur. Son excitation peut être indépendante, parallèle ou série.



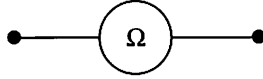
Moteur asynchrone triphasé

Le rotor d'un moteur asynchrone triphasé est en rotation sous l'influence d'un champ tournant. Sa fréquence de rotation est inférieure à la fréquence du champ tournant appelée fréquence de synchronisme.



Ohmmètre

Un ohmmètre mesure la valeur d'une résistance.



Oscilloscope

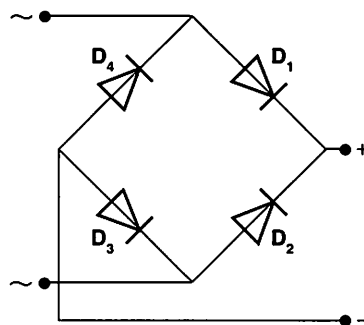
Un oscilloscope permet de visualiser les variations d'une tension en fonction du temps. Ses bornes d'entrée sont repérées par les symboles Y et $\overline{\overline{\overline{\text{Y}}}}$.

Pince de mesure

Une pince de mesure permet de relever l'intensité dans un circuit sans couper celui-ci. La pince se place autour du conducteur dans lequel circule le courant à mesurer. Les pinces, suivant leurs modèles, font fonction d'ampèremètre, de wattmètre, de fréquencemètre, de détecteurs de courants de fuite...

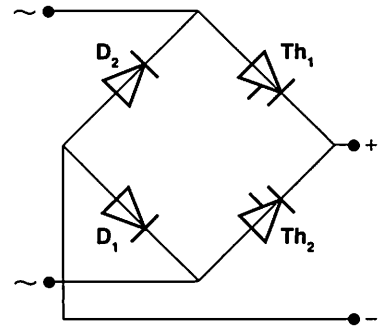
Pont de Graëtz

Un pont de Graëtz est le montage à quatre diodes permettant de redresser en double alternance un courant alternatif.



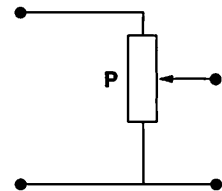
Pont mixte

Un pont mixte est utilisé dans les redresseurs commandés double alternance. Le pont mixte est constitué de deux diodes et deux thyristors.



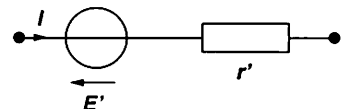
Potentiomètre

Un potentiomètre est une résistance variable à trois bornes : les deux extrémités de la résistance et le curseur. Le montage potentiométrique est un diviseur de tension réglable.



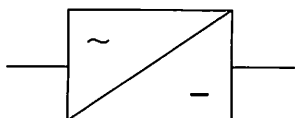
Récepteur

Un récepteur transforme l'énergie électrique qu'il reçoit en une autre forme d'énergie. Le récepteur actif est caractérisé par sa f.e.m. E' et sa résistance interne r' .



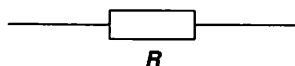
Redresseur

Un redresseur effectue la conversion alternatif-continu. À partir du réseau alternatif mono ou triphasé, il fournit une tension redressée. Si le redresseur est commandé, la tension redressée fournie est réglable.



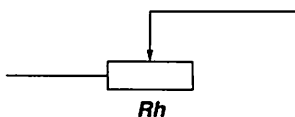
Résistance

Une résistance est un récepteur passif qui transforme l'énergie électrique qu'elle reçoit en énergie thermique. La valeur de la résistance s'exprime en ohm (Ω).



Rhéostat

Un rhéostat est une résistance variable. Le rhéostat permet la variation de l'intensité du courant dans un circuit.



Sonde

Une sonde de courant permet de visualiser l'intensité d'un courant sur l'écran d'un oscilloscope. Une sonde différentielle permet de rendre les entrées d'un oscilloscope indépendantes de la masse.

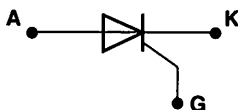
Tachymètre

Un tachymètre est un capteur de vitesse. Le tachymètre est utilisé pour mesurer la fréquence de rotation des moteurs.



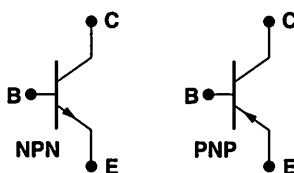
Thyristor

Un thyristor est un redresseur dont la conduction peut être commandée. Le thyristor comporte trois bornes : anode (A), cathode (K), gachette (G).



Transistor

Un transistor peut être de deux types : PNP ou NPN. Le transistor comporte trois bornes : base (B), collecteur (C), émetteur (E).

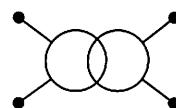


Transformateur monophasé

Un transformateur monophasé comporte :

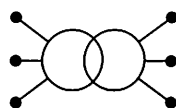
- un circuit magnétique,
- deux enroulements, le primaire et le secondaire.

Le transformateur est caractérisé par ses tensions primaire et secondaire et sa puissance apparente.



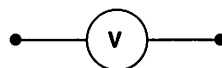
Transformateur triphasé

Un transformateur triphasé comporte un enroulement primaire et un enroulement secondaire par phase sur un circuit magnétique commun. Les enroulements primaires peuvent être couplés en étoile ou en triangle. Les enroulements secondaires peuvent être couplés en étoile, en triangle ou en zig-zag.



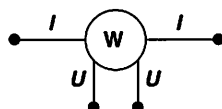
Voltmètre

Un voltmètre est un appareil de mesure de tension. Le voltmètre se place en parallèle aux bornes du circuit sur lequel la tension est mesurée.



Wattmètre

Un wattmètre est un appareil de mesure de puissance active. Le wattmètre comporte quatre bornes pour le relier au circuit extérieur.



ÉLÉMENTS DE CORRIGÉ

SO 1

Chapitre 1

- E. 1 : **b.** $U = 24 \text{ V}$
c. $I_1 = 0,25 \text{ A}$
d. $U_1 = 12 \text{ V}$; $U_2 = 12 \text{ V}$
e. $I = 0,3 \text{ A}$
f. $P_{R1} = 4,8 \text{ W}$; $P_{R2} = 0,6 \text{ W}$
- E. 2 : 1 A
- E. 3 : **a.** $P = 50 \text{ kW}$
b. $P_A = 62,5 \text{ kW}$
- E. 4 : Dipôle non linéaire, passif.
- E. 5 : **a.** $P_A = 2\,300 \text{ W}$
b. $P_U = 1\,955 \text{ W}$
- E. 6 : $I_1 = 0,17 \text{ A}$; $I_2 = 0,26 \text{ A}$
- E. 7 : $U = 18 \text{ V}$; $P = 3,6 \text{ W}$
- E. 8 : **a.** $U_2 = 0,5 \text{ V}$; $U_4 = 2 \text{ V}$; $I_2 = 0,17 \text{ A}$
b. $P_{R1} = 0,6 \text{ W}$; $P_{R2} = 85 \text{ mW}$; $P_{R3} = 60 \text{ mW}$;
 $P_{R4} = 0,255 \text{ W}$
- E. 9 : **a.** $I = 10,9 \text{ A}$
b. $W = 6,25 \text{ kWh}$

Chapitre 2

- E. 1 : **a.** $U_2 = 60 \text{ V}$
b. $U_2 = 53,3 \text{ V}$; $U_2 = 40 \text{ V}$
- E. 2 : $5 \text{ A} - 1\,150 \text{ W}$; $2,5 \text{ A} - 575 \text{ W}$; $10 \text{ A} - 2\,300 \text{ W}$
- E. 3 : **a.** 21Ω
b. 20Ω
c. 32Ω
d. 32Ω
- E. 4 : **a.** $0,43 \text{ A} - 535 \Omega$; $0,26 \text{ A}$; 885Ω
b. $0,69 \text{ A} - 333 \Omega$
- E. 5 : **a.** $0,64 \Omega$
b. $6,4 \text{ V} - 233,6 \text{ V}$
c. 64 W
- E. 6 : $0,125 \Omega$
- E. 7 : **a.** $R_0 = 75 \Omega$
b. $R_{70} = 96 \Omega$
- E. 8 : **a.** $R = 1\,500 \Omega$
b. $P = 9,6 \text{ W}$

Chapitre 3

- E. 1 : **a.** $I = 1,2 \text{ A}$
b. $U = 2,4 \text{ V}$
c. $P_A = 8,64 \text{ W}$; $P_U = 7,2 \text{ W}$
- E. 2 : **a.** $E = 120 \text{ V}$, $r = 7 \Omega$
b. $I = 10 \text{ A}$
- E. 3 : **a.** $P_A = 2\,040 \text{ W}$
b. $E' = 6 \text{ V}$, $r' = 0,021 \Omega$
c. $r = 9 \text{ m}\Omega$
- E. 4 : **a.** $E = 120 \text{ V}$
b. $r = 4 \Omega$
- E. 5 : **a.** $R = 12 \Omega$

- b.** $I = 0,6 \text{ A}$
c. $U_G = 10,8 \text{ V}$; $U_{R1} = 3,6 \text{ V}$; $U_{R2} = 7,2 \text{ V}$

- E. 6 : **a.** $I = 10 \text{ A}$
b. $P_a = 2\,200 \text{ W}$; $P_u = 2\,000 \text{ W}$; $\eta = 0,9$
- E. 7 : **a.** 8 W ; 9 W ; $8,64 \text{ W}$; 8 W ; $7,3 \text{ W}$
- E. 8 : **a.** $E' = 200 \text{ V}$
b. $218,5 \text{ V}$; 16 V ; $202,5 \text{ V}$

Chapitre 4

- E. 1 : **a.** $33,3 \mu\text{F} - 75 \text{ V}$
b. $300 \mu\text{F} - 25 \text{ V}$
- E. 2 : **b.** 50 V ; 25 V ; 75 V
- E. 3 : **a.** $W = 0,34 \text{ mJ}$
b. $t = 235 \text{ ms}$
c. $I = 1,2 \text{ mA}$
- E. 4 : **a.** $t = 3,8 \text{ s}$
b. $t = 16,5 \text{ s}$
c. $U_C = 37 \text{ V}$
- E. 5 : **a.** $U_C = -4,5 \text{ V}$
b. $t = 25 \text{ s}$
c. $t = 3,5 \text{ s}$

SO 2

Chapitre 5

- E. 2 : **a.** $T = 5 \text{ ms}$; $f = 200 \text{ Hz}$
b. $U^- = 4 \text{ V}$
- E. 3 : **a.** $T = 10 \text{ ms}$; $f = 100 \text{ Hz}$; $I_1 = 4 \text{ A}$; $I_2 = 2 \text{ A}$
d. $I = 4,47 \text{ A}$, $\varphi = -26,5^\circ$
- E. 4 : $i = 3,8 \sin(\omega t + 0,26)$; $i = 4 \sin(\omega t - 1)$;
 $i_2 = 5 \sin(\omega t - 0,93)$
- E. 5 : **a.** $T = 20 \text{ ms}$; $\hat{U}_1 = 15 \text{ V}$; $\hat{U}_2 = 10 \text{ V}$
b. $f = 50 \text{ Hz}$; $U_1 = 10,6 \text{ V}$; $U_2 = 7 \text{ V}$
c. $\varphi = 57,6^\circ$; u_2 en retard sur u_1
- E. 6 : **b.** $U = 15,6 \text{ V}$; $\varphi = 26^\circ$

Chapitre 6

- E. 1 : $C = 5,6 \mu\text{F}$
- E. 2 : **a.** $Z_1 = 165 \Omega$; $Z_2 = 372 \Omega$
b. $Z = 533 \Omega$
c. $I = 0,2 \text{ A}$
- E. 3 : **a.** $\varphi = 57,5^\circ$
b. $C = 100 \mu\text{F}$
c. $U_B = 44,6 \text{ V}$; $U_C = 37,7 \text{ V}$
- E. 4 : **a.** $C = 20 \mu\text{F}$
b. $I_R = 0,23 \text{ A}$; $I_C = I_L = 1,46 \text{ A}$
- E. 5 : $R = 157 \Omega$; $L = 1,4 \text{ H}$
- E. 6 : **a.** $I_R = 0,7 \text{ A}$; $I_C = 0,6 \text{ A}$
b. $I = 0,9 \text{ A}$

Chapitre 7

- E. 1 : **a.** $P_a = 120 \text{ W}$
b. $Q = 139 \text{ var}$

ÉLÉMENTS DE CORRIGÉ

- c. $\cos \varphi = 0,65$
 d. $\eta = 0,83$; $C = 5 \mu\text{F}$

- E. 2 : a. $P = 4,7 \text{ kW}$; $Q = 3,5 \text{ kvar}$
 b. $S = 7,6 \text{ kVA}$; $I = 33 \text{ A}$; $\cos \varphi = 0,88$

- E. 3 : a. $\cos \varphi = 0,69$
 b. $C = 2,7 \mu\text{F}$

- E. 4 : a. $Z_b = 300 \Omega$
 b. $r = 41 \Omega$; $L = 0,95 \text{ H}$

- E. 5 : a. $\cos \varphi = 0,88$
 b. $I = 16 \text{ A}$

Chapitre 8

- E. 1 : a. $P = 72 \text{ kW}$
 b. $Q = 45,5 \text{ kvar}$; $S = 85,2 \text{ kVA}$
 c. $I = 123 \text{ A}$; $\cos \varphi = 0,845$
 d. $C = 70 \mu\text{F}$

- E. 2 : a. $I = 7,2 \text{ A}$
 b. $C = 10 \mu\text{F}$

- E. 3 : a. $U = 400 \text{ V}$; $I = 2,7 \text{ A}$; $I = 4,6 \text{ A}$; $P_1 = 928,8 \text{ W}$;
 $P = 2 740 \text{ W}$
 b. $V = 230 \text{ V}$; $I = 1,5 \text{ A}$; $P_1 = 300 \text{ W}$; $P = 900 \text{ W}$

- E. 4 : A. a. $w = 120 \text{ wh}$
 b. $P = 4 800 \text{ W}$
 c. $S = 5 750 \text{ VA}$
 d. $\cos \varphi = 0,83$
 B. $C = 89 \mu\text{F}$

- E. 5 : Étoile $R = 4 \Omega$; triangle $R = 1,3 \Omega$

- E. 6 : a. $I = 2,6 \text{ A}$
 b. $I = 1,5 \text{ A}$
 c. $R = 267 \Omega$

- E. 7 : a. $I = 49 \text{ A}$
 b. $\cos \varphi = 0,72$

- E. 8 : a. $P_a = 4 \text{ kW}$
 b. $Q = 3 967 \text{ var}$
 c. $I = 8,1 \text{ A}$
 d. Triangle
 e. $C = 10 \mu\text{F}$

SO 3

Chapitre 9

- E. 1 : a. 1 : Nord ; 2 : Sud
 b. Répulsion

- E. 2 : $I = 0,3 \text{ A}$

- E. 3 : b.

μ_r	1 600	1 000	584	324	226	175	144
---------	-------	-------	-----	-----	-----	-----	-----

- E. 4 : b. $I = 40 \text{ A}$

Chapitre 10

- E. 1 : a. $L = 62,5 \text{ mH}$
 b. $E = 3,125 \text{ V}$

- E. 2 : $E = 800 \text{ V}$

Chapitre 12

- E. 1 : a. $E' = 208 \text{ V}$
 b. $\phi = 1,3 \text{ mWb}$

- E. 2 : $E' = 168 \text{ V}$

- E. 3 : $Rh = 11,4 \Omega$

- E. 4 : a. $E' = 230 \text{ V}$
 b. $P_{em} = 1 150 \text{ W}$
 c. $T_{em} = 9,15 \text{ Nm}$

- E. 5 : a. $i = 1,2 \text{ A}$, $I = 6,8 \text{ A}$
 b. $p_{j \text{ induit}} = 92,5 \text{ W}$; $p_{j \text{ inducteur}} = 288 \text{ W}$
 c. $E' = 226,4 \text{ V}$, $P_{em} = 1 540 \text{ W}$
 d. $\eta_i = 0,7$, $\eta_e = 0,80$, $P_c = 190 \text{ W}$

- E. 6 : $N = 3 240 \text{ tr/min}$

- E. 7 : $2,5 \text{ A}$; $3,3 \text{ A}$

- E. 8 : a. $\eta_i = 0,85$
 b. $T_u = 9,5 \text{ Nm}$

- E. 9 : $i = 4,5 \text{ A}$, $I = 85,5 \text{ A}$
 b. $E' = 219 \text{ V}$
 c. $P_{em} = 18,7 \text{ kW}$
 d. $\eta_e = 0,86$

- E. 10 : a. $\eta_i = 0,82$
 b. $p_j = 612,5 \text{ W}$; $p_c = 787,5 \text{ W}$
 c. $T_{em} = 92,9 \text{ Nm}$, $T_u = 83,5 \text{ Nm}$

- E. 11 : a. $i = 1,6 \text{ A}$, $I = 43,4 \text{ A}$
 b. $P_u = 7 313 \text{ W}$; $P_a = 9 000 \text{ W}$
 c. $T_{em} = 52,8 \text{ Nm}$, $T_u = 50 \text{ Nm}$

- E. 12 : a. $U = 222 \text{ V}$
 b. $N = 1 700 \text{ tr/min}$; $T_{em} = 14 \text{ Nm}$

- E. 13 : a. $R_D = 15,8 \Omega$
 b. $R_C = 150 \Omega$

- E. 14 : a. $P_a = 2 040 \text{ W}$; $\eta = 0,49$
 b. $T_u = 9,5 \text{ Nm}$
 c. $p_j = 990 \text{ W}$
 d. $R = 0,025 \Omega$
 e. $E' = 5,25 \text{ V}$

- E. 15 : a. $\eta = 0,78$
 b. $P_j = 291 \text{ W}$; $P = 1 069 \text{ W}$

- E. 16 : a. $i = 2,2 \text{ A}$; $I = 25 \text{ A}$
 b. $E' = 207,5 \text{ V}$; $P_{em} = 5 187 \text{ W}$

- E. 17 : a. $P_a = 60 \text{ W}$
 b. $P_j = 20 \text{ W}$
 c. $P_u = 40 \text{ W}$
 d. $T_u = 0,11 \text{ Nm}$

Chapitre 14

- E. 1 : a. $P_a = 12,1 \text{ kW}$
 b. $\eta = 0,82$
 c. $T_u = 66 \text{ Nm}$

- E. 2 : a. $T = -0,5 \text{ N} + 750$
 b. $N = 1 428 \text{ tr/min}$
 c. $T = 35,7 \text{ Nm}$

- E. 3 : a. Couplage étoile
 b. 4 pôles ; $g = 5 \%$
 c. $T_u = 20 \text{ Nm}$

ÉLÉMENTS DE CORRIGÉ

E. 4 : a. $P_a = 17,6 \text{ kW}$; $I = 36,4 \text{ A}$
 b. $N = 960 \text{ tr/min}$; $T_u = 149 \text{ Nm}$

E. 5 : a. couplage triangle ; $g = 8 \%$
 b. $P_a = 12\,990 \text{ W}$; $\eta = 0,77$
 c. $P_{JS} = 311 \text{ W}$
 d. $P_{TR} = 12\,179 \text{ W}$
 e. $P_{JR} = 974 \text{ W}$
 f. $\eta_R = 92 \%$

E. 6 : a. $g = 4,7 \%$
 b. $P_{JR} = 233 \text{ W}$
 c. $P_a = 5\,233 \text{ W}$
 d. $I = 10,8 \text{ A}$

Chapitre 15

E. 1 : a. $I = 6,2 \text{ A}$
 b. $P_J = 1\,125 \text{ W}$
 c. $\cos \varphi_1 = 0,33$; $\cos \varphi_2 = 0,43$
 d. $I = 12 \text{ A}$

E. 2 : b. $N = 2\,000 \text{ tr/min}$

Chapitre 16

E. 1 : a. couplage étoile
 b. $I = 7,2 \text{ A}$
 c. $N = 3\,000 \text{ tr/min}$

E. 2 : a. $S = 1\,992 \text{ VA}$
 b. 2 paires de pôles

E. 3 : a. $P_U = 242 \text{ W}$
 b. $P = 20 \text{ W}$
 c. $P_J = 10 \text{ W}$
 d. $\eta = 0,89$

SO 4

Chapitre 17

E. 1 : a. $m = 0,046$
 b. $N_2 = 55 \text{ spires}$
 c. $I_1 = 0,92 \text{ A}$
 d. $P = 3\,220 \text{ W}$; $S = 4\,600 \text{ VA}$; $Q = 3\,285 \text{ var}$

E. 2 : a. $I_1 = 13 \text{ A}$; $I_2 = 2 \text{ A}$
 b. $I_{1V} = 0,65 \text{ A}$
 c. $U_2 = 1\,470 \text{ V}$

E. 3 : $I_1 = 1,2 \text{ A}$

E. 4 : a. $I_1 = 20 \text{ A}$; $I_2 = 120 \text{ A}$
 b. $P_{J1} = 860 \text{ W}$; $P_{J2} = 1\,440 \text{ W}$; $\eta = 0,89$

E. 5 : c. $P_J = 0,08 \text{ W}$
 d. $P_J \ll P_o$; $P_o = \text{pertes fer}$

Chapitre 18

E. 1 : a. $U_2 = 1\,200 \text{ V}$; $U_2 = 694 \text{ V}$
 b. Étoile : $I_2 = 9,6 \text{ A}$; triangle : $I_2 = 16,6 \text{ A}$; $J_2 = 9,6 \text{ A}$

E. 2 : 1. $\eta = 90 \%$

2. a. $V_2 = 230 \text{ V}$; $U_2 = 398 \text{ V}$
 b. $I_2 = 10,6 \text{ A}$

E. 3 : a. $U_2 = 404 \text{ V}$
 b. $I_2 = 71,5 \text{ A}$

E. 4 : a. $13,8 \text{ V-}24 \text{ V}$
 b. $13,8 \text{ V}$
 c. 24 V
 d. $24 \text{ V-}41,6 \text{ V}$

E. 5 : 1. a. $P_L = 3\,000 \text{ W}$
 b. $P_M = 3\,750 \text{ W}$
 c. $Q_M = 2\,618 \text{ var}$
 d. $S = 7\,240 \text{ VA}$
 e. $\cos \varphi = 0,93$
 f. $I_2 = 10,5 \text{ A}$

2. a. $V_{2V} = 400 \text{ V}$; $U_{2V} = 693 \text{ V}$
 b. $\eta = 0,95$

SO 5

Chapitre 20

E. 1 : b. $U_R = 32,5 \text{ V}$
 c. bi-alternance

E. 2 : $U = 2 \text{ V}$

E. 3 : $I = 0,15 \text{ A}$

Chapitre 21

E. 1 : b. $\alpha = 36^\circ$; $\bar{U} = 93,6 \text{ V}$

E. 2 : a. $\hat{U} = 135 \text{ V}$
 b. $m = 0,41$

E. 3 : $U = 115 \text{ V}$

Chapitre 22

E. 1 : a. $U_s = 5,3 \text{ V}$; $I_s = 53 \text{ mA}$
 b. $I_B = 1 \text{ mA}$
 c. $I = 28 \text{ mA}$; $I_2 = 27 \text{ mA}$

E. 2 : a. $I_C = 0,12 \text{ A}$; $I_B = 0,8 \text{ mA}$
 b. $R_2 = 87,5 \Omega$; $R_1 = 1\,284 \Omega$

Chapitre 23

E. 1 : Capteurs : S_1 ; S_2 ; S_3 ; S_4 ; S_5 ; S_6 ; S_7 ; S_8
 Actionneurs : M_1 ; V_1 ; M_2 ; V_2

E. 2 : a. $R_o = 470 \Omega$; $R_{20} = 220 \Omega$; $R_{100} = 30 \Omega$
 b. $U_o = 3,4 \text{ V}$; $U_{20} = 2,5 \text{ V}$; $U_{100} = 0,6 \text{ V}$

SO 6

Chapitre 24

E. 2 : 1 A

E. 3 : $5,09 \text{ V} < U < 5,20 \text{ V}$

E. 4 : 5 V

E. 5 : a. $12 \mu\text{A}$
 b. $22 \mu\text{A}$

INDEX ALPHABÉTIQUE

A

Accumulateur, 50
Actionneur, 208
Aimant, 100
Aimantation, 103
Alternateur, 147
Amorçage, 187
Ampère, 8
Ampèremètre, 8
Ampères par mètre, 102
Amplification (*transistor en*), 201
Anode, 177, 186
Armatures, 40
Asynchrone (*machine*), 130
Auto-induction, 110
Automate, 211
Autotransformateur, 161

B

Bagues de déphasage, 143
Balayage, 227
Base de temps, 227
Bi-alternance, 179
Bobiné (*rotor*), 131
Boucherot (*méthode de*), 77
Bouchon (*circuit bouchon*), 67

C

Cage (*moteur à*), 131
Cathode, 177, 186
Calibre, 220
Capacité, 40
Capacitif (*dipôle*), 65
Capteur, 207
Champ magnétique, 102
Champ tournant, 129
Charge d'un condensateur, 42
Circuit magnétique, 104
Claquage (*tension de*), 177
Coefficient d'amplification, 196
Coefficient de température, 20
Coercitive (*excitation*), 104
Collecteur (*composant*), 196
Collecteur (*de machine*), 114
Commutateur d'intensité, 17
Commutation, 199
Composées (*tensions*), 86
Condensateur, 40
Conductance, 18
Constante de temps, 42
Contacteur, 48, 95
Conversion d'énergie, 176
Convertisseur, 176

Couleurs (*code des*), 49
Coulomb, 8
Couplage (*moteur asynchrone*), 133
Couplage (*transformateur*), 166
Couple électromagnétique, 118, 121
Courant électrique, 8
Courant induit, 108

D

Décharge d'un condensateur, 42
Démarrage (*couple de*), 137
Démarrage (*moteur asynchrone*), 135
Démarrage (*rhéostat*), 116
Déphasage, 55
Désamorçage (*thyristor*), 187
Diac, 191
Diélectrique, 42
Différentiel, 240
Différentielle (*sonde*), 229
Diode, 177
Diode Zéner, 177
Dipôles, 11
Diviseur de courant, 22
Diviseur de tension, 21
Doigts (*règle des trois*), 111

E

Efficace (*valeur*), 53
Électrons, 8
Émetteur, 196
Énergie active, 78
Énergie électrique, 12
Énergie réactive, 78
Équilibré (*triphase*), 85
Étoile (*montage*), 86
Étoile-triangle (*démarrage*), 136
Excitation, 115
Excitation magnétique, 102

F

Facteur de puissance, 73
Farad, 40
Ferromagnétisme, 103
Filtrage, 181
Flux magnétique, 101
Fluxmètre, 101
Force contre électromotrice, 116
Force électromagnétique, 111
Force électromotrice, 147
Force électromotrice d'induction, 108
Foucault (*courants de*), 109

Fréquence, 52
Fresnel (*représentation de*), 55

G

Gâchette, 186
Générateur, 29
Glissement, 133
Gradateur, 189
Graëtz (*pont de*), 180

H

Hacheur, 200
Hall (*effet*), 232
Henry, 110
Hertz, 52
Hyperbole (*de dissipation*), 198
Hystérésis, 104

I

Impédance, 61
Inductance, 62, 110
Inducteur, 114
Inductif (*dipôle*), 65
Induction électromagnétique, 108
Induit, 114
Instantanée (*valeur*), 52
Intensité, 8

J

Joubert (*méthode de*), 70
Jonctions, 177
Joule (*loi de*), 18

K

Kapp (*coefficient de*), 147

L

Laplace (*loi de*), 111

M

Machines, 114, 129
Mailles (*loi des*), 10
Maximale (*valeur*), 53
Mono-alternance, 178
Moteur à excitation indépendante, 115
Moteur asynchrone, 131
Moteur série, 120
Moteur synchrone, 130, 144
Moyenne (*valeur*), 53
Multimètre, 20

INDEX ALPHABÉTIQUE

N

Neutre, 85
Nœuds (*loi des*), 9

O

Ohm, 18
Ohm (*loi d'*), 18
Ohmmètre, 24
Ohm-mètre, 20
Ondulation, 182
Opérative (*partie*), 206
Oscilloscope, 225

P

Période, 52
Perméabilité magnétique, 103
Perméabilité absolue, 102
Phase, 85
Piles, 50
Pince ampéremétrique, 15, 232
Point de fonctionnement, 198
Pôles (*paires de*), 132, 148
Pont mixte, 188
Potentiel, 9
Potentiomètre, 21
Pouillet (*loi de*), 33
Précision, 220
Primaire, 158
Puissance active, 73
Puissance apparente, 73
Puissance électrique, 11
Puissance électro-magnétique, 118, 121
Puissance instantanée, 73
Puissance réactive, 73
Pulsation, 54

R

Radian par seconde, 54
Rapport de transformation, 159, 160
Réactance, 62
Réaction magnétique d'induit, 116
Récepteurs actifs, 32
Redresseur commandé, 187
Redresseurs, 178
Rémanent (*champ*), 104
Rémanente (*aimantation*), 104
Rendement, 119, 122, 139
Répulsion (*moteur à*), 145
Résistance, 18
Résistivité, 20
Résonance, 65
Rhéostat, 25
Rotor, 131
Rotorique (*démarrage*), 136
Roue libre (*diode de*), 199

S

Secondaire, 158
Sens du courant, 8
Seuil (*de tension*), 177
Siemens, 18
Simples (*tensions*), 86
Sinusoïdal (*courant*), 52
Solénoïde, 102
Sonde de courant, 229
Spot, 225
Stabilisation de tension, 182
Stator, 131
Synchrone (*machine*), 130
Synchronisme (*fréquence de*), 132
Système automatisé, 206

T

Tellurohmmètre, 237
Tension, 9
Tensions triphasées, 85
Terre, 236
Tesla, 100
Teslamètre, 106
Thévenin (*modèle équivalent de*), 30
Thyristor, 186
Trains d'onde, 190
Transformateur, 158
Transistor, 196
Triac, 191
Triangle (*montage*), 88
TRMS, 221
Tube cathodique, 225

U

Universel (*Moteur*), 143

V

Vitesse angulaire, 132
Volt, 10
Voltampère, 73
Voltampère réactif, 74
Voltampéremétrique (*méthode*), 23
Voltmètre, 10

W

Watt, 11
Wattmètre, 11
Wattmètres (*méthode des deux*), 92
Weber, 101
Wheatstone (*pont de*), 24

