

**ESPACES TECHNOLOGIQUES**

Collection dirigée par A. BIANCIOTTO et P. BOYE

# **ÉLECTROTECHNIQUE**

## **EXPÉRIMENTATION**

### **MESURES SUR DES**

# **APPLICATIONS PROFESSIONNELLES**

**Pierre SALETTE**

*Professeur de Lycée Professionnel*

**André BIANCIOTTO**

*Professeur agrégé honoraire*

**Pierre BOYE**

*Professeur honoraire d'ENNA*

À l'usage :

- des élèves des classes :
  - du **BEP des métiers de l'électrotechnique**,
  - des **BEP** et des **Baccalauréats Professionnels industriels**,
- des apprentis électrotechniciens des **Centres d'apprentissage**,
- des auditeurs de la **Formation Continue**.

**Delagrave**

15, rue Soufflot, 75254 PARIS Cedex 05

## COLLECTION ESPACES TECHNOLOGIQUES

P. SALETTE – A. BIANCIOTTO – P. BOYE

### L'ÉLECTRONIQUE ET SES FONCTIONS

- Tome 1
- Tome 2

### L'ÉLECTROTECHNIQUE SES MESURES ET ESSAIS

- Tome 1
- Tome 2

### ÉLECTROTECHNIQUE

P. LEAUTEY – P. SALETTE – A. BIANCIOTTO – P. BOYE

### ÉLECTRONIQUE APPLIQUÉE

### ÉLECTRONIQUE BEP

A. BIANCIOTTO – P. BOYE – G. AUGEREAU

### ÉQUIPEMENTS ET INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES – BEP –

### MÉTIERES DE L'ÉLECTROTECHNIQUE

- Seconde professionnelle
- Terminale

P. BOYE – A. BIANCIOTTO – G. AUGEREAU

### SCHEMAS ET ÉTUDES D'ÉQUIPEMENTS

P. DENIS – D. MURAIL – A. BIANCIOTTO – P. BOYE

### LA MAINTENANCE DES SYSTÈMES AUTOMATISÉS (BEP ET BAC PRO)

### LES ACTIVITÉS DE LA MAINTENANCE

- Livre de l'élève BEP
- Livre de l'élève BAC PRO
- Livre du professeur (BEP – BAC PRO)

## COLLECTION AUTONOMIE & PERFORMANCES

P. SALETTE

**SCIENCES PHYSIQUES BEP** – Métiers de la productique et de la maintenance

**SCIENCES PHYSIQUES BEP** – Métiers de l'électricité

**SCIENCES PHYSIQUES BEP** – Métiers de la santé et de l'hygiène  
Métiers de l'habillement

**SCIENCES PHYSIQUES BEP** – Métiers de l'électronique et de l'audiovisuel

### MATHÉMATIQUES BEP INDUSTRIELS

P. SALETTE – M. BABIN

### MATHÉMATIQUES BEP TERTIAIRES

### MATHÉMATIQUES BAC PRO TERTIAIRES

### MATHÉMATIQUES BAC PRO INDUSTRIELS

### FICHES MATHÉMATIQUES BEP TERTIAIRES

- Fichier 1 : seconde professionnelle
- Fichier 2 : terminale



- Le photocopillage, c'est l'usage abusif et collectif de la photocopie sans autorisation des auteurs et éditeurs. Largement répandu dans les établissements d'enseignement, le photocopillage menace l'avenir du livre, car il met en danger son équilibre économique. Il prive les auteurs d'une juste rémunération. En dehors de l'usage privé du copiste, toute reproduction totale ou partielle de cet ouvrage est interdite. -

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code Pénal.

© DELAGRAVE, 2002

ISBN 2-206-08521-6

DELAGRAVE Édition – 15, rue Soufflot – 75005 Paris

E-mail : delagrave@delagrave-edition.fr – Web : www.delagrave-edition.fr

# PRÉSENTATION

## ■ LES CONTENUS DU SAVOIR SO :

### « Électrotechnique – Expérimentation – Mesures sur des applications professionnelles »

qui associent les concepts, lois et expérimentation à leurs champs d'application professionnels représentent un ensemble fondamental pour la formation des élèves préparant le Brevet d'Enseignement Professionnel « métiers de l'électrotechnique ».

Cet ouvrage, en un seul volume, vise les objectifs suivants :

- acquisition des concepts de l'électrotechnique,
- validation de ces concepts au travers de situations à caractère expérimental,
- exploitation des acquis et confirmation de leur validité par des mesures sur des applications industrielles,
- développement de :
  - la rigueur du raisonnement,
  - la précision dans les activités expérimentales,
  - l'interprétation cohérente des mesures sur les applications industrielles,
  - la qualité rédactionnelle des rapports et comptes rendus d'activités.

Son contenu est rigoureusement conforme au dernier référentiel des activités professionnelles et de certification du domaine professionnel.

Ce document officiel qui ne fait aucune partition entre Seconde Professionnelle et Terminale permet à l'Équipe Pédagogique de gérer, en toute autonomie, la répartition sur les deux années, des 28 chapitres qui constituent le contenu de cet ouvrage divisé en 7 parties repérées, SO1 à SO7.

Chacun des chapitres est organisé selon les 5 rubriques ci-après :

ÉLECTROTECHNIQUE	ESSENTIEL À RETENIR	TEST RAPIDE	EXPÉRIMENTATION	APPLICATIONS
<b>Acquérir :</b> <ul style="list-style-type: none"><li>– les concepts et les lois qui en découlent,</li><li>– la rigueur dans la conduite du raisonnement.</li></ul>	<b>Mémoriser :</b> <ul style="list-style-type: none"><li>– les relations et formules fondamentales,</li><li>– les définitions clefs.</li></ul>	<b>Évaluer</b> immédiatement son niveau de connaissance.	<b>Exploiter</b> les acquis scientifiques dans des activités expérimentales : <ul style="list-style-type: none"><li>en décodant un schéma de montage,</li><li>en réalisant des mesurages,</li><li>en interprétant les résultats obtenus.</li></ul>	<b>S'exercer</b> , dans les exercices résolus, à mettre en œuvre les notions et les méthodes, <b>Confirmer</b> , dans les exercices à résoudre, ses aptitudes à appliquer un raisonnement scientifique et à effectuer avec rigueur des calculs mathématiques.

Ces chapitres sont répartis en sept parties, Savoir SO1 à Savoir SO7, représentatives du Savoir SO. Chacune de ces parties se termine sur une double rubrique « **Mesures sur des applications professionnelles et compléments technologiques** » :

- **Les mesures** proposées sont placées dans un contexte technique réaliste et sont choisies parmi les activités professionnelles le plus couramment rencontrées dans les métiers de l'électrotechnique,
- **Les compléments technologiques**, relatifs aux composants, constituants ou machines les plus courants dans le domaine de l'électrotechnique permettent d'apporter les éléments technologiques nécessaires à leur choix, à leur mise en œuvre ou à leur exploitation rationnelle.

En fin d'ouvrage, sous la rubrique annexe, figurent :

- les grandeurs et unités de mesure,
- les principales formules,
- le mémento,
- les éléments de corrigé,
- l'index alphabétique.

*Les auteurs souhaitent que cet ouvrage apporte un soutien efficace aux élèves préparant le BEP des métiers de l'électrotechnique.*

# TABLE DES MATIÈRES

## SAVOIR S01 – Circuits parcourus par un courant continu..... 7

### 1. Courants et tensions. Puissance et énergie électrique

<b>Électrotechnique</b> : Courant électrique, Intensité du courant, Potentiels-Tension, Puissance électrique, Dipôles, Énergie électrique, Rendement.....	8
<b>Essentiel à retenir</b> .....	13
<b>Test rapide</b> .....	14
<b>Expérimentation</b> : Mesure de tension, Mesure d'intensité.....	15
<b>Applications</b> .....	16

### 2. Résistance électrique. Lois d'Ohm et de Joule

<b>Électrotechnique</b> : Loi d'Ohm, Puissance dissipée en chaleur, Groupement de résistances, Montage diviseur de tension, Montage potentiométrique, Montage diviseur de courant .....	18
<b>Essentiel à retenir</b> .....	22
<b>Test rapide</b> .....	23
<b>Expérimentation</b> : Mesure de résistance, Réglage d'un courant, Réglage d'une tension .....	23
<b>Applications</b> .....	27

## SAVOIR S02 – Circuits parcourus par un courant alternatif sinusoïdal ..... 51

### 5. Grandeurs fondamentales (système monophasé)

<b>Électrotechnique</b> : Régime variable, Valeurs caractéristiques, Courant sinusoïdal, Représentation de Fresnel, Loi des mailles, Loi des nœuds.....	52
<b>Essentiel à retenir</b> .....	57
<b>Test rapide</b> .....	57
<b>Expérimentation</b> : Mesures de tensions alternatives, Relevé d'oscillogrammes.....	58
<b>Applications</b> .....	59

### 6. Association de dipôles élémentaires (système monophasé)

<b>Électrotechnique</b> : Impédance, Dipôles élémentaires, Groupement de dipôles en série et en parallèle.....	61
<b>Essentiel à retenir</b> .....	67
<b>Test rapide</b> .....	68
<b>Expérimentation</b> : Mesure de capacité, Mesure d'inductance, Étude d'un circuit R-L-C série.....	69
<b>Applications</b> .....	71

### 7. Puissances (système monophasé)

<b>Électrotechnique</b> : Puissance active, Puissance apparente, Puissance réactive, Triangle des puissances, Puissances consommées par les dipôles
---

## SAVOIR S03 – Appareils électromagnétiques..... 99

### 9. Champ magnétique

<b>Électrotechnique</b> : Champ magnétique, Flux, Champ magnétique produit par un courant, Ferromagnétisme.....	100
<b>Essentiel à retenir</b> .....	105
<b>Test rapide</b> .....	105
<b>Expérimentation</b> : Mesures sur un solénoïde.....	106
<b>Applications</b> .....	107

### 10. Induction électromagnétique. Lois de Lenz et de Laplace

<b>Électrotechnique</b> : Induction, Auto-induction, Force électromagnétique .....	108
<b>Essentiel à retenir</b> .....	112
<b>Test rapide</b> .....	112
<b>Applications</b> .....	113

### 11. Principe et organisation du moteur à courant continu

<b>Électrotechnique</b> : Organisation fonctionnelle d'une machine à courant continu, Principe de réversibilité .....	114
---	-----

### 12. Moteur à excitation séparée et moteur à excitation série

<b>Électrotechnique</b> : Différentes configurations d'excitation, Moteur à excitation séparée, Moteur à excitation série .....	115
<b>Essentiel à retenir</b> .....	123
<b>Test rapide</b> .....	123
<b>Expérimentation</b> : Caractéristique de réglage d'un moteur à excitation indépendante, Caractéristique du couple d'un moteur à excitation série, Caractéristique de fréquence de rotation d'un moteur à excitation série .....	124
<b>Applications</b> .....	126

### 3. Générateurs et récepteurs. Loi d'Ohm généralisée

<b>Électrotechnique</b> : Générateurs, Groupements de générateurs, Récepteurs actifs, Loi d'Ohm généralisée.....	29
<b>Essentiel à retenir</b> .....	34
<b>Test rapide</b> .....	35
<b>Expérimentation</b> : Caractéristique d'une pile, Mesure des grandeurs caractéristiques d'un générateur linéaire, Caractéristique d'une diode électroluminescente (LED).....	35
<b>Applications</b> .....	37

### 4. Condensateurs

<b>Électrotechnique</b> : Notion de condensateur, Groupements de condensateurs, Charge et décharge, Circuit RC .....	40
<b>Essentiel à retenir</b> .....	44
<b>Test rapide</b> .....	44
<b>Expérimentation</b> : Calculs de charge et de décharge.....	45
<b>Applications</b> .....	46

## MESURES SUR DES APPLICATIONS PROFESSIONNELLES ET COMPLÉMENTS TECHNOLOGIQUES ..... 48

élémentaires, Méthode de Boucherot, Amélioration du facteur de puissance.....	73
<b>Essentiel à retenir</b> .....	79
<b>Test rapide</b> .....	80
<b>Expérimentation</b> : Mesure des puissances actives. Wattmètre, Mesure du facteur de puissance, Mesure d'inductance.....	81
<b>Applications</b> .....	83

### 8. Couplages et puissances (système triphasé)

<b>Électrotechnique</b> : Tensions triphasées, Couplage de récepteurs en triphasé, Puissances en triphasé équilibré.....	85
<b>Essentiel à retenir</b> .....	90
<b>Test rapide</b> .....	91
<b>Expérimentation</b> : Mesure de puissance active avec et sans neutre, Mesure de puissance réactive.....	91
<b>Applications</b> .....	93

## MESURES SUR DES APPLICATIONS PROFESSIONNELLES ET COMPLÉMENTS TECHNOLOGIQUES ..... 95

### 13. Principe et organisation des machines à courant alternatif

<b>Électrotechnique</b> : Champ magnétique tournant, Machines synchrones, Machines asynchrones.....	129
---	-----

### 14. Moteur asynchrone triphasé

<b>Électrotechnique</b> : Organisation générale, Principe de fonctionnement, Caractéristiques, Bilan énergétique.....	131
<b>Essentiel à retenir</b> .....	138
<b>Test rapide</b> .....	138
<b>Expérimentation</b> : Mesure du rendement d'un moteur asynchrone triphasé.....	139
<b>Applications</b> .....	140

### 15. Moteurs monophasés

<b>Électrotechnique</b> : Moteur asynchrone monophasé, Moteur série universel, Moteur à répulsion, Moteur synchrone monophasé.....	142
<b>Essentiel à retenir</b> .....	145
<b>Test rapide</b> .....	145
<b>Applications</b> .....	146

### 16. Alternateur

<b>Électrotechnique</b> : Organisation générale, Force électromotrice induite, Pertes et rendement, Alternateur triphasé .....	147
<b>Essentiel à retenir</b> .....	150
<b>Test rapide</b> .....	150
<b>Expérimentation</b> : Essai à vide et en charge.....	151
<b>Applications</b> .....	152

## MESURES SUR DES APPLICATIONS PROFESSIONNELLES ET COMPLÉMENTS TECHNOLOGIQUES ..... 153

<b>SAVOIR S04 – Transformateurs .....</b>	<b>157</b>
<b>17. Transformateur monophasé</b>	
Électrotechnique : Fonctionnement à vide, Fonctionnement en charge Autotransformateur.....	158
Essentiel à retenir.....	162
Test rapide.....	162
Expérimentation : Essai à vide, Mesure du rendement par la méthode directe, Mesure directe du rendement par la méthode des pertes séparées.....	163
Applications.....	164
<b>SAVOIR S05 – Fonctions .....</b>	<b>175</b>
<b>19. Principe de la conversion d'énergie</b>	
Électrotechnique : Convertisseurs statiques d'énergie, Structure générale d'un convertisseur.....	176
<b>20. Redressement</b>	
Électrotechnique : Diode à jonctions, Diode Zéner, Redressement monophasé, Redressement triphasé, Filtrage d'une tension redressée, Stabilisation de tension.....	177
Essentiel à retenir.....	183
Test rapide.....	183
Expérimentation : Relevé de la caractéristique d'une diode, Redressement sur f.c.e.m.....	184
Applications.....	185
<b>21. Modulation d'énergie. Redresseur commandé et gradateur</b>	
Électrotechnique : Thyristor, Redresseur commandé, Gradateur, Triac, Diac.....	186
Test rapide.....	192
Essentiel à retenir.....	192
<b>SAVOIR S06 – Appareils de mesure .....</b>	<b>219</b>
<b>24. Multimètres</b>	
Électrotechnique : Appareils de mesure, Lecture et précision, Mesures en alternatif, Choix du calibre – Précautions d'emploi, Sécurité des appareils de mesure.....	220
Essentiel à retenir.....	223
Expérimentation : Relevé de la caractéristique d'une lampe.....	224
Applications.....	224
<b>25. Oscilloscopes</b>	
Électrotechnique : Tube cathodique, Analyse fonctionnelle de l'oscilloscope, Mesures et sécurité.....	225
<b>SAVOIR S07 – Mesures sur des applications professionnelles spécifiques .....</b>	<b>235</b>
<b>27. Mesures de valeurs ohmiques</b>	
Électrotechnique : Résistance de terre, Mesure de résistance de terre, Mesure d'isolement.....	236
Essentiel à retenir.....	238
<b>28. Tests sur un départ terminal en régime TT</b>	
Électrotechnique : Dispositif de protection contre les contacts indirects, Mesure de la valeur de déclenchement du dispositif de protection différentiel, Ordre des phases.....	239
<b>Annexes .....</b>	<b>243</b>
Grandeurs et unités utilisées en électrotechnique.....	244
Principales formules utilisées en électrotechnique.....	245
Multiples et sous multiples d'unités et principaux symboles.....	246
Mémento.....	247
Éléments de corrigé.....	251
Index alphabétique.....	254
<b>18. Transformateur triphasé</b>	
Électrotechnique : Organisation générale, Couplage des enroulements, Repérage de la plaque à bornes, Rapport de transformation, Rendement, Règles de branchement des transformateurs de puissance.....	166
Essentiel à retenir.....	169
Applications.....	170
<b>MESURES SUR DES APPLICATIONS PROFESSIONNELLES ET COMPLÉMENTS TECHNOLOGIQUES .....</b>	<b>173</b>
<b>Expérimentation : Redressement commandé sur charge résistive, Gradateur à triac.....</b>	<b>194</b>
<b>Applications.....</b>	<b>195</b>
<b>22. Commutation. Amplification</b>	
Électrotechnique : Transistor bipolaire, Transistor en commutation, Hacheur, Transistor en amplification.....	196
Essentiel à retenir.....	202
Test rapide.....	202
Expérimentation : Relevé de caractéristiques, Transistor en commutation, Hacheur série.....	203
Applications.....	205
<b>23. Saisie des informations. Traitement des données</b>	
Électrotechnique : Organisation fonctionnelle, Saisie de données : capteurs, Actionneurs, Traitement des données : constituants programmables de commande, Automate programmable industriel.....	206
Essentiel à retenir.....	211
Test rapide.....	212
Applications.....	212
<b>MESURES SUR DES APPLICATIONS PROFESSIONNELLES ET COMPLÉMENTS TECHNOLOGIQUES .....</b>	<b>213</b>
<b>Essentiel à retenir.....</b>	<b>230</b>
<b>Test rapide.....</b>	<b>231</b>
<b>Expérimentation : Observation de l'intensité d'un courant dans un circuit TBTS.....</b>	<b>231</b>
<b>26. Pinces multifonctions</b>	
Électrotechnique : Pinces ampèremétriques, Pinces wattmétriques, Sondes de courant pour oscilloscopes.....	232
Essentiel à retenir.....	233
<b>MESURES SUR DES APPLICATIONS PROFESSIONNELLES ET COMPLÉMENTS TECHNOLOGIQUES .....</b>	<b>234</b>
<b>Expérimentation : Seuil de déclenchement d'un disjoncteur différentiel.....</b>	<b>241</b>
<b>Essentiel à retenir.....</b>	<b>241</b>
<b>MESURES SUR DES APPLICATIONS PROFESSIONNELLES ET COMPLÉMENTS TECHNOLOGIQUES .....</b>	<b>242</b>

# **Circuits parcourus par un courant continu**

- 1 Courants et tensions.  
Puissance et énergie électrique**
- 2 Résistance électrique.  
Lois d'Ohm et de Joule**
- 3 Générateurs et récepteurs.  
Loi d'Ohm généralisée**
- 4 Condensateurs**

# 1 Courants et tensions. Puissance et énergie électrique

## ÉLECTROTECHNIQUE

### 1 Courant électrique

Le courant électrique est un déplacement de charges électriques dans la matière. Dans les métaux, les porteurs de charge sont les électrons.

Les électrons, chargés négativement circulent de la borne  $\ominus$  vers la borne  $\oplus$  du générateur (fig. 1.01).

Le sens conventionnel du courant est de la borne  $\oplus$  vers la borne  $\ominus$  du générateur.

L'unité de charge électrique ou de quantité d'électricité est le **COULOMB (C)**.

La charge de l'électron est de  $-1,6 \times 10^{-19}$  C.

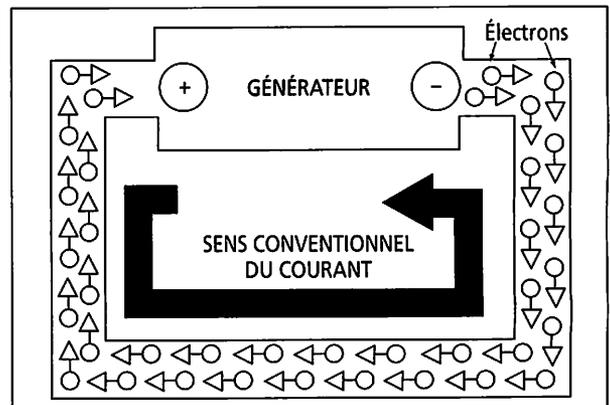


Fig. 1.01 : Circulation des électrons.

### 2 Intensité du courant

L'intensité du courant est le quotient de la quantité d'électricité  $Q$  par la durée  $t$  de passage du courant.

$$I = \frac{Q}{t} \quad \left\{ \begin{array}{l} I \text{ en ampères} \\ Q \text{ en coulombs} \\ t \text{ en secondes} \end{array} \right.$$

L'unité d'intensité est l'**AMPÈRE (A)**.

Sous-multiples : Le milliampère :  $1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$

Le microampère :  $1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$

Le nanoampère :  $1\text{nA} = 10^{-9}\text{A}$

Le courant électrique est représenté sur les schémas par une **flèche** qui n'indique pas forcément son sens.

L'intensité du courant est une **grandeur algébrique**; sa valeur est :  
– **positive** lorsque le courant circule dans le **sens de la flèche**,  
– **négative** dans le cas **contraire**.

Dans la figure 1.02  $I_1$  est positif,  $I_2$  négatif.

L'intensité se mesure avec un **AMPÈREMÈTRE** placé en **série** dans le circuit.

La figure 1.03 représente le symbole de l'ampèremètre, il mesure l'intensité traversant le dipôle D.

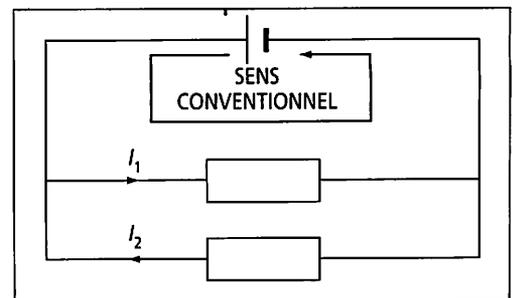


Fig. 1.02 : Représentation des courants électriques.

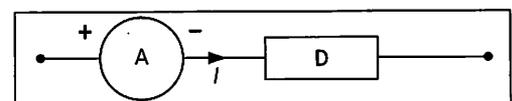


Fig. 1.03 : Mesure d'intensité.

### LOI DES NŒUDS :

Un nœud est un point de circuit où aboutissent plusieurs conducteurs.

La somme des courants arrivant à un nœud est égale à la somme des courants qui en partent.

Dans la figure 1.04,  $I_1 + I_3 = I_2 + I_4$

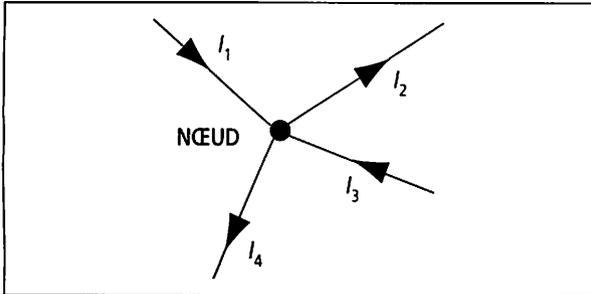


Fig. 1.04 : Exemple de nœud.

La figure 1.05 comporte deux nœuds : **N1** et **N2**.  $I$  est le courant principal,  $I_1$ ,  $I_2$  et  $I_3$  sont les courants dérivés et on peut écrire :

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

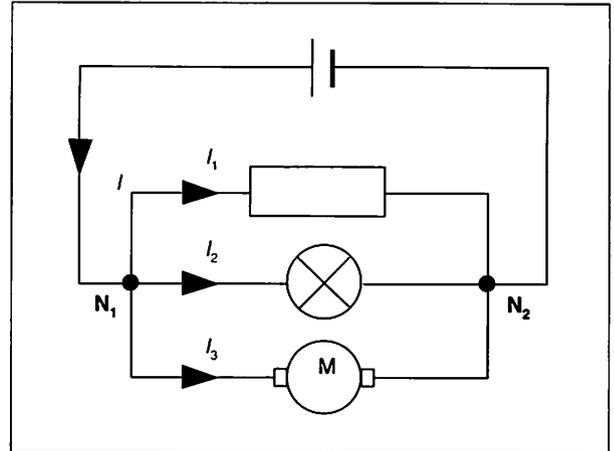


Fig. 1.05 : Loi des nœuds.

## 3 Potentiel – Tension

La circulation du courant électrique entre deux points d'un circuit est due à une différence de potentiel entre ces deux points.

Le potentiel d'un point caractérise son niveau électrique, il s'exprime en VOLTS (V).

La différence de potentiel est aussi appelée tension, elle s'exprime en VOLTS (V).

La tension entre deux points **A** et **B** est notée  $U_{AB}$ .

$$U_{AB} = U_A - U_B \quad \left\{ \begin{array}{l} U_{AB} \text{ en volts} \\ U_A \text{ en volts} \\ U_B \text{ en volts} \end{array} \right.$$

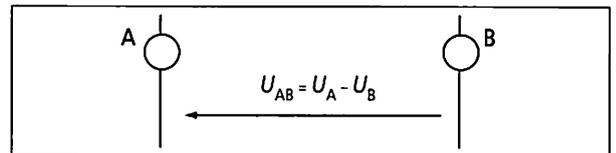


Fig. 1.06 : Représentation de la tension.

$U_A$  est le potentiel du point **A**,  $U_B$  celui du point **B**. La tension est une grandeur algébrique représentée par une flèche (fig. 1.06).

### Remarque :

Le potentiel d'un point n'est pas mesurable, c'est un nombre qui dépend du point choisi comme **potentiel zéro** ou **potentiel de référence**.

Dans la figure 1.07, les potentiels sont les nombres cerclés.

Le potentiel de référence est celui du point **M** :

$$U_{AB} = U_A - U_B = 7 \text{ V}$$

$$U_{AM} = U_A - U_M = 5 \text{ V}$$

$$U_{BM} = U_B - U_M = -2 \text{ V}$$

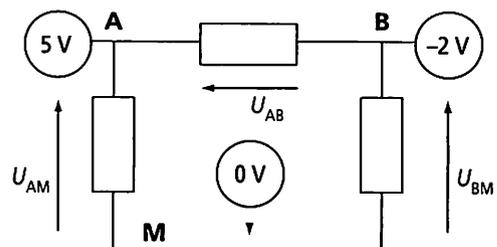


Fig. 1.07 : Calcul de potentiels.

**LOI DES MAILLES :**

Une maille est un circuit fermé.

Dans une maille, la somme algébrique des tensions est nulle.

Dans le montage de la figure 1.08, on peut définir trois mailles : ABCE – CDE – ABDE.

Dans la maille ABCE on peut écrire :

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CE} + U_{EA} = 0$$

Une des tensions de cette maille peut s'écrire :  
même initiale    même finale

$$U_{AE} = U_{AB} + U_{BC} + U_{CE}$$

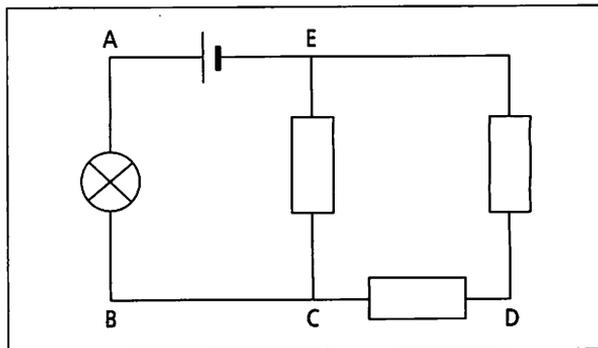


Fig. 1.08 : Exemple de mailles.

**Exemples :**

Dans le montage de la figure 1.09 :

$$U_{AB} = U_{AD} + U_{DC} + U_{CB}$$

Soit

$$U = U_1 + U_2 - U_3$$

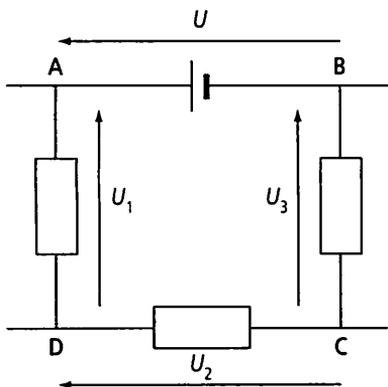


Fig. 1.09 : Calcul de tensions.

Dans le circuit de la figure 1-10 la tension  $U_{BC}$  a pour valeur :

$$U_{BC} = U_{BA} + U_{AC}$$

$$U_{BC} = - 50 + 110 = 60 \text{ V}$$

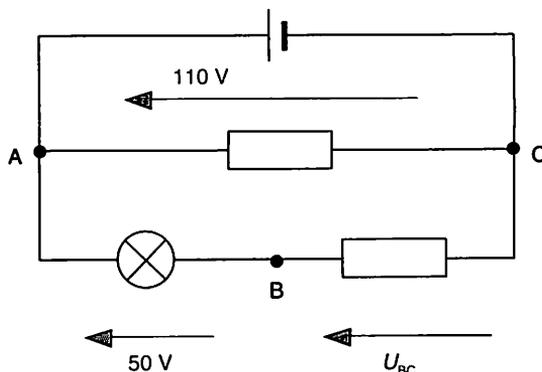


Fig. 1.10 : Application de la loi des mailles.

**La tension se mesure avec un VOLTMÈTRE placé en dérivation sur le circuit.**

Le voltmètre de la fig. 1.11 mesure la tension  $U_{AB}$  aux bornes du dipôle D.

**ORDRES DE GRANDEURS DE TENSIONS**

Les piles usuelles sont formées d'éléments de 1,5 V montés en série : 3 éléments pour une pile de 4,5 V. La tension délivrée par le secteur est de 230 V.

Il y a danger d'électrocution lorsqu'un être humain est soumis à une tension supérieure à 24 V.

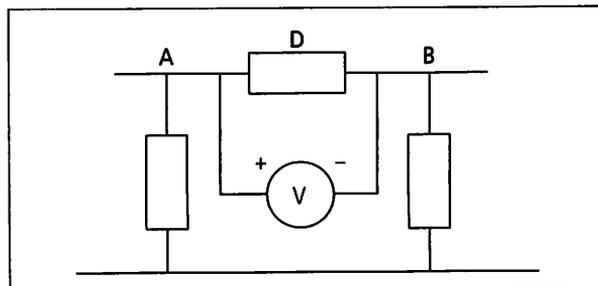


Fig. 1.11 : Utilisation d'un voltmètre.

## 4 Dipôles

Un dipôle est une portion de circuit comprise entre deux bornes (pôles).

Cette portion de circuit peut se réduire à un composant (fig. 1.12).

### • CARACTÉRISTIQUES D'UN DIPÔLE

La caractéristique est la **représentation graphique** de la relation entre le **courant  $I$**  traversant le dipôle et le **tension  $U$**  à ses bornes.

Un dipôle est **passif** si  $U = 0$  lorsque  $I = 0$ , **actif** dans le cas contraire.

Si la caractéristique est une droite, le dipôle est **linéaire**, dans le cas contraire il est **non-linéaire** (fig. 1.13).

Si la caractéristique est symétrique par rapport à l'origine, le dipôle est **symétrique** ou **non polarisé**.

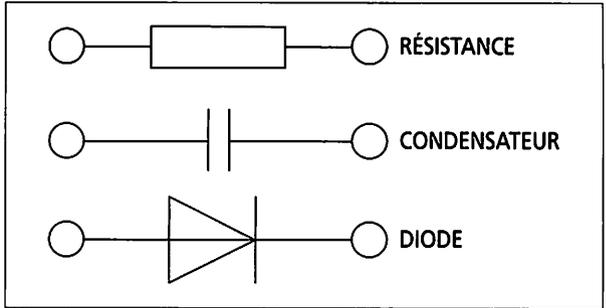


Fig. 1.12 : Composants qui constituent des dipôles.

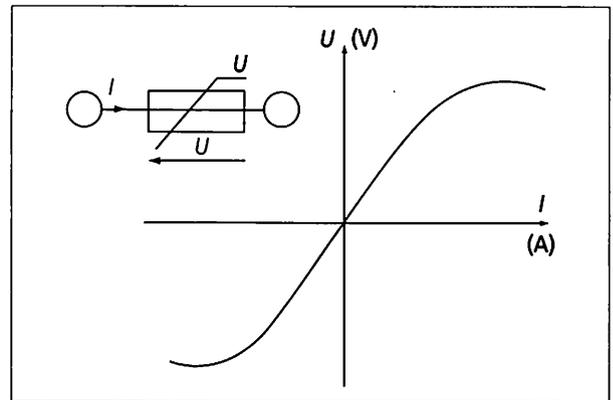


Fig. 1.13 : Symbole et caractéristique d'une résistance non linéaire (varistance).

## 5 Puissance électrique

La puissance électrique mise en jeu entre deux points d'un circuit est égale au produit de la tension entre ces deux points par l'intensité du courant.

$$P = UI \quad \left\{ \begin{array}{l} P \text{ en watts} \\ U \text{ en volts} \\ I \text{ en ampères} \end{array} \right.$$

L'unité de puissance est le **WATT (W)**.

Dans la figure 1.14,  $D_1$  est **générateur** : il fournit de la puissance à une portion de circuit.  $D_2$  est **récepteur** : il absorbe la puissance.

La puissance se mesure avec un **WATTMÈTRE**.

La figure 1.15 représente le schéma de branchement des quatre bornes de l'appareil :

- les bornes 1 et 2 correspondent au circuit d'intensité,
- les bornes 3 et 4 correspondent au circuit de tension.

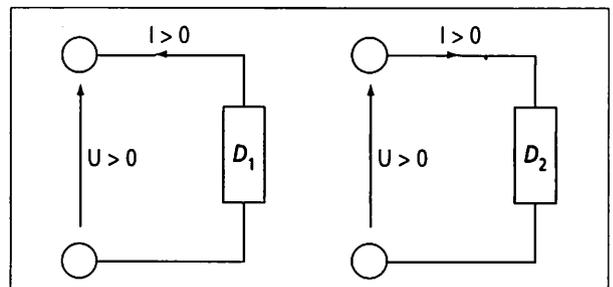


Fig. 1.14 : Dipôles générateur et récepteur.

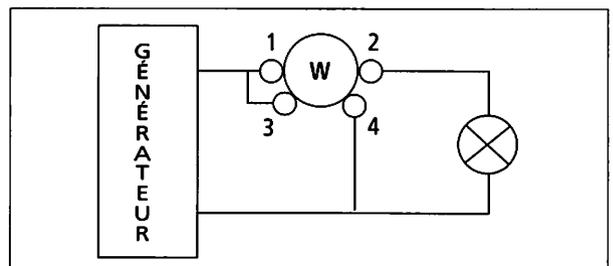


Fig. 1.15 : Utilisation du wattmètre.

## 6 Énergie électrique

L'énergie électrique absorbée par un circuit est égale au produit de la puissance consommée par le temps de fonctionnement.

$$W = Pt \quad \left\{ \begin{array}{l} W \text{ en joules,} \\ P \text{ en watts,} \\ t \text{ en secondes.} \end{array} \right.$$

L'unité d'énergie est le **JOULE (J)**.

Une autre unité d'énergie, fréquemment utilisée en électricité, est le **watt-heure (Wh)** et son multiple le **kilowatt-heure (kWh)**.

$$1 \text{ Wh} = 3\,600 \text{ J} \quad 1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$$

**Exemple :**

Un radiateur électrique dont la puissance absorbée est de 1 500 W et la durée de fonctionnement 3 h absorbe une énergie égale à :

$$W = Pt = 4\,500 \text{ Wh}$$

Soit :  $W = 4,5 \text{ kWh}$  ou  $16,2 \times 10^6 \text{ J}$ .

## 7 Rendement

Tout récepteur électrique ou machine, absorbe de l'énergie électrique et la restitue sous d'autres formes. Ainsi un moteur électrique transforme l'énergie électrique qu'il absorbe en énergie mécanique.

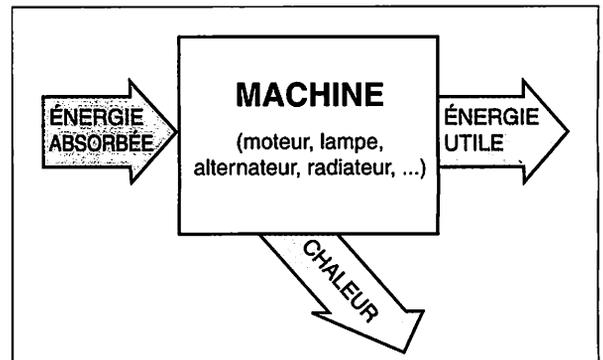
Toute transformation d'énergie s'accompagne toujours d'un dégagement de chaleur.

Lors de cette transformation, l'énergie est entièrement conservée en quantité :

**Énergie absorbée = Énergie utile + Chaleur**  
soit :

$$W_a = W_u + \text{pertes}$$

Dans la plupart des cas, en effet, l'énergie dissipée sous forme de chaleur correspond à des pertes.



Le rendement d'un récepteur est égal :

= au rapport entre la quantité d'énergie utile qu'il produit et la quantité d'énergie qu'il absorbe  
= ou au rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée.

$$\eta = \frac{W_u}{W_a} \quad \begin{array}{l} W_u \text{ énergie utile,} \\ W_a \text{ énergie absorbée.} \end{array}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad \begin{array}{l} P_u \text{ puissance utile,} \\ P_a \text{ puissance absorbée.} \end{array}$$

Noté  $\eta$  (lettre grecque êta), le rendement est un nombre sans unité **toujours inférieur ou égal à 1**. Il peut être exprimé par un **pourcentage**.

**Exemple :**

Le générateur d'une centrale électrique de puissance utile 125 MW absorbe une puissance mécanique de 130 MW. Son rendement est égal à :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = 0,96 \text{ ou } 96 \%$$

En une journée de fonctionnement, soit 24 h, l'énergie dissipée en chaleur est égale à :

$$W = Pt \text{ avec } P = P_a - P_u = 5 \text{ MW}$$

soit  $W = 120 \text{ MWh} = 4,32 \times 10^{11} \text{ J}$ .

# ESSENTIEL À RETENIR

## INTENSITÉ DU COURANT ÉLECTRIQUE

L'intensité du courant électrique est le quotient de la quantité électrique  $Q$  par la durée  $t$  du passage du courant.

$$I = \frac{Q}{t}$$

$I$  en ampères,  
 $Q$  en coulombs,  
 $t$  en secondes.

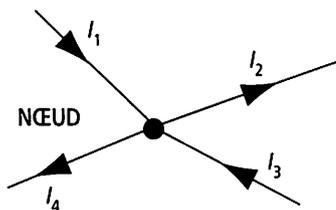
## DIFFÉRENCE DE POTENTIEL – TENSION

Cette différence de potentiel entre deux points A et B ou tension est notée  $U_{AB} = U_A - U_B$ .

La tension s'exprime en **volts (V)**.

## LOI DES NŒUDS

La somme des courants qui arrivent à un nœud est égale à la somme des courants qui en repartent.



$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4$$

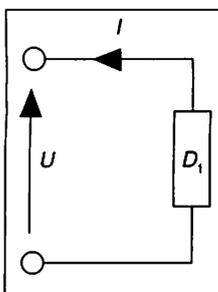
## ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

L'énergie électrique absorbée par un circuit est égale au produit de la puissance consommée par le temps de fonctionnement.

$$W = Pt$$

$W$  en joules,  
 $P$  en watts,  
 $t$  en secondes.

## DIPÔLE GÉNÉRATEUR

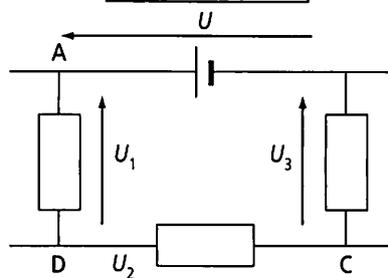


Un dipôle générateur fournit de la puissance.

## LOI DES MAILLES

Dans une maille, la somme algébrique des tensions est nulle.

$$U - U_1 - U_2 + U_3 = 0$$



## PUISSANCE ÉLECTRIQUE

La puissance électrique mise en jeu entre deux points d'un circuit est égale au produit de la tension entre ces deux points par l'intensité du courant.

$$P = UI$$

$P$  en watts,  
 $U$  en volts,  
 $I$  en ampères.

## RENDEMENT

Le rendement d'un récepteur est égal :  
– au rapport entre la quantité d'énergie utile qu'il produit et la quantité d'énergie qu'il absorbe.

$$\eta = \frac{W_u}{W_a}$$

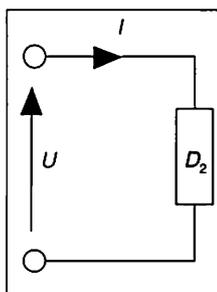
– au rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

$W_u$  et  $W_a$  en joules,

$P_u$  et  $P_a$  en watts.

## DIPÔLE RÉCEPTEUR



Un dipôle récepteur absorbe de la puissance.

## TEST RAPIDE

**T.1** Entre deux points d'un circuit parcouru par un courant de 500 mA, on branche en série deux ampèremètres identiques. Quelle valeur lit-on sur chaque appareil ?

**Réponse :** 250 mA ; 500 mA ; 1 A.

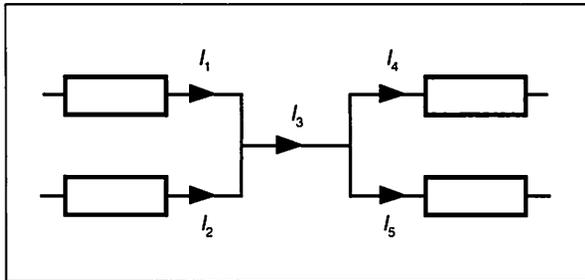
**T.2** Même question que l'exercice T.1 lorsque les deux ampèremètres sont en parallèle l'un sur l'autre.

**Réponse :** 250 mA ; 500 mA ; 1 A.

**T.3** Dans la portion de circuit représentée ci-dessous, on mesure :

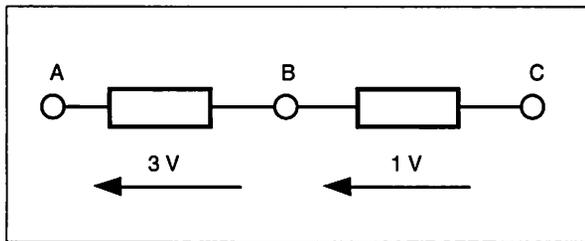
$$I_1 = 0,1 \text{ A} ; I_2 = 800 \text{ mA} ; I_4 = 0,5 \text{ A}.$$

Calculer  $I_3$ .



**Réponse :** 400 mA ; 1,4 A ; 0,5 A.

**T.4** Dans la portion de circuit représentée ci-dessous, le potentiel du point B est nul. Déterminer les potentiels de A et C.

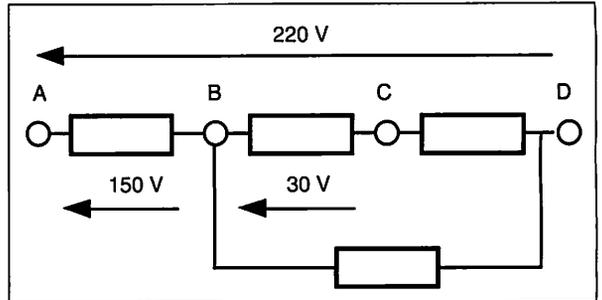


**Réponse :** 3 V ; - 3 V ; 4 V ; - 1 V.

**T.5** Une lampe de 100 W fonctionne pendant 5 heures, calculer l'énergie absorbée.

**Réponse :** 5 kWh ; 500 Wh ;  $1,8 \times 10^6 \text{ J}$ .

**T.6** Dans le montage de la figure ci-dessous, déterminer les tensions  $U_{BD}$  et  $U_{CD}$ .



**Réponse :** 70 V ; 150 V ; 40 V ; 30 V.

**T.7** Une lampe absorbe une puissance de 60 W lorsqu'elle est alimentée en 230 V. Calculer le courant consommé.

**Réponse :** 3,7 A ; 0,27 A ; 1 A.

**T.8** Un moteur de 3 kW de puissance utile a un rendement de 80 %.

Calculer la puissance qu'il absorbe.

**Réponse :** 3 000 W ; 2 400 W ; 3 750 W.

**T.9** Un alternateur de puissance utile 10 kW a un rendement de 0,9.

Calculer la puissance perdue en chaleur.

**Réponse :** 1 kW ; 9 kW ; 100 kW.

**T.10** Un moteur à courant continu de puissance utile 1 kW consomme 5 A sous 220 V.

Calculer son rendement.

**Réponse :** 0,9 ; 1 ; 1,1.

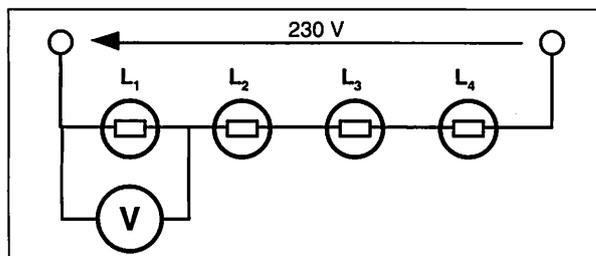
# EXPÉRIMENTATION

## MESURE DE TENSION

### ■ TRAVAIL À RÉALISER

Mesurer la tension aux bornes de chaque lampe ainsi que la tension d'alimentation. Vérifier la loi des mailles.

### ■ SCHÉMA DU MONTAGE



Le dispositif de mesure est constitué par les éléments suivants :

- une alimentation en courant alternatif fixe (secteur),
- quatre lampes 230 V de puissances différentes,
- un voltmètre à aiguille.

### ■ EXEMPLE DE RÉSULTATS

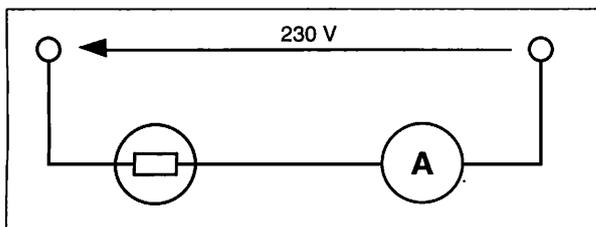
Puissance des lampes (W)		L1:40	L2:60	L3:75	L4:100
Voltmètre	Calibre (V)	300	100	30	30
	Lecture/Échelle	13/30	49/100	28/30	20/30
	Tension (U)	130	49	28	20

## MESURE D'INTENSITÉ

### ■ TRAVAIL À RÉALISER

- Exécuter le montage ci-dessous avec des lampes de différentes puissances.
- Prévoir le calibre de l'ampèremètre en calculant l'intensité devant être consommée d'après les caractéristiques de chaque lampe.
- Mesurer l'intensité parcourant la lampe.
- Vérifier, en changeant la position de l'ampèremètre dans le circuit, que l'intensité ne varie pas.

### ■ SCHÉMA DU MONTAGE



Le dispositif de mesure est constitué par les éléments suivants :

- une alimentation en courant alternatif fixe (secteur),
- quatre lampes 230 V de puissances différentes à introduire successivement dans le montage,
- un ampèremètre à aiguille.

### ■ EXEMPLE DE RÉSULTATS

Puissance des lampes (W)		L1:40	L2:60	L3:75	L4:100
Intensité prévue (A)		0,18	0,27	0,34	0,45
Ampèremètre	Calibre (A)	0,3	0,3	1	1
	Lecture/Échelle	17/30	25/30	31/100	42/100
	intensité (A)	0,17	0,25	0,31	0,42

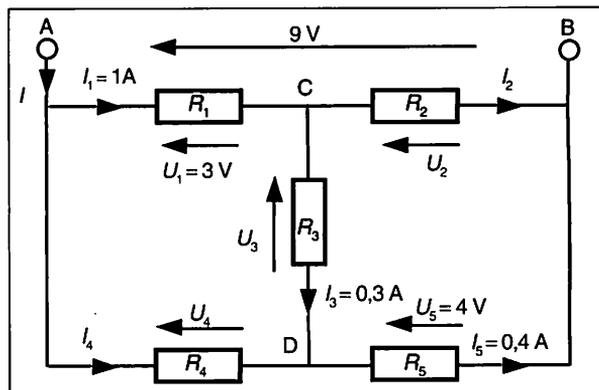
# APPLICATIONS

## EXERCICES RÉSOLUS

### Énoncé 1

Dans le montage de la figure ci-contre :

- déterminer la valeur des tensions et intensités manquantes,
- calculer la puissance absorbée par chacune des résistances.



Méthode :

a. – Repérer, pour la grandeur tension, chacune des extrémités du vecteur qui la représente et écrire une relation équivalente.

– Pour la grandeur intensité, appliquer la loi des nœuds.

b. La puissance absorbée par chaque résistance est égale au produit de l'intensité du courant qui la traverse par la ddp existant entre ses bornes.

Solution proposée :

a. – **Tensions :**

$$U_2 = U_{CB} = U_{AB} - U_{AC} = 6 \text{ V.}$$

$$U_3 = U_{CD} = U_{CA} + U_{AB} + U_{BD} = 2 \text{ V.}$$

$$U_4 = U_{AD} = U_{AB} + U_{BD} = 5 \text{ V.}$$

– **Courants :**

$$I_2 = I_1 - I_3 = 0,7 \text{ A.}$$

$$I_4 = I_5 - I_3 = 0,1 \text{ A.}$$

$$I = I_1 + I_4 = 1,1 \text{ A.}$$

b. **Puissances absorbées :**

par  $R_1$  : 3 W ; par  $R_2$  : 4,2 W ; par  $R_3$  : 0,6 W ; par  $R_4$  : 0,5 W ; par  $R_5$  : 1,6 W.

Remarque :

Pour éviter tout risque d'erreur, il faut être très attentif à l'orientation des vecteurs tensions et des vecteurs courants.

### Énoncé 2

Une batterie d'accumulateurs de 12 V a une charge de 60 Ah (1 Ah = 3 600 C). Elle alimente deux lampes 12 V, 45 W montées en parallèle. Calculer :

- l'intensité du courant consommé par chacune des lampes,
- la durée au bout de laquelle la batterie sera complètement déchargée.

Méthode :

a. Appliquer la relation reliant les grandeurs tension ( $U$ ), courant ( $I$ ) et puissance ( $P$ ).

b. Exploiter la relation qui définit l'intensité du courant électrique.

Solution proposée :

a. **Intensité du courant consommé par les lampes :**

$$I = \frac{P}{U} \text{ soit } I = 3,75 \text{ A pour une lampe}$$

et donc le double, 7,50 A, pour les deux.

b. **Temps de décharge :**

$$t = \frac{Q}{I} \text{ avec } Q = 60 \times 3\,600 = 216\,000 \text{ C}$$

$$\text{d'où } t = 28\,800 \text{ s ou } 8 \text{ h.}$$

Remarque :

Ne pas perdre de vue que dans le système international d'unités le temps est exprimé en secondes.

## Énoncé 3

Une lampe alimentée sous 230 V consomme 300 Wh en 5 h de fonctionnement.  
Calculer : la puissance de la lampe et l'intensité du courant consommé.

### Méthode :

Appliquer les relations de définition de l'énergie et de la puissance.

### Solution proposée :

– Puissance de la lampe :

$$P = \frac{W}{t} \text{ soit } P = 60 \text{ W.}$$

– Intensité du courant consommé :

$$I = \frac{P}{U} \text{ soit } I = 0,26 \text{ A.}$$

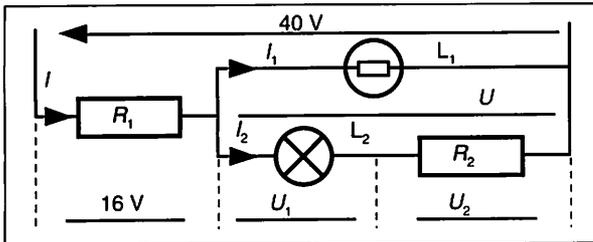
### Remarque :

Ne pas confondre puissance (qui s'exprime en W) et énergie (qui s'exprime en Wh). C'est l'énergie qui est facturée par EDF!

## EXERCICES À RÉSOUDRE

**E. 1** Sur le circuit ci-dessous :

- Compléter les vecteurs tensions.
- Calculer  $U$ .
- La lampe  $L_1$  absorbe une puissance de 6 W, calculer  $I_1$ .
- $I_2 = 50 \text{ mA}$ , la lampe  $L_2$  absorbe une puissance de 0,6 W, calculer  $U_1$  et  $U_2$ .
- Calculer  $I$ .
- Déterminer les puissances absorbées par chacune des deux résistances.



**E. 2** Pour mesurer l'intensité du courant consommé par une lampe 230 V-75 W, choisir le calibre de l'ampèremètre parmi ceux indiqués ci-après :

3 A ; 1 A ; 0,3 A ; 0,1 A.

**E. 3** Un alternateur fournit une énergie de 200 kWh en 4 h de fonctionnement.

- Calculer la puissance fournie.
- Déterminer la puissance absorbée par l'alternateur si son rendement est de 80 %.

**E. 4** Le relevé de la caractéristique d'une lampe donne les mesures suivantes :

$U \text{ (V)}$	0	50	100	150	200
$I \text{ (A)}$	0	0,20	0,32	0,40	0,43

- Représenter graphiquement  $U$  en fonction de  $I$ .
- La lampe est-elle :
  - un dipôle linéaire ou non ?
  - actif ou passif ?

**E. 5** Un moteur à courant continu absorbe 10 A sous 230 V.

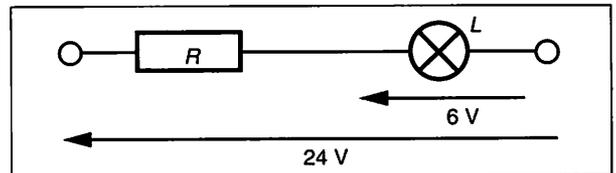
Son rendement est de 85 %. Calculer :

- la puissance absorbée,
- la puissance utile.

**E. 6** Deux lampes 230 V-40 W et 230 V-60 W sont montées en parallèle et alimentées sous leur tension nominale.

Tracer le schéma du montage et déterminer l'intensité du courant dans chaque lampe.

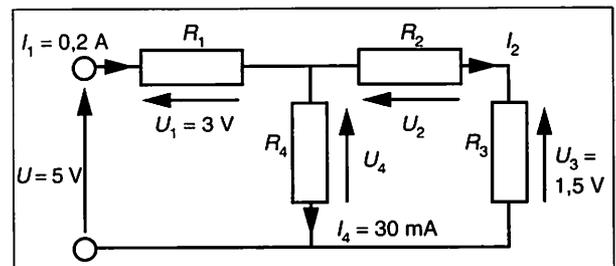
**E. 7** Dans le montage ci-dessous, la lampe absorbe une puissance de 1,2 W sous une tension de 6 V. La tension d'alimentation du montage est de 24 V.



Déterminer la tension aux bornes de la résistance  $R$  et la puissance qu'elle absorbe.

**E. 8** Dans le montage ci-dessous on demande :

- de déterminer les valeurs des tensions et intensités manquantes,
- d'en déduire la puissance absorbée par chaque résistance.



**E. 9** Un radiateur électrique alimenté sous une tension de 230 V absorbe une puissance de 2500 W. Calculer :

- l'intensité consommée,
- l'énergie absorbée en 2 h 30 min de fonctionnement.

# 2 Résistance électrique. Lois d'Ohm et de Joule

## ÉLECTROTECHNIQUE

### 1 Loi d'OHM

Une résistance électrique est un dipôle passif linéaire et symétrique (fig. 2.01).  
La tension  $U$  aux bornes d'une résistance est proportionnelle à l'intensité  $I$  du courant qui la traverse.

Le coefficient de proportionnalité est la valeur de la résistance notée  $R$  et exprimée en **OHMS** ( $\Omega$ ).

$$U = RI \quad \left\{ \begin{array}{l} U \text{ en volts} \\ I \text{ en ampères} \\ R \text{ en ohms} \end{array} \right.$$

Cette relation est l'expression de la **LOI D'OHM**.  
Les multiples usuels de l'ohm sont :

- le kilo-ohm :  $1 \text{ k}\Omega = 10^3 \Omega$
- le mégohm :  $1 \text{ M}\Omega = 10^6 \Omega$

#### Remarque :

La relation traduisant la loi d'ohm peut aussi s'écrire :

$$I = GU \quad \text{avec} \quad G = \frac{1}{R}$$

$G$  est la **conductance**, elle est exprimée en **SIEMENS** (S).

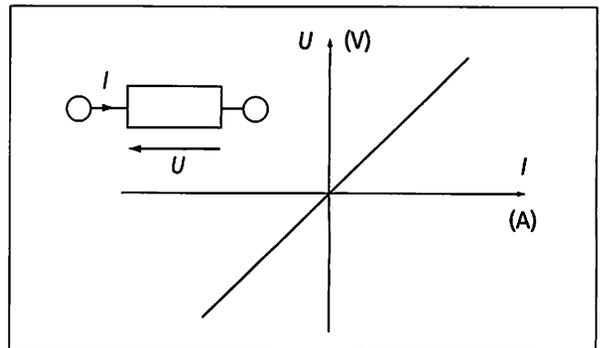


Fig. 2.01 : Caractéristique d'une résistance.

### 2 Puissance dissipée en chaleur

La puissance électrique absorbée par une résistance est intégralement dissipée en chaleur, c'est l'**EFFET JOULE**.

La puissance absorbée par un dipôle est égale à :

$$P = UI \quad \left\{ \begin{array}{l} P \text{ en watts,} \\ U \text{ en volts,} \\ I \text{ en ampères.} \end{array} \right.$$

La tension aux bornes de la résistance est égale à :

$$U = RI$$

La puissance dissipée par une résistance est donc donnée par la relation :

$$P = RI^2 = \frac{U^2}{R} \quad \left\{ \begin{array}{l} P \text{ en watts,} \\ R \text{ en ohms,} \\ U \text{ en volts,} \\ I \text{ en ampères.} \end{array} \right.$$

Cette expression de la puissance est appelée **LOI DE JOULE**.

#### Exemples d'application :

La figure ci-dessous représente quelques modèles de résistances mettant en œuvre l'effet Joule (d'après CETAL).

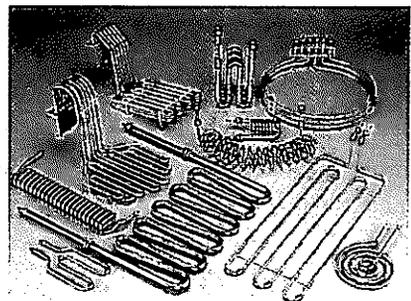


Fig. 2.02

• **LIMITES D'UTILISATION D'UNE RÉSISTANCE**

La valeur de la résistance  $R$  étant connue ainsi que la puissance maximale  $P_{MAX}$  qu'elle peut dissiper, on peut déterminer :

- le courant maximal qui peut la traverser :

$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{P_{MAX}}{R}}$$

- la tension maximale qu'on peut lui appliquer :

$$U_{MAX} = \sqrt{P_{MAX} \cdot R}$$

**Exemple :**

Pour une résistance de  $1\text{ k}\Omega$ ;  $0,5\text{ W}$

$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{0,5}{1000}} = 22\text{ mA}$$

$$U_{MAX} = \sqrt{0,5 \cdot 1000} = 22\text{ V}$$

### 3 Groupement de résistances en série

Dans le montage de la figure 2.03, trois résistances sont montées en série. Elles sont traversées par le même courant  $I$ .

D'après la loi des mailles :

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = R_1 I + R_2 I + R_3 I$$

$$\text{soit } U = (R_1 + R_2 + R_3) I$$

Le dipôle équivalent à cet ensemble est une résistance  $R_{eq}$  de valeur :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

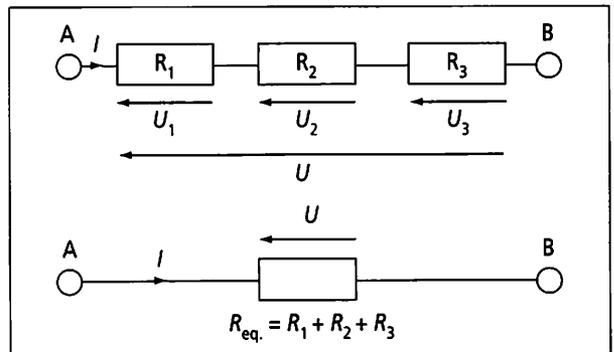


Fig. 2.03 : Groupement de trois résistances en série.

**En conclusion, pour le groupement de résistances en série :**

- le dipôle équivalent est une résistance dont la valeur est la somme des valeurs des résistances du groupement.
- l'intensité  $I$  étant la même, la tension aux bornes de chaque résistance est proportionnelle à la valeur de la résistance.

### 4 Groupement de résistances en parallèle

Dans le montage de la figure 2.04 trois résistances sont montées en parallèle. Elles sont alimentées par la même tension  $U$ .

D'après la loi des nœuds :

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

$$\text{soit } I = U \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

Le dipôle équivalent à l'ensemble est une résistance  $R_{eq}$  de valeur telle que :

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

En utilisant les conductances, cette relation s'écrit :

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

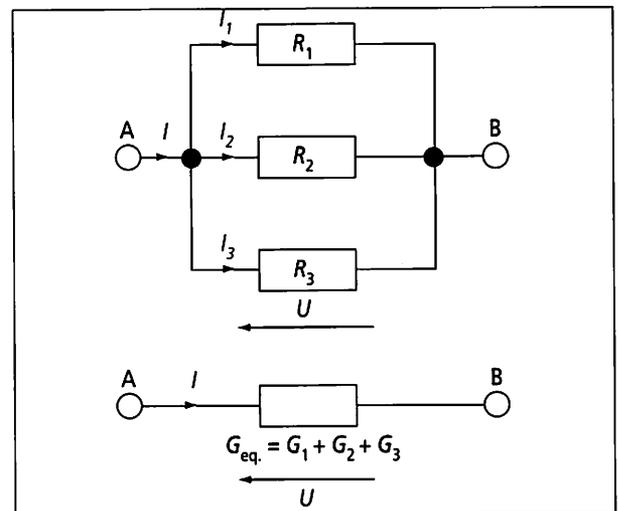


Fig. 2.04 : Groupement de trois résistances en parallèle.

**En conclusion, pour le groupement de résistance en parallèle, le dipôle équivalent a une conductance égale à la somme des conductances.**

## 5 Résistance d'un conducteur filiforme

Un conducteur est filiforme lorsque sa section droite est constante.

La résistance d'un tel conducteur homogène est :

- proportionnelle à sa longueur  $\ell$ ,
- inversement proportionnelle à sa section  $S$ ,
- fonction de la nature du matériau.

La résistance se calcule par la relation :

$$R = \rho \frac{\ell}{S}$$

$\left\{ \begin{array}{l} R \text{ en ohms} \\ \ell \text{ en mètres} \\ S \text{ en mètres carrés} \\ \rho \text{ en ohms-mètres} \end{array} \right.$

$\rho$  (lettre grecque rhô) est un coefficient qui dépend du matériau utilisé (fig. 2.05), on l'appelle **résistivité** de ce matériau.

La **résistivité s'exprime en OHM-MÈTRE ( $\Omega \cdot m$ )**.

MÉTAUX	RÉSISTIVITÉ
ARGENT	$1,5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
CUIVRE	$1,6 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
ALUMINIUM	$2,6 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
FER	$8,5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

Fig. 2.05 : Résistivité à 20° C.

**Exemple :**

Un conducteur de 100 m de longueur est réalisé en fil de cuivre de 5 mm<sup>2</sup> de section. Sa résistance est égale à :

$$R = \rho \frac{\ell}{S} = \frac{1,6 \cdot 10^{-8} \times 100}{5 \cdot 10^{-6}} = 0,32 \Omega.$$

Si ce conducteur était réalisé en fer ( $\rho = 8,5 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ ) sa résistance serait égale à  $R = 1,7 \Omega$  soit plus de cinq fois plus grande.

**Remarque :**

Un matériau peut aussi être caractérisé par sa **conductivité  $\gamma$**  (lettre grecque gamma).

La conductivité est l'inverse de la résistivité.

## 6 Variation de la résistance avec la température

La résistance d'un conducteur métallique augmente proportionnellement à sa température.

La résistance d'un conducteur dont la température est  $\theta$  (lettre grecque thêta) est donnée par la relation (fig. 2.06) :

$$R_{\theta} = R_0 (1 + a_0 \theta)$$

$\left\{ \begin{array}{l} R_0, R_{\theta} \text{ en ohms} \\ \theta \text{ en degré celsius} \\ a_0 \text{ en } (^{\circ}C)^{-1} \end{array} \right.$

Le coefficient de température dépend du métal utilisé. Il est plus faible pour les alliages que pour les métaux purs (fig. 2.07).

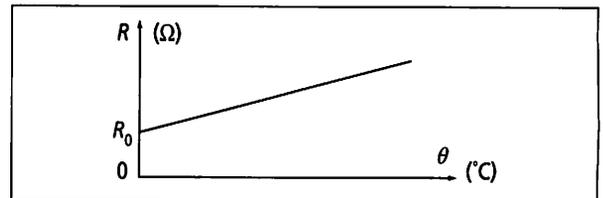


Fig. 2.06 : Variation de la résistance en fonction de la température du métal.

MATÉRIAU	CUIVRE	ALUMINIUM	FERRONICKEL	CONSTANTAN
$a_0 (^{\circ}C)^{-1}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$0,9 \cdot 10^{-3}$	$0,01 \cdot 10^{-3}$

Fig. 2.07 : Coefficients de température.

La résistance des conducteurs non métalliques (carbone, semi-conducteurs) diminue lorsque la température augmente (fig. 2.08).

**Remarque :**

Certains composants ont une résistance qui dépend fortement d'une grandeur physique extérieure.

C'est le cas de :

- la thermistance, fonction de la température;
- la photorésistance, fonction de l'éclairement;
- la varistance, fonction de la tension à ses bornes.

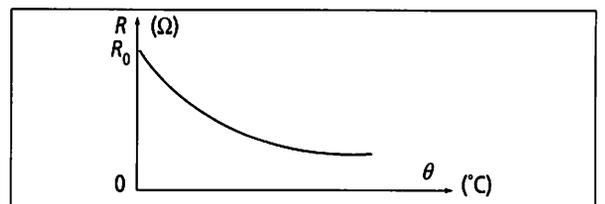


Fig. 2.08 : Variation de la résistance en fonction de la température d'un semi-conducteur.

## 7 Montage diviseur de tension

Le montage est constitué de **deux résistances en série** (fig. 2.09).

Le courant  $I$  qui traverse les deux résistances est égal à :

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{U_2}{R_2}$$

d'où :  $U_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2}$

La tension  $U_2$  est proportionnelle à  $U$ .

### Exemple :

Un voltmètre analogique est constitué par un milli-ampèremètre de calibre 0,1 mA et de résistance  $r$  égale à 1 000  $\Omega$  en série avec une résistance  $R$  selon le schéma de la figure 2.10.

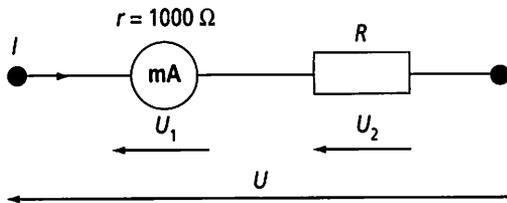


Fig. 2.10 : Résistance additionnelle de voltmètre.

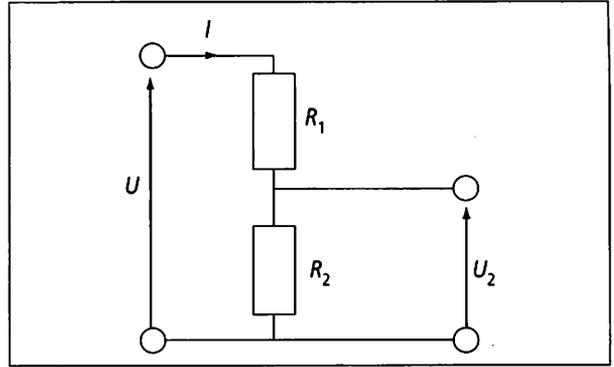


Fig. 2.09 : Montage diviseur de tension.

Le voltmètre ainsi constitué doit permettre de mesurer une tension maximale  $U$  de 3 V. La valeur maximale de la tension  $U_1$  est égale à :

$$U_1 = rI = 1\,000 \times 0,1 \times 10^{-3} \text{ soit } U_1 = 0,1 \text{ V}$$

La tension  $U_2$  doit alors être égale à :

$$U_2 = U - U_1 \text{ soit } U_2 = 2,9 \text{ V}$$

La résistance  $R$  doit avoir pour valeur :

$$R = \frac{U_2}{I} = \frac{2,9}{0,1 \times 10^{-3}} \text{ soit } R = 29\,000 \Omega$$

Un tel voltmètre présente une résistance totale de 30 000  $\Omega$  pour un calibre 3 V soit une résistance spécifique de 10 k $\Omega$ /V.

## 8 Montage potentiométrique

Un potentiomètre est une résistance variable possédant trois bornes :

- deux correspondent aux extrémités du corps de la résistance,
- une correspond au curseur qui frotte sur le corps.

La figure 2.11 schématise le montage potentiométrique.

En faisant varier la position du curseur, on obtient une tension de sortie :

- Nulle lorsque le curseur est en B.
- Égale à  $U$  lorsque le curseur est en A.
- Comprise entre 0 et  $U$  lorsque le curseur est dans une position intermédiaire.

**Le montage potentiométrique est un diviseur de tension dont le coefficient est variable.**

### Remarque :

Les caractéristiques d'un potentiomètre sont :

- la valeur de sa résistance,
- la puissance,
- la loi de variation.

La loi de variation est la relation entre la course du curseur et la valeur de la résistance entre A et C.

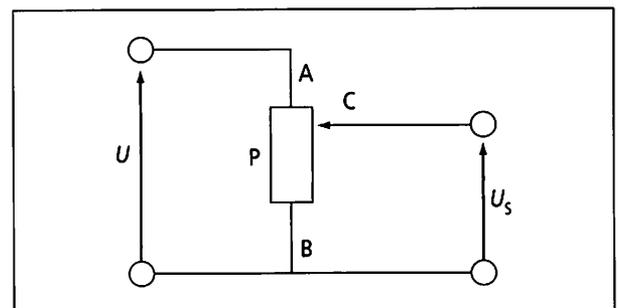


Fig. 2.11 : Montage potentiométrique.

Elle est indiquée par une lettre sur le composant :

- linéaire : A
- logarithmique droite : B
- logarithmique inverse C
- en S : S

## 9 Montage diviseur de courant

Le montage est constitué de deux résistances en parallèle (fig. 2.12).

$$\text{On pose : } G_1 = \frac{1}{R_1}; G_2 = \frac{1}{R_2}$$

La tension aux bornes des deux résistances est égale à :

$$U = \frac{I}{G_1 + G_2} = \frac{I_2}{R_2}$$

$$\text{d'où : } I_2 = \frac{G_2}{G_1 + G_2} I$$

$I_2$  est proportionnel à  $I$ .

**Exemple :**

Un ampèremètre analogique de calibre 1A est équivalent à une résistance de  $0,5 \Omega$  ( $R_2$ ). On le place en parallèle avec une résistance de  $0,125 \Omega$  ( $R_1$ ) (fig. 2.13).

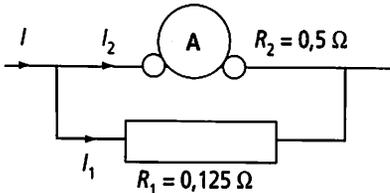


Fig. 2.13 : Shunt d'ampèremètre.

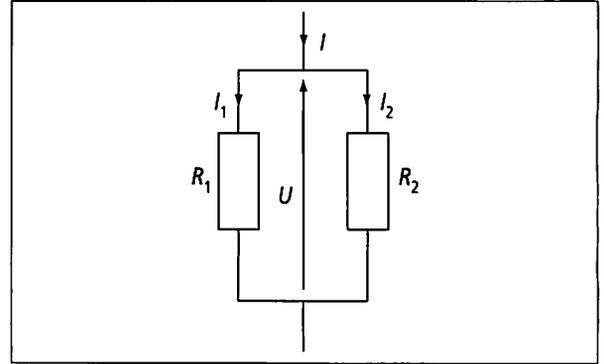


Fig. 2.12 : Montage diviseur de courant.

Le courant circulant dans l'ampèremètre se calcule de la manière suivante :

$$I_2 = \frac{G_2}{G_1 + G_2} I = \frac{2}{2 + 8} I = 0,2 I$$

Le courant dans l'ampèremètre est donc égal au cinquième du courant total. L'ensemble peut être utilisé pour mesurer des courants jusqu'à 5 A.

La résistance  $R_1$  est appelée **SHUNT D'AMPÈREMÈTRE**.

## ESSENTIEL À RETENIR

### LOI D'OHM

La différence de potentiel aux bornes d'un dipôle passif linéaire (ou résistance pure) est égale au produit de sa résistance par l'intensité du courant qui le parcourt.

$$U = RI$$

$U$  en volts,  
 $R$  en ohms,  
 $I$  en ampères.

### PUISSANCE DISSIPÉE EN CHALEUR

$$P = RI^2$$

$P$  en watts,  
 $R$  en ohms,  
 $I$  en ampères.

$$P = \frac{U^2}{R}$$

$P$  en watts,  
 $U$  en volts,  
 $R$  en ohms.

### GROUPEMENTS DE RÉSISTANCES

#### GROUPEMENT SÉRIE

Le dipôle équivalent est une résistance dont la valeur est la somme des résistances du groupement.

$$R_{eq.} = R_1 + R_2 + \dots R_n$$

#### GROUPEMENT PARALLÈLE

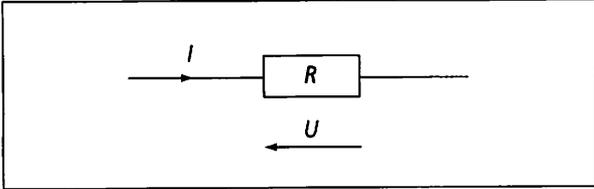
Le dipôle équivalent a une conductance dont la valeur est la somme des conductances du groupement.

$$G_{eq.} = G_1 + G_2 \dots G_n = \frac{1}{R_{eq.}} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \dots \frac{1}{R_n} \right)$$

La conductance est l'inverse de la résistance, elle est notée  $G$  et s'exprime en **SIEMENS (S)**.

## TEST RAPIDE

**T.1** Dans le montage ci-dessous :  $R = 50 \Omega$  et  $U = 100 \text{ V}$ .  
Calculer l'intensité  $I$ .

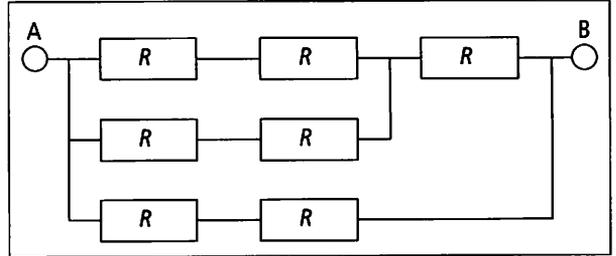


Réponse : 0,5 A ; 2 A ; 1 A.

**T.2** Une résistance de  $100 \Omega$  est soumise à une tension de 50 V.  
Quelle puissance dissipe-t-elle ?

Réponse : 25 W ; 2 W ; 0,5 W.

**T.3** Dans le montage ci-dessous toutes les résistances ont la même valeur  $R$ .  
Déterminer la résistance équivalente du dipôle AB.



Réponse :  $2R$  ;  $R$  ;  $R/2$ .

**T.4** Quelle tension maximale peut supporter une résistance de  $100 \Omega$  ; 0,5 W ?

Réponse : 50 V ; 7 V ; 5V.

## EXPÉRIMENTATION

### MESURE DE RÉSISTANCE

#### 1 Méthode voltampéremétrique

##### ■ PRINCIPE

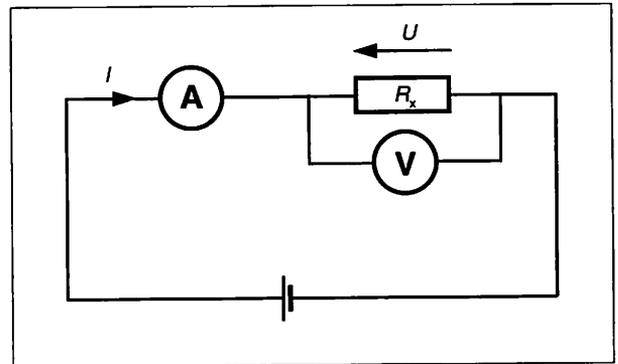
La méthode est une **application directe de la Loi d'Ohm**.

Elle consiste à mesurer simultanément, en courant continu, la **tension  $U$**  aux bornes de la résistance et l'**intensité  $I$**  du courant qui la traverse.

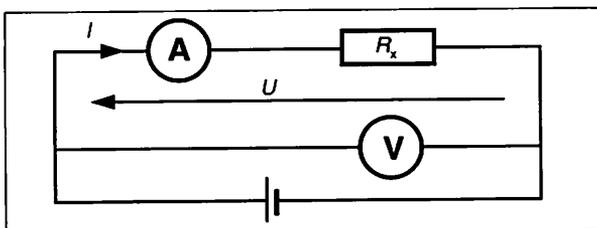
La valeur de la résistance est donnée par la relation :

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

La mesure nécessite un voltmètre et un ampèremètre branchés soit en courte, soit en longue dérivation (cf. figures). Avec des appareils de mesure parfaits, les deux montages sont équivalents.



Montage courte dérivation.



Montage longue dérivation.

##### ■ CHOIX DU MONTAGE

Le montage **courte dérivation** est à utiliser lorsque le voltmètre a une résistance d'entrée **grande devant la résistance** à mesurer.

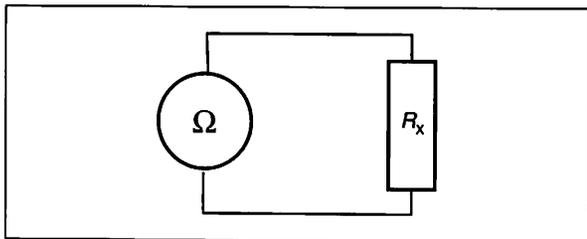
Le montage **longue dérivation** peut être utilisé si la **résistance interne de l'ampèremètre est négligeable devant la résistance** à mesurer.

## 2 Mesure à l'ohmmètre

### ■ PRINCIPE

Cette méthode qui ne nécessite qu'un seul appareil de mesure (figure ci-dessous) ne peut être utilisée que lorsque la valeur de la résistance est indépendante de l'intensité qui la traverse.

La plupart des multimètres possèdent la fonction ohmmètre. Avec les appareils numériques, la précision est excellente, de 0,2 à 0,05 %.



Mesure de résistance à l'ohmmètre.

## 3 Mesure au pont de Wheatstone

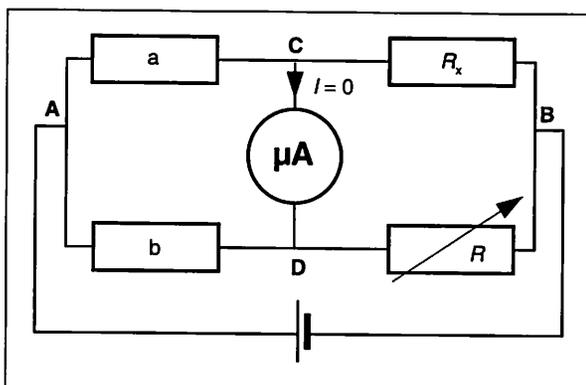
### ■ PRINCIPE

Le pont de la figure qui suit est équilibré lorsque le courant passant dans le microampèremètre est nul, on a alors  $U_{CD} = 0$ .

Cette condition est réalisée lorsque :  $R_x = \frac{a}{b} R$

Le rapport  $a/b$ , appelé tête de pont, étant fixé, la mesure consiste à faire varier  $R$  jusqu'à l'équilibre du pont.

Les résistances  $a$ ,  $b$ ,  $R$  étant connues, il est alors possible de déterminer  $R_x$ .



Mesure au pont de Wheatstone.

## 4 Exemple d'application

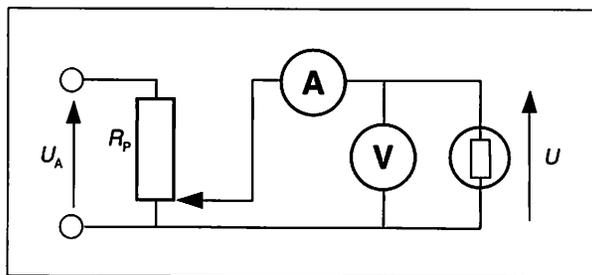
### ■ TRAVAIL À EXÉCUTER

Alimenter une lampe 100 W-230 V à partir d'un montage potentiométrique. Relever l'intensité consommée  $I$  en fonction de la tension  $U$  aux bornes de la lampe. Calculer pour chaque mesure la valeur de la résistance de la lampe.

Représenter graphiquement  $R = f(U)$ .

### ■ RÉSULTATS

– Schéma du montage :



– Choix du matériel

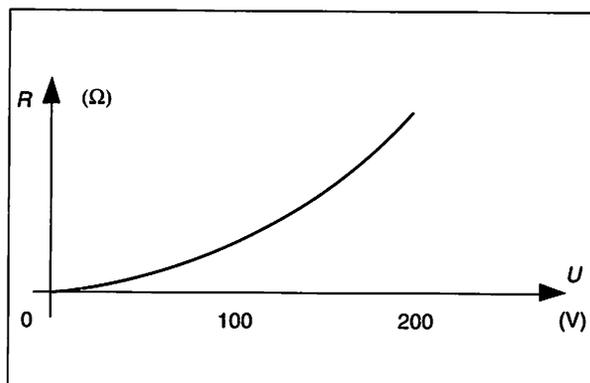
Sous tension nominale, la lampe doit consommer un courant égal à :  $I = \frac{P}{U_A}$  soit  $I = 0,43$  A.

La résistance de la lampe en fonctionnement nominal est égale à :  $R = \frac{U_A}{I}$  soit  $R = 534 \Omega$ .

Le potentiomètre choisi aura une résistance totale de cet ordre soit  $R_p = 500 \Omega$  et consommera à vide :

$$I_V = \frac{U_A}{R_p} \text{ soit } I_V = 0,46 \text{ A.}$$

L'intensité maximale qu'il devra être capable de supporter sera :  $I_{MAX} \geq I + I_V$  soit  $I_{MAX} \geq 1$  A.



Courbe  $R = f(U)$ .

# RÉGLAGE D'UN COURANT

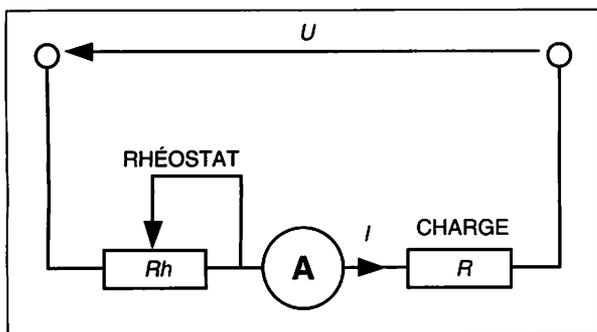
## ■ PRINCIPE

En série avec la charge est montée une résistance variable appelée **rhéostat** (voir figure ci-après). Le courant  $I$  traversant la charge de résistance  $R$  est alors égal à :

$$I = \frac{U}{R + R_H} \text{ avec } R_H : \text{résistance du rhéostat.}$$

La valeur du courant  $I$  dans le circuit sera :

- minimale lorsque la valeur de  $R_H$  sera maximale,
- maximale lorsque la valeur de  $R_H$  sera minimale ou nulle.



Montage de rhéostat.

## ■ CHOIX DU RHÉOSTAT

Les caractéristiques d'un rhéostat à curseur sont :

- la valeur de sa résistance,
- l'intensité maximale admissible.

Le choix du rhéostat s'effectue à partir de ces caractéristiques.

*Exemple :*

Un récepteur de résistance  $50 \Omega$  est alimenté sous  $48 \text{ V}$ . L'intensité qui le parcourt doit être comprise entre  $0,1 \text{ A}$  et  $1 \text{ A}$ .

Lorsque la résistance  $R_H$  du rhéostat sera nulle, l'intensité a pour valeur :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{48}{50} \text{ soit } I = 0,96 \text{ A.}$$

Pour que  $I$  soit égal à  $0,1 \text{ A}$ , il faut que :

$$R + R_H = \frac{U}{I} = \frac{48}{0,1} \text{ soit } R_H = 430 \Omega.$$

Le rhéostat choisi sera tel que :

$$I_{\text{max}} \geq 1 \text{ A,}$$

$$R_H \geq 430 \Omega.$$

## ■ APPLICATION

L'enroulement inducteur d'une machine à courant continu, alimenté sous  $220 \text{ V}$ , consomme un courant nominal  $I_n = 0,8 \text{ A}$ .

a. Choisir un rhéostat permettant de faire varier cette intensité de  $0,4 I_n$  à  $I_n$ .

b. Réaliser le montage de la figure précédente (montage de rhéostat) et relever l'intensité en fonction de la position du curseur du rhéostat. Tracer la courbe  $I = f(R_H)$ .

**Résultats :**

a. La résistance de l'inducteur est égale à :

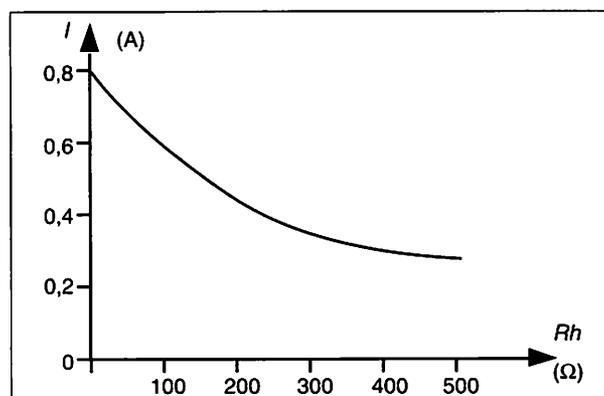
$$R = \frac{U}{I_n} \text{ soit } R = 275 \Omega.$$

Le courant doit varier de  $0,32 \text{ A}$  à  $0,8 \text{ A}$ .

Lorsque  $I = 0,32 \text{ A}$  :  $R + R_H = \frac{U}{I} = 687,5 \Omega$   
soit  $R_H = 412,5 \Omega$ .

**On choisira un rhéostat :  $500 \Omega$  ;  $1 \text{ A}$ .**

b. Voir figure ci-dessous.

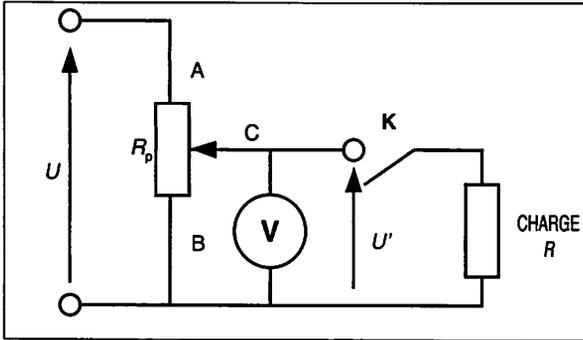


Courbe  $I = f(R_H)$ .

# RÉGLAGE D'UNE TENSION

## ■ PRINCIPE

Le potentiomètre (cf. § 8) permet d'obtenir une tension variable depuis zéro jusqu'à  $U$  aux bornes de la charge.



Montage de potentiomètre.

## ■ CHOIX DU POTENTIOMÈTRE

Pour obtenir une variation de tension la plus linéaire possible, la résistance du potentiomètre doit être inférieure ou égale à celle de la charge :

$$R_p \leq R$$

D'autre part, le courant circulant dans le potentiomètre est égal à la somme de celui qu'il consommerait à vide  $I_v$  et de celui consommé par la charge  $I_c$ . L'intensité maximale admissible doit donc être telle que :

$$I_{MAX} = I_v + I_c$$

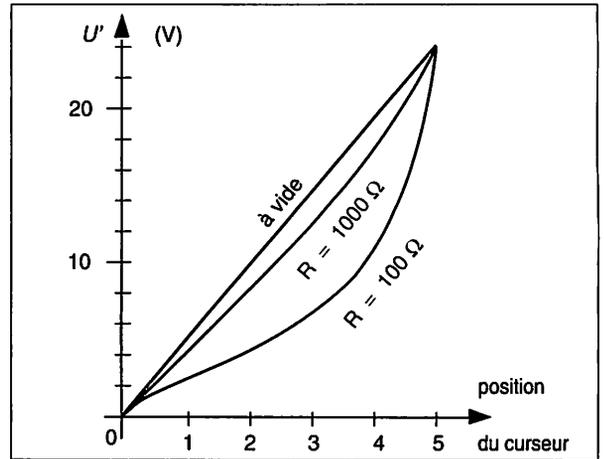
## ■ APPLICATION

Le montage de la figure ci-dessus est réalisé avec un potentiomètre de résistance  $R_p = 500 \Omega$  et une résistance de charge  $R = 100 \Omega$ . La tension d'alimentation est  $U = 24 \text{ V}$ .

Relever  $U'$  en fonction de la position du curseur, l'interrupteur K étant ouvert puis fermé.  
Refaire les mêmes mesures avec  $R = 1\,000 \Omega$ .

### Résultats :

La tension à vide  $U'$  est proportionnelle à la résistance comprise entre le curseur C et le point B. Le potentiomètre étant divisé en cinq parties égales on obtient la courbe ci-après. Plus la résistance de charge est faible par rapport à celle du potentiomètre, plus la courbe s'écarte de celle relevée à vide.



Variation de  $U'$  en fonction de la position du curseur.

### Remarque .....

Dans l'application précédente, le potentiomètre de  $500 \Omega$  consomme à vide :

$$I_v = \frac{U}{R_p} = \frac{24}{500} \text{ soit } I_v = 48 \text{ mA.}$$

La résistance de charge de  $100 \Omega$  consomme :

$$I_c = \frac{U}{R} = \frac{24}{100} \text{ soit } I_c = 0,24 \text{ A.}$$

L'intensité admissible est donc :  $I_{MAX} \geq 0,3 \text{ A.}$

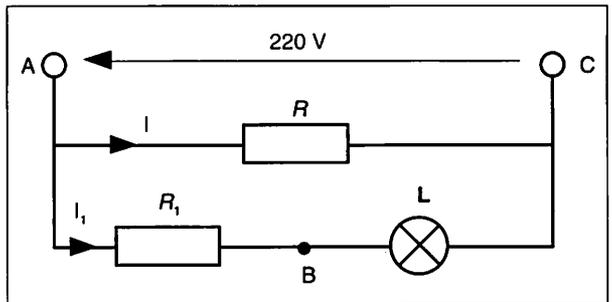
# APPLICATIONS

## EXERCICES RÉSOLUS

### Énoncé 1

Dans le montage de la figure ci-contre le voyant L absorbe une puissance de 5 W et la tension à ses bornes est de 100 V. La résistance R a une valeur de 50 Ω.

- Calculer l'intensité du courant dans  $R_1$ , la valeur de  $R_1$  et la puissance qu'elle dissipe.
- Calculer l'intensité du courant dans R et la puissance qu'elle dissipe.



#### Méthode :

Calculer la valeur de la tension aux bornes de  $R_1$ , puis déterminer sa valeur par la loi d'Ohm.

La puissance absorbée par la résistance est égale au produit de l'intensité du courant qui la traverse par la ddp existant entre ses bornes.

#### Solution proposée :

a.  $U_{AB} = U_{AC} - U_{BC} = 120 \text{ V}$ .

D'où le courant  $I_1$  :  $I_1 = \frac{P}{U_{BC}}$  soit  $I_1 = 0,05 \text{ A}$

La valeur de  $R_1$  est donnée par la relation :

$$R_1 = \frac{U_{AB}}{I_1} \text{ soit } R_1 = 2\,400 \, \Omega$$

La puissance dissipée par  $R_1$  est égale à :

$$P_{R1} = R_1 I_1^2 \text{ soit } P_{R1} = 6 \text{ W.}$$

b. L'intensité dans R est égal à :

$$I = \frac{U_{AC}}{R} \text{ soit } I = 4,4 \text{ A}$$

Et la puissance dissipée a pour valeur :

$$P = R I^2 \text{ soit } P = 968 \text{ W.}$$

#### Remarque :

La puissance dissipée par la résistance R est proche du kilowatt.

Son choix doit en tenir compte pour éviter tout risque d'incendie.

### Énoncé 2

Un moteur alimenté sous 220 V consomme un courant de 2 A. Son rendement est de 0,7. Calculer :

- la puissance absorbée par le moteur,
- la puissance dissipée en chaleur en considérant que toutes les pertes sont dues à l'effet Joule,
- la résistance interne du moteur.

#### Méthode :

a. Appliquer la relation reliant les grandeurs tension (U), courant (I) et puissance (P).

b. La puissance dissipée en chaleur correspond aux pertes, c'est-à-dire à la différence entre la puissance absorbée et la puissance utile.

c. Cette puissance est due à la résistance interne du moteur.

#### Solution proposée :

a.  $P_a = UI$  soit  $P_a = 440 \text{ W}$ .

b. La puissance utile a pour valeur :

$$P_u = \eta P_a \text{ soit } P_u = 308 \text{ W.}$$

Et les pertes  $P_j$  sont égales à :

$$P_j = P_a - P_u \text{ soit } P_j = 132 \text{ W.}$$

c. La résistance interne du moteur a pour expression :

$$R = \frac{P_j}{I^2} \text{ soit } R = 33 \, \Omega.$$

#### Remarque :

La valeur de R est différente du quotient  $\frac{U}{I}$  du fait que le moteur n'est pas une résistance pure.

## EXERCICES À RÉSOUDRE

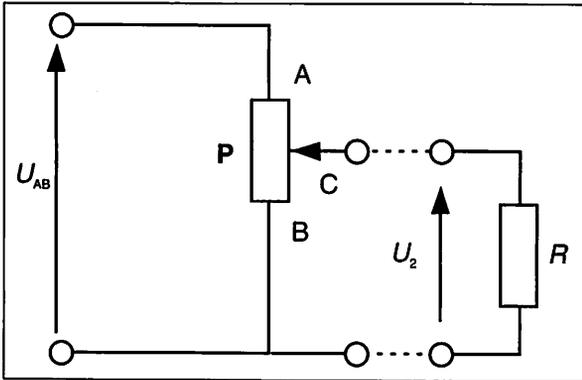
**E.1** Le potentiomètre de la figure ci-dessous est linéaire, de résistance totale  $100 \Omega$ .

La tension appliquée entre ses bornes extrêmes A et B est  $U_{AB} = 120 \text{ V}$ .

Le curseur C est placé au milieu de AB.

a. Calculer la tension  $U_2$  lorsqu'aucune charge n'est placée entre C et B.

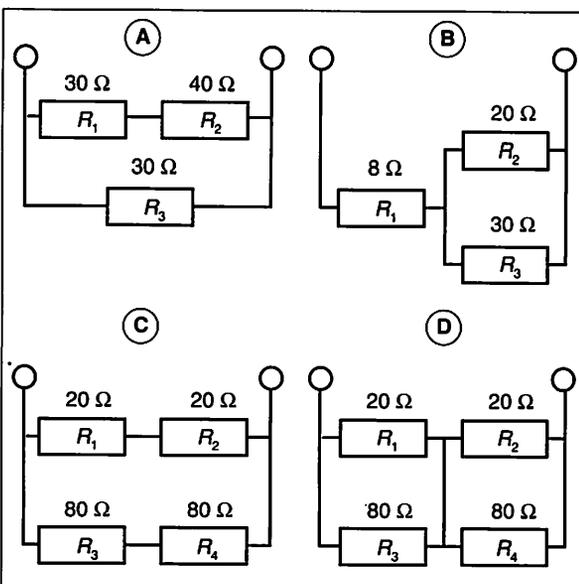
b. Une résistance  $R$  est placée entre C et B. Calculer  $U_2$  lorsque  $R = 200 \Omega$ , puis  $R = 50 \Omega$ .



**E.2** Un appareil de chauffage fonctionnant sous  $230 \text{ V}$  comporte deux résistances identiques de  $46 \Omega$  chacune. Calculer le courant consommé et la puissance dissipée en chaleur lorsque :

- une seule résistance est en fonctionnement,
- les deux résistances sont en série,
- les deux résistances sont en parallèle.

**E.3** Déterminer les résistances équivalentes aux groupements de la figure ci-dessous.



**E.4** Deux lampes, l'une de  $100 \text{ W}$ , l'autre de  $60 \text{ W}$  sont branchées en parallèle sous  $230 \text{ V}$ . Calculer :

- l'intensité du courant consommé par chaque lampe et la résistance de chacune,
- l'intensité du courant consommé par le groupement et la résistance de ce groupement.

**E.5** Une ligne d'alimentation est constituée de deux fils de cuivre, de  $100 \text{ m}$  de long chacun et de  $5 \text{ mm}^2$  de section. A une extrémité se trouve la tension d'alimentation de  $230 \text{ V}$ , à l'autre extrémité un moteur consommant  $10 \text{ A}$ .

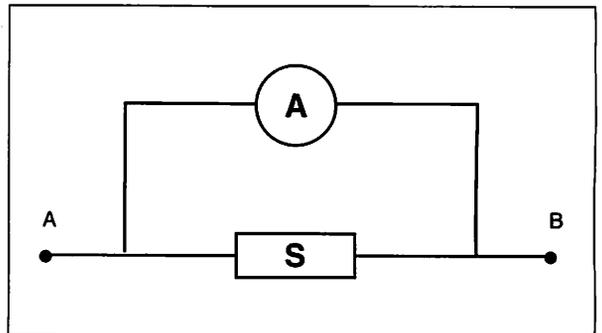
Calculer :

- la résistance de la ligne ( $\rho = 1,6 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ),
- la chute de tension dans la ligne et la tension aux bornes du moteur,
- les pertes par effet Joule dans la ligne.

**E.6** L'appareil de mesure de la figure ci-dessous a pour calibre  $5 \text{ A}$ .

Il est constitué d'un ampèremètre de calibre  $1 \text{ A}$ , de résistance interne  $r = 0,5 \Omega$  et d'un shunt  $S$ .

Déterminer la résistance du shunt  $S$ .



**E.7** Le bobinage d'un moteur est réalisé en fil de cuivre dont le coefficient de température est :

$$\alpha_0 = 4 \times 10^{-3} (\text{°C})^{-1}.$$

- La résistance de ce bobinage est de  $81 \Omega$  à  $20 \text{ °C}$ , calculer sa résistance  $R_0$  à  $0 \text{ °C}$ .
- En fonctionnement, la température du moteur est de  $70 \text{ °C}$ , calculer la résistance du bobinage à cette température.

**E.8** Un voyant fonctionnant sous  $110 \text{ V}$  consomme un courant de  $80 \text{ mA}$ . Pour l'utiliser sous  $230 \text{ V}$  on branche en série une résistance. Calculer :

- la valeur de la résistance,
- la puissance dissipée par cette résistance.

# 3 Générateurs et récepteurs. Loi d'Ohm généralisée

## ÉLECTROTECHNIQUE

### 1 Générateurs

Un générateur est un appareil qui produit de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie :  
– mécanique, chimique, solaire...

#### ■ CARACTÉRISTIQUE

Le générateur, dont le rôle consiste à fournir de l'énergie à une charge, est défini par sa caractéristique courant-tension.

#### ■ GÉNÉRATEUR PARFAIT DE TENSION

Un générateur parfait de tension maintient entre ses bornes une tension constante  $U = E$  quel que soit le courant  $I$  débité.

Le générateur parfait de tension est également appelé **source de tension** ; son symbole et sa caractéristique sont représentés figure 3.01.

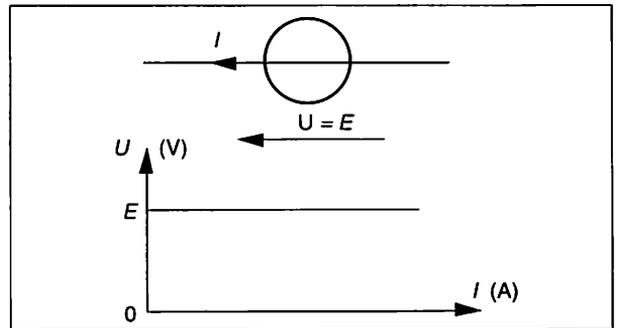


Fig. 3.01 : Symbole et caractéristique d'une source de tension.

### 2 Générateurs réels

Dans un **générateur réel**, la tension et l'intensité varient simultanément en fonction de la charge :

– lorsque l'intensité débitée par le générateur augmente, la tension à ses bornes diminue.

Le générateur est dit **linéaire** lorsque cette diminution de tension est proportionnelle à l'augmentation de l'intensité du courant fourni (cf. fig. 3.02).

#### ■ GRANDEURS CARACTÉRISTIQUES

La tension  $E$ , aux bornes du **générateur lorsqu'il ne débite pas** ( $I = 0$ ), est appelée tension à vide ou **force électromotrice** (f.e.m.). On la note aussi  $U_0$ .

La chute de tension en charge est due à la résistance interne  $r$  du générateur. Cette résistance interne a pour expression :

$$r = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad \text{avec} : \begin{cases} \Delta U = U_A - U_B \\ \Delta I = I_B - I_A \end{cases}$$

La caractéristique a pour équation :

$$U = E - rI \quad \left\{ \begin{array}{l} U, E \text{ en volts,} \\ r \text{ en ohms,} \\ I \text{ en ampères.} \end{array} \right.$$

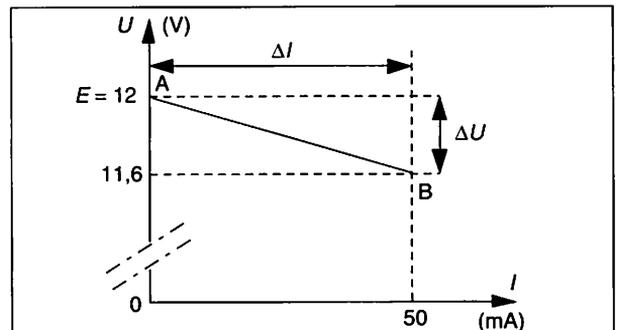


Fig. 3.02 : Caractéristique d'un générateur réel.

#### Exemple :

Avec les valeurs de la figure 3.02 :

$I_A = 0$  ;  $I_B = 50 \text{ mA}$ .

$U_A = E = 12 \text{ V}$  ;  $U_B = 11,6 \text{ V}$ .

$$r = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad \text{ou} \quad r = \frac{E - U_B}{I}$$

soit  $r = 8 \Omega$

Cette relation est l'expression de la loi d'Ohm pour un générateur.

## ■ MODÈLE ÉQUIVALENT D'UN GÉNÉRATEUR

Dans le modèle représenté figure 3.03, les deux paramètres  $E$  et  $r$  qui caractérisent le générateur sont représentés chacun par leur symbole, soit **une source de tension en série avec une résistance**. La caractéristique de cet ensemble est identique à celle d'un **générateur réel linéaire de f.e.m.  $E$  et de résistance interne  $r$** .

Ce modèle équivalent au générateur est appelé **modèle équivalent de Thévenin ou MET**.

Cette représentation, commode pour déterminer le fonctionnement d'un générateur dans un circuit donné, n'est qu'un modèle théorique et, dans la réalité, le point commun entre la source de tension et la résistance interne est inaccessible.

## ■ UTILISATION DU MET : DÉBIT DANS UNE RÉSTANCE

La figure 3.04 est représentative d'un générateur de f.e.m.  $E$  et de résistance interne  $r$  débitant dans une charge résistante  $R$ .

En appliquant la loi des mailles au modèle équivalent :  $U_{BC} = U_{BA} + U_{AC}$  soit  $E = rI + RI = I(r + R)$ .

Le courant débité par le générateur est donc égal à :

$$I = \frac{E}{r + R}$$

## ■ PUISSANCES MISES EN JEU DANS UN GÉNÉRATEUR

### – PUISSANCE UTILE ( $P_U$ )

C'est la puissance communiquée à la charge :

$$P_U = UI$$

### – PUISSANCE PERDUE ( $P_J$ )

C'est la puissance dissipée en chaleur par effet Joule dans le générateur :

$$P_J = rI^2$$

### – PUISSANCE TOTALE ( $P_T$ )

La puissance électrique totale est la somme de la puissance utile et de la puissance perdue :

$$P_T = P_U + P_J \text{ soit } P_T = UI + rI^2 = I(U + rI)$$

$$P_T = EI$$

### Remarque :

La puissance utile fournie par un générateur est fonction du courant qu'il débite; elle passe par un maximum pour un courant débité égal à :

$$I = \frac{I_{cc}}{2} \text{ (fig. 3.05)}$$

Ce courant est obtenu lorsque la résistance de charge  $R_c$  est égale à la résistance interne du générateur.

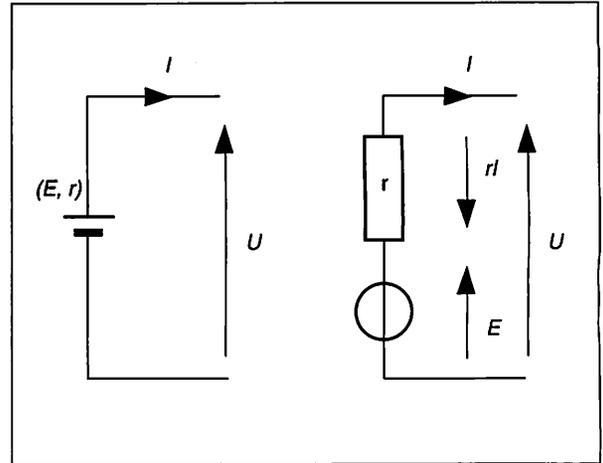


Fig. 3.03 : Schémas représentatifs d'un générateur linéaire et de son modèle équivalent.

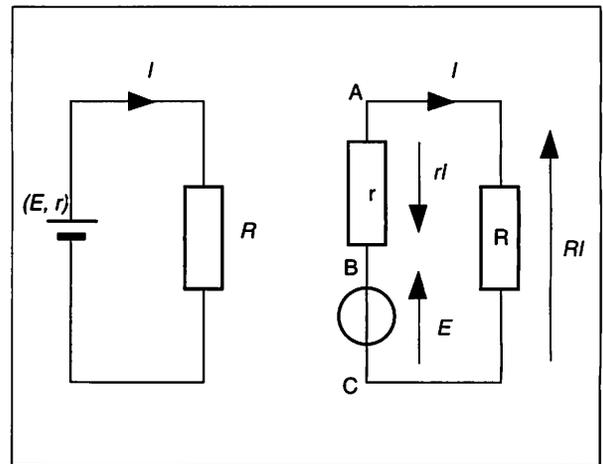


Fig. 3.04 : Débit dans une résistance et modèle équivalent.

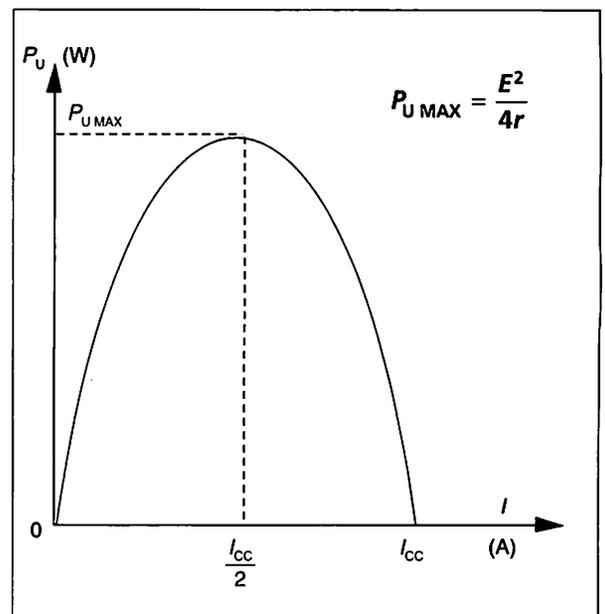


Fig. 3.05 : Puissance utile fournie par un générateur en fonction du courant débité.

### 3 Groupements de générateurs

#### ■ GROUPEMENT EN SÉRIE

Deux générateurs sont en série lorsque le pôle positif de l'un est relié au pôle négatif de l'autre (cf. fig. 3.06). Ce groupement en série peut être remplacé par un seul générateur dont le modèle équivalent est représenté figure 3.07.

Les caractéristiques  $E_{eq}$  et  $r_{eq}$  du groupement peuvent être déterminées en remplaçant chaque générateur par son modèle équivalent de Thévenin (cf. fig. 3.08).

**La tension  $U$  est la somme des tensions partielles :**

$$U = U_1 + U_2$$

$$\text{soit : } U = (E_1 + r_1 I) + (E_2 + r_2 I)$$

$$\text{et : } U = (E_1 + E_2) + I(r_1 + r_2)$$

**Le générateur équivalent a donc pour caractéristiques :**

$$E_{eq} = (E_1 + E_2)$$

$$r_{eq} = (r_1 + r_2)$$

#### Remarques :

1. Le groupement en série est utilisé pour pouvoir disposer d'une tension supérieure à celle que peut fournir un seul générateur.

En pratique on ne groupe en série que des **générateurs identiques**. Dans ce cas, l'intensité que peut fournir un seul générateur est l'intensité maximale du groupement.

2. Pour un groupement en série de  $n$  générateurs, les caractéristiques du groupement équivalent sont :

$$E_{eq} = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n \quad \text{et} \quad r_{eq} = r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n$$

#### ■ GROUPEMENT EN PARALLÈLE

Des générateurs sont en parallèle lorsque toutes les bornes positives sont reliées au même point P et toutes les bornes négatives au même point N (cf. fig. 3.09). Pour éviter les courants de circulation à l'intérieur du groupement, on associe, en parallèle, uniquement des **générateurs identiques**.

Comme pour le groupement en série, le groupement en parallèle peut être remplacé par un seul générateur de modèle équivalent (cf. fig. 3.10).

On obtient les caractéristiques de ce modèle équivalent en remplaçant chaque générateur par son modèle, soit (cf. fig. 3.10) :

$$E_{eq} = E \quad \text{et} \quad r_{eq} = \frac{r}{2}$$

#### Remarque :

Dans le cas du groupement en parallèle de  $n$  générateurs identiques, les caractéristiques du groupement équivalent sont :

$$E_{eq} = E \quad \text{et} \quad r_{eq} = \frac{r}{n}$$

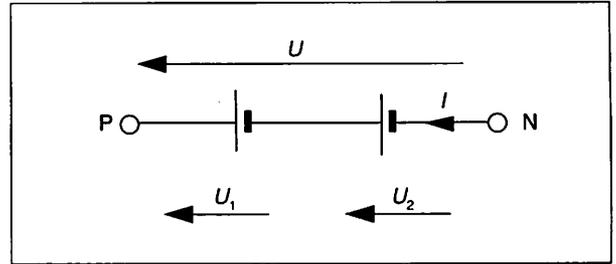


Fig. 3.06 : Groupement en série de deux générateurs.

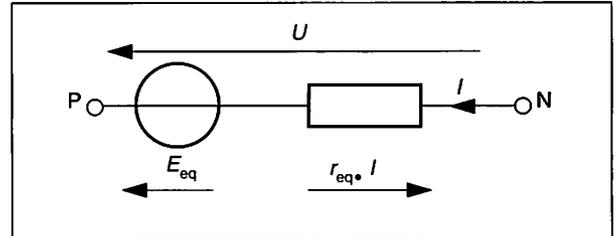


Fig. 3.07 : Groupement équivalent à un groupement de deux générateurs.

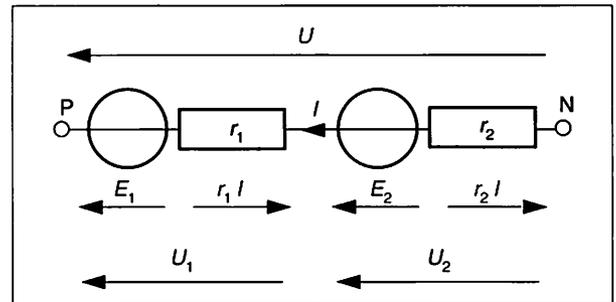


Fig. 3.08 : Groupement équivalent à chaque générateur.

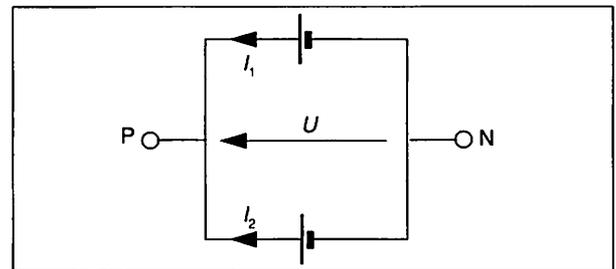


Fig. 3.09 : Groupement de générateurs en parallèle.

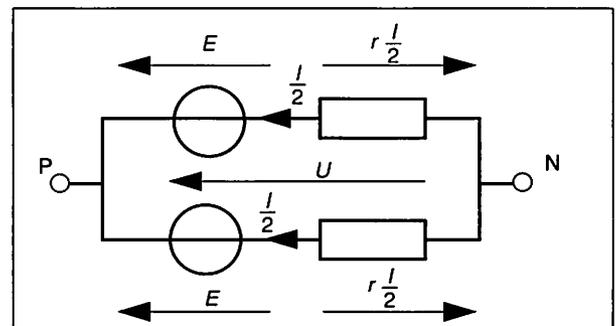


Fig. 3.10 : Modèle équivalent de chaque générateur.

## 4 Récepteurs actifs

Un récepteur actif convertit une partie de l'énergie qu'il reçoit en une énergie autre que thermique :  
– énergie mécanique, chimique, lumineuse.

### ■ CARACTÉRISTIQUE

Un **accumulateur en charge** peut être considéré comme un récepteur actif. Il transforme l'énergie électrique en énergie chimique.

La caractéristique courant-tension d'un tel récepteur est représentée figure 3.11.

### ■ EXPLOITATION DE LA CARACTÉRISTIQUE

Lorsque la caractéristique est une **droite**, le récepteur est **linéaire**.

La tension à vide  $U_0$  est aussi appelée **force contre électromotrice (f.c.e.m.)** et notée  $E'$ .

La valeur de la **résistance interne  $r'$**  du récepteur est donnée par la relation :

$$r' = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad \text{avec : } \begin{cases} \Delta U = U_A - U_B \\ \Delta I = I_B - I_A \end{cases}$$

La caractéristique a pour équation :

$$U = E' + r'I \quad \left\{ \begin{array}{l} U, E' \text{ en volts,} \\ r \text{ en ohms,} \\ I \text{ en ampères.} \end{array} \right.$$

Cette relation est l'expression de la loi d'Ohm pour un récepteur actif.

### ■ MODÈLE ÉQUIVALENT D'UN RÉCEPTEUR

Le modèle équivalent de Thévenin d'un récepteur actif est semblable à celui d'un générateur. Il est constitué d'une **source de tension en série avec une résistance** (cf. fig. 3.12).

### ■ PUISSANCES MISES EN JEU DANS UN GÉNÉRATEUR

– **PUISSANCE ABSORBÉE ( $P_A$ )**

Elle est donnée par la relation :

$$P_U = UI$$

– **PUISSANCE PERDUE ( $P_J$ )**

C'est la puissance dissipée en chaleur par effet Joule dans le générateur :

$$P_J = r'I^2$$

– **PUISSANCE UTILE ( $P_U$ )**

La puissance utile est la différence entre la puissance absorbée et la puissance perdue :

$$P_U = P_A - P_J \text{ soit } P_U = UI - r'I^2 = I(U - r'I)$$

La quantité  $(U - r'I)$  étant la **f.c.e.m.  $E'$** , la puissance utile est égale à :

$$P_U = E'I$$

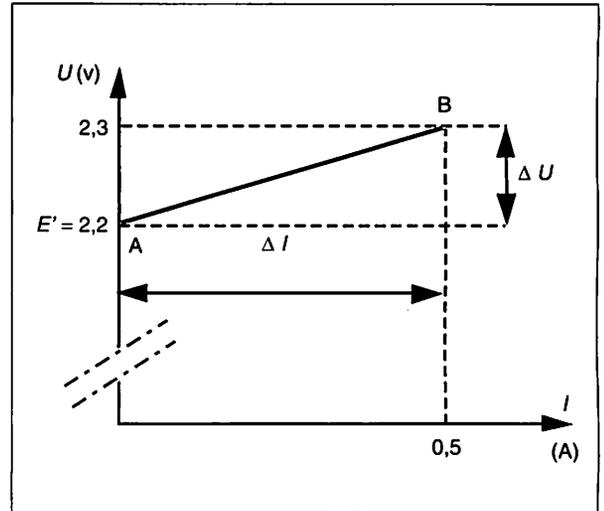


Fig. 3.11 : Caractéristique d'un récepteur actif (accumulateur en charge).

**Exemple :**

Avec les valeurs de la figure 3.11 :

$$I_A = 0; I_B = 0,5 \text{ A.}$$

$$E' = 2,2 \text{ V}; U_B = 2,3 \text{ V.}$$

$$r' = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad \text{ou} \quad r' = \frac{E' - U_B}{I} \\ \text{soit } r' = 0,2 \Omega$$

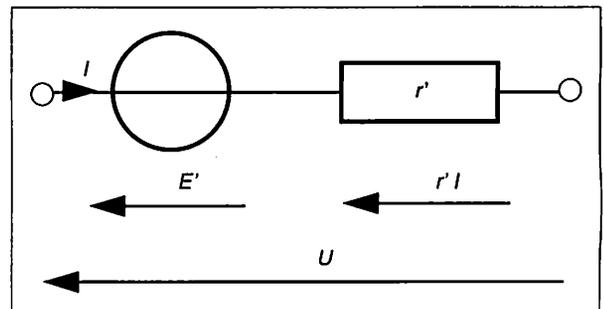


Fig. 3.12 : Modèle équivalent d'un récepteur actif.

**Remarque :**

Du fait des pertes autres que celles dues à l'effet Joule, la puissance utile réelle est souvent inférieure à la puissance utile déterminée ci-contre.

## ■ DIPÔLES ACTIFS RÉVERSIBLES

Certains dipôles ont la propriété de pouvoir fonctionner tantôt en générateur, tantôt en récepteur : ils sont dits **réversibles**.

L'accumulateur de la figure 3.13 est générateur lorsqu'il se décharge, récepteur lorsqu'on le charge.

**En générateur :**  
 - les flèches  $U$  et  $I$  sont dans le même sens,  
 - la f.e.m.  $E$  est supérieure à la tension  $U$ .  
**En récepteur :**  
 - les flèches  $U$  et  $I$  sont en sens inverse,  
 - la f.e.m.  $E'$  est inférieure à la tension  $U$ .

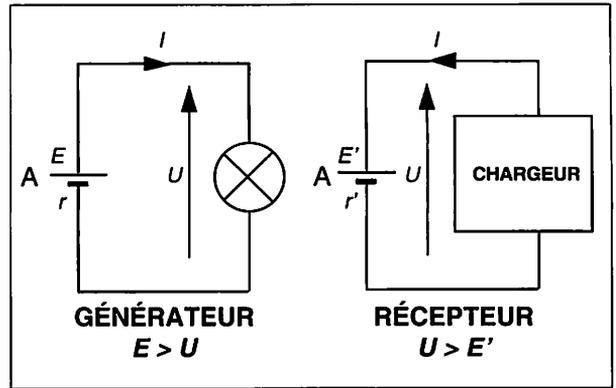


Fig. 3.13 : Deux modèles pour l'accumulateur A.

## 5 Loi d'Ohm généralisée

Soit à déterminer l'intensité du courant circulant dans un circuit fermé comportant des dipôles actifs et passifs comme celui de la figure 3.14.

Dans le schéma de la figure 3.15 chaque dipôle est remplacé par son modèle équivalent de Thévenin et le sens du courant est fixé arbitrairement.

En appliquant la loi des mailles à ce schéma équivalent, on obtient :

$$E_1 - R_1 I - R_2 I - E_3 - r_3 I - r_2 I + E_2 - r_1 I = 0$$

$$\text{soit : } E_1 + E_2 - E_3 = (R_1 + R_2 + r_1 + r_2 + r_3) I$$

$$\text{d'où : } I = \frac{E_1 + E_2 - E_3}{R_1 + R_2 + r_1 + r_2 + r_3} = 0,25 \text{ A}$$

Dans ce circuit :

- les dipôles de f.e.m.  $E_1$  et  $E_2$  sont générateurs,
- le dipôle de f.e.m.  $E_3$  est récepteur et  $E_3$  est sa f.c.e.m.

Plus généralement, dans un circuit à une maille, la relation entre les caractéristiques des dipôles qui le constituent peut s'écrire :

$$\Sigma E - \Sigma E' = \Sigma RI$$

Avec :

$\Sigma E$  somme des f.e.m. des générateurs,

$\Sigma E'$  somme des f.c.e.m. des récepteurs,

$\Sigma RI$  somme de toutes les résistances internes et externes aux dipôles actifs.

La relation  $\Sigma E - \Sigma E' = \Sigma RI$  est l'expression de la loi d'Ohm généralisée encore appelée loi de Pouillet.

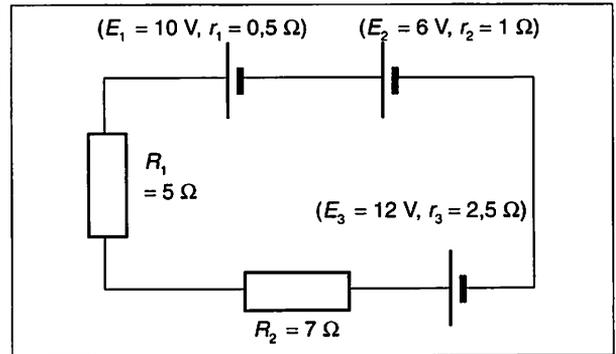


Fig. 3.14 : Circuit à une maille.

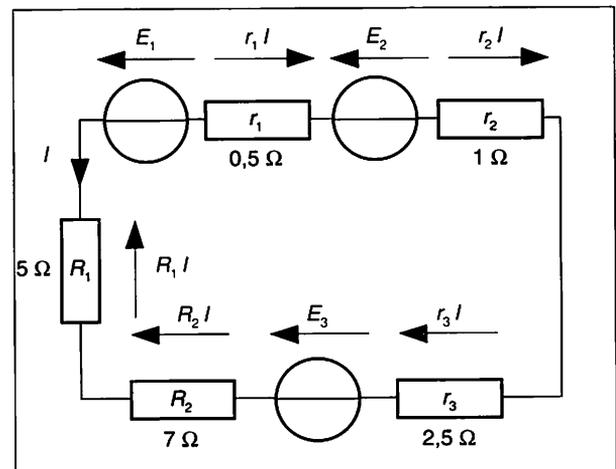


Fig. 3.15 : Schéma équivalent au circuit à une maille.

# ESSENTIEL À RETENIR

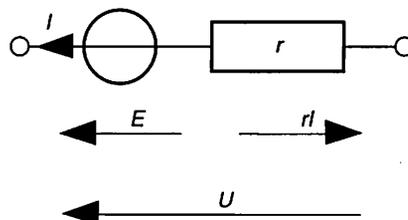
## GÉNÉRATEURS

### LOI D'OHM

$$U = E - rI$$

$U$  en volts,  
 $E$ , force électromotrice en volts,  
 $r$  en ohms,  
 $I$  en ampères.

### MODÈLE ÉQUIVALENT DE THÉVENIN



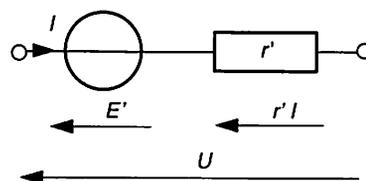
## RÉCEPTEURS ACTIFS

### LOI D'OHM

$$U = E' + r'I$$

$U$  en volts,  
 $E'$ , force contre électromotrice en volts,  
 $r'$  en ohms,  
 $I$  en ampères.

### MODÈLE ÉQUIVALENT DE THÉVENIN



### LOI D'OHM GÉNÉRALISÉE OU LOI DE PUILLET

$$\Sigma E - \Sigma E' = \Sigma RI$$

$\Sigma E$  somme des f.e.m. des générateurs,  
 $\Sigma E'$  somme des f.c.e.m. des récepteurs,  
 $\Sigma R$  somme de toutes les résistances internes et externes aux dipôles actifs.

## TEST RAPIDE

**T. 1** Un générateur linéaire de f.e.m.  $E = 4,5 \text{ V}$  et de résistance interne  $r = 2 \Omega$  est chargé par une résistance de  $8 \Omega$ .

Quelle est l'intensité du courant débité ?

**Réponse :**  $0,9 \text{ A}$ ;  $0,45 \text{ A}$ ;  $3,6 \text{ A}$ .

**T. 2** La tension aux bornes d'un générateur linéaire est  $20 \text{ V}$  lorsqu'il débite un courant de  $0,2 \text{ A}$ . Elle est de  $15 \text{ V}$  pour un courant de  $0,4 \text{ A}$ .

Calculer la f.e.m. du générateur.

**Réponse :**  $30 \text{ V}$ ;  $10 \text{ V}$ ;  $25 \text{ V}$ .

**T. 3** Deux générateurs identiques de f.e.m.  $4,5 \text{ V}$  et de résistance interne  $5 \Omega$  sont montés en série.

Calculer la tension aux bornes du groupement lorsqu'il débite un courant de  $0,1 \text{ A}$ .

**Réponse :**  $3,5 \text{ V}$ ;  $8 \text{ V}$ ;  $8,5 \text{ V}$ .

**T. 4** Un moteur de f.c.e.m.  $E' = 100 \text{ V}$  et de résistance interne  $2 \Omega$  est alimenté sous une tension de  $120 \text{ V}$ .

Quelle est l'intensité du courant qui le traverse ?

**Réponse :**  $50 \text{ A}$ ;  $10 \text{ A}$ ;  $5 \text{ A}$ .

**T. 5** Un générateur de f.e.m.  $12 \text{ V}$  et de résistance interne  $2 \Omega$  alimente un récepteur linéaire de f.c.e.m.  $10 \text{ V}$  et de résistance interne  $3 \Omega$ .

Calculer le courant dans le circuit.

**Réponse :**  $4,4 \text{ A}$ ;  $0,4 \text{ A}$ ;  $2,4 \text{ A}$ .

## EXPÉRIMENTATION

### CARACTÉRISTIQUE D'UNE PILE

#### ■ TRAVAIL À EXÉCUTER

Relever la tension aux bornes d'une pile du type 3LR2 en fonction du courant qu'elle débite. Ce courant sera limité à  $0,1 \text{ A}$ .

#### ■ CHOIX DU MATÉRIEL

D'après les caractéristiques de la pile :

– le voltmètre a un **calibre supérieur à  $4,5 \text{ V}$** ; il sera de préférence **numérique** afin d'être sensible aux faibles variations de tension,

– l'ampèremètre a un **calibre supérieur ou égal à  $0,1 \text{ A}$** ,

– pour permettre cinq mesures échelonnées de  $0$  à  $0,1 \text{ A}$  la résistance  $R_h$  du rhéostat doit être suffisante pour fixer le courant  $I$  à  $20 \text{ mA}$ .

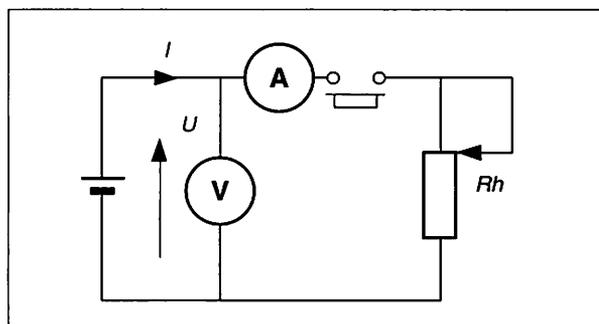
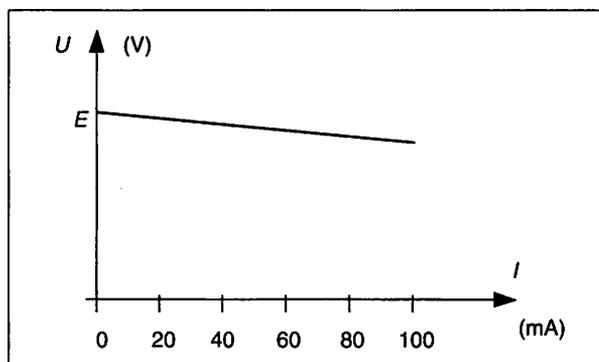
Avec :  $U = 4,5 \text{ V}$ ,  $R_h \geq \frac{U}{I}$  soit  $R_h \geq 225 \Omega$ .

#### Remarques .....

La caractéristique est pratiquement celle d'un générateur linéaire.

Les mesures doivent être effectuées rapidement afin d'éviter un débit trop important et des variations de tension dues à la polarisation de la pile.

#### ■ SCHÉMA DU MONTAGE ET ALLURE DE LA COURBE



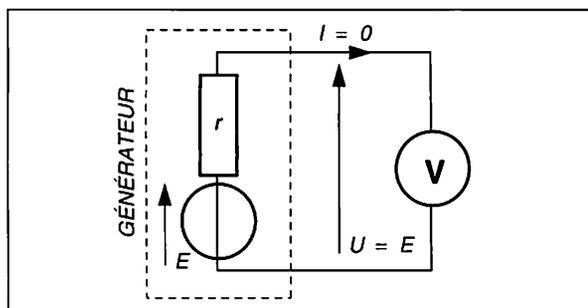
# MESURE DES GRANDEURS CARACTÉRISTIQUES D'UN GÉNÉRATEUR LINÉAIRE

## 1 Mesure de f.e.m.

La mesure s'effectue au voltmètre.

Celui-ci doit avoir une grande résistance interne afin que le courant débité par le générateur soit négligeable.

Pendant la mesure le générateur doit être déconnecté du circuit qu'il alimente.



Mesure de f.e.m.

## 2 Mesure de résistance interne par la méthode de la demi déviation

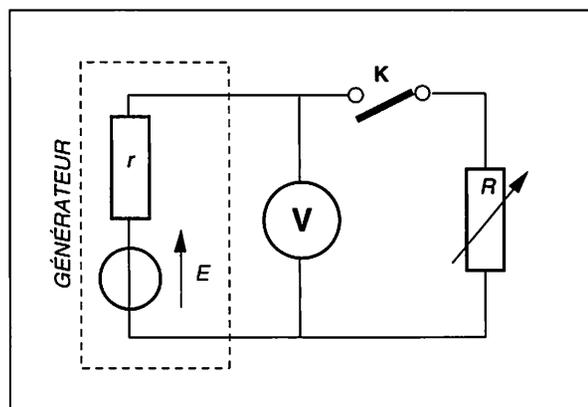
La méthode consiste à charger le générateur par une résistance variable connue  $R$ .

La tension aux bornes de cette résistance est mesurée par un voltmètre.

En faisant varier  $R$ , il est possible d'obtenir une tension moitié de la f.e.m.  $E$  :

$$U = \frac{1}{2} E$$

Dans ce cas,  $R$  et la résistance interne  $r$  forment un diviseur de tension par deux et  $R = r$ .



Mesure de résistance interne.

Remarque .....

La méthode de la demi déviation n'est pas utilisable lorsque la résistance interne du générateur est très faible. Dans ce cas, le courant débité risquerait d'endommager ou de faire fonctionner dans de mauvaises conditions le générateur.

On conserve le même montage, la tension mesurée  $U$  est égale à :

$$U = E \frac{R}{R+r}$$

et la résistance interne  $r$  a pour valeur :

$$r = R \frac{E-U}{U}$$

## 3 Application : pont diviseur en charge

### TRAVAIL À EXÉCUTER

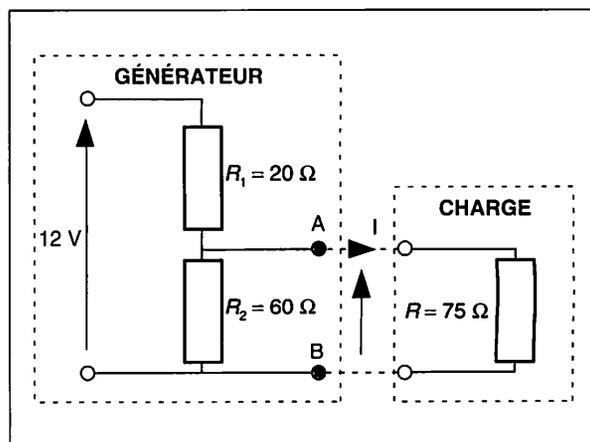
Réaliser le dipôle générateur AB à partir du schéma de principe fourni ci-après.

Mesurer sa f.e.m. et sa résistance interne à l'aide des méthodes précédentes.

Relier ce dipôle à une résistance de charge  $R = 75 \Omega$ .

Prévoir le courant circulant dans  $R$  et la tension à ses bornes.

Vérifier expérimentalement.



### SCHÉMA DE PRINCIPE ET ÉLÉMENTS DE RÉPONSE

$$E_1 = 9 \text{ V}; r = 15 \Omega,$$

$$I = \frac{E}{R+r} = 0,1 \text{ A},$$

$$U = RI = 7,5 \text{ V}.$$

# CARACTÉRISTIQUE D'UNE DIODE ÉLECTROLUMINESCENTE (LED)

## ■ TRAVAIL À EXÉCUTER

Relever la tension aux bornes d'une DEL (0,5 mm) en fonction du courant qui la traverse.  
Ce courant sera limité à 25 mA.

## ■ CHOIX DU MATÉRIEL

D'après les limites de la diode :

– l'ampèremètre sera d'un **calibre supérieur ou égal à 25 mA**,

– le voltmètre sera de préférence **numérique** pour permettre la lecture de faibles variations de tension,

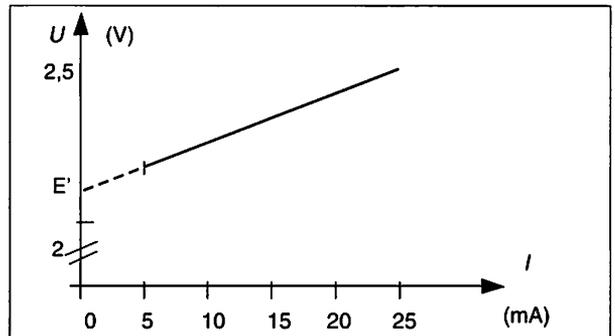
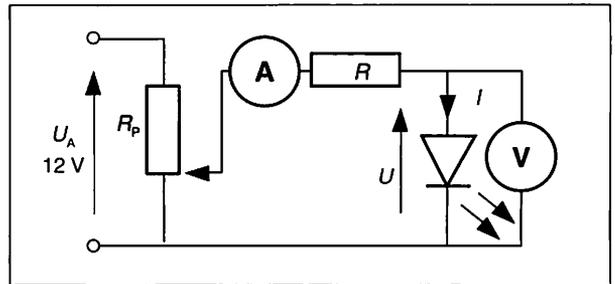
– la résistance  $R$  limite le courant dans la diode à  $I_{MAX} = 25 \text{ mA}$ ; la tension d'alimentation étant fixée à 12 V, elle a pour valeur :

$$R \geq \frac{U_A}{I_{MAX}} \text{ soit } R \geq 480 \Omega.$$

### Remarques

La caractéristique est celle d'un récepteur actif linéaire.  
La valeur de la f.c.e.m.  $E'$  est donnée par l'intersection de la caractéristique avec l'axe vertical.

## ■ SCHÉMA DU MONTAGE ET ALLURE DE LA COURBE



## APPLICATIONS

### EXERCICES RÉSOLUS

#### Énoncé 1

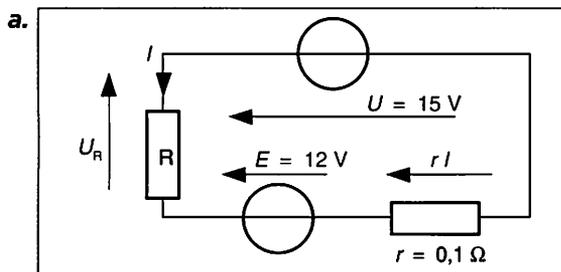
Une batterie d'accumulateurs de f.e.m.  $E = 12 \text{ V}$  et de résistance interne  $r = 0,1 \Omega$  est alimentée par une source de tension  $U = 15 \text{ V}$  par l'intermédiaire d'une résistance  $R$ .  
Déterminer la valeur de  $R$  pour que le courant de charge soit de 2 A.

#### Méthode :

#### Solution proposée :

#### Remarque :

a. Tracer le schéma équivalent au montage décrit par l'énoncé.



La résistance interne d'une batterie d'accumulateurs est très faible; en l'absence de la résistance  $R$ , le courant de charge atteindrait la valeur de 150 A et la source de tension serait détériorée.

b. Exploiter la loi des mailles.

b. La tension aux bornes de  $R$  est égale à :

$$U_R = U - E - rI \text{ soit } U_R = 2,8 \text{ V.}$$

Le courant étant de 2 A, la valeur de  $R$  est donnée par :

$$R = \frac{U_R}{I} \text{ soit } R = 1,4 \Omega$$

## Énoncé 2

Le relevé de la tension aux bornes d'une lampe en fonction du courant qu'elle consomme donne les résultats, consignés sur le tableau ci-contre.

$I$ (A)	0	0,1	0,2	0,3	0,35	0,4
$U$ (V)	0	0,4	1	2,2	3,2	5

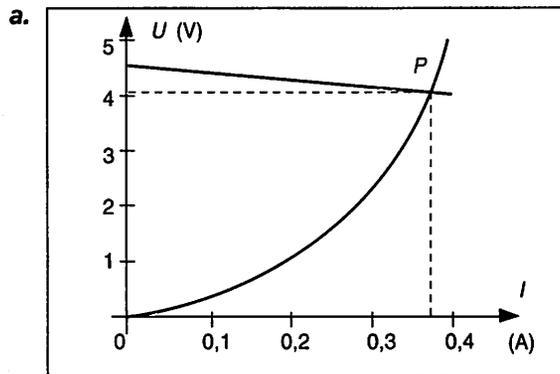
Cette lampe est alimentée par un générateur de f.e.m.  $E = 4,5$  V et de résistance interne  $r = 1,25$   $\Omega$ .

- Représenter sur un même graphique les caractéristiques de la lampe et du générateur.
- Déterminer graphiquement le courant dans la lampe et la tension à ses bornes.

**Méthode :**

Tracer avec le maximum de précision les deux courbes, utiliser du papier millimétré. Relever soigneusement les coordonnées du point P d'intersection.

**Solution proposée :**



**Remarque :**

La résistance de la lampe n'a pas une variation linéaire.

b. Le courant et la tension sont donnés par les coordonnées du point d'intersection des deux caractéristiques, soit :  $I = 0,37$  A et  $U = 4,05$  V.

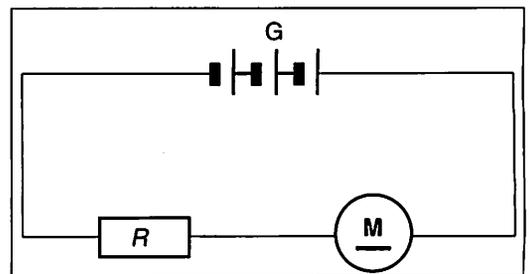
## Énoncé 3

Le circuit électrique d'un jouet est schématisé ci-dessous. Il comporte :

- une résistance bobinée  $R$  constituée par un fil en ferro-nickel de longueur 1,50 m, de section 0,2 mm<sup>2</sup>, et de résistivité  $8 \times 10^{-7}$   $\Omega \cdot m$ ,
- un moteur  $M$  de f.c.e.m. 3,75 V et de résistance interne 0,5  $\Omega$ ,
- un générateur  $G$  constitué de trois éléments ayant chacun une f.e.m. de 1,5 V et une résistance interne de 0,1  $\Omega$ .

Calculer :

- La valeur de la résistance  $R$ ,
- L'intensité dans le circuit,
- La durée prévisible de fonctionnement si l'on admet que la capacité du générateur  $G$  est de 1,5 A.h.



**Méthode :**

Appliquer l'expression physique de la résistance. Appliquer la loi d'Ohm généralisée.

**Solution proposée :**

a.  $R = \rho \frac{l}{S} = 8 \cdot 10^{-7} \frac{1,5}{0,2 \cdot 10^{-6}}$  soit  $R = 6$   $\Omega$

b.  $I = \frac{E - E'}{R + r_M + 3r} = \frac{4,5 - 3,75}{6 + 0,5 + 0,3}$  soit  $I = 0,11$  A

c.  $Q = I \cdot t$ , d'où

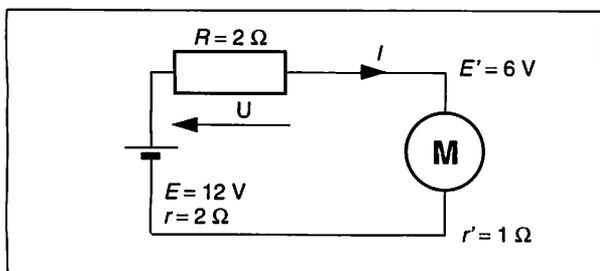
$t = \frac{Q}{I} = \frac{1,5}{0,11}$  soit  $t = 13,6$  h

**Remarque :**

Veiller à la cohérence des unités dans les différentes expressions utilisées.

## EXERCICES À RÉSOUDRE

**E. 1** Un générateur linéaire de f.e.m.  $E = 12 \text{ V}$  et de résistance interne  $r = 2 \ \Omega$  alimente un moteur de f.c.e.m.  $E' = 6 \text{ V}$  et de résistance interne  $r' = 1 \ \Omega$  en série avec une résistance  $R$  de  $2 \ \Omega$  selon le montage ci-dessous.



Calculer :

- l'intensité du courant dans le moteur,
- la chute de tension dans la résistance  $R$ ,
- la puissance absorbée par le moteur et sa puissance utile.

**E. 2** Les mesures de tension aux bornes d'un générateur en fonction de l'intensité qu'il débite sont consignées dans le tableau suivant :

$U \text{ (V)}$	120	118,6	116,5	114,4	113	106	85
$I \text{ (A)}$	0	0,2	0,5	0,8	1	2	5

- Tracer la caractéristique  $U = f(I)$  de ce générateur. Est-il linéaire ?
- Déterminer les éléments de son modèle de Thévenin.
- Tracer la caractéristique  $U = f(I)$  d'une résistance de  $5 \ \Omega$ .
- Déterminer l'intensité débitée par le générateur lorsqu'il alimente la résistance  $R$ .

**E. 3** Le démarreur d'une voiture consomme  $200 \text{ A}$  sous  $10,2 \text{ V}$ . Sa puissance électrique utile est alors de  $1\,200 \text{ W}$ .

Il est alimenté par une batterie d'accumulateurs de f.e.m.  $12 \text{ V}$ .

En ne tenant compte que des pertes par effet Joule, déterminer :

- la puissance absorbée par le démarreur,
- la f.c.e.m. et la résistance interne du démarreur,
- la résistance interne de la batterie.

**E. 4** La tension aux bornes d'un générateur est telle que :

$$U = 100 \text{ V pour } I = 5 \text{ A,}$$

$$U = 80 \text{ V pour } I = 10 \text{ A.}$$

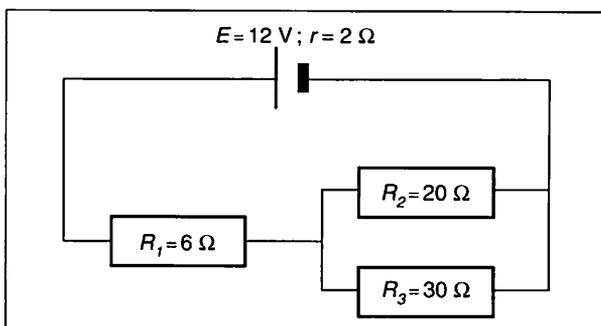
Calculer :

- sa f.e.m.,
- sa résistance interne.

**E. 5** Le générateur qui alimente le montage ci-dessous a une f.e.m. de  $12 \text{ V}$  et une résistance interne de  $2 \ \Omega$ .

Calculer :

- la résistance équivalente au groupement en parallèle de  $R_2$  et  $R_3$ ,
- l'intensité  $I$  du courant débité par le générateur,
- les tensions aux bornes du générateur, de la résistance  $R_1$ , des résistances  $R_2$  et  $R_3$ .



**E. 6** Un moteur à courant continu est alimenté sous  $220 \text{ V}$ . Sa f.c.e.m. est égale à  $200 \text{ V}$ , sa résistance interne est de  $2 \ \Omega$ .

Calculer :

- l'intensité du courant consommé,
- la puissance absorbée, la puissance utile et le rendement.

**E. 7** Un générateur a pour f.e.m.  $E = 12 \text{ V}$ , pour résistance interne  $r = 4 \ \Omega$ .

Il alimente une résistance  $R$ .

- Calculer la puissance  $P$  fournie pour les valeurs suivantes de  $R$  :  $2 \ \Omega$ ,  $4 \ \Omega$ ,  $6 \ \Omega$ ,  $8 \ \Omega$  et  $10 \ \Omega$ .
- Représenter graphiquement  $P$  en fonction de  $R$ .

**E. 8** Un générateur de f.e.m.  $220 \text{ V}$  et de résistance interne  $0,15 \ \Omega$  alimente en série :

– une résistance  $R = 1,6 \ \Omega$ ,

– un moteur de f.c.e.m.  $E'$  et de résistance interne  $r' = 0,25 \ \Omega$ .

L'intensité dans le circuit est  $10 \text{ A}$ .

Calculer :

- la f.c.e.m. du moteur,
- les tensions aux bornes du générateur, du moteur et de la résistance.

# 4 Condensateurs

## ÉLECTROTECHNIQUE

### 1 Notion de condensateur

#### ■ CONSTITUTION

Un condensateur est constitué de deux conducteurs métalliques séparés par une même couche isolante d'épaisseur constante.

Les deux conducteurs sont les **armatures** du condensateur.

L'**isolant** qui sépare les armatures est appelé **diélectrique**. Ce diélectrique peut être :

- gazeux (air);
- liquide (huile, électrolyte);
- solide (papier, mica).

L'épaisseur du diélectrique est toujours très faible.

#### ■ CAPACITÉ D'UN CONDENSATEUR

Lorsqu'un condensateur est chargé sous une tension  $U$  :

- L'armature **A** porte la charge **positive**  $+Q$ .
- L'armature **B**, la charge **negative**  $-Q$ .

La quantité d'électricité  $Q$  emmagasinée par un condensateur est proportionnelle à la tension  $U$  existant entre ses armatures.

$$Q = CU \quad \text{avec} \quad \begin{cases} Q \text{ en coulombs,} \\ C \text{ en farads,} \\ U \text{ en volts.} \end{cases}$$

Le **coefficient de proportionnalité**  $C$  caractérise l'aptitude d'un condensateur à emmagasiner une quantité d'électricité.

**$C$  est la capacité du condensateur.**

**L'unité de capacité est le FARAD (F).**

#### ■ ÉNERGIE EMMAGASINÉE PAR UN CONDENSATEUR

Le dispositif représenté figure 4.03 permet de mettre en évidence l'énergie emmagasinée par un condensateur durant sa charge et restituée ensuite au cours de sa décharge :

- interrupteur en 1 : le condensateur se charge,
- interrupteur en 2 : le condensateur se décharge dans la lampe qui brille un court instant.

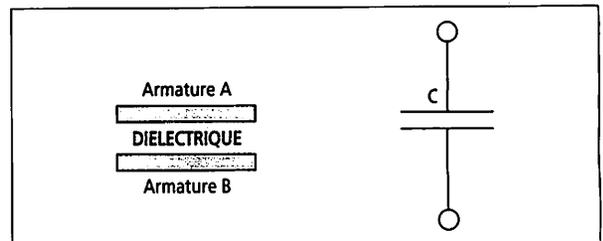


Fig. 4.01 : Constitution d'un condensateur.

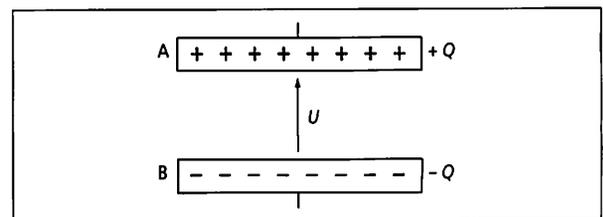


Fig. 4.02 : Condensateur chargé sous une tension  $U$ .

#### Remarque :

Les sous-multiples les plus courants sont :

- Le microfarad ( $\mu\text{F}$ ) :  $1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$
- Le nanofarad ( $\text{nF}$ ) :  $1 \text{ nF} = 10^{-9} \text{ F}$
- Le picofarad ( $\text{pF}$ ) :  $1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$

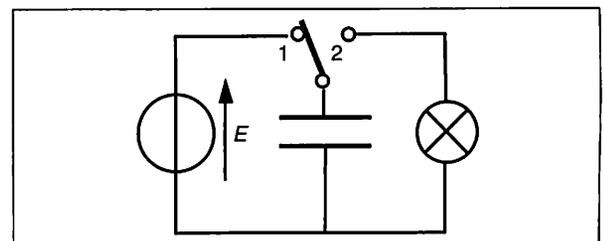


Fig. 4.03 : Mise en évidence de l'énergie emmagasinée par un condensateur.

Pour que la lampe émette de la lumière, il lui faut de l'énergie, celle-ci est fournie par le condensateur.

Un condensateur chargé accumule de l'énergie dont la valeur est fonction de sa capacité et de la tension entre ses armatures :

$$W = \frac{1}{2} CU^2$$

$W$  en joules,  
 $C$  en farads,  
 $U$  en volts.

## ■ MODÈLES ÉLECTRIQUES SIMPLES D'UN CONDENSATEUR

### • CONDENSATEUR DÉCHARGÉ

Lorsqu'un condensateur est **déchargé**, la tension entre ses armatures est nulle.

Un condensateur déchargé se comporte comme un interrupteur fermé (fig. 4.04).

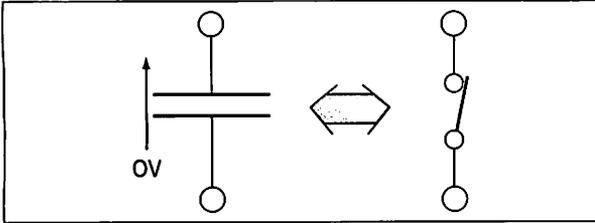


Fig. 4.04 : Modèle équivalent d'un condensateur déchargé.

### • CONDENSATEUR CHARGÉ

Lorsque le condensateur est **chargé**, la tension entre ses armatures est égale à la f.e.m. du générateur qui l'alimente.

Un condensateur chargé se comporte comme un interrupteur ouvert (fig. 4.05).

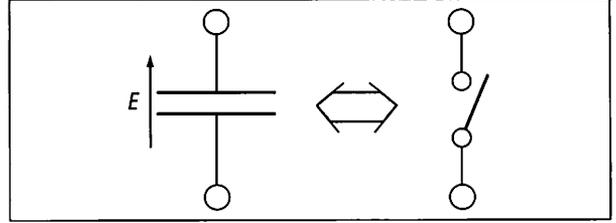


Fig. 4.05 : Modèle équivalent d'un condensateur chargé.

## 2 Groupements de condensateurs

### ■ GROUPEMENT EN PARALLÈLE

Lorsqu'on groupe en parallèle trois condensateurs, la quantité d'électricité  $Q$  emmagasinée est la **somme** des quantités d'électricité emmagasinées par chacun des trois condensateurs :

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

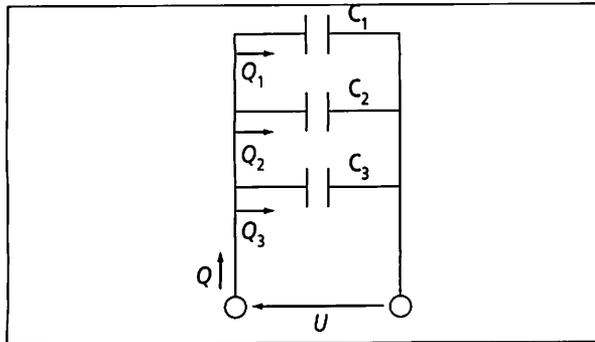


Fig. 4.06 : Groupement de condensateurs en parallèle.

Les quantités d'électricité sont égales à :

$$Q_1 = C_1 U ; Q_2 = C_2 U ; Q_3 = C_3 U$$

La quantité d'électricité totale est donc :

$$Q = (C_1 + C_2 + C_3) U$$

L'ensemble des trois condensateurs est équivalent à un condensateur unique dont la capacité  $C$  est égale à la **somme des capacités** des condensateurs du groupement :

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

L'association en **parallèle** permet d'obtenir une **capacité plus importante** que celles des condensateurs utilisés dans le groupement.

### ■ GROUPEMENT EN SÉRIE

Dans le groupement en série de trois condensateurs, la quantité d'électricité  $Q$  emmagasinée par le groupement **est la même que celle qu'emmagasine chaque condensateur**.

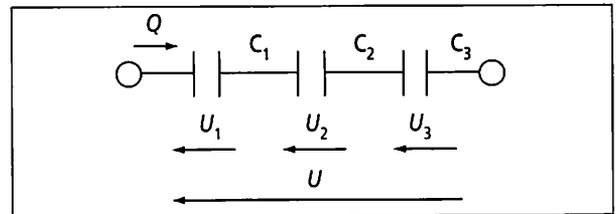


Fig. 4.07 : Groupement de condensateurs en série.

Les tensions aux bornes de chaque condensateur sont :

$$U_1 = \frac{Q}{C_1} ; U_2 = \frac{Q}{C_2} ; U_3 = \frac{Q}{C_3}$$

$$\text{D'où : } U = Q \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

L'ensemble des trois condensateurs **en série** est équivalent à un condensateur unique dont **l'inverse de la capacité  $\frac{1}{C}$  est égal à la somme des inverses des capacités** des condensateurs du groupement.

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

Dans un groupement **série**, la **capacité équivalente est plus petite** que celles des condensateurs du groupement.

### 3 Charge et décharge d'un condensateur à travers une résistance

#### ■ CHARGE

Dans le montage de la figure 4.08, un condensateur, préalablement déchargé, est alimenté par un générateur, de f.e.m.  $E$  et de résistance interne négligeable, à travers une résistance de valeur  $R$  lorsque l'inverseur  $K$  est en position 1.

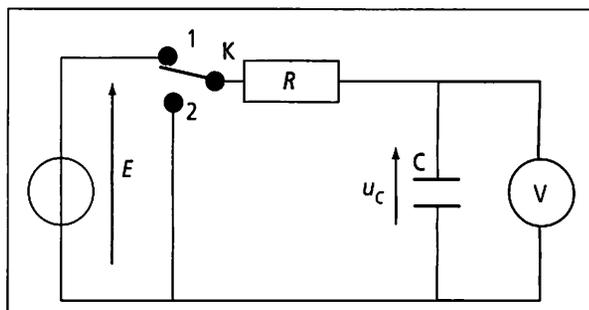


Fig. 4.08 : Montage pour le relevé de la courbe de charge d'un condensateur.

La tension  $u_c$  aux bornes du condensateur est relevée à intervalles de temps réguliers. La courbe ci-contre représente les variations de  $u_c$  en fonction du temps lorsque :

$$E = 10 \text{ V}; R = 10 \text{ k}\Omega; C = 1000 \text{ }\mu\text{F}$$

La courbe de charge d'un condensateur est une **exponentielle**.

Au bout d'un certain temps, la **tension  $u_c$  ne varie plus, le condensateur est chargé**.

#### • TEMPS DE CHARGE

Le temps de charge d'un condensateur de capacité  $C$  à travers une résistance de valeur  $R$  est fonction du **produit  $RC$** .

Le **produit  $RC$**  est appelé **constante de temps du circuit** et représenté par la lettre grecque tau ( $\tau$ ) :

$$\tau = R \cdot C \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \tau \text{ en secondes,} \\ R \text{ en ohms,} \\ C \text{ en farads.} \end{cases}$$

Plus la constante de temps est grande, plus la charge du condensateur est lente.

Dans l'expérience précédente, on a :

$$\tau = (10 \times 10^3) \times (1000 \cdot 10^{-6}) \text{ soit } \tau = 10 \text{ s.}$$

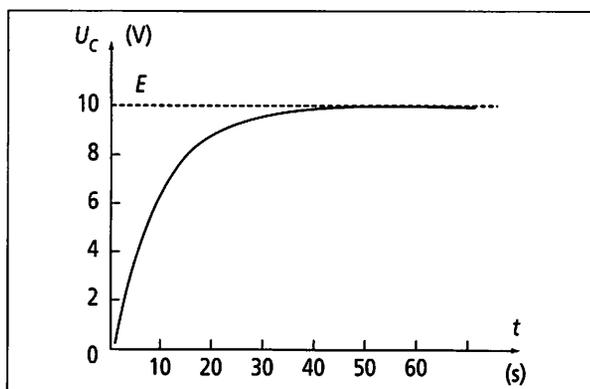


Fig. 4.09 : Courbe de charge d'un condensateur.

#### Remarque :

**Théoriquement, la charge du condensateur ne se termine jamais.**

**Pratiquement, un condensateur est considéré comme totalement chargé au bout d'un temps  $t$  égal à 5 fois la constante de temps. La tension à ses bornes est alors égale à 99 % de la tension d'alimentation.**

#### ■ DÉCHARGE

Un condensateur, préalablement chargé sous une tension  $E$ , est relié à une résistance  $R$ .

Les variations de la tension  $u_c$  aux bornes du condensateur en fonction du temps sont représentées ci-contre, les valeurs du montage étant :

$$E = 10 \text{ V}; R = 10 \text{ k}\Omega; C = 1000 \text{ }\mu\text{F}$$

Au début de la décharge, la tension est maximale et égale à  $E$ .

Au bout d'un temps égal à 5 fois la constante de temps, soit 50 s, le condensateur est complètement déchargé, la tension à ses bornes est nulle.

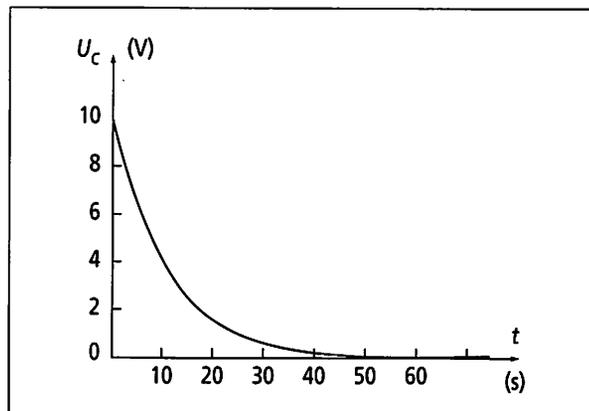


Fig. 4.10 : Courbe de décharge du condensateur.

### Remarques :

- Le courant de décharge  $i$  est proportionnel à la tension  $u_c$  :

$$i = \frac{u_c}{R}$$

La courbe du courant de décharge est donnée ci-contre.

- Durant la charge, les variations du courant sont les mêmes que pendant la décharge (fig. 4.11). Le courant de charge est maximal en début de charge.

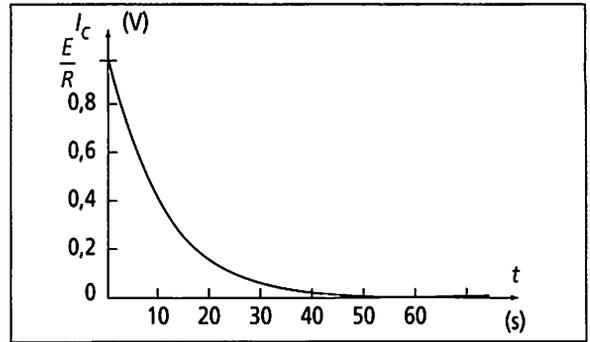


Fig. 4.11 : Courant de charge et de décharge du condensateur.

## 4 Utilisation du circuit RC – Temporisation

### ■ PRINCIPE

Le groupement d'une **résistance R** avec un **condensateur C**, appelé encore **circuit RC**, permet d'apporter un **retard connu** à l'établissement d'une tension dans un circuit.

Le **circuit RC** est un circuit de temporisation.

### ■ EXEMPLE DE TEMPORISATION À CIRCUIT RC (FIG. 4.12)

Dans ce montage, la tension aux bornes du condensateur commande l'entrée d'un **opérateur logique NON**. Son fonctionnement est le suivant :

- à l'état initial : C est déchargé, l'entrée E est à l'état logique 0, la sortie S à l'état 1,

- dès la mise sous tension :  $U_c$  augmente suivant la courbe de charge du condensateur, et la **sortie S de l'opérateur NON change d'état lorsque  $U_c$  atteint une valeur caractéristique du circuit utilisé** (ici 6,3 V pour le circuit CD 4011 alimenté sous 9 V).

Ainsi le temps pour provoquer un changement d'état en sortie du montage est fonction de la constante de temps du circuit RC.

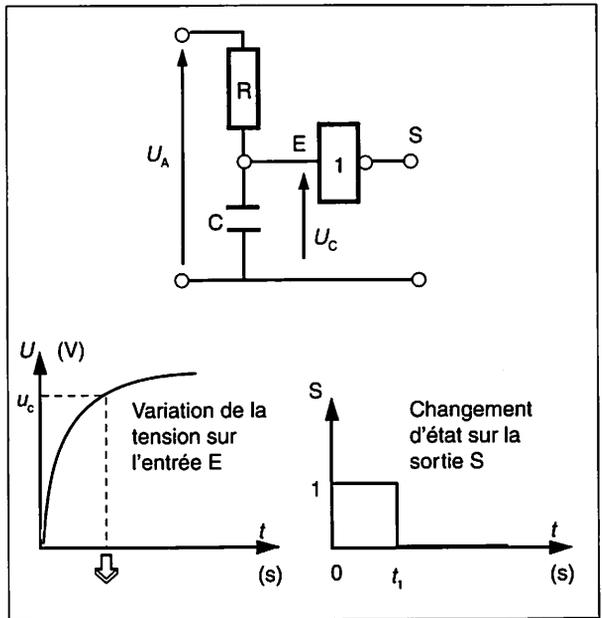


Fig. 4.12 : Circuit de temporisation.

## 5 Caractéristiques des condensateurs usuels

### ■ TENSION DE SERVICE

Lorsque les armatures du condensateur sont soumises à une tension trop élevée, une étincelle perce le diélectrique, ce qui le met hors service. Ce **phénomène est appelé claquage du condensateur**. La **tension de service**, qui dépend de la nature et de l'épaisseur du diélectrique, **est la tension à ne pas dépasser pour éviter le claquage**.

### ■ NATURE DU DIÉLECTRIQUE

Les condensateurs à l'aluminium et au tantale sont à **électrolyte liquide**; **polarisés** et de forte capacité, ils sont utilisés dans les alimentations ou comme découplage.

Les condensateurs au polyester ont comme diélectrique un film plastique; non polarisés, on les emploie pratiquement dans tous les domaines.

Les condensateurs céramique, à très faibles pertes en haute fréquence, sont utilisés en radio-électricité.

## ESSENTIEL À RETENIR

### CAPACITÉ D'UN CONDENSATEUR

$$Q = CU$$

$Q$  en coulombs,  
 $C$  en farads,  
 $U$  en volts.

### ÉNERGIE EMMAGASINÉE

$$W = \frac{1}{2} CU^2$$

$W$  en joules,  
 $C$  en farads,  
 $U$  en volts.

### GROUPEMENTS DE CONDENSATEURS

#### ■ Groupement parallèle

La capacité du condensateur équivalent est égale à la somme des capacités des condensateurs du groupement.

$$C_{\text{eq}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

#### ■ Groupement série

L'inverse de la capacité du condensateur équivalent est égal à la somme des inverses des capacités des condensateurs du groupement.

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

## TEST RAPIDE

**T. 1** Un condensateur de  $100 \mu\text{F}$  est chargé sous une tension de  $30 \text{ V}$ .

Quelle est la quantité d'électricité emmagasinée ?

**Réponse :**  $30 \text{ mC}$ ;  $3 \text{ mC}$ ;  $0,3 \text{ mC}$ .

**T. 2** Un condensateur de  $100 \mu\text{F}$  est placé en série avec un condensateur de  $25 \mu\text{F}$ .

Calculer la capacité équivalente au groupement.

**Réponse :**  $125 \mu\text{F}$ ;  $62,5 \mu\text{F}$ ;  $20 \mu\text{F}$ .

**T. 3** Un condensateur de  $100 \mu\text{F}$  est placé en parallèle avec un condensateur de  $25 \mu\text{F}$ .

Calculer la capacité équivalente au groupement.

**Réponse :**  $125 \mu\text{F}$ ;  $62,5 \mu\text{F}$ ;  $20 \mu\text{F}$ .

**T. 4** Un condensateur de  $100 \mu\text{F}$  est chargé sous une tension de  $30 \text{ V}$ .

Quelle est l'énergie électrique emmagasinée ?

**Réponse :**  $45 \text{ mJ}$ ;  $90 \text{ mJ}$ ;  $1,5 \text{ mJ}$ .

**T. 5** Un condensateur de  $100 \mu\text{F}$  est chargé au travers d'une résistance de  $10 \text{ k}\Omega$ .

Quelle est la constante de temps du circuit ?

**Réponse :**  $1 \text{ s}$ ;  $0,1 \text{ s}$ ;  $5 \text{ s}$ .

**T. 6** Un condensateur de  $50 \mu\text{F}$  est alimenté par une tension de  $10 \text{ V}$  au travers d'une résistance de  $10 \text{ k}\Omega$ .

Calculer le courant de début de charge.

**Réponse :**  $0,5 \text{ mA}$ ;  $1 \text{ mA}$ ; *infini*; *nul*.

# EXPÉRIMENTATION

## CALCULS DE CHARGE ET DE DÉCHARGE

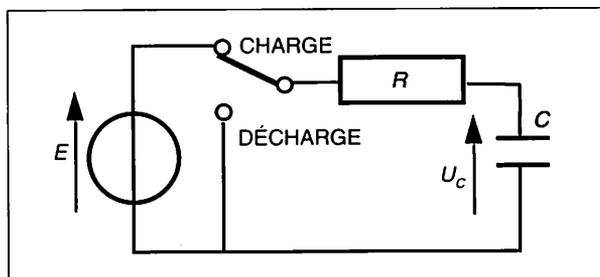
### COURBES UNIVERSELLES

Le graphique ci-dessous porte :

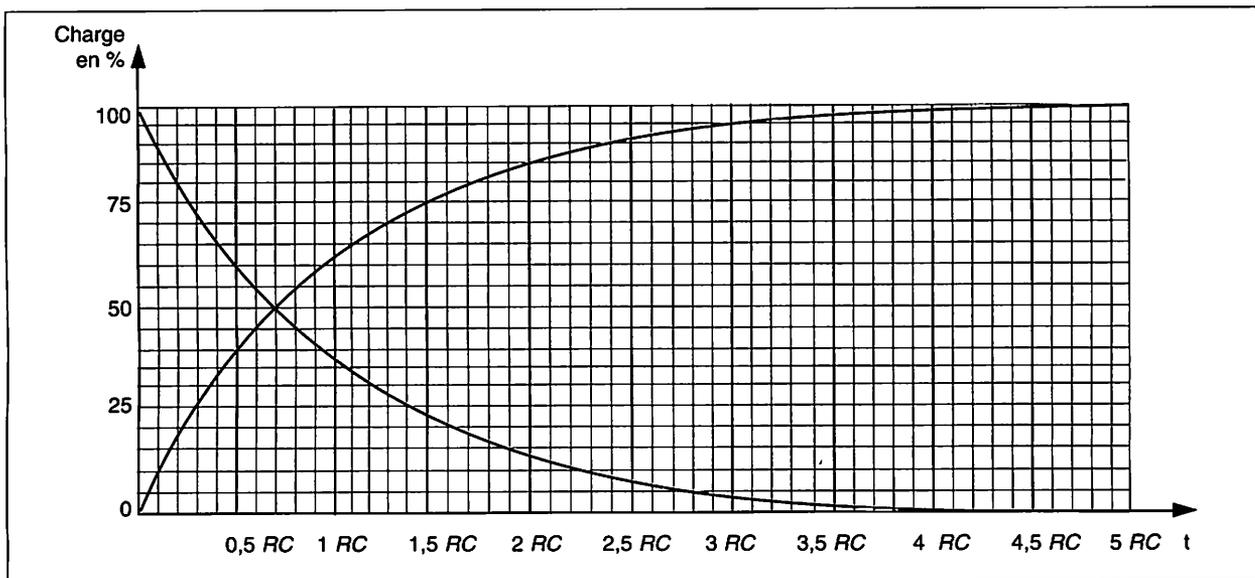
- en abscisses, le temps gradué en nombre de fois la constante de temps  $\tau = RC$ ,
- en ordonnées, le pourcentage de la tension de charge maximale.

Un condensateur étant alimenté selon le montage ci-contre, les courbes permettent de déterminer la tension à ses bornes à un instant donné durant la charge ou la décharge.

### CHARGE ET DÉCHARGE DU CONDENSATEUR C



### COURBES UNIVERSELLES DE CHARGE ET DÉCHARGE D'UN CONDENSATEUR



#### Exemple d'utilisation :

Le condensateur  $C$ , initialement déchargé, est chargé à l'aide du montage proposé ci-dessus.

Les valeurs utilisées sont :

$E = 10 \text{ V}$ ;  $R = 10 \text{ k}\Omega$ ;  $C = 1000 \text{ }\mu\text{F}$ .

Quelle est la tension aux bornes du condensateur 7 secondes après le début de la charge ?

La constante de temps du circuit  $RC$  est égale à :

$\tau = RC$  soit  $\tau = 10 \text{ s}$ .

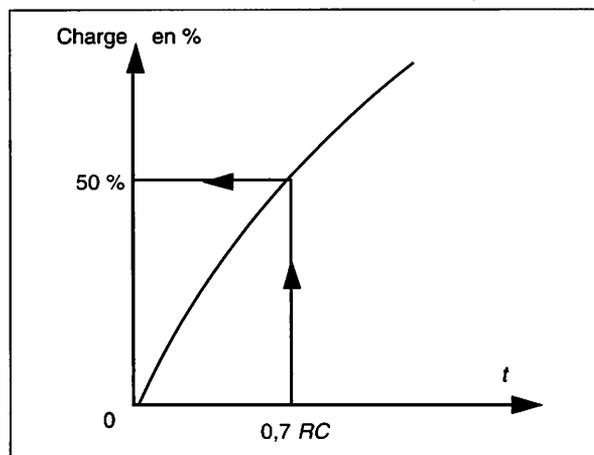
Le temps de charge étant 7 s :

$$\frac{t}{\tau} = \frac{7}{10} \text{ soit } t = 0,7 \tau.$$

En reportant cette valeur en abscisses de la courbe de charge, on constate que ce temps correspond à un pourcentage de charge de 50 %.

La tension maximale de charge est égale à :  $E = 10 \text{ V}$ .

Au bout de 7 secondes, la tension aux bornes du condensateur est égale à :  $U_C = E \times 50 \%$  soit  $U_C = 5 \text{ V}$ .



## EXERCICE RÉSOLU

### Énoncé

Un condensateur de  $47 \mu\text{F}$  et un autre de  $33 \mu\text{F}$  supportent la même tension maximale, soit  $25 \text{ V}$ . On les branche en série puis en parallèle.

Calculer dans chaque cas :

- la capacité équivalente,
- la tension maximale que peut supporter le groupement,
- l'énergie emmagasinée par le groupement lorsqu'il est chargé sous la tension maximale.

#### Méthode :

a. Dans chacun des cas, appliquer la relation des groupements.

b. Calculer les tensions appliquées à chaque condensateur.

c. Appliquer la relation relative à l'énergie emmagasinée.

#### Solution proposée :

##### Cas du groupement série

a. La capacité équivalente est telle que :

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{33} + \frac{1}{47}$$

soit  $C = 19,4 \mu\text{F}$ .

b. La tension aux bornes du groupement se répartit de manière inversement proportionnelle aux capacités :

$$C_1 U_1 = C_2 U_2$$

Le condensateur de la capacité la plus faible, soit  $33 \mu\text{F}$ , supporte la plus forte tension.

La tension maximale étant  $25 \text{ V}$ , on a :

$$C_1 U_1 = 33 \times 10^{-6} \times 25.$$

La tension supportée par l'autre condensateur de  $47 \mu\text{F}$ , est alors :

$$U_2 = \frac{C_1 U_1}{C_2} = \frac{33 \times 10^{-6} \times 25}{47 \times 10^{-6}}$$

soit :  $U_2 = 17,5 \text{ V}$ .

La tension maximale supportée par le groupement est la somme des tensions aux bornes de chaque condensateur, soit :

$$U_{\text{MAX}} = 42,5 \text{ V}.$$

c. L'énergie emmagasinée est égale à :

$$W = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} \times 19,4 \times 10^{-6} \times (42,5)^2$$

soit :  $W = 17,5 \text{ mJ}$ .

##### Cas du groupement parallèle

a. Les capacités s'ajoutent :

$$C = C_1 + C_2 \text{ soit } C = 80 \mu\text{F}.$$

b. Chaque capacité est soumise à la même tension :

$$U_{\text{MAX}} = 25 \text{ V}.$$

c. L'énergie emmagasinée est égale à :

$$W = \frac{1}{2} C U^2 \text{ soit } W = 25 \text{ mJ}.$$

#### Remarques :

C'est le groupement parallèle qui emmagasine le plus d'énergie et la tension maximale supportée est la même pour chaque condensateur.

Dans le groupement série il faut s'assurer que la tension supportée par le condensateur de plus faible capacité est compatible avec sa tension de service.

## EXERCICES À RÉSOUDRE

**E. 1** On dispose de trois condensateurs identiques, de capacité  $100 \mu\text{F}$  et de tension de service  $25 \text{ V}$ . Déterminer la capacité et la tension de service du groupement des trois condensateurs :

- en série,
- en parallèle.

**E. 2** On dispose de condensateurs identiques, de capacité  $500 \mu\text{F}$  et de tension de service  $25 \text{ V}$ .

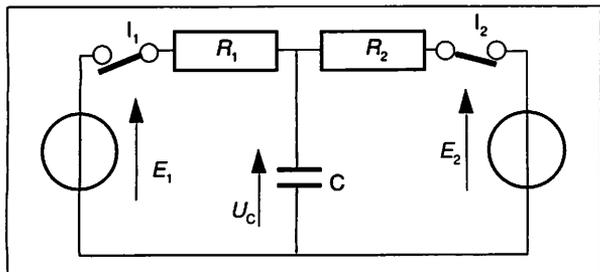
- Déterminer les groupements à réaliser pour obtenir une capacité de :  $250 \mu\text{F}$  ;  $1\,500 \mu\text{F}$  ;  $1\,250 \mu\text{F}$ .
- Calculer la tension de service de chaque groupement.

**E. 3** Un condensateur de  $4,7 \mu\text{F}$  initialement chargé sous une tension de  $12 \text{ V}$  est déchargé à travers une résistance de  $10 \text{ k}\Omega$ .

Calculer :

- l'énergie dissipée pendant la décharge,
- la durée de cette décharge,
- le courant circulant dans la résistance au début de la décharge,
- le courant après  $20 \text{ ms}$  de décharge.

**E. 4** On dispose du montage ci-dessous dans lequel :  
 $R_1 = 33 \text{ k}\Omega$  ;  $R_2 = 470 \text{ k}\Omega$  ;  
 $E_1 = 30 \text{ V}$  ;  $E_2 = 100 \text{ V}$  ;  
 $C = 100 \mu\text{F}$ .



a. Le condensateur  $C$  est initialement déchargé. On ferme l'interrupteur  $I_1$ . Au bout de combien de temps la tension  $u_c$  atteint-elle  $20 \text{ V}$  ?

b. Combien de temps faut-il pour que le condensateur soit complètement chargé (à  $1\%$  près) ?

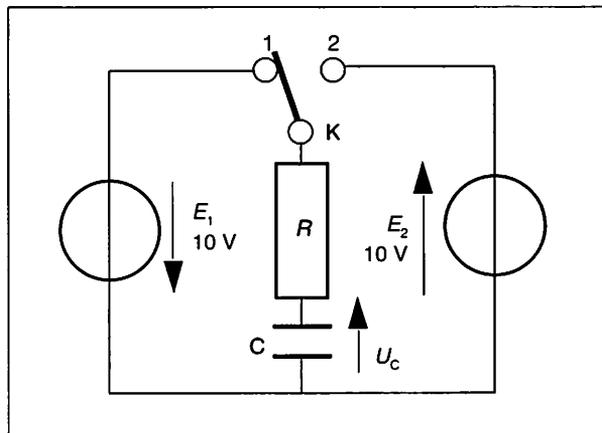
c. Lorsque  $C$  est complètement chargé, on ouvre  $I_1$  et on ferme  $I_2$ . Quelle sera la valeur de la tension  $u_c$  au bout de  $5 \text{ secondes}$  ?

**E. 5** Dans le montage ci-dessous, le condensateur  $C$  est initialement complètement déchargé. On a :

$$R = 10 \text{ k}\Omega \text{ et } C = 500 \mu\text{F}.$$

a. On bascule l'inverseur  $K$  en position 1. Quelle sera la valeur de la tension  $u_c$  aux bornes du condensateur  $3 \text{ secondes}$  après le basculement ?

b. L'inverseur  $K$  est maintenu en position 1 jusqu'à ce que le condensateur soit complètement chargé. Calculer le temps minimum nécessaire à cette charge.



c. Lorsque le condensateur est complètement chargé, on bascule l'inverseur  $K$  en position 2. Au bout de combien de temps la tension aux bornes du condensateur sera-t-elle nulle ?

# MESURES SUR DES APPLICATIONS PROFESSIONNELLES

## CONTACTEURS – ALIMENTATION CONTINUE

### ■ CONTEXTE TECHNIQUE

Dans le cadre de la modification d'une armoire de commande d'un système technique automatisé, il est prévu de doubler le nombre de relais auxiliaires pour augmenter le nombre de fonctions d'interfaçage avec des capteurs électroniques.

Les contacteurs, actuellement au nombre de dix, sont du type courant continu, basse consommation :

- bobine 24 V courant continu,
  - plage de tension de fonctionnement 0,7 à 1,3  $U_N$ .
- Il faut déterminer si l'alimentation en courant continu, actuellement installée, peut supporter cette extension d'équipement.

### ■ TRAVAIL DEMANDÉ

#### 1. ÉTUDE DES CONTACTEURS

1.1. Alimenter la bobine d'un contacteur sous sa tension nominale. Mesurer la tension  $U$  et l'intensité correspondante  $I$ .

1.2. Calculer la résistance de la bobine.

#### 2. ÉTUDE DE L'ALIMENTATION

2.1. Mesurer la tension disponible  $U$  en fonction de l'intensité débitée  $I$ .

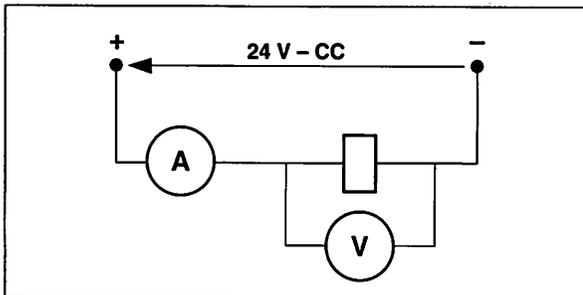
2.2. Tracer la courbe  $U = f(I)$ .

2.3. Déterminer si les conditions d'alimentation de vingt relais sont satisfaites.

### Exemple de résultats

#### ■ 1. ÉTUDE DES CONTACTEURS

1.1. Schéma du montage :



Mesures :  $U = 24 \text{ V}$  ;  $I = 0,0625 \text{ A}$

1.2. Calcul de la résistance :

$$R = \frac{U}{I} = \frac{24}{0,0625} \text{ soit } R = 384 \Omega$$

#### ■ 2. ÉTUDE DE L'ALIMENTATION

L'alimentation débite dans un rhéostat  $Rh$  d'après le schéma ci-contre. La valeur minimale de  $Rh$  dépend de l'intensité maximale que peut fournir l'alimentation :

$$Rh_{\text{MINI}} = \frac{U}{I_{\text{MAX}}}$$

2.1. Schéma du montage :

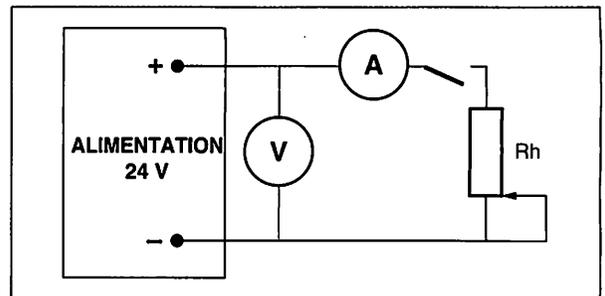
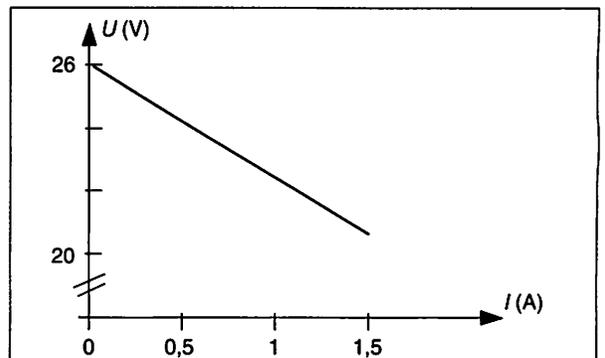


Tableau de mesures :

$I \text{ (A)}$	0	0,5	1	1,5
$U \text{ (V)}$	26	24,2	22,4	20,6

2.2. Tracé de la courbe  $U = f(I)$  :



2.3. Pour  $I = 20 I_N = 1,25 \text{ A}$  :  $U = 21,5 \text{ V}$

Le minimum de tension nécessaire est :

$$U = 0,7 U_N = 16,8 \text{ V}$$

L'alimentation convient pour les vingt relais.

# COMPLÉMENTS TECHNOLOGIQUES

## 1 Code des couleurs

COULEUR	PREMIER CHIFFRE	DEUXIÈME CHIFFRE	MULTIPLICATEUR	TOLÉRANCE
ARGENT			$\times 0,01 \Omega$	$\pm 10 \%$
OR			$\times 0,1 \Omega$	$\pm 5 \%$
NOIR			$\times 1 \Omega$	$\pm 20 \%$
MARRON	1	1	$\times 10 \Omega$	$\pm 1 \%$
ROUGE	2	2	$\times 100 \Omega$	$\pm 2 \%$
ORANGE	3	3	$\times 1 \text{ k}\Omega$	
JAUNE	4	4	$\times 10 \text{ k}\Omega$	
VERT	5	5	$\times 100 \text{ k}\Omega$	
BLEU	6	6	$\times 1 \text{ M}\Omega$	
VIOLET	7	7		
GRIS	8	8		
BLANC	9	9		

Les résistances usuelles portent l'indication de leur valeur ainsi que la **tolérance** sur cette valeur sous forme de **quatre anneaux** de couleur :

- le premier anneau indique le **premier chiffre significatif de la valeur en ohms**,
- le deuxième anneau indique le **deuxième chiffre significatif de la valeur en ohms**,
- le troisième anneau indique le **coefficient à appliquer aux deux premiers chiffres** pour obtenir la valeur en ohms,
- le quatrième anneau indique le **pourcentage de tolérance** sur la valeur en ohms.

**Exemple :**

Une résistance portant les couleurs :

jaune      violet      rouge      or  
4          7           $\times 100$        $\pm 5 \%$

aura pour valeur :

$$R = 4\,700 \Omega \pm 5 \%$$

soit :  $4\,465 \Omega \leq R \leq 4\,935 \Omega$ .

## 2 Séries normalisées

La série définit le nombre des premiers chiffres significatifs de la valeur de la résistance sur lequel est appliqué un coefficient multiplicateur puissance 10 (de  $10^{-2}$  à  $10^6$ ). Le numéro de la série indique le nombre de valeurs dans une décade. Ainsi la série  $E_{12}$  comporte 12 valeurs entre 10 et  $100 \Omega$ .

À chaque série correspond une tolérance :

- $E_3$  : 40 %,
- $E_6$  : 20 %,
- $E_{12}$  : 10 %,
- $E_{24}$  : 5 %.

$E_3$	$E_6$	$E_{12}$	$E_{24}$
10	10	10	10
			11
			12
			13
			15
			18
			20
			22
			24
			27
			30
			33
22	22	33	33
			38
			39
			43
			47
			51
			56
			62
			68
			75
			82
			91

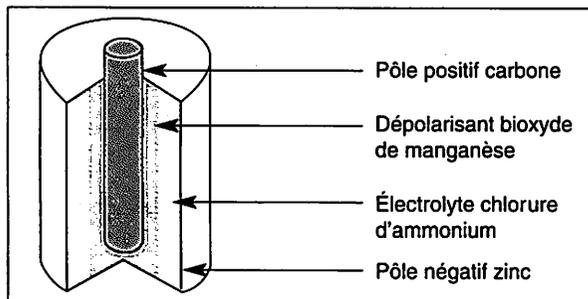
## COMPLÉMENTS TECHNOLOGIQUES

### 3 Piles

#### ■ PILE LECLANCHÉ

La chaîne conductrice est constituée par du **carbone** (électrode positive) entouré de **bioxyde de manganèse** (dépolarisant); l'électrolyte est une solution de **chlorure d'ammonium**, (fixé par de la gélatine); l'électrode négative est réalisée en **zinc**.

La f.e.m. d'une pile de ce type est de **1,5 V**.



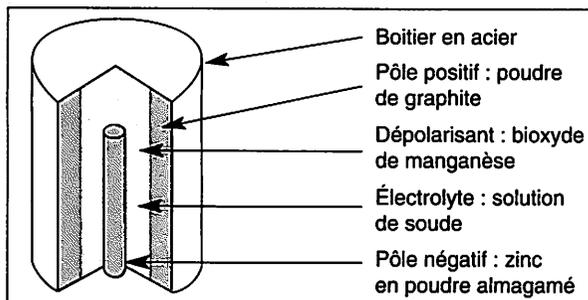
Coupe simplifiée d'une pile Leclanché.

#### ■ PILE ALCALINE

Elle est constituée par un boîtier en acier contenant :

- de la poudre de **graphite** (électrode positive),
- du **bioxyde de manganèse** (dépolarisant),
- de la poudre de **zinc** mélangée à une solution de **potasse** (électrolyte) dans laquelle plonge une tige de **laiton** reliée à la borne négative.

La f.e.m. d'une pile de ce type est de **1,45 V**.



Coupe simplifiée d'une pile alcaline.

#### ■ CARACTÉRISTIQUES DES PILES ALCALINES

TYPE	LR 03	LR 6	LR 14	3LR 12	6LR 61
TENSION (V)	1,5	1,5	1,5	4,5	9
CAPACITÉ (mA. h)	1 050	2 250	7 500	4 400	500

### 4 Accumulateurs au plomb

#### ■ CONSTITUTION

La chaîne conductrice est constituée par :

- des plaques recouvertes d'**oxyde de plomb** (pôle positif),
  - de l'**acide sulfurique dilué avec de l'eau pure** (électrolyte),
  - des plaques de plomb pur spongieux (pôle négatif).
- L'ensemble est logé dans un caisson.

#### ■ CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT

À la différence des piles un accumulateur peut être rechargé.

Au cours de la charge, la f.e.m. croît progressivement de 1,8 V à 2,2 V puis augmente rapidement en fin de charge. La charge est considérée comme complète lorsque la f.e.m. est supérieure à 2,4 V.

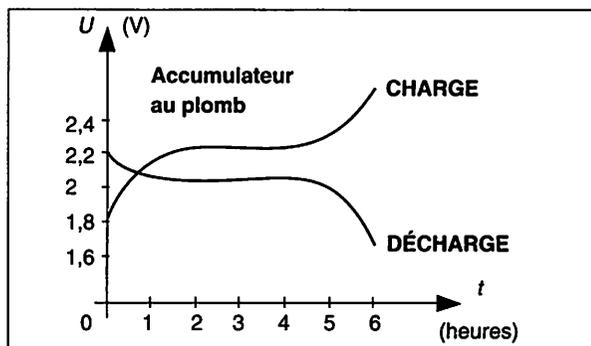
Au cours de la décharge, la f.e.m. décroît très vite au début jusqu'à 2 V, puis en fin de décharge elle diminue à nouveau très rapidement. La décharge ne doit pas être poursuivie en dessous de 1,8 V.

#### ■ CARACTÉRISTIQUES

La force électromotrice est en moyenne de 2 V par élément. Pour obtenir une f.e.m. plus importante, les éléments sont groupés en série (par exemple, 6 éléments pour une batterie de voiture de 12 V).

La résistance interne est très faible, de  $10^{-2} \Omega$  pour les petits accumulateurs à  $10^{-3} \Omega$  pour les plus gros.

La capacité est exprimée en ampères-heures (Ah). Une batterie de voiture a une capacité de l'ordre de 50 Ah.



Courbe de charge et de décharge.

### 5 Accumulateurs cadmium-nickel

La chaîne conductrice est constituée par de l'**hydroxyde de nickel** (plaque positive), une solution de soude (électrolyte) et du **cadmium** (plaque négative). Les caractéristiques de ce type d'accumulateur figurent sur le tableau suivant.

TYPE	R × 6	R × 14	R × 20	R × 22
TENSION (V)	1,2	1,2	1,2	8,4
CAPACITÉ (mA. h)	500	1 200	1 200	500

# **Circuits parcourus par un courant alternatif sinusoïdal**

## **Systeme monophasé**

- 5 Grandeurs fondamentales**
- 6 Association de dipôles  
élémentaires**
- 7 Puissances**

## **Systeme triphasé**

- 8 Couplages et puissances**

## 5

## Grandeurs fondamentales

## ÉLECTROTECHNIQUE

## 1 Régime variable

En régime variable, les courants et les tensions sont des grandeurs qui varient avec le temps.

Les courants variables peuvent être classés selon leur sens de circulation :

- **les courants unidirectionnels** circulent toujours dans le même sens. Les intensités et les tensions qui leur correspondent sont toujours du même signe (fig. 5.01).
- **Les courants bidirectionnels** ne circulent pas toujours dans le même sens. Les intensités et les tensions qui leur correspondent sont des nombres relatifs, tantôt positifs, tantôt négatifs (fig. 5.02).

## • NOTATIONS

Les **valeurs instantanées**, variables avec le temps sont écrites en **minuscules** :

$i, u, p, e, \dots$

Toutes les autres valeurs, indépendantes du temps sont écrites en **majuscules**. C'est le cas, par exemple, des valeurs maximales :

$\hat{I}, \hat{U}, \hat{P}, \hat{E} \dots$

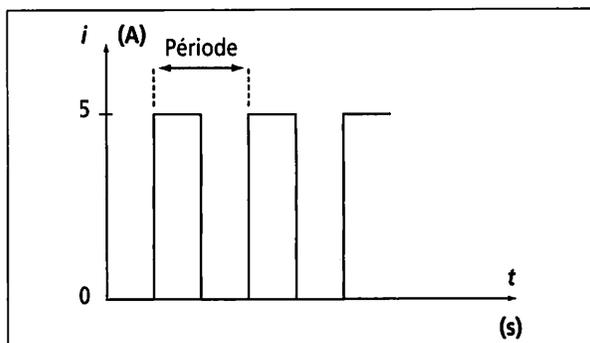


Fig. 5.01 : Courant unidirectionnel variable et périodique.

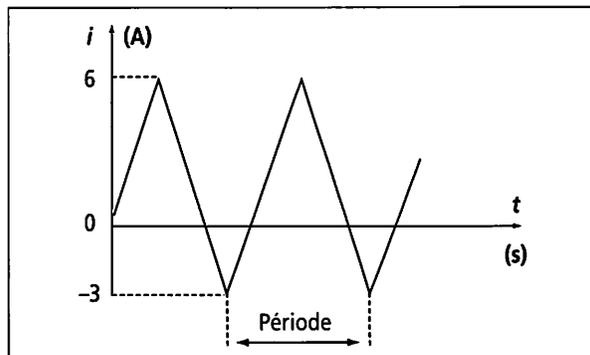


Fig. 5.02 : Courant bidirectionnel variable et périodique.

La période d'un courant périodique est l'intervalle de temps constant  $T$  qui sépare deux instants consécutifs où le courant se reproduit identiquement à lui-même.

La période s'exprime en **SECONDE (s)**.

Le symbole de la période est la lettre  $T$ .

En France, le courant distribué par le réseau EDF est périodique, sa période est :

$$T = 0,02 \text{ s} = 20 \text{ ms.}$$

Les figures 5.01 et 5.02 représentent des **courants périodiques**. Leur représentation est une répétition de figures identiques.

La fréquence d'un courant périodique est le nombre de périodes par secondes.

$$f = \frac{1}{T} \quad \left\{ \begin{array}{l} T \text{ en secondes,} \\ f \text{ en hertz.} \end{array} \right.$$

L'unité de fréquence est le **HERTZ (Hz)**.

En France, la fréquence du courant distribué par le réseau EDF est 50 Hz.

## 2 Valeurs caractéristiques

Les grandeurs tension  $u$  et intensité  $i$ , produites par un courant variable changent de valeur à chaque instant. Pour caractériser un courant, on définit :

- Des valeurs maximales notées  $\hat{U}, \hat{I}$ .
- Des valeurs moyennes notées  $\bar{U}, \bar{I}$ .
- Des valeurs efficaces notées  $U, I$ .

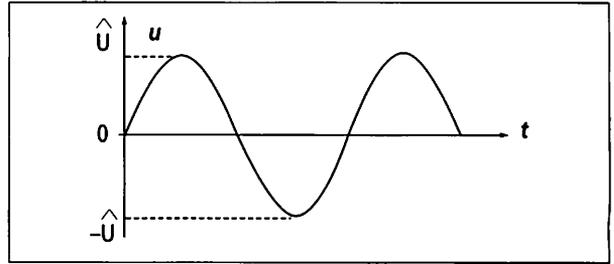


Fig. 5.03 : Valeur maximale.

La valeur maximale est le maximum de la fonction  $u(t)$  ou  $i(t)$ . Elle est aussi appelée valeur de crête et sa mesure s'effectue à l'oscilloscope (fig. 5.03).

L'intensité moyenne d'un courant variable est égale à l'intensité d'un courant continu qui transporterait pendant le même temps la même quantité d'électricité.

La figure 5.04 représente un courant continu d'intensité  $I$ . La quantité d'électricité  $Q$  qu'il transporte est représentée par l'aire  $A$  du rectangle  $OBCD$ .

Dans la figure 5.05 le courant périodique d'intensité  $i(t)$  transporte la quantité d'électricité représentée par l'aire  $A_1$  de la surface  $OBCDEF$ . L'aire  $A_2$  du rectangle  $OBEF$  représente la quantité d'électricité qui serait transportée par un courant continu d'intensité  $I$ .

Si  $A_1 = A_2$ ,  $I$  est la valeur moyenne de  $i(t)$ .

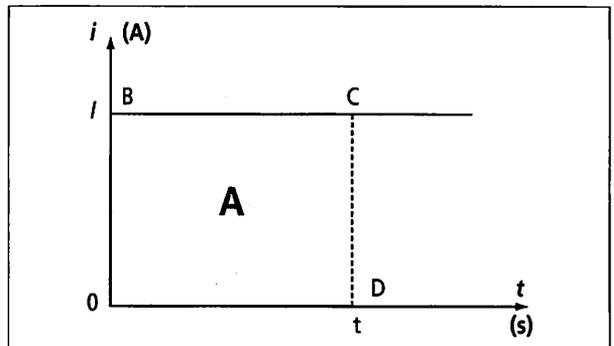


Fig. 5.04 : Quantité d'électricité  $Q = I \times t$  transportée par un courant continu.

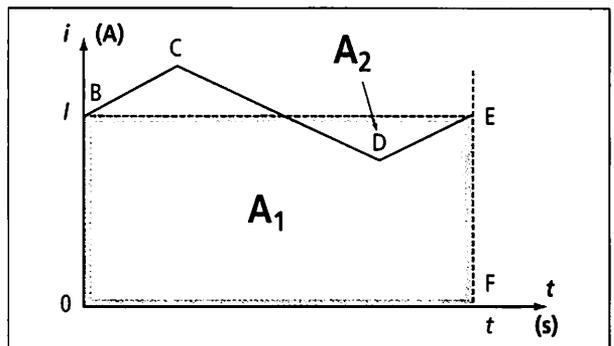


Fig. 5.05 : Valeur moyenne d'un courant périodique.

Remarques :

- La valeur moyenne d'un courant périodique est définie sur une période.
- Pour un courant bidirectionnel, les aires de surfaces situées en dessous de l'axe horizontal sont à compter négativement.
- Un courant dont la valeur moyenne est nulle est alternatif (fig. 5.03).

L'intensité efficace d'un courant variable est égale à l'intensité d'un courant continu qui produirait dans la même résistance le même dégagement de chaleur.

Le dégagement de chaleur produit dans une résistance est proportionnel au carré de l'intensité du courant. Il est représenté par l'aire comprise entre la courbe  $i^2(t)$  et l'axe horizontal. (fig. 5.06). Sur la figure 5.07, les deux aires  $A_1$  et  $A_2$  sont égales. Le courant variable  $i(t)$  produit le même dégagement de chaleur que le courant continu  $I$ .

$I$  est l'intensité efficace de  $i(t)$ .

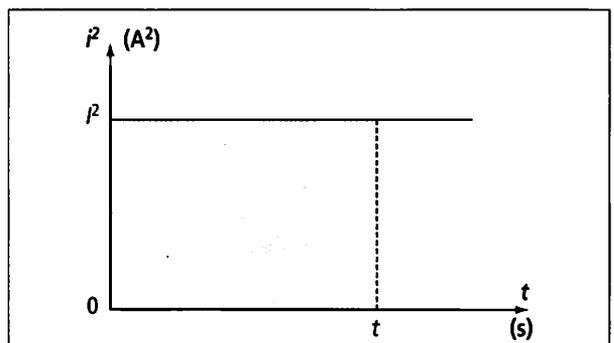


Fig. 5.06 : Chaleur dégagée par un courant  $I$ .

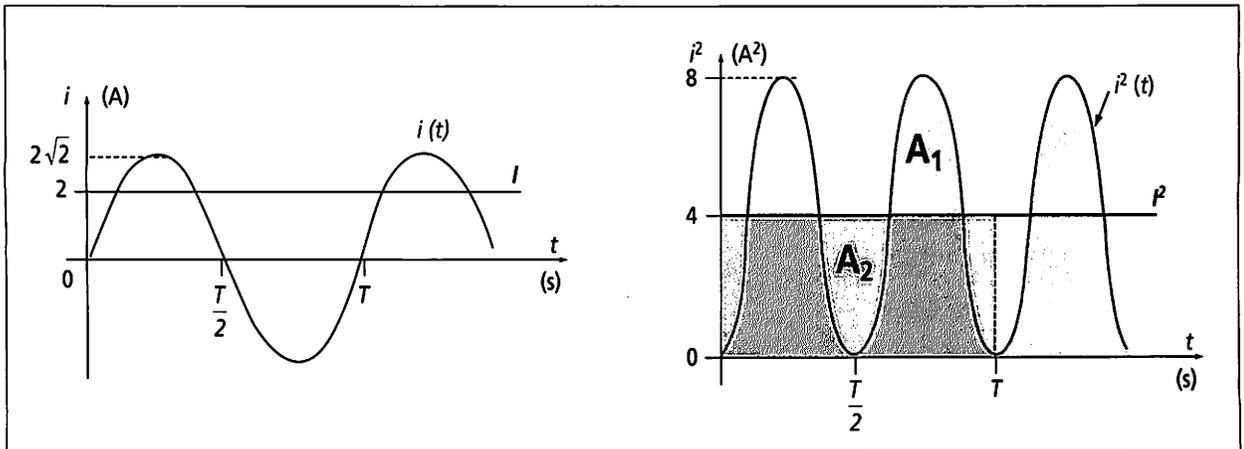


Fig. 5.07 : Pendant une période  $T$ , le courant continu  $I$  produit le même dégagement de chaleur que le courant variable  $i(t)$ .

### 3 Courant sinusoïdal

L'expression mathématique d'un courant alternatif sinusoïdal est de la forme :

$$i = \hat{i} \sin \omega t$$

$\hat{i}$  : valeur maximale de l'intensité en ampères,  
 $\omega$  : pulsation en radians par seconde,  
 $\omega t$  : phase de tension de l'instant  $t$ .

La figure 5.08 représente une tension alternative sinusoïdale. La courbe obtenue est une sinusoïde.

#### • PULSATION

La période de la fonction sinus est  $2\pi$ . Au bout d'une période  $T$ , il faut que :

$$\omega T = 2\pi$$

Soit :  $\omega = \frac{2\pi}{T}$   $\left\{ \begin{array}{l} \omega \text{ en radians par seconde,} \\ T \text{ en secondes.} \end{array} \right.$

L'unité de pulsation est le **RADIAN PAR SECONDE** (rad/s).

La période étant l'inverse de la fréquence, on peut écrire :

$$\omega = 2\pi f \quad \left\{ \begin{array}{l} \omega \text{ en radians par seconde,} \\ f \text{ en hertz.} \end{array} \right.$$

#### • VALEUR MOYENNE

La valeur moyenne d'une tension alternative est nulle.

#### • VALEUR EFFICACE

La valeur efficace d'une grandeur sinusoïdale est égale au quotient de sa valeur maximale par  $\sqrt{2}$ .

$$U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} \quad I = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}}$$

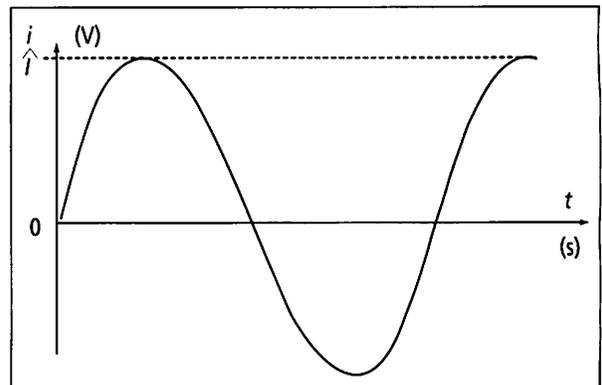


Fig. 5.08 : Représentation de  $i = \hat{i} \sin \omega t$ .

#### Remarques :

- En France, la fréquence du réseau EDF étant 50 Hz la pulsation est :

$$\omega = 100\pi \approx 314 \text{ rad/s.}$$

- En pratique, les grandeurs  $u$  et  $i$  d'un courant sont définies par leurs valeurs efficaces. Ainsi, une tension du réseau de 230 V signifie que sa valeur efficace est 230 V.

Sa valeur maximale est :

$$\hat{U} = 230 \sqrt{2} \approx 325 \text{ V}$$

- L'expression d'une tension sinusoïdale peut s'écrire indifféremment :

$$u = \hat{U} \sin \omega t$$

ou  $u = U \sqrt{2} \sin \omega t$  en remplaçant  $\hat{U}$  par  $U \sqrt{2}$ .

- Les multimètres en position courant alternatif indiquent la valeur efficace des tensions et courants alternatifs sinusoïdaux.

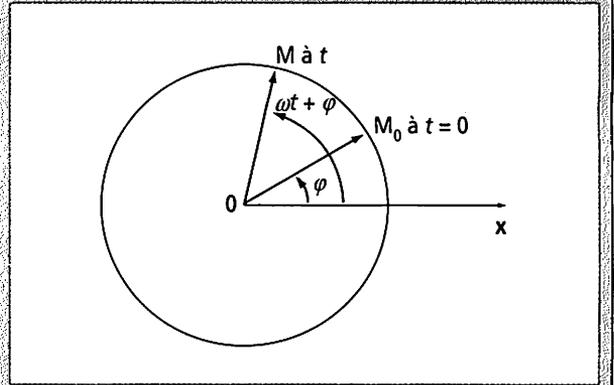
## 4 Représentation de Fresnel

A toute grandeur sinusoïdale est associé un vecteur  $\vec{OM}$  tel que :

- la norme de  $\vec{OM}$  est égale à la valeur maximale de la grandeur représentée, ainsi  $\|\vec{OM}\| = \hat{U}$  pour les tensions,  $\|\vec{OM}\| = \hat{I}$  pour les courants,
- l'angle  $(Ox, \vec{OM})$  est égal à la phase à l'instant  $t$ , la phase à l'instant  $t=0$  étant notée  $\varphi$  :

$$(\vec{Ox}, \vec{OM}) = \omega t + \varphi$$

Le vecteur  $\vec{OM}$  est le vecteur de Fresnel associé à la tension  $u = \hat{U} \sin(\omega t + \varphi)$  ou à l'intensité  $i = \hat{I} \sin(\omega t + \varphi)$ .



La figure 5.09 représente deux tensions sinusoïdales de même fréquence.

Pour représenter ces deux tensions par la méthode de Fresnel, on porte les vecteurs  $\vec{OM}_1$  et  $\vec{OM}_2$  représentant  $u_1$  et  $u_2$  à l'instant initial  $t = 0$ .

**Remarque :**

La valeur efficace d'une grandeur ayant plus d'intérêt, en électricité, que sa valeur maximale, l'échelle adoptée pour la construction des vecteurs de Fresnel est choisie de façon que la norme du vecteur représente la valeur efficace de la grandeur associée.

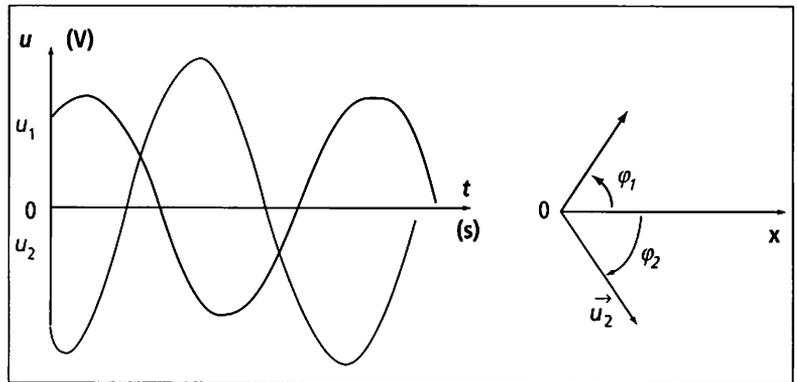


Fig. 5.09 :  $u_1 = \hat{U}_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$ ;  $u_2 = \hat{U}_2 \sin(\omega t + \varphi_2)$ .

**Le déphasage est l'angle que font entre eux deux vecteurs de Fresnel représentant deux grandeurs de même fréquence.**

**Le déphasage est égal à la différence des phases à l'instant origine :  $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ .**

Lorsque le **déphasage est nul** (fig. 5.10), les tensions  $u_1$  et  $u_2$  sont **en phase**.

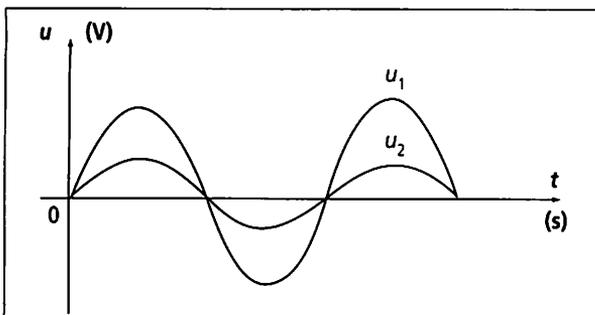


Fig. 5.10 : Tensions en phase  $\varphi = 0^\circ$ .

Lorsque le **déphasage est de  $\pi$  radians ou  $180^\circ$** , les tensions sont en **opposition de phase** (fig. 5.11).

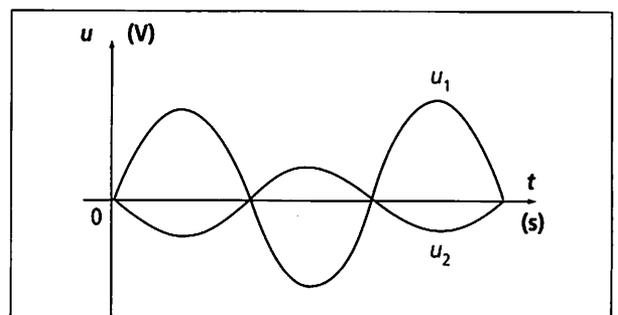


Fig. 5.11 : Tensions en opposition de phase  $\varphi = 180^\circ$ .

## 5 Loi des mailles

Lorsque deux dipôles sont en série, la loi des mailles permet d'écrire à chaque instant :

$$u = u_1 + u_2$$

En notation vectorielle, la loi des mailles s'écrit :

$$\vec{U} = \vec{U}_1 + \vec{U}_2$$

### Exemple

Dans le schéma de la figure 5.12  $u_1$  et  $u_2$  sont deux tensions alternatives de valeurs efficaces  $U_1 = 3 \text{ V}$ ;  $U_2 = 4 \text{ V}$ ;  $u_2$  est en avance de phase de  $90^\circ$  par rapport à  $u_1$ .

$$u_1 = 3 \sqrt{2} \sin \omega t$$

$$u_2 = 4 \sqrt{2} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

La représentation de Fresnel permet de déterminer les caractéristiques de la tension  $u = u_1 + u_2$  (fig. 5.13).

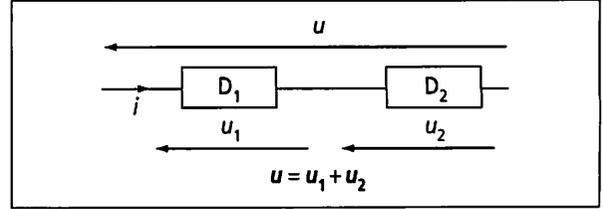


Fig. 5.12 : Loi des mailles.

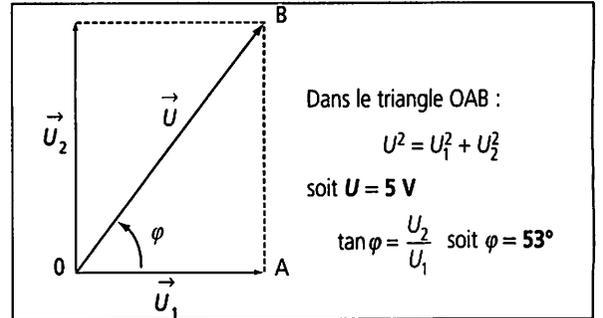


Fig. 5.13 : Méthode de Fresnel.

## 6 Loi des nœuds

Lorsque deux dipôles sont en parallèle, la loi des nœuds permet d'écrire à chaque instant :

$$i = i_1 + i_2$$

En notation vectorielle, la loi des nœuds s'écrit :

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

### Exemple

Dans le schéma de la figure 5.14  $i_1$  et  $i_2$  sont deux intensités alternatives de valeurs efficaces  $I_1 = 100 \text{ mA}$ ,  $I_2 = 50 \text{ mA}$ .

L'intensité  $i_2$  est en retard de phase de  $60^\circ$  par rapport à  $i_1$ .

$$i_1 = 100 \sqrt{2} \sin \omega t \text{ (en mA)}$$

$$i_2 = 50 \sqrt{2} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{3} \right)$$

La représentation de Fresnel permet de déterminer graphiquement les caractéristiques du courant  $i$  (fig. 5.15).

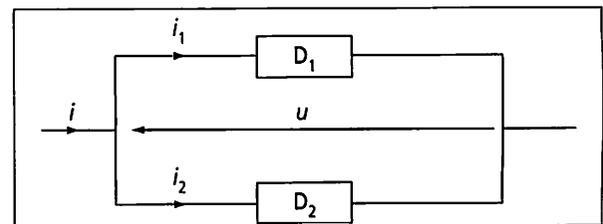


Fig. 5.14 : Loi des nœuds :  $i = i_1 + i_2$ .

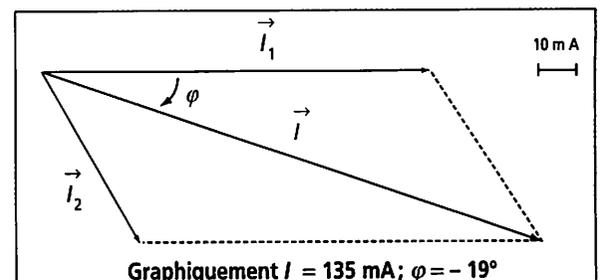


Fig. 5.15 : Méthode de Fresnel.

# ESSENTIEL À RETENIR

## FRÉQUENCE ET PÉRIODE

La fréquence est le nombre de périodes par secondes, soit :

$$f = \frac{1}{T} \quad \begin{array}{l} f \text{ en hertz,} \\ T \text{ en secondes.} \end{array}$$

## PULSATION

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad \begin{array}{l} \omega \text{ en radians par secondes,} \\ T \text{ en secondes,} \\ f \text{ en hertz.} \end{array}$$

## COURANT ET TENSION INSTANTANÉS

C'est l'expression mathématique de la grandeur sinusoïdale.

$$i = \hat{i} \sin \omega t \quad u = \hat{U} \sin \omega t$$

## COURANT ET TENSION EFFICACES

La valeur efficace d'une grandeur sinusoïdale est égale au quotient de sa valeur maximale par  $\sqrt{2}$ .

$$U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} \quad I = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}}$$

## COURANT ET TENSION MOYENS

La valeur moyenne d'une grandeur alternative est nulle.

## LOI DES MAILLES

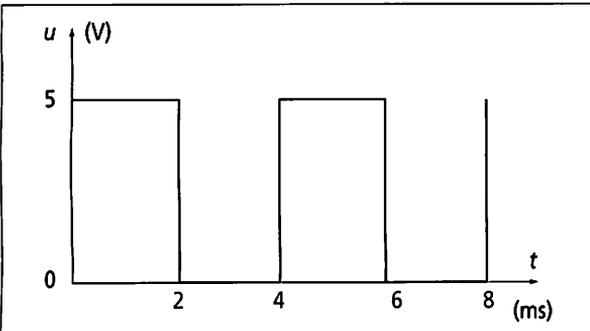
C'est une relation vectorielle :  $\vec{U} = \vec{U}_1 + \vec{U}_2$

## LOI DES NŒUDS

C'est une relation vectorielle :  $\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2$

# TEST RAPIDE

**T.1** Quelle est la fréquence de la tension périodique représentée ci-dessous ?



**Réponse :** 2 kHz; 500 Hz; 0,5 Hz; 250 Hz.

**T.2** La valeur instantanée d'un courant variable a pour expression :  $i = 4 \sin 100 \pi t$   
Quelle est la fréquence de ce courant ?

**Réponse :** 100 Hz; 50 Hz; 314 Hz.

**T.3** Une tension alternative a pour fréquence 50 Hz.  
Quelle est sa pulsation ?

**Réponse :** 314 rad/s; 100 rad/s; 50 rad/s.

**T.4** Une tension alternative a pour période 20 ms.  
Quelle est sa pulsation ?

**Réponse :** 314 rad/s; 100 rad/s; 50 rad/s.

**T.5** Une tension alternative sinusoïdale a pour valeur maximale 10 V. Déterminer sa valeur moyenne.

**Réponse :** 0 V; 7 V; 10 V.

**T.6** Quelle est la valeur efficace de la tension exprimée par :

$$u = 220 \sqrt{2} \sin 200 \pi t$$

**Réponse :** 220 V; 311 V; 110 V.

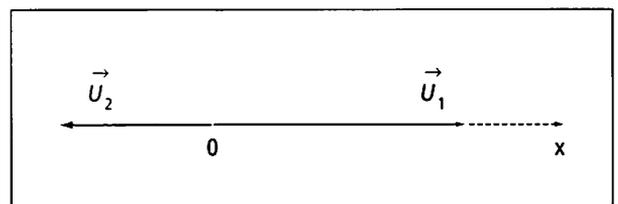
**T.7** Une tension alternative sinusoïdale a pour valeur efficace 380 V. Déterminer sa valeur maximale.

**Réponse :** 268 V; 380 V; 537 V.

**T.8** Quelle est la valeur moyenne de la tension représentée ci-dessus (T. 1) ?

**Réponse :**  $5 \sqrt{2}$  V; 0 V; 2,5 V.

**T.9** Quel est le déphasage entre les tensions  $u_1$  et  $u_2$  représentées par les vecteurs de la figure ci-dessous ?



**Réponse :**  $0^\circ$ ;  $90^\circ$ ;  $180^\circ$ .

# EXPÉRIMENTATION

## MESURES DE TENSIONS ALTERNATIVES

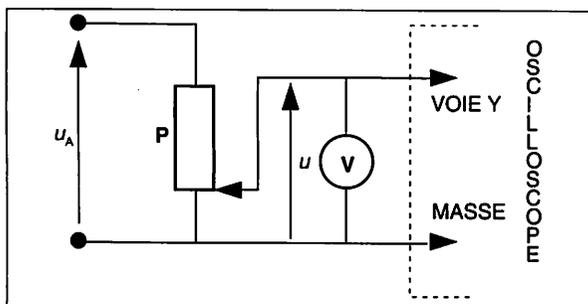
### BUT DE LA MESURE

Déterminer expérimentalement le rapport  $\frac{\hat{U}}{U}$  d'une tension alternative sinusoïdale.

### CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIELS MIS EN ŒUVRE

- La tension  $u_A$  a pour valeur efficace 48 V et pour fréquence 50 Hz,
- le potentiomètre  $P$  permet de faire varier la tension  $u$  à mesurer,
- le voltmètre, en position alternatif, mesure la valeur efficace  $U$ ,
- l'oscilloscope mesure la valeur maximale  $\hat{U}$ .

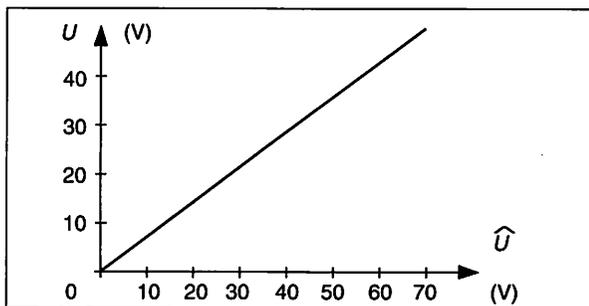
### SCHÉMA DU MONTAGE



### PROCÉDURE

En faisant varier la position du potentiomètre  $P$  relever  $U$  en fonction de  $\hat{U}$  et tracer la courbe  $U = f(\hat{U})$ .

### EXEMPLE DE RÉSULTATS



Les valeurs de  $U$  et  $\hat{U}$  sont proportionnelles :

$$\frac{\hat{U}}{U} = \sqrt{2} \approx 1,4.$$

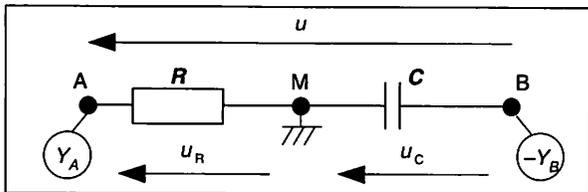
## RELEVÉ D'OSCILLOGRAMMES

### BUT DE LA MESURE

Sur le schéma de principe ci-dessous :  $R = 100 \Omega$  ;  $C = 20 \mu\text{F}$  ; la tension est alternative de tension efficace  $U = 10 \text{ V}$  et de fréquence 50 Hz.

- Observer  $u_R$  et  $u_C$  simultanément avec un oscilloscope double trace.
- Relever les deux oscillogrammes et mesurer le déphasage  $\varphi$  de  $u_C$  sur  $u_R$ .

### SCHÉMA DE PRINCIPE



### PROCÉDURE

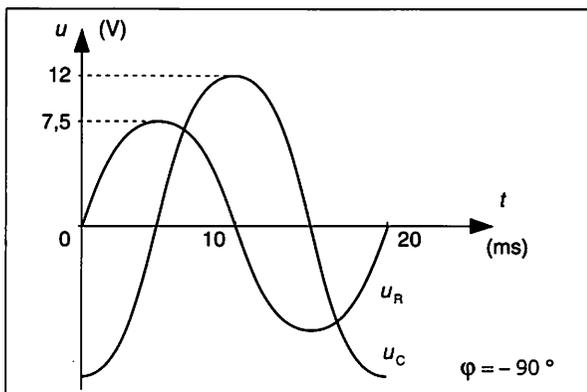
Pour observer simultanément deux tensions, il faut qu'elles aient un point commun relié à la masse de l'oscilloscope. Les tensions affichées sur l'écran sont  $U_{AM}$  et  $U_{BM}$ , soit  $u_R$  et  $-u_C$ . Pour faire apparaître  $u_C$

sur l'écran, il faut inverser le signal de  $Y_B$  à l'aide du commutateur prévu à cet effet.

Les commandes de l'oscilloscope seront réglées :

- base de temps : 2ms/div,
- sensibilité  $Y_A$  : 5V/div,
- sensibilité  $Y_B$  : 5V/div.

### OSCILLOGRAMMES



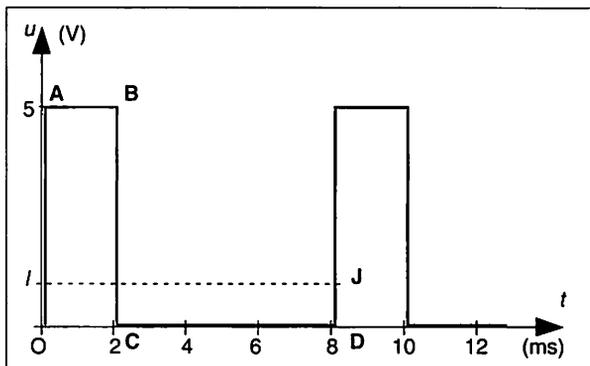
La tension  $u_C$  est en retard de  $90^\circ$  sur  $u_R$ .

# APPLICATIONS

## EXERCICES RÉSOLUS

### Énoncé 1

Déterminer la période et la valeur moyenne de la tension représentée sur le graphique ci-contre.



#### Méthode :

- Mesurer l'intervalle de temps séparant deux instants consécutifs où la tension se reproduit identiquement à elle-même.
- Identifier les aires égales.

#### Solution proposée :

- a. La période est  $T = 8 \text{ ms}$ .
- b. Si l'aire du rectangle OABC est égale à l'aire du rectangle OIJD, alors le côté OI est représentatif de la valeur moyenne de la tension, soit :
- Aire OABC = Aire OIJD.
- Aire OABC = OA  $\times$  BC = 5  $\times$  2 = 10.
- Aire OIJD = OI  $\times$  OD = 8OI et  $OI = \frac{10}{8} = 1,25$ .
- La tension moyenne est égale à  $\bar{U} = 1,25 \text{ V}$ .

#### Remarque :

La précision des résultats dépend du soin apporté au tracé des graphiques.

### Énoncé 2

Un courant sinusoïdal  $i$  a pour expression :  $i = 10\sqrt{2} \sin(314t + \pi/2)$ .

- Donner ses caractéristiques : période, fréquence, valeur efficace.
- Construire le vecteur de Fresnel représentant  $i$ .
- Représenter graphiquement  $i = f(t)$  sur une période.

#### Méthode :

- Appliquer la relation reliant la pulsation à la période et à la fréquence. Exploiter la relation entre la valeur maximale et la valeur efficace.
- Choisir une échelle et dessiner le vecteur  $\vec{T}$ .
- Construire une sinusoïde de période  $t$ .

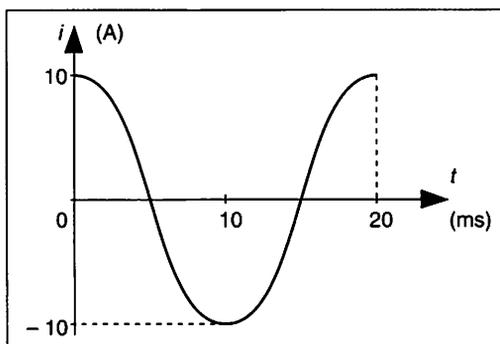
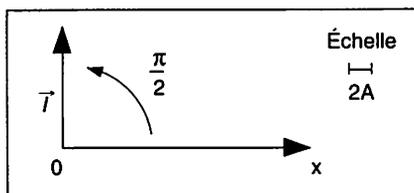
#### Solution proposée :

- a. D'après l'expression de  $i$  :  $\omega = 314 \text{ rad/s}$
- d'où  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  soit  $T = 20 \text{ ms}$
- et  $f = \frac{1}{T} = 50 \text{ Hz}$ .
- La valeur maximale est  $I = 10\sqrt{2}$ , la valeur efficace est égale à :
- $$I = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \text{ soit } I = 10 \text{ A.}$$

#### Remarque :

La courbe  $i = f(t)$  est représentative de la fonction sinusoïdale :

$$i = 10\sqrt{2} \sin(314t + \pi/2).$$



## EXERCICES À RÉSOUDRE

**E. 1** Construire les vecteurs de Fresnel correspondant aux tensions suivantes :

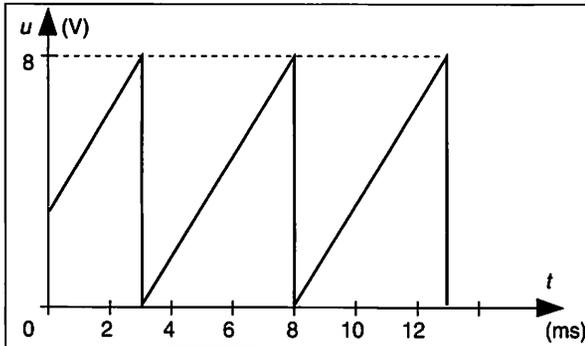
$$u_1 = 230 \sqrt{2} \sin \omega t.$$

$$u_2 = 127 \sqrt{2} \sin (\omega t + \pi/3).$$

$$u_3 = 110 \sqrt{2} \sin (\omega t - \pi/4).$$

**E. 2** La figure ci-dessous représente une tension  $u$ .

- Déterminer sa période et sa fréquence.
- Calculer sa valeur moyenne.



**E. 3** Deux courants sinusoïdaux ont pour expression :

$$i_1 = 4 \sqrt{2} \sin 628 t.$$

$$i_2 = 2 \sqrt{2} \sin (628 t - \pi/2).$$

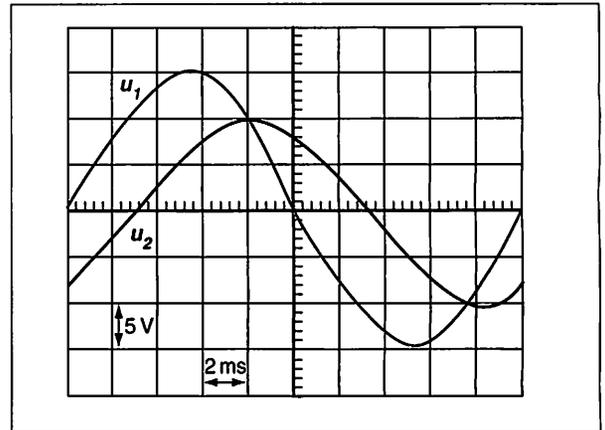
- Indiquer la période, la fréquence et la valeur efficace de ces courants.
- Les représenter par des vecteurs de Fresnel.
- Construire le vecteur représentant la somme des courants :  $i = i_1 + i_2$ .
- Déterminer la valeur efficace de  $i$  et sa phase à l'origine.

**E. 4** En utilisant la représentation de Fresnel, déterminer l'expression du troisième courant du tableau suivant en sachant que :  $i = i_1 + i_2$ .

$i$	$i_1$	$i_2$
	$2 \sin (\omega t + \frac{\pi}{6})$	$2 \sin \omega t$
	$5 \sin (\omega t - \frac{\pi}{2})$	$3 \sin \omega t$
$3 \sin \omega t$	$4 \sin (\omega t + \frac{\pi}{2})$	

**E. 5** Deux tensions sinusoïdales  $u_1$  et  $u_2$  sont visualisées sur l'écran d'un oscilloscope représenté à la figure ci-dessous.

La base de temps est réglée à 2 ms/div, la sensibilité verticale à 5 V/div.



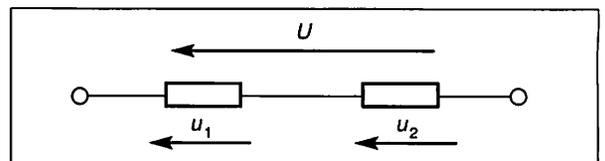
- Préciser pour chaque tension, la période et la valeur maximale.
- En déduire la fréquence et la valeur efficace de chaque tension.
- Déterminer le déphasage entre les deux tensions observées.

**E. 6** Deux récepteurs sont placés en série selon le montage de la figure ci-dessous et alimentés par une tension sinusoïdale  $u$ .

Les valeurs efficaces des tensions sont :

$$U_1 = 10 \text{ V} ; U_2 = 8 \text{ V}.$$

La tension  $u_2$  est en avance de  $60^\circ$  sur la tension  $u_1$ .



- Représenter les vecteurs de Fresnel correspondant aux tensions  $u$ ,  $u_1$  et  $u_2$  (prendre  $u_1$  comme tension de référence).
- Déterminer graphiquement la valeur efficace de la tension  $u$  et son déphasage par rapport à  $u_1$ .

# 6 Association de dipôles élémentaires

## ÉLECTROTECHNIQUE

### 1 Impédance

L'impédance  $Z$  d'un dipôle parcouru par un courant alternatif sinusoïdal est le quotient de la valeur efficace  $U$  de la tension à ses bornes par la valeur efficace  $I$  de l'intensité qui le traverse.

Le dipôle de la figure 6.01 est alimenté par une tension sinusoïdale  $u$ . Il est parcouru par un courant sinusoïdal  $i$ .

$$Z = \frac{U}{I} \quad \begin{array}{l} Z \text{ en ohms,} \\ U \text{ en volts,} \\ I \text{ en ampères.} \end{array}$$

L'unité d'impédance est l'OHM ( $\Omega$ ).

#### ■ DÉPHASAGE

Dans la plupart des dipôles, la tension  $u$  est déphasée par rapport au courant  $i$ . Ce déphasage, illustré par la construction de Fresnel de la figure 6.02, est noté  $\varphi$  :

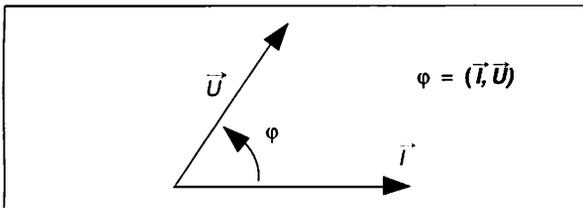


Fig. 6.02 : Déphasage.

#### Exemple :

Un dipôle a une impédance de  $100 \Omega$  et produit un déphasage de  $(-60^\circ)$ . La tension à ses bornes a une valeur efficace de  $230 \text{ V}$  et le courant qui le parcourt a pour valeur efficace :

$$Z = \frac{U}{I} \text{ soit } I = 2,3 \text{ A.}$$

Ci-après, la construction de Fresnel correspondante.

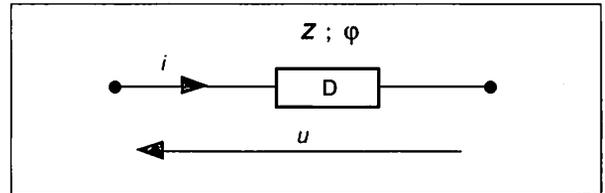
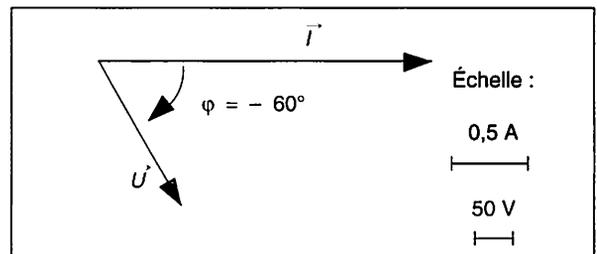


Fig. 6.01 : Dipôle en courant sinusoïdal.

#### Remarque

- En courant sinusoïdal, la loi d'Ohm s'écrit :  $U = ZI$ .
- L'impédance  $Z$  est indépendante de la valeur efficace  $U$  de la tension appliquée au dipôle. Elle varie, pour certains dipôles, avec la fréquence de la tension.
- Comme l'impédance, le déphasage est une caractéristique du dipôle considéré. Il ne dépend que de la fréquence de la tension appliquée au dipôle.



### 2 Dipôles élémentaires

Les dipôles passifs utilisés en électrotechnique sont essentiellement constitués de résistances, de bobines et de condensateurs.

Pour étudier leur comportement, ces dipôles sont considérés comme des associations de dipôles élémentaires appelés : résistance pure, inductance pure, capacité pure.

## ■ RÉSISTANCE PURE

Pour une résistance pure (fig. 6.03) :

- la tension  $u$  à ses bornes est en phase avec le courant  $i$  qui la traverse,
- le rapport des valeurs efficaces est  $Z = R$ .

Les vecteurs de Fresnel sont colinéaires.

$$\begin{aligned} Z &= R \\ \varphi &= 0^\circ \end{aligned}$$

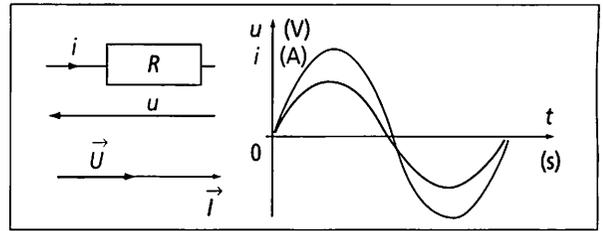


Figure 6.03 : Résistance pure.

## ■ INDUCTANCE PURE

Une inductance pure est une bobine parfaite dont le fil qui la constitue n'a aucune résistance. Pour une inductance pure (fig. 6.04) :

- la tension  $u$  à ses bornes est en avance de  $90^\circ$  sur le courant  $i$  qui la traverse,
- le rapport des valeurs efficaces est  $Z = L\omega$ .

Les vecteurs de Fresnel sont perpendiculaires.

Le produit  $L\omega$  est appelé réactance d'induction. Il s'exprime en ohms :

$$X = L\omega$$

La réactance d'induction est proportionnelle à la fréquence.

$$\begin{aligned} Z &= X = L\omega \\ \varphi &= 90^\circ \end{aligned}$$

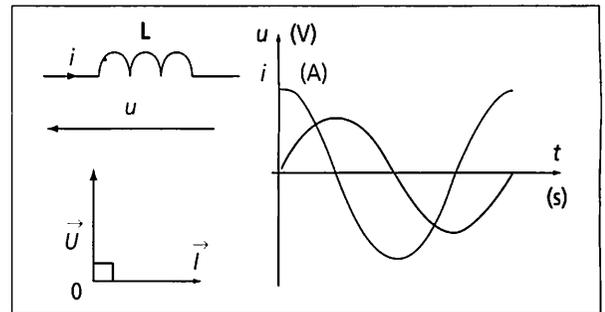


Figure 6.04 : Inductance pure.

## ■ CAPACITÉ PURE

Pour une capacité pure (fig. 6.05) :

- la tension  $u$  à ses bornes est en retard de  $90^\circ$  sur le courant  $i$  qui la traverse,
- le rapport des valeurs efficaces est  $Z = \frac{1}{C\omega}$

Les vecteurs de Fresnel sont perpendiculaires.

Le nombre  $\frac{1}{C\omega}$  est appelé réactance de capacité. Il s'exprime en ohms :

$$X = \frac{1}{C\omega}$$

La réactance de capacité est inversement proportionnelle à la fréquence.

$$\begin{aligned} Z &= \frac{1}{C\omega} \\ \varphi &= -90^\circ \end{aligned}$$

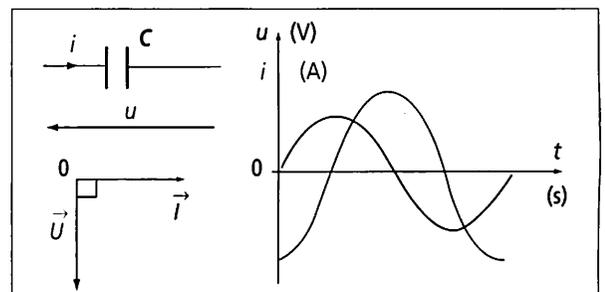


Fig. 6.05 : Capacité pure.

### Exemple

À la fréquence de 50 Hz ( $\omega = 314$  rad/s.).

- Une résistance de 100  $\Omega$  a une impédance  $Z = R$  soit  $Z = 100 \Omega$ .
- Une inductance pure de 1 H a une impédance  $Z = L\omega$  soit  $Z = 314 \Omega$ .
- Un condensateur ou capacité pure de 1  $\mu\text{F}$  a une impédance  $Z = \frac{1}{C\omega}$  soit  $Z = 3184 \Omega$ .

### 3 Groupement de dipôles en série

Lorsque des dipôles sont en série, ils sont parcourus par le même courant  $i$ . La tension appliquée au groupement est la somme des tensions partielles.

Dans le schéma de la figure 6.06 :

$$u = u_1 + u_2$$

La détermination de  $u$  se fait par la méthode suivante :  
 – représenter, à l'échelle, les vecteurs de Fresnel de chaque tension partielle avec son déphasage, le **vecteur  $\vec{I}$  du courant servant de référence**,  
 – faire la somme des vecteurs, comme indiqué à la figure 6.06 dans le cas de deux dipôles.  
 La valeur efficace de  $u$  et son déphasage se lisent alors directement sur le graphique.

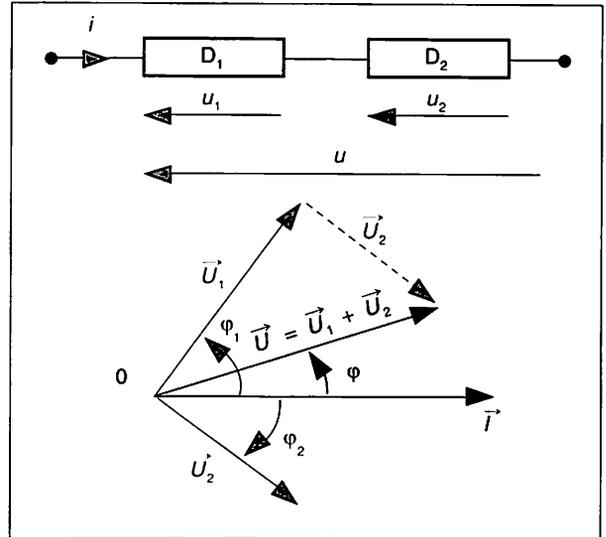


Fig. 6.06 : Groupement série.

#### ■ RÉSISTANCE ET INDUCTANCE PURE – CIRCUIT RL

Le groupement de la figure 6.07 est constitué d'une résistance et d'une inductance pure en série.

La tension  $u$  aux bornes du groupement est telle que :

$$u = u_R + u_L$$

d'où la relation vectorielle de la figure 6.08 :

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L$$

Les vecteurs  $\vec{U}_R$ ,  $\vec{U}_L$ ,  $\vec{U}$  placés bout à bout forment un triangle appelé **triangle des tensions** (fig. 6.08). Dans ce triangle :

$$U^2 = U_L^2 + U_R^2.$$

Comme  $U_R = RI$  et  $U_L = Z_L I = L\omega I$ , la relation précédente s'écrit :

$$U^2 = (RI)^2 + (L\omega I)^2 = I^2 [R^2 + (L\omega)^2]$$

D'où l'impédance totale du circuit :

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

Le déphasage entre  $u$  et  $i$  est donné par :

$$\tan \varphi = \frac{U_L}{U_R} = \frac{L\omega I}{RI} \quad \text{soit} \quad \tan \varphi = \frac{L\omega}{R}$$

#### Remarques

- En divisant par  $I$  les côtés du triangle des tensions, on obtient le triangle des impédances (fig. 6.09) qui permet de retrouver l'impédance totale et le déphasage.
- Une bobine est équivalente au groupement en série d'une inductance pure et d'une résistance dont la valeur correspond aux pertes dans la bobine.

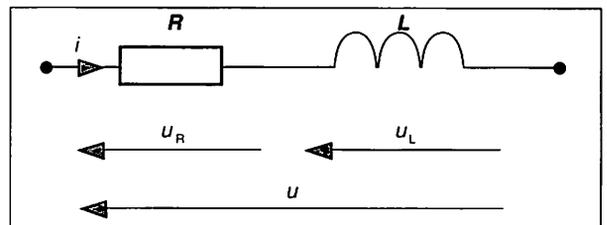


Fig. 6.07 : Groupement R-L.

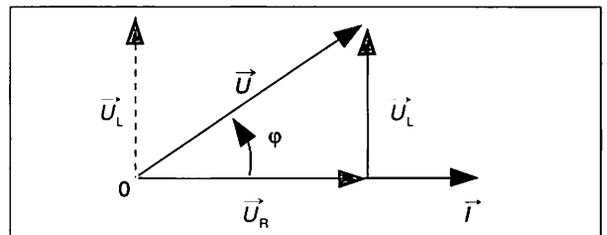


Fig. 6.08 : Triangle des tensions.

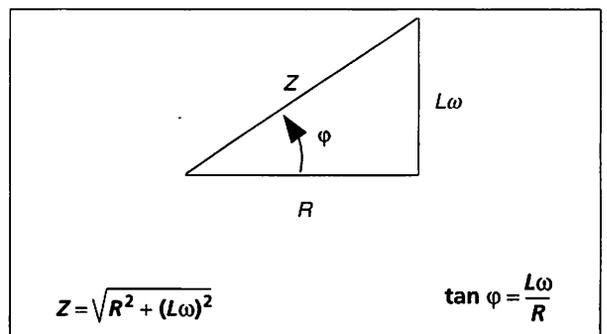


Fig. 6.09 : Triangle des impédances.

**Exemple :**

Une bobine d'inductance  $L = 0,1 \text{ H}$  a une résistance de  $20 \Omega$ . Elle est alimentée par une tension de valeur efficace  $230 \text{ V}$  et de fréquence  $50 \text{ Hz}$ .

L'impédance de chaque élément est :  $Z_R = R = 20 \Omega$  ;  $Z_L = L\omega = 31,4 \Omega$ .

L'impédance totale de la bobine est alors :  $Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}$  soit  $Z = 37,2 \Omega$ .

Le courant traversant la bobine a pour valeur  $I = \frac{U}{Z}$  soit  $I = 6,2 \text{ A}$ .

Le déphasage entre  $U$  et  $I$  est donné par :  $\tan \varphi = \frac{L\omega}{R}$  soit  $\varphi = 57,5^\circ$ .

■ **RÉSISTANCE ET CAPACITÉ PURE – CIRCUIT RC**

Le groupement est représenté à la figure 6.10, la tension  $u$  à ses bornes est égale à :

$$u = u_R + u_C$$

d'où la relation vectorielle de la figure 6.11 :

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_C$$

D'après le triangle des tensions :

$$U^2 = U_R^2 + U_C^2$$

avec  $U_R = RI$  et  $U_C = Z_C I = \frac{I}{C\omega}$ .

D'où :  $U^2 = (RI)^2 + (\frac{I}{C\omega})^2 = I^2 [R^2 + (\frac{1}{C\omega})^2]$ .

L'impédance totale du circuit est donc égale à :

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

Le déphasage entre  $u$  et  $i$  est négatif ; il est donné par la relation :

$$\tan \varphi = -\frac{U_C}{U_R} = -\frac{\frac{I}{C\omega}}{RI} \text{ soit } \tan \varphi = -\frac{1}{RC\omega}$$

Le **triangle des impédances** (fig. 6.12) permet de retrouver ces résultats.

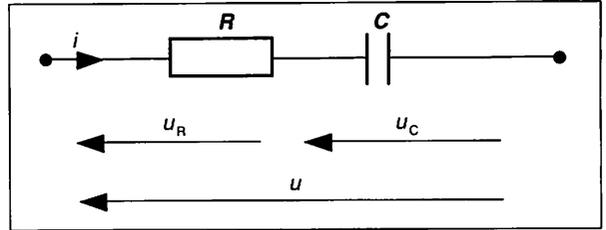


Fig. 6.10 : Groupement R-C.

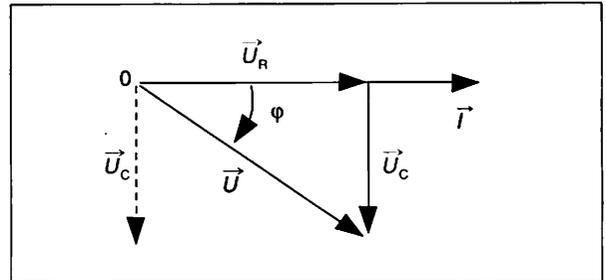


Fig. 6.11 : Triangle des tensions.

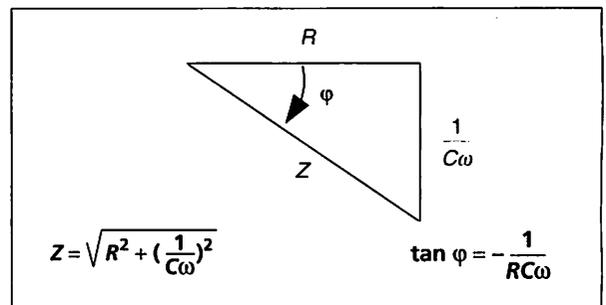


Fig. 6.12 : Triangle des impédances.

**Exemple :**

Un condensateur de  $10 \mu\text{F}$  est placé en série avec une résistance de  $100 \Omega$ . Le groupement est alimenté par une tension de valeur efficace  $230 \text{ V}$  et de fréquence  $50 \text{ Hz}$ .

L'impédance de chaque élément est :  $Z_R = R = 100 \Omega$  ;  $Z_C = \frac{1}{C\omega} = 318 \Omega$ .

L'impédance totale est donnée par :  $Z = \sqrt{R^2 + (\frac{1}{C\omega})^2}$  soit  $Z = 333 \Omega$ .

Le courant traversant le groupement a pour valeur :  $I = \frac{U}{Z}$  soit  $I = 0,69 \text{ A}$ .

Le déphasage entre  $U$  et  $I$  est donné par :  $\tan \varphi = -\frac{1}{RC\omega}$  soit  $\varphi = -72,5^\circ$ .

## ■ BOBINE ET CONDENSATEUR – CIRCUIT RLC

Une bobine d'inductance  $L$  et de résistance  $R$  est placée en série avec un condensateur parfait de capacité  $C$  selon le schéma de la figure 6.13. La tension  $u$  aux bornes du groupement est égale à :

$$u = u_R + u_L + u_C$$

D'où la relation vectorielle :

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C$$

D'après la construction de la figure 6.14 :

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

$$\text{Soit : } U^2 = (RI)^2 + (L\omega I - \frac{I}{C\omega})^2 = I^2 [R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2].$$

L'impédance totale du circuit est donc égale à :

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

Le déphasage entre  $u$  et  $i$  est donné par la relation :

$$\tan \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} \quad \text{soit} \quad \tan \varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}$$

Selon les valeurs de  $L$ ,  $C$  et  $\omega$ , 3 cas sont possibles :

- premier cas :  $U_L > U_C$  soit  $L\omega > \frac{1}{C\omega}$  (fig. 6.15).

La tension  $u$  est en avance sur  $i$ , le circuit est inductif.

- deuxième cas :  $U_L < U_C$  soit  $L\omega < \frac{1}{C\omega}$  (fig. 6.15).

La tension  $u$  est en retard sur  $i$ , le circuit est capacitif.

- troisième cas :  $U_L = U_C$  soit  $L\omega = \frac{1}{C\omega}$  (fig. 6.16).

La tension  $u$  est en phase avec  $i$ , le circuit est équivalent à une résistance pure de valeur  $R$ .

Le circuit  $R$ - $L$ - $C$  est alors à la résonance.

La condition de résonance est :

$$L\omega = \frac{1}{C\omega} \quad \text{soit} \quad LC\omega^2 = 1.$$

### Remarque

La tension aux bornes de l'inductance ou du condensateur d'un circuit  $R$ - $L$ - $C$  peut être très importante, bien supérieure à la tension d'alimentation. Pour éviter ces surtensions, la résonance est à éviter dans les circuits industriels.

Par contre, le phénomène de résonance permet d'amplifier une tension sinusoïdale. Il est utilisé dans les circuits de radio et de télévision.

### Exemples :

Un circuit est constitué d'une résistance de  $10 \Omega$ , d'une inductance de  $1 \text{ H}$  et d'une capacité  $C$  branchées en série. Il est alimenté sous  $230 \text{ V}/50 \text{ Hz}$ .

La valeur de  $C$  pour que le circuit soit à la résonance est :  $C = \frac{1}{L\omega^2}$  soit  $C = 10 \mu\text{F}$ .

À la résonance  $Z = R = 10 \Omega$ . L'intensité dans le circuit est alors :  $I = \frac{U}{Z}$  soit  $I = 23 \text{ A}$ .

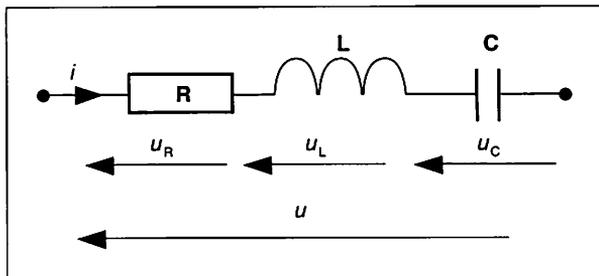


Fig. 6.13 : Circuit  $R$ - $L$ - $C$  série.

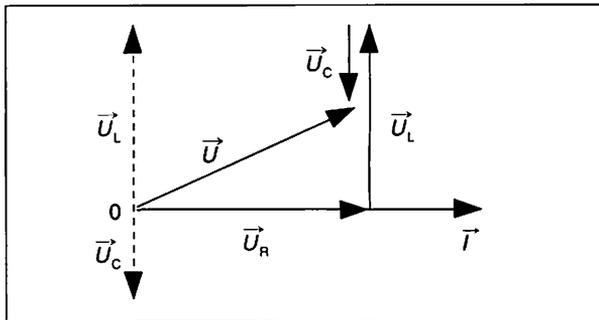


Fig. 6.14 : Triangle des tensions.

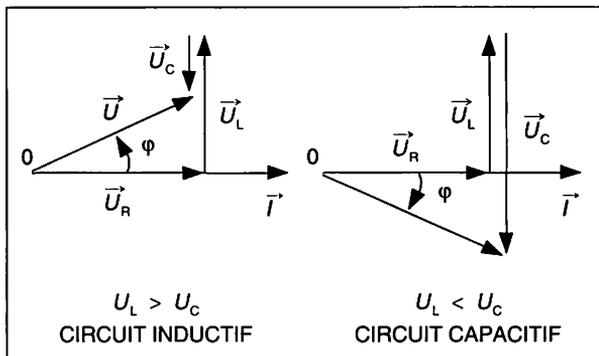


Fig. 6.15 : Circuit inductif et circuit capacitif.

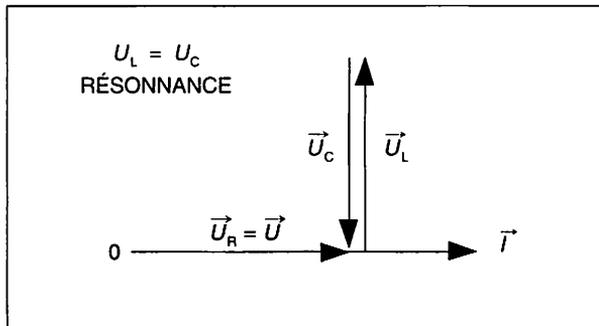


Fig. 6.16 : Circuit  $R$ - $L$ - $C$  série à la résonance.

## 4 Groupement de dipôles en parallèle

Lorsque des dipôles sont en parallèle, ils ont tous la même tension à leurs bornes (fig. 6.17). L'intensité du courant traversant le groupement est la somme des intensités dans chaque dipôle.

Dans le schéma de la figure 6.17

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

La détermination de  $i$  se fait par la méthode suivante :

- représenter, à l'échelle, les vecteurs de Fresnel de chaque courant partiel avec son déphasage, le **vecteur  $\vec{U}$  de la tension servant de référence**,
- faire la somme des vecteurs courant :

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

La valeur efficace de  $i$  et son déphasage se lisent alors directement sur le graphique.

### Exemple : Résistance et capacité pure – Circuit RC parallèle

Dans le montage de la figure 6.18,  $R = 100 \Omega$  et  $C = 10 \mu\text{F}$ . La tension a pour valeur efficace  $U = 230 \text{ V}$  et pour fréquence  $50 \text{ Hz}$ .

Le courant total  $i$  est égal à :

$$i = i_R + i_C$$

D'où la relation vectorielle :

$$\vec{I} = \vec{I}_R + \vec{I}_C$$

Dans la représentation de la figure 6.19,  $\vec{I}_R$  est en phase avec  $\vec{U}$ ;  $\vec{I}_C$  est en retard de  $90^\circ$  sur  $\vec{I}_R$ .

Les vecteurs  $\vec{I}$ ,  $\vec{I}_R$  et  $\vec{I}_C$  forment un triangle rectangle :

$$I^2 = I_R^2 + I_C^2$$

Les valeurs de  $I_R$  et  $I_C$  sont données par :

$$I_R = \frac{U}{R} \quad \text{et} \quad I_C = \frac{U}{Z_C} = UC\omega$$

Soit avec les valeurs du montage :  $I_R = 2,3 \text{ A}$   
et  $I_C = 0,72 \text{ A}$ .

D'où :

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \quad \text{soit} \quad I = 2,4 \text{ A}.$$

Le déphasage entre  $u$  et  $i$  est donné par :

$$\tan \varphi = -\frac{I_C}{I_R} = -RC\omega \quad \text{soit} \quad \varphi = -17,4^\circ.$$

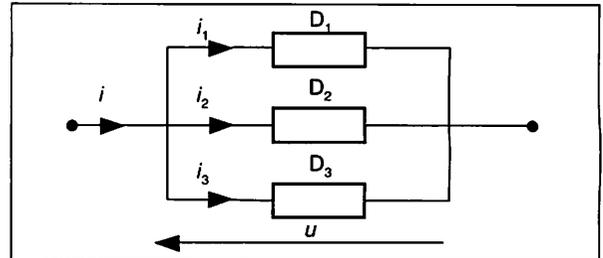


Fig. 6.17 : Groupement de dipôles en parallèle.

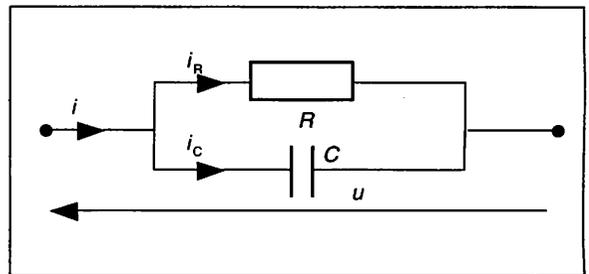


Fig. 6.18 : Circuit R-C parallèle.

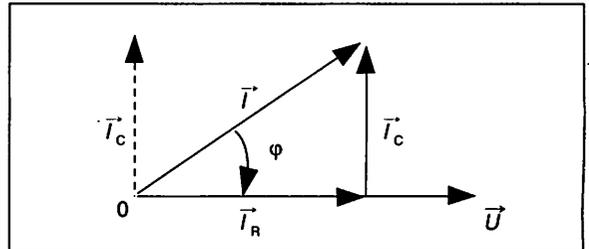


Fig. 6.19 : Triangle des courants.

### Remarque :

Un condensateur réel est équivalent au groupement parallèle d'une capacité pure et d'une résistance dont la valeur correspond aux pertes dans le diélectrique.

Pour les condensateurs usuels cette résistance est très grande, plus de 100 fois la valeur de l'impédance : de tels condensateurs peuvent être considérés comme des capacités pures.

## ■ CONDENSATEUR ET INDUCTANCE – CIRCUIT LC PARALLÈLE

Le schéma du groupement est donné figure 6.20.  
La loi des courants s'écrit :

$$i = i_C + i_L$$

Elle est représentée graphiquement à la figure 6.21.

Le courant  $i_C$  est en avance de  $90^\circ$  sur  $u$ , le courant  $i_L$  est en retard de  $90^\circ$  sur  $u$ .

Les vecteurs  $\vec{T}_C$  et  $\vec{T}_L$  sont colinéaires, de sens opposés.  
Le courant total  $I$  est égal à :

$$I = |I_C + I_L|$$

Lorsque  $I_C = I_L$ , le courant traversant le groupement est nul quelle que soit la tension à ses bornes. Le circuit est alors équivalent à un interrupteur ouvert, il est appelé **circuit bouchon** (fig. 6.22).

Ce phénomène se produit lorsque les impédances du condensateur et de l'inductance sont égales :

$$L\omega = \frac{1}{C\omega}$$

Le circuit est alors à la résonance avec la condition :

$$LC\omega^2 = 1$$

### Remarque :

Dans la réalité, l'inductance pure n'existe pas, c'est toujours une bobine d'inductance  $L$  et de résistance  $R$ .

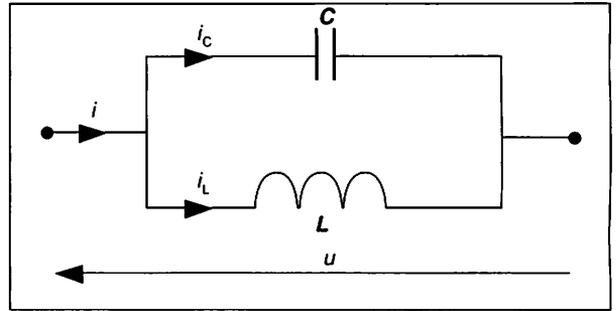


Fig. 6.20 : Circuit L-C parallèle.

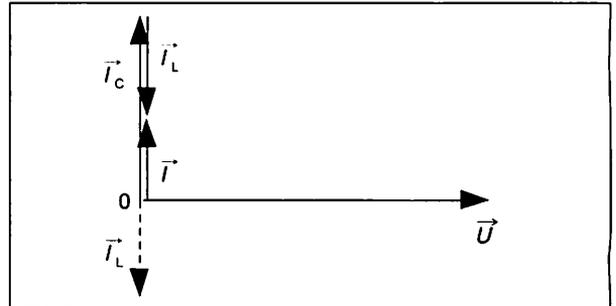


Fig. 6.21 : Courants dans le circuit L-C parallèle.

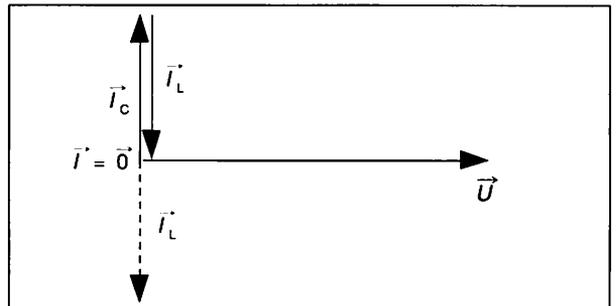


Fig. 6.22 : Circuit bouchon.

## ESSENTIEL À RETENIR

### DIPÔLES ÉLÉMENTAIRES

#### ■ Résistance pure

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

#### ■ Inductance pure

$$Z = \frac{U}{I} = L\omega \quad X = L\omega$$

#### ■ Capacité pure

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{1}{C\omega} \quad X = \frac{1}{C\omega}$$

### GROUPEMENTS DE DIPÔLES

#### ■ R-L Série

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2} \quad \tan \varphi = \frac{L\omega}{R}$$

#### ■ R-C Série

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

#### ■ R-L-C Série

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

## TEST RAPIDE

**T.1** Un dipôle soumis à une tension alternative de 230 V est parcouru par un courant de 0,5 A. Déterminer son impédance.

**Réponse :** 115  $\Omega$  ; 230  $\Omega$  ; 460  $\Omega$ .

**T.2** Déterminer la réactance d'une inductance de 0,5 H à 100 Hz.

**Réponse :** 50  $\Omega$  ; 200  $\Omega$  ; 314  $\Omega$ .

**T.3** Un condensateur de 10  $\mu\text{F}$  est parcouru par un courant alternatif de valeur efficace 1 A et de fréquence 50 Hz.

Calculer la tension à ses bornes.

**Réponse :** 10 V ; 318 V ; 500 V.

**T.4** La tension  $u$  aux bornes d'un dipôle est en avance sur le courant  $i$ .

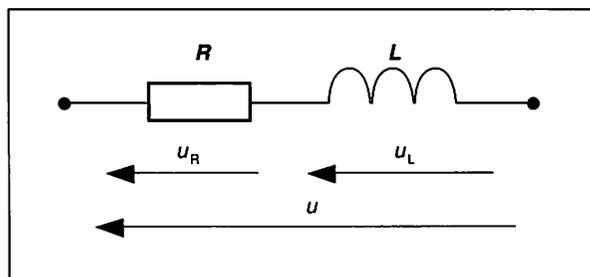
Déterminer le type du dipôle.

**Réponse :** Résistif ; capacitif ; inductif.

**T.5** Les tensions aux bornes des composants du circuit R-L ci-dessous ont pour valeurs efficaces :

$$U_R = 30 \text{ V} ; U_L = 40 \text{ V}.$$

Déterminer la valeur efficace de la tension aux bornes du groupement.



**Réponse :** 10 V ; 50 V ; 70 V.

**T.6** Déterminer la pulsation de résonance d'un circuit R-L-C série tel que :

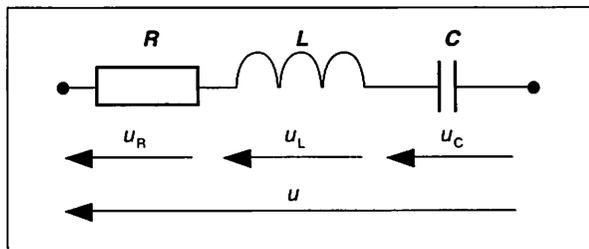
$$R = 100 \Omega ; L = 0,1 \text{ H} ; C = 10 \mu\text{F}.$$

**Réponse :** 100 rad/s ; 1 000 rad/s ;  $10^6$  rad/s.

**T.7** Les valeurs efficaces des tensions aux bornes des composants du circuit R-L-C de la figure ci-dessous sont égales à :

$$U_R = 120 \text{ V} ; U_C = 60 \text{ V} ; U_L = 220 \text{ V}.$$

Déterminer la valeur efficace de la tension  $u$  aux bornes du groupement.

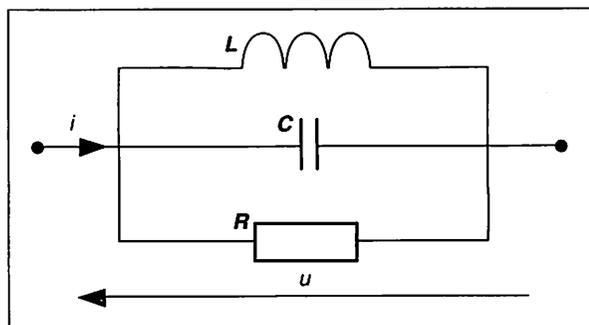


**Réponse :** 120 V ; 200 V ; 400 V.

**T.8** Le circuit de la figure ci-dessous est tel que :

$$R = 100 \Omega ; C = 10 \mu\text{F}.$$

Déterminer la valeur de l'inductance  $L$  pour que la pulsation de résonance soit 100 rad/s.



**Réponse :** 0,1 H ; 1 H ; 10 H.

**T.9** Le circuit de la figure ci-dessus étant à la résonance, la tension  $u$  a pour valeur efficace 230 V.

Calculer la valeur efficace du courant  $i$ .

**Réponse :** nulle ; 2,3 A ; 6,6 A.

# EXPÉRIMENTATION

## MESURE DE CAPACITÉ

### ■ PRINCIPE DE LA MESURE

La mesure consiste à déterminer l'impédance du condensateur par la méthode voltampèremétrique, soit :

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

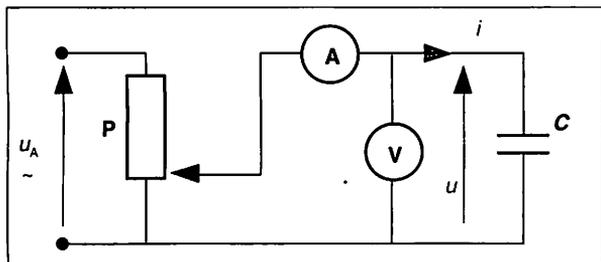
Si le condensateur peut être assimilé à une capacité pure, son impédance est égale à sa réactance, soit :

$$Z_c = X_c = \frac{1}{C\omega}$$

Connaissant la pulsation du courant alternatif appliqué au condensateur, sa capacité se détermine par la relation :

$$C = \frac{1}{Z_c \omega}$$

### ■ SCHÉMA DE MONTAGE



### ■ CARACTÉRISTIQUE DU MATÉRIEL

- La tension d'alimentation alternative  $u_A$  peut être la tension du secteur 230 V ; 50 Hz.
- Le potentiomètre  $P$  permet de ne pas dépasser la tension de service du condensateur.
- Le condensateur ne doit pas être polarisé.

### ■ EXEMPLE DE MESURES

Les valeurs indiquées par les appareils de mesure sont :

$$I = 0,1 \text{ A} ; U = 159 \text{ V.}$$

L'impédance est égale à  $Z_c = \frac{U}{I} = \frac{159}{0,1}$   
soit  $Z = 1\,590 \, \Omega$ .

D'où  $C = \frac{1}{Z_c \omega}$  avec  $\omega = 2\pi f = 314 \text{ rad/s}$

soit  $C = 2 \, \mu\text{F}$ .

### Remarque :

Cette méthode s'applique aux condensateurs présentant de faibles pertes dans le diélectrique. Ces pertes augmentant rapidement avec la fréquence, la tension d'alimentation doit être de basse fréquence (de l'ordre de 50 Hz).

## MESURE D'INDUCTANCE

### Remarque préalable :

Une inductance pure n'existe pas dans la réalité. Comme indiqué à la remarque du paragraphe 3 précédent, un dipôle inductif ou bobine est équivalent à l'association en série d'une inductance pure et d'une résistance représentant les pertes dans le dipôle.

La mesure consiste à déterminer les paramètres  $L$  et  $R$  caractéristiques du dipôle.

### ■ PRINCIPE DE LA MESURE

Comme pour le condensateur, il s'agit d'une méthode voltampèremétrique.

La mesure s'effectue en deux étapes :

- en courant continu mesure de  $R$  :

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

- en courant alternatif, mesure de  $Z$  :

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

La réactance  $X_L = L\omega$  se calcule à partir de la relation :

$$Z^2 = R^2 + (L\omega)^2$$

Soit :

$$X_L = L\omega = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

D'où l'inductance qui est égale à :

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{\omega}$$

## ■ SCHEMA DU MONTAGE

Le montage de mesure est semblable à celui utilisé pour la mesure de capacité, le condensateur étant remplacé par le dipôle inductif considéré.

La tension d'alimentation  $u_A$  est :

- continue pour la mesure de  $R$ ,
- alternative pour la mesure de  $Z$ .

### Remarque :

- Cette méthode de mesure d'inductance est appelée méthode de Joubert.

- La méthode de Joubert ne prend en compte que la résistance, cause des pertes Joule dans la bobine ; ces pertes sont les mêmes en courant continu et en courant alternatif.

Lorsque la bobine comporte un noyau de fer, les pertes dans le circuit magnétique, en courant alternatif, s'ajoutent aux pertes Joule ; dans ce cas la méthode de Joubert n'est plus utilisable.

## ■ EXEMPLE DE MESURES

Les valeurs indiquées par les appareils de mesure sont :

- en courant continu :  $I = 0,1 \text{ A}$  ;  $U = 2,2 \text{ V}$ .
- en courant alternatif :  $I = 0,1 \text{ A}$  ;  $U = 3,8 \text{ V}$ .

La résistance et l'impédance sont égales à :

$$R = \frac{2,2}{0,1} = 22 \Omega.$$

$$Z = \frac{3,8}{0,1} = 38 \Omega.$$

D'où la réactance d'induction :

$$X_L = \sqrt{38^2 - 22^2} \text{ soit } X_L = 31 \Omega.$$

La mesure étant faite à 50 Hz ( $\omega = 314 \text{ rad/s}$ ), la valeur de l'inductance est :

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{31}{314} \text{ soit } L = 0,1 \text{ H}.$$

## ÉTUDE D'UN CIRCUIT R-L-C SÉRIE

### ■ BUT DE LA MESURE

Mesurer, dans un circuit **R-L-C série**, les valeurs efficaces :

- du courant  $i$  dans le circuit,
  - des tensions aux bornes de la bobine et du condensateur,
- en fonction de l'inductance de la bobine.

### ■ CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL

Le montage de mesure ci-après est alimenté par une tension de valeur efficace  $U = 24 \text{ V}$  et de fréquence 50 Hz.

L'inductance de la bobine est variable entre 0,2 et 1,1 H grâce à un noyau de fer pouvant coulisser à l'intérieur.

La résistance de cette bobine est faible, de l'ordre de 10  $\Omega$ .

Le condensateur a une capacité  $C = 15 \mu\text{F}$ .

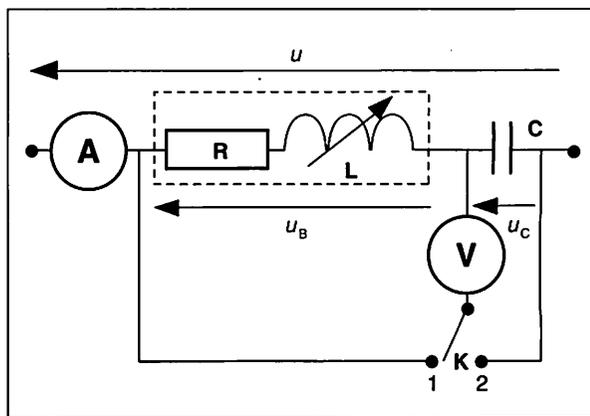
### ■ EXEMPLE DE MESURES

Lorsque le circuit est à la résonance, soit pour :

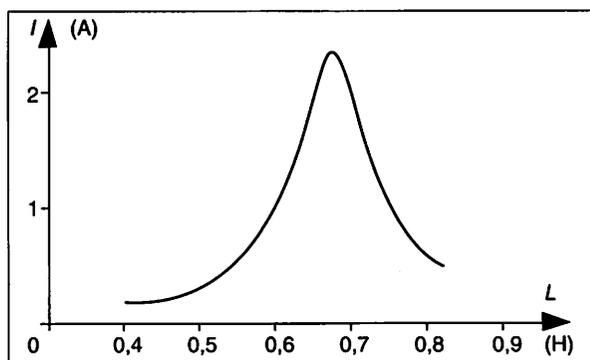
$$L = \frac{1}{C\omega^2} = 0,68 \text{ H}, \text{ le courant passe par un maximum.}$$

Les tensions  $U_L$  et  $U_C$  sont alors maximales, nettement supérieures à la tension d'alimentation.

### ■ MONTAGE DE MESURE



### ■ COURBE DE VARIATION DE I EN FONCTION DE L



# APPLICATIONS

## EXERCICE RÉSOLU

### Énoncé

Une bobine d'inductance 0,5 H et de résistance 50 Ω est alimentée par une tension de valeur efficace 230 V et de fréquence 50 Hz.

- Calculer l'impédance de la bobine.
- Déterminer l'intensité du courant qui la traverse et son déphasage par rapport à la tension d'alimentation.
- Un condensateur de 20 μF est alimenté par la même tension. Déterminer sa réactance et les caractéristiques du courant qui le traverse.
- La bobine et le condensateur sont placés en parallèle et alimentés par la tension précédente. Déterminer par une construction de Fresnel l'intensité du courant traversant le groupement.

Méthode :

Solution proposée :

Remarque :

a. b. Appliquer les relations du circuit RL série et la loi d'Ohm en courant alternatif.

a. Il s'agit d'un groupement série de dipôles, d'où :

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2} = \sqrt{50^2 + (0,5 \times 314)^2} \text{ soit } Z = 165 \Omega.$$

b. La valeur efficace du courant est égale à :

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{230}{165} \text{ soit } I_B = 1,4 \text{ A.}$$

Le déphasage entre  $u$  et  $i$  est donné par :

$$\tan \varphi = \frac{L\omega}{R} \text{ soit } \varphi = 72,3^\circ.$$

Le courant  $i$  est en retard de 72,3° sur la tension d'alimentation  $u$ .

La précision des résultats dépend du soin apporté au tracé des graphiques.

c. Appliquer la formule de l'impédance d'un condensateur.

c.

$$X_C = \frac{1}{C\omega} \text{ soit } X_C = 159 \Omega.$$

Le courant  $i$  qui traverse le condensateur a pour caractéristiques :

– Sa valeur efficace :  $I_C = \frac{U}{Z} = \frac{230}{159} \text{ soit } I_C = 1,4 \text{ A.}$

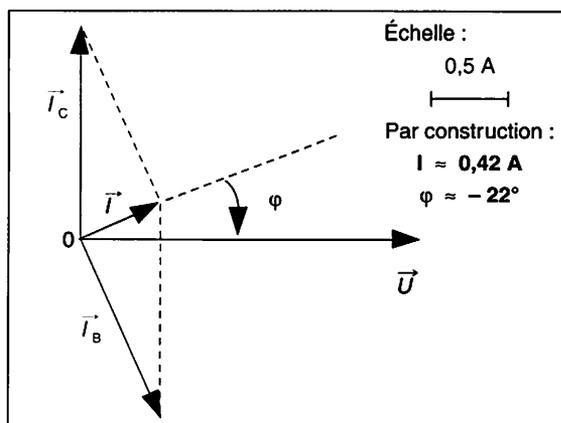
– Son déphasage : soit une avance de 90° de  $i$  sur la tension d'alimentation  $u$ .

La réactance de capacité est aussi l'impédance du condensateur.

d. Choisir une échelle et représenter les vecteurs  $\vec{I}_B$  et  $\vec{I}_C$ .  
Faire la somme vectorielle  $\vec{I}_B + \vec{I}_C$ .

d. Détermination, par construction de Fresnel, du courant traversant le groupement :

Le vecteur  $\vec{U}$  est la référence du graphique.



## EXERCICES À RÉSOUDRE

**E. 1** Une résistance  $R$  de  $1\,000\ \Omega$  et un condensateur de capacité  $C$  sont placés en série.

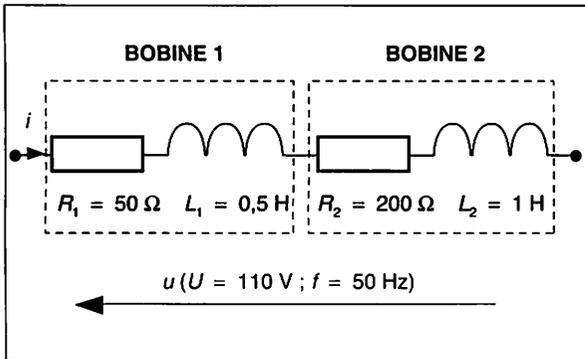
Le groupement est parcouru par un courant efficace de  $0,2\ \text{A}$  lorsque la tension efficace aux bornes est  $230\ \text{V}$  et de fréquence  $50\ \text{Hz}$ .

Déterminer la valeur de  $C$ .

**E. 2** Dans le montage de la figure ci-dessous, deux bobines sont placées en série.

Déterminer, pour une fréquence de  $50\ \text{Hz}$  :

- L'impédance de chaque bobine.
- L'impédance totale du circuit.
- Le courant circulant dans les bobines lorsqu'on applique au groupement une tension alternative de  $110\ \text{V}$ .



**E. 3** Une bobine d'inductance  $0,1\ \text{H}$  et de résistance  $20\ \Omega$  est utilisée sous une tension de fréquence  $50\ \text{Hz}$ .

- Déterminer le déphasage entre le courant dans la bobine et la tension à ses bornes.
- Un condensateur est placé en série avec cette bobine. Déterminer la valeur de la capacité pour que le courant dans le groupement soit en phase avec la tension.
- La tension efficace aux bornes du groupement est de  $24\ \text{V}$ . Calculer la tension aux bornes de chaque élément.

**E. 4** Une résistance  $R = 1\,000\ \Omega$ , une inductance pure  $L = 0,5\ \text{H}$  et un condensateur de capacité  $C$  sont branchés en parallèle.

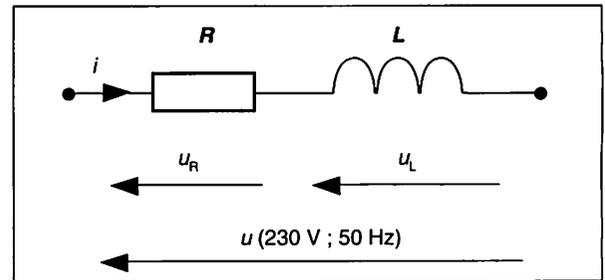
L'ensemble est alimenté par une tension alternative de valeur efficace  $230\ \text{V}$  et de fréquence  $50\ \text{Hz}$ .

- Déterminer la valeur de  $C$  pour que le courant traversant le circuit soit en phase avec la tension à ses bornes.
- Calculer dans ces conditions les valeurs efficaces des courants dans chaque composant et du courant total.

**E. 5** Un dipôle inductif dont le schéma est représenté ci-dessous est parcouru par un courant efficace de  $0,5\ \text{A}$  lorsqu'il est soumis à une tension efficace de  $230\ \text{V}$  et de fréquence  $50\ \text{Hz}$ .

La tension  $u$  est en avance de  $70^\circ$  sur le courant  $i$  qui traverse le dipôle.

Déterminer les valeurs de la résistance et de l'inductance du dipôle.

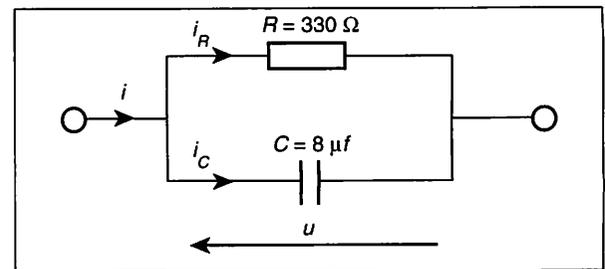


**E. 6** Dans le montage de la figure ci-après, une résistance  $R = 330\ \Omega$  est placée en parallèle avec un condensateur de capacité  $C = 8\ \mu\text{F}$ .

L'ensemble est alimenté par une tension alternative de valeur efficace  $230\ \text{V}$  et de fréquence  $50\ \text{Hz}$ .

Calculer :

- l'intensité dans chaque dipôle,
- l'intensité totale absorbée par le groupement.



# 7 Puissances

## ELECTROTECHNIQUE

### 1 Puissance active

À chaque instant, un dipôle absorbe une puissance instantanée égale au produit  $p = ui$ . La puissance active  $P$  est la valeur moyenne de la puissance instantanée.

La **puissance active**  $P$ , qui s'exprime aussi en watts, dépend des valeurs efficaces de  $u$  et de  $i$  et du déphasage  $\varphi$  entre les deux grandeurs (fig. 7.01).

La puissance active se calcule par la relation :

$$P = UI \cos \varphi$$

$P$  en watts,  
 $U$  en volts,  
 $I$  en ampères.

Exemple :

Un dipôle inductif d'impédance  $50 \Omega$  produit un déphasage  $\varphi = 70^\circ$ .

Lorsqu'il est alimenté par une tension de 230 V il est parcouru par un courant de valeur efficace :

$$I = \frac{U}{Z} \text{ soit } I = 4,6 \text{ A.}$$

La puissance active qu'il absorbe est égale à :

$$P = UI \cos \varphi = 230 \times 4,6 \times \cos 70^\circ \text{ soit } P = 362 \text{ W.}$$

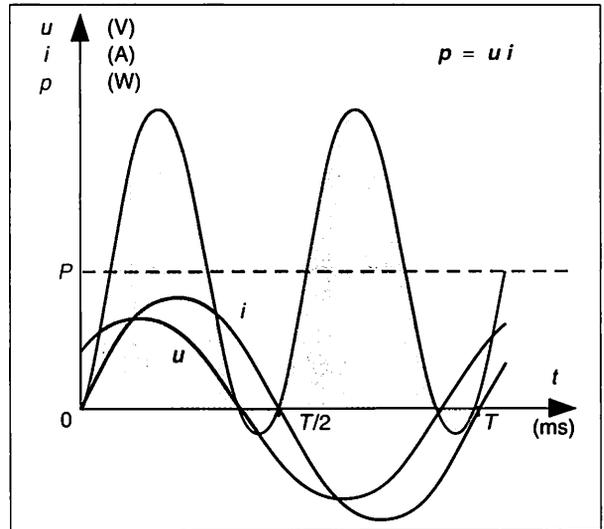


Fig. 7.01 : Puissance instantanée et puissance active.

### 2 Puissance apparente

La **puissance apparente**  $S$  reçue par un dipôle est égale au produit des valeurs efficaces de la tension et de l'intensité.

$$S = UI$$

$S$  en volts-ampères,  
 $U$  en volts,  
 $I$  en ampères.

L'unité de **puissance apparente** est le **VOLT-AMPÈRE (VA)**.

#### ■ FACTEUR DE PUISSANCE

Le **facteur de puissance** est le rapport entre les puissances active et apparente. Il est égal au cosinus de l'angle de déphasage  $\varphi$ .

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \text{facteur de puissance}$$

Remarque :

La puissance apparente est une caractéristique de construction des machines électriques. Celles-ci sont prévues pour un fonctionnement sous une tension nominale  $U_n$  déterminée par l'isolation de la machine, et avec un courant nominal  $I_n$  déterminé par les possibilités de refroidissement. La puissance apparente est alors :  $S_n = U_n I_n$ .

Ainsi un transformateur de 300 VA alimenté sous 230 V peut admettre un courant nominal de :

$$I_n = \frac{S}{U_n} = \frac{300}{230} \text{ soit } I_n = 1,30 \text{ A.}$$

### 3 Puissance réactive

Par analogie avec la puissance active  $P = UI \cos \varphi$ , la **puissance réactive** est donnée par la relation :

$$Q = UI \sin \varphi$$

$Q$  en volts-ampères réactifs,  
 $U$  en volts,  
 $I$  en ampères.

L'unité de **puissance réactive** est le **VOLT-AMPÈRE RÉACTIF (var)**.

**Remarque :**

Le signe de la puissance réactive est fonction de l'angle de déphasage produit par le récepteur considéré :

- pour un récepteur **inductif** ( $\varphi > 0$ ) la puissance réactive est **positive**,
- pour un récepteur **capacitif** ( $\varphi < 0$ ) la puissance réactive est **négative**.

Une installation courante est à tendance inductive. La puissance réactive, positive, est consommée sur le réseau qui alimente cette installation.

### 4 Triangle des puissances

Les puissances  $P$ ,  $Q$  et  $S$  correspondent aux longueurs des trois côtés d'un triangle rectangle appelé **triangle des puissances**.

Le triangle des puissances de la figure 7.02 correspond à un récepteur inductif, celui de la figure 7.03 à un récepteur capacitif.

Les relations dans le triangle rectangle permettent d'écrire :

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

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

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P}$$

**Exemple :**

Un moteur a une puissance utile de 1 kW avec un rendement de 0,8. Alimenté par une tension de valeur efficace 230 V, il consomme une intensité de 7 A.

La puissance utile ou puissance mécanique disponible sur l'arbre est une caractéristique du moteur. Elle permet de déterminer la puissance active  $P$  à partir du rendement  $\eta$  :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \text{ soit } P_a = P = \frac{P_u}{\eta} \text{ ou } P_a = 1\,250 \text{ W.}$$

La puissance apparente  $S$  est égale à :  $S = UI$   
soit  $S = 1\,610 \text{ VA}$ .

La puissance réactive a pour valeur :  $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$   
soit  $Q = 1\,015 \text{ var}$ .

La puissance réactive est positive puisque le moteur est un récepteur inductif. Son facteur de puissance est :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \text{ soit } \cos \varphi = 0,78.$$

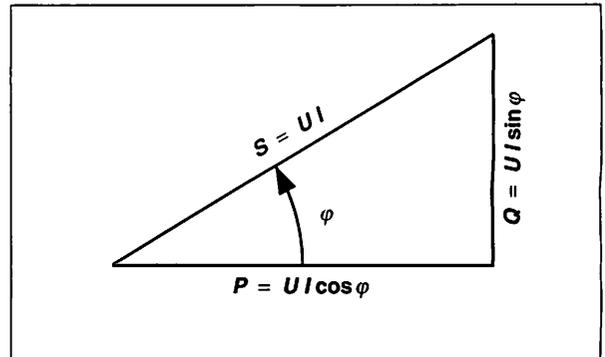


Fig. 7.02 : Triangle des puissances.

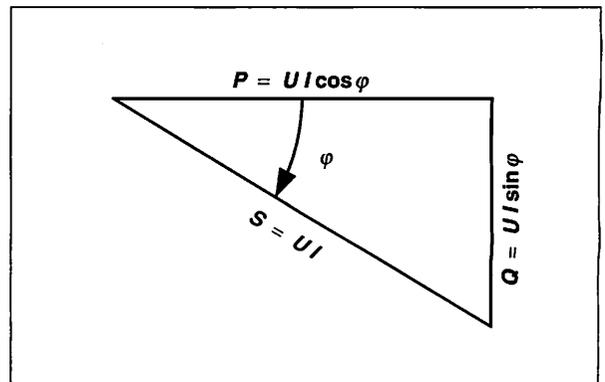


Fig. 7.03 : Puissances dans un récepteur capacitif.

## 5 Puissances consommées par les dipôles élémentaires

### ■ RÉSISTANCE PURE

Pour une résistance pure,  $u$  et  $i$  sont en phase. Le facteur de puissance est égal à l'unité.

La **puissance instantanée**  $p$ , représentée figure 7.04 est toujours **positive**.

Le facteur de puissance est égal à l'unité :

$$\cos \varphi = 1 \quad \sin \varphi = 0$$

La puissance active est égale à la puissance apparente :

$$P = S = UI$$

La puissance réactive est nulle :

$$Q = 0$$

Une résistance consomme en permanence de l'énergie active, la puissance consommée est égale à :

$$P = RI^2 = \frac{U^2}{R}$$

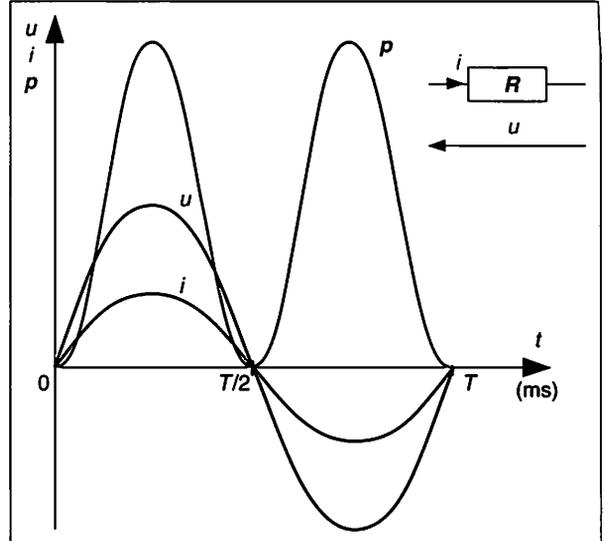


Fig. 7.04 : Puissance instantanée dans une résistance pure.

### ■ INDUCTANCE PURE

Dans une inductance pure, la tension  $u$  est en avance de  $90^\circ$  sur l'intensité  $i$ . Le facteur de puissance est nul.

D'après la représentation de la figure 7.05, l'**inductance**  $L$  emmagasine de l'énergie électromagnétique entre  $0$  et  $T/4$ , la puissance  $p$  est alors positive.

Elle restitue cette énergie entre  $T/4$  et  $T/2$ ,  $p$  est alors négative.

La valeur moyenne de  $p$  est nulle, une inductance pure ne consomme aucune puissance active.

Le facteur de puissance est nul :

$$\cos \varphi = 0 \quad \sin \varphi = 1$$

La puissance réactive est égale à la puissance apparente :

$$Q = S = UI$$

Une inductance pure consomme en permanence de l'énergie réactive, comme la tension aux bornes de l'inductance est égale à  $U = L\omega I$ , la puissance consommée est égale à :

$$Q = L\omega I^2 = \frac{U^2}{L\omega}$$

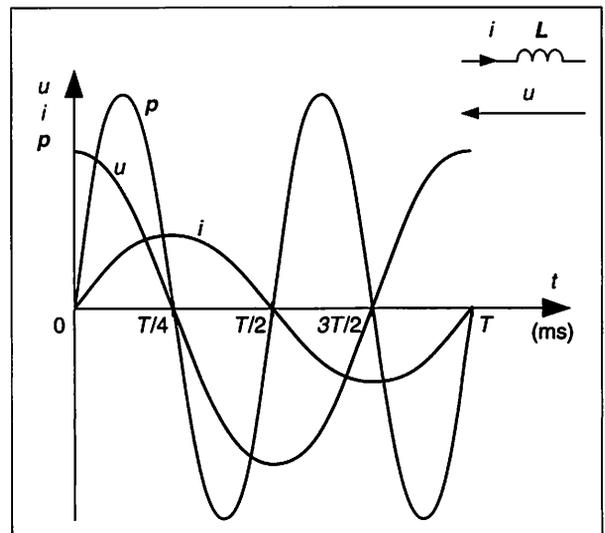


Fig. 7.05 : Puissance instantanée dans une inductance pure.

## ■ CAPACITÉ PURE

Dans une capacité pure, la tension  $u$  est en retard de  $90^\circ$  sur l'intensité  $i$ . Le facteur de puissance est nul.

Durant un quart de période, entre  $T/4$  et  $T/2$ ,  $C$  emmagasine de l'énergie électrostatique qu'il restitue durant le quart de période suivant entre  $T/2$  et  $3T/4$  (fig. 7.06).

La valeur moyenne de  $p$  est nulle, une capacité pure ne consomme aucune puissance active.

Le facteur de puissance est nul ( $\varphi = -90^\circ$ ) :

$$\cos \varphi = 0 \quad \sin \varphi = -1$$

La puissance réactive négative est égale à l'opposé de la puissance apparente :

$$Q = -S = -UI$$

Une capacité pure consomme en permanence de l'énergie réactive négative, comme la tension aux bornes de la capacité est égale à  $U = \frac{I}{C\omega}$ , la puissance consommée est égale à :

$$Q = -\frac{I^2}{C\omega} = -U^2 C\omega$$

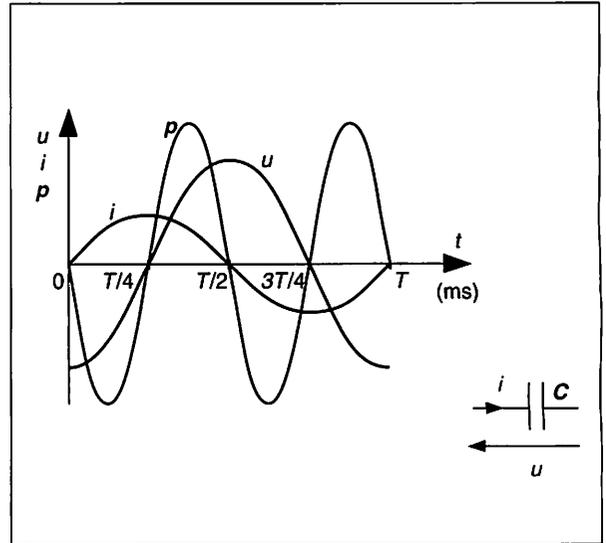


Fig. 7.06 : Puissance instantanée dans une capacité pure.

Remarque :

Comme la puissance réactive consommée est négative, la capacité fournit donc de la puissance réactive au réseau d'alimentation.

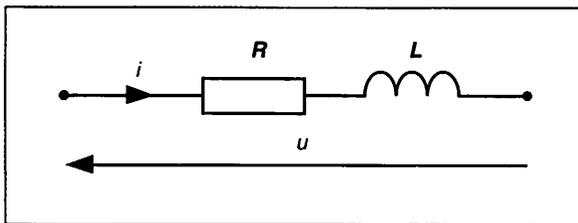
## ■ TABLEAU RÉCAPITULATIF DES PUISSANCES

Dipôles	Puissance active $P$	Puissance réactive $Q$	Puissance apparente $S$
Résistance $R$	$UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}$	0	$UI$
Inductance $L$	0	$UI = L\omega I^2 = \frac{U^2}{L\omega}$	$UI$
Capacité $C$	0	$-UI = -\frac{I^2}{C\omega} = -U^2 C\omega$	$UI$

Exemple :

Un dipôle inductif constitué d'une résistance  $R$  et d'une inductance  $L$ , alimenté par une tension de valeur efficace 230 V et de fréquence 50 Hz, consomme un courant de 1,5 A.

La puissance qu'il absorbe est de 180 W. Soit à déterminer les valeurs de  $L$  et de  $R$ .



La puissance active  $P = 180$  W est uniquement absorbée par la résistance  $R$ . Sa valeur est donc telle que :

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{180}{1,5^2} \text{ soit } R = 80 \Omega.$$

La puissance apparente du circuit est égale à :

$$S = UI = 345 \text{ VA,}$$

d'où la puissance réactive :

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \text{ soit } Q = 294 \text{ var.}$$

Cette puissance réactive est uniquement consommée par l'inductance  $L$ . Sa valeur est donc égale à :

$$L = \frac{Q}{\omega I^2} = \frac{294}{314 \times 1,5^2} \text{ soit } L = 0,42 \text{ H.}$$

## 6 Puissances consommées par un groupement de récepteurs

Une installation électrique est un ensemble de récepteurs, groupés en parallèle et alimentés par une tension commune de valeur efficace constante fournie par le réseau de distribution.

Chaque récepteur (lampe, radiateur, moteur...) est caractérisé par :

- la puissance électrique absorbée,
- le facteur de puissance,
- sa nature, inductive ou capacitive.

**Le problème à résoudre consiste à déterminer le courant total consommé par le groupement et le facteur de puissance de l'installation.**

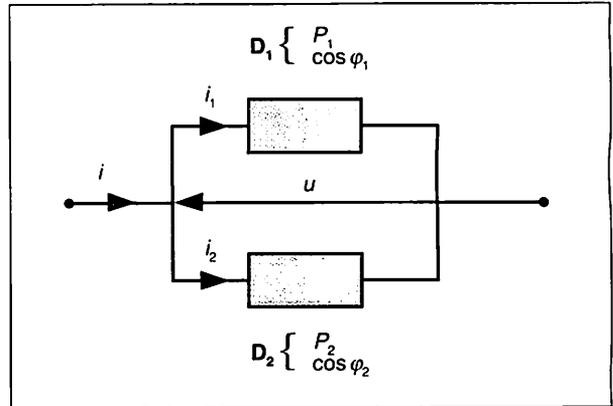


Fig. 7.07 : Groupements de dipôles.

### ■ MÉTHODE DE BOUCHEROT

**Le théorème de Boucherot énonce la conservation des puissances actives et réactives.**

**Dans tout circuit électrique :**

- la puissance active totale consommée est égale à la somme arithmétique des puissances actives consommées par chaque dipôle,
- la puissance réactive totale consommée est égale à la somme algébrique des puissances réactives consommées par chaque dipôle.

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$$

Par contre les **puissances apparentes ne se conservent pas.**

Pour appliquer la **méthode de Boucherot** à un circuit, il faut faire le **bilan des puissances actives et réactives**. Ce bilan peut se présenter sous la forme du tableau de la figure 7.08 (le groupement étudié est celui représenté fig. 7.07).

La puissance apparente totale se calcule alors par la relation :

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

De la valeur de  $S$  on peut déduire :

$$I = \frac{S}{U} \quad \cos \varphi = \frac{P}{S}$$

**Remarques :**

- la méthode de Boucherot s'applique à tout type de groupements : série, parallèle ou mixte.
- le signe de la puissance réactive totale  $Q$  indique si l'installation est inductive ( $Q > 0$ ) ou capacitive ( $Q < 0$ ).

Dipôles	Puissance active (W)	Puissance réactive (var)
$D_1$	$P_1$	$Q_1 = P_1 \tan \varphi_1$
$D_2$	$P_2$	$Q_2 = P_2 \tan \varphi_2$
installation	$P = P_1 + P_2$	$Q = Q_1 + Q_2$

Fig. 7.08 : Bilan des puissances (cf. schéma fig. 7.07).

**Exemple :**

Le dipôle  $D_1$  est un moteur tel que :  $I_1 = 5 \text{ A}$  ;  $\cos \varphi_1 = 0,8$ .  
Le dipôle  $D_2$  est un deuxième moteur tel que :  $I_2 = 10 \text{ A}$  ;  $\cos \varphi_2 = 0,7$ .

Le groupement est alimenté sous une tension efficace de 230 V.

Le bilan des puissances actives et réactives correspond au tableau ci-après.

Dipôles	Puissance active (W)	Puissance réactive (var)
$D_1$	920	$920 \tan \varphi_1 = 690$
$D_2$	1 610	$1 610 \tan \varphi_2 = 1 643$
Installation	$P = 2 530$	$Q = 2 333$

Les deux dipôles étant inductifs, leurs puissances réactives sont positives.

La puissance réactive totale est positive, l'installation est inductive.

La puissance apparente est égale à :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ soit } S = 3\,441 \text{ VA.}$$

$$\text{D'où : } I = \frac{S}{U} \text{ soit } I = 14,9 \text{ A.}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \text{ soit } \cos \varphi = 0,74.$$

## 7 Amélioration du facteur de puissance

Le courant consommé par une installation est :  
 - proportionnel à la puissance active absorbée  $P$ ,  
 - inversement proportionnel au facteur de puissance  $\cos \varphi$ .

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

Pour fournir ce courant, le distributeur d'énergie électrique doit prévoir des **lignes de section d'autant plus grande que l'intensité est importante**.

Un faible facteur de puissance, par augmentation du courant consommé, oblige le fournisseur à **surdimensionner**, par rapport à la puissance fournie, les lignes et les éléments qui les alimentent (alternateurs, transformateurs).

Le facteur de puissance moyen d'une installation industrielle est mesuré à partir de deux compteurs :

- l'un mesure l'énergie active  $W$ ,
- l'autre l'énergie réactive  $W_R$ .

Le facteur de puissance se détermine alors à partir de la relation :

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} = \frac{W_R}{W}$$

### ■ PRINCIPE D'AMÉLIORATION DU FACTEUR DE PUISSANCE

Une installation industrielle a toujours un **caractère inductif** du fait des moteurs qui la composent. La puissance réactive est donc positive. L'installation consomme une énergie réactive d'autant plus grande que son facteur de puissance est faible.

Pour réduire cette consommation, il faut un dispositif produisant de l'énergie réactive : le moyen le plus simple pour cela est le branchement, en parallèle sur l'installation, de **condensateurs** (cf fig. 7.09). Le condensateur fournit au réseau de l'énergie réactive, compensant ainsi celle consommée par l'installation.

**Exemple :**

Ainsi pour une installation de puissance 15 kW sous une tension efficace de 230 V, le courant consommé est égal à :

$$I = 72 \text{ A avec } \cos \varphi = 0,9.$$

$$I = 130 \text{ A avec } \cos \varphi = 0,5.$$

Pour obliger les usagers à avoir des installations de facteur de puissance élevé, l'Électricité de France (EDF) fixe :

- une **réduction** sur le prix du kWh lorsque  $\cos \varphi > 0,86$  (soit  $\tan \varphi < 0,6$ ),
- une **majoration** lorsque  $\cos \varphi < 0,86$  (soit  $\tan \varphi > 0,6$ ).

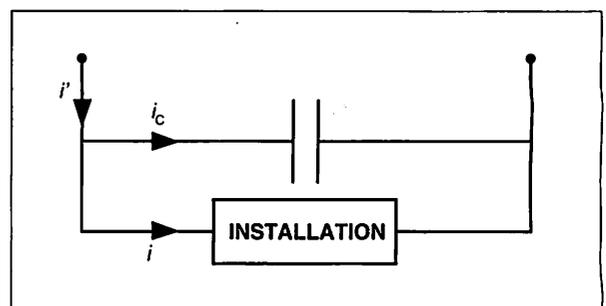


Fig. 7.09 : Amélioration du facteur de puissance.

La valeur de la capacité dépend du facteur de puissance de l'installation ( $\cos \varphi$ ) et de celui souhaité ( $\cos \varphi'$ ).

## ■ DÉTERMINATION DE LA CAPACITÉ

Le calcul de la capacité permettant d'améliorer le facteur de puissance peut se faire par la **méthode de Boucherot**.

Sur la figure 7.10 sont représentés les triangles des puissances d'une installation :

- sans condensateur  $P, Q, S,$
- avec condensateur  $P', Q', S'.$

La puissance active  $P$  est constante.

La puissance réactive  $Q$  de l'installation sans condensateur est égale à :

$$Q = P \tan \varphi.$$

Avec condensateur, elle est égale à :

$$Q' = P \tan \varphi'.$$

La différence de puissance réactive est fournie par le condensateur :

$$Q_C = Q - Q' = P \tan \varphi - P \tan \varphi'.$$

La puissance fournie par une capacité  $C$  étant égale à :

$$Q_C = U^2 C \omega.$$

La capacité du condensateur se calcule à partir de la relation :

$$U^2 C \omega = P (\tan \varphi - \tan \varphi')$$

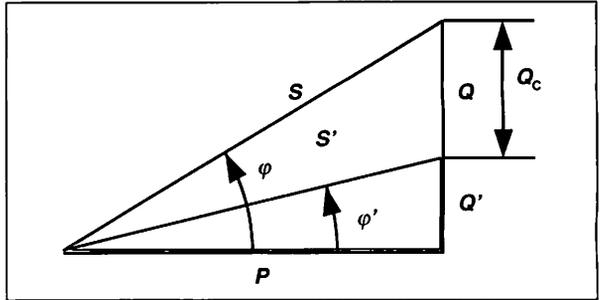


Fig. 7.10 : Détermination de  $C$  par la méthode de Boucherot ou méthode des puissances.

### Exemple :

L'installation de l'exemple précédent absorbe une puissance active de 1656 W, son  $\cos \varphi$  est égal à 0,6. Déterminer la capacité du condensateur à mettre en parallèle avec elle pour que le facteur de puissance résultant soit de 0,9.

Des valeurs des facteurs de puissance sont déduites  $\tan \varphi$  et  $\tan \varphi'$  :

$$\cos \varphi = 0,6 \rightarrow \tan \varphi = 1,33$$

$$\cos \varphi' = 0,9 \rightarrow \tan \varphi' = 0,48.$$

D'où :

$$C = \frac{P(\tan \varphi - \tan \varphi')}{U^2 \omega} = \frac{1656(1,33 - 0,48)}{230^2 \times 314}$$

$$\text{soit : } C = 85 \mu\text{F}.$$

## ESSENTIEL À RETENIR

### PUISSANCES EN MONOPHASÉ

$$\begin{aligned} S &= UI & U \text{ en volts,} \\ P &= UI \cos \varphi & I \text{ en ampères,} \\ Q &= UI \sin \varphi & S \text{ en volts-ampères,} \\ & & P \text{ en watts,} \\ & & Q \text{ en volts ampères réactifs.} \end{aligned}$$

### RELATIONS ENTRE PUISSANCES

$$\begin{aligned} S^2 &= P^2 + Q^2 \\ \cos \varphi &= \frac{P}{S} \quad \tan \varphi = \frac{Q}{P} \end{aligned}$$

### PUISSANCES CONSOMMÉES PAR LES DIPÔLES ÉLÉMENTAIRES

– Résistance pure

$$P = RI^2 = \frac{U^2}{R} \quad Q = 0$$

– Inductance pure

$$P = 0 \quad Q = L\omega I^2 = \frac{U^2}{L\omega}$$

– Capacité pure

$$P = 0 \quad Q = -\frac{I^2}{C\omega} = -U^2 C \omega$$

### THÉORÈME DE BOUCHEROT

La puissance active totale est la somme des puissances actives :  $P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$

La puissance réactive totale est la somme des puissances réactives :  $Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$

Les puissances apparentes ne se conservent pas.

## TEST RAPIDE

### Avertissement :

Les tensions et courants du questionnaire ci-dessous sont alternatifs sinusoïdaux. Les valeurs indiquées sont des valeurs efficaces.

**T.1** Un dipôle alimenté sous 24 V, 50 Hz consomme un courant de 0,5 A avec un facteur de puissance de 0,8.

Calculer sa puissance active et sa puissance apparente.

**Réponse :**  $P : 9,6 \text{ W} ; 12 \text{ W} ; 15 \text{ W}.$   
 $S : 9,6 \text{ VA} ; 12 \text{ VA} ; 15 \text{ VA}.$

**T.2** Un récepteur absorbe une puissance de 500 W avec un facteur de puissance de 0,8.

Calculer sa puissance réactive et sa puissance apparente.

**Réponse :**  $Q : 375 \text{ var} ; 400 \text{ var} ; 625 \text{ var}.$   
 $S : 375 \text{ VA} ; 400 \text{ VA} ; 625 \text{ VA}.$

**T.3** Un moteur alimenté sous 230 V consomme 5 A. Sa puissance absorbée est de 825 W. Déterminer son facteur de puissance.

**Réponse :**  $0,6 ; 0,72 ; 1,55.$

**T.4** Déterminer la puissance active absorbée par une résistance de  $100 \Omega$  sous 230 V.

**Réponse :**  $0 \text{ W} ; 529 \text{ W} ; 22 \text{ kW}.$

**T.5** Déterminer la puissance active absorbée par une inductance de 0,5 H sous 230 V.

**Réponse :**  $0 \text{ W} ; 300 \text{ W} ; 400 \text{ W}.$

**T.6** Déterminer la puissance réactive absorbée par un condensateur de  $100 \mu\text{F}$  alimenté sous 230 V, 50 Hz.

**Réponse :**  $- 1 660 \text{ var} ; 0 \text{ var} ; 1 660 \text{ var}.$

**T.7** Quel est le signe de la puissance réactive absorbée par un récepteur inductif ?

**Réponse :** *positif ; négatif.*

**T.8** Quel est le signe de la puissance active absorbée par un récepteur résistif ?

**Réponse :** *positif ; négatif.*

**T.9** Deux moteurs absorbent respectivement 1 500 W et 2 000 W.

Ils fonctionnent simultanément.

Calculer la puissance active absorbée par le groupement.

**Réponse :**  $300 \text{ W} ; 3 500 \text{ W} ; \text{non calculable}.$

**T.10** Deux moteurs fonctionnent sous 230 V. Le premier absorbe 5 A, l'autre 10 A.

Calculer la puissance apparente du groupement.

**Réponse :**  $1 100 \text{ VA} ; 3 300 \text{ VA} ; \text{non calculable}.$

**T.11** Une installation a consommé une énergie active de 10 000 kWh et une énergie réactive de 7 500 kvarh. Déterminer son facteur de puissance.

**Réponse :**  $0,75 ; 0,8 ; 1.$

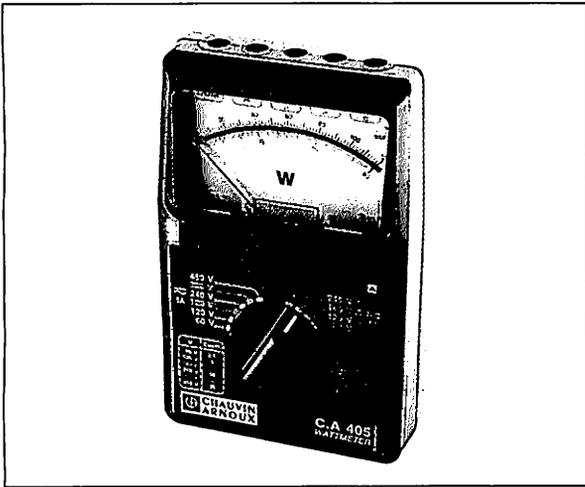
## MESURE DES PUISSANCES ACTIVES. WATTMÈTRE

### 1 Constitution

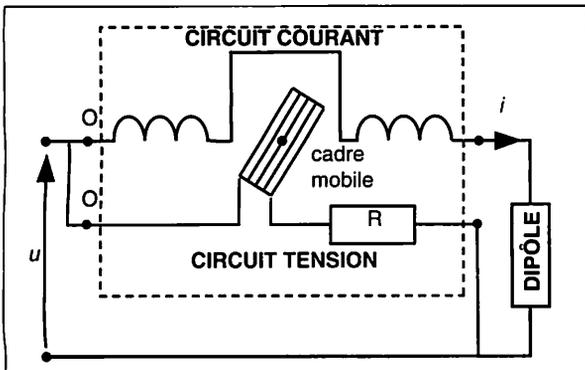
Le wattmètre électrodynamique (ci-après) comporte deux circuits indépendants représentés sur le schéma qui suit :

– le **circuit tension** est constitué par un cadre mobile en série avec une résistance additionnelle. Il se place en parallèle sur le dipôle comme un voltmètre.

– le **circuit courant**, constitué d'une bobine inductrice fixe se place en série avec le dipôle.



Wattmètre électrodynamique (CHAUVIN – ARNOUX).



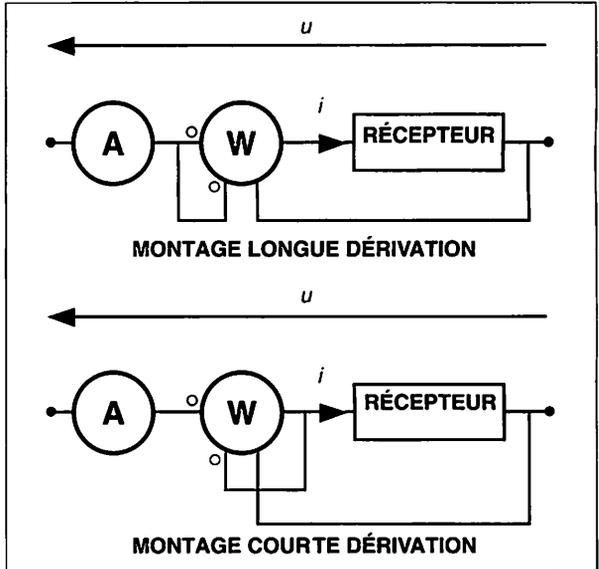
Constitution d'un wattmètre électrodynamique.

La déviation du cadre mobile est proportionnelle à la valeur moyenne de la puissance absorbée par le dipôle, c'est à dire la puissance active en courant alternatif.

Un wattmètre comporte donc quatre bornes pour le relier au circuit extérieur.

Un wattmètre n'est pas polarisé ; pour que l'appareil dévie dans le bon sens, le constructeur repère les bornes d'entrée des circuits courant et tension soit par zéro (0), soit par un astérisque (\*).

Comme dans le cas d'une mesure voltampèremétrique, deux montages sont possibles (voir figure ci-dessous).



Montages de wattmètre.

**Dans tous les cas, il est indispensable de placer un ampèremètre dans le circuit courant du wattmètre : afin de contrôler si ce circuit n'est pas surchargé.**

En effet, le wattmètre indiquant la puissance active consommée, l'intensité peut varier de façon importante en fonction du facteur de puissance du récepteur.

#### Remarque .....

Dans les wattmètres électroniques, le produit  $u \times i$  et sa valeur moyenne sont calculés électroniquement. Ces appareils ont la même utilisation que les wattmètres électrodynamiques mais disposent de plus grandes sensibilités dans la mesure des courants.

### 2 Calibres-lecture

Un wattmètre dispose en général de plusieurs calibres tension et intensité.

La **constante K** du wattmètre correspond pour des calibres donnés ( $U$ ,  $I$ ) à la puissance par division de l'échelle de lecture. Elle se calcule par la relation :

$$K = \frac{\text{Calibre } U \times \text{Calibre } I}{\text{Nombre total de divisions}}$$

La puissance mesurée est alors égale à :

$$P = K \times \text{nombre de divisions lues}$$

**Exemple :**

L'échelle d'un wattmètre comporte 150 divisions. Les calibres sont  $U = 300 \text{ V}$  ;  $I = 2,5 \text{ A}$ .

La constante est égale à :

$$K = \frac{300 \times 2,5}{150} \text{ soit } K = 5 \text{ W/div.}$$

Si l'aiguille s'arrête sur la division 60, la puissance mesurée est :  $P = 5 \times 60$  soit  $P = 300 \text{ W}$ .

## MESURE DU FACTEUR DE PUISSANCE

### ■ BUT DE LA MESURE

Déterminer, par des mesures de puissance, le facteur de puissance d'un tube fluorescent :

- non compensé,
- compensé par un condensateur de  $2 \mu\text{F}$  en parallèle avec lui.

### ■ PRINCIPE-PROCÉDURE

La mesure du facteur de puissance résulte de l'application de la relation :

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

Elle nécessite la mesure de  $P$  au wattmètre, la mesure de  $S$  au voltmètre et à l'ampèremètre comme indiqué sur le schéma de montage.

### ■ RÉSULTATS

Les mesures donnent :

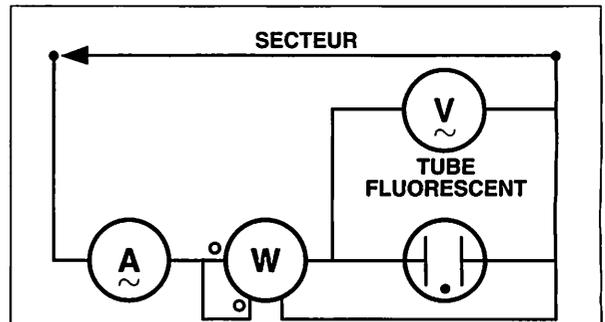
a) sans condensateur :  $U = 227 \text{ V}$  ;  $I = 0,4 \text{ A}$  ;  $P = 50 \text{ W}$

$$\text{soit : } \cos \varphi = \frac{P}{UI} = \frac{50}{227 \times 0,4} \text{ ou } \cos \varphi = 0,55.$$

b) avec condensateur :

$$U = 227 \text{ V} ; I = 0,3 \text{ A} ; P = 50 \text{ W} \text{ soit } \cos \varphi = 0,73.$$

### ■ SCHÉMA DU MONTAGE



Mesure de facteur de puissance.

## MESURE D'INDUCTANCE

### ■ BUT DE LA MESURE

Mesurer les puissances absorbées par le primaire d'un transformateur 230 V-24 V fonctionnant à vide.

En déduire l'inductance du primaire.

### ■ PRINCIPE-PROCÉDURE

Le calcul de l'inductance se fait par application de la relation :

$$Q_L = L\omega I^2 \text{ avec } Q_L = P \tan \varphi.$$

Cela nécessite la mesure de la puissance active  $P$ , du courant  $I$  et de la tension  $U$  (cf. schéma de montage).

### ■ RÉSULTATS

Les mesures donnent :

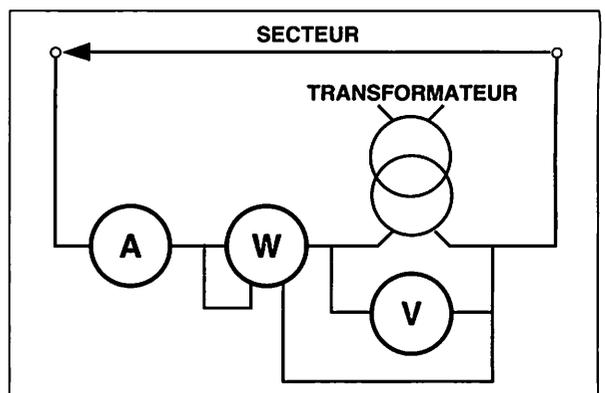
$$U = 227 \text{ V} ; I = 0,15 \text{ A} ; P = 10 \text{ W}$$

$$\text{soit : } \cos \varphi = \frac{P}{UI} = \frac{10}{227 \times 0,15} \text{ ou } \cos \varphi = 0,55 ; \tan \varphi = 3,25.$$

D'après la relation :  $L\omega I^2 = P \tan \varphi$ .

$$L = \frac{P \tan \varphi}{\omega I^2} = \frac{10 \times 3,25}{314 \times (0,15)^2} \text{ soit } L = 4,6 \text{ H.}$$

### ■ SCHÉMA DU MONTAGE



Mesure d'inductance.

# APPLICATIONS

## EXERCICE RÉSOLU

### Énoncé

Une installation monophasée alimentée sous 230 V, 50 Hz comprend :

- un moteur de 3 kW ayant un rendement de 0,75 et un facteur de puissance de 0,6,
- un second moteur de 4 kW, de rendement 0,8 et de facteur de puissance 0,8.

a. Calculer les intensités des courants absorbés par chacun des moteurs ainsi que l'intensité totale et le facteur de puissance de l'installation.

b. On veut relever le facteur de puissance de l'installation en plaçant un condensateur en parallèle. Quelle sera sa capacité si le nouveau facteur de puissance est 0,85 ?

c. Pour éclairer l'atelier où se trouve l'installation ainsi adaptée, on utilise des lampes à incandescence. Le facteur de puissance est alors de 0,90.

Déterminer la puissance des lampes ainsi que l'intensité du courant total absorbé par l'installation de l'atelier.

#### Méthode :

#### Solution proposée :

#### Remarque :

a. Déterminer la puissance active absorbée à partir du rendement. En déduire les puissances réactives.

a. La puissance électrique absorbée est donnée par :

$$P_a = \frac{P_U}{\eta}$$

- soit : – pour le premier moteur  $P_{a1} = 4 \text{ kW}$ ,  
– pour le second moteur  $P_{a2} = 5 \text{ kW}$ .

Les puissances réactives se calculent à partir de la relation :  $Q = P \tan \varphi$  avec  $\cos \varphi_1 = 0,6$

soit :  $\tan \varphi_1 = 1,33$  et  $\cos \varphi_2 = 0,8$  soit  $\tan \varphi_2 = 0,75$ .

Le bilan des puissances est donné ci-après :

	Puissance active (W)	Puissance réactive (var)
Moteur 1	$P_1 = 4000$	$4000 \tan \varphi_1 = 5333$
Moteur 2	$P_2 = 5000$	$5000 \tan \varphi_2 = 3750$
Installation	$P = 9000$	$Q = 9083$

La puissance indiquée sur la plaque signalétique est la puissance mécanique ou puissance utile.

Appliquer le théorème de Boucherot.

En déduire la puissance apparente totale et l'intensité dans l'installation.

D'où les puissances apparentes :

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

– pour le moteur 1 :  $S_1 = 6666 \text{ VA}$ ,  
– pour le moteur 2 :  $S_2 = 6250 \text{ VA}$ ,  
– pour l'installation :  $S = 12786 \text{ VA}$ .

Les puissances apparentes ne s'additionnent pas.

Les courants absorbés sont égaux à :

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

– pour le moteur 1 :  $I_1 = 29 \text{ A}$ ,  
– pour le moteur 2 :  $I_2 = 27 \text{ A}$ ,  
– pour l'installation :  $I = 55,6 \text{ A}$ .

Le facteur de puissance a pour valeur :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{9000}{12786} \text{ soit } \cos \varphi = 0,7.$$

b. Appliquer la méthode de Boucherot.

b. La capacité du condensateur se calcule par la relation :

$$C = \frac{P (\tan \varphi - \tan \varphi')}{U^2 \omega}$$

avec  $\cos \varphi = 0,7$  soit  $\tan \varphi = 1,02$  et  $\cos \varphi' = 0,85$   
soit  $\tan \varphi' = 0,62$ . Soit  $C = 217 \mu\text{F}$ .

Le condensateur permet l'amélioration du facteur de puissance.

**Méthode (suite) :**

c. Même démarche qu'en a. mais appliquée aux lampes.

**Solution proposée (suite) :**

c. L'installation compensée absorbe une puissance réactive égale à :

$$Q' = P \tan \varphi' = 9\,000 \tan \varphi' \text{ soit } Q' = 5\,580 \text{ var.}$$

Le fait de rajouter des lampes ne change pas la puissance réactive.

Le facteur de puissance étant égal à 0,9 ( $\tan \varphi = 0,484$ ).

La puissance active est alors :

$$P' = \frac{Q'}{\tan \varphi'} = \frac{5\,580}{0,484} \text{ soit } P = 11\,529 \text{ W.}$$

Les lampes ont une puissance :

$$P_L = P' - P = 11\,529 - 9\,000 \\ \text{soit : } P_L = 2\,529 \text{ W.}$$

**Remarques (suite) :**

– L'augmentation de la puissance active due à la mise en place de l'éclairage de l'atelier (éclairage par lampes à incandescence contribue également l'amélioration du facteur de puissance.

**EXERCICES À RÉSOUDRE**

**E. 1** Un moteur monophasé 230 V, 50 Hz et de puissance utile 100 W entraîne une petite meule.

Le moteur fonctionnant pendant 15 minutes à son régime nominal a consommé 30 Wh, un ampèremètre indique alors 0,8 A.

Calculer :

- la puissance active absorbée par le moteur.
- la puissance réactive.
- le facteur de puissance du moteur.
- le rendement du moteur.

On veut relever le facteur de puissance à la valeur  $\cos \varphi = 0,9$ .

Calculer la capacité du condensateur nécessaire.

**E. 2** Un atelier alimenté en courant alternatif 230 V, 50 Hz comprend en parallèle :

- un moteur de 3,3 kW ayant un rendement de 0,7 et un facteur de puissance de 0,8,
- un groupe de 20 lampes de 100 W chacune.

Déterminer :

- les puissances active et réactive du moteur.
- la puissance apparente de l'installation, le courant qu'elle consomme et son facteur de puissance.

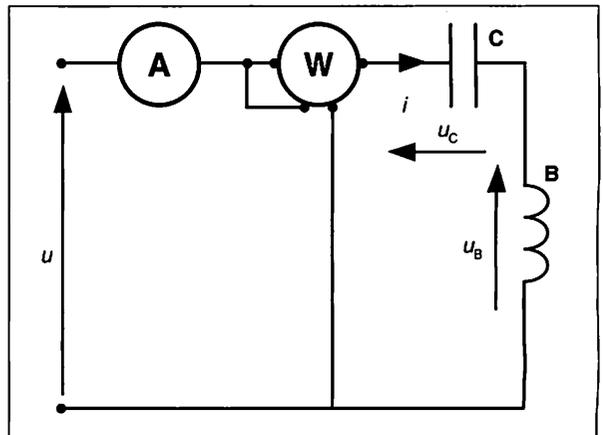
**E. 3** L'essai d'un tube fluorescent donne les résultats suivants :

Puissance : 80 W – Tension : 232 V – Intensité : 0,5 A.

- Calculer le facteur de puissance.
- Déterminer la capacité du condensateur à placer en parallèle sur ce tube pour que le facteur de puissance de l'ensemble soit égal à 0,9.

**E. 4** Dans le montage de la figure ci-contre on donne :  $I = 1 \text{ A}$  ;  $P = 41 \text{ W}$  ;  $f = 50 \text{ Hz}$  ;  $U_B = 300 \text{ V}$  ;  $U_C = 210 \text{ V}$ .

- Calculer l'impédance de la bobine.
- Calculer la résistance, l'inductance et le facteur de puissance de la bobine.
- Construire le diagramme de Fresnel des tensions du circuit. En déduire la tension  $U$  à ses bornes et le facteur de puissance de l'ensemble.



**E. 5** Un abonné dispose d'une installation monophasée 230 V-50 Hz.

Il utilise simultanément un radiateur de résistance  $35 \Omega$  et un moteur monophasé qui absorbe 11 A avec un facteur de puissance égal à 0,70.

Calculer :

- le facteur de puissance de l'ensemble,
- l'intensité totale demandée au réseau.

# 8 Couplages et puissances en triphasé

## ÉLECTROTECHNIQUE

### 1 Tensions triphasées

Une ligne de distribution triphasée comporte quatre conducteurs (fig. 8.01).

Les trois premiers, les fils de phase, sont numérotés 1, 2 et 3, = le quatrième, le fil neutre, est repéré par la lettre N.

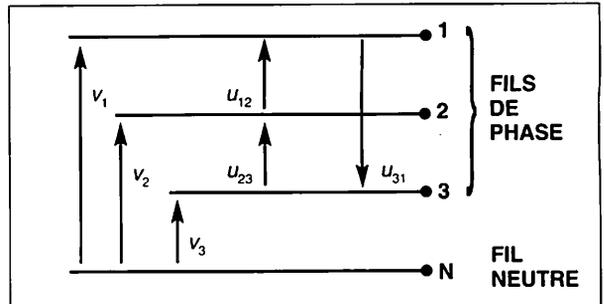


Fig. 8.01 : Distribution triphasée.

#### ■ TENSIONS SIMPLES

Les tensions simples sont les tensions entre chaque fil de phase et le neutre : = elles sont notées  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$ .

Dans un système triphasé équilibré, comme le réseau EDF, les tensions simples sont sinusoïdales :

- de même fréquence,
- de même valeur efficace notée  $V$ ,
- déphasées de  $120^\circ$  ( $2\pi/3$  rad) les unes par rapport aux autres.

La figure 8.02 représente ces trois tensions et la représentation de Fresnel de la figure 8.03 montre les trois vecteurs déphasés de  $120^\circ$ .

Par construction on a :  $v_1 + v_2 + v_3 = 0$ .

À chaque instant, la somme des tensions simples est nulle :

$$v_1 + v_2 + v_3 = 0$$

#### Remarque :

Dans le réseau de distribution EDF, les tensions simples ont pour valeur efficace :

$$V = 230 \text{ V}$$

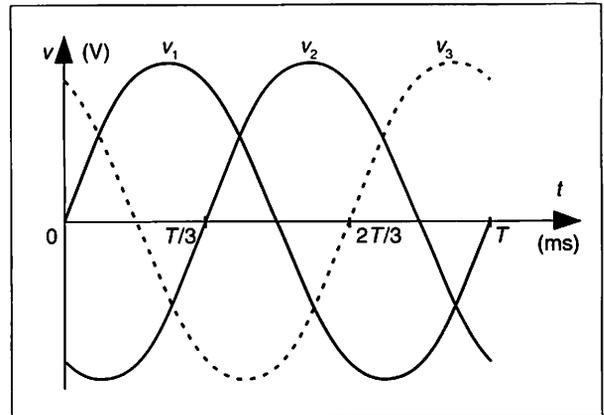


Fig. 8.02 : Tensions simples triphasées.

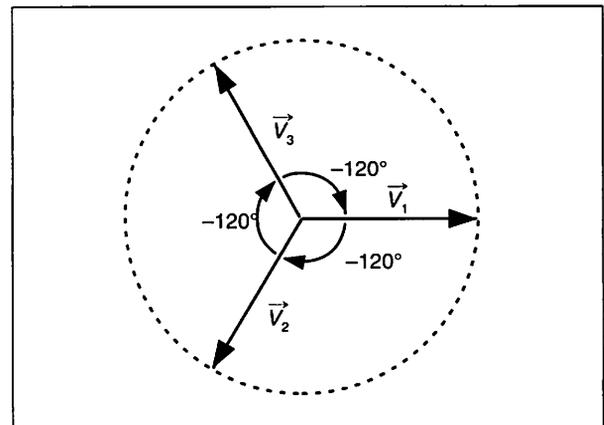


Fig. 8.03 : Représentation de Fresnel des tensions simples.

## ■ TENSIONS COMPOSÉES

Les tensions composées sont les tensions entre deux phases :  
 = elles sont notées  $u_{12}$ ,  $u_{23}$  et  $u_{31}$ .

Les trois tensions composées, comme les tensions simples, sont sinusoïdales :

- de même fréquence,
- de même valeur efficace notée  $U$ ,
- déphasées de  $120^\circ$  ( $2\pi/3$  rad) les unes par rapport aux autres. Leur représentation est analogue à celle de la figure 8.04.

D'après la loi des mailles, ces tensions sont telles que :

$$\begin{aligned} u_{12} &= v_1 - v_2, \\ u_{23} &= v_2 - v_3, \\ u_{31} &= v_3 - v_1. \end{aligned}$$

Ainsi, comme indiqué par le triangle OAB de la figure 8.05 :

$$AI = OA \cos 30^\circ = OA \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\text{soit : } AB = 2AI = OA \sqrt{3}$$

d'où :

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

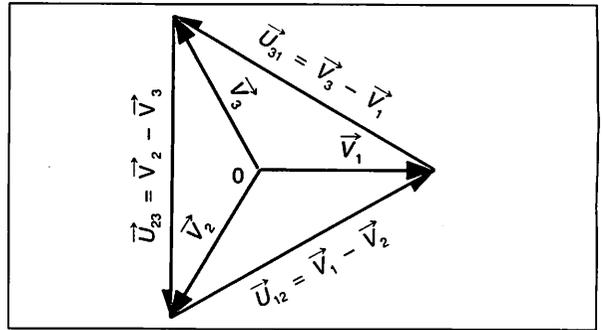


Fig. 8.04 : Tensions simples et composées.

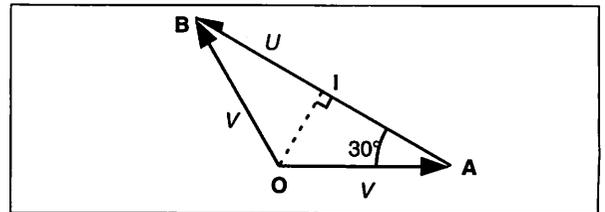


Fig. 8.05 : Relation entre tensions simple et composée.

**Exemple :**

Dans le réseau de distribution EDF :

$$V = 230 \text{ V} ; U = V\sqrt{3} = 400 \text{ V}.$$

## 2 Couplage de récepteurs en triphasé

Une ligne triphasée peut alimenter deux types de récepteurs :

- des récepteurs monophasés, branchés entre phase et neutre lorsqu'ils sont de faible puissance ou entre deux phases lorsque leur puissance est plus importante.
- des récepteurs triphasés constitués de trois récepteurs monophasés identiques fonctionnant ensemble.

Ces récepteurs peuvent être alimentés soit sur la tension simple (montage étoile) soit sur la tension composée (montage triangle).

### ■ MONTAGE ÉTOILE

Dans un montage étoile, chaque dipôle récepteur est branché entre le neutre et une phase (fig. 8.06).

Quel que soit le récepteur, chaque dipôle est soumis à une tension simple de valeur efficace  $V$ .

Le courant dans le fil neutre  $i_N$  est à chaque instant la somme des courants dans les fils de phase :

$$i_N = i_1 + i_2 + i_3$$

### ■ RÉCEPTEUR SYMÉTRIQUE

Un récepteur triphasé est symétrique lorsque les impédances des dipôles qui les constituent sont égales. Les intensités  $i_1$ ,  $i_2$  et  $i_3$  ont alors la même valeur efficace  $I$  et le même déphasage  $\phi$  par rapport aux tensions simples  $v_1$ ,  $v_2$  et  $v_3$ .

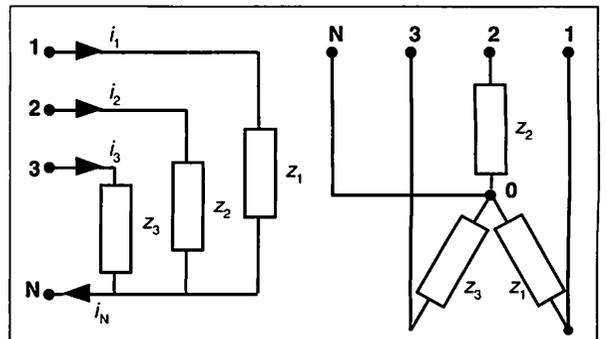


Fig. 8.06 : Deux représentations du montage étoile.

D'après la construction de la figure 8.07, on peut en déduire que :  $i_1 + i_2 + i_3 = i_N = 0$ .

**Le courant dans le fil neutre est nul :  $i_N = 0$ .**

Ainsi pour un montage étoile symétrique, dans le cas d'un moteur triphasé par exemple, le fil neutre peut être supprimé et le récepteur alimenté par les trois fils de phase seulement.

### ■ RÉCEPTEUR DISSYMMÉTRIQUE OU QUELCONQUE

Lorsque les dipôles constituant le récepteur triphasé ne sont pas identiques, les courants dans chaque fil de ligne sont différents.

Leur somme n'est plus nulle et un **courant circule dans le fil neutre, l'installation est déséquilibrée.**

**Dans une installation déséquilibrée, le fil neutre ne peut pas être supprimé.**

La détermination du courant circulant dans le fil neutre peut se faire graphiquement (voir l'exemple ci-dessous). Les installations domestiques alimentées en triphasé 230 V/400 V sont des installations déséquilibrées : **les appareils monophasés fonctionnant sous 230 V sont branchés entre le neutre et un des fils de phase** (fig. 8.08); ils sont répartis de façon telle qu'à pleine charge, les courants dans chaque fil de phase aient sensiblement la même intensité.

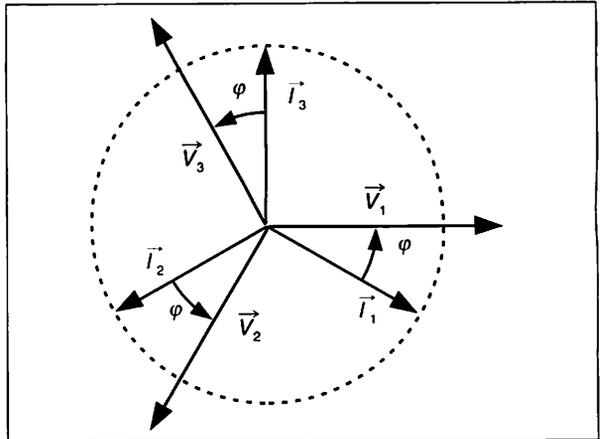


Fig. 8.07 : Courants dans un récepteur étoile symétrique.

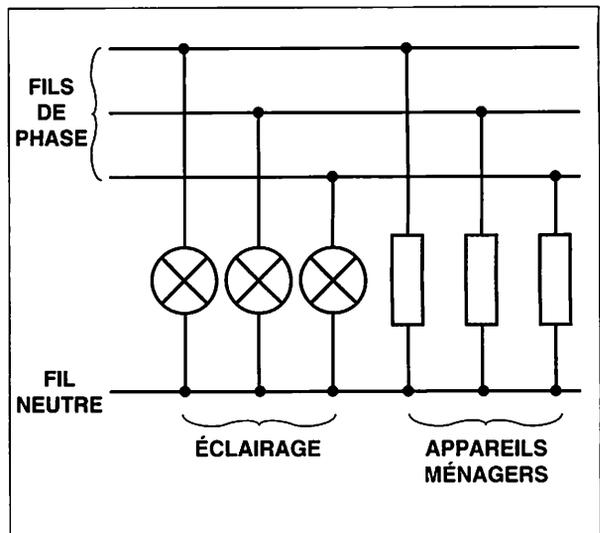


Fig. 8.08 : Installation domestique triphasée.

#### Exemple :

Un récepteur triphasé monté en étoile est constitué de trois résistances :

$$R_1 = 50 \Omega, R_2 = R_3 = 100 \Omega.$$

La tension simple du réseau d'alimentation a pour valeur efficace 230 V.

Les courants dans chaque fil de phase sont tels que :

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = 4,6 \text{ A} ; I_2 = I_3 = \frac{U}{R_2} = 2,3 \text{ A}.$$

La construction de Fresnel ci-contre permet d'écrire :

$$i_1 + i_2 + i_3 = i_N.$$

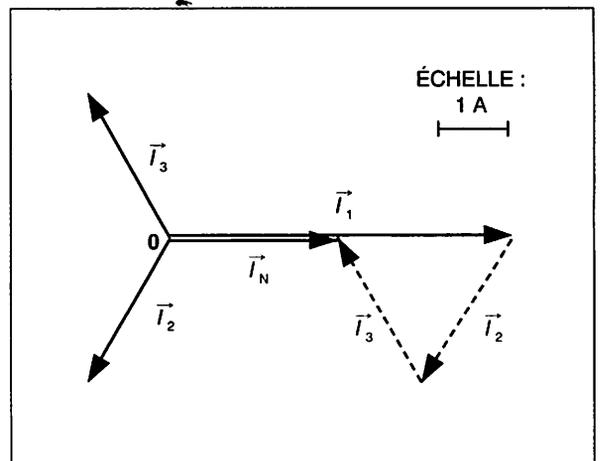
Et on en déduit que le courant  $i_N$  est :

- en phase avec  $i_1$ ,
- a pour valeur efficace 2,3 A.

#### Remarque :

En fonctionnement partiel, une installation domestique est toujours déséquilibrée et il faut éviter toute coupure, même accidentelle du neutre :

**Le conducteur neutre ne doit jamais comporter de fusible.**



## ■ MONTAGE TRIANGLE

Dans un montage triangle, chaque dipôle récepteur est branché entre deux fils de phase.

Dans le montage triangle, le fil neutre n'est pas utilisé ; chaque dipôle est soumis à une tension composée de valeur efficace  $U$  (fig. 8.09).

Les courants dans chaque fil de phase sont notés  $i_1$ ,  $i_2$  et  $i_3$  comme dans le montage étoile.

Les courants dans les dipôles récepteurs sont notés  $j_{12}$ ,  $j_{23}$  et  $j_{31}$ .

Lorsque le récepteur est **symétrique**, par exemple dans le cas d'un moteur triphasé, les courants  $j_{12}$ ,  $j_{23}$  et  $j_{31}$  ont :

- même valeur efficace notée  $J$ ,
- même déphasage par rapport aux tensions composées.

Le montage est équilibré.

La représentation de Fresnel de ces courants se déduit à partir du **triangle des tensions composées** (cf. fig. 8.10).

De cette représentation, on peut déduire que les courants  $i_1$ ,  $i_2$  et  $i_3$  dans les fils de phase ont la même valeur efficace :

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

### Remarque :

La relation ci-dessus relative aux courants est similaire de celle liant tension simple et tension composée.

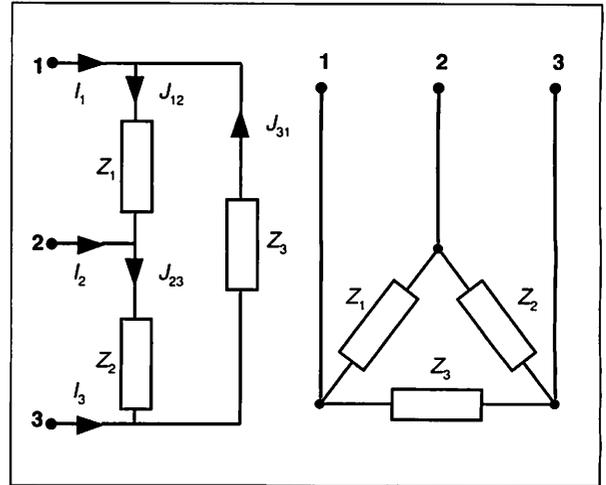


Fig. 8.09 : Deux représentations du montage triangle.

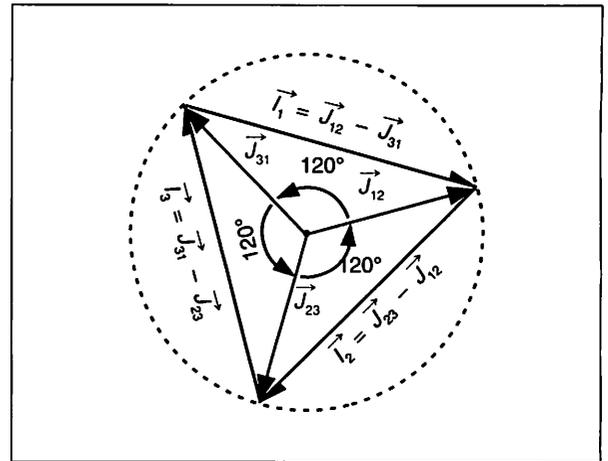


Fig. 8.10 : Courants dans un montage triangle équilibré.

### Exemple :

Un récepteur triphasé constitué de trois résistances de  $100 \Omega$  est monté en triangle sur le réseau  $230 \text{ V}/400 \text{ V}$ . Chaque résistance est soumise à la tension composée du réseau de valeur efficace  $U = 400 \text{ V}$ .

L'intensité du courant qui la traverse est telle que :  $J = \frac{U}{R}$  soit  $J = 4 \text{ A}$ .

La valeur efficace du courant dans chaque fil de phase est égal à :  $I = J\sqrt{3}$  soit  $I = 6,93 \text{ A}$ .

Si ces trois résistances avaient été placées sur une seule phase, le courant en ligne eût été :  $I = 3J$  soit  $I = 12 \text{ A}$ .

Ainsi un des intérêts de la distribution triphasée est de diminuer le courant dans les fils de ligne et donc les pertes par effet Joule.

### 3 Puissances en triphasé équilibré

Dans un récepteur alimenté en triphasé, quel que soit son montage, chaque dipôle consomme :

- une **puissance active**  $P_1, P_2, P_3$ ,
- une **puissance réactive**  $Q_1, Q_2, Q_3$ .

La puissance active totale est la somme des puissances actives :

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

La puissance réactive totale est la somme des puissances réactives :

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Lorsque le récepteur est symétrique, les dipôles qui le constituent absorbent les mêmes puissances :

$$P_1 = P_2 = P_3 \text{ et } Q_1 = Q_2 = Q_3$$

Comme en monophasé, la puissance apparente est égale à :

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

et le facteur de puissance :

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

#### ■ EXPRESSION DES PUISSANCES

Quel que soit le montage du récepteur triphasé, les puissances qu'il absorbe lorsqu'il est symétrique sont égales à :

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi \quad Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi \quad S = \sqrt{3} UI$$

■ Dans un récepteur monté en étoile, chaque dipôle est :

- parcouru par le courant  $I$ ,
- soumis à une tension simple  $V$ .

Il absorbe une puissance active égale à  $P_1 = VI \cos \varphi$ .

Lorsque le récepteur est symétrique, la puissance totale absorbée est égale à :  $P = 3 P_1 = 3 VI \cos \varphi$ .

comme  $V = \frac{U}{\sqrt{3}}$  on peut écrire :

$$P = 3 \frac{U}{\sqrt{3}} I \cos \varphi \text{ ou } P = \sqrt{3} UI \cos \varphi.$$

De même  $Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi$  et  $S = \sqrt{3} UI$ .

■ Dans un récepteur monté en triangle, chaque dipôle est :

- parcouru par le courant  $J$ ,
- soumis à une tension composée  $U$ .

Il absorbe une puissance active égale à  $P_1 = UJ \cos \varphi$ .

L'ensemble du récepteur symétrique absorbe donc :

$$P = 3 P_1 = 3 UJ \cos \varphi.$$

comme  $J = \frac{I}{\sqrt{3}}$  on peut écrire :

$$P = 3U \frac{I}{\sqrt{3}} \cos \varphi \text{ ou } P = \sqrt{3} UI \cos \varphi.$$

De même :  $Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi$  et  $S = \sqrt{3} UI$ .

#### Exemple :

Un moteur triphasé absorbe 5 A sur chaque fil de phase du réseau triphasé 230 V/400 V. Son facteur de puissance est de 0,8.

Sa puissance apparente est égale à :  $S = \sqrt{3} UI = \sqrt{3} \times 400 \times 5$  soit  $S = 3\,464 \text{ VA}$ .

Sa puissance active :  $P = \sqrt{3} UI \cos \varphi = S \cos \varphi$  soit  $P = 2\,771 \text{ W}$ .

Sa puissance réactive :  $Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi = S \sin \varphi$  soit  $Q = 2\,078 \text{ var}$ .

## ■ ÉTUDE D'UNE INSTALLATION TRIPHASÉE

Comme pour une installation monophasée, le problème consiste à déterminer :

- l'intensité du courant dans les fils de phase,
- le facteur de puissance de l'installation,
- la capacité des condensateurs à intégrer à l'installation pour ramener le facteur de puissance à une valeur imposée.

### Exemple :

L'installation triphasée d'un atelier comporte :

- 30 lampes de 100 W chacune montées entre phases et neutre de manière à constituer un système équilibré,
- un moteur triphasé absorbant une puissance active de 3 kW avec un facteur de puissance de 0,6.

L'alimentation est assurée par le réseau 230 V/400 V, 50 Hz.

Le bilan global des puissances est consigné dans le tableau ci-contre.

La puissance apparente est égale à :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ soit } S = 7211 \text{ VA.}$$

D'où le courant dans chaque fil de ligne :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} = \frac{7211}{\sqrt{3} \times 400} \text{ soit } I = 10,41 \text{ A.}$$

Le facteur de puissance de l'installation :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{6000}{7211} \text{ soit } \cos \varphi = 0,83.$$

La solution consiste à appliquer aux trois phases la **méthode de Boucherot**.

Les condensateurs utilisés pour l'amélioration du facteur sont au nombre de trois. Ils sont identiques et montés en triangle sur le réseau.

Ainsi, soumis à la tension composée  $U$ , ils fournissent une puissance réactive égale à :

$$Q_c = 3U^2C\omega$$

Pour amener le facteur de puissance du moteur seul à une valeur supérieure, soit  $\cos \varphi' = 0,9$ ; la capacité des condensateurs est donnée par la même relation qu'en monophasé soit :

$$Q_c = P(\tan \varphi - \tan \varphi') \text{ avec } Q_c = 3U^2C\omega$$

$$\text{d'où : } C = \frac{P(\tan \varphi - \tan \varphi')}{3U^2\omega} \text{ soit } C = 7,5 \mu\text{F.}$$

Les trois condensateurs de 7,5  $\mu\text{F}$  seront branchés en triangle sur le réseau.

	Puissance active (W)	Puissance réactive (var)
Lampes	3 000	0
Moteur	3 000	4 000
Installation	6 000	4 000

## ESSENTIEL À RETENIR

### RELATION ENTRE TENSIONS

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

### PUISSANCE RÉACTIVE

$$Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi$$

$Q$  en volts-ampères réactifs,  
 $U$  en volts,  
 $I$  en ampères.

### RELATION ENTRE COURANTS

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

### PUISSANCE APPARENTE

$$S = \sqrt{3} UI$$

$S$  en volts-ampères,  
 $U$  en volts,  
 $I$  en ampères.

### PUISSANCE ACTIVE

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$$

$P$  en watts,  
 $U$  en volts,  
 $I$  en ampères.

### FACTEUR DE PUISSANCE

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

## TEST RAPIDE

**T.1** Une résistance de  $100\ \Omega$  est placée entre deux phases du réseau triphasé  $230\ \text{V}/400\ \text{V}$ .

Calculer le courant qui la traverse.

**Réponse :**  $4\ \text{A}$  ;  $7\ \text{A}$  ;  $2,3\ \text{A}$ .

**T.2** La tension composée d'un réseau triphasé est  $230\ \text{V}$ .

Calculer la tension simple qui lui correspond.

**Réponse :**  $400\ \text{V}$  ;  $132\ \text{V}$  ;  $127\ \text{V}$ .

**T.3** Un récepteur triphasé est constitué de trois résistances de  $100\ \Omega$  montées en triangle sur le réseau  $230\ \text{V}/400\ \text{V}$ .

Calculer le courant dans un fil de ligne.

**Réponse :**  $4\ \text{A}$  ;  $6,93\ \text{A}$  ;  $12\ \text{A}$ .

**T.4** Un récepteur triphasé symétrique de facteur de puissance  $0,8$  est branché sur le réseau  $230\ \text{V}/400\ \text{V}$ .

Le courant dans un fil de ligne est de  $2\ \text{A}$ .

Calculer la puissance active absorbée.

**Réponse :**  $368\ \text{W}$  ;  $1\ 108\ \text{W}$  ;  $637\ \text{W}$ .

**T.5** Un moteur triphasé absorbant une puissance active de  $1\ 500\ \text{W}$  consomme  $3$  ampères sur chaque phase du réseau  $230\ \text{V}/400\ \text{V}$ .

Calculer son facteur de puissance.

**Réponse :**  $1,25$  ;  $0,72$  ;  $0,3$ .

**T.6** Trois condensateurs de  $10\ \mu\text{F}$  sont placés en triangle sur le réseau triphasé  $230\ \text{V}/400\ \text{V}$ - $50\ \text{Hz}$ .

Calculer la puissance réactive fournie au réseau.

**Réponse :**  $456\ \text{var}$  ;  $152\ \text{var}$  ;  $1\ 507\ \text{var}$ .

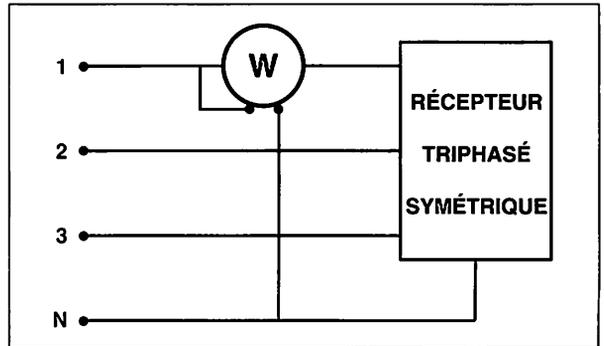
## EXPÉRIMENTATION

### MESURE DE PUISSANCE ACTIVE

#### 1 Ligne triphasée avec neutre

Lorsqu'un récepteur symétrique est alimenté par trois phases et le neutre, la **mesure de la puissance active absorbée s'effectue avec un seul wattmètre** branché selon le schéma de la figure ci-contre. Le wattmètre mesure la puissance  $P_1$  absorbée sur une phase et comme le récepteur est symétrique on a :

$$P = 3 P_1$$



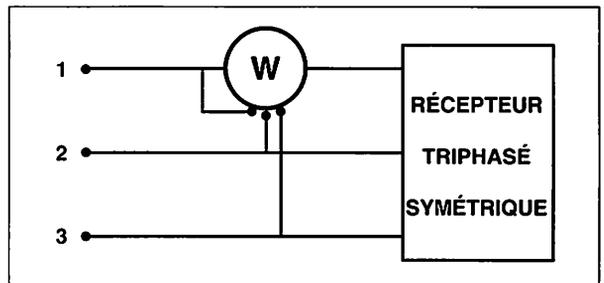
Mesure en triphasé équilibré avec neutre.

#### 2 Ligne triphasée sans neutre

##### ■ RÉCEPTEUR ÉQUILIBRÉ OU SYMÉTRIQUE

Lorsque le récepteur est équilibré, un wattmètre triphasé permet la mesure directe de la puissance absorbée.

L'appareil comporte trois bornes tension à relier à chaque fil de phase selon le schéma ci-contre.



Mesure au wattmètre triphasé.

## ■ RÉCEPTEUR QUELCONQUE – MÉTHODE DES DEUX WATTMÈTRES

Deux wattmètres  $W_1$  et  $W_2$  sont branchés selon le schéma de la figure suivante.

Le wattmètre  $W_1$  mesure la puissance  $P_1$  :

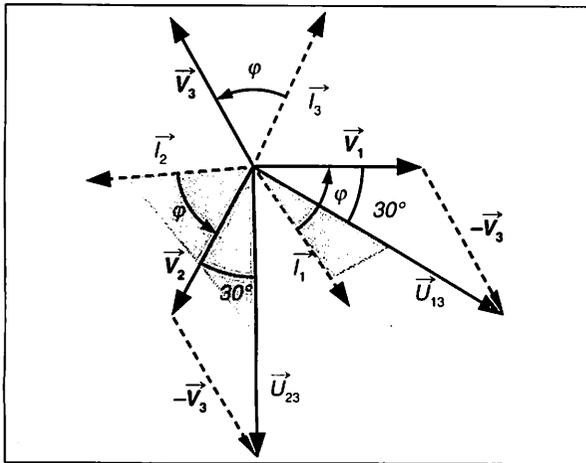
$$P_1 = U_{13} I_1 \cos(\widehat{\vec{I}_1, \vec{U}_{13}}).$$

Le wattmètre  $W_2$  mesure la puissance  $P_2$  :

$$P_2 = U_{23} I_2 \cos(\widehat{\vec{I}_2, \vec{U}_{23}}).$$

Pour un récepteur présentant un déphasage  $\varphi$ , d'après la construction de Fresnel ci-après, les déphasages entre les tensions et courants mesurés sont égaux à :

$$(\widehat{\vec{I}_1, \vec{U}_{13}}) = \varphi - 30^\circ \quad \text{et} \quad (\widehat{\vec{I}_2, \vec{U}_{23}}) = \varphi + 30^\circ.$$



Déphasages entre courants et tensions mesurés.

La somme des puissances mesurées est égale à :

$$P_1 + P_2 = UI \times [\cos(\varphi + 30^\circ) + \cos(\varphi - 30^\circ)].$$

Mathématiquement on montre que :

$$\cos(\varphi + 30^\circ) + \cos(\varphi - 30^\circ) = 2 \cos 30^\circ \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cos \varphi.$$

La somme des puissances mesurées est donc :

$$P_1 + P_2 = UI \sqrt{3} \cos \varphi.$$

Elle est égale à la puissance

active absorbée par le récepteur soit :

$$P = P_1 + P_2$$

## MESURE DE PUISSANCE RÉACTIVE

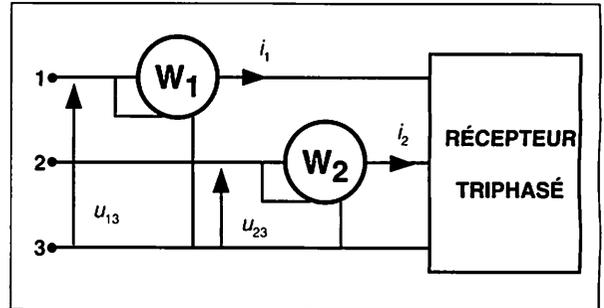
La méthode des deux wattmètres permet la mesure de la **puissance réactive**  $Q$  absorbée par un récepteur triphasé.

En faisant la différence des valeurs indiquées par les deux wattmètres on obtient :

$$P_1 - P_2 = UI \times [\cos(\varphi - 30^\circ) - \cos(\varphi + 30^\circ)].$$

Mathématiquement on montre que :

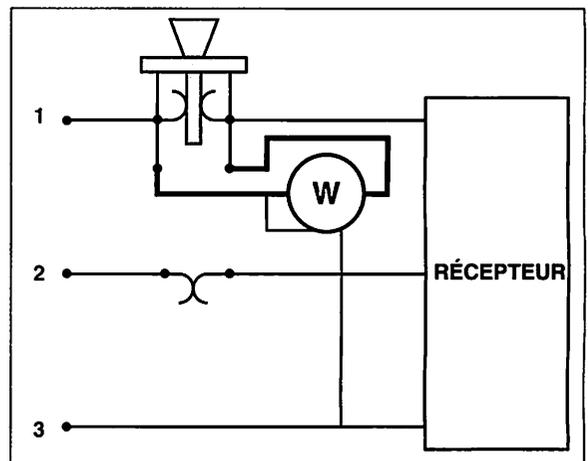
$$\cos(\varphi - 30^\circ) - \cos(\varphi + 30^\circ) = 2 \sin 30^\circ \cdot \sin \varphi = \sin \varphi.$$



Méthode des deux Wattmètres.

### Remarque :

En fonction du facteur de puissance du récepteur, les valeurs de  $P_1$  et  $P_2$  peuvent être négatives : la puissance  $P$  est alors la somme algébrique des puissances mesurées.



Montage de mesures n'utilisant qu'un seul wattmètre (le commutateur de courant permet de placer le wattmètre successivement sur chaque phase sans interrompre le courant).

La différence des puissances est donc égale à :

$$P_1 - P_2 = UI \sin \varphi = \frac{Q}{\sqrt{3}}.$$

La **puissance réactive absorbée** est égale à la **différence des deux valeurs indiquées multipliée par  $\sqrt{3}$** , soit :

$$Q = \sqrt{3}(P_1 - P_2)$$

# APPLICATIONS

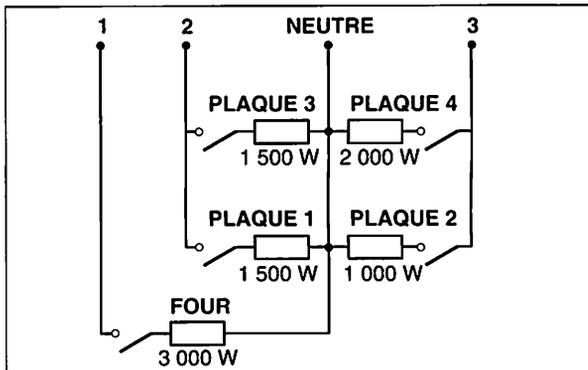
## EXERCICE RÉSOLU

### Énoncé

Le branchement en triphasé des résistances chauffantes du four et des quatre plaques d'une cuisinière électrique est représenté ci-contre.

a. Le four et les quatre plaques fonctionnant ensemble, déterminer l'intensité dans chaque fil de phase et dans le fil neutre.

b. Même question lorsque le four et la plaque 3 fonctionnent ensemble.



### Méthode :

a. Identifier la nature, étoile ou triangle, du montage. Identifier également si le récepteur est symétrique ou non.

b. Déterminer l'intensité des courants phase par phase.

### Solution proposée :

a. La puissance électrique absorbée sur chaque phase est de 3 000 W, le récepteur est symétrique. Dans ce cas les courants dans chaque fil de phase ont la même valeur efficace :

$$I = \frac{P}{V} = \frac{3\,000}{230} \text{ soit } I = 13,04 \text{ A.}$$

Le courant dans le fil neutre est nul.

b.

$$I_1 = \frac{P_1}{V} = \frac{3\,000}{230} \text{ soit } I_1 = 13,04 \text{ A.}$$

$$I_2 = \frac{P_2}{V} = \frac{1\,500}{230} \text{ soit } I_2 = 6,52 \text{ A.}$$

$$I_3 = 0.$$

Le courant dans le fil neutre est donné par la construction de Fresnel ci-dessous :

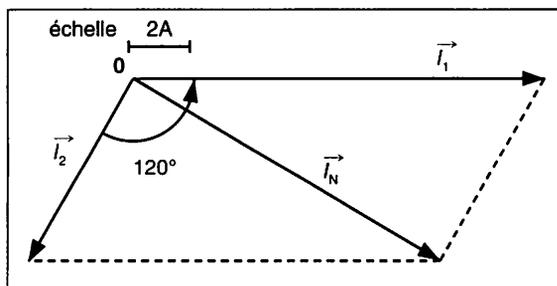
$$\vec{I}_N = \vec{I}_1 + \vec{I}_2$$

soit graphiquement :  $I_N = 11,4 \text{ A.}$

### Remarque :

Ce qui démontre la nécessité de ne jamais placer un fusible sur le fil neutre.

Construire le diagramme de Fresnel pour définir graphiquement le courant dans le fil neutre.



L'intensité  $i_2$  est en retard de  $120^\circ$  sur  $i_1$ .

## EXERCICES À RÉSOUDRE

**E. 1** Un atelier alimenté par un secteur triphasé 230 V/400 V comprend :

– 90 lampes de 100 W-230 V (30 lampes sur chaque phase).

– 10 perceuses entraînées chacune par un moteur asynchrone triphasé sur lequel on lit :

$$400 \text{ V} - 1,5 \text{ A} - \cos \varphi = 0,75.$$

– 15 fraiseuses entraînées chacune par un moteur asynchrone triphasé sur lequel on lit :

$$400 \text{ V} - 6,5 \text{ A} - \cos \varphi = 0,82.$$

Toutes les lampes et les machines fonctionnant simultanément dans les conditions nominales, calculer :

- les puissances active, réactive et apparente de l'installation,
- l'intensité du courant en ligne et le facteur de puissance de l'installation,
- la fréquence du secteur étant 50 Hz, calculer la capacité des trois condensateurs qui, montés en triangle, permettront de relever le facteur de puissance à 0,9.

**E. 2** Un moteur triphasé fonctionnant sur le réseau 230 V/400 V, 50 Hz porte comme indications :

$$P_U = 3 \text{ kW} ; \eta = 0,8 ; \cos \varphi = 0,75.$$

- calculer le courant dans la ligne lorsque le moteur fonctionne dans les conditions nominales,
- déterminer la capacité de chacun des trois condensateurs à monter en triangle pour amener le facteur de puissance à 0,9.

**E. 3** On dispose de trois récepteurs identiques, d'impédance  $150 \Omega$ , de facteur de puissance 0,86 et d'une distribution triphasée 230 V/400 V-50 Hz.

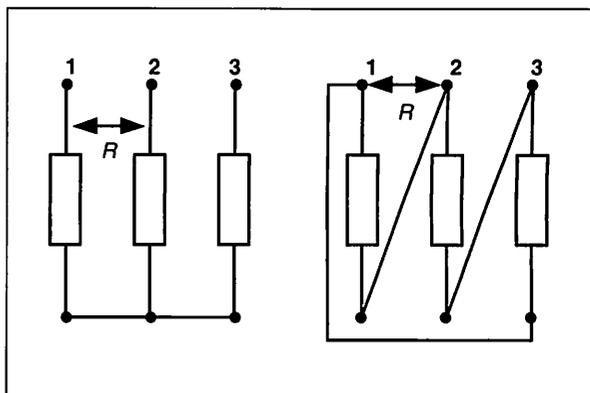
- les trois récepteurs sont branchés en triangle. Déterminer :
  - la tension aux bornes d'un récepteur,
  - l'intensité du courant dans un récepteur,
  - l'intensité du courant en ligne,
  - la puissance active absorbée par un seul récepteur,
  - la puissance active absorbée par le récepteur triphasé.
- les trois récepteurs étant branchés en étoile, répondre aux mêmes questions.

**E. 4** Un atelier alimenté en courant alternatif monophasé 230 V – 50 Hz absorbe un courant d'intensité 25 A.

L'énergie électrique qu'il consomme est mesurée par un compteur d'énergie active de constante  $K = 1,2 \text{ Wh}$  par tour. Sachant que le disque du compteur effectue 100 tours en 1 min 30 s, calculer :

- l'énergie active consommée par l'atelier,
- la puissance active de l'atelier,
- la puissance apparente,
- le facteur de puissance.

**E. 5** Les trois enroulements d'un moteur triphasé, chacun de résistance  $2 \Omega$ , peuvent être placés en étoile ou en triangle comme indiqué sur la figure ci-après.



Dans chacun de ces deux cas, déterminer la résistance  $R$  entre deux fils de ligne.

**E. 6** Un chauffe-eau électrique est constitué de trois résistances identiques montées en triangle.

La puissance absorbée sur le réseau triphasé : 230 V/400 V-50 Hz est de 1 800 W.

Calculer :

- L'intensité dans chaque fil de phase.
- L'intensité dans chacune des résistances.
- La valeur de chaque résistance.

**E. 7** Une installation triphasée 230 V/400 V comporte deux moteurs :

$$M_1 : P_U = 12 \text{ kW} ; \eta_1 = 0,80 ; \cos \varphi_1 = 0,80.$$

$$M_2 : P_U = 8 \text{ kW} ; \eta_2 = 0,85 ; \cos \varphi_2 = 0,60.$$

- Calculer le courant en ligne quand :
  - $M_1$  fonctionne seul,
  - $M_2$  fonctionne seul,
  - $M_1$  et  $M_2$  fonctionnent simultanément.
- En déduire le facteur de puissance de l'installation.

**E. 8** Un moteur triphasé porte les indications suivantes : 400 V/690 V – 3 kW.

$$\text{Rendement} : 0,75 - \cos \varphi = 0,71.$$

Déterminer les valeurs nominales de ce moteur alimenté en 230 V/400 V.

- La puissance active absorbée.
- La puissance réactive.
- L'intensité du courant en ligne.
- Le couplage.
- Calculer la capacité des condensateurs placés en triangle pour relever le facteur de puissance à 0,86.

# MESURES SUR DES APPLICATIONS PROFESSIONNELLES

## BOBINE DE CONTACTEUR MESURE D'IMPÉDANCE

### ■ CONTEXTE TECHNIQUE

Un équipement de commande comporte cinq contacteurs identiques, de type LC1-DO9, dont les bobines sont alimentées en 24 V/50 Hz.

Afin de déterminer la puissance de l'alimentation nécessaire, il est demandé d'étudier les caractéristiques d'une des bobines de ces contacteurs.

### ■ TRAVAIL DEMANDÉ

1. Alimenter la bobine sous sa tension nominale. Vérifier l'enclenchement du contacteur. Mesurer l'intensité et la tension.

1.1. Faire le schéma du montage.

1.2. Réaliser le montage et effectuer les mesures.

1.3. Calculer l'impédance  $Z$  de la bobine et la puissance apparente absorbée  $S$ .

2. Alimenter la bobine en courant continu en réglant l'intensité à la valeur nominale mesurée précédemment. Mesurer l'intensité et la tension.

2.1. Faire le schéma du montage.

2.2. Réaliser le montage et effectuer les mesures.

2.3. Calculer la résistance  $R$  de la bobine et la puissance  $P$  dissipée dans ces conditions.

3. En utilisant les résultats précédents, déterminer l'inductance  $L$  de la bobine et son facteur de puissance.

4. À la mise sous tension du contacteur, le circuit magnétique est ouvert. Il se produit alors un appel de courant important.

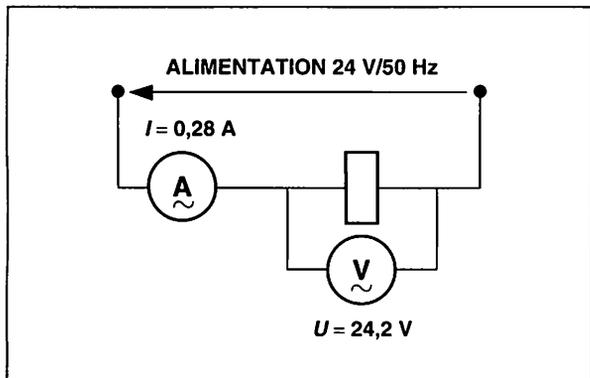
Alimenter la bobine sous sa tension nominale en bloquant le circuit magnétique en position ouverte.

Mesurer la tension et l'intensité.

Calculer les nouvelles valeurs de l'impédance, l'inductance et du facteur de puissance.

### Exemple de résultats

#### 1. Mesures en courant alternatif

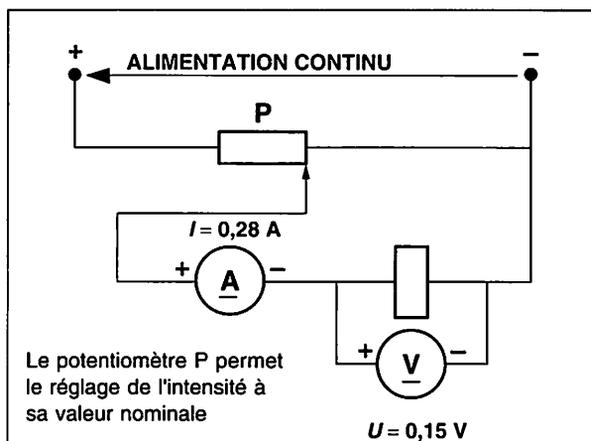


$$Z = \frac{U}{I} = \frac{24,2}{0,28} \text{ soit } Z \approx 86 \Omega$$

$$S = UI = 24,2 \times 0,28 \text{ soit } S \approx 6,8 \text{ VA}$$

#### 2. Mesures en courant continu

$$R = \frac{U}{I} = 0,5 \Omega \quad P = UI = 42 \text{ mW}$$



#### 3. Inductance et facteur de puissance

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{\omega} = 0,27 \text{ H} \quad \cos \varphi = \frac{R}{Z} = 6 \times 10^{-3}$$

#### 4. Circuit magnétique ouvert

$$U = 24,2 \text{ V}$$

$$I = 2,5 \text{ A}$$

$$Z \approx 9,7 \Omega$$

$$\text{soit } L = 0,03 \text{ H}$$

$$\text{et } \cos \varphi = 0,05$$

L'inductance diminue fortement lorsque le circuit magnétique est ouvert.

# MESURES SUR DES APPLICATIONS PROFESSIONNELLES

## MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ

### MESURE DU FACTEUR DE PUISSANCE À VIDE ET EN PLEINE CHARGE

#### ■ CONTEXTE TECHNIQUE

Un tapis transporteur élévateur est entraîné par un moteur asynchrone triphasé à cage. Afin d'établir un dossier de maintenance, il est demandé de mesurer le facteur de puissance du moteur à vide et en pleine charge.

#### ■ TRAVAIL DEMANDÉ

1. À partir de la plaque signalétique du moteur, répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont la tension simple et la tension composée du réseau ?
- Quelle est la tension nominale aux bornes d'un enroulement du stator ?
- Quel sera le mode de couplage (étoile ou triangle) des enroulements du stator ?
- Quelle sera l'intensité nominale dans un fil de phase ?
- Quelle est la puissance utile nominale du moteur ?
- Quel est le  $\cos \varphi$  nominal ? Correspond-il au  $\cos \varphi$  à vide ou en pleine charge ?

#### Exemple de résultats

La plaque signalétique du moteur utilisé comporte les indications suivantes :

**Tensions : 230 V/400 V**

**$P = 1,5 \text{ kW}$**

**Intensités : 5,4 A/3,1 A**

**$\cos \varphi = 0,83$**

**$N = 1\ 460 \text{ tr/min}$**

Le réseau utilisé est 230 V/400 V.

- Tension simple = 230 V.  
Tension composée = 400 V.
  - Tension nominale d'un enroulement = 230 V.
  - Chaque enroulement doit être alimenté par la tension simple du réseau. Il doit être branché entre une phase et le neutre. Il s'agit d'un couplage étoile.
  - Intensité nominale = 3,1 A.
  - $P_u = 1,5 \text{ kW}$ .
  - $\cos \varphi = 0,83$ , à pleine charge.
- Le facteur de puissance se calcule par la relation :

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI\sqrt{3}}$$

Sa mesure nécessite l'utilisation d'un voltmètre, d'un ampèremètre et d'un wattmètre.

Le moteur étant un récepteur symétrique, la mesure de puissance active peut s'effectuer par un wattmètre triphasé.

2. Dessiner le schéma complet du montage.

a. Préciser les appareils de mesure utilisés pour la mesure du  $\cos \varphi$ .

b. Selon les modèles des appareils proposés, préciser, si besoin est, les calibres choisis.

c. Préciser la méthode utilisée pour la mesure de la puissance active (wattmètre triphasé ou wattmètre monophasé).

d. Préciser les précautions que l'on doit prendre, pour ces appareils, lors du démarrage du moteur.

3. Préparer le tableau des mesures à effectuer.

4. Réaliser le montage.

5. Effectuer les mesures à vide et à pleine charge.

6. Compléter le tableau de mesures.

7. Calculer dans chaque cas les puissances apparentes et réactives absorbées par le moteur.

8. Comparer les puissances absorbées et interpréter les résultats obtenus.

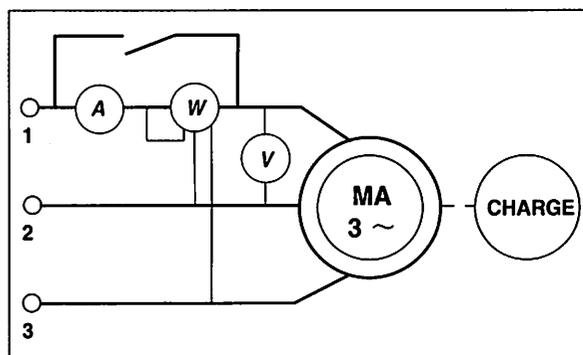


Schéma du montage.

3.

	U(V)	I(A)	P(W)	$\cos \varphi$
<b>À vide</b>	398	1,4	210	0,22
<b>En charge</b>	395	3,3	1 875	0,83

7. À vide :  $S = 965 \text{ VA}$ .

$Q = 941 \text{ var}$ .

En charge :  $S = 2\ 258 \text{ VA}$ .

$Q = 1\ 258 \text{ var}$ .

8. Le facteur de puissance mesuré en charge nominale correspond à celui indiqué sur la plaque signalétique.

# MESURES SUR DES APPLICATIONS PROFESSIONNELLES

## TUBE FLUORESCENT MESURE DU FACTEUR DE PUISSANCE

### ■ CONTEXTE TECHNIQUE

L'éclairage d'un atelier est assuré par un ensemble de tubes fluorescents 230 V/50 Hz.

Il est demandé de déterminer les caractéristiques de ces tubes afin de les compenser de manière à améliorer leur facteur de puissance.

### ■ TRAVAIL DEMANDÉ

#### 1. Caractéristiques du tube fluorescent.

1.1. Concevoir et représenter un schéma de montage permettant de mesurer la puissance active  $P_1$  consommée par le tube, la tension  $U$  à ses bornes et l'intensité  $I_1$  du courant qui la traverse.

1.2. Réaliser le montage.

1.3. Mesurer les grandeurs demandées dans les conditions nominales de fonctionnement du tube.

1.4. Calculer pour le tube fluorescent :

- sa puissance apparente  $S_1$ ,
- sa puissance réactive  $Q_1$ ,
- son facteur de puissance  $\cos \varphi_1$ .

#### 2. Compensation du montage

2.1. Brancher aux bornes du tube, un condensateur non polarisé de capacité  $C = 2 \mu\text{F}$  (400 V).

2.2. Mesurer les grandeurs  $P_2$ ,  $U$  et  $I_2$ .

2.3. Calculer pour le circuit :

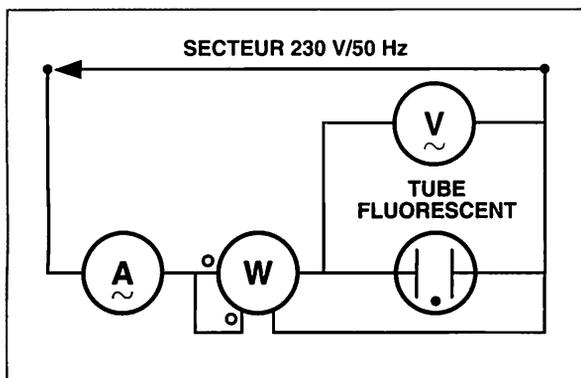
- sa puissance apparente,  $S_2$ ,
- sa puissance réactive,  $Q_2$ ,
- son facteur de puissance,  $\cos \varphi_2$ .

Comparer  $P_1$  et  $P_2$ ;  $\cos \varphi_1$  et  $\cos \varphi_2$ .

Quel est l'intérêt du branchement du condensateur ?

### Exemple de résultats

#### 1. Caractéristiques du tube



$$U = 227 \text{ V}$$
$$I = 0,4 \text{ A}$$
$$P = 50 \text{ W}$$

La puissance apparente  $S_1$  est égale à :

$$S_1 = UI = 227 \times 0,4 \text{ soit } S_1 = 90,8 \text{ VA}$$

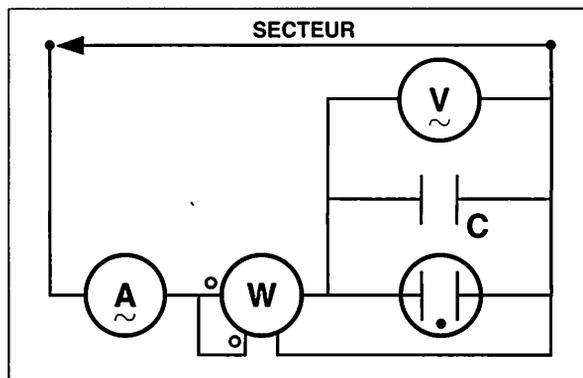
La puissance réactive  $Q_1$  se calcule par la relation :

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2} \text{ soit } Q_1 = 75,8 \text{ var}$$

Le facteur de puissance est égal à :

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{50}{90,8} \text{ soit } \cos \varphi = 0,55$$

#### 2. Compensation du montage



$$U = 227 \text{ V}$$
$$I = 0,25 \text{ A}$$
$$P = 50 \text{ W}$$

La puissance apparente  $S_2$  est égale à :

$$S_2 = UI = 227 \times 0,25 \text{ soit } S_2 = 56,8 \text{ VA}$$

d'où  $Q_2 = \sqrt{S_2^2 - P_2^2}$  soit  $Q_2 = 26,9 \text{ var}$

Le facteur de puissance est alors :

$$\cos \varphi_2 = \frac{P_2}{S_2} \text{ soit } \cos \varphi_2 = 0,88$$

La puissance active absorbée ne varie pas :  $P_1 = P_2$ .

Le facteur de puissance a augmenté :  $\cos \varphi_2 > \cos \varphi_1$

**Le branchement du condensateur permet l'amélioration du facteur de puissance.**

# COMPLÉMENTS TECHNOLOGIQUES

## Comptage de l'énergie

### ● Caractéristiques d'un compteur d'énergie

Ce compteur est caractérisé par :

- son **type**, monophasé, triphasé 4 fils, triphasé 3 fils suivant que la charge électrique à compter est alimentée par 2 fils, 4 fils (3 phases + 1 neutre), 3 fils (3 phases mais pas de neutre),
- sa **tension d'emploi** 230 V, 3 x 230/400 V, 3 x 400 V,
- son **calibre intensité** qui dépend de la puissance consommée,  $I = \frac{P}{U}$  en monophasé,  $I = \frac{P}{U\sqrt{3}}$  en triphasé, d'où les calibres :
  - 15-60 A ou 30-90 A en monophasé,
  - 10-30 A, 20-60 A, 30-90 A en triphasé,
- et un certain nombre de **dispositifs complémentaires** tels que :
  - émetteur d'impulsions pour transmettre à distance le nombre de kWh mesuré,
  - relais de changement de tarif.

### ● Principe de fonctionnement d'un compteur

Il existe deux types de compteur, basés sur des principes de fonctionnement différents :

- **compteur électromécanique à induction**,
- **compteur électronique** qui se substitue progressivement au précédent.

#### ■ COMPTEUR À INDUCTION

(cf. fig. ci-contre)

L'élément moteur est un **disque métallique** (1) qui sous l'action simultanée de **deux électroaimants** :

- l'un en **série** et parcouru par le **courant** (2),
- l'autre en **parallèle** et soumis à la **tension** (3), est entraîné par le **couple moteur** créé par les **courants de Foucault** dont il est le siège.

Un **aimant permanent** (4) freine plus ou moins le mouvement de rotation du disque de la **minuterie enregistreuse** de l'énergie consommée.

Le compteur bleu ci-contre comprend :

- un compteur électro-magnétique à induction,
- un relais récepteur de télécommande 175 Hz qui assure la fonction changement de tarif avec une minuterie double tarif.

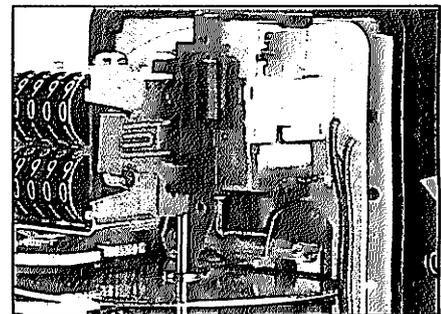
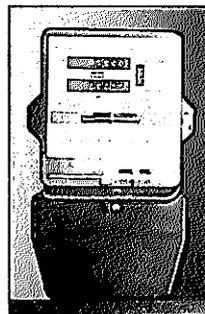
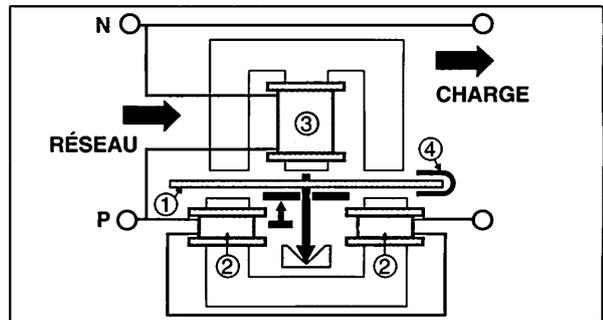
L'énergie enregistrée par chaque tour de disque exprime la constante du compteur (ici : 4 Wh/tour)

#### ■ COMPTEUR ÉLECTRONIQUE

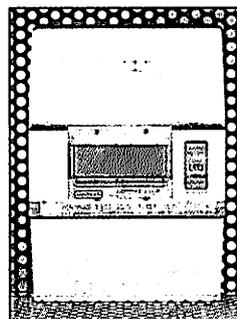
Dans ce type de compteur un capteur basé sur le principe de l'effet Hall mesure la puissance dissipée dans la charge. Une intégration dans le temps de cette puissance permet de mesurer l'énergie consommée.

Relevable à distance par EDF, ce compteur permet à l'abonné de visualiser tous les paramètres de sa facturation.

Sa constante est de 1 Wh/impulsion.



Compteur bleu monophasé à relais associé (SIEMENS - METERING).



Compteur électronique monophasé multifonctionnel (SIEMENS - METERING).

# **Appareils électromagnétiques**

## **Phénomènes magnétiques et électromagnétiques**

- 9** **Champ magnétique**
- 10** **Induction électromagnétique.  
Lois de Lenz et de Laplace**

## **Moteurs à courant continu**

- 11** **Principe et organisation**
- 12** **Moteur à excitation séparée et  
moteur à excitation série**

## **Machines à courant alternatif**

- 13** **Principe et organisation**
- 14** **Moteur asynchrone triphasé**
- 15** **Moteurs monophasés**
- 16** **Alternateur**

# 9 Champ magnétique

## ÉLECTROTECHNIQUE

### 1 Champ magnétique

#### ■ AIMANTS

Un aimant est capable d'attirer des morceaux de fer ou de la limaille.

Tout aimant comporte deux extrémités, le pôle Nord et le pôle Sud, indissociables. Deux pôles de même nom se repoussent, deux pôles de noms différents s'attirent.

#### ■ CHAMP MAGNÉTIQUE

Le champ magnétique est l'espace sur lequel un aimant fait sentir son influence.

Ce champ magnétique peut être mis en évidence en saupoudrant de la limaille de fer sur une plaque de verre placée au dessus de l'aimant. Les grains de limaille s'orientent alors sur des lignes allant d'un pôle à l'autre (cf. fig. 9.02). Une aiguille aimantée, placée dans le champ, prend une direction tangente à ces lignes.

Ces lignes de limaille matérialisent les lignes de champ de l'aimant :  
– leur ensemble constitue un spectre magnétique.

#### ■ VECTEUR CHAMP MAGNÉTIQUE

En tout point du champ magnétique, l'influence de l'aimant peut être définie par un vecteur dont les caractéristiques sont :

- une direction tangente à la ligne de champ passant par ce point,
- un sens allant du pôle Nord vers le pôle Sud,
- une valeur ou une intensité exprimée en Teslas (T).

Le vecteur champ magnétique est noté  $\vec{B}$ . Un exemple de ses représentations autour d'un aimant droit est donné figure 9.03.

#### Remarque

La valeur du champ magnétique d'un aimant est fonction de celui-ci et diminue avec la distance. Lorsque le vecteur champ magnétique  $\vec{B}$  a les mêmes caractéristiques en tout point du champ, celui-ci est dit **uniforme**. C'est le cas de l'entrefer d'un aimant en U (fig. 9.04).

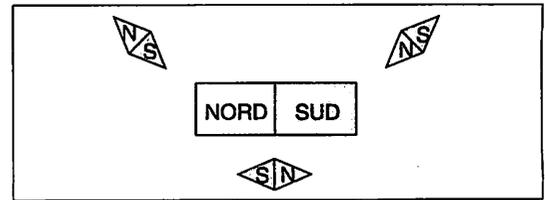


Fig. 9.01 : Repérage des pôles d'un aimant droit avec une aiguille aimantée.

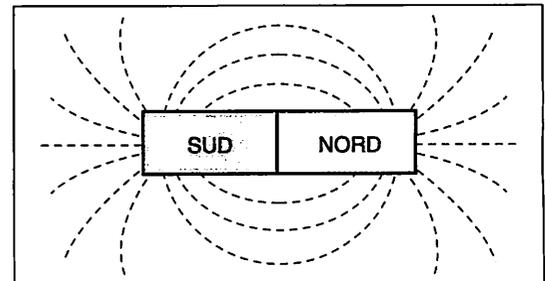


Fig. 9.02 : Spectre magnétique de l'aimant droit.

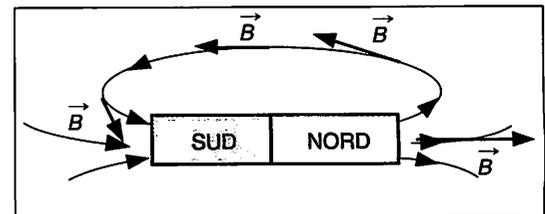


Fig. 9.03 : Vecteur champ magnétique  $\vec{B}$ .

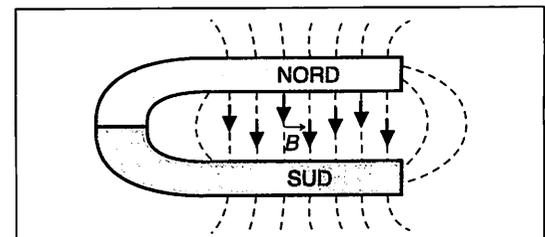


Fig. 9.04 : Champ magnétique uniforme.

## 2 Flux magnétique

Lorsqu'une **surface d'aire  $S$**  (par exemple une spire de bobine) est placée dans un **champ magnétique uniforme d'intensité  $B$** , perpendiculaire aux lignes de champ (fig. 9.05) le flux magnétique traversant la surface est égal à :

$$\Phi = B \cdot S$$

$\Phi$  en webers,  
 $B$  en teslas,  
 $S$  en  $m^2$ .

Le flux magnétique, représenté par la lettre grecque  $\Phi$  (phi majuscule), s'exprime en **WEBER (Wb)**.

Lorsque la surface n'est pas perpendiculaire au vecteur  $\vec{B}$ , elle doit être remplacée, dans le calcul du flux, par sa **projection d'aire  $S'$**  dans le plan perpendiculaire aux lignes de champ (fig. 9.05). Le flux magnétique à travers  $S$  est alors égal à :

$$\Phi = BS' \text{ soit } \Phi = B \cdot S \cos \alpha$$

Avec  $\alpha$ , l'angle entre la surface et sa projection ou encore, l'angle entre le vecteur  $\vec{B}$  et la normale  $\vec{N}$  à la surface.

Lorsque la **surface est parallèle** aux lignes de champ ( $\alpha = 90^\circ$ ), le flux qui la traverse est **nul**.

### ■ FLUX À TRAVERS UNE BOBINE

Une bobine étant placée dans un champ magnétique, le flux total qui la traverse est égal à la somme des flux à travers chacune des spires. Si la bobine comporte  **$N$  spires** de même aire  $S$  et que le champ est **uniforme d'intensité  $B$** , le flux magnétique à travers la bobine (fig. 9.06) est alors égal :

$$\Phi = B \cdot S \cdot N \cdot \cos \alpha$$

Avec  $\alpha$ , l'angle entre  
l'axe de la bobine et  
le vecteur  $\vec{B}$ .

#### Exemple :

Un cadre rectangulaire de 2 cm sur 3 cm de côtés comportant 500 spires est placé entre les pôles d'un aimant en U où le champ magnétique est uniforme de valeur 50 mT. Lorsque le cadre est perpendiculaire aux lignes de champ, le flux le traversant est égal à :

$$\Phi = BSN = 50 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{-2} \cdot 500$$

soit  $\Phi = 15 \text{ mWb}$

### ■ MESURE DES VARIATIONS DE FLUX

La mesure directe du flux au travers d'une bobine est impossible. Seule est mesurable une variation de flux à l'aide d'un fluxmètre. Le fluxmètre est constitué d'une bobine exploratrice reliée à un appareil à cadran gradué en webers. En plaçant la bobine exploratrice perpendiculairement aux lignes d'un champ magnétique puis en l'éloignant pour annuler le flux (fig. 9.07), on détermine le flux traversant la bobine et de là, la valeur du champ magnétique.

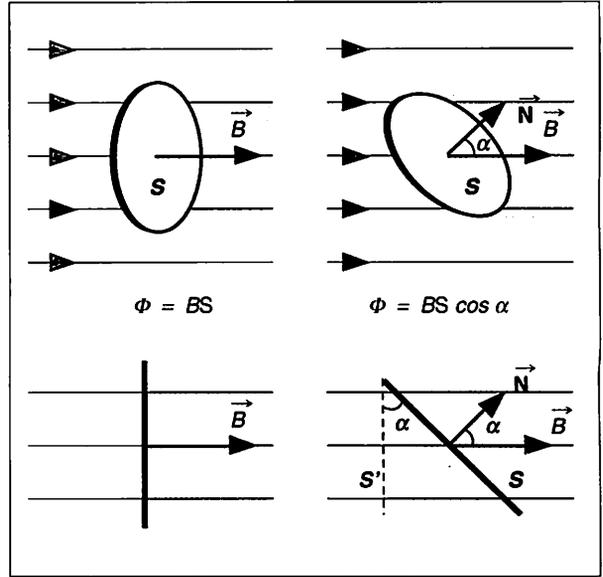


Fig. 9.05 : Flux à travers une surface.

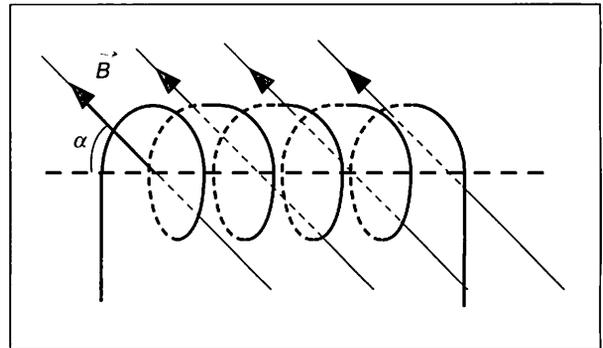


Fig. 9.06 : Flux à travers une bobine.

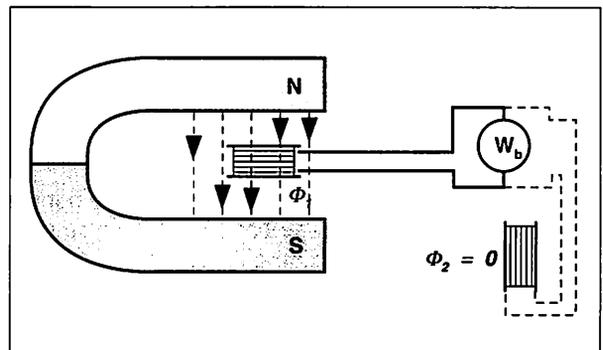


Fig. 9.07 : Mesure du flux.

### EXCITATION MAGNÉTIQUE

Un courant continu circulant dans un conducteur crée un champ magnétique autour de celui-ci. Ce champ magnétique est fonction de la forme du conducteur (fig. 9.08).

L'excitation magnétique caractérise le circuit qui crée le champ magnétique.

L'excitation magnétique s'exprime en **AMPÈRES PAR MÈTRE (A/m)** et se note par la lettre  $H$ .

Dans l'air ou dans le vide, le champ magnétique créé par un courant est proportionnel à l'excitation magnétique en ce point.

$$B = \mu_0 H$$

#### Remarque

Le coefficient  $\mu_0$ , constante magnétique, est appelé **perméabilité absolue**.

Sa valeur est :

$$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} = 1,25 \cdot 10^{-6}$$

### CHAMP D'UN SOLÉNOÏDE

Un solénoïde est une bobine dont la longueur est grande devant son diamètre. Le champ produit par un solénoïde parcouru par un courant est semblable à celui d'un aimant droit (fig. 9.09).

À l'intérieur du solénoïde le champ est pratiquement uniforme.

Son intensité est égale à :

$$B = \mu_0 \frac{NI}{\ell}$$

$N$  nombre de spires de la bobine,  
 $I$  intensité du courant en ampères,  
 $\ell$  longueur de la bobine en mètres.

Et l'excitation magnétique à l'intérieur de la bobine est donc :

$$H = \frac{N \cdot I}{\ell} \quad H \text{ en A/m.}$$

#### Exemple

Une bobine longue de 20 cm comporte 1 000 spires et est parcourue par un courant de 2 A.

L'excitation magnétique a pour valeur :

$$H = \frac{NI}{\ell} = 10\,000 \text{ A/m}$$

Le champ magnétique à l'intérieur de la bobine est égal à :

$$B = \mu_0 H = 12,5 \text{ mT}$$

### SENS DU CHAMP MAGNÉTIQUE

La détermination de la face Nord ou Sud d'une bobine ou d'une spire s'effectue en observant le sens du courant, comme indiqué à la figure 9.10.

La face Sud est celle où le courant tourne dans le sens des aiguilles d'une montre. Il tourne en sens inverse pour la face Nord.

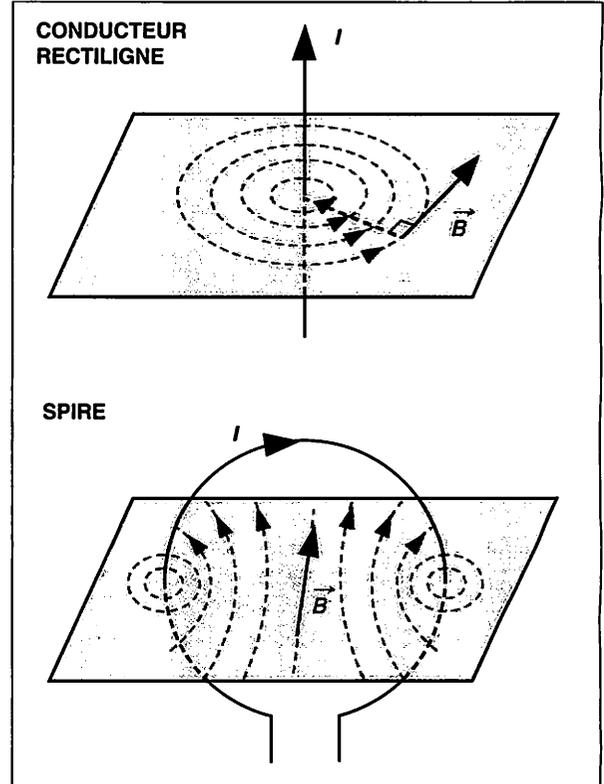


Fig. 9.08 : Champs magnétiques produits par un courant.

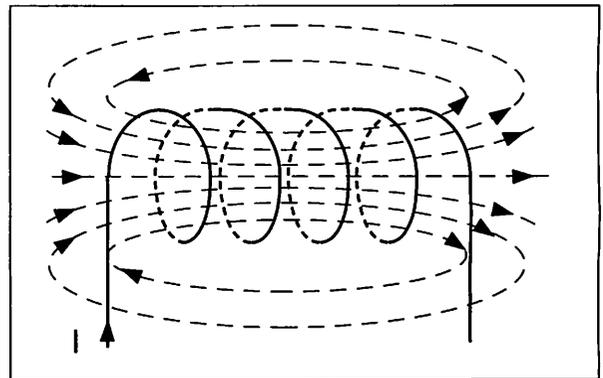


Fig. 9.09 : Champ magnétique d'un solénoïde.

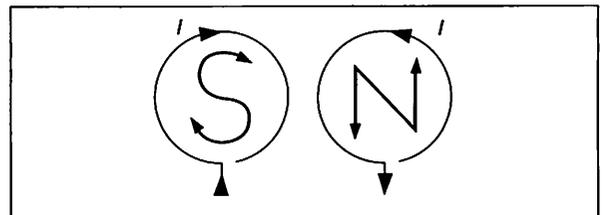


Fig. 9.10 : Pôles d'une bobine.

## 4 Ferromagnétisme

### ■ AIMANTATION

Un morceau de fer ou d'acier placé dans un champ magnétique s'aimante.

Lorsque le champ magnétique est supprimé :

- l'aimantation disparaît s'il s'agit d'acier doux (acier à faible teneur en carbone),
- l'aimantation persiste légèrement s'il s'agit d'acier dur; ce qu'il en reste est appelé aimantation rémanente.

L'aimantation induite renforce le champ qui lui donne naissance, ainsi le noyau de fer (fig. 9.12) canalise les lignes de champ.

Dans le cas de la figure 9.11, l'intensité du champ magnétique produite par la bobine sans noyau de fer, soit  $B_0$ , est multipliée par un coefficient, la **perméabilité magnétique** notée  $\mu_r$ .

$$B = \mu_r B_0 \quad \text{soit} \quad B = \mu_r \mu_0 H$$

Pour les milieux ferromagnétiques (acier, cobalt, nickel),  $\mu_r$  est très grand, sa valeur n'est pas constante mais dépend de l'excitation magnétique. Lorsque celle-ci augmente,  $\mu_r$  diminue, le milieu se **sature** (fig. 9.13). Pour les milieux **non ferromagnétiques** (cuivre, aluminium...),  $\mu_r$  est **pratiquement égal à 1**.

### ■ COURBE D'AIMANTATION

La courbe d'aimantation traduit la relation entre la valeur du champ magnétique  $B$  et celle de l'excitation magnétique  $H$  qui crée ce champ dans un matériau donné.

La courbe d'aimantation de l'acier doux est donnée à la figure 9.14.

Cette courbe comporte trois parties :

- dans la **première partie OA**, sensiblement rectiligne, le champ  $B$  est proportionnel à l'excitation magnétique  $H$ .

La perméabilité magnétique  $\mu_r$  est une constante :

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \quad \text{soit} \quad \mu_r = 1\,600 \quad \text{pour l'acier doux};$$

- la **deuxième partie AB** correspond au **début de la saturation du matériau**,  $\mu_r$  diminue au fur et à mesure que  $H$  augmente;

- dans la **troisième partie BC**, de nouveau rectiligne, le matériau est saturé, une **augmentation importante de  $H$  n'entraîne qu'un faible accroissement du champ magnétique  $B$** .

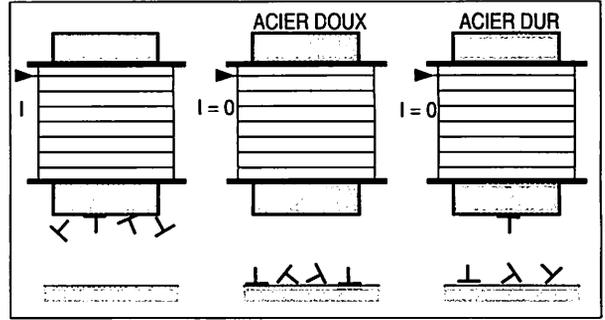


Fig. 9.11 : Aimantation de l'acier.

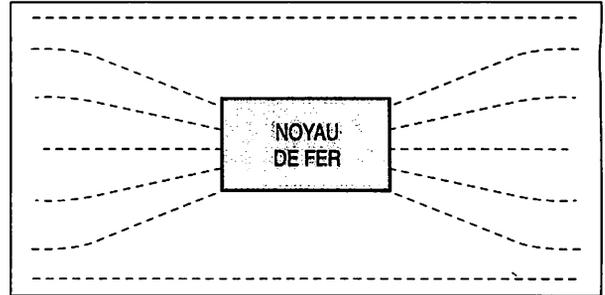


Fig. 9.12 : Canalisation des lignes de champ.

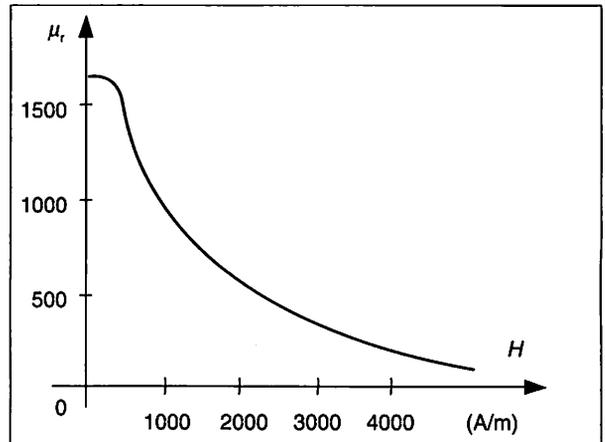


Fig. 9.13 : Variations de  $\mu_r$  en fonction de  $H$  (pour l'acier doux).

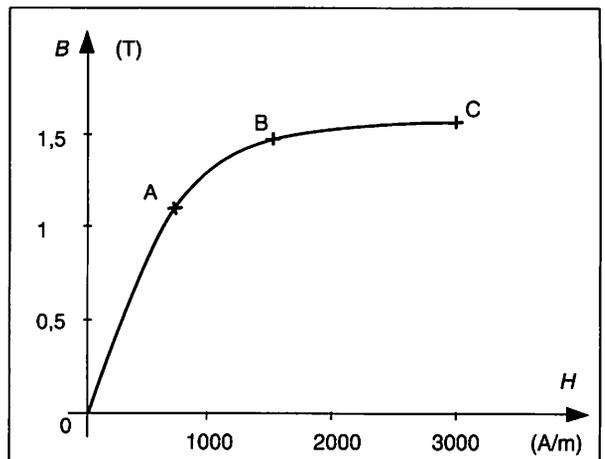


Fig. 9.14 : Courbe d'aimantation de l'acier doux.

## ■ HYSTÉRÉSIS

Un matériau ferromagnétique étant aimanté jusqu'à saturation, si l'excitation  $H$  diminue le champ magnétique  $B$  diminue aussi. Les valeurs restent cependant supérieures à celles obtenues lors de la première aimantation.

La courbe  $B = f(H)$  prend l'allure de la figure 9.14.

Ce phénomène de retard à la désaimantation prend le nom d'hystérésis.

Lorsque l'excitation magnétique s'annule, la matière reste aimantée, il persiste un champ **rémanent de valeur  $B_r$** . Pour annuler l'aimantation, il faut une excitation de sens contraire, négative, appelée **excitation coercitive  $H_c$** .

Le phénomène d'hystérésis fait que le champ magnétique en un point d'un matériau ferromagnétique dépend non seulement de l'excitation mais aussi des précédents états magnétiques du matériau.

En faisant varier l'excitation entre deux valeurs extrêmes opposées  $+H_M$  et  $-H_M$ , la courbe d'aimantation se dédouble selon la figure 9.15. La courbe fermée obtenue est appelée **cycle d'hystérésis; elle est caractéristique du matériau ferromagnétique.**

### Remarques

L'acier dur possède une excitation coercitive importante, il se désaimante difficilement par rapport au fer doux dont l'excitation coercitive est faible.

Lorsque le métal subit des aimantations et des désaimantations successives et fréquentes, l'hystérésis consomme de l'énergie qui apparaît sous forme de chaleur dans le matériau.

Ces pertes sont proportionnelles à l'aire du cycle.

## ■ CIRCUIT MAGNÉTIQUE

Un circuit magnétique est constitué de matériaux ferromagnétiques qui canalisent les lignes de champ produites par une ou plusieurs bobines magnétisantes.

Un circuit magnétique est fermé si la totalité du trajet des lignes de champ se fait dans un matériau ferromagnétique. Il est ouvert si une partie du trajet s'effectue dans l'air, cette partie est appelée entrefer.

## ■ ÉLECTRO-AIMANT

Un électro-aimant comporte un circuit magnétique ouvert et une ou plusieurs bobines magnétisantes.

Il est utilisé :

- soit pour produire un champ magnétique de forte valeur dans les machines électriques,
  - soit pour exercer une force d'attraction lorsqu'une partie du circuit magnétique, l'armature, est mobile.
- Cette dernière utilisation correspond aux électro-aimants porteurs d'appareils de levage ou à ceux de commande à distance (relais, contacteurs, sonneries).

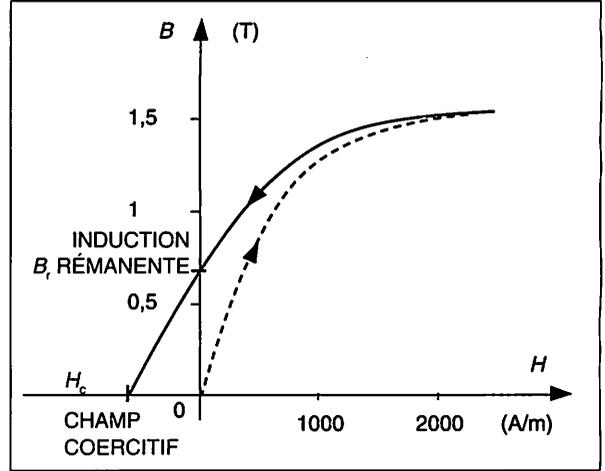


Fig. 9.14 : Courbe de désaimantation d'un matériau ferromagnétique.

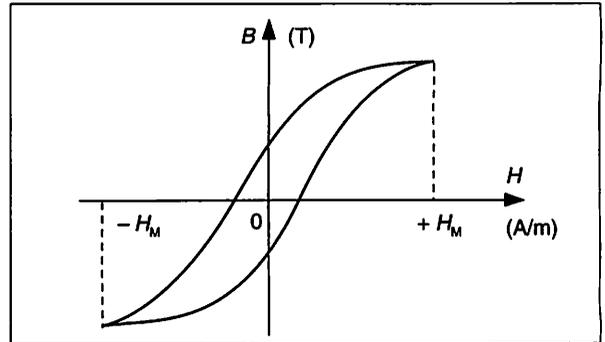


Fig. 9.15 : Cycle d'hystérésis.

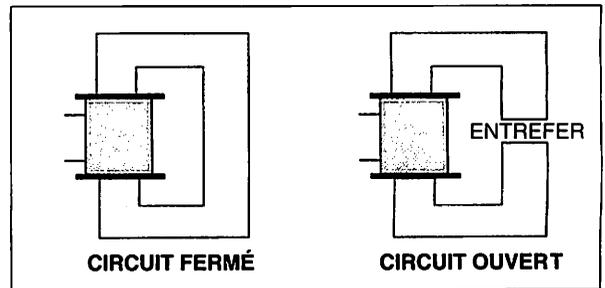


Fig. 9.16 : Types de circuit magnétique.

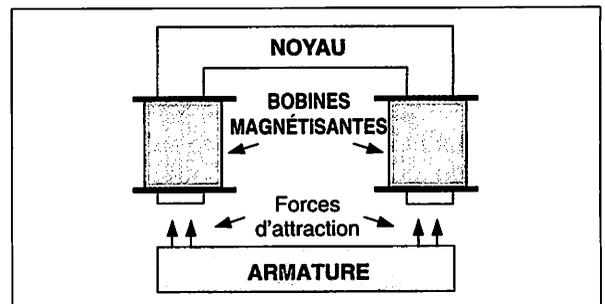


Fig. 9.17 : Électro-aimant.

# ESSENTIEL À RETENIR

## MAGNÉTISME

### FLUX MAGNÉTIQUE

$\Phi = B \cdot S \cos \alpha$

$\Phi$  en webers,  
 $B$  en teslas,  
 $S$  en  $m^2$ ,  
 $\alpha$  angle entre le vecteur  $\vec{B}$  et la normale  $\vec{N}$  à la surface.

### FLUX À TRAVERS UNE BOBINE

$\Phi = B \cdot S \cdot N \cos \alpha$

$\Phi$  en webers,  
 $B$  en teslas,  
 $S$  en  $m^2$ ,  
 $N$  nombre de spires de la bobine,  
 $\alpha$  angle entre l'axe de la bobine et le vecteur  $\vec{B}$ .

### CHAMP D'UN COURANT

$B = \mu_0 H$

$B$  en teslas,  
 $H$  excitation magnétique en ampères par mètre,  
 $\mu_0$  constante magnétique ou perméabilité absolue.

### CHAMP D'UN SOLÉNOÏDE

$B = \mu_0 \frac{NI}{\ell}$

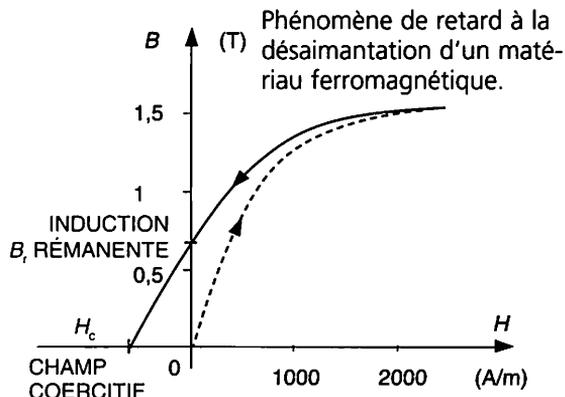
$N$  nombre de spires de la bobine,  
 $I$  intensité du courant en ampères,  
 $\ell$  longueur de la bobine en mètres,  
 $\mu_0$  perméabilité absolue.

### FERROMAGNÉTISME

$B = \mu_r B_0$   
 $B = \mu_r \mu_0 H$

$B$  en teslas,  
 $B_0$  champ magnétique dans l'air,  
 $H$  en ampères par mètre,  
 $\mu_r$  perméabilité relative,  
 $\mu_0$  perméabilité absolue.

### HYSTÉRÉSIS



## TEST RAPIDE

**T.1** Une spire de 20 cm de diamètre est placée perpendiculairement aux lignes d'un champ magnétique d'intensité 1 T.

Déterminer le flux qui la traverse.

**Réponse :** 0,1 Wb; 31 mWb; 10 Wb.

**T.2** La bobine exploratrice d'un fluxmètre comporte 100 spires de 1  $cm^2$  de section chacune. Le flux qui traverse cette bobine est de 10 mWb.

Déterminer l'intensité du champ magnétique à l'intérieur de la bobine.

**Réponse :** 10 T; 1 T; 0,1 T.

**T.3** Une bobine longue de 0,5 m comporte 500 spires parcourues par un courant de 4 A.

Déterminer l'intensité du champ magnétique à l'intérieur de la bobine.

**Réponse :** 5 mT; 4 000 T; 5 T.

**T.4** La bobine précédente comporte un noyau d'acier doux de perméabilité magnétique  $\mu_0 = 1 000$ .

Déterminer l'intensité du champ magnétique à l'intérieur de la bobine.

**Réponse :** 1 T; 0,1 T; 5 T.

# EXPÉRIMENTATION

## MESURES SUR UN SOLÉNOÏDE

### ■ BUT DE LA MANIPULATION

Mesurer l'intensité du champ magnétique au centre d'un solénoïde en fonction des différents paramètres.

### ■ CHOIX DU MATÉRIEL

La mesure du champ magnétique est effectuée par un **teslamètre à effet Hall** permettant une lecture directe de l'intensité du champ sur un voltmètre préalablement étalonné en teslas.

Le solénoïde, comporte deux enroulements bobinés simultanément sur le même support cylindrique.

La longueur du solénoïde est de 41,2 cm. Les deux enroulements permettent d'avoir soit 200 spires, soit 400 spires réparties sur toute la longueur.

La photo du bas de page représente ce matériel.

### ■ PROCÉDURE

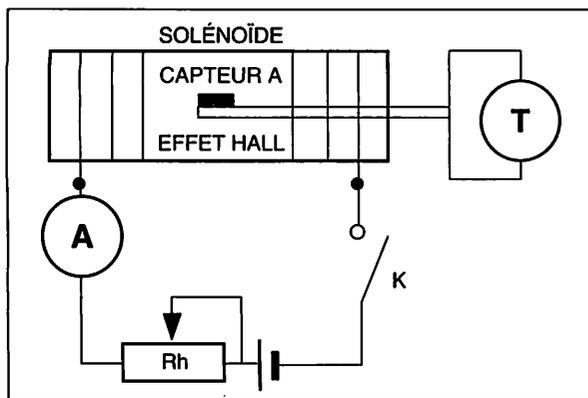
1. En utilisant un seul enroulement, soit  $N = 200$  spires, relever l'intensité  $B$  du champ magnétique en fonction du courant  $I$  dans le solénoïde.

Le rhéostat permet de faire varier  $I$  de 0 à 5 A.

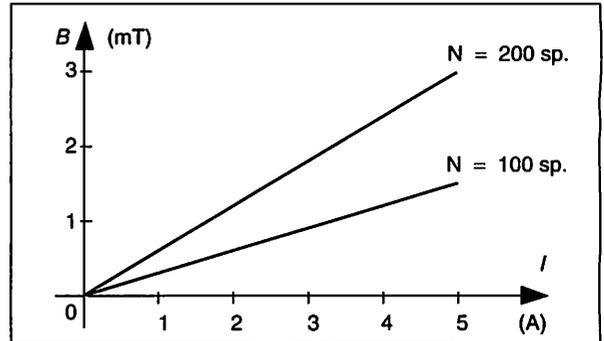
2. Reprendre les mêmes mesures en utilisant les deux enroulements, soit  $N = 400$  spires.

3. D'après les mesures précédentes, déterminer la valeur de la constante magnétique  $\mu_0$ .

### ■ SCHÉMA DU MONTAGE



### ■ COURBES



### ■ RÉSULTATS

1 et 2. Les courbes  $B = f(I)$  représentées ci-dessus sont des droites.

$B$  est proportionnel à  $I$ .

Lorsque le nombre de spires  $N$  double, pour une même valeur de  $I$ , la valeur de  $B$  double.

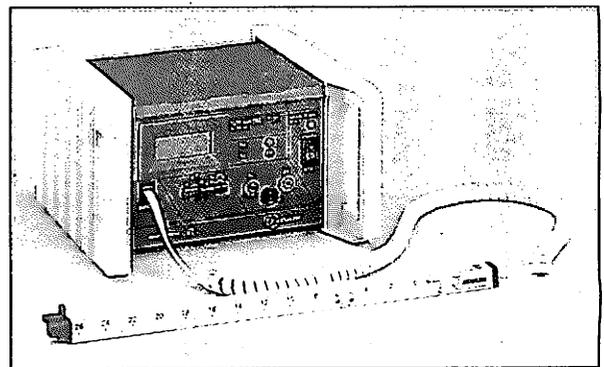
$B$  est proportionnel à  $N$ .

3. En ayant pour mesures :

$I = 5$  A ;  $N = 100$  spires ;  $\ell = 0,412$  m ;  $B = 1,4$  mT.

L'intensité du champ magnétique est donnée par la relation :  $B = \mu_0 \frac{NI}{\ell}$  soit  $\mu_0 = \frac{B\ell}{NI}$

avec les valeurs mesurées :  $\mu_0 \approx 1,2 \times 10^{-6}$ .



Teslamètre à effet Hall de JEULIN.

# APPLICATIONS

## EXERCICE RÉSOLU

### Énoncé

Un solénoïde comporte 800 spires réparties sur une longueur de 20 cm. Le champ magnétique en son centre a pour valeur 2,5 mT.

- Calculer l'intensité du courant dans les spires et l'excitation magnétique  $H$  en son centre.
- L'introduction d'un noyau d'acier fait passer la valeur du champ à 2 T, déterminer la perméabilité de l'acier.

#### Méthode

#### Solution proposée

#### Remarques

a. Appliquer les relations relatives à la détermination du champ et de l'excitation magnétique.

a. Intensité du courant dans les spires :

$$I = \frac{B\ell}{\mu_0 N} \text{ soit } I = 0,5 \text{ A}$$

Excitation magnétique :

$$H = \frac{NI}{\ell} \text{ soit } H = 2\,000 \text{ A/m}$$

b. Extraire la valeur de la perméabilité relative de l'expression liant  $B$  à  $B_0$ .

b. Perméabilité de l'acier :

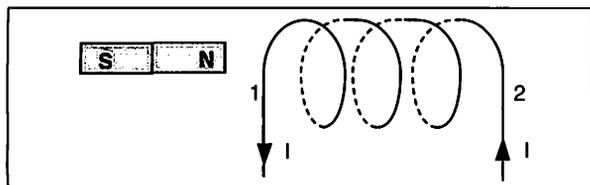
$$\mu_r = \frac{B}{B_0} \text{ soit } \mu_r = 800$$

La valeur de  $\mu_r$ , soit 800, correspond à l'accroissement du champ à l'intérieur du solénoïde qui passe de 2,5 mT à 2 T.

## EXERCICES À RÉSOUDRE

**E.1** Un aimant est placé au voisinage d'une bobine parcourue par un courant (cf. fig. ci-dessous).

- Identifier les faces de la bobine.
- Préciser la sollicitation qu'exerce l'aimant sur la bobine.



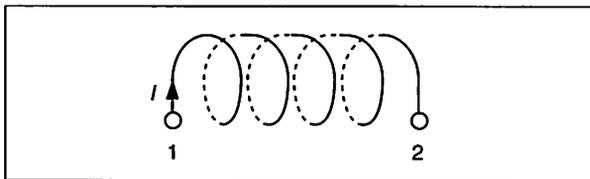
**E.2** Un noyau ferromagnétique de 5 cm<sup>2</sup> de section est recouvert d'un enroulement de 1 600 spires sur une longueur de 0,4 m assimilable à un solénoïde. La perméabilité du noyau étant de 800, déterminer l'intensité du courant pour que le flux à l'intérieur de ce noyau soit de 1 Wb.

**E.3** Des mesures sur les propriétés magnétiques des aciers donnent les résultats suivants :

$H$ (A/m)	0	500	1 000	2 000	4 000	6 000	8 000	10 000
$B$ (T)	0	1	1,25	1,46	1,62	1,7	1,75	1,8

- Représenter graphiquement  $B$  en fonction de  $H$ .
- Calculer  $\mu_r$  dans chacun des cas du tableau ; représenter  $\mu_r$  en fonction de  $H$ .

**E.4** Un solénoïde long de 50 cm comporte 100 spires. Il est parcouru par un courant  $I$  selon le schéma de la figure ci-dessous.



- Indiquer les pôles Nord et Sud de la bobine.
- Calculer la valeur de  $I$  pour que le champ magnétique au centre soit de 10 mT.

# 10 Induction électromagnétique.

## Lois de Lenz et de Laplace

### ÉLECTROTECHNIQUE

#### 1 Induction électromagnétique

##### ■ COURANTS INDUITS

Une variation de flux magnétique à travers un circuit électrique donne naissance à un courant induit.

Dans les schémas de la figure 10.01, la variation de flux est produite par le déplacement d'un aimant. Le sens du courant induit dépend de la variation du flux à travers le circuit. C'est ce qu'exprime la loi de Lenz.

Le sens du courant induit est tel que ses effets tendent toujours à s'opposer à la cause qui lui donne naissance.

Ainsi, figure 10.01, lors de l'approche d'un pôle Nord d'aimant, le courant induit dans la bobine génère une face Nord qui s'oppose à cette approche. Lors du retrait du pôle Nord de l'aimant, le courant induit produit une face Sud qui s'oppose à ce retrait.

##### ■ VALEUR DE LA F.E.M. INDUITE

Le courant induit est produit par une force électromotrice engendrée par la variation du flux à travers le circuit.

La valeur moyenne de la f.e.m. induite est :

- proportionnelle à la variation de flux notée  $\Delta\Phi$ ,
- inversement proportionnelle à la durée de cette variation, notée  $\Delta t$ .

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

$E$  en volts,  
 $\Delta\Phi$  en webers,  
 $\Delta t$  en secondes.

##### Exemple

Une spire de 50 cm<sup>2</sup> d'aire tourne dans un champ magnétique uniforme tel que  $B = 0,5$  T (cf. fig. ci-contre). Le flux à travers la spire est maximal lorsque celle-ci est perpendiculaire aux lignes de champ soit :

$$\Phi_1 = BS = 2,5 \text{ mWb.}$$

Lorsque la spire a tourné de 90° par rapport à la position précédente, elle est parallèle aux lignes de champ. Le flux qui la traverse est nul, soit :

$$\Phi_2 = 0.$$

Si la spire a parcouru cet angle de 90° (soit 1/4 de tour) en 25 ms (soit une fréquence de rotation de 10 tr/s ou 600 tr/min), la f.e.m. induite a pour valeur :

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Delta t} \text{ soit } E = 0,1 \text{ V}$$

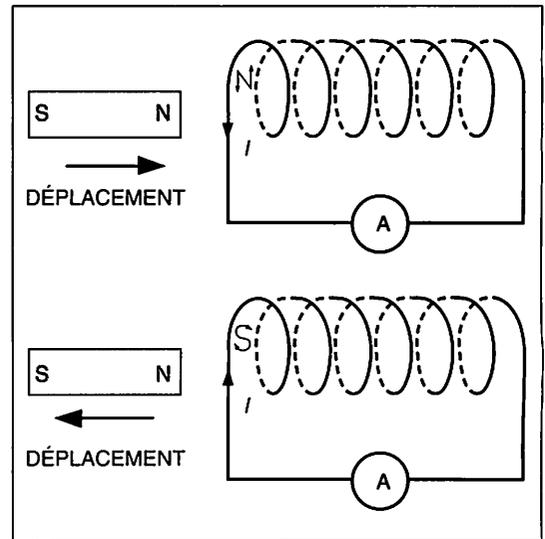
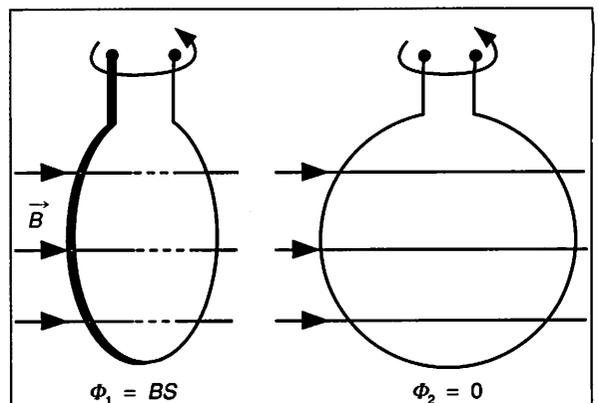


Fig. 10.01 : Production d'un courant induit.



## ■ DÉPLACEMENT D'UN CONDUCTEUR DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE UNIFORME

Le conducteur AB de longueur  $\ell$  représenté à la figure 10.02 se déplace dans un champ magnétique d'intensité  $B$ .

Lorsque sa position passe de AB à A'B', le flux à travers le circuit a augmenté de :

$$\Delta\Phi = BS = B\ell d$$

Si le déplacement de AB s'effectue sur une durée de  $\Delta t$ , entre les extrémités du conducteur apparaît une f.e.m. induite de valeur :

$$= \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{B\ell d}{\Delta t}$$

Le rapport  $d/\Delta t$  représentant la **vitesse**  $v$  du déplacement, la f.e.m. est alors égale à :

$$E = B \ell v$$

$B$  en teslas,  
 $\ell$  en mètres,  
 $v$  en mètres par seconde.

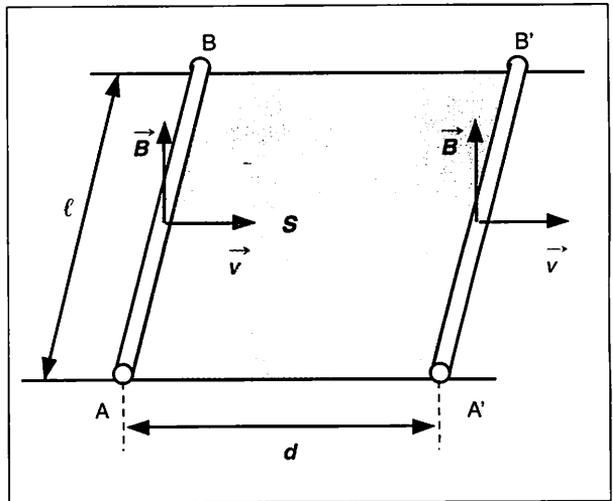


Fig. 10.02 : Déplacement d'un conducteur dans un champ magnétique uniforme.

### Exemple :

Le conducteur de la figure 10.02 a une longueur de 0,5 m. Il se déplace à la vitesse  $v = 2$  m/s dans un champ magnétique uniforme d'intensité  $B = 0,5$  T.

La f.e.m. induite entre les extrémités du conducteur a pour valeur :

$$E = B \ell v = 0,5 \times 0,5 \times 2 \text{ soit } E = 0,5 \text{ V}$$

Cette valeur de la f.e.m. peut être retrouvée de la manière suivante :

- en calculant l'augmentation de flux à travers le circuit ou encore le flux coupé par le conducteur durant son déplacement pendant une seconde :  $\Delta\Phi = B S = 0,5 \times 0,5 \times 2$  soit  $\Delta\Phi = 0,5$  Wb
- en appliquant la relation :

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{0,5}{1} \text{ soit } E = 0,5 \text{ V.}$$

### Remarque :

Durant le déplacement du conducteur, le système a effectué la conversion :

**Énergie mécanique en Énergie électrique.**

Le principe de ce système est à la base de la réalisation des **génératrices et des alternateurs**.

## ■ COURANTS DE FOUCAULT

Les **courants de Foucault** sont des **courants induits qui circulent dans des masses métalliques** lorsque celles-ci sont :

- en mouvement dans un champ magnétique fixe,
- fixes dans un champ magnétique variable.

Le disque de la figure 10.03, en rotation entre les pôles d'un électro-aimant, est **freiné lorsque l'électro-aimant est alimenté**. La tranche du disque qui traverse le champ magnétique est le siège de courants induits. Ils s'opposent à la cause qui leur a donné naissance, c'est-à-dire la rotation du disque. Les courants de Foucault permettent le **freinage des masses mécaniques sans liaison mécanique** (ralentisseurs de camions, freinage à des fins d'étalonnage des compteurs électriques).

En général les **courants de Foucault sont nuisibles**, ils provoquent une perte d'énergie qui se traduit par un échauffement du métal.

Pour réduire ces pertes on gêne la circulation des courants de Foucault en réalisant les circuits magnétiques en tôles fines empilées (circuits feuilletés) dans lesquelles les courants sont fortement atténués.

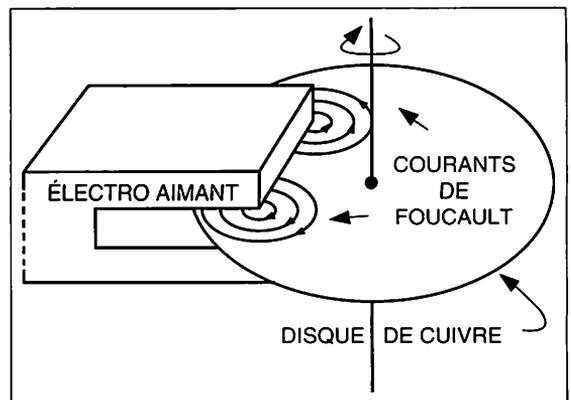


Fig. 10.03 : Mise en évidence des courants de Foucault.

## 2 Auto-induction

### INDUCTANCE

Un circuit parcouru par un courant est traversé par le flux du champ magnétique qu'il produit. Ce flux est appelé flux propre.

Le flux propre est proportionnel à l'intensité  $I$  du courant dans le circuit :

$$\Phi = LI$$

$\Phi$  en webers,  
 $L$  en henrys,  
 $I$  en ampères.

Le coefficient de proportionnalité  $L$  représente l'**inductance** du circuit. Elle s'exprime en **HENRYS (H)**.

**L'inductance dépend de la forme du circuit.**

Si une bobine comporte un **noyau de fer**, le champ magnétique et par conséquent le flux propre sont multipliés par le **coefficient de perméabilité**  $\mu_r$ . L'inductance est elle aussi multipliée par la perméabilité.

En notant  $L_0$  l'inductance de la bobine sans noyau, la nouvelle inductance est égale à :

$$L = \mu_r L_0$$

La valeur de  $\mu_r$  étant grande, la présence d'un noyau de fer augmente considérablement l'inductance.

Ainsi avec un noyau d'acier doux non saturé ( $\mu_r = 1\ 600$ ), l'inductance de la bobine précédente devient :

$$L = \mu_r L_0 = 1\ 600 \times 2,5 \times 10^{-3} \text{ soit } L = 4 \text{ H}$$

### F.E.M. D'AUTO-INDUCTION

La force électromotrice d'auto-induction peut être mise en évidence par le montage de la figure 10.04.

À l'ouverture de l'interrupteur  $K$ , la lampe néon s'éclaire un court instant. Elle est alimentée par la f.e.m. d'auto-induction due à la suppression du courant dans la bobine.

La f.e.m. d'auto-induction apparaît lors d'une variation de courant dans un circuit.

Cette variation de courant  $\Delta I$  provoque une variation de flux propre  $\Delta \Phi$  telle que :

$$\Delta \Phi = L \Delta I$$

La f.e.m.  $E$  a pour valeur moyenne :

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

Soit :

$$E = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$E$  en volts,  
 $L$  en henrys,  
 $\Delta I$  en ampères,  
 $\Delta t$  en secondes.

**Exemple :**

Un solénoïde de 50 cm de long comporte 1 000 spires de 10 cm<sup>2</sup> de surface chacune. Il est parcouru par un courant de 4 A.

Le champ magnétique produit en son centre est égal à :  
 La **f.e.m. induite** entre les extrémités du conducteur a pour valeur :

$$B = \mu_0 \frac{NI}{\ell}$$

Le flux propre qui le traverse est alors :

$$\Phi = B S N \text{ soit } \Phi = 10 \text{ mWb.}$$

Son inductance  $L$  est égale à :

$$L = \frac{\Phi}{I} \text{ soit } L = 2,5 \text{ mH.}$$

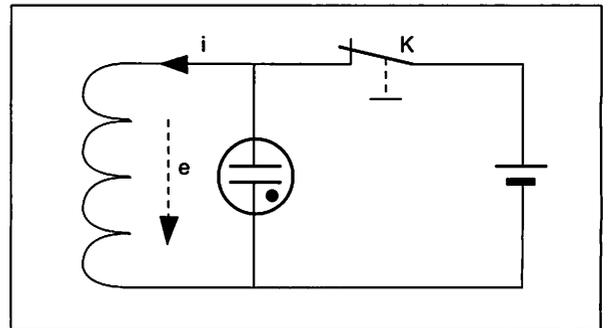


Fig. 10.04 : Mise en évidence de la f.e.m. d'auto-induction.

**Remarque :**

Une variation brusque de courant produit une f.e.m. de valeur élevée. Ainsi la coupure d'un courant de 1 A dans un circuit inductif ( $L = 5 \text{ H}$ ) s'effectuant en 0,01 s produit une f.e.m. de 500 V.

Cette f.e.m. se reporte, à l'ouverture du circuit, aux bornes de l'interrupteur  $y$  provoquant des étincelles dommageables pour les organes de coupure.

Dans un circuit alimenté en courant continu, l'auto-induction retarde l'établissement du courant à la fermeture du circuit et le prolonge à l'ouverture.

En courant alternatif, un circuit inductif s'oppose au passage du courant.

### 3 Force électromagnétique

#### CARACTÉRISTIQUES

Un conducteur rectiligne parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à une force perpendiculaire à la fois aux lignes de champ et au conducteur.

L'expérience représentée à la figure 10.05 met en évidence cette force. Un conducteur AB est placé entre les branches d'un aimant en U. Lorsque le courant circule dans le conducteur il se déplace en A'B', il a donc été soumis à une force appelée **force électromagnétique**.

Le sens du déplacement du conducteur et donc celui de la force  $\vec{F}$  dépend des sens respectifs du champ magnétique  $\vec{B}$  et du courant  $I$ .

Le sens de la force électromagnétique est donné par la règle des trois doigts de la main droite.

Le pouce, l'index et le majeur sont placés perpendiculairement entre eux et forment un trièdre rectangle.

L'index est placé dans le sens et la direction du courant (INDEX-INTensité), le majeur dans le sens du champ magnétique (MAJeur-MAgnétique), le pouce donne alors la direction et le sens de la force.

Lorsque le champ magnétique est uniforme et perpendiculaire au conducteur, l'intensité de la force électromagnétique est égale à :

$$F = BI\ell$$

$F$  en newtons,  
 $B$  en teslas,  
 $I$  en ampères,  
 $\ell$  en mètres.

Cette relation est l'expression de la loi de Laplace.

Lorsque conducteur et champ magnétique ne sont pas perpendiculaires mais forment, comme sur la figure 10.07, un angle  $\alpha$  l'intensité de la force  $F$  est alors égale à :

$$F = BI\ell \sin \alpha$$

#### TRAVAIL DES FORCES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Lorsque le conducteur AB de longueur  $\ell$  représenté figure 10.08 se déplace sous l'action de la force électromagnétique, celle-ci effectue un travail tel que :

$$W = Fd$$

où  $d$  représente le déplacement du conducteur, soit :  $W = BI\ell d$

Le produit  $\ell d$  représente l'aire  $S$  du rectangle ABBA' balayé par le conducteur au cours de son déplacement, soit :  $W = BIS$

Le produit  $BS$  représente le flux coupé ou balayé par le conducteur dans son déplacement :

$$W = I\Phi$$

Plus généralement, le travail de la force électromagnétique agissant sur un conducteur lors du déplacement de celui-ci est égal au produit du courant dans le conducteur par le flux coupé par ce conducteur durant son déplacement.

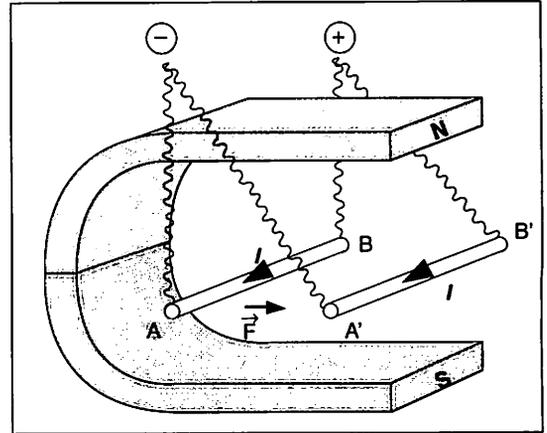


Fig. 10.05 : Force électromagnétique  $F$ .

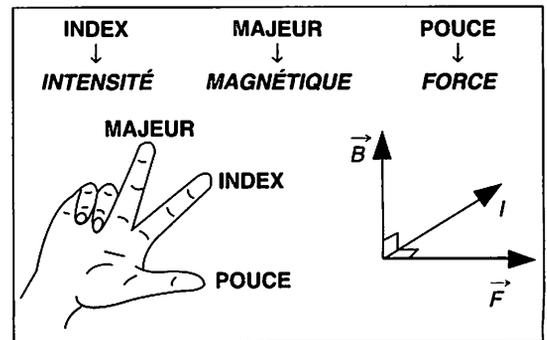


Fig. 10.06 : Règles des trois doigts de la main droite.

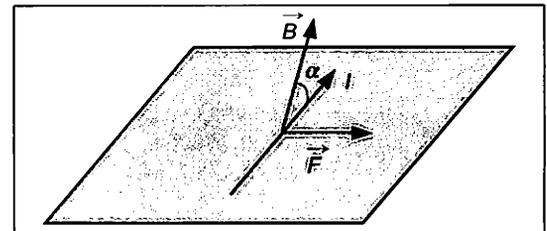


Fig. 10.07 : Force  $F$  dans le cas où le conducteur et le champ magnétique forment un angle  $\alpha$ .

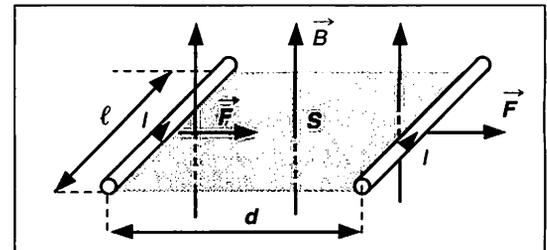


Fig. 10.08 : Travail de la force électromagnétique.

## ■ APPLICATIONS : PRINCIPE DU MOTEUR À COURANT CONTINU

Un moteur à courant continu comporte deux parties (fig. 10.09) :

- le stator (partie fixe) est constitué par un aimant ou un électro-aimant qui crée un champ magnétique dirigé vers l'axe du rotor,
- le rotor (partie en rotation) est constitué d'un cylindre d'acier doux à la périphérie duquel sont disposés des conducteurs reliés aux bornes d'alimentation par l'intermédiaire de deux lames du collecteur sur lesquelles frottent deux charbons (sur la fig. 10.10 ne sont représentés que deux conducteurs).

Lorsque les conducteurs sont parcourus par un courant, ils sont soumis à des forces  $\vec{F}_1$  et  $\vec{F}_2$  qui tendent à faire tourner le rotor.

Le collecteur permet d'inverser le sens du courant dans les conducteurs lorsque ceux-ci passent le plan vertical (fig. 10.10).

Ainsi le sens du couple des forces  $\vec{F}_1$  et  $\vec{F}_2$  et donc le sens de rotation du moteur est conservé.

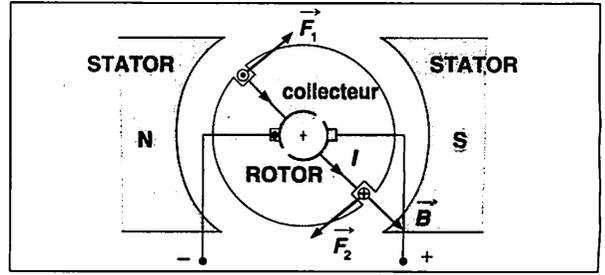
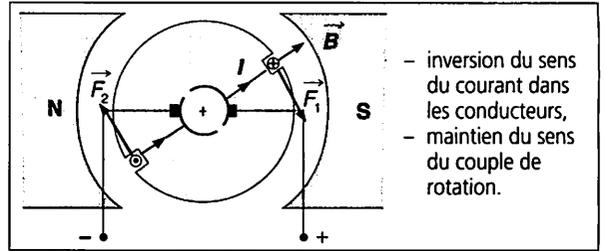


Fig. 10.09 : Moteur à courant continu.



- inversion du sens du courant dans les conducteurs,
- maintien du sens du couple de rotation.

Fig. 10.10 : Rotation du rotor.

## ESSENTIEL À RETENIR

### ÉLECTROMAGNÉTISME

#### INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

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

$E$  en volts,  
 $\Delta\Phi$  en webers,  
 $\Delta t$  en secondes.

$$E = B \ell v$$

$B$  en teslas,  
 $\ell$  en mètres,  
 $v$  en mètres par seconde.

#### AUTO-INDUCTION

$$\Phi = LI$$

$\Phi$  en webers,  
 $L$  en henrys,  
 $I$  en ampères.

$$E = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$E$  en volts,  
 $L$  en henrys,  
 $\Delta I$  en ampères,  
 $\Delta t$  en secondes.

#### FORCE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

$$F = BI \ell \sin \alpha$$

$F$  en newtons,  
 $B$  en teslas,  
 $I$  en ampères,  
 $\ell$  en mètres,  
 $\alpha$  angle entre conducteur et champ.

$$W = I\Phi$$

$W$  en joules,  
 $I$  en ampères,  
 $\Phi$  flux coupé en webers.

## TEST RAPIDE

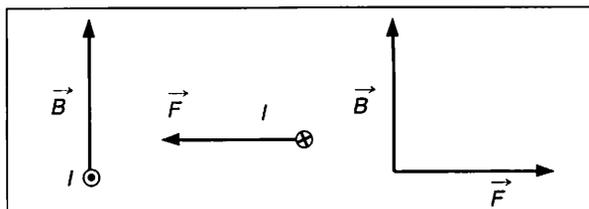
**T. 1** Une bobine de 500 spires de  $10 \text{ cm}^2$  de section a son axe parallèle aux lignes d'un champ magnétique d'intensité  $0,2 \text{ T}$ . Elle tourne de  $90^\circ$  en  $0,2 \text{ s}$ . Déterminer la valeur de la f.e.m. induite.

**Réponse :**  $0,1 \text{ V}$  ;  $0,02 \text{ V}$  ;  $0,5 \text{ V}$ .

**T. 2** Une bobine d'inductance  $2 \text{ H}$  est parcourue par un courant de  $5 \text{ A}$ . Ce courant est supprimé en  $0,1 \text{ s}$ . Déterminer la valeur de la f.e.m. induite.

**Réponse :**  $100 \text{ V}$  ;  $10 \text{ V}$  ;  $1 \text{ V}$ .

**T. 3** Un conducteur parcouru par un courant  $I$  est placé dans un champ magnétique uniforme  $B$ . Compléter sur la figure ci-dessous le sens de la grandeur manquante  $I$ ,  $B$  ou  $F$ .



Nota : Le point représente un vecteur sortant du plan ; la croix représente un vecteur rentrant dans le plan.

## APPLICATIONS

### EXERCICE RÉSOLU

#### Énoncé

Une bobine pouvant être munie ou non d'un noyau de fer de perméabilité  $\mu_r = 1\,200$  est parcourue par un courant de  $2 \text{ A}$ . Ce courant est supprimé en  $1/100 \text{ s}$ . L'inductance de la bobine sans noyau est de  $0,05 \text{ H}$ . Calculer la f.e.m. auto-induite dans les deux cas, avec et sans noyau.

#### Méthode

Appliquer l'expression qui permet la détermination de la f.e.m. auto-induite.

Ne pas oublier de déterminer la valeur de l'inductance avec noyau.

#### Solution proposée

Sans noyau, la f.e.m. est égale à :

$$E = L_0 \frac{\Delta I}{\Delta t} = 0,05 \frac{2}{10^{-2}} \text{ soit } E = 10 \text{ V.}$$

L'inductance avec noyau est :

$$L = \mu_r L_0 \text{ soit } L = 60 \text{ H.}$$

La f.e.m. est alors égale à :

$$E = L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 60 \frac{2}{10^{-2}} \text{ soit } E = 12\,000 \text{ V.}$$

#### Remarques

Le facteur d'accroissement de la f.e.m. auto-induite est supérieur à  $1\,000$ .

### EXERCICES À RÉSOUDRE

**E. 1** Un solénoïde est constitué de  $5\,000$  spires sur une longueur de  $50 \text{ cm}$ . Sa section est de  $10 \text{ cm}^2$  et il est parcouru par un courant de  $5 \text{ A}$ .

a. Calculer son inductance.

b. Déterminer la f.e.m. d'auto-induction produite lorsque le courant est supprimé en  $0,1 \text{ s}$ .

**E. 2** Une bobine d'allumage de moteur comporte :

– un primaire alimenté par la batterie et produisant un champ de  $0,2 \text{ T}$  dans le circuit magnétique,

– un secondaire comportant  $20\,000$  spires de  $2 \text{ cm}^2$  de section bobinées sur le même circuit magnétique.

La rupture du courant dans le primaire produit la suppression du champ magnétique en  $1/1\,000 \text{ s}$ . Calculer la f.e.m. disponible au secondaire pour l'allumage.

## 11

## Principe et organisation

## ÉLECTROTECHNIQUE

## 1 Organisation fonctionnelle d'une machine à courant continu

La machine à courant continu comporte trois éléments essentiels :

- l'**inducteur**, partie fixe, dont la fonction consiste à créer le champ magnétique d'excitation. Il est constitué, soit par un aimant permanent, soit par un électro-aimant dont les enroulements sont parcourus par le courant continu d'excitation ;
- l'**induit**, partie mobile, qui comporte une ou plusieurs bobines tournant dans le champ magnétique. Il est le siège d'une f.e.m. induite alternative ;
- le **collecteur**, également mobile, dont le rôle est de transformer le courant induit alternatif en courant unidirectionnel (fig. 11.01).

## 2 Principe de réversibilité

Selon la nature de la conversion énergétique réalisée, deux types de machines sont distingués :

- la **génératrice à courant continu** (ou dynamo) qui transforme une énergie mécanique en énergie électrique sous forme de courant continu ;
- le **moteur à courant continu** qui transforme une énergie électrique de forme continue en une énergie mécanique.

**La machine à courant continu possède la propriété de réversibilité.**

Elle peut en effet fonctionner indifféremment en génératrice ou en moteur (fig. 11.02).

## ■ FONCTIONNEMENT EN MODE GÉNÉRATRICE

**L'inducteur est alimenté par une tension continue. Il produit un champ magnétique constant.**

**L'induit est entraîné en rotation par un moteur. Il est le siège de variations de flux au travers des spires qui le constituent. Il en résulte la création d'une f.e.m. alternative qui est recueillie, redressée et transmise au circuit extérieur par l'ensemble collecteur-balais.**

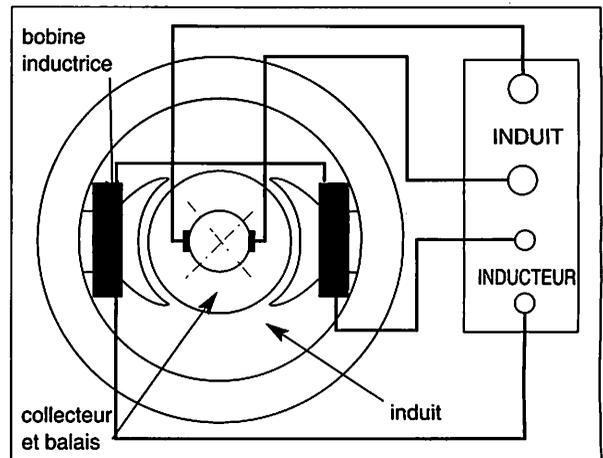


Fig. 11.01 : Éléments constitutifs de la machine à courant continu.

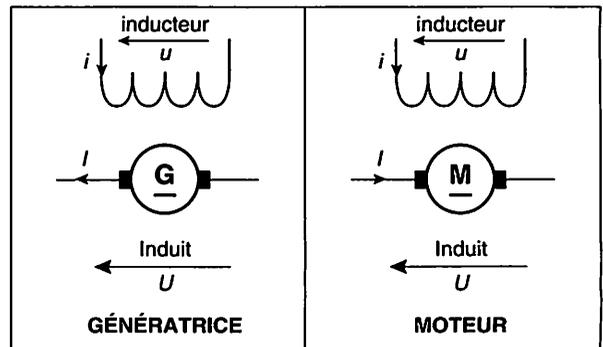


Fig. 11.02 : Symboles de la machine à courant continu.

## ■ FONCTIONNEMENT EN MODE MOTEUR

**L'inducteur est alimenté par une tension continue. Il produit un champ magnétique constant.**

**L'induit est alimenté par une source de courant continu. Le champ inducteur agit sur ses conducteurs en leur appliquant des forces électromagnétiques. Ces forces électromagnétiques produisent un couple moteur qui entraîne l'induit en rotation.**

# 12 Moteur à excitation séparée et moteur à excitation série

## ÉLECTROTECHNIQUE

### 1 Différentes configurations d'excitation

#### ■ EXCITATION SÉPARÉE OU INDÉPENDANTE

Deux sources d'alimentation sont nécessaires, une pour l'induit, l'autre pour l'inducteur (fig. 12.01).

Ce mode d'excitation offre à l'utilisateur une **fréquence de rotation indépendante de la charge** et largement réglable par action :

- soit sur la tension d'induit,
- soit sur le courant d'excitation.

Le moteur à excitation indépendante est utilisé dans les applications nécessitant **une variation de la fréquence de rotation**.

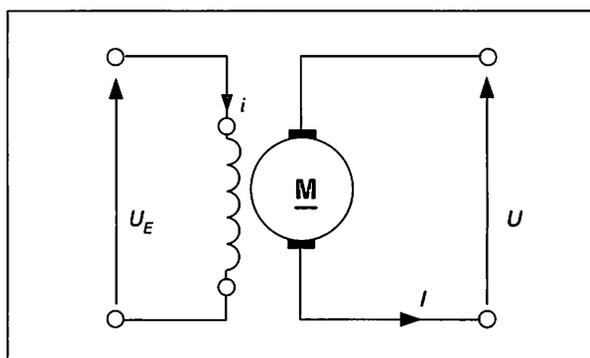


Fig. 12.01 : Excitation séparée ou indépendante.

#### ■ EXCITATION DÉRIVATION OU EXCITATION SHUNT

La même source d'alimentation alimente l'induit et l'inducteur. L'inducteur est mis en parallèle avec l'induit (fig. 12.02).

Les propriétés du moteur à excitation parallèle sont les mêmes que celles du moteur à excitation indépendante. Ce mode d'excitation permet la réalisation d'un moteur dont la **fréquence de rotation est pratiquement indépendante de la charge** et qui peut démarrer à vide.

Le moteur shunt est notamment utilisé pour l'entraînement des machines outils.

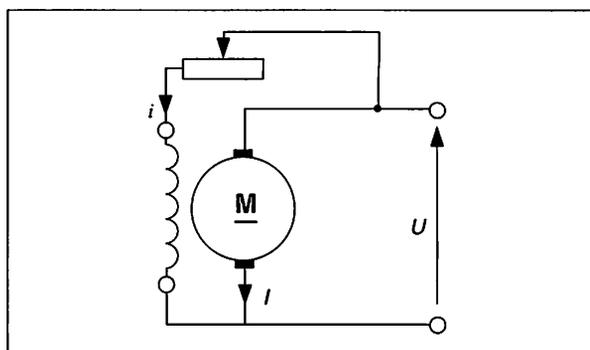


Fig. 12.02 : Excitation dérivation ou shunt.

#### ■ EXCITATION SÉRIE

Une seule source de tension alimente l'induit et l'inducteur. L'inducteur est mis en série avec l'induit (fig. 12.03).

Dans ce montage, le courant d'excitation est le même que le courant dans l'induit.

La **fréquence de rotation du moteur varie beaucoup avec la charge** et ce type de moteur a tendance à s'emballer à vide ou sous faible charge.

Le moteur série est notamment utilisé en traction électrique et dans les applications de levage.

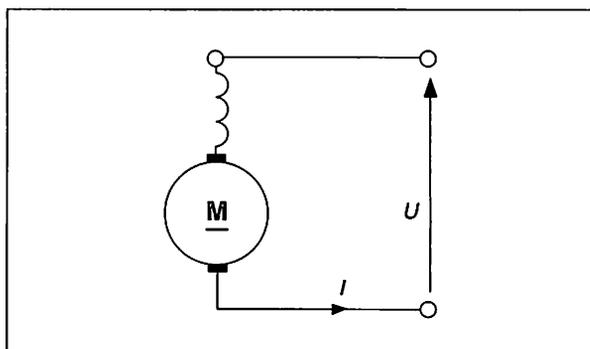


Fig. 12.03 : Excitation série.

### A1 Force contre électromotrice

Comme pour la génératrice, les conducteurs de l'induit du moteur en rotation coupent le flux inducteur et sont le siège d'une f.c.e.m.  $E'$ .

La f.c.e.m. est proportionnelle :

- au nombre  $N$  de conducteurs actifs de l'induit,
- à la fréquence de rotation  $n$  de l'induit,
- au flux  $\Phi$  dans l'entrefer sous l'un des pôles.

Soit pour un moteur bipolaire :

$$E' = Nn\Phi$$

$E'$  en volts,  
 $n$  en tours par seconde,  
 $\Phi$  en webers.

### A2 Tension aux bornes du moteur

Appliquée à l'induit, récepteur actif, la loi d'Ohm s'exprime sous la forme :

$$U = E' + ri$$

$U$  et  $E'$  en volts,  
 $r$ , résistance de l'induit, en ohms,  
 $i$ , courant d'induit, en ampères.

Le modèle équivalent au moteur est représenté à la figure 12.04.

### A3 Courant au démarrage

Lors de la mise sous tension du moteur (démarrage), la f.c.e.m. est nulle. Le courant traversant l'induit, uniquement limité par la résistance de l'induit qui est faible, peut prendre une valeur importante risquant de détériorer la machine.

En effet : 
$$I = \frac{U}{r} = \frac{220}{0,4} = 550 \text{ A.}$$

Il est donc indispensable de prévoir un dispositif dont le rôle est de limiter le courant à une valeur raisonnable jusqu'à ce que la f.c.e.m. soit en mesure de s'opposer à la tension d'alimentation :

- redresseur contrôlé (chapitre 21),
- rhéostat de démarrage (fig. 12.05).

#### Exemple

L'enroulement induit d'un moteur bipolaire comporte 400 spires soumises à un flux de 0,01 Wb.

L'induit tourne à 1800 tr/min. Sa force contre électromotrice a pour valeur :

$$E' = 800 \times \frac{1800}{60} \times 0,01 = 240 \text{ V.}$$

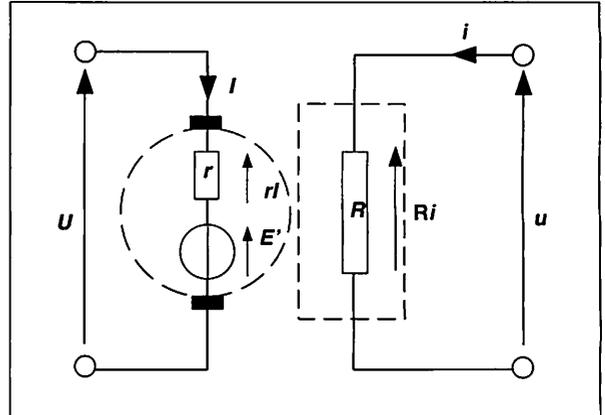


Fig. 12.04 : Modèle équivalent au moteur.

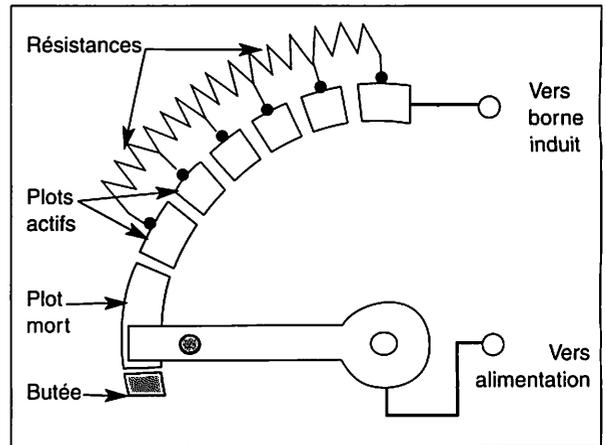


Fig. 12.05 : Rhéostat de démarrage.

#### Exemple :

Un moteur a une résistance d'induit de  $0,4 \Omega$  et absorbe à charge nominale un courant de 30 A. Il est alimenté sous 220 V.

En direct, le courant au démarrage peut atteindre la valeur

$$I = \frac{U}{r} = \frac{220}{0,4} = 550 \text{ A.}$$

#### Cette intensité est prohibitive.

Si l'on admet, au démarrage, une pointe de courant (surintensité au démarrage) égale à 1,5 fois le courant nominal du moteur, il faut prévoir un rhéostat en série avec l'induit. La valeur du rhéostat de démarrage est :

$$R_D = \frac{U}{1,5 I_n} - r \text{ soit } R_D = 4,5 \Omega.$$

## A4 Fréquence de rotation

### ■ EXPRESSION GÉNÉRALE

Elle s'obtient à partir de l'expression de la force contre électromotrice, soit :

$$= \frac{L}{N\Phi} \quad \text{avec} \quad E' = U - rI.$$

D'où :

$$n = \frac{U - rI}{N\Phi}$$

$n$  en tours par seconde,  
 $U$  en volts,  
 $r$ , résistance de l'induit, en ohms,  
 $I$ , courant d'induit, en ampères.

### ■ COMPORTEMENT À VIDE

Pour une tension d'alimentation constante, la fréquence de rotation à vide est inversement proportionnelle au flux, lequel dépend du courant d'excitation.

En effet, dans ce mode de fonctionnement le courant dans l'induit est faible et la chute de tension,  $rI$ , peut être négligée, soit :

$$\approx \frac{U}{N\Phi}.$$

La courbe  $n = f(i)$  pour  $U = \text{constante}$  est appelée **caractéristique de réglage**. Elle a l'allure d'une portion d'hyperbole (fig. 12.06).

#### Remarques :

- Lorsque le flux est nul, la fréquence de rotation tend vers l'infini. Le moteur s'emballe si le courant d'excitation est nul.
- Le courant d'excitation, donc le flux, est réglé par un rhéostat appelé **rhéostat d'excitation** ou **rhéostat de champ**.

Pour un courant d'excitation constant ( $\Phi = \text{constante}$ ), la fréquence de rotation à vide est proportionnelle à la tension d'alimentation.

La courbe  $n = f(U)$  pour  $i = \text{constante}$  est une droite (fig. 12.07).

#### Remarque :

- Pour inverser le sens de rotation du moteur, il faut inverser le sens du courant :
- soit dans le circuit inducteur,
  - soit dans le circuit induit.

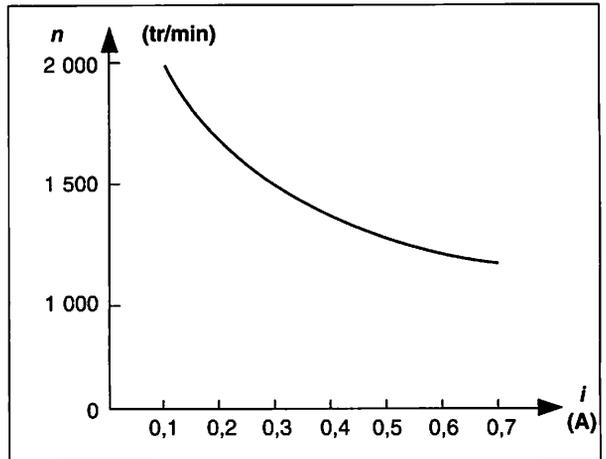


Fig. 12.06 : Courbe  $n = f(i)$  pour  $U = \text{constante}$ .

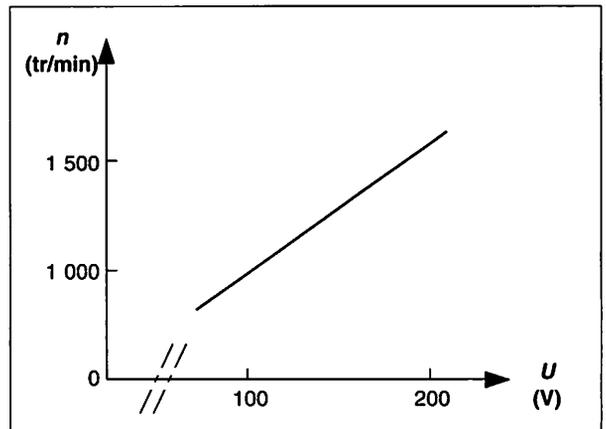


Fig. 12.07 : Courbe  $n = f(U)$  pour  $i = \text{constante}$ .

## ■ COMPORTEMENT EN CHARGE

Pour une tension d'alimentation et un courant d'excitation constant, la fréquence de rotation en charge diminue quand le courant absorbé par le moteur s'accroît.

La caractéristique en charge  $n = f(I)$  pour  $U$  et  $i$  constants est une droite (fig. 12.08).

En effet la fréquence de rotation peut s'écrire :

$$= \frac{\omega}{N\Phi} = \frac{\omega}{N\Phi} - \frac{\omega}{N\Phi}$$

Cette expression est celle d'une droite de la forme :

$y = ax + b$  avec  $I$  comme variable.

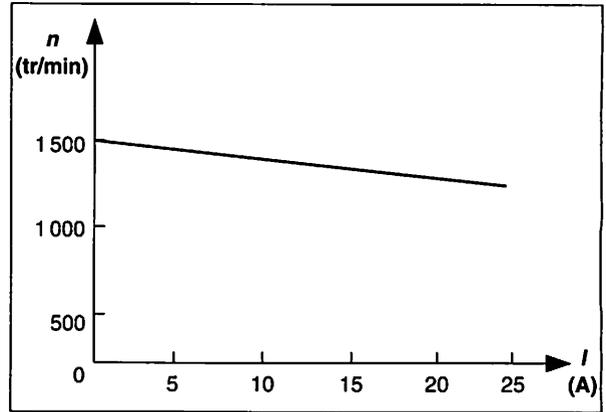


Fig. 12.08 : Courbe  $n = f(I)$  pour  $i$  et  $U$  constants.

## A5 Puissance et couple électromagnétiques

La puissance électromagnétique,  $P_{em}$ , ou puissance électrique est celle qui est transformée en puissance mécanique par le moteur.

Le couple moteur ou couple électromagnétique,  $T_{em}$ , est égal au quotient de la puissance électromagnétique,  $P_{em}$ , par la vitesse angulaire  $\Omega$ .

$$P_{em} = E'I = Nn\Phi I$$

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega}$$

$T_{em}$  en newtons mètres,  
 $P_{em}$  en watts,  
 $\Omega$  en radians par seconde.

Le couple utile, qui tient compte des pertes mécaniques est légèrement plus faible que le couple électromagnétique.

$$T_u = \frac{P_u}{\Omega}$$

$T_u$  en newtons mètres,  
 $P_u$  en watts,  
 $\Omega$  en radians seconde.

### Remarque :

Le couple électromagnétique peut s'écrire :

$$T_{em} = \frac{Nn\Phi I}{2\pi n} = \frac{N}{2\pi} \Phi I$$

Lorsque le flux est maintenu constant, le couple électromagnétique est proportionnel au courant  $I$  (fig. 12.09).

## ■ CARACTÉRISTIQUES ÉLECTROMAGNÉTIQUE ET MÉCANIQUE

La caractéristique électromagnétique  $T_{em} = f(I)$  pour  $U$  et  $\Phi$  constants est une droite passant par l'origine (fig. 12.09).

La caractéristique mécanique  $T_{em} = f(n)$  pour  $U$  et  $\Phi$  constants est une droite (fig. 12.10).

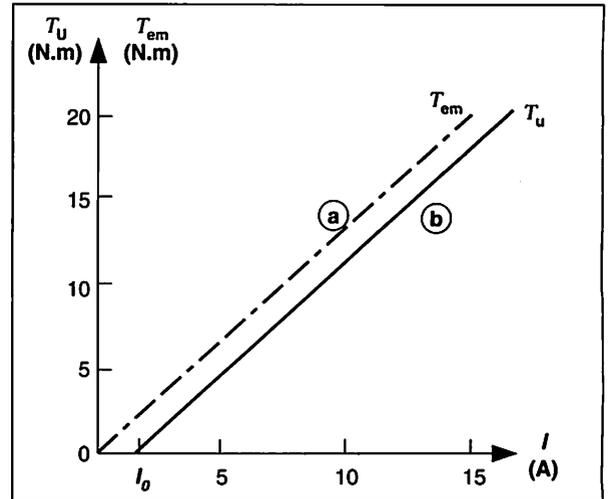


Fig. 12.09 : Caractéristique électromagnétique.

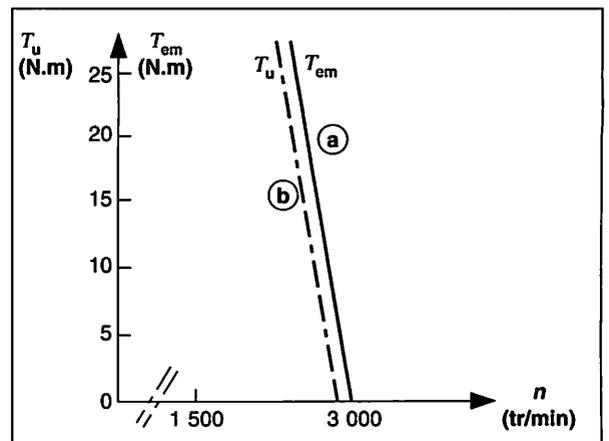


Fig. 12.10 : Caractéristique mécanique.

## POINT DE FONCTIONNEMENT

Lorsqu'un moteur entraîne une machine, celle-ci oppose un couple résistant,  $T_R$ . À ce couple résistant, fonction de la fréquence de rotation, correspond la caractéristique mécanique de l'utilisation ou de la charge.

Lorsque les caractéristiques mécaniques du moteur et de la charge qu'il entraîne sont portées sur le même graphique (fig. 12.11), leur point d'intersection est appelé **point de fonctionnement**.

## A6 Bilan énergétique

Le bilan, représenté figure 12.12, prend en compte les différentes puissances mises en jeu lors du fonctionnement du moteur.

• La **puissance absorbée**,  $P_a$ , correspond au total des puissances consommées par les circuits induit et inducteur, soit :

$$P_a = UI + ui$$

• Les **pertes** sont d'origines mécanique, magnétique ou électrique.

Les **pertes mécaniques et magnétiques** sont considérées comme constantes et notées  $p_c$ .

Les **pertes électriques**, par effet Joule sont :

Pour l'induit :  $p_j = rI^2$ .

Pour l'inducteur :  $p_j = Ri^2 = ui$ .

• La **puissance mécanique utile**,  $P_u$ , est égale à la puissance absorbée diminuée de l'ensemble des pertes :

$$P_u = P_a - \text{pertes}$$

D'où :  $P_u = (UI + ui) - (rI^2 + ui + p_c)$

$$P_u = (U - rI)I - p_c$$

soit :  $P_u = E'I - p_c = P_{em} - p_c$ .

La puissance utile est égale à la puissance électromagnétique diminuée des pertes constantes.

Le rendement industriel,  $\eta_i$ , du moteur est égal au rapport de la puissance utile  $P_u$  à la puissance absorbée  $P_a$  :

$$\eta_i = \frac{P_u}{P_a}$$

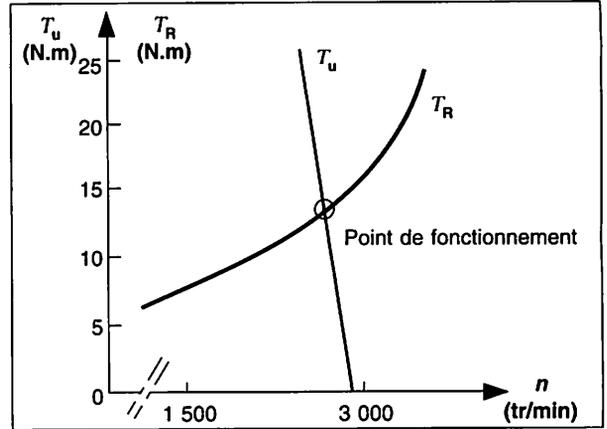


Fig. 12.11 : Point de fonctionnement du moteur.

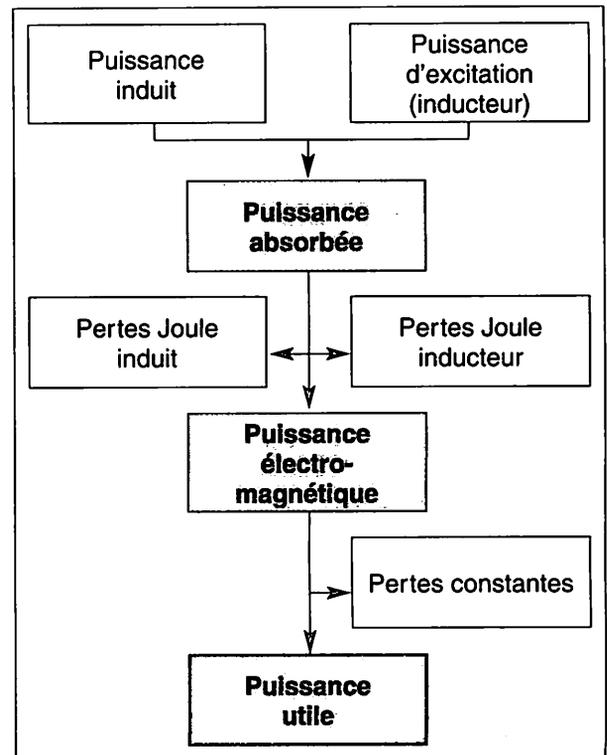


Fig. 12.12 : Bilan énergétique du moteur à excitation séparée.

Remarque :

Le rapport de la puissance électromagnétique,  $P_{em}$ , à la puissance absorbée,  $P_a$ , est appelée rendement électrique,  $\eta_e$  :

$$\eta_e = \frac{P_{em}}{P_a}$$

**B1 Tension aux bornes du moteur**

La f.c.e.m. est commune à tous les modes d'excitation, son expression reste donc égale à :

$$E' = Nn\Phi$$

$E'$  en volts,  
 $n$  en tours par seconde,  
 $\Phi$  en webers.

D'après le modèle équivalent au moteur série (fig. 12.13) la tension à ses bornes est égale à :

$$U = E' + (R + r)I$$

$U$  et  $E'$  en volts,  
 $R$ , résistance inducteur, en ohms,  
 $r$ , résistance induit, en ohms,  
 $I$ , courant d'induit, en ampères.

**Remarque :**

Dans le moteur série, le courant d'excitation et le courant d'induit ne font qu'un. Le courant d'induit dépendant de la charge, le flux inducteur n'est pas constant, il varie en fonction de la charge.

**Le moteur à excitation série est un moteur à flux variable.**

**B2 Fréquence de rotation**

Le flux inducteur est proportionnel au courant inducteur, donc au courant  $I$  :  $\Phi = kI$ .

La fréquence de rotation peut s'écrire :  $n = \frac{E'}{N\Phi} = \frac{E'}{kNI}$ .

Soit :

$$n = \frac{E'}{KI}$$

$n$  en tours par seconde,  
 $E'$  en volts,  
 $I$  en ampères,  
 $K = kN$ , constante dépendant du moteur.

La courbe représentant les variations de la fréquence de rotation  $n$  en fonction du courant  $I$  est une branche d'hyperbole (fig. 12.14).

**Remarque :**

À vide ou aux faibles charges, le courant  $I$  est très inférieur au courant nominal  $I_n$ . Le flux inducteur est très faible ce qui entraîne une fréquence de rotation élevée.

**À vide, sous sa tension nominale, le moteur série tend à s'emballer.**

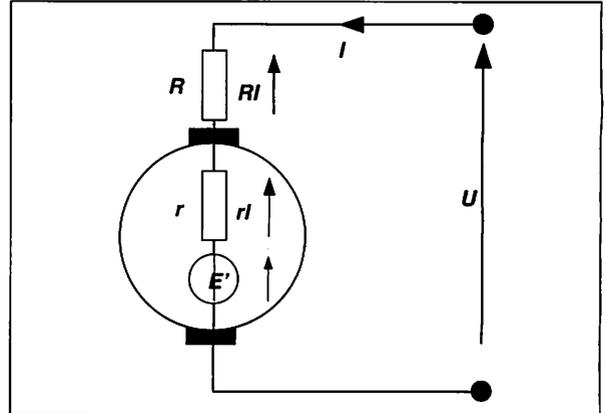


Fig. 12.13 : Modèle équivalent du moteur.

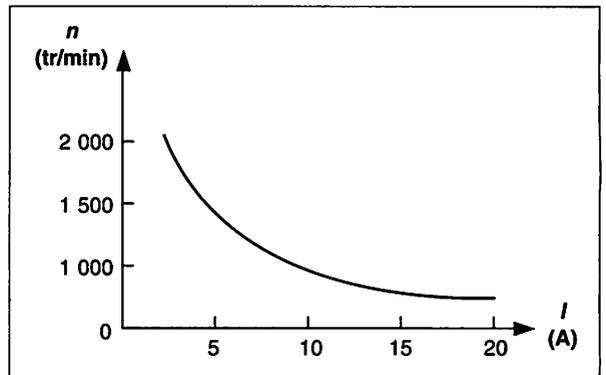


Fig. 12.14 : Courbe  $n = f(I)$  pour  $U =$  constante.

**Exemple :**

Les caractéristiques nominales d'un moteur série sont les suivantes :

$U = 110$  V ;  $I = 20$  A ;  $n = 1\,500$  tr/min ou 25 tr/s.

La résistance totale, induit + inducteur, est de  $1 \Omega$ .

En fonctionnement nominal, sa f.c.e.m. est :

$$E' = U - I(R + r) = 110 - 20 \times 1 \text{ soit } E' = 90 \text{ V.}$$

Le coefficient  $K$  du moteur est alors :

$$K = \frac{E'}{nI} = \frac{90}{25 \times 20} \text{ soit } K = 0,18.$$

Utilisé sous charge réduite, si le courant n'est plus que  $I = 10$  A, la fréquence de rotation est alors égale à :

$$n = \frac{U - (R + r)I}{KI} \text{ soit } n = 55,6 \text{ tr/s} = 3\,300 \text{ tr/min.}$$

### B3. Puissance et couple électromagnétique

Comme pour le moteur à excitation séparée, la puissance électromagnétique a pour expression :

$$P_{em} = E'I = Nn\Phi I.$$

Or le flux est proportionnel à  $I$  :

$$\Phi = kI \text{ d'où } P_{em} = kNnI^2.$$

Soit :

$$P_{em} = KnI^2$$

$P_{em}$  en watts,  
 $n$  en tours par seconde,  
 $I$  en ampères,  
 $K$ , constante du moteur.

Le couple électromagnétique,  $T_{em}$ , est égal à :

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} \text{ avec } \Omega = 2\pi n \text{ et } P_{em} = KnI^2.$$

Le couple a pour expression finale :

$$T_{em} = K'I^2$$

$T_{em}$  en newtons mètre,  
 $I$  en ampères,  
 $K'$ , constante du moteur.

La puissance électromagnétique et le couple d'un moteur série sont proportionnels au carré du courant  $I$  (fig. 12.15).

La **caractéristique électromagnétique** est la courbe  $T_{em} = f(I)$  pour  $U$  constant (fig. 12.15). Cette caractéristique a l'allure d'une parabole.

Le couple utile,  $T_u$ , est inférieur au couple électromagnétique du fait des frottements et de la ventilation du moteur.

$$T_u = \frac{P_u}{\Omega} \quad \begin{array}{l} P_u \text{ en watts,} \\ \Omega \text{ en radians par seconde.} \end{array}$$

D'après la caractéristique mécanique du moteur (fig. 12.16), le couple utile du moteur série est sensiblement inversement proportionnel à sa fréquence de rotation.

Le couple utile  $T_u$  est nul ou très faible à vide. La fréquence de rotation tend à atteindre des valeurs excessives.

**Le moteur série ne doit pas fonctionner à vide.**

En charge, le couple diminue lorsque la fréquence de rotation augmente.

Le moteur série est ainsi **auto-régulateur de puissance**.

Couplé à une machine de couple résistant  $T_R$  :

- le moteur ralentit lorsque  $T_R$  augmente,
- le moteur accélère lorsque  $T_R$  diminue.

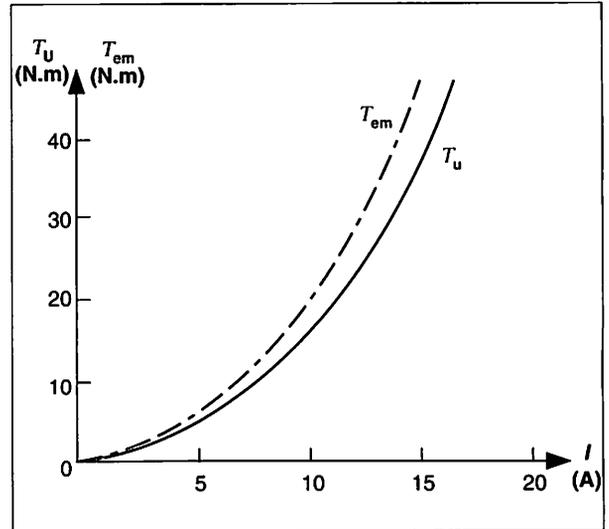


Fig. 12.15 : Courbe  $T_{em} = f(I)$  et  $T_u = f(I)$  pour  $U = \text{constante}$ .

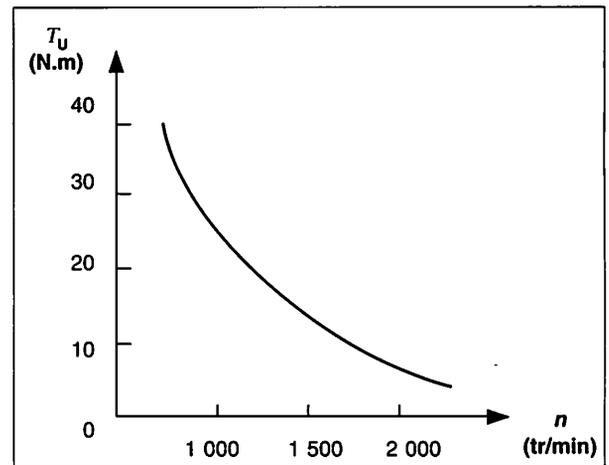


Fig. 12.16 : Caractéristique mécanique  $T_u = f(n)$  pour  $U = \text{constante}$ .

**Remarque :**

Au démarrage du moteur, en choisissant  $I_d = 2I_n$ , le couple moteur est pratiquement égal au couple nominal multiplié par quatre. **Le moteur présente un couple de démarrage élevé.**

## B4 Bilan énergétique

Le bilan représenté figure 12.17 prend en compte les différentes puissances mises en jeu lors du fonctionnement du moteur.

● La **puissance absorbée**,  $P_a$ , correspond au total des puissances consommées par les circuits induit et inducteur. Soit :

$$P_a = UI$$

● Les **pertes** sont d'origines mécanique, magnétique ou électrique.

Les pertes mécaniques (frottements, ventilation) et magnétiques (hystérésis, courants de Foucault) sont considérées comme constantes et notées  $p_c$ .

Les pertes électriques, par **effet Joule**, sont égales à :

- pour l'induit :  $p_j = rI^2$ ,
- pour l'inducteur  $p_j = RI^2$ .

● La **puissance mécanique utile**,  $P_u$ , est égale à la puissance absorbée diminuée de l'ensemble des pertes :

$$P_u = P_a - \text{pertes}$$

d'où :  $P_u = UI - (RI^2 + rI^2 + p_c) = [U - (R + r)I] I - p_c$ .

Soit :  $P_u = E'I - p_c = P_{em} - p_c$ .

La puissance utile est égale à la puissance électromagnétique diminuée des pertes constantes.

Le **rendement industriel**,  $\eta_i$ , du moteur est égal au rapport de la puissance utile,  $P_u$ , à la puissance absorbée,  $P_a$ .

$$\eta_i = \frac{P_u}{P_a}$$

### Remarque :

Le rapport de la puissance électromagnétique,  $P_{em}$ , à la puissance absorbée,  $P_a$ , est appelé rendement électrique,  $\eta_e$ .

$$\eta_e = \frac{P_{em}}{P_a}$$

Ce rendement, qui ne tient pas compte des pertes constantes, est supérieur au rendement industriel.

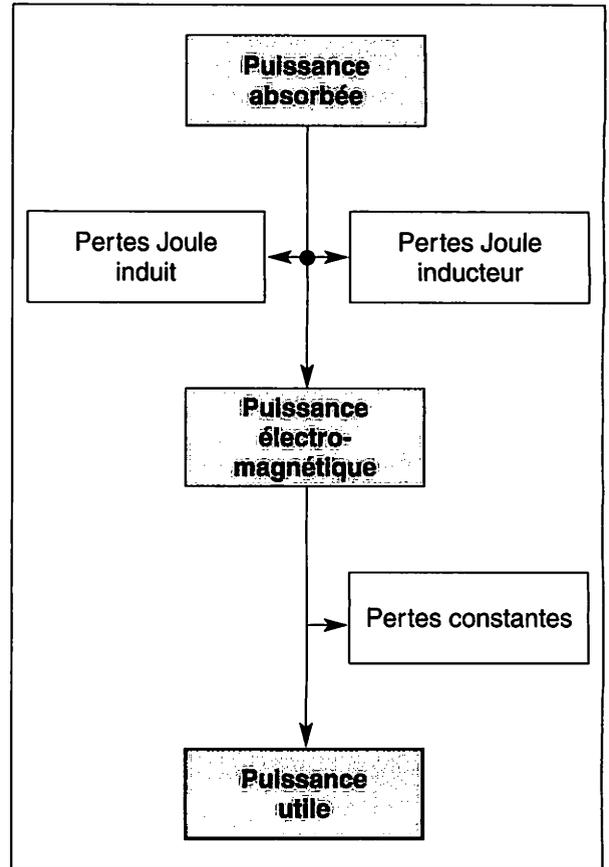


Fig. 12.17 : Bilan énergétique du moteur série.

### Exemple :

Un moteur série absorbe 10 A sous 220 V. La résistance induit et inducteur est  $(R + r) = 1,5 \Omega$ . Les pertes constantes sont  $p_c = 150 \text{ W}$ .

La puissance absorbée s'élève à :

$$P_a = UI = 220 \times 10 \text{ soit } P_a = 2\,200 \text{ W.}$$

Les pertes sont égales à :

$$\text{pertes} = (R + r) I^2 + p_c = 1,5 \times 10^2 + 150 = 300 \text{ W.}$$

La puissance utile est alors :

$$P_u = P_a - \text{pertes} = 2\,200 - 300 \text{ soit } P_u = 1\,900 \text{ W.}$$

Quant à la puissance électromagnétique, elle s'élève à

$$P_{em} = P_u + p_c = 1\,900 + 150 \text{ soit } P_{em} = 2\,050 \text{ W.}$$

Les rendements sont égaux à :

$$\eta_i = \frac{P_u}{P_a} = 86 \% ; \quad \eta_e = \frac{P_{em}}{P_a} = 93 \%$$

# ESSENTIEL À RETENIR

## MOTEURS À COURANT CONTINU

### FORCE CONTRE ÉLECTROMOTRICE

$$E' = Nn\Phi$$

$E'$  f.c.e.m. (V),  
 $n$  fréquence de rotation (tr/s),  
 $\Phi$  flux inducteur (Wb),  
 $N$  nombre de conducteurs actifs.

### TENSION AUX BORNES

Moteur à excitation séparée

$$U = E' + rI$$

$U, E'$  tension, f.c.e.m. (V),  
 $r$  résistance de l'induit ( $\Omega$ ).

Moteur à excitation série

$$U = E' + (R + r)I$$

$R$  résistance de l'inducteur ( $\Omega$ ),  
 $I$  courant d'induit (A).

### PUISSANCE ET COUPLE MOTEUR

Puissance électromagnétique

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

$E'$  f.c.e.m. (V),  
 $I$  courant d'induit (A).

Couple électromagnétique

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega}$$

$P_{em}$  puissance électromagnétique (W),  
 $\Omega$  vitesse angulaire en rad/s.

Couple utile

$$T_u = \frac{P_u}{\Omega}$$

$P_u$  puissance utile (W).

### BILAN ÉNERGÉTIQUE

Puissance absorbée

Excitation séparée

$$P_a = UI + ui$$

Excitation série

$$P_a = UI$$

$U$  tension aux bornes du moteur (V),  
 $u$  tension aux bornes de l'inducteur (V),  
 $I$  courant d'induit (A),  
 $i$  courant dans l'inducteur (A).

Puissance utile

$$P_u = P_a - \text{pertes}$$

Puissance électromagnétique

$$P_{em} = P_u + P_c$$

### RENDEMENT INDUSTRIEL

$$\eta_i = \frac{P_u}{P_a}$$

### RENDEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

$$\eta_e = \frac{P_{em}}{P_a}$$

## TEST RAPIDE

**T.1** L'induit d'un moteur comporte 400 spires soumises à un flux de 12 mWb, sa fréquence de rotation est de 1 850 tr/min. Quelle est sa f.c.e.m. ?

**Réponse :** 148 V ; 350 V ; 296 V.

**T.2** La résistance d'induit d'un moteur alimenté sous 220 V est de 0,8  $\Omega$  ; l'induit est parcouru par un courant de 15 A. Calculer la f.c.e.m. en charge du moteur.

**Réponse :** 110 V ; 208 V ; 232 V.

**T.3** Comment varie la fréquence de rotation d'un moteur à excitation séparée lorsque le courant d'excitation croît ?

**Réponse :** augmente ; diminue ; reste constante.

**T.4** Un moteur de puissance utile de 3 kW tourne à 1 500 tr/min. Calculer son couple moteur.

**Réponse :** 2 Nm ; 19 Nm ; 25 Nm.

**T.5** Un moteur série alimenté sous 220 V est parcouru par un courant d'intensité 15 A. La résistance de l'induit est 0,5  $\Omega$ , celle de l'inducteur 1,5  $\Omega$ . Calculer la f.c.e.m. du moteur.

**Réponse :** 220 V ; 250 V ; 190 V.

**T.6** Comment varie la fréquence de rotation d'un moteur à excitation série lorsque sa charge diminue ?

**Réponse :** augmente ; diminue ; reste constante.

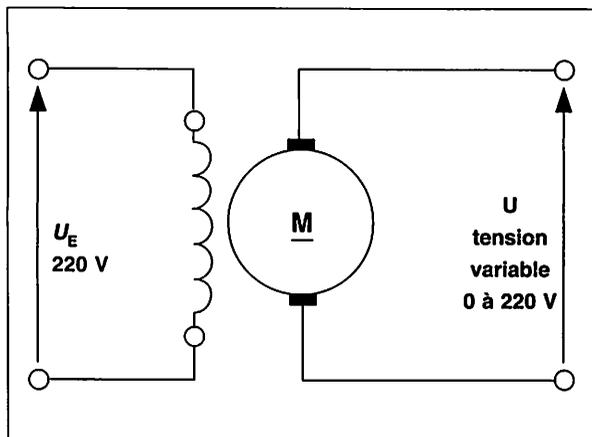
# EXPÉRIMENTATION

## CARACTÉRISTIQUE DE RÉGLAGE D'UN MOTEUR À EXCITATION INDÉPENDANTE

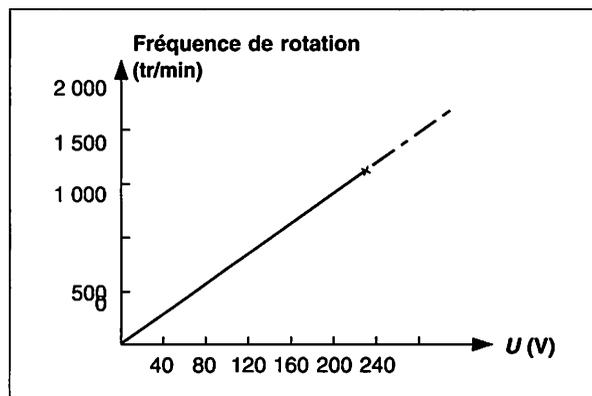
### ■ TRAVAIL À EXÉCUTER

Le moteur fonctionnant à vide, relever les valeurs de la fréquence de rotation  $n$  en fonction de la tension d'induit  $U$ .

### ■ SCHÉMA ET EXEMPLE DE RÉSULTATS



Le moteur a pour caractéristiques nominales :  
 $P_u = 3 \text{ kW}$ ;  $U_n = 220 \text{ V}$ ;  $I_N = 15 \text{ A}$ ;  
 $n = 1\,500 \text{ tr/min}$ .



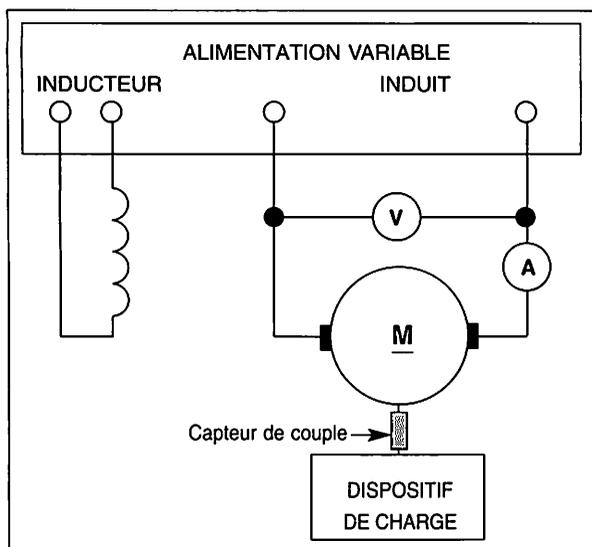
D'après la caractéristique ci-dessus, la fréquence de rotation augmente avec la tension d'induit.

## CARACTÉRISTIQUE DU COUPLE D'UN MOTEUR À EXCITATION INDÉPENDANTE

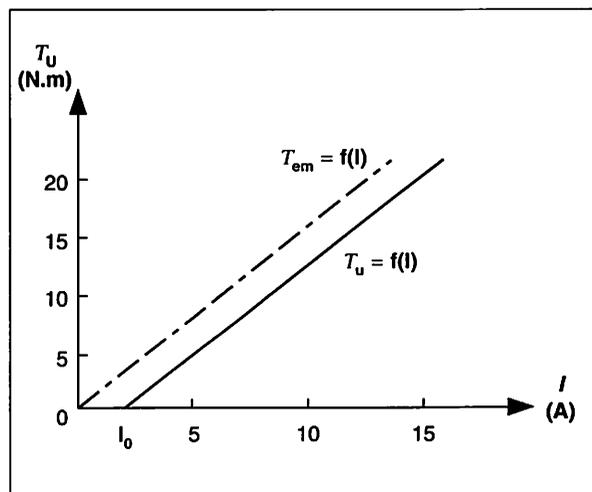
### ■ TRAVAIL À EXÉCUTER

Le moteur fonctionnant en charge, relever les valeurs du couple utile  $T_u$  en fonction du courant  $I$  dans l'induit.

### ■ SCHÉMA ET EXEMPLE DE RÉSULTATS



La mesure du couple s'effectue avec un capteur de couple à jauge de contrainte.



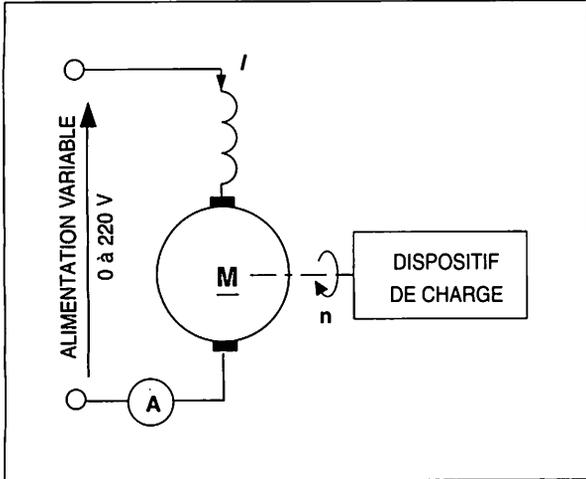
La caractéristique du couple utile est une droite qui passe à proximité de l'origine. Le couple électromagnétique, légèrement supérieur à  $T_u$ , est proportionnel à  $I$ .

# CARACTÉRISTIQUE DE FRÉQUENCE DE ROTATION D'UN MOTEUR À EXCITATION SÉRIE

## ■ TRAVAIL À EXÉCUTER

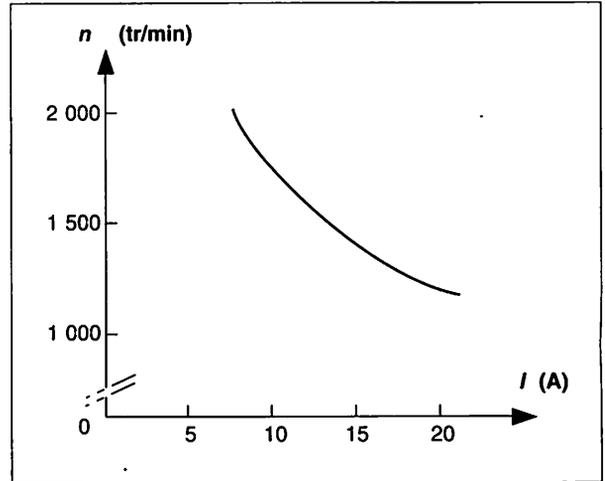
Relever les valeurs de la fréquence de rotation  $n$  en fonction du courant  $I$  consommé par le moteur.

## ■ SCHÉMA DU MONTAGE ET EXEMPLE DE RÉSULTATS



D'après la caractéristique de la figure qui suit, la fréquence de rotation augmente lorsque le courant diminue, c'est-à-dire lorsque la charge diminue.

**Le moteur série s'emballe à vide, il doit toujours être accouplé à une charge.**

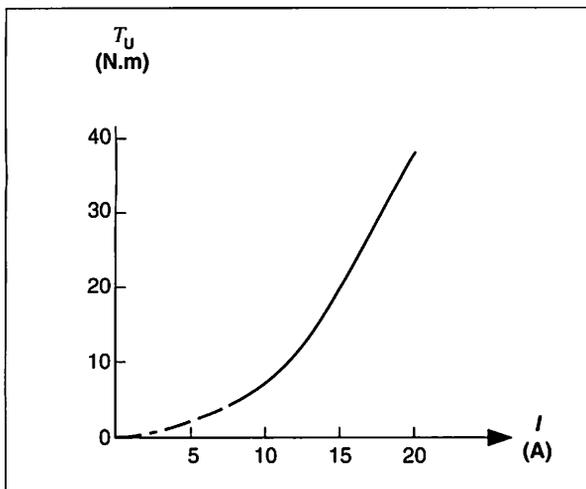


# CARACTÉRISTIQUE DU COUPLE D'UN MOTEUR À EXCITATION SÉRIE

## ■ TRAVAIL À EXÉCUTER

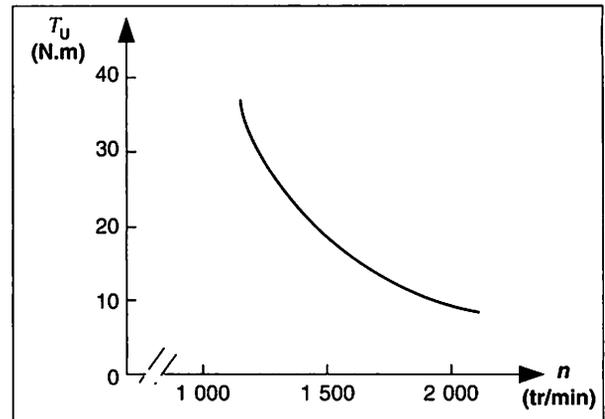
Relever les valeurs du couple utile  $T_u$  en fonction du courant  $I$  consommé par le moteur. En déduire la caractéristique mécanique  $T_u = f(n)$ .

## ■ SCHÉMA DU MONTAGE ET EXEMPLE DE RÉSULTATS



Le montage est identique au précédent. Le couple utile est donné par le capteur à jauge.

La caractéristique du couple est une portion de parabole. Le couple utile varie comme le carré de l'intensité.



La caractéristique mécanique ci-dessus est une portion d'hyperbole.

Le couple utile est inversement proportionnel à la fréquence de rotation.

# APPLICATIONS

## EXERCICES RÉSOLUS

### Énoncé 1

Les caractéristiques d'un moteur à excitation séparée sont les suivantes :

$$U_n = 240 \text{ V}; I_n = 42 \text{ A}; n = 1\,200 \text{ tr/min.}$$

La résistance de l'induit est  $0,5 \Omega$ . Le circuit inducteur absorbe  $250 \text{ W}$  et les pertes constantes s'élèvent à  $600 \text{ W}$ .  
Calculer :

- la f.c.e.m. du moteur,
- la puissance absorbée et la puissance utile,
- le couple utile et le rendement industriel.

#### Méthode :

a. Appliquer la loi d'Ohm pour un récepteur.

b. Utiliser les relations :

$$P_a = UI + ui$$

$$P_u = P_a - \text{pertes.}$$

c. Calculer le couple utile à partir de la puissance utile.

Calculer le rendement en divisant la puissance par la puissance absorbée.

#### Solution proposée :

a. La f.c.e.m. a pour expression :

$$E' = U - rI = 240 - 0,5 \times 42$$

$$\text{Soit : } E' = 219 \text{ V.}$$

b. La puissance absorbée est la somme des puissances dans l'induit et l'inducteur :

$$P_a = 240 \times 42 + 250 \text{ soit } P_a = 10\,330 \text{ W.}$$

La puissance utile est égale à :

$$P_u = P_a - (rI^2 + P_{\text{inducteur}} + P_c).$$

$$P_u = 10\,330 - (0,5 \times 42^2 + 250 + 600) \text{ soit } P_u = 8\,598 \text{ W.}$$

c. Le couple utile est égal à :

$$T = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{P_u}{2\pi(n/60)} = \frac{8\,598}{125,6} \text{ soit } T_u = 68,5 \text{ Nm.}$$

Le rendement industriel est alors :

$$\eta_i = \frac{P_u}{P_a} = \frac{8\,598}{10\,330} \text{ soit } \eta_i = 0,83 \text{ ou } 83 \text{ \%.}$$

#### Remarques :

La f.c.e.m. est toujours inférieure à la tension d'alimentation.

Le produit  $ui$  représente les pertes Joule dans l'inducteur. Lorsque  $n$  est exprimé en tours par minute, la vitesse angulaire est égale :

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60}$$

### Énoncé 2

Un moteur à excitation série fonctionne sous  $220 \text{ V}$ . La résistance d'induit est égale à  $3 \Omega$ , celle de l'inducteur à  $5 \Omega$ .

a. Le moteur consomme  $2 \text{ A}$  pour une fréquence de rotation de  $3\,000 \text{ tr/min}$ . Calculer sa f.c.e.m. et sa puissance électromagnétique.

b. Le même moteur consomme  $5 \text{ A}$  avec une charge différente.

Calculer sa f.c.e.m., sa fréquence de rotation et sa puissance électromagnétique.

#### Méthode :

a. Appliquer la loi d'Ohm pour un récepteur.

b. Écrire la proportionnalité entre f.c.e.m., fréquence de rotation et courant  $I$ .

#### Solution proposée :

a. La f.c.e.m. est égale à :

$$E'_1 = U - (R + r)I \text{ soit } E'_1 = 204 \text{ V.}$$

La puissance électromagnétique est égale à :

$$P_{em} = E'_1 I = 204 \times 2 \text{ soit } P_{em} = 408 \text{ W.}$$

b. La nouvelle f.c.e.m. est égale à :

$$E'_2 = U - (R + r)I \text{ soit } E'_2 = 180 \text{ V.}$$

$$\frac{E'_1}{n_1 I_1} = \frac{E'_2}{n_2 I_2} \text{ d'où } n_2 = \frac{E'_2 n_1 I_1}{E'_1 I_2}$$

$$\text{soit } n_2 = 1\,058 \text{ tr/min.}$$

La nouvelle puissance électromagnétique est :

$$P_{em} = E'_2 I = 180 \times 5 \text{ soit } P_{em} = 900 \text{ W.}$$

#### Remarques :

La f.c.e.m. varie avec la fréquence de rotation.

La fréquence de rotation diminue lorsque la charge augmente.

## EXERCICES À RÉSOUDRE

**E. 1** L'induit d'un moteur bipolaire alimenté sous 220 V consomme un courant de 8 A.

Il est formé de 1 000 conducteurs actifs et sa résistance est de  $1,5 \Omega$ .

Le moteur tourne à 1 500 tr/min.

Calculer :

- a. la f.c.e.m. du moteur,
- b. le flux dans l'entrefer.

**E. 2** La force contre-électromotrice d'un moteur à excitation séparée est de 210 V à 1 500 tr/min.

Calculer sa valeur pour une fréquence de rotation de 1 200 tr/min, le flux étant maintenu constant.

**E. 3** La résistance de l'induit d'un moteur à excitation séparée est de  $0,8 \Omega$ .

En fonctionnement nominal, ce moteur consomme 12 A sous 220 V.

Calculer la résistance du rhéostat de démarrage à placer en série avec l'induit pour limiter le courant de démarrage à 1,5 fois l'intensité nominale.

**E. 4** L'induit d'un moteur à excitation séparée, consomme 5 A sous 240 V pour une fréquence de rotation de 1 200 tr/min. Sa résistance est de  $2 \Omega$

Calculer :

- a. la f.c.e.m. du moteur,
- b. la puissance électromagnétique,
- c. le couple électromagnétique.

**E. 5** Un moteur à excitation en dérivation consomme 8 A sous 240 V.

La résistance de l'induit est de  $2 \Omega$ , celle de l'inducteur,  $200 \Omega$ .

Il fournit une puissance utile de 1 350 W.

Calculer :

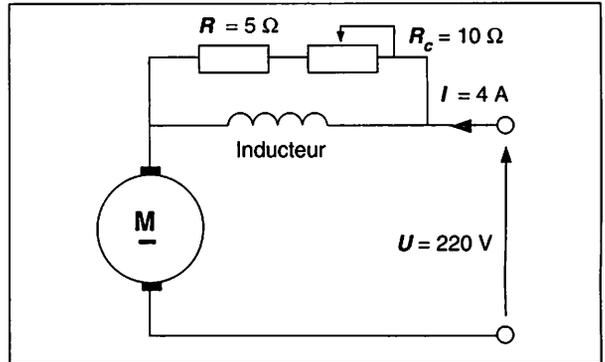
- a. les courants dans l'inducteur et dans l'induit,
- b. les pertes Joule induit et inducteur,
- c. la f.c.e.m. et la puissance électromagnétique,
- d. les rendements industriel et électromagnétique et les pertes constantes.

**E. 6** Un moteur série en charge nominale consomme 10 A pour une fréquence de rotation de 1 500 tr/min, sa f.c.e.m. est de 190 V.

Sous charge réduite, il consomme 5 A, sa f.c.e.m. est alors de 205 V.

Calculer sa nouvelle fréquence de rotation.

**E. 7** Pour régler, dans une application spécifique, le courant d'excitation d'un moteur série, une résistance de  $5 \Omega$  et un rhéostat de  $10 \Omega$  sont placés en parallèle sur l'inducteur (voir figure ci-après).



La résistance de l'inducteur est de  $3 \Omega$  et le courant consommé par le moteur est constant et égal à 4 A.

Calculer les limites de la variation possible du courant dans l'inducteur.

**E. 8** Les caractéristiques d'un moteur à excitation série sont les suivantes :

$U_n = 220 \text{ V}$  ;  $I_n = 8 \text{ A}$  ;  $n = 1 500 \text{ tr/min}$  ;  $P_u = 1,5 \text{ kW}$

Calculer :

- a. le rendement industriel,
- b. le couple utile.

**E. 9** Un moteur à excitation dérivation alimenté sous 240 V absorbe à pleine charge un courant total de 90 A. La puissance nécessaire à son excitation est égale à 5 % de la puissance absorbée. La résistance de l'induit est de  $0,25 \Omega$ . Calculer :

- a. l'intensité des courants induit et inducteur,
- b. la force contre électromotrice,
- c. la puissance électromagnétique,
- d. le rendement électrique du moteur.

**E. 10** La plaque signalétique d'un moteur à excitation séparée porte les indications suivantes :

$U = 240 \text{ V}$  ;  $I = 35 \text{ A}$  ;  $P = 7 \text{ kW}$  ;  $n = 800 \text{ tr/min}$ .

Calculer :

- a. le rendement industriel du moteur sachant que les pertes Joule inducteur s'élèvent à 150 W,
- b. les pertes Joule induit et les pertes constantes sachant que l'induit a une résistance de  $0,5 \Omega$ ,
- c. les couples électromagnétique et industriel.

**E. 11** Un moteur dérivation est alimenté sous 200 V, les résistances de l'induit et de l'inducteur sont respectivement égales à  $0,5 \Omega$  et  $125 \Omega$ , les pertes constantes s'élèvent à 425 W. Calculer, lorsque ce moteur absorbe 45 A et tourne à une fréquence de 1 400 tr/min :

- a. les courants induit et inducteur,
- b. la puissance utile et la puissance absorbée,
- c. le couple électromagnétique et le couple utile.

**E. 12** Les résistances induit et inducteur d'un moteur à excitation série sont respectivement égales à  $0,6 \Omega$  et  $0,25 \Omega$ . On considère les pertes constantes négligeables par rapport à la puissance utile. Un essai à excitation séparée a permis de relever la caractéristique à vide  $E = f(i)$ , les résultats figurent sur le tableau ci-dessous.

$i$ (A)	5	10	15
$E$ (V)	120	190	210

$n = 1\,350$  tr/min.  
(fréquence de rotation nominale).

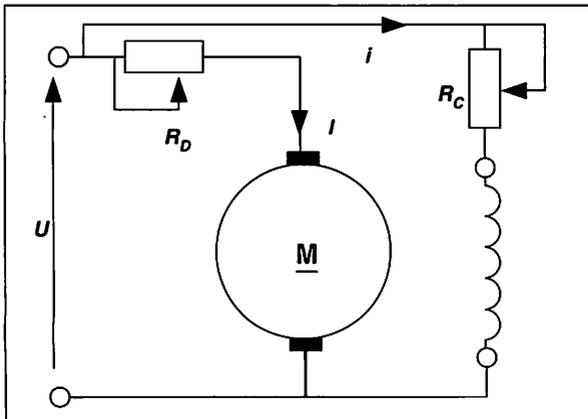
- le moteur absorbant son courant nominal de 15 A, déterminer la tension nominale d'alimentation,
- le moteur étant alimenté sous sa tension nominale il absorbe maintenant 12 A, calculer sa fréquence de rotation.

**E. 13** Un moteur à excitation dérivation présente les caractéristiques suivantes :  
 $U = 220$  V ;  $n = 1\,500$  tr/min.  
 Induit :  $I = 6$  A ;  $r = 2,5 \Omega$ .  
 Inducteur :  $i = 0,5$  A ;  $R = 400 \Omega$ .

Le courant au démarrage est limité par le rhéostat  $R_D$  et le courant d'excitation est réglé par le rhéostat de champ  $R_C$  (voir fig. ci-après).

Calculer :

- la résistance du rhéostat de démarrage pour que le courant dans l'induit n'exécède pas le double de sa valeur nominale.
- la résistance du rhéostat de champ permettant de faire varier le courant d'excitation de 80 % à 100 % de sa valeur nominale.



**E. 14** Le démarreur d'une voiture automobile est un moteur série absorbant un courant de 200 A sous 10,2 V.

Sa fréquence de rotation est de 1 000 tr/min et la puissance utile fournie est de 1 kW.

Les pertes constantes s'élèvent à 50 W.

Calculer :

- la puissance absorbée par le moteur et son rendement,
- le couple utile,
- la puissance perdue par effet Joule,
- la résistance totale de l'induit et de l'inducteur,
- la force contre électromotrice du moteur.

**E. 15** La plaque signalétique d'un moteur à excitation indépendante comporte les indications suivantes :

$U = 230$  V ;  $I = 27$  A ;  $P = 5$  kw.

- Les pertes Joule dans le circuit inducteur sont de 150 W. Calculer le rendement industriel du moteur.
- La résistance de l'induit est  $r = 0,4 \Omega$ . Déterminer les pertes Joule dans l'induit. En déduire les autres pertes.

**E. 16** Un moteur à excitation dérivation est alimenté par une tension de 220 V.

Le courant total consommé est de 27,2 A.

La résistance de l'induit est de  $0,5 \Omega$  ; celle de l'inducteur de  $100 \Omega$ .

Calculer :

- les courants dans l'induit et l'inducteur,
- la force contre électromotrice,
- la puissance électromagnétique.

**E. 17** Un moteur universel, analogue à un moteur série en courant continu, est alimenté lors d'un essai sous une tension continue de 80 V.

Il absorbe une intensité de 0,75 A. Sachant que sa fréquence de rotation est de 3 000 tr/min et que la résistance totale (induit + inducteur) est de  $36 \Omega$ .

Calculer :

- la puissance absorbée,
- les pertes par effet Joule,
- la puissance utile en négligeant les autres pertes,
- le moment du couple utile.

## 13

## Principe et organisation

## ÉLECTROTECHNIQUE

## 1 Champ magnétique tournant

Un aimant en U, en rotation autour de son axe de symétrie entraîne une aiguille aimantée (fig. 13.01).

Il produit un champ magnétique tournant. La fréquence de rotation de l'aiguille aimantée est la même que celle de l'aimant.

La rotation de l'aiguille est synchronisée avec celle du champ tournant.

**Un champ magnétique tournant est représenté par un vecteur  $\vec{B}$  tournant autour de son origine.**

Un champ magnétique tournant peut aussi être obtenu en alimentant, par un système triphasé de tensions, trois bobines disposées géométriquement à  $120^\circ$  l'une de l'autre (fig. 13.02).

La fréquence de rotation du champ magnétique est alors égale à la fréquence du courant alternatif d'alimentation des bobines.

Pour inverser le sens de rotation du champ magnétique, il suffit de permuter deux phases d'alimentation des bobines.

Plus généralement, en réalisant des enroulements alimentés en triphasé de fréquence  $f$  et présentant un nombre  $p$  de paires de pôles par phase, la fréquence de rotation du champ magnétique est donnée par la relation :

$$n_s = \frac{f}{p} \quad n_s \text{ en tours par seconde,} \\ f \text{ en hertz.}$$

**La fréquence de rotation du champ magnétique est aussi appelée fréquence de synchronisme.**

## Remarque :

Le fonctionnement des machines tournantes à courant alternatif à l'exception du moteur universel est fondé sur le principe des champs magnétiques tournants.

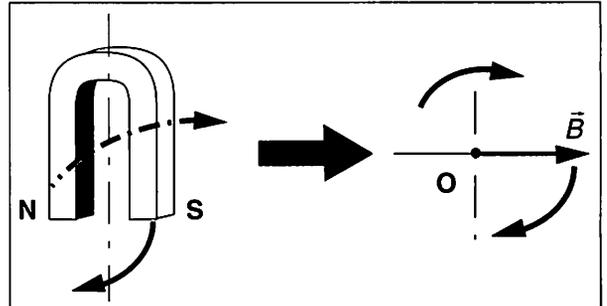


Fig. 13.01 : Champ tournant bipolaire.

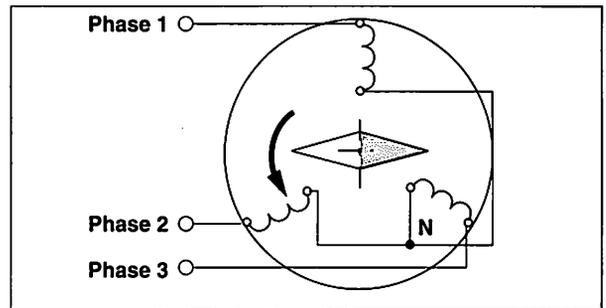
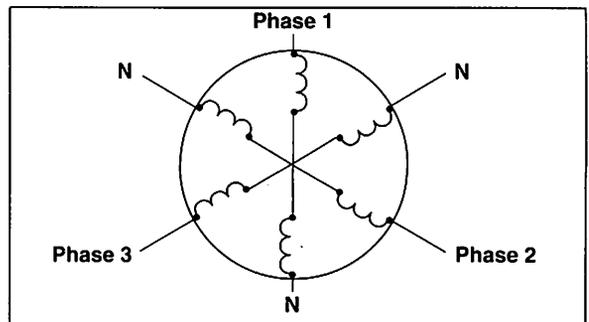


Fig. 13.02 : Champ tournant triphasé.

## Exemple :



L'enroulement de la figure ci-dessus comporte 2 paires de pôles par phase.

La fréquence de rotation du champ est :

$$n_s = \frac{f}{p} = \frac{50}{2} \quad \text{soit} \quad n = 25 \text{ tr/s} = 1\,500 \text{ tr/min.}$$

## 2 Machines synchrones

L'aiguille aimantée de la figure 13.03 est entraînée par le champ tournant créé par les trois bobines alimentées en triphasé. Sa fréquence de rotation est égale à celle du champ tournant.

Sur ce principe est basé le **moteur synchrone**. Son rotor, constitué par un aimant ou un électroaimant, tourne à la **fréquence de synchronisme** du champ magnétique tournant créé par le stator.

**Tout aimant ou électro-aimant lancé à une fréquence de rotation voisine de celle du champ tournant voit son mouvement de rotation entretenu à la même vitesse que celle du champ.**

L'aimant permanent de la figure 13.04 tourne devant trois bobines disposées à  $120^\circ$  l'une de l'autre.

Aux bornes de chaque bobine apparaît une f.e.m. alternative de fréquence égale à la fréquence de rotation de l'aimant.

Les trois f.e.m. ainsi produites, déphasées chacune de  $120^\circ$  par rapport à la suivante, forment ainsi un système de tensions triphasées.

Sur ce principe est basé l'**alternateur triphasé** ou génératrice synchrone.

**Lorsqu'un aimant ou électroaimant est entraîné dans un ensemble constitué de  $q$  bobines, celles-ci sont le siège d'une tension alternative sinusoïdale polyphasée de fréquence égale à celle de la rotation de l'aimant.**  
Si  $q = 1$ , la tension est monophasée. Si  $q = 3$ , la tension est triphasée.

## 3 Machines asynchrones

Un disque de cuivre (fig. 13.05) est placé au centre d'un système de trois bobines alimentées en triphasé. Sous l'action du champ tournant, le disque tourne à une fréquence légèrement inférieure à la fréquence du champ tournant.

Sa rotation n'est pas synchrone avec celle du champ. Sur ce principe est basé le **moteur asynchrone**.

Son rotor, constitué de conducteurs en court-circuit, tourne à une fréquence inférieure à la fréquence de synchronisme.

**Tout conducteur mobile, placé dans un champ tournant, tend à entrer en rotation à une fréquence de rotation proche, mais inférieure, à celle du champ.**

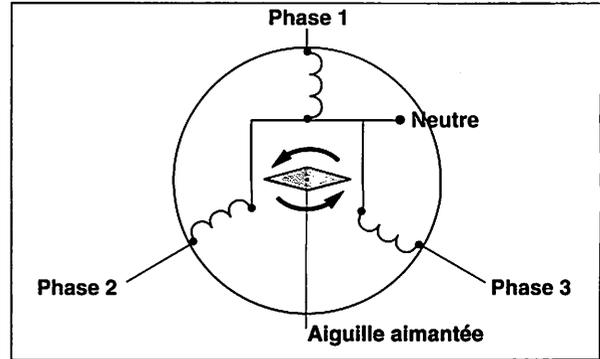


Fig. 13.03 : Principe du moteur synchrone.

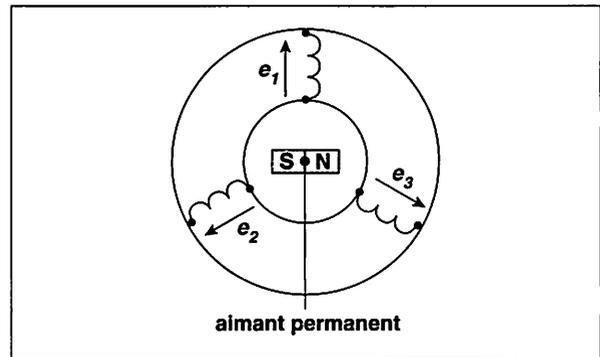


Fig. 13.04 : Principe de la génératrice synchrone.

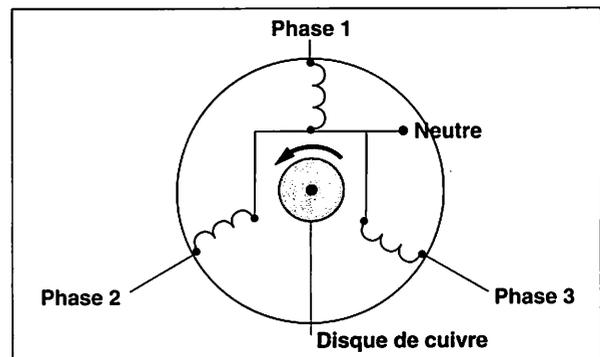


Fig. 13.05 : Principe du moteur asynchrone.

# 14 Moteur asynchrone triphasé

## ÉLECTROTECHNIQUE

### 1 Organisation générale

#### ■ STATOR

**Le stator est l'inducteur du moteur asynchrone.**

Le stator est la **partie fixe** du moteur dans laquelle se trouvent les enroulements générateurs du champ tournant.

Sur le plan électrique, le stator contient autant d'enroulements que de phases d'alimentation soit trois pour le moteur triphasé.

Ces enroulements réalisent une ou plusieurs **paires de pôles**. Ils peuvent être couplés, soit en étoile, soit en triangle (fig. 14.01).

Sur le plan magnétique, le stator est constitué par un empilage de tôles d'acier doux au silicium formant une couronne. Cette couronne présente des encoches où sont placés les conducteurs des enroulements.

#### ■ ROTOR

**Le rotor est l'induit du moteur asynchrone.**

Le rotor, mobile et soumis aux effets du champ tournant est constitué :

– pour le **moteur à rotor en court-circuit** ou à **cage d'écureuil** (fig. 14.02), d'un enroulement fermé sur lui même,

– pour le **moteur à rotor bobiné**, de trois enroulements couplés en étoile et pouvant être mis en court-circuit par l'intermédiaire de bagues, de balais et d'un dispositif extérieur de mise en court-circuit.

Les enroulements du rotor sont le siège de courants induits par la rotation du champ statorique.

Ils comportent autant de paires de pôles que le stator.

### 2 Principe de fonctionnement

Dès la mise sous tension, un **champ tournant** prend naissance dans les enroulements statoriques.

Ce champ induit des courants dans les enroulements en court-circuit du rotor.

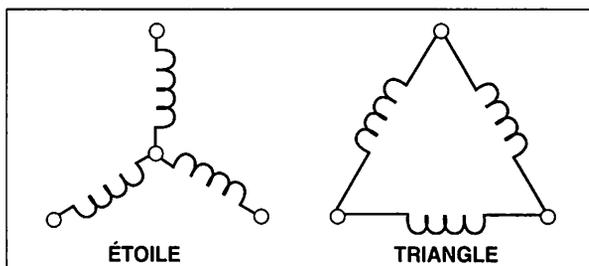


Fig. 14.01 : Couplages du moteur asynchrone triphasé.

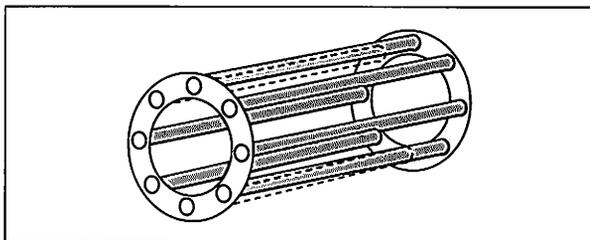


Fig. 14.02 : Rotor en cage d'écureuil.

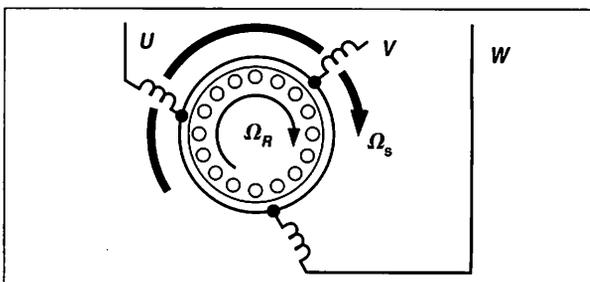


Fig. 14.03 : Champ tournant et fréquence de rotation rotorique.

Les conducteurs du rotor sont alors soumis à la **force électromagnétique de Laplace** (cf. chapitre 10).

L'ensemble de ces forces crée un couple moteur qui entraîne le rotor en rotation (fig. 14.03).

La fréquence de rotation du rotor est inférieure à celle du champ tournant car si les deux fréquences étaient égales, il n'y aurait plus création de courants induits et donc, plus de couple moteur.

### 3 Fréquence de rotation

#### ■ FRÉQUENCE DE SYNCHRONISME

La fréquence de synchronisme est la fréquence de rotation du champ tournant.

Elle est fonction de la fréquence  $f$  du réseau d'alimentation et du nombre de paires de pôles par phase  $p$  des enroulements statoriques :

$$n_s = \frac{f}{p}$$

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

À la fréquence de synchronisme,  $n_s$ , correspond la vitesse angulaire de synchronisme,  $\Omega_s$  :

$$\Omega_s = 2\pi n_s$$

$\Omega_s$  en radians par seconde,  
 $n_s$  en tours par seconde.

À la fréquence industrielle de 50 Hz, la fréquence de synchronisme est au plus égale à 3 000 tr/min.

#### ■ FRÉQUENCE DE ROTATION-GLISSEMENT

La fréquence de rotation,  $n$ , du rotor est inférieure à la fréquence de synchronisme. Le rapport de l'écart de fréquence de rotation à la fréquence de synchronisme est appelé glissement,  $g$  :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{N_s - N}{N_s}$$

$n$  fréquence de rotation en tours par seconde,  
 $N$  fréquence de rotation en tours par minute.

Le glissement s'exprime en pourcentage. **En fonctionnement normal, le glissement d'un moteur asynchrone triphasé est de l'ordre de 2 à 6 %.**

La fréquence de rotation peut aussi s'exprimer en fonction du glissement.

$$n = n_s (1 - g) \quad \text{ou} \quad \Omega = \Omega_s (1 - g)$$

#### ■ INVERSION DU SENS DE ROTATION

Pour inverser le sens de rotation du moteur, il suffit d'inverser celui du champ tournant. Pour cela, il faut intervertir l'alimentation de deux des trois phases (fig. 14.04).

#### Exemples :

- pour  $p = 1$

$$n_s = \frac{50}{1} = 50 \text{ tr/s} = 3\,000 \text{ tr/min}$$

$$\Omega_s = 100 \pi \approx 314 \text{ rad/s}$$

- pour  $p = 2$

$$n_s = \frac{50}{2} = 25 \text{ tr/s} = 1\,500 \text{ tr/min}$$

$$\Omega_s = 50 \pi \approx 157 \text{ rad/s}$$

- pour  $p = 3$

$$n_s = \frac{50}{3} = 16,6 \text{ tr/s} = 1\,000 \text{ tr/min}$$

$$\Omega_s = \frac{100 \pi}{3} \approx 104,7 \text{ rad/s.}$$

#### Remarque :

Un moteur est :

- bipolaire avec une paire de pôles,
- tétrapolaire avec deux paires de pôles,
- hexapolaire avec trois paires de pôles.

#### Exemple :

Un moteur asynchrone tétrapolaire tourne, en charge, à 1 435 tr/min.

Sa fréquence de synchronisme est :

$$n_s = \frac{50}{2} = 25 \text{ tr/s} = 1\,500 \text{ tr/min.}$$

Le glissement en charge est égal à :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{1\,500 - 1\,435}{1\,500}$$

soit :  $g = 4,3 \%$ .

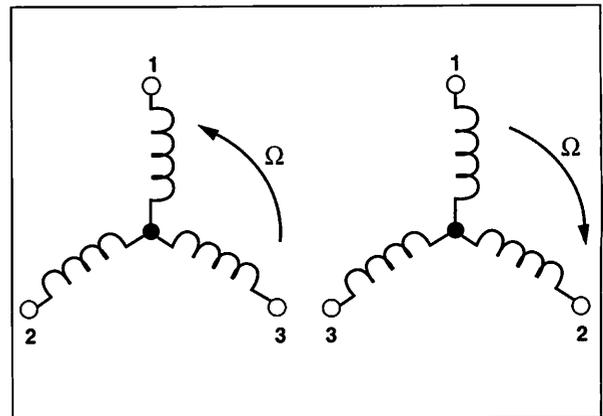


Fig. 14.04 : Inversion du sens de rotation.

## 4 Fonctionnement en charge

Le fonctionnement en charge concerne l'ensemble « **moteur-charge entraînée** » (fig. 14.05). Outre les caractéristiques du réseau d'alimentation, les paramètres à considérer prioritairement sont :

- **du point de vue exploitation :**
  - la fréquence de rotation et le glissement,
  - le couple utile,
- **du point de vue économique :**
  - l'intensité absorbée,
  - la puissance utile,
  - le facteur de puissance,
- **du point de vue global :**
  - le rendement.

### ■ COUPLAGE AU RÉSEAU

Sur la plaque signalétique du moteur sont indiquées deux tensions, la plus faible correspond à la tension nominale de chaque enroulement.

Le couplage des enroulements statoriques doit se faire en fonction des caractéristiques du moteur et du réseau.

Un moteur asynchrone peut être couplé :

- **en triangle** si ses enroulements peuvent supporter la tension composée du réseau,
- **en étoile** si ses enroulements ne supportent que la tension simple du réseau.

Le branchement des enroulements correspondant au couplage retenu s'effectue au niveau de la plaque à bornes à l'aide de barrettes (fig. 14.06).

#### Exemples :

Un moteur comporte sur sa plaque signalétique : 230 V / 400 V. Alimenté par le réseau 230 V/400 V il ne peut être couplé qu'en étoile.

Un moteur 400 V/690 V alimenté par le même réseau doit, pour un fonctionnement normal, être couplé en triangle.

### ■ FRÉQUENCE DE ROTATION ET GLISSEMENT

La fréquence de rotation varie légèrement en fonction de la charge. Proche de la fréquence de synchronisme à vide, elle diminue au fur et à mesure que croît la charge.

Le glissement dépend donc lui aussi de la charge.

Très faible à vide, il augmente avec elle.

En fonctionnement nominal, le glissement ne dépasse pas quelques « pour cent ».

La figure 14.07 représente la caractéristique de glissement  $g = f(P_u)$ .

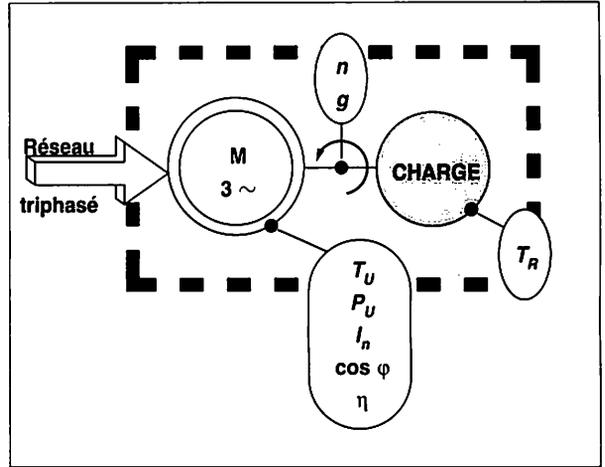


Fig. 14.05 : Ensemble moteur-charge et paramètres associés.

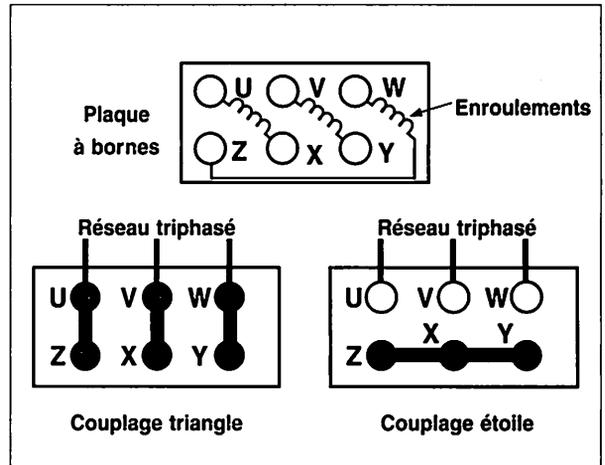


Fig. 14.06 : Couplages du moteur asynchrone.

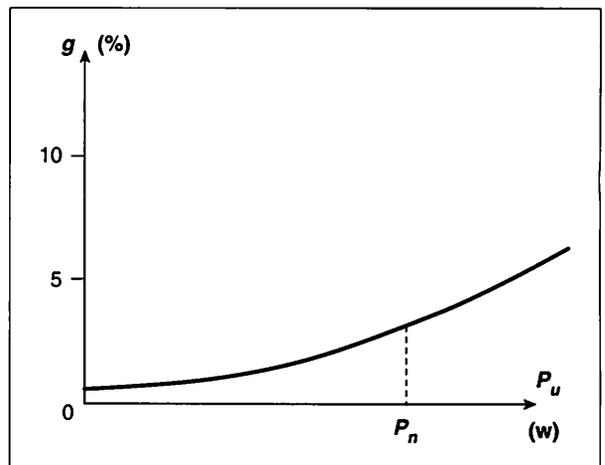


Fig. 14.07 : Courbe  $g = f(P_u)$ .

## ■ FACTEUR DE PUISSANCE ET RENDEMENT

De faible valeur à vide, le facteur de puissance s'améliore notablement lorsque la charge augmente. Le rendement atteint son maximum pour la charge nominale (fig. 14.08).

Le moteur asynchrone est utilisé de façon optimale lorsqu'il travaille à proximité de sa charge nominale.

## 5 Bilan énergétique

### ■ PUISSANCE TRANSMISE AU ROTOR

La puissance transmise au rotor,  $P_{tr}$  est égale à la puissance absorbée diminuée des pertes dans le stator.

$$P_a = UI\sqrt{3} \cos \varphi$$

$$P_{tr} = P_a - \text{pertes statoriques}$$

À cette puissance correspond le couple du rotor :

$$T_{tr} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s} \quad \Omega_s \text{ vitesse de synchronisme.}$$

Les pertes statoriques sont d'origine magnétique (pertes fer  $p_{FS}$ ) et d'origine électrique (pertes Joule  $p_{JS}$ ).

$$p_{JS} = \frac{3}{2} RI^2 \quad R \text{ résistance mesurée entre deux bornes de phases du stator.}$$

### ■ PUISSANCE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

La puissance électromagnétique  $P_{em}$  prend en compte les pertes dans le rotor essentiellement dues à l'effet Joule,  $p_{JR}$ .

$$P_{em} = P_{tr} - p_{JR}$$

À cette puissance correspond le couple électromagnétique,  $T_{em}$  :

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} \quad \Omega \text{ vitesse réelle.}$$

En écrivant l'égalité des couples du rotor et électromagnétique, on obtient :

$$\frac{P_{tr}}{\Omega_s} = \frac{P_{em}}{\Omega} \quad \text{d'où} \quad \frac{P_{em}}{P_{tr}} = \frac{\Omega}{\Omega_s} = 1 - g.$$

#### Exemple :

Un moteur asynchrone triphasé fournit une puissance utile de 1 500 W. Il absorbe 1 800 W sur le réseau 230 V/400 V avec une intensité en ligne de 3,2 A. Son rendement est égal à :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{1500}{1800} \quad \text{soit} \quad \eta = 83 \%$$

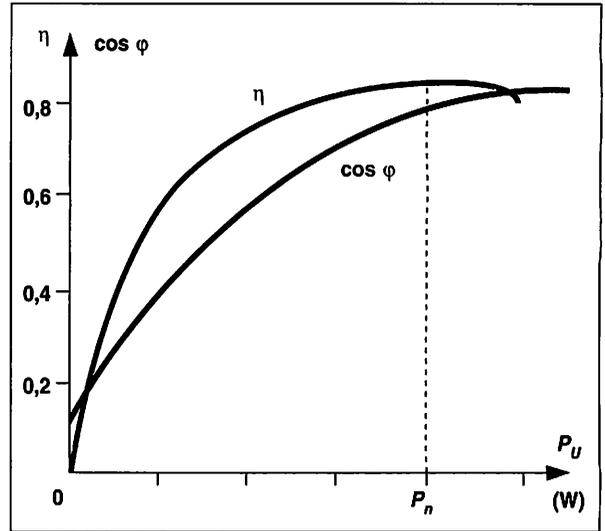


Fig. 14.08 : Courbes  $\cos \varphi = f(P_u)$  et  $\eta = f(P_u)$ .

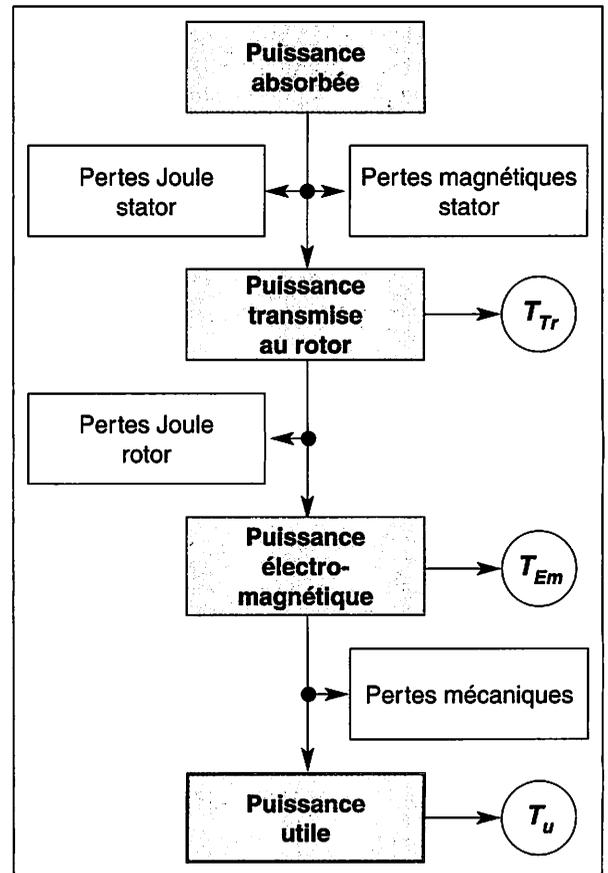


Fig. 14.09 : Bilan énergétique du moteur asynchrone.

Son facteur de puissance se calcule par la relation :

$$\cos \varphi = \frac{P_a}{UI\sqrt{3}} \quad \text{soit} \quad \cos \varphi = 0,81.$$

Le rapport de la puissance électromagnétique à la puissance transmise au rotor est appelé rendement du rotor.

$$\eta_R = \frac{P_{em}}{P_{tr}} = 1 - g.$$

Le rendement du moteur asynchrone dépend essentiellement de son glissement. Le glissement doit être faible pour que le rendement soit acceptable.

## ■ PUISSANCE UTILE

La puissance utile est égale à la puissance électromagnétique diminuée des pertes mécaniques.

$$P_u = P_{em} - \text{pertes mécaniques}$$

À cette puissance correspond le couple utile,  $T_u$  :

$$T_u = \frac{P_u}{\Omega}$$

Le rendement du moteur est le rapport de la puissance utile à la puissance absorbée.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

## 6 Fonctionnement au démarrage

### ■ SURINTENSITÉ AU DÉMARRAGE

Au démarrage du moteur se produit une pointe de courant, ou intensité de décollage, pouvant atteindre cinq à six fois l'intensité nominale du moteur.

En effet, de par sa construction le rotor du moteur, fermé sur lui-même, est en court-circuit. Le moteur à l'arrêt est alors comparable à un transformateur dont le secondaire serait mis en court-circuit. Il en résulte, dès la mise sous tension, un fort appel de courant au primaire, c'est-à-dire au stator.

Au fur et à mesure de l'accroissement de la fréquence de rotation, le courant diminue et se stabilise à sa valeur nominale (fig. 14.10).

La surintensité de démarrage a des effets néfastes :

- sur le moteur lui-même (échauffement, contraintes mécaniques),
- sur le réseau d'alimentation (baisse de tension).

Le démarrage direct, sous tension nominale, ne peut être utilisé que pour des moteurs de faible puissance.

### Exemple :

La plaque signalétique d'un moteur asynchrone porte les indications suivantes :

$$U = 400 \text{ V} ; I = 30 \text{ A} ; \\ \cos \varphi = 0,85 ; N = 720 \text{ tr/min} ; \\ P_u = 15 \text{ kW}.$$

La puissance nominale absorbée est :

$$P_a = UI\sqrt{3} \cos \varphi \text{ soit } P_a = 17,7 \text{ kW}.$$

Le rendement est égal à :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \text{ soit } \eta \approx 85 \text{ \%}.$$

Le glissement pour une fréquence de synchronisme de 750 tr/min est égal à :

$$g = \frac{N_s - N}{N} \text{ soit } g = 4 \text{ \%}.$$

Le rendement du rotor est alors :

$$\eta_R = 1 - g = 1 - 0,04 = 0,96.$$

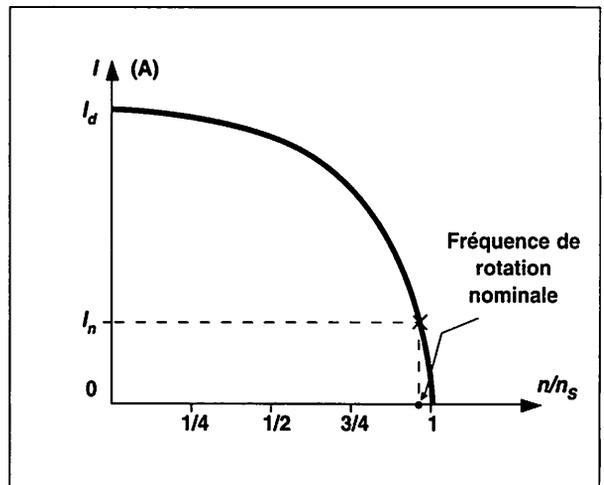


Fig. 14.10 : Courbe  $I = f(n)$ .

## ■ PROCÉDÉS DE DÉMARRAGE

La réduction de l'intensité de démarrage des moteurs à cage s'obtient par la diminution de la tension d'alimentation du stator.

La tension d'alimentation du stator peut être réduite par :

- un **autotransformateur**,
- l'insertion de **résistances en série** avec les enroulements du stator,
- un **démarrateur électronique**,
- un **démarrage à couplage étoile-triangle**.

Le démarrage étoile-triangle utilise les deux tensions, simple et composée, disponibles sur le réseau de distributeur triphasé.

Dans un premier temps, la tension appliquée à chaque enroulement du moteur est la tension simple. Pour cela, le stator est couplé **en étoile**.

À l'issue de ce premier temps, au couplage étoile est substitué le **couplage triangle** dans lequel la tension composée du réseau est appliquée à chaque enroulement (fig. 14.11).

Par ce procédé, la surintensité au démarrage est réduite au tiers de la surintensité produite par un démarrage direct (fig. 14.12).

### Remarque

Le démarrage étoile-triangle n'est possible que si les enroulements du moteur peuvent supporter, en couplage triangle, la tension composée du réseau.

Ainsi un moteur utilisé sur le réseau 230 V/400 V doit comporter sur sa plaque signalétique les tensions 400 V/690 V.

La réduction de l'intensité de démarrage d'un moteur à rotor bobiné s'obtient par augmentation de la résistance rotorique.

L'augmentation de la résistance du rotor s'obtient en insérant des résistances extérieures en série avec chaque enroulement du rotor.

Ces résistances rotoriques sont ensuite éliminées progressivement par des contacteurs tripolaires temporisés qui se ferment au fur et à mesure que la fréquence de rotation augmente.

La figure 14.13 représente le schéma et l'intensité consommée pour un démarrage rotorique à trois temps.

Dans le premier temps, les résistances  $R_1$  et  $R_2$  sont en série avec le rotor. Le moteur démarre.

Deuxième temps, à partir d'une certaine fréquence de rotation, le contacteur  $K_1$  se ferme éliminant les résistances  $R_1$ .

Troisième temps, le contacteur  $K_2$  se ferme éliminant les résistances  $R_2$ . Le moteur fonctionne alors normalement.

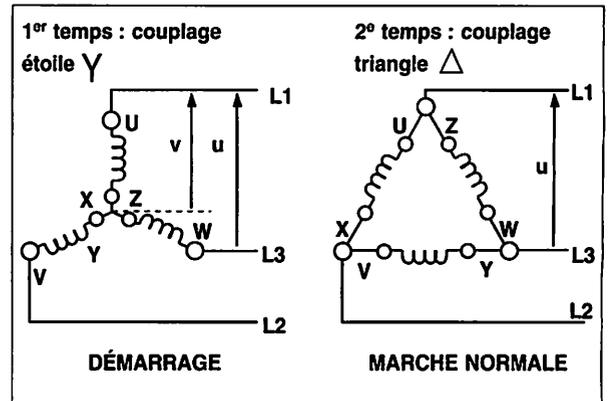


Fig. 14.11 : Couplage étoile-triangle (Y-D).

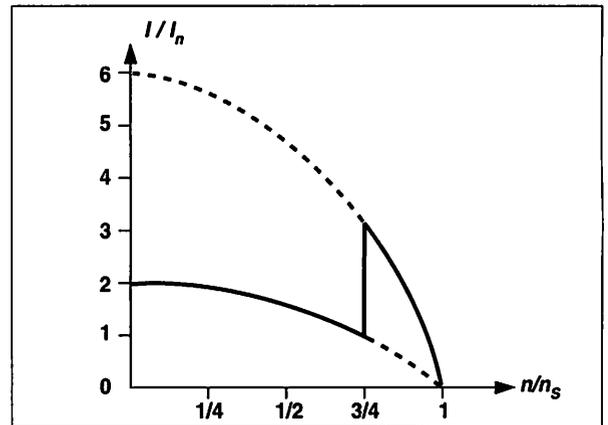


Fig. 14.12 : Courbe  $I = f(n)$  en démarrage étoile-triangle.

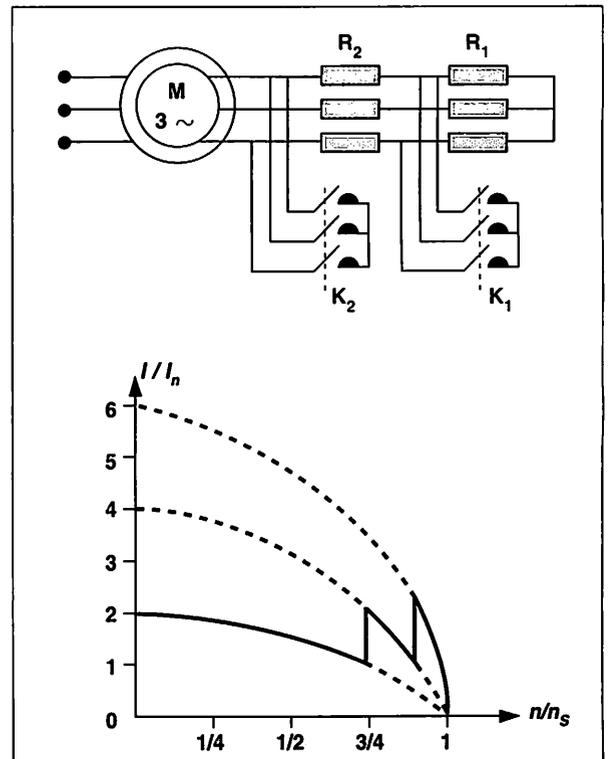


Fig. 14.13 : Démarrage rotorique en trois temps.

## 7 Couple de démarrage

Un moteur ne peut démarrer que si son couple de démarrage est supérieur au couple résistant de la machine entraînée.

La figure 14.14 représente les variations du couple d'un moteur à cage en fonction de la fréquence de rotation. Le couple de décollage pour  $n = 0$  n'est que 1,25 fois plus grand que le couple nominal  $T_n$ . Il est nettement plus faible que ce qu'aurait pu le faire supposer le rapport des intensités.

En démarrage étoile-triangle, le couple de décollage est réduit d'un facteur 3 par rapport au couple de décollage en démarrage direct (fig. 14.14).

Ce type de démarrage est utilisé lorsque la machine entraînée exerce un couple relativement petit à faible vitesse.

### POINT DE FONCTIONNEMENT

La phase de démarrage se termine lorsque le couple moteur est égal au couple résistant de la machine entraînée. Le moteur est alors en marche de régime.

Dans la représentation de la figure 14.15, le couple résistant,  $T_R$ , de la machine entraînée est proportionnel au carré de la fréquence de rotation. Sa caractéristique est un arc de parabole.

Le moteur peut démarrer puisque pour  $n = 0$ ,  $T > T_R$ . La fréquence de rotation du moteur va augmenter jusqu'à ce que les deux couples soient égaux.

Le point d'intersection des deux caractéristiques de couple est appelé **point de fonctionnement** de l'ensemble moteur-machine entraînée.

Sur la courbe fig. 14.15, le point de fonctionnement est stable car, si la fréquence de rotation du moteur augmente, le couple résistant augmente aussi et tend à ralentir le moteur.

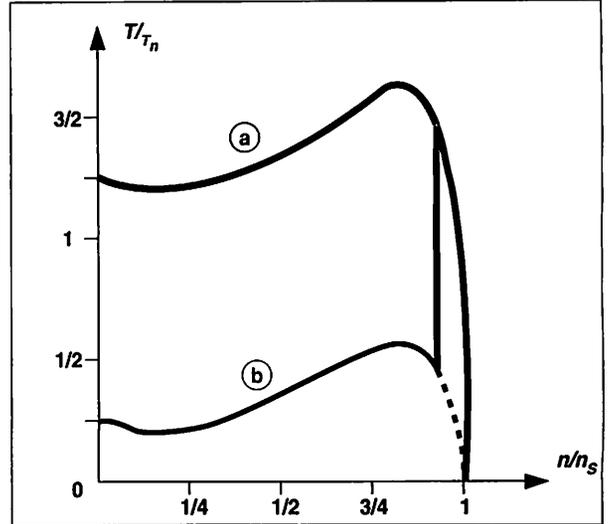


Fig. 14.14 : Courbes comparées du couple en démarrage direct (a) et en démarrage étoile-triangle (b).

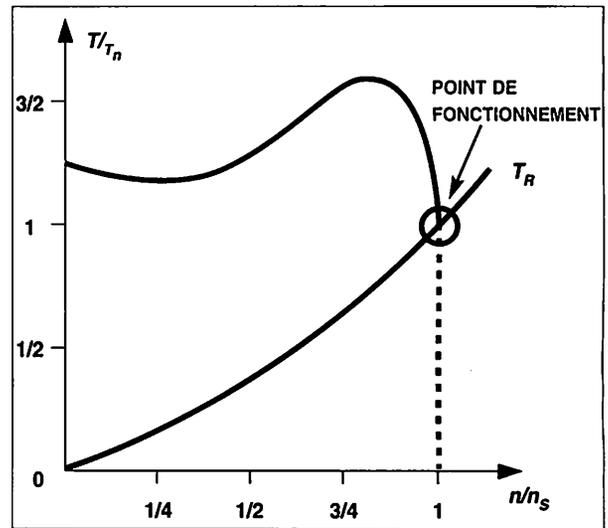


Fig. 14.15 : Point de fonctionnement.

## 8 Utilisation du moteur asynchrone triphasé

Le moteur asynchrone, dont le rapport coût/puissance est faible, est le moteur électrique le plus répandu. Alimenté par le réseau, sa fréquence de rotation est pratiquement constante. De nombreuses machines outils sont entraînées de cette manière.

Associé à des variateurs de vitesse électroniques permettant d'alimenter le moteur par un courant de fréquence réglable, le moteur asynchrone peut aussi fonctionner à vitesse variable. Cela permet son utilisation dans les applications nécessitant une variation de fréquence de rotation (convoyeurs, machines-outils, machines centrifuges, etc.).

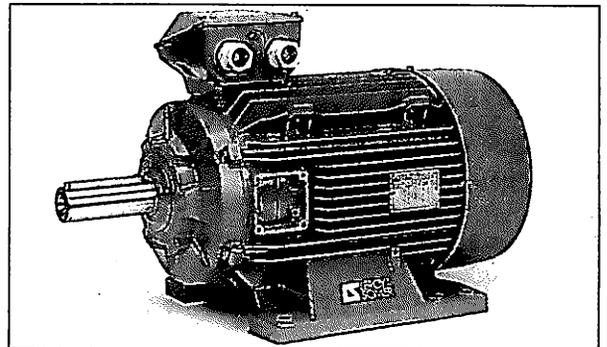


Fig. 14.16 : Moteur asynchrone.

## ESSENTIEL À RETENIR

### FRÉQUENCES DE ROTATION

La fréquence de synchronisme,  $n_s$  est la fréquence de rotation du champ tournant :

$$n_s = \frac{f}{p} \quad \Omega_s = 2\pi n_s$$

$n_s$  fréquence de synchronisme (tr/s),  
 $\Omega_s$  vitesse angulaire de synchronisme (rad/s),  
 $f$  fréquence de la tension d'alimentation (Hz),  
 $p$  nombre de paires de pôles par phase.

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

$g$  glissement,  
 $n$  fréquence de rotation réelle (tr/s).

$$n = n_s (1 - g)$$

### BILAN ÉNERGÉTIQUE

$$P_a = UI\sqrt{3} \cos \varphi$$

$P_a$  puissance absorbée (W),  
 $U$  tension composée du réseau (V),  
 $I$  intensité en ligne (A).

$$P_u = P_a - \text{pertes} \quad P_u \text{ puissance utile (W).}$$

Les pertes Joule dans le stator sont :

$$P_{JS} = \frac{3}{2} R I^2$$

$R$  résistance mesurée entre 2 bornes de phases du stator ( $\Omega$ ).

$$\text{Rendement} : \eta = \frac{P_u}{P_a}$$

$$\text{Rendement du rotor} : \eta_R = 1 - g$$

### COUPLE MOTEUR

$$T_u = \frac{P_u}{\Omega}$$

$T_u$  couple utile (N.m),  
 $P_u$  puissance utile (W),  
 $\Omega$  vitesse angulaire (rad/s).

### POINT DE FONCTIONNEMENT

$$T_u = T_R$$

$T_u$  couple utile du moteur (N.m),  
 $T_R$  couple résistant de la machine entraînée (N.m).

## TEST RAPIDE

**T. 1** Un moteur asynchrone comporte quatre pôles. Calculer sa fréquence de synchronisme.

**Réponse :** 750 tr/min ; 1 500 tr/min ; 3 000 tr/min.

**T. 2** La fréquence de rotation d'un moteur asynchrone est de 1 470 tr/min.

Déterminer la valeur de son glissement.

**Réponse :** 0 % ; 2 % ; 30 %.

**T. 3** Un moteur asynchrone tourne à 965 tr/min avec un glissement de 3,5 %.

Déterminer le nombre de pôles du moteur.

**Réponse :** 4 ; 3 ; 6.

**T. 4** Les tensions indiquées sur la plaque signalétique d'un moteur sont :

400 V/690 V.

Quel doit être son couplage sur le réseau triphasé 230 V/400 V ?

**Réponse :** étoile, triangle.

**T. 5** Un moteur fournit une puissance utile de 2 kW. Sa fréquence de rotation est 1 450 tr/min.

Déterminer son couple utile.

**Réponse :** 2 Nm ; 13 Nm ; 300 Nm.

**T. 6** Un moteur asynchrone triphasé est alimenté sur le réseau 230 V/400 V.

Le courant dans un fil de ligne est  $I = 5$  A. Le facteur de puissance est  $\cos \varphi = 0,8$ .

Calculer la puissance absorbée par le moteur.

**Réponse :** 880 W ; 1 520 W ; 2 771 W.

**T. 7** Les enroulements d'un moteur asynchrone triphasé sont couplés en triangle. La résistance entre deux bornes de phase est  $R = 0,5 \Omega$ .

Le courant en ligne est  $I = 10$  A.

Calculer les pertes Joule dans le stator.

**Réponse :** 75 W ; 90 W ; 150 W.

**T. 8** Un moteur de puissance utile 5 kW fonctionne avec un rendement de 0,8.

Calculer la puissance absorbée.

**Réponse :** 4 000 W ; 5 000 W ; 6 250 W.

## MESURE DU RENDEMENT D'UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ

### ■ TRAVAIL À EFFECTUER

Mesurer la puissance absorbée et la puissance utile développées pour différentes charges. Tracer la courbe de rendement  $\eta = f(P_u)$ .

### ■ SCHÉMA DU MONTAGE ET EXEMPLE DE RÉSULTATS

Le moteur utilisé pour l'essai a pour caractéristiques :

$P_u = 1,5 \text{ kW}$       Tensions : 230 V/400 V  
 $N = 1\,465 \text{ tr/min}$     Intensités : 5,4 A/3,1 A  
 $\eta = 84 \%$              $\cos \varphi = 0,83$

La puissance absorbée est mesurée par un wattmètre placé sur une phase qui indique la puissance  $P_1$ .

La puissance totale absorbée est :

$$P_a = 3 P_1.$$

Il est aussi possible de mesurer la puissance absorbée par la **méthode des deux wattmètres**.

Un capteur à jauge de contrainte permet la mesure du couple utile.

Un tachymètre relève la fréquence de rotation.

La puissance utile se calcule par la relation :

$$P_u = T_u \cdot \Omega.$$

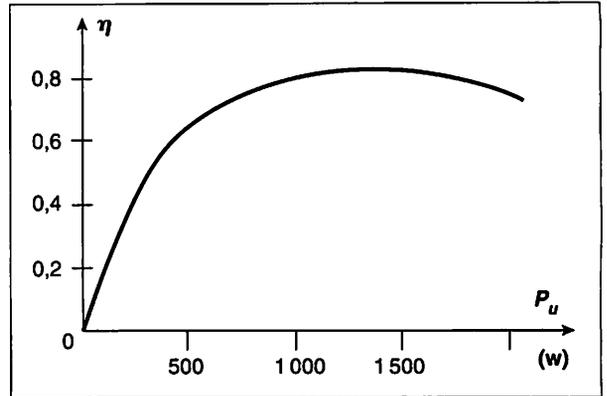
### Remarque .....

Le montage permet aussi de mesurer le facteur de puissance :

$$\cos \varphi = \frac{P_a}{UI\sqrt{3}}$$

et de tracer les caractéristiques :

$\cos \varphi = f(P_u)$  ;  $T_u = f(P_u)$  ;  $I = f(P_u)$  ;  $g = f(P_u)$ .



Le rendement  $\eta = \frac{P_u}{P_a}$  passe par un maximum au voisinage de la charge nominale.

Au voisinage de la puissance nominale, le couple mesuré est  $T_u = 10 \text{ Nm}$ .

La fréquence de rotation est alors :

$$N = 1\,460 \text{ tr/min} \text{ soit } \Omega = \frac{2\pi N}{60} = 152,9 \text{ rad/s.}$$

La puissance utile est égale à :

$$P_u = T_u \Omega \text{ soit } P_u = 1\,529 \text{ W.}$$

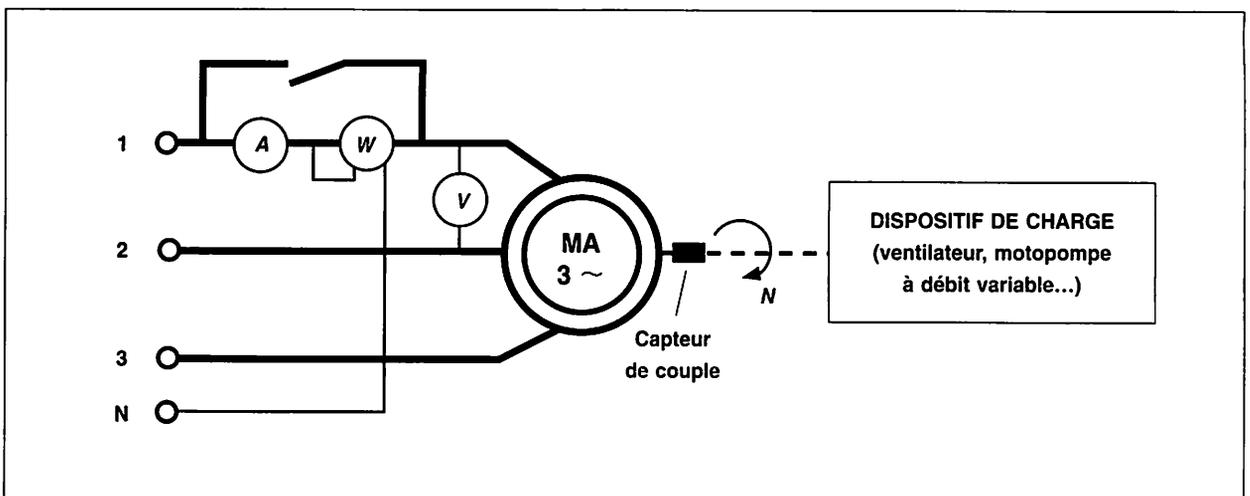
Le wattmètre indique  $P_1 = 625 \text{ W}$ , soit :

$$P_a = 3 P_1 = 1\,875 \text{ W.}$$

D'où un rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{1\,529}{1\,875} \text{ soit } \eta = 81 \%.$$

Cette valeur mesurée du rendement est à comparer avec celle indiquée sur la plaque signalétique.



# APPLICATIONS

## EXERCICES RÉSOLUS

### Énoncé 1

Un moteur triphasé tétrapolaire possède les caractéristiques suivantes :

**230 V-400 V - 50 Hz ; 17,8 A-10,3 A ;  $\cos \varphi = 0,83$  ;  $N = 1\,425$  tr/min ;  $P_u = 5$  kW.**

Le moteur est alimenté par le réseau 230 V/400 V.

À partir de ces données, calculer :

- le couplage à utiliser, la fréquence de synchronisme et le glissement en charge,
- la puissance absorbée et le rendement en charge nominale.

**Méthode :**

a. Comparer les tensions indiquées sur le moteur avec les tensions du réseau.

Utiliser les relations :

$$n_s = \frac{f}{p}$$

$$g = \frac{N_s - N}{N_s}$$

b. Utiliser les relations de la puissance en triphasé et du rendement.

**Solution proposée :**

a. La tension nominale de chaque enroulement est 230 V. Le moteur doit être couplé en étoile sur le réseau 230 V/400 V.

Le moteur comporte 2 paires de pôles :

$$n_s = \frac{f}{p} = \frac{50}{2} = 25 \text{ tr/s} \text{ soit } N_s = 1\,500 \text{ tr/min.}$$

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{1\,500 - 1\,425}{1\,500} \text{ soit } g = 5 \%$$

b. La puissance absorbée est égale à

$$P_a = UI \sqrt{3} \cos \varphi = 400 \times 10,3 \times \sqrt{3} \times 0,83$$

$$\text{soit } P_a = 5\,923 \text{ W.}$$

Le rendement est alors :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{5\,000}{5\,923} \text{ soit } \eta = 0,84.$$

**Remarques :**

La tension nominale d'un enroulement est la plus faible de celles indiquées sur le moteur.

Tétrapolaire signifie à quatre pôles soit 2 paires de pôles.

L'intensité la plus faible est celle consommée par un enroulement donc l'intensité en ligne dans le couplage étoile.

### Énoncé 2

Les variations du couple d'un moteur asynchrone en fonction de sa fréquence de rotation sont relevées dans le tableau ci-dessous.

N (tr/min)	0	250	500	800	900	950	1 000
T (Nm)	14	14,5	16	20	16	8	0

a. Représenter graphiquement  $T = f(N)$ .

b. Ce moteur entraîne un compresseur dont le couple résistant est constant et égal à 8 Nm.

Le démarrage en charge du moteur est-il possible ?

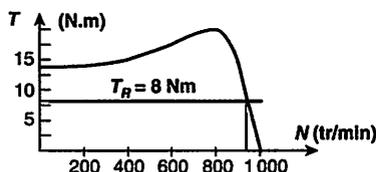
Déterminer graphiquement la fréquence de rotation de l'ensemble en régime établi.

**Méthode :**

a. Placer les points de coordonnées (N; T) dans un repère.

**Solution proposée :**

a.



b. Rechercher l'abscisse du point d'intersection des deux représentations graphiques.

b. Le couple moteur au démarrage est supérieur au couple résistant du compresseur. Le démarrage en charge est possible.  
En régime établi l'ensemble tourne à 950 tr/min.

**Remarques :**

La variation du couple est pratiquement linéaire à partir de 900 tr/min.

La caractéristique du couple résistant,  $T_R$ , est une droite horizontale.

## EXERCICES À RÉSOUDRE

**E. 1** Un moteur asynchrone triphasé de puissance utile 10 kW est alimenté par le secteur 230 V/400 V.

Il consomme un courant de 25 A avec un facteur de puissance égal à 0,7. Sa fréquence de rotation est de 1 450 tr/min.

Calculer :

- La puissance absorbée.
- Le rendement.
- Le couple utile.

**E. 2** La partie utile de la caractéristique de couple d'un moteur en fonction de sa fréquence de rotation peut être considérée comme une droite passant par les points :

**A :**  $T = 50 \text{ Nm}$  pour  $N = 1\,400 \text{ tr/min}$ .

**B :**  $T = 0$  pour  $N = 1\,500 \text{ tr/min}$ .

Ce moteur entraîne une machine dont le couple résistant  $T_r$ , est donné en fonction de la fréquence de rotation par la relation :

$$T_r = 0,025 N$$

avec :  $T_r$  en Nm,  
 $N$  en tr/min.

- Établir l'équation de la droite du couple moteur en fonction de la fréquence de rotation  $N$ .
- Déterminer la fréquence de rotation de régime de l'ensemble moteur-machine.
- Calculer le couple correspondant.

**E. 3** Un moteur asynchrone triphasé a les caractéristiques suivantes :

**230 V/400 V ;  $f = 50 \text{ Hz}$**

**$P_u = 3 \text{ kW}$  ;  $N = 1\,425 \text{ tr/min}$ .**

- Déterminer son couplage sur le réseau triphasé 230 V/400 V.
- Donner son nombre de pôles et son glissement.
- Calculer son couple utile.

**E. 4** Un moteur asynchrone triphasé fonctionne sur le réseau triphasé 230 V/400 V – 50 Hz et comporte six pôles.

En marche normale, la puissance utile développée par le moteur est de 15 kW, son facteur de puissance 0,7, son rendement 0,85 et son glissement 4 %.

Calculer :

- La puissance absorbée par le moteur et l'intensité du courant circulant dans les fils de la ligne d'alimentation.
- La fréquence de rotation et le couple utile du moteur.

**E. 5** La plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé comporte les indications suivantes :

- puissance utile : 10 kW,
- tension d'alimentation : 400 V/690 V,
- fréquence : 50 Hz,
- fréquence de rotation nominale : 920 tr/min,
- intensité nominale : 25 A/14,4 A,
- facteur de puissance à charge nominale : 0,75.

Ce moteur est alimenté par le réseau 230 V/400 V. La résistance de chaque enroulement du stator est égale à 0,5  $\Omega$ .

Calculer :

- Le mode de couplage et le glissement.
- La puissance absorbée et le rendement.
- Les pertes par effet Joule dans le stator.
- La puissance transmise au rotor sachant que les pertes fer du stator s'élèvent à 500 W.
- Le rendement du rotor.

**E. 6** Un moteur asynchrone triphasé est alimenté par le réseau 230 V/400 V.

Sa fréquence de rotation est de 1 430 tr/min et sa puissance utile est de 5 kW.

En négligeant toutes les pertes autres que les pertes par effet Joule dans le rotor.

Calculer :

- Le glissement du moteur.
- Les pertes Joule dans le rotor.
- La puissance absorbée.
- Le courant dans les fils de ligne pour un facteur de puissance égal à 0,7.

## 15

## Moteurs monophasés

## ÉLECTROTECHNIQUE

## 1 Moteur asynchrone monophasé

## ■ CONSTITUTION

L'enroulement statorique, **inducteur**, est monophasé et comporte  $2p$  pôles.

Le rotor ou **induit** est identique à celui du moteur asynchrone triphasé; il est généralement à cage.

## ■ PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Une aiguille aimantée est placée au voisinage d'une bobine alimentée en courant alternatif (fig. 15.01).

Après avoir été lancée, elle tourne indifféremment dans un sens ou dans l'autre.

Elle est soumise dans chaque cas à un **champ tournant**.

Le champ magnétique alternatif produit par un enroulement monophasé peut se décomposer en deux champs tournant en sens inverse l'un de l'autre.

Chacun de ces champs induit des courants dans le rotor du moteur asynchrone et tend à l'entraîner en rotation dans le même sens que lui.

Le rotor est ainsi sollicité en rotation par deux couples opposés, le couple direct  $T_d$  et le couple inverse  $T_i$  (fig. 15.02).

Le couple résultant est nul à l'arrêt. **Le moteur ne peut démarrer seul.** Il est indispensable de recourir à un artifice de démarrage.

## ■ MODES DE DÉMARRAGE

Quelle que soit la technique mise en œuvre, le principe consiste en la transformation du moteur monophasé en **moteur diphasé**.

Cette transformation s'obtient en ajoutant un enroulement auxiliaire, dit **phase de démarrage**, parcouru par un courant déphasé par rapport au courant circulant dans l'enroulement principal.

La solution la plus souvent retenue est la mise en série, avec la phase de démarrage, d'un condensateur. Cela

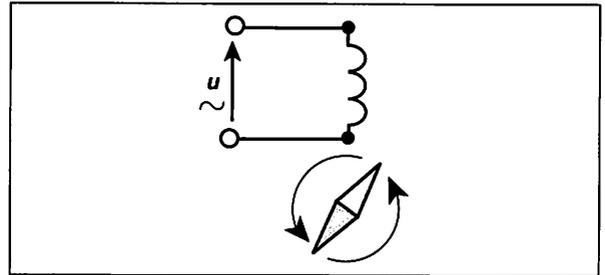


Fig. 15.01 : Champ tournant monophasé.

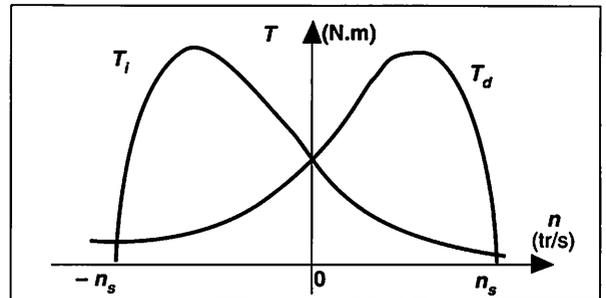


Fig. 15.02 : Couples du moteur monophasé.

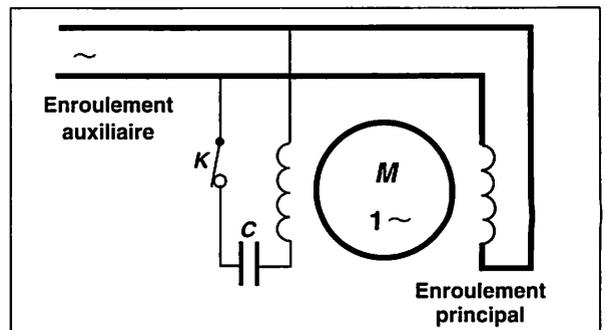


Fig. 15.03 : Démarrage par condensateur.

permet d'obtenir un déphasage entre les courants dans les deux enroulements de l'ordre de  $90^\circ$  (fig. 15.03).

Après le démarrage le courant dans l'enroulement auxiliaire peut être supprimé par un interrupteur centrifuge. L'inversion du sens de rotation s'effectue par la permutation des connexions d'un enroulement.

Les petits moteurs asynchrones (ventilateurs, pompes, de lave-linge, etc.) utilisent comme procédé de démarrage des **bagues de déphasage** ou **spires de Frager**.

Ces bagues en cuivre entourent une partie des pièces polaires (fig. 15.04). Le courant induit dans chaque bague crée un champ magnétique, décalé par rapport au champ principal, qui suffit à entraîner le moteur en rotation.

## ■ CARACTÉRISTIQUES DU MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASÉ

**Le moteur asynchrone monophasé présente des performances inférieures à celles du moteur asynchrone triphasé.**

La fréquence de rotation a la même expression :

$$n = n_s (1 - g) \quad \text{ou} \quad \Omega = \Omega_s (1 - g)$$

mais le glissement,  $g$ , du moteur monophasé est plus élevé.

Le rendement, du fait d'un glissement élevé, est plus faible que celui d'un moteur triphasé.

À dimensions égales, le moteur monophasé a une puissance utile inférieure à celle que fournirait un moteur triphasé.

Il est donc relativement plus coûteux et il est uniquement proposé pour des faibles puissances, inférieures à 2 kW.

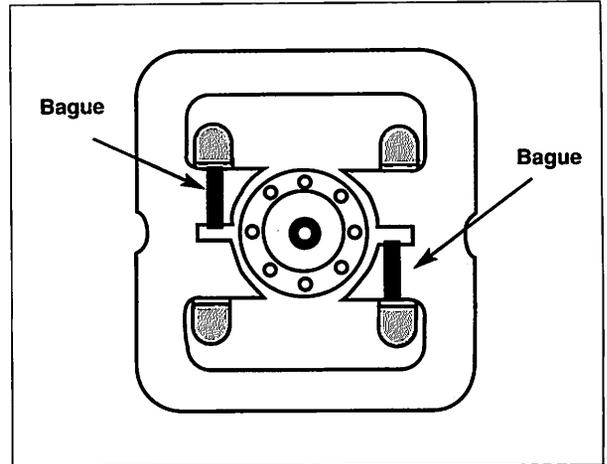


Fig. 15.04 : Moteur à bagues de déphasage.

### Exemple :

Un moteur asynchrone monophasé porte les indications suivantes.

$$P = 1 \text{ kW} ; N = 1\,400 \text{ tr/min} ; \\ U^p = 230 \text{ V} ; I = 10 \text{ A} ; f = 50 \text{ Hz} ; \\ \cos \varphi = 0,7.$$

Son glissement pour une vitesse de synchronisme de 1500 tr/min est :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \quad \text{soit} \quad g = 6,7 \%$$

La puissance absorbée est égale à :

$$P_a = UI \cos \varphi \quad \text{soit} \quad P_a = 1\,610 \text{ W.}$$

Son rendement est alors :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{1\,000}{1\,610} \quad \text{soit} \quad \eta = 62 \%$$

## 2 Moteur série universel

### ■ CONSTITUTION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le moteur universel est constitué comme un **moteur série** à courant continu, mais alimenté en courant alternatif. En effet, lorsque le signe de la tension d'alimentation d'un moteur série à courant continu est inversé, le sens du flux produit par l'enroulement inducteur et celui du courant dans l'enroulement induit sont changés simultanément. Ainsi, le sens de rotation n'est pas modifié.

À partir de cette constatation, il serait théoriquement possible d'alimenter le moteur série par un réseau alternatif monophasé.

Toutefois, s'il n'est pas procédé à quelques modifications, le moteur fonctionne très mal, c'est-à-dire avec :

- un faible couple,
- un faible rendement,
- une mauvaise commutation.

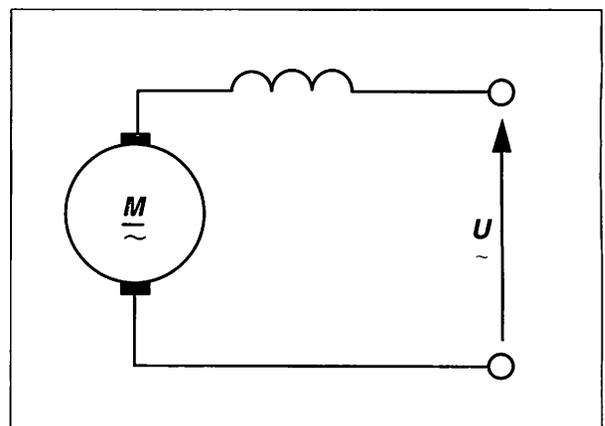


Fig. 15.05 : Moteur série universel.

Pour diminuer les pertes par courants de Foucault, le circuit magnétique du moteur universel est entièrement feuilleté.

Pour améliorer la commutation et diminuer les étincelles au niveau du collecteur, dues à des f.e.m. importantes, le moteur universel est muni d'un **enroulement de compensation**.

### ■ CARACTÉRISTIQUES

Le moteur universel présente des caractéristiques de vitesse et de couple analogues au moteur série à courant continu.

Le moteur série tend à s'emballer à vide et sa fréquence de rotation diminue rapidement avec la charge (fig. 15.06).

Il est possible de régler la fréquence de rotation du moteur en agissant sur la tension d'alimentation grâce à un convertisseur électronique comme le gradateur.

Le couple moteur est proportionnel au carré de l'intensité consommée (fig. 15.07).

Le couple au démarrage est important, il peut atteindre 2,5 fois le couple nominal.

## 3 Moteur à répulsion

Le moteur à répulsion est constitué :

- d'un **stator ou inducteur** analogue à celui du moteur universel,
- d'un **rotor ou induit** à courant continu dont les balais sont court-circuités par un conducteur de faible résistance.

Le fonctionnement du moteur dépend de la **position des balais par rapport à la ligne neutre** (fig. 15.08).

L'induit tourne dans le sens du décalage des balais.

La fréquence de rotation dépend de l'angle de décalage des balais ; elle peut être inférieure ou supérieure à la fréquence de synchronisme.

Comme le moteur série, le moteur à répulsion tend à s'emballer à vide.

## 4 Moteur synchrone monophasé

Dans ce type de moteur, le stator est bobiné, le rotor est un **aimant permanent**.

Des bagues de déphasage facilitent le démarrage. Ensuite, il tourne à la fréquence de synchronisme, liée à la fréquence de la tension d'alimentation.

### Applications

Ces moteurs, à très faible couple, sont utilisés dans les programmeurs de lave-linge, les horloges, les minuteries, etc.

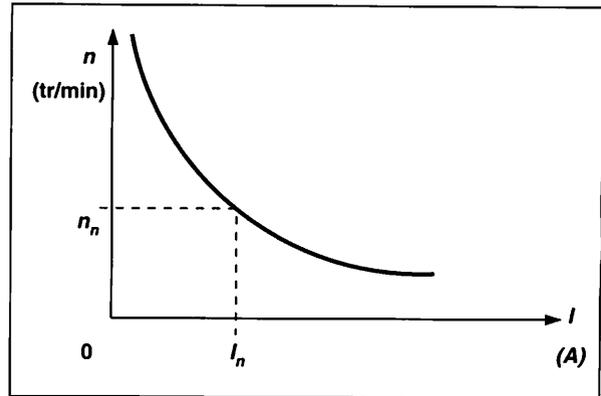


Fig. 15.06 : Caractéristique  $n = f(I)$ .

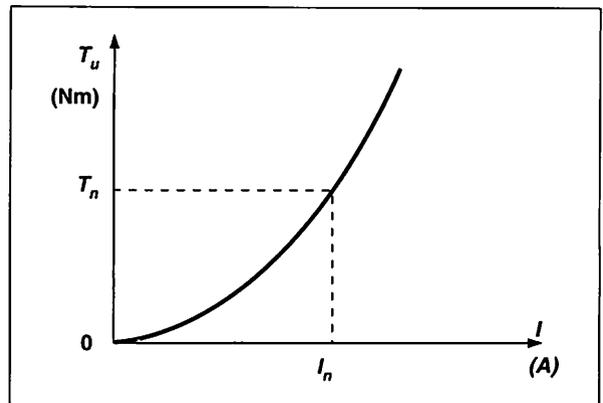


Fig. 15.07 : Caractéristique  $T = f(I)$ .

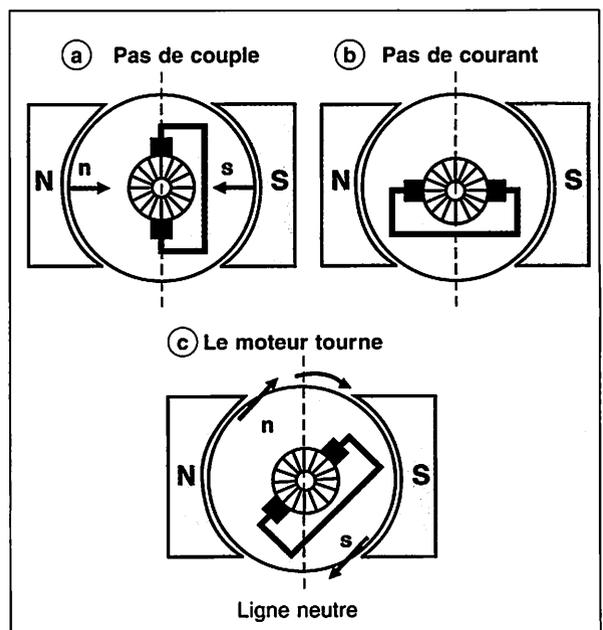


Fig. 15.08 : Calage des balais du moteur à répulsion.

## ESSENTIEL À RETENIR

### MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASÉ

$$n = n_s (1 - g)$$

$n$  fréquence de rotation (tr/s),  
 $n_s$  fréquence de synchronisme (tr/s),  
 $g$  glissement.

### MOTEUR UNIVERSEL

Comme le moteur à courant continu série, le moteur universel tend à s'emballer à vide. Sa fréquence de rotation diminue lorsque la charge augmente. Le couple moteur est proportionnel au carré de l'intensité consommée.

### MOTEUR À RÉPULSION

La fréquence de rotation dépend de la position des balais.  
Le moteur à répulsion tend à s'emballer à vide.

### MOTEUR SYNCHRONE MONOPHASÉ

$$n_s = \frac{f}{p}$$

$f$  fréquence de la tension d'alimentation (Hz),  
 $p$  nombre de paires de pôles,  
 $n_s$  fréquence de synchronisme.

## TEST RAPIDE

**T. 1** La fréquence de synchronisme du moteur monophasé d'un lave-linge est de 500 tr/min. Déterminer le nombre de paires de pôles du moteur.  
**Réponse :** 2; 4; 6.

**T. 2** Le moteur de l'exercice précédent a une vitesse de rotation de 430 tr/min. Calculer son glissement.  
**Réponse :** 0,14; 0,5; 1,2.

**T. 3** Un moteur asynchrone monophasé bipolaire a un glissement en charge égal à 8 %. Calculer sa fréquence de rotation.  
**Réponse :** 2 760 tr/min; 3 000 tr/min; 3 240 tr/min.

**T. 4** Calculer le rendement du rotor du moteur de l'exemple précédent.  
**Réponse :** 8 %; 80 %; 92 %.

**T. 5** La charge d'un moteur universel série augmente. Comment réagit sa fréquence de rotation ?  
**Réponse :** Augmente; diminue; reste stable.

**T. 6** Un moteur série universel consomme 2 A pour fournir un couple de 1,5 Nm. Quel courant consommerait-il pour développer un couple de 0,75 Nm ?  
**Réponse :** 0,5 A; 1 A; 4 A.

**T. 7** L'enroulement statorique d'un moteur synchrone monophasé comporte 10 pôles. Calculer la fréquence de rotation du moteur.  
**Réponse :** 300 tr/min; 600 tr/min; 3 000 tr/min.

**T. 8** Les balais d'un moteur à répulsion sont calés sur la ligne neutre. Quelle est sa fréquence de rotation ?  
**Réponse :** 0 tr/min; 1 500 tr/min; 3 000 tr/min.

# APPLICATIONS

## EXERCICE RÉSOLU

### Énoncé

Un moteur asynchrone monophasé de puissance utile 1,1 kW est alimenté sous 230 V. Le courant consommé est 8,5 A pour une fréquence de rotation de 1 400 tr/min. La puissance absorbée est de 1 480 W.

Calculer :

- le facteur de puissance,
- le rendement et le couple moteur.

**Méthode :**

- Transformer la formule :

$$P_a = UI \cos \varphi$$

- Utiliser les formules :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

$$T_u = \frac{P_u}{\Omega}$$

**Solution proposée :**

- Le facteur de puissance est égal à :

$$\cos \varphi = \frac{P_u}{UI} = \frac{1\,480}{230 \times 8,5} \quad \text{soit} \quad \cos \varphi = 0,76.$$

- Le rendement est égal à :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{1\,100}{1\,480} \quad \text{soit} \quad \eta = 74 \%$$

Le couple moteur est alors :

$$T_u = \frac{P_u}{\Omega} \quad \text{avec} \quad \Omega = 2\pi \times \frac{1\,400}{60} = 146,6 \text{ rad/s},$$

soit  $T_u = 7,5 \text{ N.m.}$

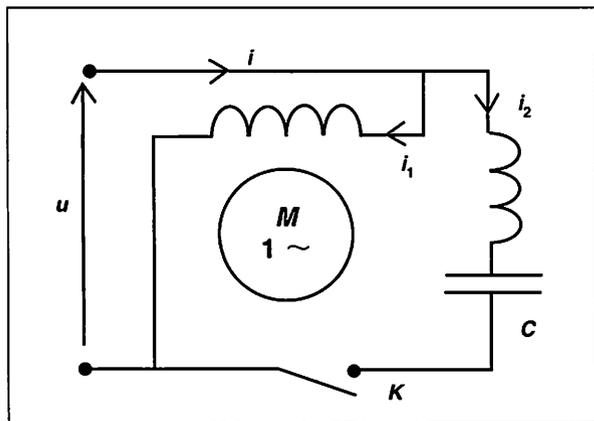
**Remarques :**

Exprimer la puissance utile et la puissance absorbée dans la même unité.

Le rendement est plus faible que celui d'un moteur triphasé.

## EXERCICES À RÉSOUDRE

**E. 1** Le moteur asynchrone monophasé représenté à la figure ci-après possède une phase auxiliaire de démarrage. Il est alimenté sur le réseau 230 V – 50 Hz. Sa puissance utile est de 600 W avec un facteur de puissance de 0,7 et un rendement de 60 %.



Il consomme au démarrage :

$$I_1 = 15 \text{ A dans l'enroulement de travail,}$$

$$I_2 = 5 \text{ A dans l'enroulement auxiliaire.}$$

Les résistances des enroulements sont :

$$R_1 = 5 \Omega \text{ pour l'enroulement de travail,}$$

$$R_2 = 20 \Omega \text{ pour l'enroulement auxiliaire.}$$

Calculer :

- le courant absorbé en fonctionnement nominal,
- les pertes Joule au démarrage dans chaque enroulement,
- le facteur de puissance au démarrage pour chaque enroulement,
- l'intensité totale consommée.

**E. 2** La mesure de la fréquence de rotation  $N$  d'un moteur universel série en fonction du courant  $I$  consommé donne les résultats suivants :

$I$ (A)	1	1,5	2	3
$N$ (tr/min)	3 000	2 000	1 700	1 250

- Représenter graphiquement  $N$  en fonction de  $I$ .
- Le moteur fonctionnant sous 230 V absorbe une puissance de 250 W avec un  $\cos \varphi$  de 0,7. Déterminer sa fréquence de rotation.