

LYCEE JEAN ROSTAND
RUE F. BODET
78200 MANTES LA JOLIE
Tél 30.94.09.21 - Fax 30.33.44.50

Électricité

2nde Professionnelle et Terminale BEP

A. Declercq
J.-C. Gallois
C. Riera
M. Sybilensky
PLP2 électrotechnique

NATHAN
TECHNIQUE

Édition : Patrick Gonidou
Coordination artistique : Paule Garouste
Fabrication : Pascal Mégret
Iconographie : Véronique Brown
Maquette intérieure : Michel Ganne
Composition et schémas : IGS
Maquette couverture : Jérôme Lo Monaco
Crédit photo de la couverture : © HOAQUI/ZEFA/H. Kehrer

Nous tenons à remercier toutes les sociétés qui nous ont aidés dans notre recherche documentaire et qui nous ont donné l'autorisation de reproduire leurs documents :
Chauvin Arnoux (p. 122 et 173), France Transfo (p. 215), Jeulin (p. 22, 23, 40, 43, 293 et 304), Legrand (p. 202), Leroy Somer (p. 231, 232 et 252), et Metrix (172).

P. 11, 18, 26, 58, 67, 71, 90 et 91 : © Archives Nathan

© Nathan/HER, 2000 – 9, rue Méchain – 75014 PARIS
ISBN : 2-09-178738-8



"Le photocopillage, c'est l'usage abusif et collectif de la photocopie sans autorisation des auteurs et des 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."

Avant-propos

Cet ouvrage, conforme au référentiel du BEP électrotechnique, peut également être utile pour la préparation aux CAP de l'électrotechnique, et aux autres métiers de l'électricité.

L'expérimentation scientifique et technique (partie EP3 de l'examen) fait partie des enseignements professionnels du BEP électrotechnique. Au cours de sa formation l'élève apprend :

- **un savoir faire** en mesures des grandeurs électriques et en expérimentation des applications électriques, dans les locaux spécifiques de mesures et essais,
- **les lois de l'électrotechnique et la maîtrise des applications numériques.**

Cet ouvrage répond à ce second besoin, bien qu'il fasse souvent appel à des phases d'expérimentation qu'il sera facile de reproduire durant les séquences en salles de mesures.

Un livre unique pour l'ensemble de la formation

Ce manuel est consacré aux savoirs technologiques associés S0 : « électrotechnique - essais et mesures » du référentiel du BEP électrotechnique.

Nous y avons distingué trois parties :

- les lois générales (S0-1 à S0-8),
- les machines électriques (S0-8 à S0-11),
- l'électronique (S0-12).

Ce cours d'électricité couvre la totalité du programme de formation du brevet d'études professionnelles électrotechnique.

Structuré en 51 chapitres de formation et 13 synthèses de préparation à l'examen, ce livre comporte 64 séquences qui correspondent sensiblement aux 66 semaines de travail des deux années de formation d'un élève de BEP.

Le chapitre de formation

Nous l'avons voulu facilement accessible à l'élève, en privilégiant l'observation et l'expérimentation pour mettre en place les lois fondamentales de l'électrotechnique.

Chaque chapitre respecte la structure décrite page 4.

La préparation à l'examen

Les chapitres sont regroupés par thème au sein de 13 parties. Chaque partie se termine par une synthèse intitulée « Préparation à l'examen », qui comporte un résumé de cours, des exercices résolus ou avec résultats, des exercices d'entraînement, et des problèmes de type « sujet d'examen » (voir présentation page 5).

Un livre du professeur complète ce livre

Toutes les activités proposées dans ce manuel sont corrigées dans le livre du professeur. Un lecteur auto-didacte pourra ainsi contrôler sa progression.

Nous souhaitons que chacun trouve dans ce livre une aide et un outil vers la réussite.

Les auteurs

Sommaire

Notations, symboles et unités	Pages 8
-------------------------------------	------------

LOIS GÉNÉRALES

PARTIE 1 - CIRCUITS ÉLECTRIQUES ET GRANDEURS DE BASE

1. L'énergie et le circuit électrique	10
2. La puissance	15
3. Intensité d'un courant électrique et tension	20
4. Courant continu et courants alternatifs	25
5. Lois des circuits	30
PRÉPARATION À L'EXAMEN	35

PARTIE 2 - CIRCUITS RÉSISTIFS

6. Résistor et loi d'Ohm	40
7. Variation de la résistance	45
8. L'effet Joule	49
9. Association de résistors	53
10. Rhéostat et potentiomètre	57
PRÉPARATION À L'EXAMEN	61

PARTIE 3 - ÉLECTROMOTEURS EN COURANT CONTINU

11. Générateur de courant continu	66
12. Électromoteur récepteur	71
13. Circuits à une maille	76
14. Circuits à plusieurs mailles	81
PRÉPARATION À L'EXAMEN	85

PARTIE 4 - AUTRES DIPÔLES EN COURANT CONTINU

15. Condensateurs et réacteurs	90
16. Résistor et condensateur en série	95
17. Réacteurs et électromagnétisme	99
PRÉPARATION À L'EXAMEN	103

PARTIE 5 - COURANT ALTERNATIF SINUSOÏDAL

18. Les grandeurs sinusoïdales	108
19. Le déphasage	112
20. Somme de grandeurs sinusoïdales	117
21. Dipôle sous tension sinusoïdale	122
PRÉPARATION À L'EXAMEN	127

PARTIE 6 - DIPÔLES EN RÉGIME SINUSOÏDAL

22. Récepteurs élémentaires en régime sinusoïdal	132
23. Dipôles R, L, C série	137
24. Récepteurs en dérivation et puissances	143
25. Facteur de puissance et compensation	148
PRÉPARATION À L'EXAMEN	153

PARTIE 7 - LE TRIPHASÉ

26. Le réseau	158
27. Le montage étoile	162
28. Le montage triangle	166
29. Puissances en triphasé	171
PRÉPARATION À L'EXAMEN	177

MACHINES ÉLECTRIQUES

PARTIE 8 - PRODUCTION DU COURANT SINUSOÏDAL

30. De l'aimant aux machines électriques	182
31. Induction et générateur synchrone triphasé	187
32. Générateur synchrone isolé en fonctionnement	192
<i>PRÉPARATION À L'EXAMEN</i>	197

PARTIE 9 - ADAPTATION DE LA TENSION SINUSOÏDALE

33. Transformateur monophasé	202
34. Transformateur monophasé en fonctionnement	207
35. Bilan des puissances d'un transformateur	211
36. Transformateur triphasé et transformateurs particuliers	215
<i>PRÉPARATION À L'EXAMEN</i>	221

PARTIE 10 - MOTEURS À COURANT ALTERNATIF

37. Du champ tournant aux moteurs triphasés	226
38. Le moteur asynchrone triphasé	231
39. Couple et puissance d'un moteur asynchrone triphasé	236
40. Démarrage des moteurs asynchrones triphasés	240
<i>PRÉPARATION À L'EXAMEN</i>	245

PARTIE 11 - MOTEURS À COURANT CONTINU

41. Force électromagnétique et moteur à courant continu	250
42. Moteur à excitation séparée	256
43. Bilan des puissances du moteur et compléments	261
<i>PRÉPARATION À L'EXAMEN</i>	267

ÉLECTRONIQUE

PARTIE 12 - CONVERSION ALTERNATIF CONTINU

44. La diode, redressement simple alternance	272
45. Redressement double alternance, pont de Graëtz PD2	277
46. Filtrage, lissage et stabilisation	283
47. Redressement triphasé, ponts P3 et PD3	288
48. Thyristor et redressement commandé	293
<i>PRÉPARATION À L'EXAMEN</i>	299

PARTIE 13 - AUTRES CONVERSIONS D'ÉNERGIE

49. Transistor et commutation	304
50. Hacheurs	308
51. Triac et gradateurs	312
<i>PRÉPARATION À L'EXAMEN</i>	317

Notations, symboles et unités

► Écriture des nombres

Un nombre décimal s'écrit avec une virgule (et non un point).

Un résultat se donne le plus souvent avec trois chiffres significatifs (précision de 1 % courante en électricité).

Exemples :

Le calcul donne 357,875 362 → nous conservons 358

Le calcul donne 0,075 489 → nous conservons 0,075 4

L'utilisation des puissances de 10 devient indispensable dès que les nombres sont très grands ou très petits.

Exemples :

256 638 957,21 s'écrit 257×10^6

0,000 022 475 s'écrit $22,4 \times 10^{-6}$

► Symboles littéraux

Le système international d'unités (système SI) précise les grandeurs et unités légales en France, et leurs symboles.

Les grandeurs : elles s'écrivent et s'accordent comme un nom commun.

Symboles des grandeurs : chaque grandeur physique est représentée par une lettre appelée « symbole de la grandeur ». Ce symbole est toujours écrit en italique, parfois suivi d'un indice.

Les unités : elles s'écrivent toujours en minuscules et s'accordent comme un nom commun (exemple : trois newtons).

Le symbole d'une unité est une ou plusieurs lettres, écrites :

- en majuscule si le nom de l'unité est issu d'un nom propre (N pour newton),
- en minuscule si le nom de l'unité est issu d'un nom commun (m pour mètre).

Nous verrons, au fur et à mesure de ce cours, les grandeurs et unités nouvelles. À chaque fois, nous préciserons les symboles normalisés correspondants.

► Grandeur physique

Une grandeur physique est quantifiée par un nombre concret, **ce nombre est toujours suivi d'une unité.**

Expression d'un résultat : c'est l'association inséparable du symbole de la grandeur, de la quantité correspondante et du symbole de l'unité de cette quantification. *Par exemple :* la longueur est $L = 12,5 \text{ m}$.

► Multiples et sous-multiples

Multiples		
Préfixe	Symbole	Rapport à l'unité
déca	da	10
hecto	h	$100 = 10^2$
kilo	k	$1\ 000 = 10^3$
méga	M	$1\ \text{million} = 10^6$
giga	G	$1\ \text{milliard} = 10^9$
tera	T	$1\ 000\ \text{milliards} = 10^{12}$

Sous-multiples		
Préfixe	Symbole	Rapport à l'unité
déci	d	$0,1 = 10^{-1}$
centi	c	$0,01 = 10^{-2}$
milli	m	$0,001 = 10^{-3}$
micro	μ	$1\ \text{millionième} = 10^{-6}$
nano	n	$1\ \text{milliardième} = 10^{-9}$
pico	p	10^{-12}

Exemples : 1 kilomètre = mille mètres → $L = 12\ 300 \text{ m} = 12,3 \text{ km}$

1 millionième de seconde est une microseconde → $t = 0,000\ 056 \text{ s} = 56 \mu\text{s}$

► Lettres grecques et signes utilisés dans ce livre

Lettres grecques			
α	alpha	μ	mu
β	bêta	ν	nu
γ	gamma	π	pi
Δ, δ	delta	ρ	rhô
ϵ	epsilon	Σ, σ	sigma
η	êta	τ	tau
θ	thêta	Φ, φ	phi
λ	lambda	Ω, ω	oméga

Symboles de relation entre grandeurs et nombres			
=	égal à	\neq	différent de
\approx	environ égal à	\equiv	correspond à
<	inférieur à	>	supérieur à
\leq	au plus égal à	\geq	au moins égal à
<<	très inférieur à	>>	très supérieur à

PARTIE 1

CIRCUITS ÉLECTRIQUES ET GRANDEURS DE BASE

- 1 L'énergie et le circuit électrique p. 10
- 2 La puissance p. 15
- 3 Intensité d'un courant électrique
et tension p. 20
- 4 Courant continu et courants
alternatifs p. 25
- 5 Lois des circuits p. 30
- PRÉPARATION À L'EXAMEN* p. 35

1

L'énergie et le circuit électrique

Allumer la lumière, brancher le fer à repasser... sont des gestes si naturels que nous n'y pensons même pas. L'énergie électrique est utilisée en permanence par chacun de nous.

AVANT DE DÉMARRER...

► Comment obtenir un courant électrique ?

- Chaque corps est constitué d'**atomes**. L'atome (**fig. 1**) comporte un certain nombre d'électrons qui sont des charges électriques élémentaires négatives.

Les **électrons** liés tournent autour du noyau de l'atome et ne peuvent le quitter.

Une substance qui ne contient que des électrons liés ne présente pas de charge électrique externe, aucune autre charge électrique ne peut la traverser : c'est un **isolant**.

Si un électron peut se déplacer librement dans la matière (d'un atome à l'autre) c'est un **électron libre**.

Une substance qui contient des électrons libres est une matière **conductrice** car elle autorise la conduction des charges électriques.

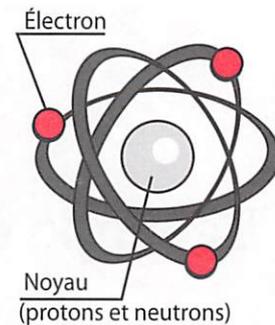


Fig. 1 L'atome.

- Lorsqu'un corps A **perd des électrons libres**, il est chargé **positivement** et tente de capturer les électrons manquants. Inversement, un corps B chargé négativement possède trop d'électrons libres et cherche à s'en débarrasser (**fig. 2**).

La mise en liaison de A et B (par une substance conductrice) engendre l'apparition du courant électrique. Les électrons excédentaires de B se déplacent vers A.

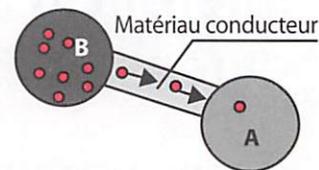


Fig. 2 Le courant électrique est une circulation d'électrons.

Le courant électrique, porteur d'énergie électrique, est une circulation d'électrons libres.

- Notons que le courant électrique est dû parfois à un déplacement d'ions (atomes chargés).

OBSERVONS

● Le circuit électrique naturel

Par temps d'orage, la circulation naturelle du courant électrique de l'éclair est visible (fig. 3).

La foudre et ses dégâts correspondent à l'énergie électrique mise en jeu.

Parfois ce phénomène existe, à moindre échelle, sous la forme dite d'**électricité statique**.

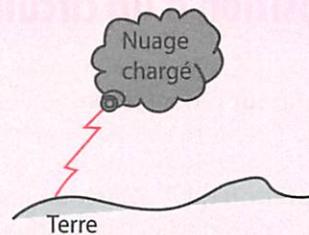


Fig. 3 Un éclair.

● Une lampe de poche

Bien qu'élémentaire, c'est une installation électrique complète. Ouvrons le boîtier d'une lampe de poche (fig. 4) :

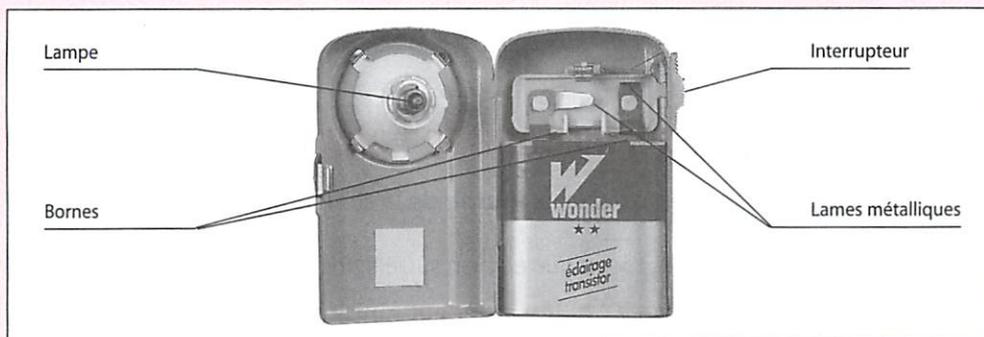


Fig. 4 L'intérieur de la lampe de poche.

La **lampe** éclaire lorsque le courant électrique circule.

Des **lames métalliques** conduisent le courant électrique.

La pile fournit l'énergie électrique, elle présente **deux bornes** :

- l'une apporte un excès d'électrons, c'est la grande lame repérée « - » ;
- l'autre manque d'électrons, c'est le « + ».

Un **interrupteur** permet d'interrompre la circulation des électrons.

● Les trois effets du courant électrique

Soit le montage expérimental ci-dessous (fig. 5). Dès la fermeture de l'interrupteur, le courant électrique circule.

- La lampe chauffe et éclaire : c'est l'**effet thermique**.
- La bobine attire le fer et la boussole dévie : c'est l'**effet magnétique** (ou mécanique).
- L'électrolyse de l'eau donne oxygène et hydrogène : c'est l'**effet chimique**.

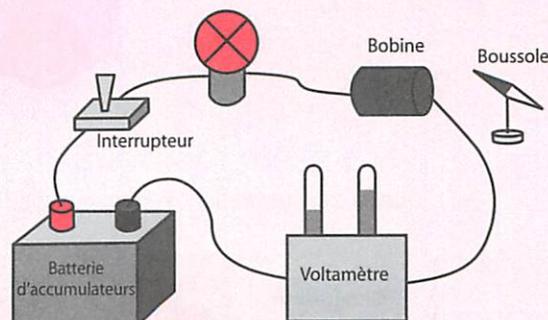


Fig. 5.

À SAVOIR

1. Composition d'un circuit électrique

Le circuit électrique (fig. 6) comporte :

- un **générateur** G dont la fonction est de mettre en mouvement les électrons libres et fournir l'énergie électrique au moment de sa consommation ;
- un **récepteur** R qui, traversé par les électrons de circulation, produit l'effet recherché en donnant une autre forme d'énergie ;
- des fils **conducteurs** de liaison qui assurent la circulation du courant électrique ;
- éventuellement, un **interrupteur** qui permet d'interrompre le passage des électrons libres en insérant un corps isolant, et ainsi de stopper les échanges d'énergie.

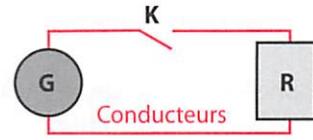


Fig. 6.

Dans l'installation électrique domestique ou industrielle, nous rencontrerons également des appareils de protection et des appareils de mesure ou de réglage.

2. Quand dire d'un corps qu'il possède de l'énergie ?

Un corps possède de l'énergie lorsqu'il est capable de **fournir de la chaleur** ou de **produire un mouvement**.

L'énergie peut être mécanique, chimique, thermique et, bien sûr, électrique.

Quelle que soit sa forme, l'énergie est une grandeur physique symbolisée par W . Son unité est le joule (J).

Le joule est une faible quantité d'énergie et, en électricité, nous utiliserons volontiers une unité pratique : le **wattheure** (Wh) et ses multiples, le kilowattheure (kWh), le mégawattheure (MWh).

$$1 \text{ Wh} = 3\,600 \text{ J}$$

$$1 \text{ kWh} = 1\,000 \text{ Wh} = 3\,600\,000 \text{ J}$$

$$1 \text{ MWh} = 10^6 \text{ Wh} = 3,6 \times 10^9 \text{ J}$$

3. Utiliser l'énergie, c'est la transformer

Grâce à son moteur thermique (fig. 7), une automobile transforme l'énergie chimique du carburant en énergie mécanique (déplacement) et aussi en chaleur (énergie thermique).

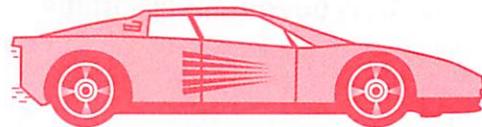


Fig. 7.

Dans le circuit électrique, la transformation d'énergie est la suivante :



a) Générateurs électriques

- **Piles et accumulateurs** transforment l'**énergie chimique** stockée en énergie électrique lorsque le circuit électrique est fermé.
- **Alternateurs et dynamos** donnent de l'**énergie électrique** lorsqu'ils sont entraînés en rotation par une turbine (énergie mécanique).

b) Récepteurs électriques

- Les **résistors** créent uniquement de la **chaleur**.
- Les **moteurs** produisent de l'**énergie mécanique**.
- Les **électrolyseurs** sont source d'**énergie chimique**.

4. Schéma du circuit électrique

C'est une représentation graphique du circuit où sont symbolisés les différents éléments qui le composent. L'installation électrique de la lampe de poche est représentée par le schéma ci-contre (fig. 8).

Nous retrouvons :

- le générateur (pile) : 
- le récepteur (lampe) : 

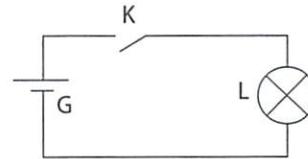


Fig. 8.

Nous présentons ci-dessous quelques symboles que nous utiliserons souvent (fig. 9).

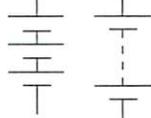
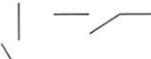
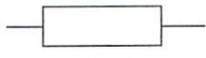
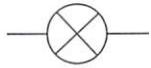
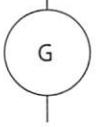
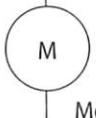
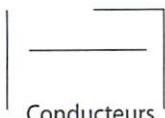
Générateurs :    Pile ou accumulateur Batterie d'accumulateurs ou de piles			Interrupteurs :  Interrupteur simple  Interrupteur à deux directions	
 Récepteur thermique Résistor		 Lampe		
 Générateur tournant		 Moteur		
Conducteurs :  Conducteurs			 Conducteurs se croisant sans connexion	 Conducteurs avec connexion électrique

Fig. 9 Symboles usuels.

5. Les différents montages

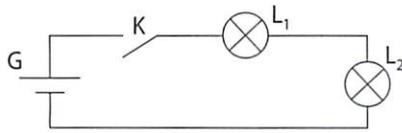
Nous appellerons **dipôle** (fig. 10) tout dispositif électrique comportant deux bornes. Un dipôle élémentaire est constitué d'un seul appareil : un générateur ou un récepteur. Un dipôle peut aussi être un ensemble de plusieurs éléments associés.



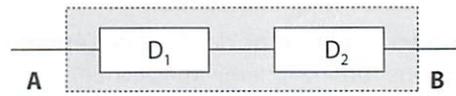
Fig. 10 Dipôle D.

a) Montage série (fig. 11)

Le courant électrique traverse successivement chacun des dipôles élémentaires.



Les lampes L_1 et L_2 sont en série.

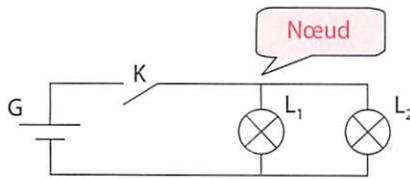


Le dipôle {AB} est un dipôle série.

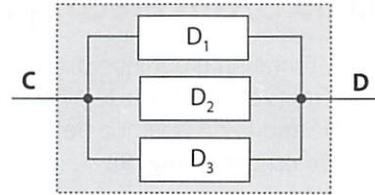
Fig. 11.

b) Montage dérivation (fig. 12)

Les dipôles sont en parallèle, le courant électrique se partage au nœud formé à chaque dérivation.



Les lampes L_1 et L_2 sont en dérivation.



Le dipôle {CD} est un dipôle dérivation.

Fig. 12.

TESTEZ VOS CONNAISSANCES

- 1 Une pile présente deux pôles repérés + et -, elle est en fonctionnement. Quelles sont les affirmations exactes ?

 - a) Le pôle + émet des électrons qui vont rejoindre le pôle -.
 - b) Le pôle - émet des électrons qui vont rejoindre le pôle +.
 - c) La pile transforme l'énergie chimique qu'elle contient en énergie électrique.
 - d) La pile stocke de l'énergie électrique.
- 2 De quelles manières peut s'exprimer une énergie de 340 Wh ?

 - a) $W = 3,4 \text{ kWh}$.
 - b) $W = 0,34 \text{ kWh}$.
 - c) $W = 1\,224\,000 \text{ J}$.
 - d) $W = 1\,224 \text{ MJ}$.
- 3 Que peut-on dire du montage ci-dessous ?
- 4 Exprimer, en joules, une consommation d'énergie électrique de 87 kWh.
- 5 Construire le schéma du circuit électrique équivalent au montage ci-dessous.

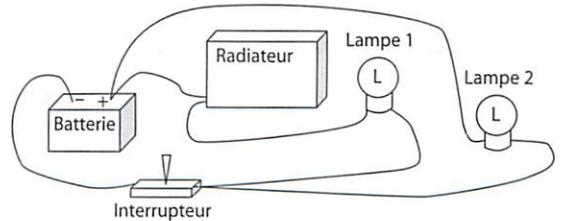


Fig. 14.

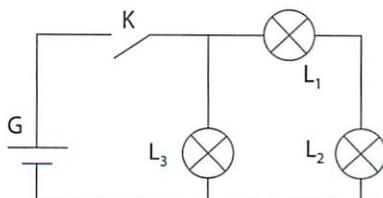


Fig. 13.

- 6 EDF (Électricité de France) facture 0,53 F (HT) le kWh d'énergie électrique au tarif plein.

 1. Quel serait le coût d'un joule ? Le joule n'est pas l'unité utilisée par EDF, pourquoi ?
 2. Un congélateur consomme 730 kWh par an. Calculer le prix de l'énergie électrique qu'il consomme si les taxes sont de 20,6 %.

2

La puissance

Dire qu'une locomotive est plus puissante qu'un moulin à café semble une évidence, mais la notion de puissance doit être définie de façon rigoureuse.

AVANT DE DÉMARRER...

► Le travail est énergie mécanique

L'énergie mécanique apparaît pour soulever une charge, faire tourner un moteur...
Chaque fois qu'un mouvement est obtenu, il y a travail.
Comme toute énergie, le **travail** est symbolisé par **W** et s'exprime en **joules (J)**.

► Expression du travail d'une force dans un mouvement de translation

- Le travail dépend de la force exercée et de la distance de déplacement obtenue (fig. 1) :

$$W = F\ell \quad \left\{ \begin{array}{l} F \text{ est la force en newtons (N)} \\ \ell \text{ est la distance en mètres (m).} \end{array} \right.$$

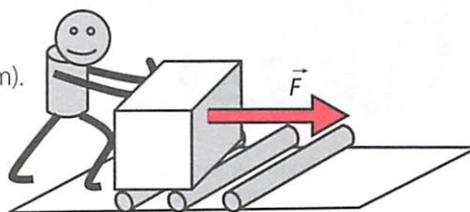


Fig. 1.

- Si la force ne s'exerce pas dans le sens du déplacement, il faut tenir compte de l'angle α formé par ces deux directions (fig. 2).

$$W = F\ell \cos \alpha$$



Fig. 2.

- Le poids d'un corps qui chute d'une hauteur h crée un travail (fig. 3) :

$$W = mgh \quad \left\{ \begin{array}{l} m \text{ est la masse du corps en kilogrammes (kg)} \\ g \text{ est l'accélération de la pesanteur en } m.s^{-2} \\ h \text{ est la hauteur de chute en mètres (m)} \\ W \text{ est le travail en joules (J).} \end{array} \right.$$

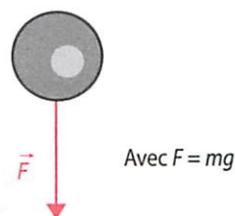


Fig. 3.

► Expression du travail dans une rotation

Une force peut également produire un mouvement de rotation (fig. 4).

Il existe un couple de forces dont le moment est symbolisé par T et qui s'exprime en newton-mètres (N.m).

Le travail effectué au cours d'une rotation est :

$$W = T\theta$$

θ est l'angle de la rotation effectuée en radians (rad) et W est le travail en joules (J).

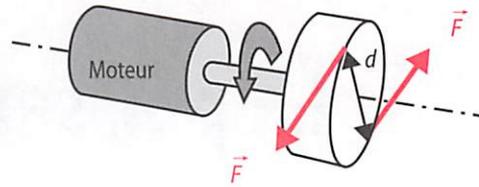


Fig. 4 Le moment du couple est $T = Fd$.

OBSERVONS

● La notion d'énergie est insuffisante

Les moteurs d'un camion et d'une perceuse (fig. 5 et 6) sont très différents et, pour les comparer, il faut considérer l'énergie qu'ils consomment durant le même temps de fonctionnement.

La puissance du moteur du camion est 100 fois plus grande que celle du moteur de la perceuse.



Fig. 5 Ce camion consomme en 1 heure environ 15 litres de carburant, soit une énergie voisine de 80 kWh.

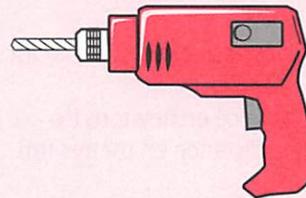


Fig. 6 La même énergie de 80 kWh alimente une perceuse électrique durant environ 100 heures.

● Chaque appareil porte une information relative à sa puissance (fig. 7, 8 et 9)

Pour tout appareil, la **puissance nominale** constitue une information essentielle et obligatoire.

Elle est inscrite directement sur l'appareil ou figure dans la notice technique.



Fig. 7 Sur l'ampoule de la lampe de bureau sont gravées les indications : 230 V / 40 W.

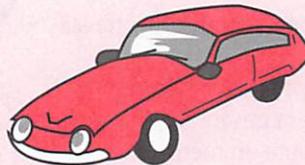


Fig. 8 Sur le catalogue constructeur, la puissance maximale est précisée : 90 ch ou 66 kW.



Fig. 9 Il est précisé pour la machine à laver le linge : 230 V / 2,6 kW.

1. La puissance est une grandeur physique

Le symbole de la puissance est P , elle s'exprime en **watts (W)**.

2. Détermination de la puissance

- La puissance d'une machine correspond à l'énergie qu'elle consomme (ou fournit) pendant l'unité de temps.

$$P = \frac{W}{t} \quad \left\{ \begin{array}{l} W \text{ en joules (J)} \\ t \text{ en secondes (s)} \\ P \text{ en watts (W).} \end{array} \right.$$

- Souvent, l'électricien exprime W en wattheures (Wh), t en heures (h), et P reste en watts (W) :

$$1 \text{ W} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ s}} = \frac{3\,600 \text{ J}}{3\,600 \text{ s}} = \frac{1 \text{ Wh}}{1 \text{ h}}$$

- Quelques ordres de grandeurs :

Lampe à incandescence	60 W
Radiateur électrique	1 kW
Machine-outil du lycée	4 kW de rendement 85 %
Automobile moyenne	50 kW de rendement 45 %
Alternateur de centrale	500 MW de rendement 97 %

3. Puissance développée dans un mouvement

C'est le travail effectué durant l'unité de temps.

Exemple (fig. 10) : je monte une charge de 25 kg d'une hauteur de 6 m en 15 secondes. La puissance développée est déterminable :

- la force exercée pour soulever s'oppose au poids donc :
 $F = mg$ avec $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2} \Rightarrow F = 25 \times 9,81 = 245 \text{ N}$;
- le travail produit est $W = Fh = 245 \times 6 = 1\,470 \text{ J}$;
- la puissance est $P = \frac{W}{t} = \frac{1\,470}{15} \Rightarrow P = 98 \text{ W}$.



Fig. 10.

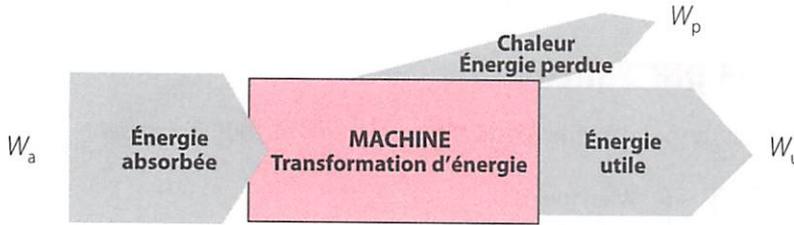
4. Expressions de la puissance d'un mouvement uniforme

- Pour un mouvement de translation : $P = \frac{W}{t} = \frac{F\ell}{t} = F \frac{\ell}{t}$.
Or, la distance parcourue ℓ divisée par le temps t correspond à la vitesse linéaire v , donc : $P = Fv$.
- Pour un mouvement de rotation : $P = \frac{W}{t} = \frac{T\theta}{t} = T \frac{\theta}{t}$.
Or, l'angle décrit θ divisé par le temps t correspond à la vitesse de rotation Ω , donc : $P = T\Omega$.

5. Rendement d'une machine

a) Principes de conservation et de dégradation de l'énergie

Dans une transformation d'énergie, il y a toujours apparition d'énergie thermique même si celle-ci n'est pas désirée.



Nous vérifierons toujours : $W_a = W_u + W_p$.

Le **rendement** (η) est le quotient de l'énergie utile par l'énergie absorbée au cours d'une transformation : $\eta = \frac{W_u}{W_a}$.

Le **rendement est un nombre** sans unité, **inférieur à 1**.

Il est préférable d'exprimer le rendement en pourcentage : $\eta = 0,82 = 82 \%$.

b) Rendement exprimé par rapport aux puissances

Les principes de conservation et de dégradation de l'énergie sont valables pour la puissance (fig. 11) :

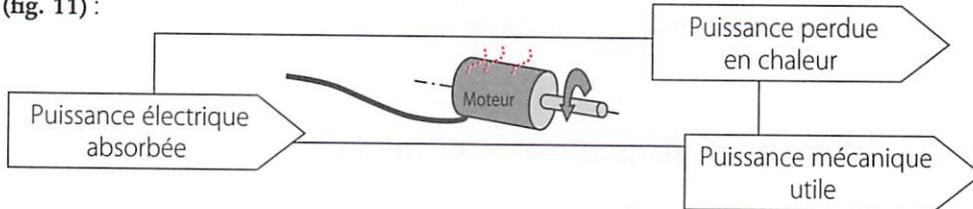


Fig. 11 Le rendement d'un moteur électrique.

$$P_a = P_u + P_p \quad \text{et} \quad \eta = \frac{P_u}{P_a}$$

6. Mesurage de l'énergie électrique

a) Appareil utilisé

L'énergie électrique se mesure avec un compteur wattheur-mètre (fig. 12).

C'est le compteur d'énergie qui se trouve chez tous les consommateurs, il est placé entre le réseau EDF et l'installation électrique de l'utilisateur (fig. 13).

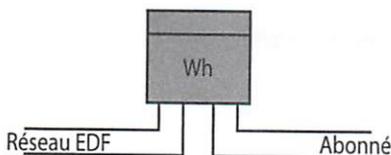


Fig. 13 La symbolisation du compteur.



Fig. 12 Compteur.

b) Constante du compteur

Au milieu du compteur, nous voyons un disque en aluminium marqué d'un trait noir. Ce disque tourne dès que nous consommons de l'énergie électrique, et cela d'autant plus vite que la puissance demandée est plus grande.

L'énergie consommée pour un tour du disque est appelée constante k du compteur :

k : énergie par tour du disque (en Wh/tr).

c) Enregistrement de l'énergie consommée

Le compteur affiche la consommation en kWh. Mécaniquement, le nombre de kWh affiché augmentera d'une unité lorsque le disque aura tourné du nombre de tours correspondant à une consommation de 1 000 Wh.

Exemple :

- Nous lisons sur le compteur $k = 4$ Wh/tr.
Pour un tour du disque : $W = 4$ Wh.
- Après 250 tours : $W = 4 \times 250 = 1\,000$ Wh.
L'affichage de l'énergie augmente donc de 1 kWh.

d) Compteur électronique

Les dernières technologies proposent un compteur numérique dans lequel le disque a disparu, mais où l'énergie électrique consommée crée des impulsions (par exemple, une impulsion correspond à 1 Wh). Les impulsions sont visualisées grâce à un voyant et l'énergie consommée est affichée.

TESTEZ VOS CONNAISSANCES

- Un moteur a une puissance utile nominale de 1,5 kW. Comment se comporte-t-il ?
 - Il absorbe de l'énergie mécanique.
 - Il fournit de l'énergie mécanique.
 - Il absorbe une puissance inférieure à 1 500 W.
 - Il absorbe une puissance supérieure à 1 500 W.
 - Il présente des pertes d'énergie thermique.
- Une lampe est marquée 100 W. Quelle énergie consomme-t-elle en 1 h 30 min de fonctionnement ?
 - 1 300 J.
 - 540 kJ.
 - 150 Wh.
 - 1,3 kWh.
 - 0,15 kWh.
- Que peut-on dire du rendement d'un appareil ?
 - C'est le quotient de la puissance absorbée par la puissance utile.
 - C'est le quotient de la puissance utile par la puissance absorbée.
 - Il est exprimé en watts.
 - C'est un nombre sans unité ou un pourcentage.
- Un barrage hydraulique apporte de l'eau à une turbine, sous conduite forcée. Le débit est de $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et le dénivellé est de 250 m. Calculer le poids de l'eau qui tombe en une seconde ($g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$), puis la puissance absorbée par cette turbine.
- Sur une pompe de relevage d'eau, on a relevé les caractéristiques suivantes :
 - puissance absorbée maximale 220 W ;
 - débit 80 L/min, hauteur d'aspiration 5 m.
 - Calculer le travail effectué par la pompe pendant 30 min de fonctionnement dans les conditions nominales (avec $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$).
 - En déduire la puissance utile de cette pompe et son rendement.
- Une centrale thermique absorbe, en 24 h de fonctionnement, une énergie de 3,2 GWh ; l'alternateur entraîné a une puissance utile de 64 MW et un rendement de 95 %.
 - Quelle est la quantité d'énergie fournie par la turbine à l'alternateur durant ces 24 heures de fonctionnement ?
 - Calculer le rendement de l'ensemble (chaudière, turbine).

3

Intensité d'un courant électrique et tension

Nous allons définir les deux grandeurs fondamentales propres à tout circuit électrique : l'intensité et la tension.

AVANT DE DÉMARRER...

► Comparaison avec un circuit hydraulique

- Nous comprenons aisément que l'eau qui descend par gravité (**fig. 1**) constitue un circuit comparable au circuit électrique :

- le château d'eau correspond au **générateur**,
- la canalisation d'eau est un **conducteur**,
- le robinet est l'**interrupteur**,
- la baignoire sera assimilée au **récepteur**.

- La circulation d'eau dépend de deux facteurs :

- la **différence d'altitude** sans laquelle l'eau ne peut pas circuler (par gravité) de la réserve d'eau vers la baignoire ;
- le **débit d'eau**, c'est-à-dire le volume d'eau circulant, par seconde, dans la canalisation.

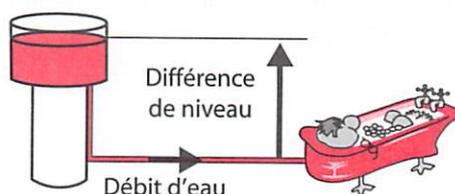


Fig. 1 L'eau qui alimente la baignoire descend du château d'eau.

OBSERVONS

• Notion de différence de potentiel

– Comme pour l'eau, un courant électrique ne peut circuler que s'il existe une différence dite de potentiel entre les deux bornes du générateur (**fig. 2**).

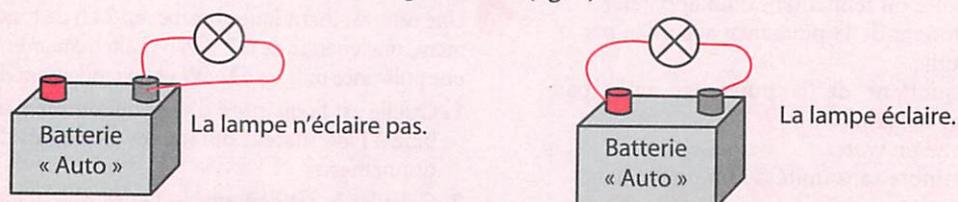


Fig. 2 Sans différence de potentiel, le courant électrique ne peut pas circuler.

– De même, tout dipôle récepteur ne peut être traversé par un courant que s'il existe entre ses bornes une différence de potentiel (fig. 3).

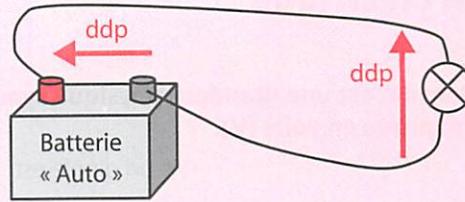


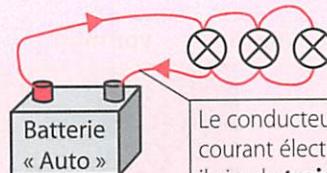
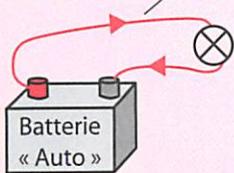
Fig. 3 La différence de potentiel de la batterie d'accumulateurs est appliquée aux bornes de la lampe lorsque l'interrupteur est fermé.

● Notion d'intensité du courant électrique

L'intensité du courant peut être comparée au débit d'eau du circuit hydraulique.

Nous savons que le courant électrique est une circulation organisée d'électrons. L'intensité du courant électrique correspond donc au débit d'électrons (fig. 4).

L'intensité du courant correspond au nombre d'électrons qui circulent pendant chaque seconde.



Le conducteur « chauffe » car le courant électrique est plus intense : il circule **trois fois plus** d'électrons par seconde.

Fig. 4 Un circuit comprenant une lampe, puis trois lampes.

Plus le nombre d'électrons qui circulent à chaque instant est important, plus le courant électrique est intense.

Comme pour le circuit hydraulique, il sera important d'adapter la section du conducteur à l'intensité du courant que l'on désire faire passer.

À SAVOIR

1. Quantité d'électricité

- Nous savons que l'énergie mise en jeu dépend du nombre d'électrons qui circulent.
- La quantité d'électricité Q transportée par un courant électrique correspond au nombre n d'électrons qui ont circulé ($Q = n e$).

**La quantité d'électricité est une grandeur physique symbolisée par Q .
 Q s'exprime en coulombs (C).**

- La quantité d'électricité élémentaire est celle de l'électron, elle est notée e : $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C.
- Autre unité de quantité d'électricité : sur les piles et accumulateurs, la quantité d'électricité utilisable est souvent indiquée en ampères-heures (Ah) : $1 \text{ Ah} = 3\,600 \text{ C}$.

2. Tension électrique

- La différence de potentiel (ddp) est le plus souvent appelée « tension ».

**La tension est une grandeur physique symbolisée par U .
 U s'exprime en volts (V).**

- L'énergie électrique mise en jeu dans un dipôle est proportionnelle à :
 - la tension entre ses bornes ;
 - la quantité d'électricité qui a circulé.

$$W = UQ$$

W en joules (J)
 Q en coulombs (C)
 U en volts (V).

- La tension peut donc être calculée avec la relation $U = \frac{W}{Q}$.
- La tension se représente par une flèche orientée (fig. 5).

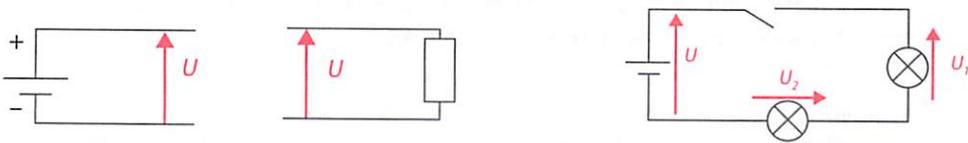


Fig. 5 La tension est représentée par une flèche orientée du moins vers le plus.

- L'appareil qui mesure la tension (fig. 6) est le **voltmètre**.

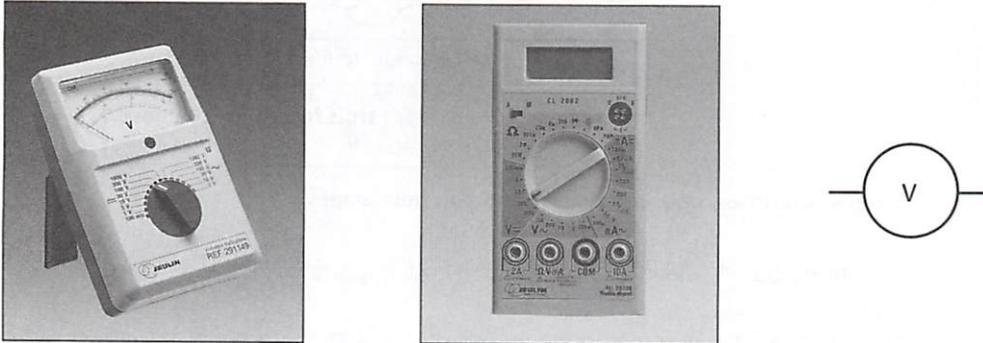


Fig. 6 Un voltmètre analogique, un voltmètre numérique et le symbole du voltmètre.

Branchement du voltmètre : nous devons raccorder les deux conducteurs du voltmètre **toujours en dérivation** entre les deux points du circuit dont on veut déterminer la différence de potentiel (fig. 7).

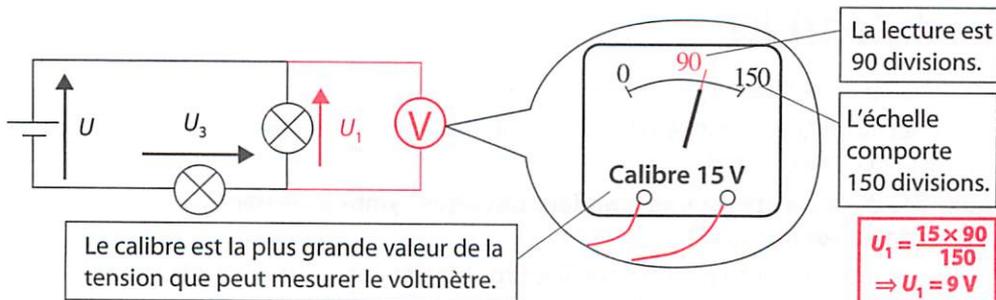


Fig. 7 Un voltmètre analogique mesure U_1 .

3. Intensité du courant électrique

- L'intensité correspond au nombre de coulombs transportés par seconde par le courant électrique.

L'intensité du courant électrique est une grandeur physique symbolisée par I . Elle s'exprime en ampères (A).

- L'intensité est égale à la quantité d'électricité qui circule pendant l'unité de temps :

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

Si Q est exprimée en ampères-heures (Ah), alors t devra être exprimé en heures (h).

- L'intensité d'un courant est symbolisée par une flèche placée sur le circuit électrique et orientée du plus vers le moins (fig. 8).



Fig. 8 La représentation de l'intensité du courant.

- L'appareil qui effectue la mesure de l'intensité est l'**ampèremètre** (fig. 9).

Branchement de l'ampèremètre : le courant électrique dont nous voulons mesurer l'intensité doit traverser l'ampèremètre. L'ampèremètre se branche donc toujours **en série** dans le circuit électrique (fig. 10).

L'ampèremètre est polarisé, sa mesure est positive lorsque le courant entre par la borne « + » et sort par la borne « - » (ou « COM »).

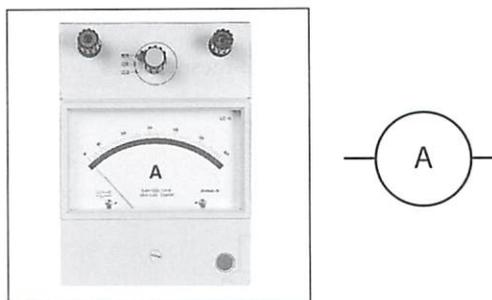


Fig. 9 L'ampèremètre analogique et le symbole de l'ampèremètre.

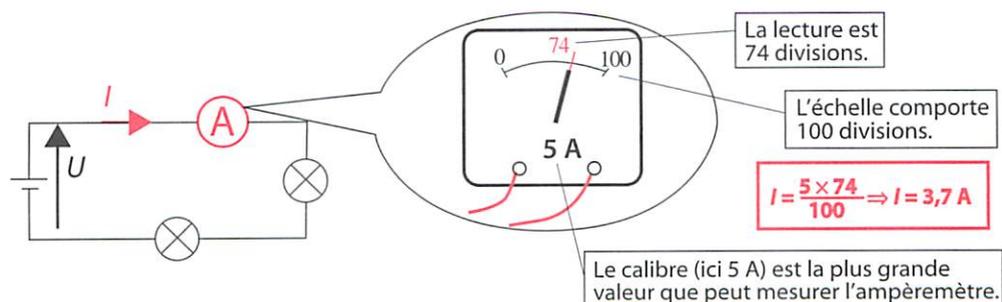


Fig. 10 Un ampèremètre analogique mesure I .

Une pince ampèremétrique ou une pince multifonction, placée autour du conducteur traversé par l'intensité à mesurer, permet d'effectuer une mesure en toute sécurité (fig. 11).

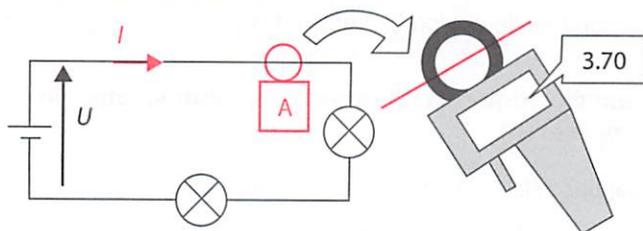


Fig. 11 Une pince ampèremétrique permet la mesure de I sans coupure du circuit.

4. Notion de potentiel

• Seules les différences de potentiel sont mesurables, cependant nous parlons souvent du potentiel (v) d'un point. Par exemple, nous dirons que la différence de potentiel entre A et B est égale au potentiel de A diminué du potentiel de B :

$$U_{AB} = v_A - v_B \text{ et donc } U_{BA} = v_B - v_A = -U_{AB}.$$

- Le potentiel de la terre (ou des masses métalliques reliées à la terre par le conducteur de protection vert/jaune) sert souvent de référence et vaut arbitrairement zéro volt.
- Un voltmètre est **polarisé**, sa mesure est positive lorsque le point de potentiel le plus grand est appliqué à la borne « + » et le point de potentiel le plus petit est relié à la borne « - » (ou « COM »).

TESTEZ VOS CONNAISSANCES

- 1 Dans le circuit électrique suivant, que mesurent les trois ampèremètres ?
- L'intensité du courant dans la lampe.
 - Des valeurs différentes.
 - Rigoureusement la même intensité.

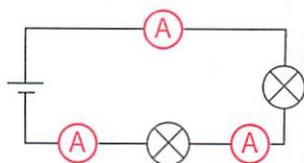
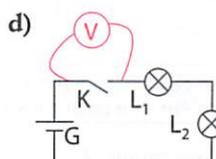
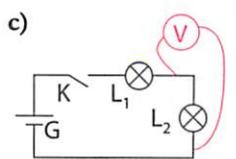
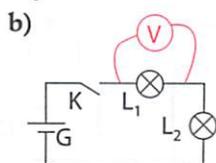
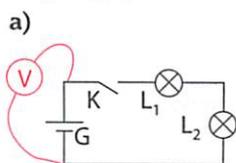


Fig. 12.

- 2 Je désire mesurer la tension aux bornes de la lampe L_1 ; quel est le bon montage du voltmètre ?



- 3 Un voltmètre analogique de calibre 240 V indique 75 divisions sur l'échelle de 120 divisions. Quelle est la valeur de la tension mesurée ?
- 75 V.
 - 150 V.
 - 18 000 V.
 - 37,5 V.
- 4 Une batterie d'accumulateurs porte les inscriptions 12 V / 45 Ah. Quelle quantité d'électricité peut-elle délivrer ?
- 162 000 C.
 - 80 C.
 - 0,012 5 C.
 - 230 V.
 - 12 V.
 - 20 kV.

- 5 Un accumulateur porte les informations suivantes : 1,2 V / 0,5 Ah. Il délivre un courant d'intensité $I = 50$ mA constante.
- Quelle énergie électrique peut-il fournir ?
 - Durant combien de temps ce générateur va-t-il fonctionner avant décharge complète ?
- 6 On recharge durant 12 heures une batterie d'accumulateurs avec un courant constant d'intensité 5 A. Quelle quantité d'électricité correspond à cette charge ? Sachant que le rendement de la charge est de 80 %, quelle sera la quantité d'électricité disponible de la batterie rechargée ?

4

Courant continu et courants alternatifs

Les piles et accumulateurs génèrent un courant dit « continu », le réseau d'énergie électrique français distribue un courant dit « alternatif ».

AVANT DE DÉMARRER...

► Différence entre le courant continu et les courants variables

- Un **courant continu** est caractérisé par une valeur constante, c'est-à-dire qui ne varie pas dans le temps (fig. 1).

À chaque instant, $i = I$.

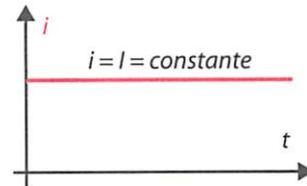


Fig. 1 Un courant continu.

- Lorsqu'un courant a une **intensité instantanée i** qui varie dans le temps, il s'agit d'un **courant variable**.

Un courant variable peut être (fig. 2) :

- **unidirectionnel** lorsqu'il circule toujours dans le même sens ;
- **bidirectionnel** s'il circule tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre ;
- **périodique** s'il se répète identiquement dans le temps.

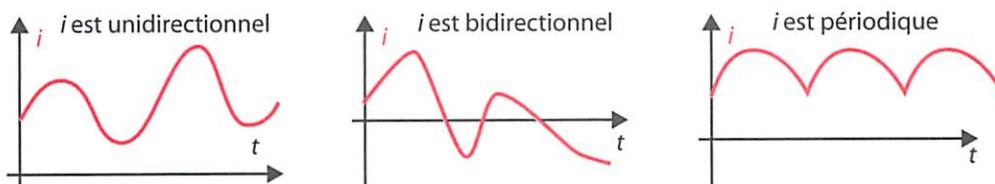


Fig. 2 Courants variables.

OBSERVONS

● L'oscilloscope

Un oscilloscope est un appareil (fig. 3) qui permet de voir évoluer dans le temps une tension, ou un courant, par l'intermédiaire d'une sonde de courant (pince ampèremétrique par exemple).

Un spot (point lumineux) se déplace horizontalement sur un écran en fonction du temps à une vitesse réglable (base de temps).

La position verticale dépend de la tension (ou du courant) appliquée à l'entrée de l'oscilloscope. Un étalonnage permet de lire la valeur instantanée de cette tension.

Dans la figure 4, nous observons successivement les tensions continues $U = 0\text{ V}$, $U = 12\text{ V}$, puis $U = -5\text{ V}$.

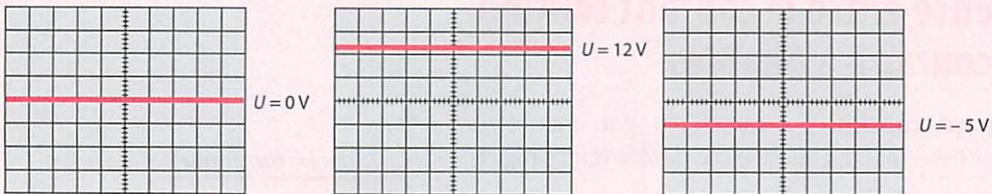


Fig. 4 Des traces de tensions continues pour une sensibilité verticale de 5 volts par division (5 V/div).

Les oscilloscopes bicourbes permettent de visualiser deux grandeurs simultanément ; ils possèdent alors deux entrées.

● Observation d'une grandeur périodique

L'oscilloscope permet d'observer les grandeurs périodiques : après réglages de la base de temps et de la sensibilité verticale, l'écran visualise la totalité du signal avant qu'il ne se répète identiquement (fig. 5). Le système de synchronisation de l'appareil trace toujours la même image tant que ce signal existe.

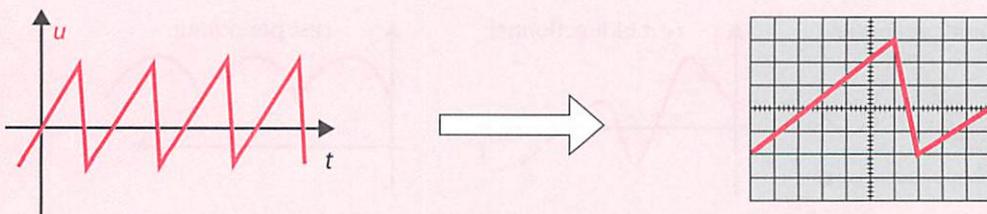


Fig. 5 Une tension en dents de scie observée après réglage de l'oscilloscope.

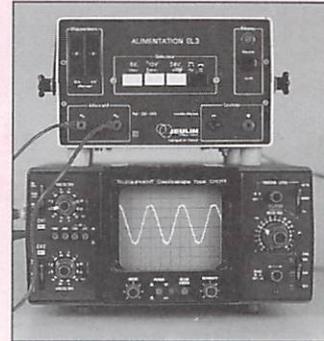


Fig. 3 Un oscilloscope permet ici d'observer une tension variable.

1. Valeurs caractéristiques d'une grandeur périodique

a) Période et fréquence

- La **période T** est une durée (en secondes) : c'est le temps que met la grandeur périodique à se reproduire identiquement.
- La **fréquence f** correspond au nombre de périodes par seconde :

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

La période et la fréquence peuvent se déduire de l'observation oscillographique (fig. 6).

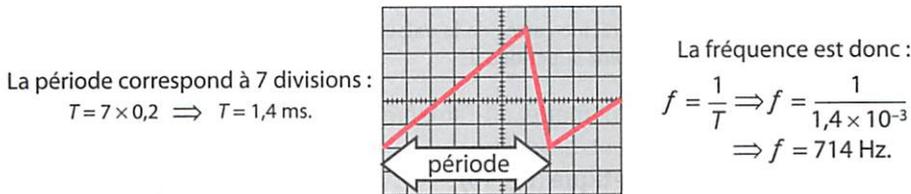


Fig. 6 La base de temps étalonnée de l'oscilloscope est réglée sur 0,2 ms/div.

Le fréquencemètre, qui se branche comme un voltmètre, permet de mesurer directement la fréquence d'une tension.

b) Valeur maximale ou amplitude

C'est la valeur instantanée la plus grande rencontrée durant la période.

Elle est notée \hat{U} s'il s'agit d'une tension ou \hat{I} pour un courant.

Dans la figure 6, l'oscilloscope est calibré sur l'entrée à 2 V/div, la tension est maximale avec 3 divisions : $\hat{U} = 3 \times 2$, soit $\hat{U} = 6$ V.

c) Valeur moyenne

- Elle est notée par le symbole de la grandeur (en majuscule) surmonté d'une barre : \bar{U} pour une tension ou \bar{I} pour un courant.

Prenons le courant périodique carré de la figure 7, sa valeur moyenne est $\bar{I} = 1,5$ A.

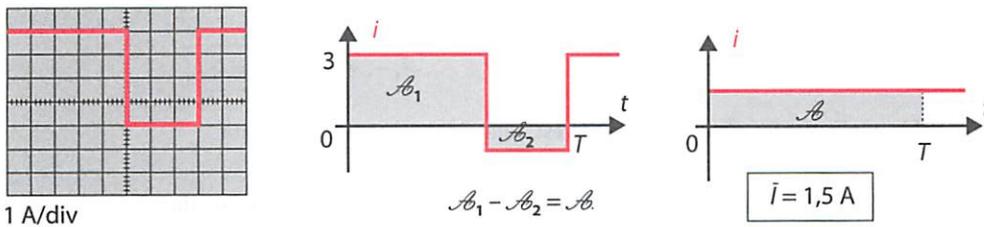


Fig. 7 La valeur moyenne de i est la valeur du courant continu qui créerait la même aire \mathcal{A} durant la période T .

- **Mesure de la valeur moyenne** : le voltmètre, ou l'ampèremètre, quelle que soit la nature du courant, devra être :

- soit **analogique** de type **magnétoélectrique** (fig. 8) ;
- soit **numérique de tout type** sur la position « DC » (ou « = »).



Fig. 8 Le symbole d'un appareil magnétoélectrique.

d) Valeur efficace

- Elle est notée par le symbole de la grandeur (en majuscule) :

U ou I

La valeur efficace est très importante : c'est toujours elle qui est précisée sur les récepteurs ou les générateurs électriques.

Prenons le courant périodique carré de la **figure 9**. Sa valeur efficace est $I = 2,45$ A.

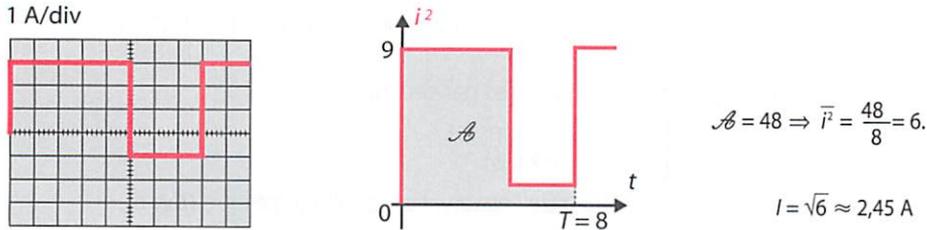


Fig. 9 La valeur efficace de i est la racine carrée de la valeur moyenne du carré de i durant la période T .

- **Mesure de la valeur efficace** : le voltmètre, ou l'ampèremètre, quelle que soit la nature du courant, devra être :
 - soit **analogique** de type **ferromagnétique** (**fig. 10**) ;
 - soit **numérique de type RMS** (ou TRMS) AC + DC sur la **position « AC »** ou « ~ ».



Fig. 10 Le symbole d'un appareil ferromagnétique.

Un appareil RMS AC seul ne conviendra que pour la mesure des valeurs efficaces des grandeurs alternatives.

2. Courant alternatif

Un courant alternatif ou une tension alternative est bidirectionnel, et son aire positive \mathcal{A}_1 est égale à l'aire négative \mathcal{A}_2 (**fig. 11**).

1 A/div (sonde 100 mV/A)

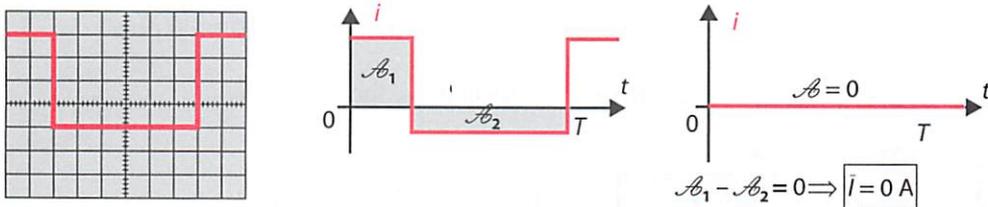


Fig. 11 L'aire résultante \mathcal{A} sur une période est nulle, i est un courant alternatif.

Une grandeur périodique **alternative** est caractérisée par une **valeur moyenne nulle**.

Un courant alternatif symétrique (**fig. 12**) a une alternance positive symétrique de l'alternance négative.

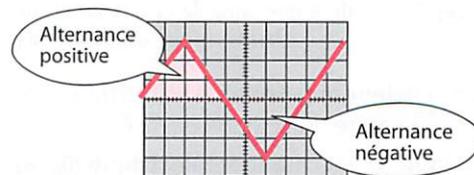


Fig. 12 Une tension triangulaire.

5

Lois des circuits

Les circuits sont rarement simples et il nous faut connaître les lois qui régissent tensions et intensités dans tous types de circuits.

AVANT DE DÉMARRER...

► Dipôle générateur et dipôle récepteur

Le générateur fournit le courant électrique.

Le courant sort par la borne « + » du générateur. **La flèche tension aux bornes du générateur est dans le même sens que le courant (fig. 1a).**

Le récepteur est traversé par le courant. Il absorbe de l'énergie électrique et fournit une autre forme d'énergie. **La flèche de la tension aux bornes du récepteur est dirigée en sens contraire de celui du courant (fig. 1b).**

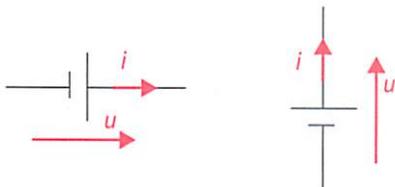


Fig. 1a Convention générateur.

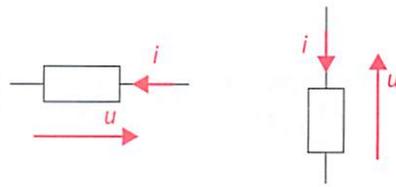


Fig. 1b Convention récepteur.

► Groupement série et groupement dérivation

Les dipôles sont en série lorsque le chemin du courant électrique est unique (fig. 2a). En dérivation, chaque raccordement constitue un **nœud** (fig. 2b).

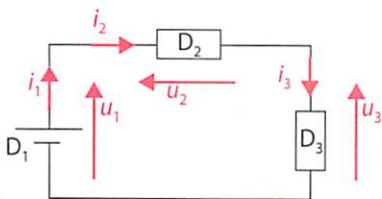


Fig. 2a Groupement en série.

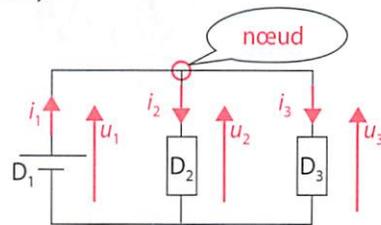


Fig. 2b Groupement en dérivation.

► Circuit complexe

Un circuit complexe associe des dipôles dans un montage mixte.

Il convient d'identifier les dipôles générateurs et les dipôles récepteurs. Les sens des courants et des tensions sont alors imposés (fig. 3).

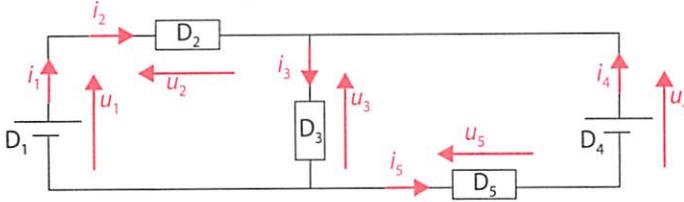


Fig. 3 Un circuit associant cinq dipôles ; D_1 et D_4 sont générateurs, les autres dipôles sont récepteurs.

OBSERVONS

• Dans un circuit série

En courant continu, nous avons mesuré les tensions et les intensités pour les différents dipôles d'un circuit série (fig. 4).

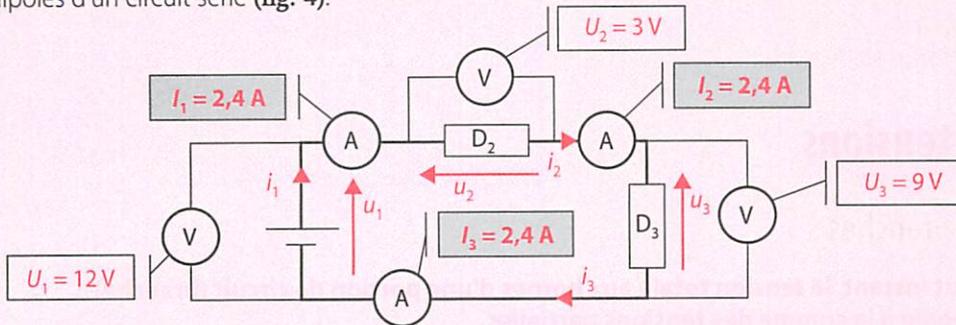


Fig. 4 Mesures des grandeurs pour un circuit série.

Les intensités des courants sont égales : $I_1 = I_2 = I_3$. Selon toute logique, il n'existe qu'un seul chemin pour les électrons.

L'intensité du courant est la même tout au long du circuit série.

Les tensions U_1 , U_2 et U_3 sont différentes mais nous observons que $U_1 = U_2 + U_3$.

• Dans un circuit dérivation

En courant continu, nous avons mesuré les tensions et les intensités pour les différents dipôles d'un circuit dérivation (fig. 5).

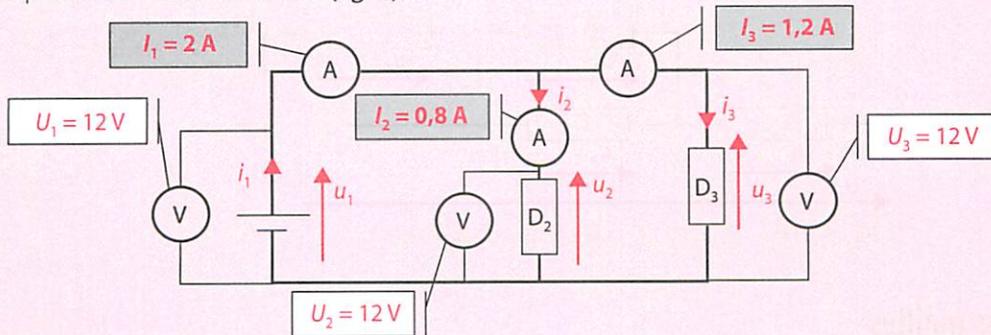


Fig. 5 Mesures des grandeurs dans un circuit dérivation.

Les intensités des courants sont différentes : $I_1 \neq I_2 \neq I_3$ mais nous observons que $I_1 = I_2 + I_3$. Les tensions U_1 , U_2 et U_3 sont égales : $U_1 = U_2 = U_3$.

La tension est commune aux bornes des dipôles en dérivation.

À SAVOIR

1. Loi des nœuds

À tout instant, la somme des intensités des courants qui arrivent à un nœud est égale à la somme des intensités des courants qui en partent.

Pour le nœud de la **figure 6**, nous écrivons :

$$i_1 + i_4 = i_3 + i_2 + i_5$$

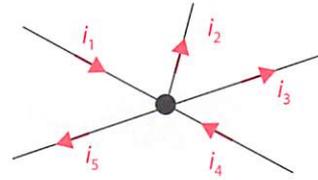


Fig. 6

Cette loi s'applique aux valeurs instantanées quel que soit le type de courant.

La loi des nœuds en courant continu peut s'écrire en lettres majuscules puisque $i = I$. Ainsi, pour la **figure 6** : $I_1 + I_4 = I_3 + I_2 + I_5$.

2. Loi des tensions

a) Loi des branches

À tout instant, la tension totale aux bornes d'une portion de circuit (branche) est égale à la somme des tensions partielles.

Ainsi, nous écrivons : $u = u_1 + u_2 + u_3$ (**fig. 7**).

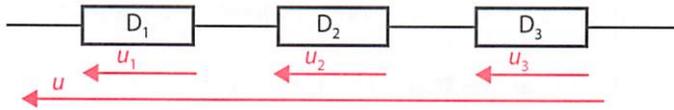


Fig. 7 Une branche comportant trois dipôles récepteurs.

Cette loi s'applique aux valeurs instantanées quelle que soit la nature du courant.

La **figure 8** montre des applications de cette loi.

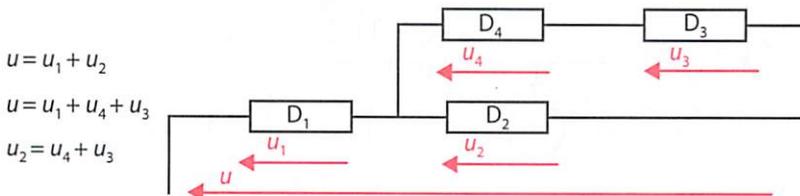


Fig. 8 Dans un circuit, il y a souvent plusieurs branches.

b) Loi des mailles

Dans un circuit fermé (une maille), la somme algébrique des tensions lues en tournant dans un même sens est toujours nulle : $\sum u = 0$.

Dans la **figure 9**, nous lisons : $u_1 - u_2 - u_3 + u_4 = 0$ (ou, pour un sens opposé de lecture : $-u_1 - u_4 + u_3 + u_2 = 0$).

La loi des branches appliquée entre A et B vérifie :

$$u_1 + u_4 = u_2 + u_3.$$

Cette équation est identique à :

$$u_1 - u_2 - u_3 + u_4 = 0$$

obtenue en appliquant la loi des mailles.

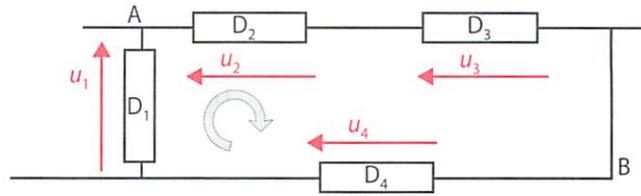


Fig. 9 Une maille.

Comme pour les lois précédentes, la loi des mailles est une relation entre valeurs instantanées, toujours vraie quelle que soit la nature du courant.

3. Puissance et énergie électriques dans un dipôle fonctionnant en courant continu

a) Énergie électrique

- Le dipôle présente à ses bornes une tension U , il est traversé par une quantité d'électricité Q durant le temps t de fonctionnement considéré (fig. 10).

$$W = UQ \quad \text{et} \quad Q = It$$

- En courant continu, l'énergie s'écrit :

$$W = UIt \quad \left\{ \begin{array}{l} U \text{ en volts (V)} \\ I \text{ en ampères (A)} \\ t \text{ en secondes (s)} \\ W \text{ en joules (J)}. \end{array} \right.$$

Si le temps t est exprimé en heures, alors l'énergie W sera en wattheures (Wh).

Cette énergie électrique est **absorbée** par un dipôle récepteur ; si le dipôle est générateur, ce sera de l'énergie électrique **fournie**.

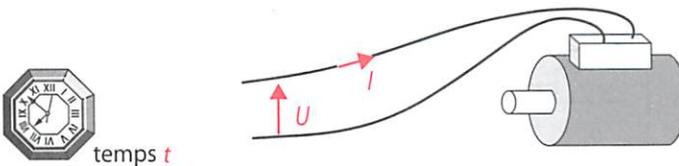


Fig. 10 Un moteur absorbe $W_a = UIt$.

b) Puissance électrique du dipôle

Nous savons que $P = \frac{W}{t} \Rightarrow P = \frac{UIt}{t}$.

La puissance électrique d'un dipôle en courant continu est égale au produit de l'intensité du courant qui le traverse par la tension existant entre ses bornes :

$$P = UI \quad \left\{ \begin{array}{l} U \text{ en volts (V)} \\ I \text{ en ampères (A)} \\ W \text{ en joules (J)}. \end{array} \right.$$

Dans la **figure 11**, le générateur fournit sa puissance utile $P_u = UI$ et le récepteur D_2 absorbe une puissance électrique $P_a = U_2I$.

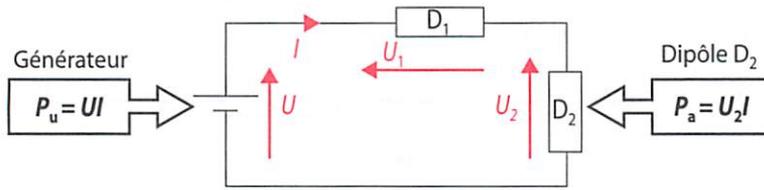


Fig. 11.

Attention !

- Ces lois sont **vraies en courant continu** seulement.

Écrire les relations précédentes pour des grandeurs périodiques n'aurait pas de sens, puisque ces lois ne s'appliquent pas aux valeurs efficaces.

- Cependant, l'expression de la puissance reste **vraie en valeurs instantanées**. Ainsi, à chaque instant, les dipôles vérifient, quelle que soit la nature du courant : $p = ui$.

TESTEZ VOS CONNAISSANCES

- 1 En courant continu, un moteur absorbe une puissance de 300 W en fonctionnant sous une tension de 24 V. Quelle est l'intensité du courant qui le traverse ?

- a) $I = 80$ mA. c) $I = 8$ A.
b) $I = 12,5$ A. d) $I = 24$ A.

- 2 Quelles sont les relations de tensions exactes pour la **figure 12** ?

- a) $u_1 = u_2 + u_3$.
b) $u_4 = u_2 + u_3$.
c) $u_1 - u_2 + u_3 = 0$.
d) $u_1 = u_2 + u_4$.
e) $0 = u_4 + u_5 - u_2 - u_3$.
f) $u_1 = u_4 + u_5$.

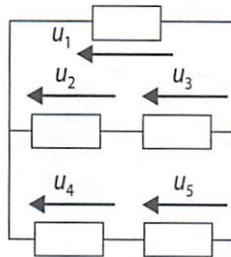


Fig. 12.

- 3 Quelle est l'intensité du courant continu I (**fig. 13**) ?

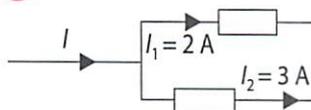


Fig. 13.

- a) $I = 1$ A.
b) $I = 5$ A.
c) $I = 2,5$ A.
d) $I = 6$ A.

- 4 Quelle est la tension U_2 (**fig. 14**) ?

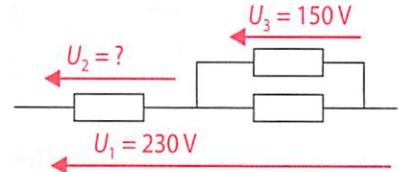


Fig. 14.

- a) $U_2 = 80$ V. c) $U_2 = 230$ V.
b) $U_2 = 150$ V. d) $U_2 = 380$ V.

- 5 Un moteur à courant continu fonctionne durant quatre heures en absorbant un courant d'intensité six ampères sous une tension de 230 V.

1. Calculer la puissance absorbée du moteur.
2. Déterminer l'énergie électrique consommée.

- 6 Un fer à repasser de puissance 1 200 W fonctionne sous la tension de 230 V. Calculer :

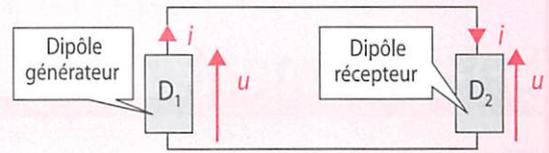
1. l'énergie électrique et la quantité d'électricité nécessaires à un fonctionnement ininterrompu de 2 h 30 min ;
2. l'intensité du courant électrique absorbé.

PRÉPARATION À L'EXAMEN

L'ESSENTIEL

- Dans tout circuit électrique, nous trouvons nécessairement :
 - un **générateur**, source d'énergie électrique ;
 - un **récepteur** qui transforme l'énergie électrique en une autre énergie ;
 - des **conducteurs** chargés de transporter le courant électrique.
- L'énergie W s'exprime en joules (unité légale) ou en wattheures ($1 \text{ Wh} = 3\,600 \text{ J}$).
- Le **travail mécanique** est de l'énergie : $W = F \times \ell$.
avec W en joules (J) ; F en newtons (N) ; ℓ en mètres (m).
- La **puissance** P s'exprime en watts (W) ; elle est l'énergie produite (ou absorbée) pendant l'unité de temps : $P = \frac{W}{t}$ avec W en joules (J) ; t en secondes (s).
- Dans toute **transformation d'énergie** : $W_a = W_u + W_p$ et donc $P_a = P_u + P_p$.
Le **rendement** $\eta = \frac{W_u}{W_a} = \frac{P_u}{P_a}$ est toujours inférieur ou au plus égal à 1 (ou à 100 %).

- Un **dipôle** présente deux bornes. Il est traversé par un **courant électrique d'intensité** I (en ampères) s'il existe entre ses bornes une **tension** U (en volts).

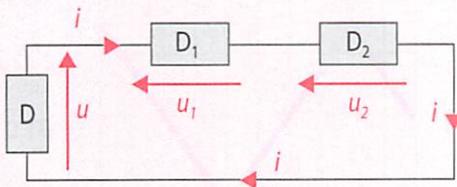


- Pour un dipôle placé sous une tension continue U (en V) et traversé par un courant continu d'intensité I (en A), nous vérifions toujours :

$$P = UI \text{ et } W = UIt.$$

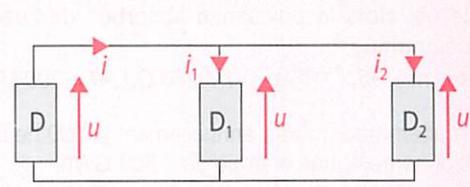
- La **quantité d'électricité** $Q = It$ s'exprime en coulombs ou en ampères-heures ($1 \text{ Ah} = 3\,600 \text{ C}$).
- **Lois des circuits**

Dipôles en série



L'intensité est la même en tout point du circuit. **Loi des branches** : $u = u_1 + u_2$.

Dipôles en dérivation



Loi des nœuds : $i = i_1 + i_2$.

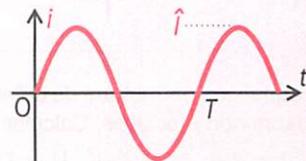
La tension u est commune à chaque dipôle.

- Les **grandeurs périodiques** sont des grandeurs variables qui se répètent identiquement dans le temps à la **fréquence** $f = \frac{1}{T}$, avec f en hertz (Hz).
La **période** T s'exprime en secondes (s).



- Le **courant alternatif sinusoïdal** est celui fourni par EDF. Les tensions et les courants sinusoïdaux sont des grandeurs alternatives périodiques caractérisées par :

$$\bar{i} = 0 \text{ et } I = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}}.$$



Exercice résolu

ÉNONCÉ

Un moteur électrique à courant continu absorbe un courant d'intensité 12 A lorsqu'il est alimenté sous une tension de 190 V.

Il fournit alors une puissance de 1 900 W.

Quel est son rendement ?

SOLUTION

L'expression du rendement est : $\eta = \frac{P_u}{P_a}$.

$$P_u = 1\,900 \text{ W}$$

$$P_a = UI \Rightarrow P_a = 190 \times 12 \text{ soit } P_a = 2\,280 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \Rightarrow \eta = \frac{1\,900}{2\,280} = 0,833 \text{ soit } \boxed{\eta = 83,3 \%}$$

Entraînement

1 En montagne, une usine produit de l'énergie électrique grâce à une chute d'eau qui, à pleine puissance, délivre 80 m³ par seconde.

Le dénivelé est de 250 mètres.

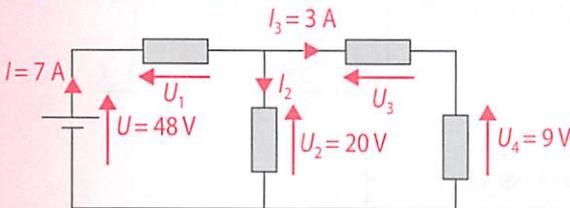
1. Quelle masse d'eau entraîne la turbine durant 20 minutes de fonctionnement ?
2. Calculer le travail correspondant produit par la chute d'eau (avec $g = 10$).
3. Quelle est alors la puissance absorbée de l'usine hydroélectrique ?

Résultats : $m = 96 \times 10^6 \text{ kg}$; $W = 240 \text{ GJ}$; $P = 200 \text{ MW}$.

2 Un alternateur fournit annuellement (3 000 heures de fonctionnement) une énergie de 1 500 GWh. Calculer la puissance absorbée par cet alternateur sachant que son rendement est 96 %.

Résultat : $P = 521 \text{ MW}$.

3 Soit le circuit schématisé ci-dessous :



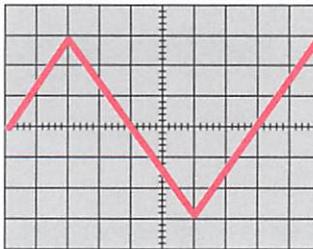
Écrire les équations permettant de déterminer les valeurs des grandeurs non précisées. Calculer ces grandeurs.

Résultats : $I_2 = 4 \text{ A}$; $U_1 = 28 \text{ V}$; $U_3 = 11 \text{ V}$.

4 La tension sinusoïdale entre un fil de phase et la terre d'un circuit haute tension (HTA) est $V = 11,6 \text{ kV}$. Quelle est la tension maximale atteinte ?

Résultat : $V_{\max} = 16\,400 \text{ V}$.

5 Le relevé oscillographique d'une tension est reproduit ci-dessous :



Les réglages :
BT 0,2 ms/div
Y 0,5 V/div.

Préciser :

1. la nature de cette tension ;
2. la valeur maximale de u ;
3. la fréquence de u .

Résultats : *alternative triangulaire ; 1,5 V ; 625 Hz.*

6 La mesure de l'intensité d'un courant continu effectuée sur le calibre 300 mA d'un ampèremètre analogique donne 87 divisions sur une échelle comportant 150 divisions.

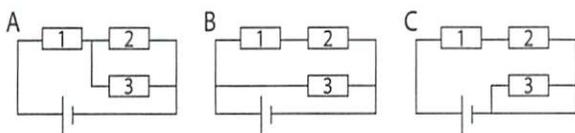
Calculer cette intensité.

Résultat : $I = 0,174 \text{ A}$.

7 À vitesse stabilisée, une automobile consomme 6 litres de carburant en 1 heure. Chaque litre correspond à une énergie de 11 kWh.

Calculer la puissance utile du moteur thermique si son rendement dans ces conditions de fonctionnement est de 55 %.

8 Placer « 1 » dans la case correspondant à une affirmation vraie, et « 0 » pour une affirmation fausse dans chacun des trois cas suivants :



	A	B	C
Les récepteurs 1 et 2 sont en série			
Les récepteurs 2 et 3 sont en série			
Les récepteurs 1 et 2 sont en dérivation			
Les récepteurs 2 et 3 sont en dérivation			
Il n'y a pas de courant dans le récepteur 3			

9 Un radiateur électrique de 2 000 W fonctionne sous une différence de potentiel de 230 V.

Calculer :

- l'intensité du courant électrique qui traverse ce radiateur ;
- l'énergie absorbée en 12 h de fonctionnement ;
- le coût de l'énergie consommée si le kWh est facturé 0,60 F.

10 Un accumulateur (vendu sous l'appellation abusive de pile rechargeable) porte les indications 1,2 V / 0,5 Ah.

- Quelle est sa durée de fonctionnement pour un usage à courant continu constant d'intensité 25 mA ?
- Calculer l'énergie électrique ainsi fournie.

11 Une lampe à incandescence, branchée sur le secteur de tension 230 V, fonctionne durant vingt minutes.

Le disque du compteur d'énergie électrique, qui porte l'indication 4 Wh/tr, effectue alors exactement huit tours.

- Calculer l'énergie électrique consommée par la lampe.
- Calculer la puissance de la lampe.

12 Un courant sinusoïdal de fréquence 60 Hz a une valeur maximale de 7,07 A.

Calculer sa période et son intensité efficace.

13 Un moteur de puissance utile 5,5 kW a un rendement de 84 %. Il fonctionne sous une tension de 240 V.

Calculer :

- la puissance absorbée par ce moteur ;
- l'intensité du courant qui le traverse ;
- l'énergie perdue en chaleur pour un fonctionnement dans ces conditions durant 2 h 30 min.

14 Pour la mise en route d'un moteur thermique, une batterie d'accumulateurs délivre un courant d'intensité 180 A durant 10 secondes.

- Calculer la quantité d'électricité fournie.
- Calculer l'énergie électrique alors fournie au démarreur sachant que la tension aux bornes de la batterie était de 10 V.
- Quelle est la puissance absorbée par le démarreur ? Effectuer ce calcul de deux façons différentes et vérifier.

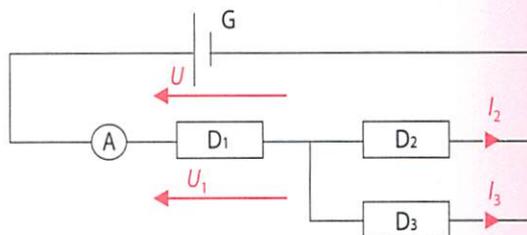
15 Une lampe à incandescence dont la valeur de la puissance est illisible est installée en série avec un ampèremètre. Un voltmètre mesure la tension entre ses bornes.

L'ampèremètre comporte 100 divisions et indique 53 divisions sur le calibre 0,5 A.

Le voltmètre analogique de calibre 300 V indique 114 divisions sur une échelle de 150 divisions.

Quelle est la puissance de cette lampe ?

16 Soit le montage suivant :



On donne :

$$U = 230 \text{ V} ; U_1 = 140 \text{ V} ; I_2 = 2,25 \text{ A} ; I_3 = 1,75 \text{ A}.$$

- Quelle est la mesure de l'ampèremètre ?
- Calculer la tension aux bornes du dipôle D_2 .

17 Un radiateur électrique porte les indications 1 500 W / 230 V.

Il est raccordé au réseau 230 V.

- Calculer l'intensité du courant qui le traverse.
- Quelle sera l'énergie consommée chaque jour pendant l'hiver (durant cette période, le radiateur fonctionne en moyenne 17 min par heure) ?

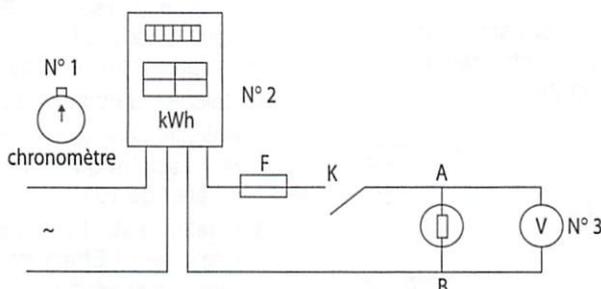
18 Un chariot électrique est capable d'élever une palette chargée d'une masse de 300 kg d'une hauteur de 4 mètres en 5 secondes ($g = 10 \text{ m.s}^{-2}$).

Calculer la puissance fournie par le moteur de levage.

Problème d'examen

19 Afin de déterminer expérimentalement la puissance électrique consommée par un dipôle, l'expérience suivante a été réalisée en salle d'essais et mesures.

Schéma du montage :



Le dipôle est connecté entre les points A et B du circuit.

On ferme l'interrupteur K et on mesure :

- la durée t nécessaire pour que le disque du compteur d'énergie fasse 10 tours ;
- la tension U aux bornes du dipôle.

L'expérience est successivement réalisée avec une lampe, puis un petit radiateur.

Tableau de mesure :

Dipôle	Lampe	Radiateur
t (s)	570	94
U (V)	230	230

1. Cocher les cases correspondant aux bonnes réponses :

- le courant électrique traversant le dipôle est : alternatif continu
- l'appareil de mesure n° 3 est : un ampèremètre un voltmètre un wattmètre
- l'appareil de mesure n° 3 permet de mesurer : l'intensité du courant la tension la puissance

2. La constante du compteur d'énergie est 1,6 Wh/tr. Ceci signifie que lorsque le disque du compteur a effectué un tour, le dipôle a consommé une énergie de 1,6 wattheure.

- Indiquer, lors de cette expérience, le nombre de tours effectué par le disque du compteur après fermeture de l'interrupteur K.
- Compléter le tableau ci-dessous :

Dipôle	Lampe	Radiateur
t (s)	570	94
U (V)	230	230
W (Wh)		
W (J)		
P (W)		

Rédiger vos calculs dans le cas de la lampe.

3. On dispose de trois fusibles de caractéristiques suivantes :

fusible 1 : 0,5 A/250 V ; fusible 2 : 1,25 A/250 V ; fusible 3 : 3 A/250 V.

Après avoir calculé l'intensité du courant traversant le dipôle dans chaque cas de l'expérience précédente, déterminer le fusible qu'il faut choisir pour protéger ce dipôle.

PARTIE 2

CIRCUITS RÉSISTIFS

6	Résistor et loi d'Ohm.....	p. 40
7	Variation de la résistance	p. 45
8	L'effet Joule	p. 49
9	Association de résistors	p. 53
10	Rhéostat et potentiomètre	p. 57
	<i>PRÉPARATION À L'EXAMEN</i>	p. 61

6

Résistor et loi d'Ohm

Chauffage, cuisson... sont des fonctions que réalisent parfaitement les récepteurs électriques destinés à produire uniquement de la chaleur.

Nous allons définir les caractéristiques de cette famille d'appareils.

AVANT DE DÉMARRER...

Transformer l'énergie électrique en énergie thermique (chaleur) est l'objectif unique des récepteurs purement thermiques.

► **Convention**

Nous appellerons « **résistor** » l'élément chauffant du récepteur électrique purement thermique. Ainsi, le thermoplongeur de la **figure 1** est un résistor.

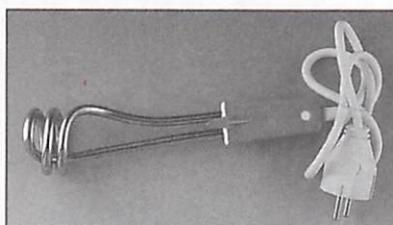


Fig. 1 Ce thermoplongeur permet de chauffer un liquide.

Le **symbole général d'un résistor** est celui de la **figure 2**.

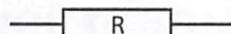


Fig. 2

► **Précautions d'emploi**

– Chaque résistor est **limité en puissance**. Cela correspond en principe à une tension nominale de fonctionnement : dépasser cette tension conduit à la destruction de l'élément chauffant (augmentation de la puissance donc de la chaleur produite).

Une bouilloire marquée 110 V sera détruite lors d'une mise sous tension de 230 V.

– Le résistor est un **dipôle passif, non polarisé**, qui fonctionne en courant continu comme en courant alternatif.

Placer un résistor de 230 V sous une tension continue $U = 230$ V, ou sous la tension sinusoïdale de valeur efficace $U = 230$ V conduit au même résultat : même puissance, même quantité de chaleur obtenue.

OBSERVONS

Nous allons étudier le comportement d'un radiateur électrique portant les indications : 230 V / 1 000 W.

● Étude expérimentale

- Objectif : relever les valeurs efficaces de la tension et de l'intensité du courant traversant le résistor lorsque la tension d'alimentation varie.
- Montage d'étude : il est donné sur la **figure 3**.

Nous alimentons le résistor en courant continu, puis en courant alternatif sinusoïdal.

La valeur efficace de u est réglée successivement dans chaque cas de 0 à $U_N = 230$ V.

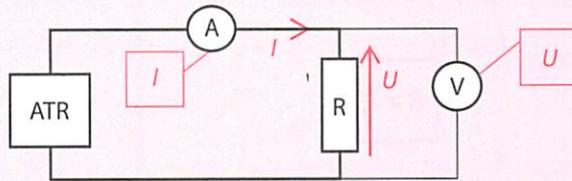


Fig. 3 Le résistor est alimenté sous tension réglable (ATR).

● Relevés et calculs

Courant continu	U (en V)	0	40	80	120	160	200	220	230	240*
	I (en A)	0	0,86	1,71	2,54	3,34	4,13	4,49	4,66	4,84
Courant sinusoïdal	U (en V)	0	40	80	120	160	200	220	230	240
	I (en A)	0	0,85	1,69	2,53	3,36	4,16	4,53	4,69	4,88
	$\frac{U}{I}$		47	47	47	48	48	49	49	49
	$P = UI$	0	34	137	305	534	826	988	1 072	1 162

* La mesure pour $U = 240$ V est autorisée car le récepteur supporte une surcharge de 6 % (marge du réseau EDF).

Tableau 1

● Analyse

- Les valeurs efficaces de u et i en courant sinusoïdal correspondent aux valeurs relevées en courant continu. Le comportement de l'élément chauffant est identique en courant continu et en courant sinusoïdal.
- Le tracé (**fig. 4**) de U en fonction de I donne sensiblement une droite passant par l'origine (fonction linéaire). Cela prouve que la tension aux bornes du résistor est proportionnelle à l'intensité efficace du courant qui le traverse.

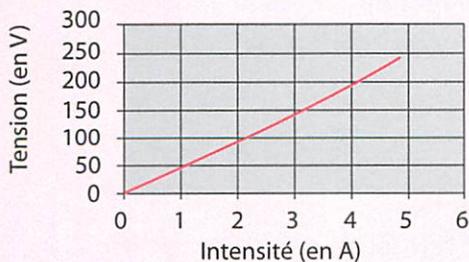


Fig. 4 Représentation de la courbe $U = f(I)$ pour un résistor linéaire.

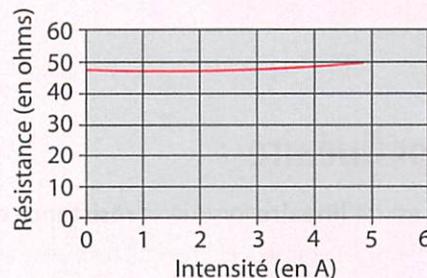


Fig. 5 Le rapport $\frac{U}{I}$ est constant.

- La puissance calculée du radiateur dépend de l'intensité du courant qui le traverse ; elle est sensiblement égale à 1 000 W lorsque le radiateur est sous sa tension nominale.

À SAVOIR

1. Résistance

- La pente de la fonction linéaire (fig. 4) détermine une caractéristique fondamentale du résistor, c'est sa résistance.

La résistance d'un résistor est une grandeur physique symbolisée par R . Elle s'exprime en ohms (Ω).

- Calcul de la résistance :

$$R = \frac{U}{I} \quad \left\{ \begin{array}{l} U \text{ en volts (V)} \\ I \text{ en ampères (A)} \\ R \text{ en ohms } (\Omega). \end{array} \right.$$

- Quelques ordres de grandeurs :

Grille-pain	400 W / 230 V	130 Ω
Fer à repasser	1 300 W / 230 V	40 Ω
Radiateur électrique	2 000 W / 230 V	25 Ω
Chauffe-eau		20 Ω

Tableau 2

- Un conducteur (fig. 6) présente toujours une résistance mais celle-ci est d'autant plus faible qu'il est bon conducteur.

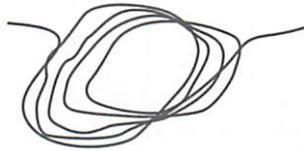


Fig. 6 Un conducteur de 100 m de long et de 1,5 mm² de section, en cuivre, correspond à une résistance voisine de 1 Ω .

- Au contraire, la résistance d'un isolant est très grande ; ainsi une pellicule de mica de 0,1 mm d'épaisseur présente une résistance voisine de 1 milliard d'ohms.
- Certains multiples ou sous-multiples sont souvent utilisés :
 - le kiloohm (k Ω) ;
 - le mégaohm ou mégohm (M Ω) ;
 - le milliohm (m Ω).

2. Résistor linéaire

Le résistor est dit **linéaire** lorsque sa **résistance est constante**.

C'est le cas en général des éléments chauffants appartenant aux appareils de cuisson ou de chauffage, mais il existe des récepteurs purement thermiques pour lesquels cette situation n'est pas vérifiée.

Ainsi, une lampe à incandescence marquée 60 W / 230 V a une résistance $R = 880 \Omega$ sous la tension d'alimentation de 230 V, mais une mesure de la résistance de la lampe éteinte montre alors que $R \approx 70 \Omega$. Le filament d'une lampe à incandescence n'est pas un résistor linéaire.

3. Loi d'Ohm pour un résistor

La loi d'Ohm traduit le comportement de la tension aux bornes d'un dipôle en fonction de l'intensité du courant qui le traverse.

Pour un résistor (fig. 7) :

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

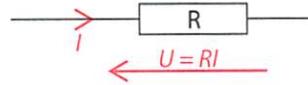


Fig. 7 La tension aux bornes d'un résistor est égale au produit RI .

4. Mesure de la résistance

a) Mesure directe

L'appareil qui mesure directement la résistance d'un dipôle est l'**ohmmètre**.

Un multimètre numérique comporte toujours une fonction ohmmètre : « Ω ».

La mesure se fait toujours en plaçant le dipôle, hors tension et déconnecté, entre les deux bornes de l'appareil de mesure (fig. 8).

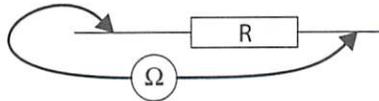


Fig. 8 L'ohmmètre mesure directement R .

La mesure des faibles résistances (inférieures à 10Ω) est imprécise avec l'ohmmètre et il conviendra alors d'utiliser une autre méthode.

b) Méthode voltampèremétrique

Le résistor est sous tension continue. Les mesures de U et I (fig. 9) permettent de calculer ensuite la résistance R .

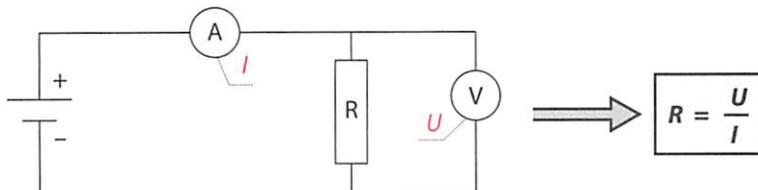


Fig. 9 La méthode voltampèremétrique permet de déterminer R .

5. Le code des couleurs

Des résistors de petites puissances sont souvent utilisés pour régler les circuits (fig. 10).

Certains portent directement l'indication de leur résistance, pour d'autres un codage par anneaux de couleur est utilisé (fig. 11).

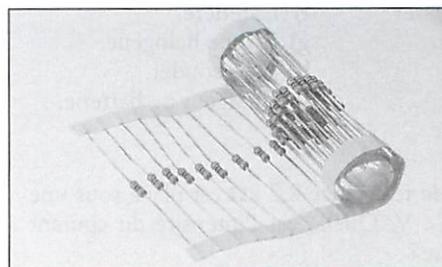


Fig. 10 Quelques résistors au carbone.

7

Variation de la résistance

Quels sont les paramètres qui interviennent dans la valeur de la résistance ?

AVANT DE DÉMARRER...

► À propos des résistors

- Nous rappelons que le résistor se comporte de façon identique en courant continu et en courant sinusoïdal. La loi d'Ohm $U = RI$ s'applique en valeurs efficaces, quelle que soit la nature du courant.

- Il faut savoir que tout conducteur, même celui qui transporte le courant électrique, présente une résistance.

La résistance est une grandeur qui concerne toutes les parties du circuit électrique (fig. 1).

Un moteur n'est pas un résistor, pourtant les enroulements qui assurent son fonctionnement possèdent une résistance.



Fig. 1 Tous les éléments du circuit ont une résistance.

- Le plus souvent, l'élément résistif est filiforme, les physiciens parlent alors de conducteur ohmique.

Nous retiendrons trois paramètres qui le caractérisent : sa longueur, sa section et la nature du matériau qui le constitue (fig. 2).

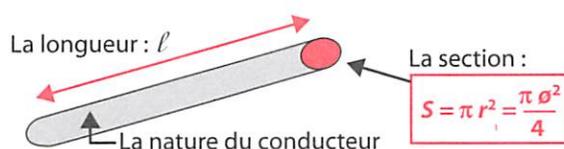


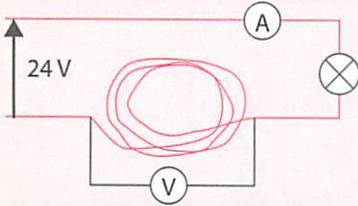
Fig. 2 Un élément résistif filiforme de section circulaire.

OBSERVONS

● Résistance d'un conducteur

Nous alimentons une lampe 40 W / 24 V par l'intermédiaire d'une couronne de 100 m de conducteur H07V-R1,5 puis avec 100 m de conducteur de 2,5 mm² (H07V-R2,5).

La mesure de la tension aux bornes de la couronne et la mesure de l'intensité du courant permettent de calculer la résistance du fil (fig. 3) :



Section	U	I	$R = \frac{U}{I}$
1,5 mm ²	2,18 V	1,81 A	1,2 Ω
2,5 mm ²	1,33 V	1,82 A	0,73 Ω

Fig. 3 Les deux couronnes n'ont pas la même résistance.

- D'un conducteur à l'autre, la résistance varie.

Nous mesurons la résistance d'un conducteur ohmique avec le montage de la figure 4 en modifiant la longueur, puis la section et enfin la nature du matériau qui le constitue.

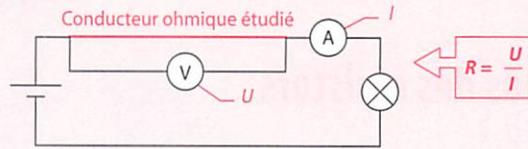


Fig. 4 Montage d'étude.

Les relevés donnent :

Longueur	10 m	30 m	10 m	10 m
Section	1,5 mm ²	1,5 mm ²	1 mm ²	1,5 mm ²
Nature	Cuivre	Cuivre	Cuivre	Aluminium
I	2 A	2 A	2 A	2 A
U	213 mV	640 mV	320 mV	360 mV
$R = \frac{U}{I}$	0,107 Ω	0,320 Ω	0,160 Ω	0,180 Ω

Tableau 1

- Analyse :

Lorsque la longueur triple, R est trois fois plus grande.

Lorsque la section diminue, R augmente.

La résistance dépend de la nature du fil.

● Une lampe à incandescence

Soit une lampe à incandescence 100 W / 230 V.

Mesurons la résistance du filament (conducteur ohmique) à l'ohmmètre :

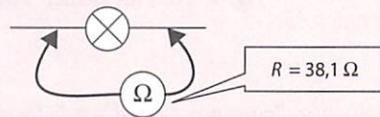


Fig. 5 La lampe est-elle un résistor linéaire ?

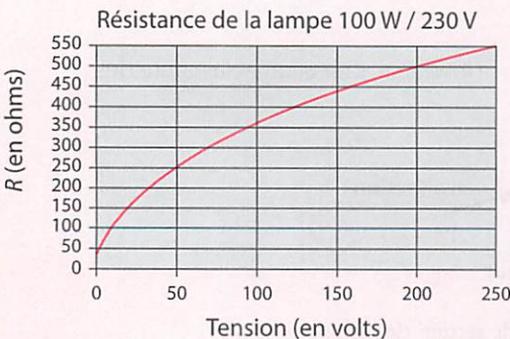


Fig. 6 Une étude sous tension variable permet de tracer R en fonction de U .

Calculons : sous 230 V, et comme la puissance est de 100 W, nous avons :

$$I = \frac{P}{U} \Rightarrow I = \frac{100}{230} \text{ soit } I = 0,435 \text{ A et donc } R = \frac{U}{I} \Rightarrow R = \frac{230}{0,435} \text{ soit } R = 529 \text{ } \Omega.$$

La résistance passe de $R = 38,1 \text{ } \Omega$ à $R = 529 \text{ } \Omega$.

La lampe à incandescence n'est pas un résistor linéaire.

Comment expliquer la variation de la résistance ?

La résistance passe de $R = 38,1 \text{ } \Omega$ à $R = 529 \text{ } \Omega$.

Lampe éteinte.
Filament froid

Lampe allumée.
Filament très chaud

La température est un paramètre qui modifie la résistance.

À SAVOIR

1. Résistivité

La résistivité est une caractéristique physique d'un matériau homogène.

Elle est numériquement égale à la résistance d'un cylindre de cette substance, de longueur et de section unités (1 m et 1 m²).

La résistivité a pour symbole ρ (rhô) et s'exprime en ohm-mètres (Ωm).

Exemple : pour le cuivre à 0 °C, $\rho = 1,6 \times 10^{-8} \text{ } \Omega\text{m}$.

Notons que la résistivité d'un conducteur est faible, celle d'un isolant est grande.

2. Résistance d'un conducteur ohmique

- **Analyse** : l'étude précédente permet de constater que :
 - la résistance est proportionnelle à la longueur ℓ du conducteur ;
 - la résistance est inversement proportionnelle à la section S du conducteur ;
 - la résistance est proportionnelle à la résistivité ρ du conducteur.

• **Relation caractérisant la résistance du conducteur :**

$$R = \rho \frac{\ell}{S} \quad \left\{ \begin{array}{l} \rho \text{ en ohms-mètres } (\Omega\text{m}) \\ \ell \text{ en mètres (m)} \\ S \text{ en mètres carrés (m}^2\text{)} \\ R \text{ en ohms } (\Omega). \end{array} \right.$$

3. Influence de la température

• **Coefficient de température du matériau**

Chaque matériau est caractérisé par une sensibilité à la température traduite par un coefficient dit de température, a_0 , exprimé en kelvins moins un (K⁻¹).

Quelques valeurs : le cuivre à 0 °C $\rightarrow a_0 = 3,9 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$;
l'aluminium à 0 °C $\rightarrow a_0 = 3,7 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

8

L'effet Joule

Tout conducteur traversé par un courant électrique s'échauffe. Ce phénomène est l'effet Joule.

AVANT DE DÉMARRER...

► Échauffement d'un corps

L'énergie thermique fournie à un corps permet une élévation de sa température (sauf s'il y a changement d'état : évaporation par exemple).

Selon la nature du corps à chauffer, pour un même échauffement et pour une même masse, l'énergie thermique à fournir est différente.

Chaque substance est caractérisée par sa **capacité thermique massique (c)**.

Elle est numériquement égale à l'énergie (en joules) qu'il faut fournir à un kilogramme de ce corps pour obtenir une élévation de température de 1 °C (sans changement d'état).

Ainsi pour l'eau : $c = 4\,190 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Le **tableau 1** donne la capacité thermique massique de quelques substances :

Substances	Air	Pétrole	Or	Cuivre	Aluminium
c (en J.kg⁻¹.K⁻¹)	990	2 100	134	400	920

Tableau 1

► Énergie thermique nécessaire

C'est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à un corps pour porter sa température de la valeur initiale θ_1 à la température finale θ_2 .

$$W = mc(\theta_2 - \theta_1) \quad \left\{ \begin{array}{l} m \text{ masse (en kg)} \\ c \text{ capacité thermique massique (en J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}) \\ \theta_1 \text{ température initiale en degrés celsius (}^\circ\text{C)} \\ \theta_2 \text{ température finale en degrés celsius (}^\circ\text{C)}. \end{array} \right.$$

Notons que l'écart de température ($\theta_2 - \theta_1$) s'exprime aussi en kelvins (K).

► Température d'équilibre

En fait, le corps restitue de la chaleur au milieu ambiant : la température atteinte dépend des conditions de déperdition de chaleur.

Plus le corps s'échauffe et plus il cède de chaleur. L'ensemble s'équilibre autour d'une température stable dite **température d'équilibre** (fig. 1).

Un four électrique dont le thermostat est réglé à 200 °C maintient sa température d'équilibre à cette valeur.

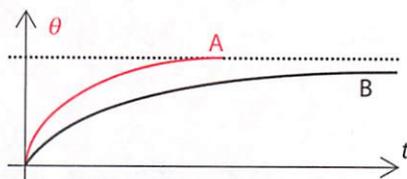


Fig. 1 Le corps A thermiquement bien isolé atteint plus rapidement sa température d'équilibre que le corps B.

OBSERVONS

● Un calorimètre permet de mesurer la quantité de chaleur

– Montage d'étude

Dans le calorimètre de la **figure 2**, nous avons placé 1/2 litre d'eau ($m = 0,5 \text{ kg}$). Un résistor linéaire R_1 est placé dans l'eau et chauffe par effet Joule.

Un thermomètre très sensible permet de mesurer l'élévation de température.

L'expérience consiste à calculer la quantité de chaleur obtenue lorsque I varie ou lorsque la durée t de passage du courant varie.

L'alimentation de tension réglable permet de modifier l'intensité I du courant.

Nous faisons ensuite une autre mesure avec un second résistor R_2 .

– Les relevés :

	I (en A)	t (en s)	θ_1 (en °C)	θ_2 (en °C)	$W = mc(\theta_1 - \theta_2)$
$R_1 = 5 \Omega$	2	300	16	18,9	6 080 J
	3	300	18	24,5	13 620 J
	3	180	24	27,9	8 170 J
$R_2 = 15 \Omega$	2	300	16	24,7	18 230 J

$$m = 0,5 \text{ kg} ; c = 4 190 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1} \Rightarrow W = 2 095 (\theta_2 - \theta_1)$$

Tableau 2

● Analyse

Comparons les lignes 1 et 2 du tableau :

l'intensité I est multipliée par 1,5 alors que W est multipliée par 2,25 donc par $1,5^2$:

W est proportionnelle au carré de l'intensité du courant qui circule.

Comparons les lignes 2 et 3 du tableau :

le rapport des durées est égal au rapport des énergies : $\frac{300}{180} \approx 1,67 \approx \frac{13 620}{8 170}$:

W est proportionnelle à la durée t de passage du courant.

Comparons les lignes 1 et 4 du tableau :

le résistor R_2 produit trois fois plus de chaleur que le résistor R_1 :

W est proportionnelle à la résistance R de l'élément chauffant.

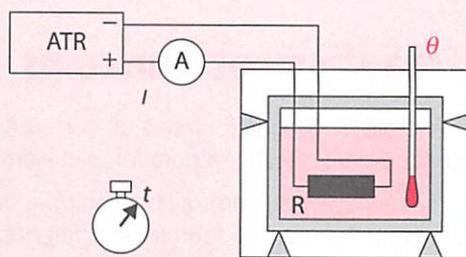


Fig. 2 Un calorimètre est un vase isolé qui conserve la chaleur (déperdition négligeable).

1. Loi de Joule

a) Énergie thermique

L'énergie thermique produite par effet Joule dans un appareil de résistance R , traversé par un courant d'intensité I durant le temps t est :

$$W = RI^2t$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R \text{ en ohms } (\Omega) \\ I \text{ en ampères (A)} \\ t \text{ en secondes (s)} \\ W \text{ en joules (J).} \end{array} \right.$$

Notons que si t est en heures (h) alors W sera obtenue en wattheures (Wh).

b) Puissance dissipée par effet Joule

$$P = \frac{W}{t} = \frac{RI^2t}{t} \Rightarrow P = RI^2.$$

La puissance dissipée en chaleur par effet Joule dans un appareil de résistance R traversé par un courant d'intensité I est :

$$P = RI^2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R \text{ en ohms } (\Omega) \\ I \text{ en ampères (A)} \\ P \text{ en watts (W).} \end{array} \right.$$

c) Effet Joule en alternatif

Les lois de Joule en énergie comme en puissance s'appliquent quelle que soit la nature du courant, mais avec I : valeur efficace de l'intensité du courant.

2. Applications de l'effet Joule

- L'énergie ainsi transformée en chaleur sera de l'énergie utile si l'appareil est destiné à produire de la chaleur uniquement. Nous savons qu'il s'agit du **résistor** (linéaire ou non).

Les applications sont nombreuses :

- chauffage électrique (radiateurs, bouilloires, fer à repasser...);
- éclairage par incandescence ;
- coupe-circuits calibrés, fusibles qui doivent fondre dès que l'intensité du courant dépasse une valeur maximale.

- Pour un résistor, récepteur purement thermique, il y a égalité (**fig. 3**) entre la puissance absorbée $P_a = UI$ et la puissance transformée en chaleur $P_u = RI^2$.

Nous pouvons écrire **pour un résistor et pour un résistor seulement** :

$$P = RI^2 = UI$$

et, puisque $I = \frac{U}{R}$:

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

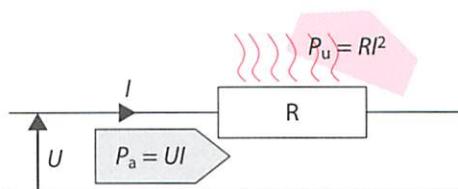


Fig. 3 $P_a = UI$ et $P_u = RI^2$ sont égaux. Du point de vue électrique, le rendement du résistor est 100 %.

3. Pertes par effet Joule

- Dès qu'un appareil électrique n'est pas destiné à produire de la chaleur, l'effet Joule est nuisible et représente de l'énergie perdue (fig. 4).

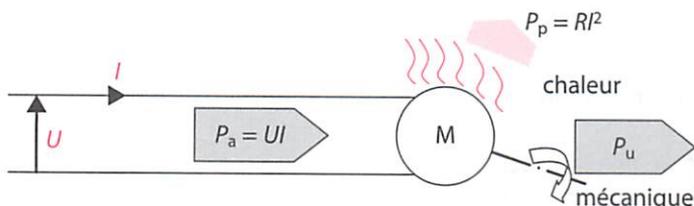


Fig. 4 La puissance perdue (P_p) par effet Joule ne représente, heureusement, qu'une faible partie de la puissance produite par un moteur électrique.

- **Bilan des puissances** pour un récepteur non thermique :



Fig. 5 Le principe de dégradation de l'énergie s'explique principalement avec l'effet Joule :

$$P_a = P_u + P_p$$

Nous avons toujours $P_a > P_u$ et $UI = P_u + RI^2$, et le rendement électrique est nécessairement inférieur à 100 % (fig. 5).

Notons qu'il existe souvent d'autres pertes qui s'ajoutent à l'effet Joule et, dans le bilan global des machines électriques, la différence ($P_a - P_u$) est supérieure à RI^2 .

- **Attention** : écrire $P = UI = RI^2$ pour un récepteur non thermique est une erreur grave ; de même, la loi d'Ohm $U = RI$ ne s'applique pas pour ce type de récepteur.

Appliquer ces lois à un moteur reviendrait à le considérer comme un simple radiateur !

TESTEZ VOS CONNAISSANCES

- L'effet Joule est-il utile pour les appareils suivants ?
 a) Aspirateur. c) Tube fluorescent.
 b) Grille-pain. d) Lampe halogène.
- Un moteur à courant continu de résistance interne 2Ω est traversé par un courant d'intensité 8 A lorsqu'il fonctionne sous une tension de 190 V .
 Quelle est la puissance absorbée ?
 a) 380 W . c) $1\,520 \text{ W}$.
 b) 128 W . d) $1,52 \text{ kW}$.
 Quelle est la puissance perdue par effet Joule ?
 a) 16 W . c) $1\,520 \text{ W}$.
 b) 128 W . d) $1,52 \text{ kW}$.
- Soit une friteuse contenant $1,5 \text{ kg}$ d'huile ($c = 3\,300 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). On souhaite que la température de l'huile passe de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ à la température de $175 \text{ }^\circ\text{C}$. Quelle énergie thermique faut-il fournir ?
 a) 767 kJ . c) $1\,500 \text{ Wh}$.
 b) $2,13 \text{ kWh}$. d) 213 Wh .
- Pour un résistor au carbone codé $R = 470 \Omega$, le constructeur indique une puissance maximale de 2 W . Quelle est l'intensité maximale du courant que peut supporter ce composant ?
 a) $2,35 \text{ A}$. c) 65 mA .
 b) $0,94 \text{ A}$. d) $4,25 \text{ mA}$.
- Une plaque de cuisson électrique a une puissance de $1\,500 \text{ W}$ lorsqu'elle fonctionne sous la tension 230 V . Déterminer la résistance de l'élément chauffant.
- Un moteur est traversé par un courant de 15 A sous une tension de 230 V . Son rendement est de 84% . Calculer sa résistance interne en supposant que toute la puissance perdue est due à l'effet Joule.
- Dans un chauffe-eau, 150 litres d'eau passent de $15 \text{ }^\circ\text{C}$ à $55 \text{ }^\circ\text{C}$ en $4 \text{ h } 30 \text{ min}$. Le thermoplongeur est alimenté sous 230 V .
 1. Calculer l'énergie nécessaire pour obtenir le chauffage de l'eau.
 2. Calculer la puissance du chauffe-eau et la résistance du thermoplongeur.

9

Association de résistors

Nous allons voir comment se comporte un groupe de plusieurs résistors.

AVANT DE DÉMARRER...

► Notion de résistance équivalente

- Un groupe de résistors, linéaires ou non, se comporte globalement comme un seul résistor dont la résistance est dite **résistance équivalente** (fig. 1).

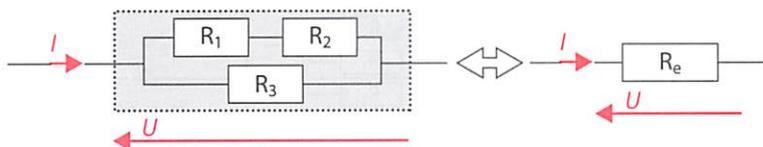


Fig. 1 R_e est la résistance équivalente du groupe $\{R_1, R_2, R_3\}$.

Nous appelons résistance équivalente R_e la résistance du résistor qui, remplaçant le groupe de résistors, absorbe la même intensité du courant lorsqu'il est alimenté sous la même tension.

La loi d'Ohm $U = R_e I$ s'applique et la puissance dissipée par l'effet Joule est $P = R_e I^2$.

• Problème posé par la recherche de l'intensité :

Très souvent, les résistances des résistors partiels et la tension d'alimentation sont connues.

La recherche de l'intensité $I = \frac{U}{R_e}$ du courant absorbé par l'ensemble conduit nécessairement à déterminer la résistance équivalente du groupe.

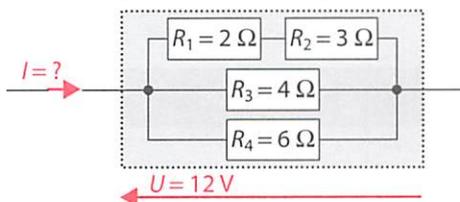


Fig. 2 Comment déterminer la résistance équivalente R_e du groupe $\{R_1, R_2, R_3, R_4\}$?

Il sera nécessaire de procéder par étapes en reconnaissant les groupements élémentaires :

- groupement série (R_1 et R_2 dans la figure 2),
- groupement dérivation (R_3 et R_4 dans la figure 2).

OBSERVONS

● Mise en œuvre

Nous disposons d'un ohmmètre et de trois résistors étalons, c'est-à-dire des résistors dont les résistances sont connues avec précision (fig. 3).

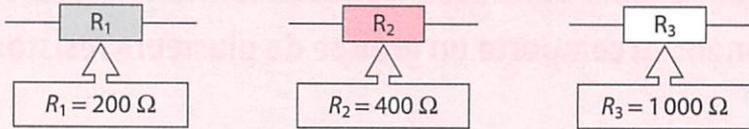


Fig. 3 Les résistors sont des boîtes à décades dont la précision est donnée à 1 %.

Nous allons associer ces résistors en série puis en dérivation, en mesurant, à chaque fois, la résistance équivalente du groupe avec l'ohmmètre.

● Tableau des relevés ($R_1 = 200 \Omega$; $R_2 = 400 \Omega$; $R_3 = 1\,000 \Omega$)

En série		En dérivation	
Montages	R_e mesurée	Montages	R_e mesurée
	$R_{12} = 603 \Omega$		$R_{12} = 134 \Omega$
	$R_{13} = 1\,199 \Omega$		$R_{13} = 167 \Omega$
	$R_{23} = 1\,401 \Omega$		$R_{23} = 309 \Omega$
	$R_{123} = 1\,602 \Omega$		$R_{123} = 118 \Omega$

Tableau 1

● Première analyse

La résistance équivalente d'un groupement série est supérieure à la plus grande des résistances partielles.

La résistance équivalente d'un groupement dérivation est inférieure à la plus petite des résistances partielles.

À SAVOIR

1. Résistance équivalente d'un groupement série

- L'analyse plus précise des résultats montre que :

$$603 \approx 200 + 400 \quad \Rightarrow \quad R_{12} \approx R_1 + R_2$$

$$1\,602 \approx 200 + 400 + 1\,000 \quad \Rightarrow \quad R_{123} \approx R_1 + R_2 + R_3.$$

Règle : la résistance équivalente à un groupement série de résistors est égale à la somme des résistances partielles : $R_e = \Sigma R$.

Remarque : le symbole Σ (sigma) signifie « somme de... ».

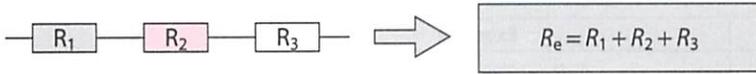


Fig. 4 Résistance équivalente à trois résistors en série.

• **Cas de n résistors identiques en série :**

Les résistors ont même résistance R , donc la résistance équivalente est une somme de n termes identiques : $R_e = R + R + R + \dots$

Dès lors, il convient d'utiliser la relation : $R_e = nR$.

2. Résistance équivalente d'un groupement dérivation

• Une seconde analyse, plus précise, des résultats montre que :

$$\frac{1}{134} = 0,00746 \approx \frac{1}{200} + \frac{1}{400} \Rightarrow \frac{1}{R_{12}} \approx \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\frac{1}{118} = 0,00847 \approx \frac{1}{200} + \frac{1}{400} + \frac{1}{1000} \Rightarrow \frac{1}{R_{123}} \approx \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Règle : l'inverse de la résistance équivalente à un groupement en dérivation de résistors est égal à la somme des inverses des résistances de chaque résistor : $\frac{1}{R_e} = \Sigma \frac{1}{R}$.

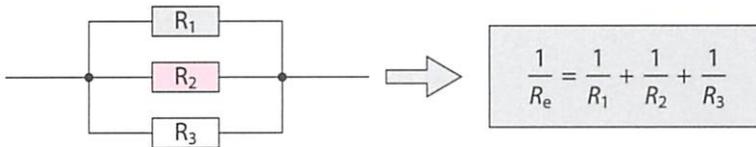


Fig. 5 Résistance équivalente à trois résistors en dérivation.

• **Cas de n résistors identiques en dérivation :**

Les résistors ont même résistance R , donc l'inverse de la résistance équivalente est une somme de n termes identiques :

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \dots \text{ soit } \frac{1}{R_e} = \frac{n}{R}$$

Dès lors, il convient d'utiliser la relation : $R_e = \frac{R}{n}$.

• **Cas de deux résistors seulement en dérivation :**

Ce cas est fréquent et nous utilisons souvent une forme adaptée de la règle :

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_2}{R_1 R_2} + \frac{R_1}{R_1 R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$$

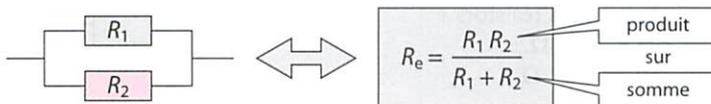


Fig. 6 La résistance équivalente à deux résistors en dérivation est égale au produit de leurs résistances divisé par leur somme.

3. Méthodologie de traitement des montages mixtes

Méthode	Exemple	
1^{re} étape Observer le schéma du montage. Identifier les groupes élémentaires		R_1 et R_2 sont en série R_3 et R_4 sont en dérivation
2^e étape Calculer les résistances équivalentes des groupes identifiés	$R_{12} = R_1 + R_2 = 2 + 3$ $R_{34} = \frac{R_3 \times R_4}{R_3 + R_4} = \frac{4 \times 6}{4 + 6}$	$R_{12} = 5 \Omega$ $R_{34} = 2,4 \Omega$
3^e étape Refaire un schéma en remplaçant chaque groupe par sa résistance équivalente		Ici R_{12} et R_{34} sont deux résistors en dérivation
4^e étape Recommencer jusqu'à atteindre un groupe élémentaire		
5^e étape Déterminer la résistance équivalente globale	$R_e = \frac{R_{12} \times R_{34}}{R_{12} + R_{34}} = \frac{5 \times 2,4}{5 + 2,4}$	$R_e = 1,62 \Omega$
6^e étape Le calcul de l'intensité I peut alors s'effectuer	$I = \frac{U}{R_e} = \frac{12}{1,62} \Rightarrow I = 7,4 \text{ A}$	

Tableau 2

TESTEZ VOS CONNAISSANCES

1 Quelle est la résistance équivalente à quatre résistors de résistance 100Ω en parallèle ?

- a) $R_e = 0,04 \Omega$. c) $R_e = 100 \Omega$.
 b) $R_e = 25 \Omega$. d) $R_e = 400 \Omega$.

2 Avec deux résistors R_1 et R_2 de résistances respectives $R_1 = 10 \Omega$ et $R_2 = 15 \Omega$, nous voulons obtenir une résistance globale de 6Ω . Laquelle des propositions suivantes est vraie ?

- a) Ce n'est pas possible.
 b) R_1 et R_2 seront en série.
 c) R_1 et R_2 seront en dérivation.

3 On considère trois résistors en dérivation dont les résistances respectives sont 20Ω , 30Ω et 60Ω . Quelle est la résistance équivalente à ces résistors ?

- a) $R_e = 36\,000 \Omega$. c) $R_e = 10 \Omega$.
 b) $R_e = 110 \Omega$. d) $R_e = 0,1 \Omega$.

4 Un résistor linéaire a une puissance de $2\,645 \text{ W}$ lorsqu'il fonctionne seul sur le réseau de tension 230 V .

1. Calculer sa résistance.

2. Associé en série avec un résistor de résistance R' , sa puissance devient $1\,125 \text{ W}$. Calculer la résistance R' .

5 Les résistors précédents sont associés selon le montage suivant.

L'ensemble reste alimenté sous la tension de 24 V . Calculer la nouvelle intensité alors absorbée.

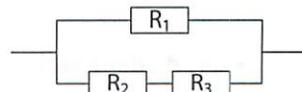


Fig. 7.

6 Soit le montage suivant :

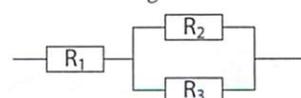


Fig. 8.

avec $R_1 = 220 \Omega$,
 $R_2 = 470 \Omega$ et
 $R_3 = 330 \Omega$.

Quelle est l'intensité du courant absorbé par l'ensemble si la tension à ses bornes est $U = 24 \text{ V}$?

10 Rhéostat et potentiomètre

Nous allons voir comment régler l'intensité d'un courant grâce à un rhéostat ou à un potentiomètre.

AVANT DE DÉMARRER...

► Principe d'un résistor réglable

La résistance R entre A et C est : $R_{AC} = \rho \frac{\ell}{S}$.

En déplaçant le curseur C, la longueur active ℓ du conducteur varie entre 0 et ℓ_T (fig. 1) :

$$\rho \frac{0}{S} = 0 \leq R_{AC} \leq \rho \frac{\ell_T}{S} = R_T.$$

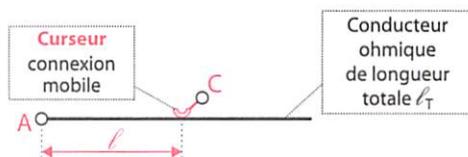


Fig. 1

Nous avons là un résistor dont la résistance peut être réglée entre 0 et R_T . C'est un **résistor réglable**.

► En pratique

Le résistor réglable est souvent appelé soit rhéostat, soit potentiomètre en fonction de l'emploi qui peut en être fait.

Généralement, le résistor réglable présente trois connexions : les extrémités A et B du conducteur ohmique et le curseur C (fig. 2).

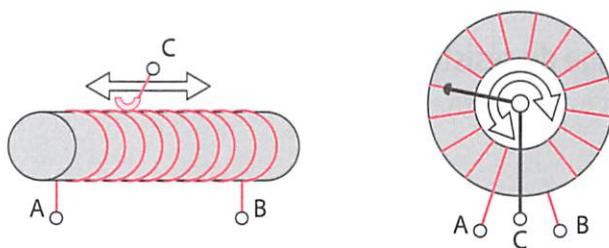


Fig. 2 Le frotteur métallique (curseur) se déplace de façon rectiligne ou rotative.

En pratique, le conducteur ohmique sera enroulé sur un support isolant (électrique et thermique).

Pour des résistors réglables de petites puissances (en électronique), le conducteur ohmique est remplacé par une piste d'un agglomérat de carbone sur laquelle se déplace le curseur.

Le symbole d'un résistor réglable est donné figure 3.

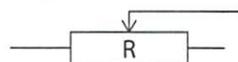


Fig. 3 Symbolisation du résistor réglable.

OBSERVONS

● Un rhéostat

Le résistor réglable que nous rencontrons dans la salle d'expérimentation (fig. 4) est souvent appelé rhéostat.

Il présente trois bornes (de sécurité), une borne de masse, le curseur est commandé par une poignée isolante à déplacement rectiligne.

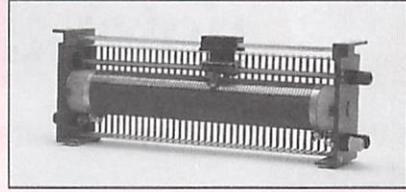


Fig. 4 Un rhéostat de la salle de mesure.

Le constructeur identifie le modèle et précise des valeurs caractéristiques (fig. 5) :

FI modèle PRN642/BTI/325	
Résistance	325 Ω
Intensité	1,4 A

Fig. 5 La plaque d'identification.

● Les valeurs limites

Les valeurs limites sont précisées par le constructeur, ce sont :

- **la résistance totale : R_T** ; il s'agit de la plus grande valeur de résistance que nous pouvons utiliser avec ce résistor réglable ;
- **l'intensité maximale : I_{\max}** ; il s'agit de la **valeur de l'intensité du courant à ne pas dépasser** quelle que soit l'utilisation faite de ce résistor.

À SAVOIR

1. Montage rhéostatique

a) Montage du résistor réglable en rhéostat

Le rhéostat est monté en série avec la charge (fig. 6).

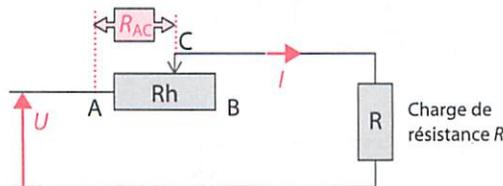


Fig. 6 R_{AC} est la résistance du rhéostat.

b) Évolution de l'intensité I du courant dans le circuit

C'est un montage série : $I = \frac{U}{R_e} = \frac{U}{R_{AC} + R}$.

Puisque R_{AC} peut varier entre 0 et R_T , alors : $\frac{U}{R_T + R} \leq I \leq \frac{U}{R}$.

Le montage rhéostatique permet de modifier l'intensité du courant dans le récepteur R (fig. 7).

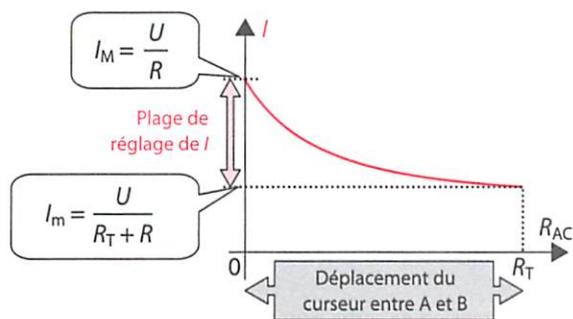


Fig. 7 L'intensité peut être réglée entre les limites suivantes :

- l'intensité est maximale pour le rhéostat en court-circuit (C en A) :

$$I_M = \frac{U}{R} ;$$

- l'intensité est minimale pour toute la résistance du rhéostat dans le circuit (C en B) :

$$I_m = \frac{U}{R_T + R} .$$

c) Choix du rhéostat

Pour obtenir une plage de réglage acceptable de l'intensité I du courant dans une charge de résistance R , il convient de choisir un rhéostat dont les caractéristiques sont :

$$R_T \approx 3 \times R \text{ et } I_{\max} \geq \frac{U}{R} .$$

2. Montage potentiométrique

a) Montage du résistor réglable en potentiomètre

Les trois bornes A, B et C sont nécessairement utilisées (fig. 8) :

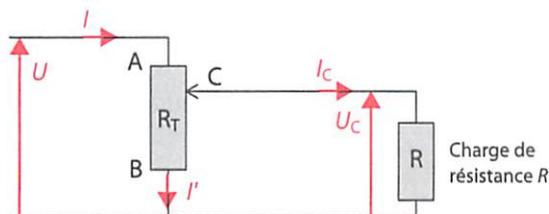


Fig. 8 La résistance totale (bornes A et B) est branchée directement à la source, la charge est connectée entre le curseur C et le point B.

b) Potentiomètre à vide

Le courant I_c est nul (pas de charge).

Le schéma de la figure 9 montre que la tension de sortie à vide U_{Co} est la tension aux bornes de la résistance R_{BC} .

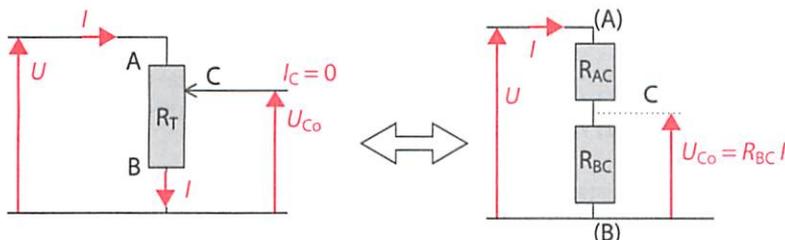


Fig. 9 Schéma équivalent du potentiomètre à vide.

L'intensité dans le potentiomètre est $I = \frac{U}{R_{AC} + R_{BC}}$; or $R_{AC} + R_{BC} = R_T$ donc $I = \frac{U}{R_T}$.

L'expression de la tension de sortie U_{Co} est donc :

$$U_{Co} = \frac{U \times R_{BC}}{R_T}$$

U et R_T sont des constantes et donc U_{Co} est une fonction linéaire de R_{BC} c'est-à-dire directement proportionnelle à la position du curseur (fig. 10).

Le montage potentiométrique permet de rendre variable une tension fixe.

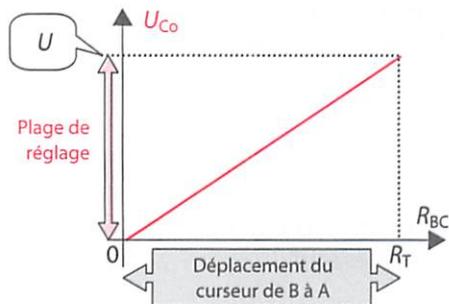


Fig. 10 La tension de sortie peut être réglée entre :

$$U_{Co} = 0 \text{ pour le curseur en B ;}$$

$$U_{Co} = U \text{ pour le curseur en A.}$$

c) Choix du potentiomètre

La charge étant connectée, le potentiomètre permet d'obtenir un courant d'intensité I_c réglable dans la charge de résistance R : $0 \leq U_c \leq U$ donc $0 \leq I_c \leq \frac{U}{R}$.

Ce montage reste très utilisé lorsque les puissances mises en jeu sont faibles. Cependant, les variateurs électroniques le remplacent avantageusement (peu de pertes par effet Joule) dès que les intensités dépassent un dixième d'ampère.

La portion R_{AC} du potentiomètre supporte le courant $I = I' + I_c$.

Lorsque le curseur atteint le point A : $I' \rightarrow \frac{U}{R_T}$ et $I_c \rightarrow \frac{U}{R}$.

Il conviendra de choisir un résistor réglable en tenant compte du courant maximal :

$$I_{\max} \geq \frac{U}{R_T} + \frac{U}{R}$$

TESTEZ VOS CONNAISSANCES

- La tension est $U = 230 \text{ V}$, la charge est un résistor de résistance 530Ω . Quels sont les résistors réglables qui conviennent pour un montage potentiométrique ?
 - $10 \Omega / 8 \text{ A}$.
 - $54 \Omega / 2,4 \text{ A}$.
 - $100 \Omega / 1,75 \text{ A}$.
 - $330 \Omega / 1,4 \text{ A}$.
 - $1\,000 \Omega / 0,57 \text{ A}$.
 - $3\,300 \Omega / 0,32 \text{ A}$.
- Plaçons en série avec une charge de résistance 12Ω un rhéostat portant les inscriptions $33 \Omega / 2,2 \text{ A}$. La tension d'alimentation est de 24 V . Quelle sera la plage de réglage de l'intensité du courant ?
 - De 0 A à $2,2 \text{ A}$.
 - De $0,53 \text{ A}$ à 3 A .
 - De 0 A à 2 A .
 - De $0,53 \text{ A}$ à 2 A .
- On utilise en potentiomètre un rhéostat dont la résistance est $R_T = 130 \Omega$. Le curseur est placé au milieu et la tension source appliquée est 48 V .
 - Quelle est la tension de sortie à vide ?
 - Que devient cette tension lorsque le potentiomètre alimente une charge de résistance 30Ω ?
- Un appareil marqué 110 V absorbe un courant d'intensité 3 A sous cette tension. Vous disposez d'une source de tension de 230 V et vous optez pour un montage rhéostatique. À quelle résistance devez-vous régler le rhéostat marqué $54 \Omega / 3,5 \text{ A}$ pour que l'appareil fonctionne correctement ?

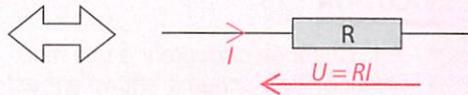
PRÉPARATION À L'EXAMEN

L'ESSENTIEL

- Un **résistor** transforme la totalité de l'énergie électrique absorbée en chaleur. Il est caractérisé par sa **résistance R** exprimée en **ohms (Ω)**.

- **Loi d'Ohm pour un résistor :**

$$U = RI \quad \begin{cases} U \text{ en volts (V)} \\ I \text{ en ampères (A)} \\ R \text{ en ohms } (\Omega). \end{cases}$$



- L'**élément chauffant d'un résistor**, souvent filiforme, présente une résistance R (en Ω) :

$$R = \rho \frac{\ell}{S} \quad \begin{cases} \rho \text{ résistivité de la substance qui le constitue, en ohms-mètres } (\Omega\text{m}). \\ \ell \text{ longueur, en mètres (m)} \\ S \text{ section, en mètres carrés (m}^2\text{)}. \end{cases}$$

- La **résistance du résistor** est sensible à la température : $R_\theta = R_0 (1 + a_0 \theta)$.
 R_θ résistance en Ω à la température θ ($^\circ\text{C}$) ; R_0 résistance en Ω à la température 0 $^\circ\text{C}$;
 a_0 coefficient de température (en K^{-1}) ; θ température effective (en $^\circ\text{C}$).

- L'**effet Joule** apparaît dès qu'un conducteur est traversé par un courant électrique.
La **puissance dissipée par effet Joule** est :

$$P = RI^2$$

C'est la **puissance utile** du résistor :

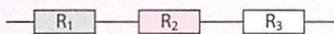
$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}.$$

C'est la **puissance perdue** par effet Joule (pertes joules) dans tout appareil électrique : $P_J = RI^2$.

- L'**énergie thermique** fournie à une substance permet à sa température de passer de la valeur initiale θ_1 à la valeur finale θ_2 selon la relation : $W = mc (\theta_2 - \theta_1)$.
 m masse (en kg) ; c capacité thermique massique (en $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) ; θ_2 et θ_1 en $^\circ\text{C}$.

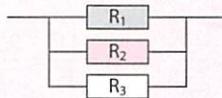
- La **résistance équivalente** est la **résistance globale** d'un groupe de résistors :

En série :



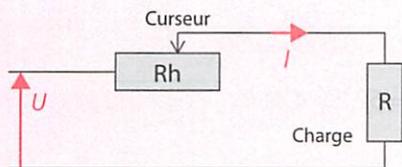
$$R_e = R_1 + R_2 + R_3.$$

En dérivation :

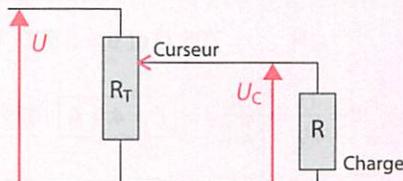


$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$

- Un **résistor réglable** permet de modifier le comportement du circuit électrique.



Monté en **rhéostat**, l'intensité I du courant est réglable.



Monté en **potentiomètre**, la tension aux bornes de la charge est réglable.

Exercices résolus

ÉNONCÉ 1

Une ligne de 50 m est constituée de deux conducteurs en cuivre de section $1,5 \text{ mm}^2$. Elle transporte un courant d'intensité 8 A à partir de la tension $U = 230 \text{ V}$.

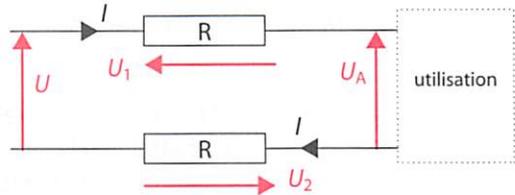
1. Quelle est la tension à l'arrivée ?
2. Calculer la puissance perdue par effet Joule dans cette ligne.

SOLUTION

1. Chaque conducteur a une résistance R (le schéma équivalent est donné ci-contre) :

$$R = \frac{\rho l}{S} \Rightarrow R = \frac{1,6 \times 10^{-8} \times 50}{1 \times 10^{-6}}$$

$$\Rightarrow R = 0,8 \Omega.$$



$$U = U_1 + U_A + U_2 \Rightarrow U_A = U - U_1 - U_2$$

$$\text{or } U_1 = U_2 = RI \Rightarrow U_1 = U_2 = 0,8 \times 8 = 6,4 \text{ V.}$$

$$U_A = 230 - 6,4 - 6,4 = 217,2 \text{ soit } \boxed{U_A = 217,2 \text{ V}}$$

2. Chaque conducteur perd RI^2 donc la puissance perdue sera :

$$P_J = 2RI^2 \Rightarrow P_J = 2 \times 0,8 \times 8^2 = 102,4 \text{ soit } \boxed{P_J = 102,4 \text{ W}}$$

ÉNONCÉ 2

Une lampe à incandescence porte les caractéristiques : 230 V/75 W.

1. Quelle est sa résistance en fonctionnement nominal ?
2. Calculer l'intensité du courant alors absorbé. Le filament de tungstène ($a_0 = 0,005 \text{ K}^{-1}$) atteint une température de $2500 \text{ }^\circ\text{C}$ en fonctionnement nominal. Que devient sa résistance à froid (prendre $0 \text{ }^\circ\text{C}$) ?
3. À l'instant de l'allumage (à $0 \text{ }^\circ\text{C}$), calculer l'intensité du courant et la puissance de la lampe.

SOLUTION

$$1. P = \frac{U^2}{R} \Rightarrow R = \frac{U^2}{P} = \frac{230^2}{75} \Rightarrow \boxed{R = 705 \Omega}$$

$$2. I = \frac{U}{R} = \frac{230}{705} \Rightarrow \boxed{I = 0,326 \text{ A}}$$

$$3. R_\theta = R_0 (1 + a_0 \theta) \Rightarrow \boxed{R_\theta = \frac{R_0}{1 + a_0 \theta}}$$

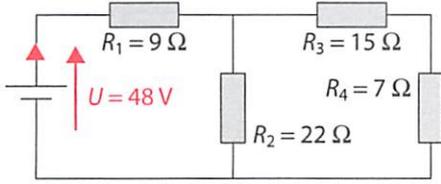
$$R_\theta = R_{2500} = 705 \Omega \text{ et } \theta = 2500 \text{ }^\circ\text{C}; R_0 = \frac{705}{1 + 0,005 \times 2500} = \frac{705}{13,5} \Rightarrow \boxed{R_0 = 52,2 \Omega}$$

$$I' = \frac{U}{R_0} = \frac{230}{52,2} \Rightarrow \boxed{I' = 4,4 \text{ A}} \text{ et } P' = R_0 I'^2 = 52,2 \times 4,4^2 \Rightarrow \boxed{P' = 1010 \text{ W}}$$

Remarque : cette puissance très supérieure à la puissance nominale 75 W est fugitive, puisque la lampe s'allume immédiatement, mais cela explique cependant que, très souvent, les lampes à incandescence « grillent » à l'allumage.

Entraînement

- 1** Déterminer l'intensité du courant absorbé par le groupement ci-dessous :



Résultat : $I = \frac{U}{R_e}$; $R_e = 20 \Omega \Rightarrow I = 2,4 \text{ A}$.

- 2** Un rhéostat de résistance totale 330Ω est en série avec un chauffe-plat dont l'élément de chauffe est un résistor linéaire de résistance 190Ω . La tension d'alimentation est 230 V .

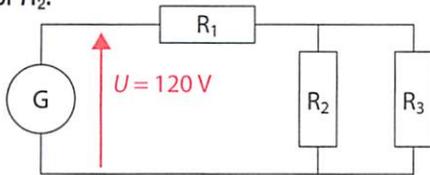
Déterminer la puissance du chauffe-plat pour les positions extrêmes du rhéostat.

Résultat : $37 \text{ W} < P < 278 \text{ W}$.

- 3** Dans le montage ci-dessous, on précise :

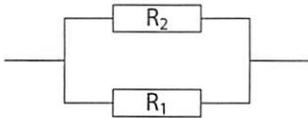
$R_1 = 6 \Omega$; $R_2 = 40 \Omega$; $R_3 = 60 \Omega$.

Calculer la puissance dissipée par effet Joule dans le résistor R_2 .



Résultat : $P_2 = 230 \text{ W}$.

- 4** Le groupement ci-dessous comporte deux résistors, seule la résistance du résistor R_1 est connue : $R_1 = 60 \Omega$.



Sous une tension de 48 V , ce groupe absorbe un courant d'intensité 2 A .

Calculer la résistance du résistor R_2 .

Résultat : $R_2 = 40 \Omega$.

- 5** Vous disposez de quatre résistors de résistance $R = 220 \Omega$.

En utilisant à chaque fois les quatre résistors :

- 1.** Construire le groupement 1 dont la résistance équivalente serait $R_{e1} = 550 \Omega$.

Faire le schéma puis justifier la valeur de R_e .

- 2.** Construire le groupement 2 dont la résistance équivalente serait $R_{e2} = 165 \Omega$.

Faire le schéma puis justifier la valeur de R_e .

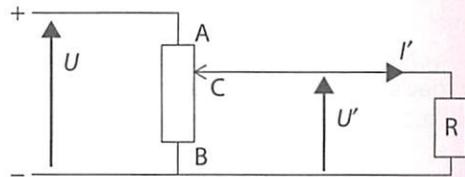
- 6** Un rhéostat portant les indications $\{130 \Omega/2,5 \text{ A}\}$ est installé pour régler l'intensité du courant électrique dans un récepteur purement thermique de résistance $R = 100 \Omega$.

La tension de la source est de 230 V .

- 1.** Calculer les limites de la variation de l'intensité du courant et vérifier que le rhéostat choisi convient.

- 2.** Calculer les limites de réglage de la puissance de chauffe du récepteur.

- 7** Soit le montage ci-dessous dans lequel le potentiomètre porte les indications $\{120 \Omega/3 \text{ A}\}$.



On précise : $U = 24 \text{ V}$ et $R = 12 \Omega$.

- 1.** Calculer l'intensité du courant dans R lorsque le curseur C est en B , puis lorsque le curseur est en A .

- 2.** Le curseur est placé au milieu et donc $R_{AC} = R_{CB}$. Calculer U' et I' dans ces conditions de fonctionnement.

- 8** Un moteur électrique absorbe un courant d'intensité 6 A lorsqu'il fonctionne sous la tension de 120 V .

- 1.** Calculer la puissance absorbée du moteur.

- 2.** Sachant que la résistance des enroulements du moteur est de $2,5 \Omega$, déterminer la puissance dissipée en chaleur par ce moteur.

- 3.** Calculer le rendement du moteur en admettant que les pertes par effet Joule sont les seules pertes.

- 9** La résistance de l'enroulement (conducteur en cuivre : $\alpha_0 = 0,004$) d'un moteur est de $0,636 \Omega$ à $15 \text{ }^\circ\text{C}$.

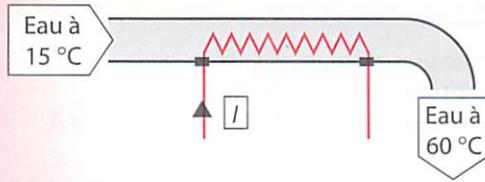
Quelle est sa résistance lorsque le moteur fonctionne et que sa température interne est de $90 \text{ }^\circ\text{C}$?

- 10** Un radiateur de puissance 1500 W fonctionne sous 230 V .

- 1.** Quelle est la résistance de ce radiateur ?

- 2.** Calculer la résistivité du métal qui constitue l'élément chauffant sachant que sa longueur est 2 m et son diamètre 1 mm .

- 11** Voici un chauffe-eau dit « instantané » :



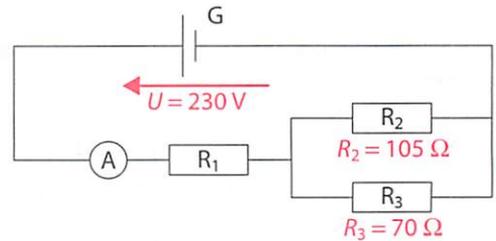
Le tube alimenté en eau à 15 °C fournit de l'eau à 60 °C avec un débit de 2,5 litres par minute.

- Calculer la puissance nécessaire de l'élément chauffant.
- En déduire l'intensité du courant et la résistance si la tension d'alimentation est le réseau 230 V.

- 12** Un lustre comporte 3 lampes à incandescence identiques montées en dérivation. Il absorbe 0,783 A sous la tension 230 V.

- Calculer la puissance et la résistance de chaque lampe.
- Après changement d'une lampe, l'intensité du courant devient 0,957 A. Calculer la puissance et la résistance de la lampe de remplacement.

- 13** Dans le montage ci-dessous, l'ampèremètre indique 2,5 A.



Quelle est la résistance du résistor R_1 ?

- 14** Un rhéostat est constitué d'un fil de ferronickel ($\rho = 80 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ et $\alpha_0 = 0,9 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$) de 300 m de longueur et de 0,2 mm² de section.

La densité du courant ne doit pas dépasser 4 A par mm² ($J = 4 \text{ A/mm}^2$).

Calculer :

- l'intensité maximale du rhéostat ;
- la résistance du fil à 0 °C ;
- la résistance du rhéostat à 70 °C.

Problèmes d'examen

- 15** Une friteuse

L'huile alimentaire d'une friteuse électrique a une masse volumique de 0,9 kg/dm³ et sa capacité thermique massique est 3 300 J.kg⁻¹.K⁻¹.

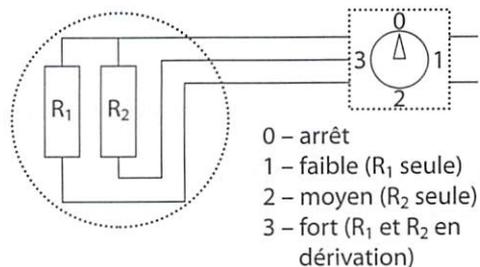
- Calculer la quantité d'énergie thermique qu'il faut fournir à deux litres d'huile pour porter sa température de 20 °C à 180 °C.
- Quelle sera l'énergie électrique absorbée si seulement 75 % sert à chauffer l'huile ?
- Calculer la puissance de l'élément chauffant de la friteuse pour obtenir l'augmentation de température souhaitée en 10 minutes.
- La tension est de 230 V. Calculer la résistance de cet élément chauffant.

- 16** Plaque de cuisson

Une plaque de cuisson possède un foyer ayant deux éléments chauffants. Un commutateur à quatre positions commande ce foyer.

Le constructeur indique sur la notice : $U = 240 \text{ V}$; $R_1 = 64 \Omega$; $P_2 = 1 500 \text{ W}$, mais les valeurs de P_1 et R_2 sont illisibles.

- Compléter la notice du constructeur en calculant les deux valeurs manquantes.
 - Sur ce foyer, on place une casserole contenant deux litres d'eau ($c = 4 190 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Le commutateur est placé sur « fort ». Calculer l'énergie thermique obtenue en cinq minutes de chauffe.
- Si seulement 50 % de cette chaleur est utilisée pour élever la température de l'eau, quelle sera la température atteinte sachant que la température initiale de l'eau était de 15 °C ?



PARTIE 3

ÉLECTROMOTEURS EN COURANT CONTINU

- 11 Générateur de courant continu... p. 66
- 12 Électromoteur récepteur p. 71
- 13 Circuits à une maille p. 76
- 14 Circuits à plusieurs mailles p. 81
- PRÉPARATION À L'EXAMEN* p. 85

11

Générateur
de courant continu

Piles et accumulateurs sont des dipôles électromoteurs.
Comment se comporte un dipôle électromoteur fonctionnant en générateur ?

AVANT DE DÉMARRER...

► L'électromoteur est un dipôle actif

Il existe entre ses bornes une tension non nulle même si aucun courant électrique ne le traverse. De plus, l'électromoteur est capable de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie (ou le contraire).

L'électromoteur est **polarisé** : il présente une borne « plus » et une borne « moins ».

► Générateur ou récepteur ?

Un électromoteur fonctionne en **générateur** lorsqu'il **fournit de l'énergie électrique** à une charge sans l'aide d'une autre source.

L'électromoteur **récepteur transforme** la plus grande partie de **l'énergie électrique** qu'il reçoit **en une autre énergie** non thermique.

Un **électromoteur réversible** peut fonctionner tantôt en générateur, tantôt en récepteur.

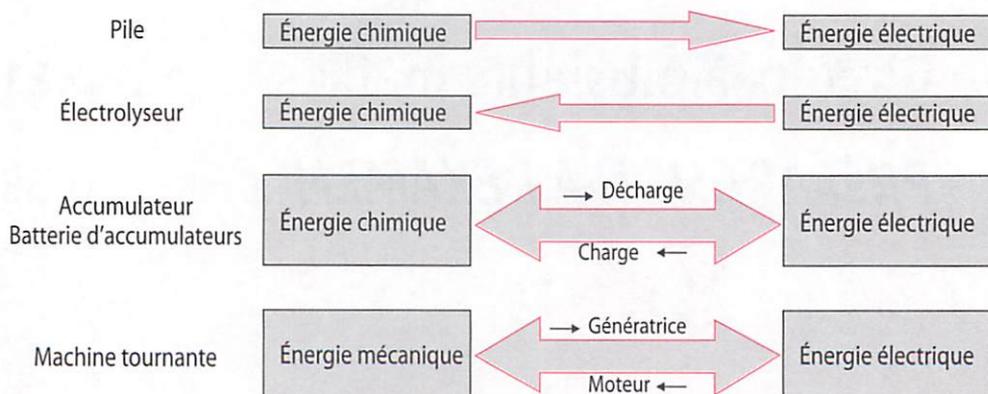


Fig. 1 Les principaux électromoteurs et les échanges énergétiques.

► Convention générateur

Les flèches « courant » et « tension » aux bornes du dipôle sont dans le même sens (fig. 2). Nous rappelons que le dipôle est générateur lorsqu'un courant d'intensité positive sort par la borne « plus ».

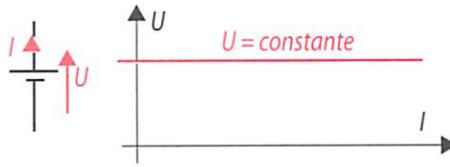


Fig. 2 La tension est la même quelle que soit l'intensité débitée : le générateur est parfait.

► Générateur idéal

Le générateur idéal délivre un courant électrique d'intensité variable selon l'utilisation qui en est faite, mais la **tension** à ses bornes **reste constante** (fig. 2).

OBSERVONS

Les machines tournantes feront l'objet de chapitres particuliers, nous limitons notre propos aux générateurs chimiques.

● Étude d'une pile

Nous étudions une pile 3R12 ; c'est une pile plate dite de 4,5 V (fig. 3).

La lame courte est la connexion du pôle « + ». La lame longue est le pôle « - ».

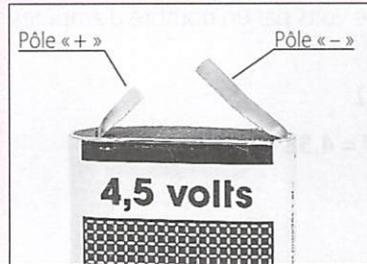


Fig. 3 Une pile plate 3R12 est destinée aux applications à faible consommation d'énergie.

- Montage d'expérimentation (fig. 4)

Le montage doit permettre de relever la tension aux bornes de la pile en fonction de l'intensité du courant qu'elle débite (nous avons choisi un débit maximal de 100 mA afin de ne pas décharger trop rapidement la pile étudiée) :

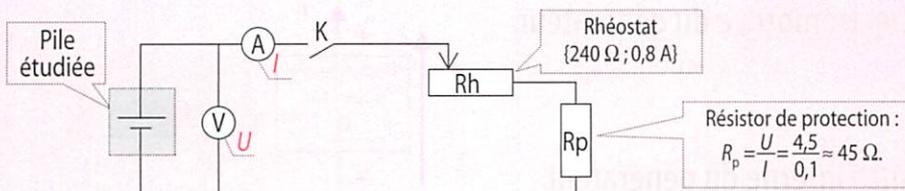


Fig. 4 L'intensité débitée est réglée par le rhéostat ; pour le premier relevé, le rhéostat est en court-circuit.

- Relevés (fig. 5)

K	I en mA	U en V
Fermé	94,3	4,43
	71,5	4,46
	59,2	4,48
	45,4	4,50
	30,7	4,52
Ouvert	0	4,58

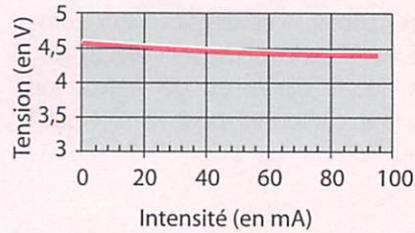
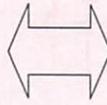


Fig. 5 Les relevés permettent de tracer la courbe associée.

● Analyse

La tension U diminue lorsque l'intensité I débitée augmente.

La courbe qui à I associe U peut être modélisée : c'est une droite ne passant pas par l'origine.

La tension U est une fonction affine de l'intensité du courant I .

L'équation de cette fonction est du type $U = aI + b$.

De quelle nature sont les constantes a et b ?

- **Le paramètre (b)** est l'ordonnée à l'origine (4,58 pour $I = 0$), c'est une quantité exprimée en volts.

Nous dirons que $b = E = 4,58$ V.

- **Le coefficient directeur (a)** est négatif (courbe décroissante) : $a = \frac{4,46 - 4,58}{0,0715 - 0} = -1,68$.

Sa valeur est le quotient d'un nombre de volts par un nombre d'ampères et représente donc une quantité exprimée en ohms.

Nous dirons que $a = -R$ avec $R = 1,68 \Omega$.

L'équation de la pile étudiée est donc **$U = 4,58 - 1,68 I$** .

À SAVOIR

1. Les deux grandeurs caractéristiques

Tout électromoteur générateur est caractérisé par deux constantes (fig. 6).

a) La force électromotrice du générateur

Son symbole est E , la force électromotrice (fém) s'exprime en volts.

b) La résistance interne du générateur

Son symbole est R , la résistance interne s'exprime en ohms (Ω).

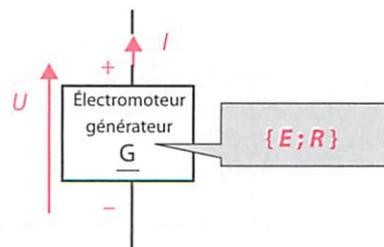


Fig. 6 E et R caractérisent le générateur.

2. Loi d'Ohm pour un générateur

C'est la relation associée à la courbe modélisée de la **figure 5**.

La tension positive qui peut être mesurée entre les bornes d'un électromoteur fonctionnant en générateur est égale à sa force électromotrice diminuée de la chute de tension ohmique (produit RI) :

$$U = E - RI \quad \left\{ \begin{array}{l} U \text{ tension aux bornes (en V)} \\ E \text{ force électromotrice (en V)} \\ R \text{ résistance interne (en } \Omega \text{)} \\ I \text{ intensité débitée (en A).} \end{array} \right.$$

3. Bilan des puissances

a) Bilan électrique

- La **puissance utile** fournie (**fig. 7**) est : $P_u = UI$, soit $P_u = (E - RI) I$.

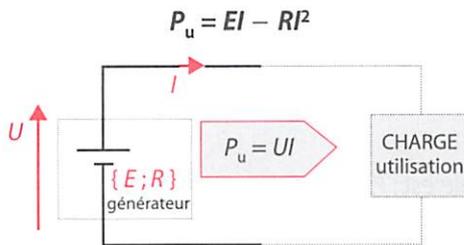


Fig. 7 Le générateur alimente une charge.

- Les **pertes par effet Joule** dans la résistance interne du générateur sont :

$$P_j = RI^2$$

- Nous appellerons **puissance électrique totale** (P_{et}) le produit de la force électromotrice par l'intensité du courant :

$$P_{et} = EI$$

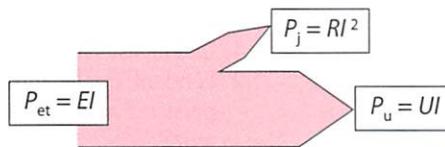


Fig. 8 La répartition des puissances électriques.

Le rendement électrique du générateur est $\eta_e = \frac{P_u}{P_{et}} = \frac{UI}{EI}$ soit $\eta_e = \frac{U}{E}$.

b) Bilan global des puissances

Aux pertes joules s'ajoutent d'autres pertes non électriques et le rendement global (ou industriel) $\eta = \frac{P_u}{P_a}$ est inférieur au rendement électrique (**fig. 9**).

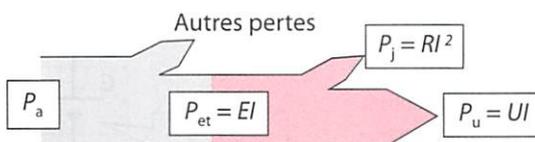


Fig. 9 La puissance absorbée est supérieure à la puissance électrique totale.

4. Les états particuliers du générateur

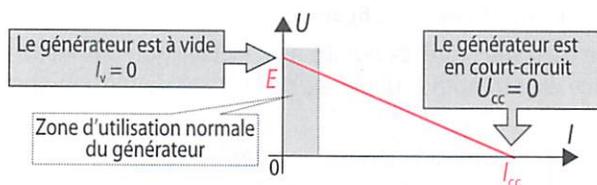


Fig. 10 Les deux états extrêmes du générateur.

• Générateur à vide :

Aucune charge n'est connectée ($I_v = 0$) :

$$U_v = E - R \times 0 \Rightarrow U_v = E.$$

Le rendement est nul puisque :

$$P_{uv} = U_v I_v = 0.$$

• Générateur en court-circuit :

$$U_{cc} = E - R I_{cc} = 0.$$

Donc $R I_{cc} = E$ et l'intensité du courant de court-circuit est $I_{cc} = \frac{E}{R}$.

Le rendement est nul puisque :

$$P_{ucc} = U_{cc} I_{cc} = 0.$$

• Puissance utile maximale :

Elle est obtenue pour une intensité égale à la moitié du courant de court-circuit, soit pour

$$I = \frac{E}{2R} \text{ et la tension est alors : } U = \frac{E}{2}.$$

La valeur de la puissance utile maximale est : $P_{umax} = UI = \frac{E}{2} \times \frac{E}{2R} \Rightarrow P_{umax} = \frac{E^2}{4R}$.

TESTEZ VOS CONNAISSANCES

- Parmi les propositions suivantes, quelles sont celles qui qualifient une batterie d'accumulateurs d'automobile ?
a) Électromoteur toujours générateur.
b) Électromoteur fonctionnant toujours en récepteur.
c) Électromoteur réversible.
- Un générateur de force électromotrice 13 V et de résistance interne $0,01 \Omega$ débite un courant d'intensité 40 A. Quelle est la tension qu'il présente entre ses bornes ?
a) 13,4 V. b) 9 V. c) 12,6 V. d) 519 V.
- La pile étudiée précédemment a pour caractéristiques : $E = 4,58 \text{ V}$ et $R = 1,68 \Omega$. Quelle sera l'intensité du courant en cas de court-circuit ?
a) 367 mA. b) 2,73 A. c) 36,7 A. d) 273 mA.
- Le démarreur d'une automobile est placé sous une tension de 10,2 V alors que la batterie qui l'alimente a une force électromotrice de 12,4 V et une résistance interne de $0,011 \Omega$. Quelle est l'intensité débitée durant le démarrage ?
- Un accumulateur chargé possède une quantité d'électricité de 120 mAh. Sa force électromotrice est de 9,4 V et sa résistance interne est de 3Ω . Lors d'un fonctionnement à courant constant, la tension est de 8,8 V.
1. Quelle est l'intensité du courant débité ?
2. Pendant quelle durée ce fonctionnement peut-il persister avant la décharge totale de l'accumulateur ?
- Une batterie d'accumulateurs de force électromotrice 12,4 V débite un courant d'intensité 40 A, la tension entre ses bornes est alors de 11,8 V.
1. Quelle est la résistance interne de cette batterie ?
2. Calculer alors la puissance maximale qu'elle peut produire.
3. Calculer son intensité de court-circuit.
- Dans le montage ci-dessous, calculer la tension U puis la résistance R' du résistor de charge.

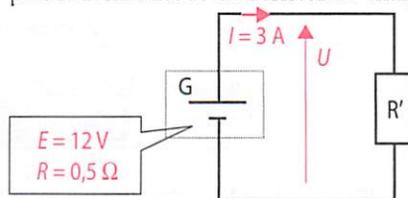


Fig. 11.

12 Électromoteur récepteur

Nous allons étudier l'électromoteur lorsqu'il fonctionne en récepteur.

AVANT DE DÉMARRER...

► Propriétés de l'électromoteur récepteur

Un électromoteur, réversible ou non, fonctionne en **récepteur** dès qu'il **absorbe de l'énergie électrique**.

C'est alors un **récepteur actif** : la plus grande partie de l'énergie électrique reçue par le dipôle électromoteur est convertie en énergie mécanique (moteur) ou en énergie chimique (électrolyseurs).

Nous rappelons que le dipôle récepteur passif est le résistor qui transforme en chaleur toute l'énergie électrique qu'il reçoit.

L'électromoteur récepteur est **polarisé** : un courant positif entre par sa borne « plus » et nous lui appliquons la convention récepteur (**fig. 1**).

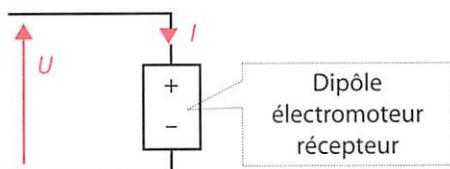


Fig. 1

OBSERVONS

● Étude de la charge d'un accumulateur

Nous étudions le comportement d'un accumulateur cadmium-nickel R22 pendant le fonctionnement récepteur, c'est-à-dire en phase de charge (**fig. 2**).

Le fabricant indique que la charge normale s'effectue à courant constant d'intensité 11 mA durant 14 h, la quantité d'électricité alors disponible pour l'accumulateur chargé est :

$$Q = 140 \text{ mAh.}$$

Fig. 2 L'accumulateur R22 peut remplacer une pile de 9 V et peut être rechargé mille fois.



- Montage d'expérimentation

Le montage expérimental doit permettre de relever la tension aux bornes de l'accumulateur en fonction de l'intensité du courant de charge.

La source d'énergie électrique est de tension continue fixe $U = 24 \text{ V}$, l'intensité du courant est réglée par un rhéostat et une résistance de protection limite l'intensité maximale (fig. 3).

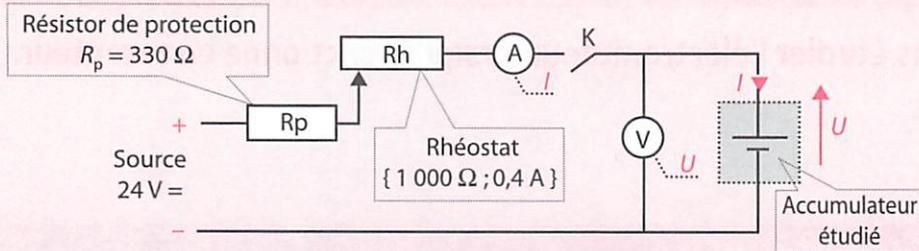


Fig. 3 L'intensité de charge est limitée à 50 mA.

- Relevés (fig. 4)

K	I en mA	U en V
Fermé	46,8	9,94
	31,4	9,84
	21	9,78
	11,7	9,74
Ouvert	0	9,64

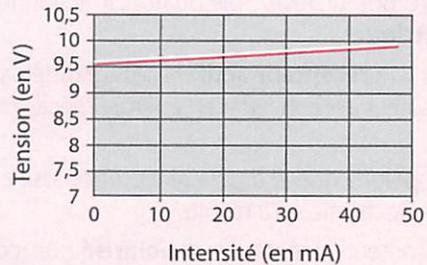
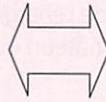


Fig. 4 Les relevés permettent de tracer la courbe associée.

● Analyse

La tension aux bornes du récepteur croît lorsque l'intensité I du courant de charge augmente. La courbe qui à I associe U peut être modélisée : c'est une droite ne passant pas par l'origine. La tension U est une fonction affine de l'intensité du courant I .

L'équation de cette fonction est du type $U = aI + b$.

La nature des constantes a et b est comparable à celle du générateur.

– **Le paramètre b** est l'ordonnée à l'origine (9,64 pour $I = 0$), c'est une quantité exprimée en volts.

Nous dirons que $b = E = 9,64 \text{ V}$.

– **Le coefficient directeur (a)** est positif (courbe croissante) :

$$a = \frac{9,94 - 9,74}{0,0468 - 0,0117} = 5,7.$$

Sa valeur est le quotient d'un nombre de volts par un nombre d'ampères et représente donc une quantité en ohms.

Nous dirons que $a = R = 5,7 \Omega$.

L'équation relative à l'accumulateur étudié est donc :

$$U = 9,64 + 5,7 I.$$

1. Les paramètres du récepteur actif

L'électromoteur récepteur est caractérisé par les mêmes constantes (fig. 5) que le générateur.

a) La force électromotrice du récepteur

Son symbole est E , la force électromotrice (fém) s'exprime en volts.

Notons que certains ouvrages utilisent le terme de force contre-électromotrice.

b) La résistance interne du récepteur

Son symbole est R , la résistance interne s'exprime en ohms (Ω).

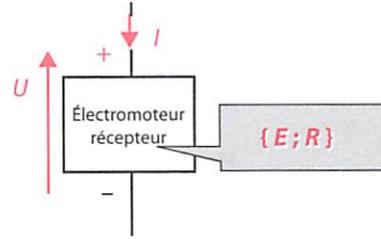


Fig. 5 E et R caractérisent le récepteur.

2. Loi d'Ohm pour un électromoteur récepteur

C'est la relation associée à la courbe modélisée de la figure 4.

La tension positive qui peut être mesurée entre les bornes d'un électromoteur fonctionnant en récepteur, est égale à sa force électromotrice augmentée de la chute de tension ohmique (produit RI) :

$$U = E + RI$$

}	U	tension aux bornes	(en V)
	E	force électromotrice	(en V)
	R	résistance interne	(en Ω)
	I	intensité débitée	(en A).

3. Bilan des puissances du récepteur

a) Bilan électrique

- La **puissance absorbée électrique** est (fig. 6) : $P_a = UI$, soit $P_a = (E + RI) I$.

$$P_a = EI + RI^2$$

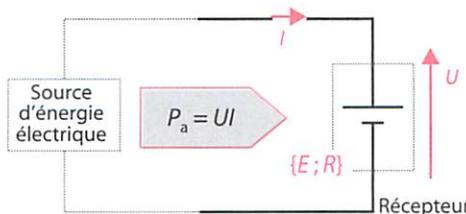


Fig. 6 Le récepteur absorbe $P_a = UI$.

- Les **pertes par effet Joule** dans la résistance interne du récepteur sont :

$$P_j = RI^2$$

• La puissance restante est la puissance électrique utile (P_{eu}).

$$P_{eu} = P_a - P_j.$$

Sa valeur est égale au produit de la force électromotrice par l'intensité du courant de charge :

$$P_{eu} = EI$$

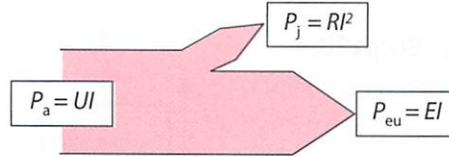


Fig. 7 La répartition des puissances électriques.

Le rendement électrique du récepteur est $\eta_e = \frac{P_{eu}}{P_a} = \frac{EI}{UI}$ soit $\eta_e = \frac{E}{U}$.

b) Bilan global des puissances

Aux pertes joules s'ajoutent d'autres pertes non électriques et le rendement global (ou industriel) $\eta = \frac{P_u}{P_a}$ est inférieur au rendement électrique (fig. 8).

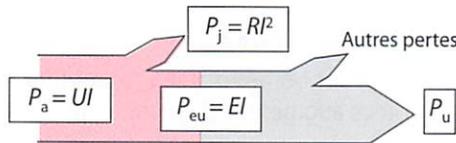


Fig. 8 La puissance utile est inférieure à la puissance électrique utile.

4. Électromoteur réversible

Lorsque l'électromoteur récepteur est réversible, son fonctionnement en générateur conduit à un courant électrique d'intensité négative et la caractéristique aura l'allure de la figure 9.

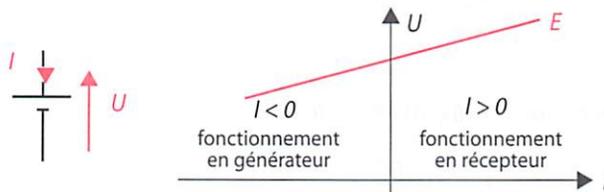


Fig. 9 Caractéristique d'un électromoteur réversible avec la convention récepteur.

L'adoption de la convention générateur inverse la représentation, mais la caractéristique est équivalente (fig. 10).

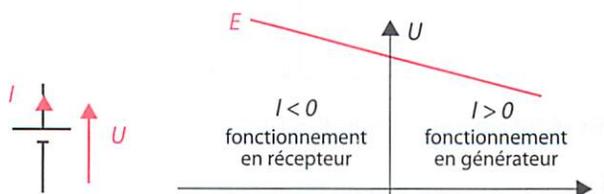


Fig. 10 Caractéristique d'un électromoteur réversible avec la convention générateur.

TESTEZ VOS CONNAISSANCES

- 1 Les piles peuvent être remplacées par des accumulateurs de dimensions identiques. À ce propos, les affirmations ci-dessous sont-elles exactes ?
 - a) Le prix d'achat de l'accumulateur est inférieur à celui de la pile correspondante.
 - b) Son coût est moindre à long terme.
 - c) Son emploi nécessite un chargeur adapté.
- 2 Le dipôle électromoteur fournit l'énergie électrique pour un téléphone portable. Quelle est sa nature ?
 - a) Uniquement générateur.
 - b) Réversible.
 - c) Uniquement récepteur.
- 3 Comment fonctionne la batterie d'accumulateurs du moteur thermique d'une automobile qui « tourne » ?
 - a) En générateur.
 - b) En récepteur.
- 4 Une batterie d'accumulateurs de force électromotrice 12,2 V et de résistance interne $0,02 \Omega$ est chargée par un courant constant de 15 A. Quelle est la tension à ses bornes ?
 - a) 11,9 V.
 - b) 15,2 V.
 - c) 12,5 V.
 - d) 9,2 V.
- 5 Pour charger un élément accumulateur R20, on effectue une charge pendant 6 h avec un courant d'intensité 350 mA.
 1. Sachant que la fém est de 1,25 V et la résistance interne est de $0,8 \Omega$, quelle doit être la tension de charge ?
 2. L'accumulateur en fin de charge aura emmagasiné une quantité d'électricité de 1,4 Ah. Quel est le rendement en quantité d'électricité de cette charge ?
- 6 Lors d'un fonctionnement en générateur, une batterie automobile fournit un courant d'intensité 5 A et la tension à ses bornes est de 12,4 V. Cette même batterie absorbant un courant d'intensité 10 A présente une tension de 13 V. Déterminer la force électromotrice et la résistance interne de cet électromoteur.
- 7 Une cuve d'électrolyse est traversée par un courant d'intensité 30 A sous une tension de 2,6 V. Lorsque le courant n'est plus que de 10 A, la tension est de 1,6 V. Calculer la résistance interne de cette cuve et sa force électromotrice.
- 8 Un moteur à courant continu (considéré comme un électromoteur récepteur) présente une résistance interne de $0,5 \Omega$. En fonctionnement, il absorbe un courant d'intensité 30 A sous une différence de potentiel de 190 V.
 1. Calculer la force électromotrice du moteur.
 2. Calculer la puissance absorbée et la puissance électrique utile.
 3. Déterminer le rendement électrique du moteur.
 4. Quel sera le rendement global de la machine si les pertes non électriques sont égales aux pertes joules ?

13 Circuits à une maille

Plusieurs dipôles montés en série, les uns à la suite des autres en constituant un circuit fermé, forment une maille.

AVANT DE DÉMARRER...

► Une maille

L'association série de plusieurs dipôles identifiés, électromoteurs ou résistors, constitue une maille traversée par un **courant unique** (fig. 1).

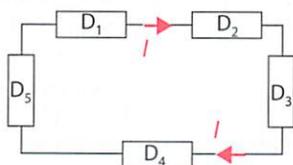


Fig. 1 Le courant est commun à chaque dipôle.

► Électromoteurs en série

Nous dirons que sont en série des électromoteurs qui se succèdent en connectant leurs bornes de polarités opposées (fig. 2) :

- si un courant d'intensité positive circule de A vers B, tous les électromoteurs sont **générateurs** ;
- dans le cas contraire, le courant d'intensité positive circule de B vers A, et les électromoteurs sont **récepteurs**.

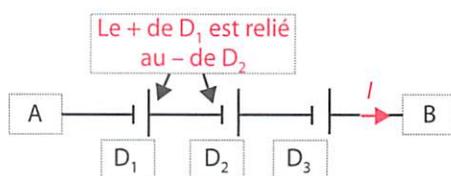


Fig. 2 Le dipôle {AB} est constitué de trois électromoteurs en série.

► Électromoteurs en opposition

Lorsque, sur une branche, deux électromoteurs sont reliés successivement par les mêmes polarités, nous dirons qu'ils sont en opposition (fig. 3) :

- si un courant d'intensité positive circule de C vers D, l'électromoteur D_1 est générateur et D_2 est récepteur ;
- dans le cas contraire, l'électromoteur D_1 est récepteur et D_2 est générateur.

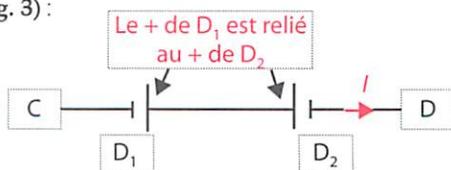


Fig. 3 Le dipôle {CD} est constitué de deux électromoteurs en opposition.

● Montage d'expérimentation

Nous avons associé en série trois piles de caractéristiques identiques; elles alimentent un accumulateur lui-même placé en série avec un résistor (fig. 4).

Nous supposons que les piles fonctionnent en électromoteurs générateurs et nous avons orienté le courant électrique en conséquence. Un ampèremètre mesure l'intensité du courant dans la maille.

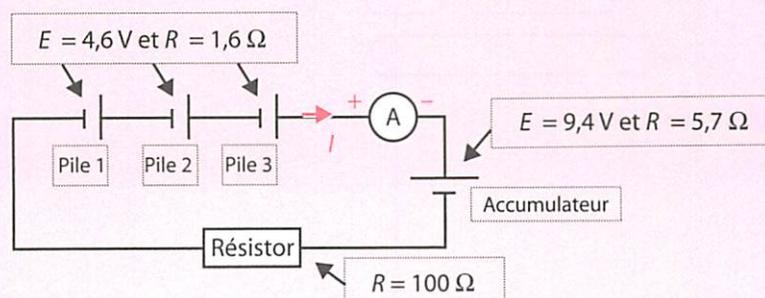


Fig. 4 Le courant de circulation choisi est imposé à tous les dipôles.

● Relevé et constatations

La mesure de l'intensité donne $I = 40 \text{ mA}$.

L'ampèremètre confirme le sens réel du courant électrique puisque sa mesure est positive :

- les trois piles fonctionnent en générateur (heureusement, car elles ne sont pas réversibles!),
- l'accumulateur est récepteur.

● Calcul de I

– **Le sens des tensions** aux bornes des résistors est imposé par celui du courant (fig. 5) et aux bornes des électromoteurs par leurs polarités.

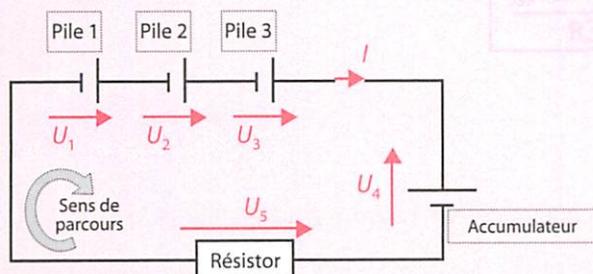


Fig. 5 Les tensions dans la maille.

Les dipôles générateurs :

$$U_1 = E_1 - R_1 I$$

$$U_2 = E_2 - R_2 I$$

$$U_3 = E_3 - R_3 I$$

Les dipôles récepteurs :

$$U_4 = E_4 + R_4 I$$

$$U_5 = R_5 I$$

– **La loi des mailles** permet d'obtenir une seule équation en fonction de I :

$$U_1 + U_2 + U_3 - U_4 - U_5 = 0$$

$$E_1 - R_1 I + E_2 - R_2 I + E_3 - R_3 I - (E_4 + R_4 I) - R_5 I = 0$$

$$E_1 + E_2 + E_3 - E_4 = R_1 I + R_2 I + R_3 I + R_4 I + R_5 I$$

$$(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5) I = E_1 + E_2 + E_3 - E_4$$

D'où le calcul de I :

$$I = \frac{E_1 + E_2 + E_3 - E_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5} \Rightarrow I = \frac{4,6 + 4,6 + 4,6 - 9,4}{1,6 + 1,6 + 1,6 + 5,7 + 100} = \frac{4,4}{110,5} \Rightarrow I = 39,8 \text{ mA.}$$

- La structure de ce calcul conduit à constater que :

The diagram shows the formula $I = \frac{E_1 + E_2 + E_3 - E_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5}$ with three callout boxes:

- A box labeled "Somme des forces électromotrices des générateurs" points to the terms $E_1 + E_2 + E_3$ in the numerator.
- A box labeled "Somme des forces électromotrices des récepteurs" points to the term E_4 in the numerator.
- A box labeled "Somme de toutes les résistances" points to the denominator $R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$.

À SAVOIR

1. Intensité dans un circuit à une maille

Après le choix du sens de circulation du courant dans la maille, le comportement de chaque dipôle électromoteur est identifié :

- générateur si le courant sort par la borne « + » ;
- récepteur si le courant entre par la borne « + ».

L'intensité du courant dans une maille est égale à la somme des forces électromotrices des électromoteurs générateurs, diminuée de la somme des forces électromotrices des électromoteurs récepteurs, divisée par la somme de toutes les résistances du circuit :

$$I = \frac{\sum E_{\text{GEN}} - \sum E_{\text{REC}}}{\sum R}$$

2. À propos du sens de I

Il est clair que le choix du sens de parcours du courant détermine qui est générateur, et qui est récepteur.

Si nous inversons le sens du courant (le sens peut être choisi arbitrairement), alors les comportements générateur et récepteur sont inversés, les signes des termes du numérateur changent, et nous trouvons, pour l'intensité, la valeur opposée à la précédente :

- le sens trigonométrique, par exemple, donne $I = 1,2 \text{ A}$;
- le sens inverse donnerait $I' = -1,2 \text{ A}$.

Le fait de trouver une valeur négative indique clairement que le sens que nous avons choisi au hasard n'est pas le bon.

Inutile de recommencer les calculs : le courant circule dans la maille avec le sens opposé à celui que nous avons choisi (et les comportements réels des électromoteurs sont inversés).

3. Des circuits simples

L'application de la loi précédente donne des relations directement utilisables lorsque nous sommes en présence des circuits simples qui suivent.

a) Un générateur alimente un résistor

Il n'y a pas d'électromoteur récepteur, le montage est celui de la **figure 6**.

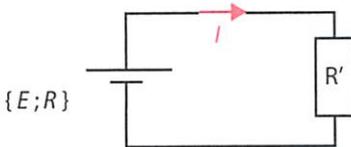


Fig. 6

L'intensité du courant qui circule est :

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

b) Un générateur alimente un récepteur actif

Les deux électromoteurs sont en opposition (**fig. 7**).

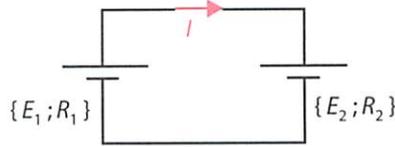


Fig. 7

L'intensité du courant qui circule est :

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_2}$$

4. Dipôle équivalent à plusieurs électromoteurs en série

a) Cas général

Un groupe de plusieurs électromoteurs peut être remplacé par un seul, c'est l'électromoteur équivalent (**fig. 8**) :

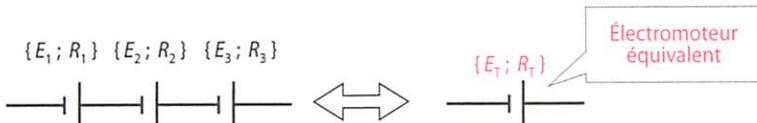


Fig. 8 Un seul électromoteur remplace plusieurs électromoteurs en série.

- **Force électromotrice** de l'électromoteur équivalent :

$$E_T = E_1 + E_2 + E_3 \Rightarrow E_T = \Sigma E$$

- **Résistance interne** de l'électromoteur équivalent :

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 \Rightarrow R_T = \Sigma R$$

b) Lorsque les électromoteurs en série sont identiques

Comme dans une batterie d'accumulateurs, les électromoteurs mis en série sont souvent identiques. L'électromoteur équivalent a alors pour caractéristiques (**fig. 9**) :

$$E_T = nE \quad \text{et} \quad R_T = nR$$

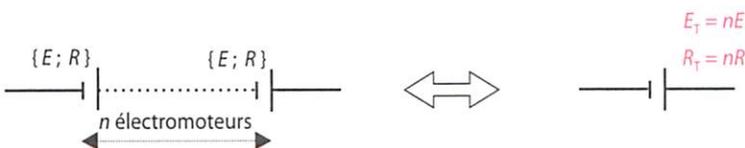


Fig. 9 Électromoteurs identiques en série.

TESTEZ VOS CONNAISSANCES

- 1 Le sens choisi du courant entre par la borne « plus » d'un électromoteur. Comment fonctionne-t-il ?
a) En générateur. b) En récepteur.

- 2 Pour le montage ci-dessous, quelles sont les affirmations exactes en fonction du sens choisi du courant ?
a) Le dipôle D_1 est générateur.
b) Le dipôle D_1 est récepteur.
c) Le dipôle D_2 est générateur.
d) Le dipôle D_2 est récepteur.

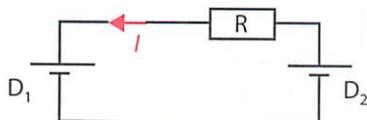


Fig. 10

- 3 Un générateur, de force électromotrice 12 V et de résistance interne $0,5 \Omega$, débite dans un résistor de résistance 2Ω . Quelle est l'intensité du courant qui circule ?
a) 6 A. b) 4,8 A. c) 8 A. d) 24 A.

- 4 Dans la maille ci-dessous, le sens du courant est choisi. Quelle est la relation correcte qui permet de déterminer I ?

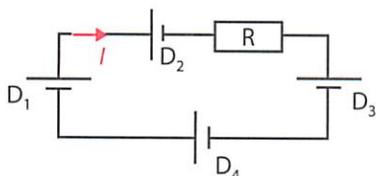


Fig. 11

- a) $I = \frac{E_1 - E_2 - (E_3 + E_4)}{R_1 + R_2 - R_3 + R_4}$.
b) $I = \frac{E_1 + E_4 - E_3 + E_2}{R_1 + R_2 + R + R_3 + R_4}$.
c) $I = \frac{E_1 + E_4 - (E_2 + E_3)}{R_1 + R_2 + R + R_3 + R_4}$.

- 5 Une batterie d'accumulateurs d'automobile est constituée de 6 accumulateurs au plomb présentant chacun une force électromotrice de 2,2 V et une résistance interne de $10 \text{ m}\Omega$.

Quelles sont les caractéristiques de l'électromoteur équivalent à cette batterie ?

- a) $E = 12 \text{ V}$ et $R = 6 \Omega$.
b) $E = 13,2 \text{ V}$ et $R = 0,01 \Omega$.
c) $E = 2,2 \text{ V}$ et $R = 60 \text{ m}\Omega$.
d) $E = 13,2 \text{ V}$ et $R = 0,06 \Omega$.

- 6 Un générateur ($E = 120 \text{ V}$; $R = 2,5 \Omega$) alimente un résistor. Nous voulons que l'intensité du courant dans le circuit soit de 10 A. Calculer la résistance du résistor nécessaire.

- 7 Soit le montage suivant dans lequel le sens du courant est déjà choisi :

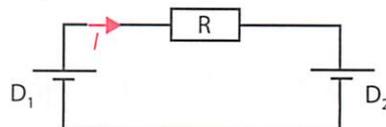


Fig. 12

Pour D_1 : $E_1 = 24 \text{ V}$; $R_1 = 2 \Omega$.

Pour D_2 : $E_2 = 18 \text{ V}$; $R_2 = 0,5 \Omega$.

Pour le résistor : $R = 3,5 \Omega$.

1. Calculer l'intensité du courant dans la maille.
2. Calculer la tension aux bornes de chaque dipôle.

- 8 La batterie d'accumulateurs ($E = 9,8 \text{ V}$; $R = 0,055 \Omega$) de mon automobile est faiblement chargée et ne permet plus d'entraîner le démarreur. Avec deux câbles, je relie, en opposition, la batterie d'accumulateurs ($E = 13,2 \text{ V}$; $R = 0,03 \Omega$) d'un autre véhicule. Au moment de cette liaison, une étincelle importante jaillit ! Quelle est l'intensité du courant qui circule à cet instant ?

14 Circuits à plusieurs mailles

Un circuit est à plusieurs mailles lorsque des dipôles, électromoteurs ou résistors, sont montés en dérivation.

AVANT DE DÉMARRER...

► Éléments d'un circuit à plusieurs mailles

Dans l'étude d'un circuit à plusieurs mailles, lorsque les caractéristiques des dipôles sont connues, plusieurs grandeurs (tensions et intensités) sont inconnues.

Ainsi, dans le montage de la **figure 1**, nous pouvons relever :

– l'existence de trois mailles :

- 1) la maille ABEF ;
- 2) la maille BCDE ;
- 3) la maille externe ACDF ;

– des courants I_1 , I_3 et I_4 dont les intensités sont inconnues (notons que les sens de ces courants ont été choisis arbitrairement) ;

– les tensions U_1 , U_2 , U_3 , U_4 et U_5 dont les valeurs sont également inconnues.

Le traitement d'un tel circuit conduit à résoudre un problème de huit équations à huit inconnues ! Bien que faisable, cette résolution serait longue et périlleuse. Nous allons limiter le nombre des inconnues au nombre des courants seulement (ici trois).

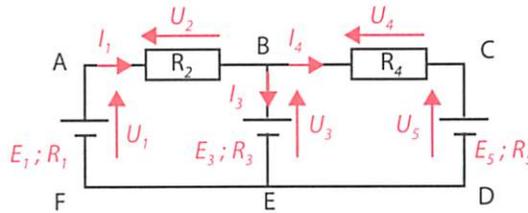


Fig. 1 Ce circuit comporte trois mailles.

OBSERVONS

● Mesure des intensités

Nous réalisons le montage précédent en installant trois ampèremètres afin d'effectuer les mesures des intensités I_1 , I_3 et I_4 (**fig. 2**).

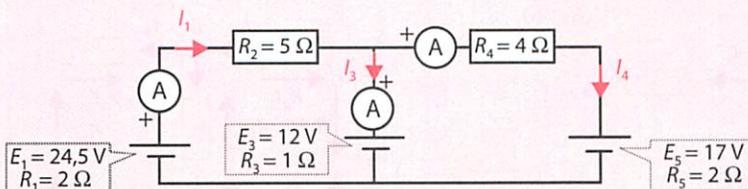


Fig. 2 Le montage d'expérimentation.

Cette mesure s'effectue en respectant soigneusement les polarités : des ampèremètres numériques sont branchés en fonction des orientations choisies des courants.

● Relevés et constatations

- Les ampèremètres indiquent : $I_1 = 1,51 \text{ A}$; $I_3 = 2,02 \text{ A}$; $I_4 = -0,51 \text{ A}$.
- Dans le choix effectué, le dipôle électromoteur D_1 était générateur et le dipôle D_3 était récepteur. Puisque les courants I_1 et I_3 sont positifs, ces comportements sont réels. Le courant I_4 est négatif, donc le dipôle électromoteur D_5 est générateur.

À SAVOIR

Comment déterminer les valeurs des intensités sans effectuer les mesures précédentes ?

1. Modèle équivalent de Thévenin d'un électromoteur

L'électromoteur est remplacé par deux dipôles élémentaires en série :

- un résistor de résistance égale à la résistance interne R de l'électromoteur et représenté par le rectangle habituel ;
- une source de tension (parfaite) de valeur égale à la force électromotrice E de l'électromoteur et symbolisée par un cercle. Cette source de tension est, bien sûr, orientée selon les polarités de l'électromoteur (du moins vers le plus).

a) Dipôle équivalent à un électromoteur générateur

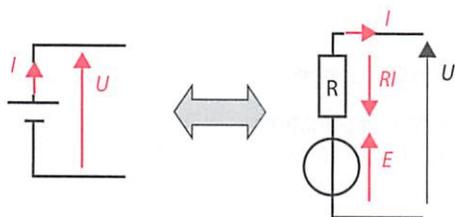


Fig. 3 Aux bornes du dipôle équivalent, la loi d'Ohm générateur est vérifiée : $U = E - RI$.

b) Dipôle équivalent à un électromoteur récepteur

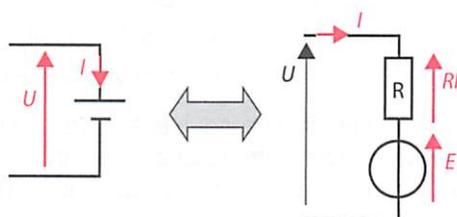


Fig. 4 Aux bornes du dipôle équivalent, la loi d'Ohm récepteur est vérifiée : $U = E + RI$.

2. Mise en équation

a) Choisir le sens des courants et faire le schéma équivalent

Pour illustrer la méthode, nous conservons le montage précédent avec les mêmes hypothèses quant aux sens des courants (fig. 5).

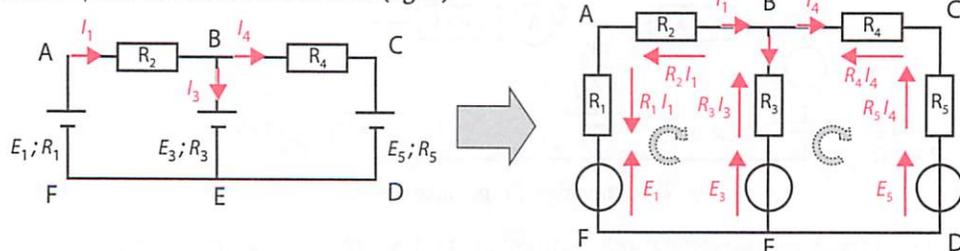


Fig. 5 Chaque électromoteur est remplacé par son dipôle équivalent.

b) Établir les équations relatives aux courants

Ces équations sont obtenues en appliquant la loi des nœuds.

Ici, au nœud B (ou au nœud E) : $I_1 = I_3 + I_4$.

c) Établir les équations relatives aux tensions

Ces équations sont obtenues en appliquant la loi des mailles.

Les trois mailles de notre montage permettent d'établir deux équations (trois possibles) :

– maille FABE $\rightarrow E_1 - R_1 I_1 - R_2 I_1 - R_3 I_3 - E_3 = 0$;

– maille EBCD $\rightarrow E_3 + R_3 I_3 - R_4 I_4 - R_5 I_4 - E_5 = 0$.

3. Résolution

• Nous sommes alors en présence d'un système de n équations à n inconnues.

C'est un problème mathématique dont la résolution, par des méthodes d'addition ou de substitution, va conduire à déterminer les intensités recherchées.

Ici, le système porte sur les trois équations suivantes :

$$\begin{cases} I_1 = I_3 + I_4 \\ E_1 - R_1 I_1 - R_2 I_1 - R_3 I_3 - E_3 = 0 \\ E_3 + R_3 I_3 - R_4 I_4 - R_5 I_4 - E_5 = 0. \end{cases}$$

• En remplaçant les grandeurs connues et en regroupant les termes de même nature, nous obtenons :

$$\begin{cases} I_1 = I_3 + I_4 \\ 24,5 - 2I_1 - 5I_1 - I_3 - 12 = 0 \\ 12 + I_3 - 4I_4 - 2I_4 - 17 = 0 \end{cases} \quad \text{soit} \quad \begin{cases} I_1 = I_3 + I_4 \\ 12,5 - 7I_1 - I_3 = 0 \\ I_3 - 6I_4 = 5. \end{cases}$$

• Par substitution de I_1 puis de I_3 nous obtenons les trois intensités :

$$\begin{cases} 12,5 - 7(I_3 + I_4) - I_3 = 0 \\ I_3 - 6I_4 = 5 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 12,5 - 8I_3 - 7I_4 = 0 \\ I_3 = 5 + 6I_4 \end{cases} \Rightarrow 12,5 - 8(5 + 6I_4) - 7I_4 = 0.$$

$$12,5 - 40 - 48I_4 - 7I_4 = 0 \Rightarrow -55I_4 = 27,5 \Rightarrow I_4 = \frac{27,5}{-55} \Rightarrow I_4 = -0,5 \text{ A}$$

$$\text{et donc : } I_3 = 5 + 6(-0,5) \Rightarrow I_3 = 2 \text{ A,}$$

$$\text{puis } I_1 = 2 + (-0,5) \Rightarrow I_1 = 1,5 \text{ A.}$$

• Notons que ces valeurs vérifient sensiblement les grandeurs mesurées précédemment.

Remarque : la recherche des tensions partielles aux bornes de chaque dipôle est ensuite possible par l'application simple des lois d'Ohm puisque toutes les intensités sont maintenant déterminées.

4. Dipôle équivalent à plusieurs électromoteurs identiques en dérivation

Il faut être prudent : le couplage en dérivation de plusieurs électromoteurs conduit souvent à des courants de circulation d'intensités d'autant plus importantes que les résistances internes sont faibles. Nous pouvons toujours calculer les intensités de ces courants par la méthode que nous venons de découvrir.

Cependant, si des électromoteurs strictement identiques sont mis en dérivation, nous pouvons remplacer ce groupement par un seul électromoteur équivalent (fig. 6).

L'électromoteur équivalent a pour caractéristiques : $E_T = E$ et $R_T = \frac{R}{n}$.

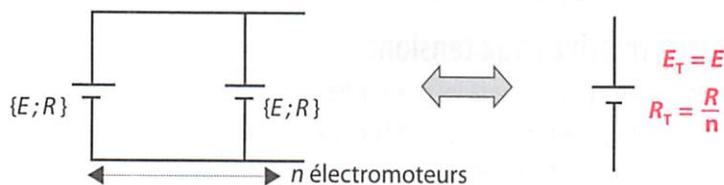


Fig. 6 Cas de n électromoteurs identiques en dérivation.

TESTEZ VOS CONNAISSANCES

- 1 Dans le montage ci-dessous, que doit-on faire pour calculer l'intensité I ?

- Rechercher 3 équations à 3 inconnues.
- Remplacer R_1 et R_2 par leur résistance équivalente.
- Réduire le circuit à une seule maille.

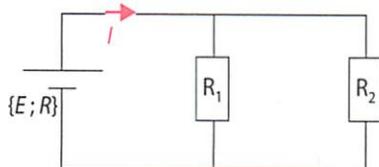


Fig. 7

- 2 Trois batteries d'accumulateurs identiques ($E = 13,2$ V et $R = 0,012$ Ω) sont mises en parallèle. L'ensemble se comporte comme un seul générateur. Quelles sont ses caractéristiques ?

- $E = 39,6$ V et $R = 0,036$ Ω .
- $E = 13,2$ V et $R = 0,012$ Ω .
- $E = 13,2$ V et $R = 4$ m Ω .
- $E = 4,4$ V et $R = 0,004$ Ω .

- 3 Le montage ci-dessous n'est pas envisageable, pourquoi ?

- Il n'y aura pas de courant.
- L'un des électromoteurs est inversé.
- Il y a un court-circuit.
- Les deux électromoteurs sont en opposition.

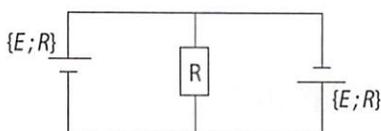


Fig. 8

- 4 Un générateur de force électromotrice 84 V et de résistance interne 1,2 Ω , alimente un groupement de deux résistors $R_1 = 18$ Ω et $R_2 = 12$ Ω montés en dérivation.

- Calculer l'intensité du courant débité par le générateur.
- Déterminer l'intensité du courant dans chaque résistor.

- 5 Trois électromoteurs différents sont en dérivation :

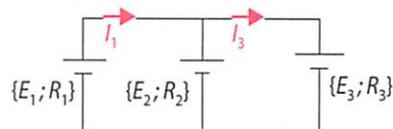


Fig. 9

$$\begin{aligned} E_1 &= 13 \text{ V et } R_1 = 0,03 \text{ } \Omega ; \\ E_2 &= 12 \text{ V et } R_2 = 0,04 \text{ } \Omega ; \\ E_3 &= 11 \text{ V et } R_3 = 0,05 \text{ } \Omega . \end{aligned}$$

Faire l'hypothèse que le dipôle D_2 est générateur. Calculer l'intensité du courant qu'il fournit. D_2 est-il vraiment générateur ?

- 6 Une batterie d'accumulateurs d'automobile de caractéristiques :

$$E = 13,2 \text{ V et } R = 0,01 \text{ } \Omega$$

alimente en parallèle simultanément deux lampes d'éclairage (de résistance 6 Ω) et un moteur à courant continu ($E = 12$ V et $R = 0,2$ Ω).

Faire un schéma précis de l'ensemble, puis un schéma simplifié équivalent.

Calculer la tension commune aux bornes de chacun des dipôles.

PRÉPARATION À L'EXAMEN

L'ESSENTIEL

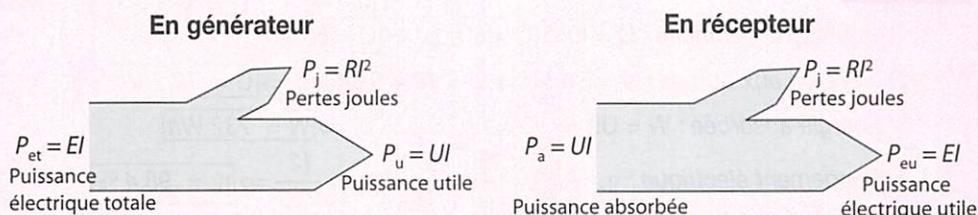
- Un électromoteur est un dipôle actif polarisé. Il est caractérisé par deux paramètres :
 - sa **force électromotrice E** exprimée en volts (V) ;
 - sa **résistance interne R** exprimée en ohms (Ω).
- L'électromoteur peut fonctionner soit en générateur, soit en récepteur.
 - L'électromoteur **générateur** fournit de l'énergie électrique à partir d'une énergie chimique ou d'une énergie mécanique.
 - L'électromoteur **récepteur** absorbe de l'énergie électrique pour restituer de l'énergie chimique ou de l'énergie mécanique.
- **Loi d'Ohm pour un électromoteur générateur**

$$U = E - RI \quad \left\{ \begin{array}{l} U \text{ en volts (V)} \\ I \text{ en ampères (A)} \\ R \text{ en ohms } (\Omega) \\ E \text{ en volts (V)}. \end{array} \right.$$

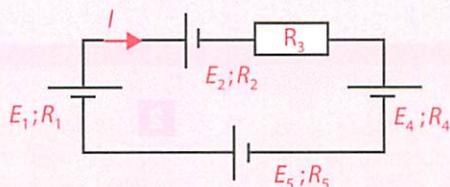
- **Loi d'Ohm pour un électromoteur récepteur**

$$U = E + RI \quad \left\{ \begin{array}{l} U \text{ en volts (V)} \\ I \text{ en ampères (A)} \\ R \text{ en ohms } (\Omega) \\ E \text{ en volts (V)}. \end{array} \right.$$

- **Bilan électrique des puissances**



- **L'association en série** de plusieurs dipôles, électromoteurs ou résistors, constitue une **maille parcourue par un courant unique**.



Le choix du sens de I détermine les comportements, générateur ou récepteur, des électromoteurs de la maille et permet le **calcul de l'intensité du courant** qui circule :

$$I = \frac{\sum E_{\text{GEN}} - \sum E_{\text{REC}}}{\sum R}$$

Exercices résolus

ÉNONCÉ 1

Une batterie d'accumulateurs, de force électromotrice 13,2 V et de résistance interne 0,02 Ω délivre un courant d'intensité 12 A.

1. Quelle est la tension aux bornes de la batterie ?
2. Calculer l'intensité du courant en cas de court-circuit accidentel de la batterie.
3. Calculer la puissance perdue en chaleur dans la batterie durant ce court-circuit. Commenter.

SOLUTION

1. Calcul de la tension aux bornes de la batterie :

$$U = E - RI \Rightarrow U = 13,2 - (0,02 \times 12); = 13,2 - 0,24, \text{ soit } \boxed{U = 12,96 \text{ V}}$$

2. En court-circuit $U_{cc} = 0$: $U_{cc} = E - RI_{cc} \Rightarrow I_{cc} = \frac{E}{R} \Rightarrow I_{cc} = \frac{13,2}{0,02}$, soit $\boxed{I_{cc} = 660 \text{ A}}$

3. Calcul des pertes joules

$$P_j = RI^2 \Rightarrow P_{jcc} = 0,02 \times 660^2, \text{ soit } \boxed{P_{jcc} = 8\,712 \text{ W}}$$

Cette puissance, très importante, détruira probablement la batterie d'accumulateurs.

ÉNONCÉ 2

Une batterie d'accumulateurs de force électromotrice stable 12 V et de résistance interne 0,04 Ω est chargée à courant constant d'intensité 5 A durant 12 h.

1. Quelle quantité d'électricité a alors été fournie à cette batterie ?
2. Sous quelle tension s'effectue l'opération ?
3. Calculer l'énergie électrique absorbée.
4. Quel est le rendement électrique de cette batterie durant la charge ?

SOLUTION

1. Quantité d'électricité : $Q = It \Rightarrow Q = 5 \times 12 \Rightarrow \boxed{Q = 60 \text{ Ah}}$

2. Tension aux bornes : $U = E + RI \Rightarrow U = 12 + 0,04 \times 5 \Rightarrow \boxed{U = 12,2 \text{ V}}$

3. Énergie absorbée : $W = UIt \Rightarrow W = 12,2 \times 5 \times 12 \Rightarrow \boxed{W = 732 \text{ Wh}}$

4. Rendement électrique : $\eta_e = \frac{P_{el}}{P_a} = \frac{EI}{UI} = \frac{E}{U} \Rightarrow \eta_e = \frac{12}{12,2} \Rightarrow \boxed{\eta_e = 98,4 \%}$

Entraînement

1 Une génératrice de courant continu débite un courant de 10 A sous une différence de potentiel de 215 V. Sa résistance interne est de 0,5 Ω.

1. Calculer la fém de cette génératrice.
2. Déterminer le rendement électrique de cette génératrice pour ce fonctionnement.

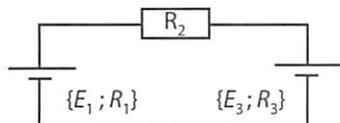
Résultats : $E = 220 \text{ V}$; $\eta_e = 97,7 \%$.

2 Entre les bornes d'un générateur de force électromotrice $E = 60 \text{ V}$ et de résistance interne $R = 3 \Omega$ sont installés, en dérivation, trois résistors de résistances $R_1 = 20 \Omega$, $R_2 = 30 \Omega$ et $R_3 = 40 \Omega$.

1. Calculer la résistance équivalente aux trois résistors.
2. Déterminer l'intensité du courant débité par le générateur.

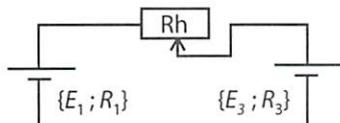
Résultats : $R_e = 9,23 \Omega$; $I = 4,9 \text{ A}$.

3 Dans le montage ci-dessous, on précise :
 $E_1 = 20 \text{ V}$; $R_1 = 3 \ \Omega$; $R_2 = 4 \ \Omega$; $E_3 = 44 \text{ V}$ et $R_3 = 5 \ \Omega$.
 Déterminer l'intensité du courant de circulation et préciser les comportements des dipôles électromoteurs.



Résultat : $I = 2 \text{ A}$, D_1 récepteur, D_3 générateur.

4 Dans le montage ci-dessous, quelle valeur faut-il donner à la résistance du dipôle D_2 (rhéostat) pour que l'intensité du courant de circulation soit de $0,5 \text{ A}$?



$E_1 = 20 \text{ V}$, $R_1 = 3 \ \Omega$; $E_3 = 44 \text{ V}$ et $R_3 = 5 \ \Omega$.

Résultat : $R_2 = 40 \ \Omega$.

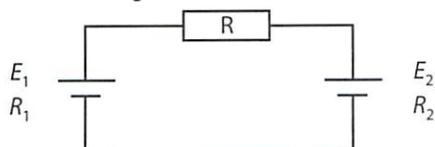
5 Une batterie d'accumulateurs d'un groupe de secours est rechargée par un courant d'intensité $2,5 \text{ A}$ sous une tension de $26,5 \text{ V}$.
 Lorsqu'elle fonctionne en générateur, la tension à ses bornes devient 24 V alors qu'elle fournit un courant d'intensité 6 A .

- Calculer la force électromotrice et la résistance interne de cette batterie d'accumulateurs.
- Lorsque la batterie fonctionne en générateur, quelle est sa puissance électrique totale ?
- Lorsque la batterie fonctionne en récepteur, quelles sont les pertes par effet Joule et le rendement électrique ?

6 Une batterie d'accumulateurs a une force électromotrice de $12,5 \text{ V}$ et une résistance interne de $0,05 \ \Omega$.

- Calculer l'intensité du courant de court-circuit.
- Calculer la puissance maximale que peut fournir cette batterie sachant que celle-ci est atteinte pour une intensité égale à la moitié du courant de court-circuit.

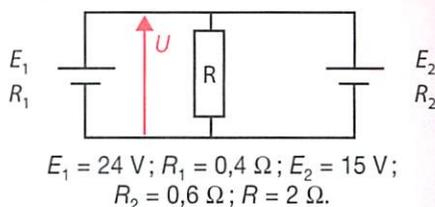
7 Soit le montage ci-dessous :



$E_1 = 24 \text{ V}$; $R_1 = 0,4 \ \Omega$; $E_2 = 15 \text{ V}$;
 $R_2 = 0,6 \ \Omega$; $R = 2 \ \Omega$.

- Calculer l'intensité du courant circulant dans ce circuit.
- Calculer les tensions aux bornes de chaque dipôle.

8 Dans le montage ci-dessous, trois dipôles sont en dérivation :



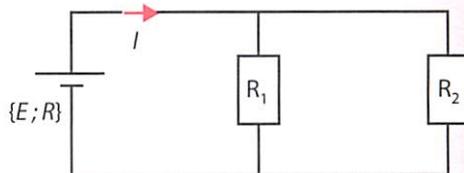
$E_1 = 24 \text{ V}$; $R_1 = 0,4 \ \Omega$; $E_2 = 15 \text{ V}$;
 $R_2 = 0,6 \ \Omega$; $R = 2 \ \Omega$.

- Calculer la tension U commune.
- Déterminer les intensités des courants dans chacun des dipôles.

9 Une pile de force électromotrice $4,86 \text{ V}$ et de résistance interne $1,2 \ \Omega$ alimente un résistor de résistance $R = 6 \ \Omega$.

- Calculer l'intensité du courant, la différence de potentiel et la puissance fournie.
- Quatre de ces piles mises en série alimentent le même résistor. L'intensité est-elle multipliée par 4 ?
- Quelle devrait être alors la résistance de charge pour que l'intensité soit effectivement multipliée par 4 ?

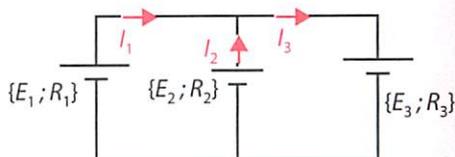
10 Un générateur alimente deux résistors en dérivation :



$E = 24 \text{ V}$; $R = 0,4 \ \Omega$; $R_1 = 6 \ \Omega$; $R_2 = 9 \ \Omega$.

- Quelle est l'intensité du courant débité par ce générateur ?
- Déterminer la tension aux bornes du résistor R_1 et l'intensité du courant qui le traverse.

11 Soit le montage ci-dessous :



$E_1 = 10 \text{ V}$ et $R_1 = 0,4 \ \Omega$; $E_2 = 15 \text{ V}$ et $R_2 = 0,8 \ \Omega$;
 $E_3 = 6 \text{ V}$ et $R_3 = 0,5 \ \Omega$.

Nous avons fait l'hypothèse que les dipôles D_1 et D_2 étaient générateurs.

- Calculer la tension commune aux bornes de ces dipôles.
- En déduire l'intensité du courant dans chaque électromoteur. L'hypothèse de départ est-elle vérifiée ?

Problèmes d'examen

12 On se propose de faire l'étude pratique et technique d'un moteur à courant continu, alimenté par un groupement en série de 4 batteries d'accumulateurs.

Caractéristiques de chaque batterie : $e = 12 \text{ V}$; $r = 0,2 \Omega$.

La plaque signalétique du moteur indique : $U = 35 \text{ V}$; $P_u = 168 \text{ W}$; $n = 73 \%$.

1. Quelle est la valeur du courant nominal du moteur ?
2. Quelle est alors la force contre-électromotrice du moteur ?
3. Quelle est la résistance interne du moteur ?
4. Les batteries qui alimentent le moteur sont placées dans un local protégé, à 120 m. La ligne de raccordement est constituée de fils de cuivre ($\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m}$) de diamètre 2,5 mm. Quelle est la valeur de la résistance de la ligne ?
5. Faire le schéma équivalent de Thévenin du montage en remplaçant la ligne par un résistor.
6. Quelle est l'intensité du courant dans le circuit ?
7. Quelle doit être la valeur de la résistance du rhéostat à placer en série dans le circuit pour limiter l'intensité absorbée par ce moteur à la valeur de son courant nominal ?
8. Quelle est alors la chute de tension en ligne ?
9. Quelle est la puissance perdue par effet Joule en ligne ?

13 L'installation d'éclairage de secours d'une centrale de production d'énergie électrique comporte 100 lampes de 100 W et 60 lampes de 200 W.

Ces lampes sont alimentées par une batterie d'accumulateurs située dans un local distant de 76 m du tableau de distribution de l'éclairage de secours. La tension à l'arrivée du tableau doit être constante et d'une valeur de 220 V en pleine charge. On admet une chute de tension dans la ligne (de la batterie au tableau) de 5 % de la tension de départ.

Première partie

Calculer :

- l'intensité du courant dans la ligne,
- la tension aux bornes de la batterie.

Deuxième partie

La densité de courant admissible est de 4 A/mm^2 dans la ligne en conducteur de cuivre dont la résistivité est de $1,8 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m}$.

Calculer pour $I = 100 \text{ A}$:

- la section des conducteurs ;
- la résistance de la ligne.

Troisième partie

La batterie d'accumulateurs est constituée de plusieurs éléments couplés en série ; un dispositif automatique permet d'en faire varier le nombre (en fonction de l'état de charge des éléments) afin de maintenir une tension constante aux bornes de la batterie.

Pour $I = 100 \text{ A}$, chaque élément présente les caractéristiques suivantes :

$u_1 = 2,2 \text{ V}$ au début du fonctionnement ; $u_2 = 1,8 \text{ V}$ en fin de décharge.

Sachant que la résistance interne d'un élément est $r = 0,004 \Omega$, calculer :

1. le nombre d'éléments de la batterie au début puis en fin de décharge ;
2. la force électromotrice de chaque élément au début puis en fin de décharge ;
3. la quantité d'électricité que doit restituer la batterie d'accumulateurs pour que l'éclairage de secours fonctionne durant 6 heures ;
4. l'énergie fournie par la batterie pendant ce temps de fonctionnement.

PARTIE 4

AUTRES DIPÔLES EN COURANT CONTINU

- 15 Condensateurs et réacteurs p. 90
- 16 Résistor et condensateur
en série p. 95
- 17 Réacteurs et électromagnétisme.. p. 99
- PRÉPARATION À L'EXAMEN* p. 103

15 Condensateurs et réacteurs

Nous allons identifier deux nouveaux types de dipôles récepteurs élémentaires, et définir leur comportement respectif lorsqu'ils fonctionnent en courant continu.

AVANT DE DÉMARRER...

► Comportement d'un dipôle

Le comportement d'un dipôle est spécifique selon la nature du dipôle.

Il est précisé lorsque la loi unissant la tension par rapport au courant est définie.

Étudier un dipôle, c'est observer l'évolution de l'intensité du courant qui le traverse en fonction de la tension entre ses bornes (ou réciproquement).

► Types de dipôles

- Nous connaissons déjà :
 - les résistors, récepteurs purement thermiques, caractérisés par leur résistance R en ohms (Ω), et dont les lois, d'Ohm : $U = RI$, et de Joule : $P = RI^2$, nous sont familières ;
 - les dipôles actifs en courant continu que sont les électromoteurs :
dipôle générateur : $U = E - RI$;
dipôle récepteur : $U = E + RI$.
- Il existe deux autres types de dipôles que nous allons découvrir : le **condensateur** et la bobine inductive (que nous appellerons **réacteur**).

OBSERVONS

● Le condensateur

– Le composant

Le composant porte en clair (ou par codage) deux informations :

- sa grandeur caractéristique (exemple : 2 000 μF) ;
- une tension limite d'utilisation (exemple : 250 V).



Fig. 1 Un condensateur (électrochimique).

- Expérimentation sous tension continue

État de K	U	I
1	0	0
2	24 V	0
1	24 V puis décroît lentement	0

L'action sur le bouton-poussoir S engendre une diminution rapide de la tension U (et l'ampèremètre dévie négativement).

Tableau 1.

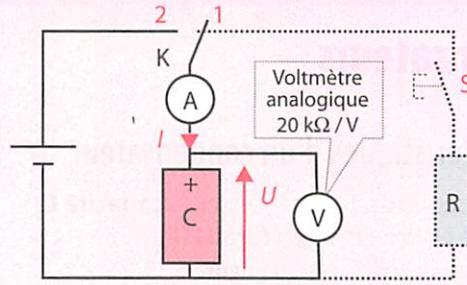


Fig. 2 Étude du condensateur C :
1 000 μ F/35 V.

- Analyse

Le condensateur se charge en énergie électrique (K en 2) puis restitue cette énergie (K en 1), lentement à travers le voltmètre, ou rapidement à travers le résistor R.

● Bobine (ou réactor)

- Bobine expérimentale

En laboratoire d'essais et mesure, nous disposons d'une bobine avec un noyau de fer réglable.

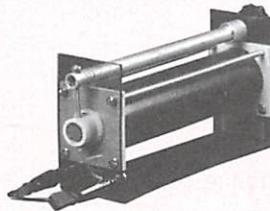


Fig. 3 Une bobine de laboratoire.

Elle porte plusieurs informations :

- sa grandeur caractéristique qui dépend de la position du noyau de fer : par exemple 1 H ;
- sa résistance (celle du fil qui la constitue) : par exemple 10 Ω ;
- une intensité maximale d'utilisation : par exemple 2 A.

- Expérimentation sous tension continue

Afin de ne pas dépasser l'intensité maximale, nous plaçons, en série avec la bobine, une résistance de protection $R_p = 33 \Omega$.

État de K	U	I
0	0	0
1	5,6 V	0,56 A
0	0	0

Tableau 2.

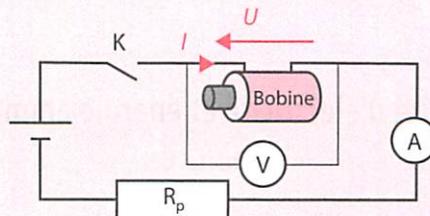


Fig. 4.

- Analyse

L'expérience montre que, en régime permanent, le comportement de la bobine est uniquement dépendant de sa résistance puisque, lorsque le courant d'intensité 0,56 A circule, la tension aux bornes de la bobine est $U = 10 \times 0,56 = 5,6$ V soit $U = RI$.

À SAVOIR

1. Condensateurs

a) Caractéristiques d'un condensateur

Le condensateur est caractérisé par sa **capacité C**.

La capacité est exprimée **en farads (F)**.

Son symbole est donné sur la **figure 5**.



Fig. 5.

Notons qu'un condensateur de un farad (1 F) n'existe pas (capacité énorme) et que nous utilisons volontiers les sous-multiples du farad :

- le microfarad (1 $\mu\text{F} = 10^{-6}$ F),
- le nanofarad (1 nF = 10^{-9} F)...

Le condensateur est également caractérisé par une **tension maximale** d'utilisation (de service), valeur qu'il ne faut pas dépasser sous peine de destruction du composant (par claquage).

b) Condensateur plan

Le condensateur le plus simple (plan) est constitué de :

- deux surfaces conductrices (les armatures) placées en regard l'une de l'autre ;
- un milieu isolant (le diélectrique) de faible épaisseur, qui sépare les armatures.

La capacité du condensateur plan (**fig. 6**) est :

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{e} \quad \left\{ \begin{array}{l} S \text{ surface (en m}^2\text{) d'une armature} \\ e \text{ épaisseur (en m) du diélectrique} \\ \varepsilon_0 \text{ permittivité du vide } (\approx 8,84 \times 10^{-12}) \\ \varepsilon_r \text{ permittivité relative du diélectrique} \\ (\varepsilon_r = 1 \text{ pour l'air ou le vide)} \\ C \text{ capacité en farads (F).} \end{array} \right.$$

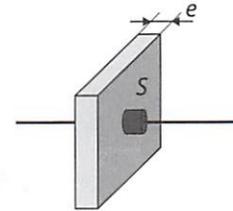


Fig. 6.

Les technologies des condensateurs sont diverses et dépendent de l'usage qui leur est réservé, retenons cependant que **certains condensateurs sont polarisés** et ne peuvent donc s'utiliser que sous tension continue (ou unidirectionnelle).

Attention : l'inversion des polarités d'un condensateur polarisé, ou son branchement en alternatif, conduit inévitablement au **claquage** (destruction du diélectrique et amorçage entre les armatures).

D'autres condensateurs, non polarisés, sont parfaitement utilisables en alternatif et donc en sinusoïdal.

c) Quantité d'électricité et énergie emmagasinées

Après avoir été alimenté directement par une source de tension continue de valeur U , le condensateur est chargé.

• **La quantité d'électricité (ou charge)** accumulée est proportionnelle à cette tension U et à la capacité C du condensateur :

$$Q = CU$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q \text{ en coulombs (C)} \\ U \text{ en volts (V)} \\ C \text{ en farads (F).} \end{array} \right.$$

• **L'énergie emmagasinée par un condensateur** de capacité C , chargé sous la tension U , est :

$$W = \frac{1}{2} CU^2 \quad \begin{cases} W \text{ en joules (J)} \\ C \text{ en farads (F)} \\ U \text{ en volts (V)}. \end{cases}$$

Pour un condensateur parfait, cette charge en quantité et en énergie est conservée indéfiniment, la décharge ne peut intervenir qu'en présence d'un circuit de décharge.

Attention : un condensateur chargé peut donc être dangereux et cela d'autant plus que la tension U qui l'a chargé était grande.

d) Groupements de condensateurs

• **Condensateurs en dérivation** (fig. 7)

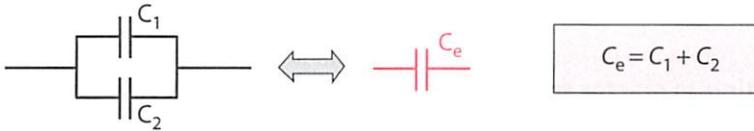


Fig. 7 Il faut placer les condensateurs en parallèle pour augmenter la capacité.

Un groupe de condensateurs branchés en dérivation peut être remplacé par un condensateur équivalent dont la capacité est égale à la somme des capacités partielles.

• **Condensateurs en série** (fig. 8)



Fig. 8 En série, la capacité équivalente est plus petite que la plus petite des capacités partielles.

Un groupe de condensateurs branchés en série peut être remplacé par un condensateur équivalent dont l'inverse de la capacité est égale à la somme des inverses des capacités partielles.

2. Réacteurs

a) Réacteur parfait

Un réacteur parfait est caractérisé par son **inductance L** .

L'inductance est exprimée **en henrys (H)**.

Son symbole est donné sur la **figure 9**.



Fig. 9.

Le réacteur est également caractérisé par une **intensité maximale** d'utilisation, valeur qu'il ne faut pas dépasser sous peine de destruction du composant.

b) Importance des réacteurs

Les réacteurs permettent de générer les champs magnétiques d'origine électrique qui régissent le fonctionnement de nombreux appareils.

Le moteur et l'électroaimant (qui permet le fonctionnement des disjoncteurs, des contacteurs) sont des applications du réacteur.

Ces bobinages sont nécessaires et se trouvent le plus souvent placés autour de substances ferromagnétiques. C'est l'ensemble de la bobine (dimension, nombre de spires) et des caractéristiques du circuit magnétique, qui détermine l'inductance du réacteur.

c) Réactor réel

Un réactor est constitué de conducteurs enroulés, c'est une bobine comportant des spires enroulées autour d'un noyau creux ou ferromagnétique.

Nécessairement, ces spires présentent une résistance ($R = \rho \frac{\ell}{S}$). En conséquence, le réactor parfait n'existe pas.

La bobine réelle est à la fois résistive et inductive et doit être considérée comme l'association série d'un résistor et d'un réactor parfait (fig. 10). Cependant, cette séparation n'a aucune réalité physique.

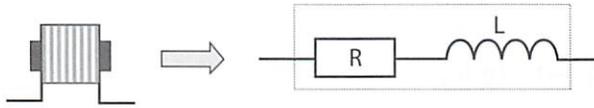


Fig. 10 Une bobine est une association RL série.

Lorsque l'intensité du courant qui traverse la bobine est constante, l'inductance L n'intervient pas : **en courant continu, le réactor se comporte comme un résistor de résistance R .**

TESTEZ VOS CONNAISSANCES

- 1 Les lois d'association des condensateurs ont une structure contraire de celles des résistors. Est-ce vrai ?
a) Oui. b) Non.
- 2 Un condensateur de capacité $4\,700\ \mu\text{F}$ est chargé par une tension de $24\ \text{V}$. Quelle est l'énergie emmagasinée ?
a) $W = 1\,350\ \text{J}$. c) $W = 1,35\ \text{J}$.
b) $W = 0,113\ \text{J}$. d) $W = 27\ \text{J}$.
- 3 Un réactor a une inductance de $12\ \text{H}$ et une résistance de $575\ \Omega$. Il est alimenté par une tension continue de $230\ \text{V}$. Quelle est l'intensité du courant qui circule ?
a) $I = 19\ \text{A}$. b) $I = 0,4\ \text{A}$. c) $I = 2,5\ \text{A}$.
- 4 Deux condensateurs, l'un dont la capacité est de $220\ \mu\text{F}$ et l'autre de capacité $470\ \mu\text{F}$, sont en série. Le groupe est placé sous une tension continue de $48\ \text{V}$.
Calculer :
1. la quantité d'électricité pour l'ensemble des deux condensateurs chargés ;
2. l'énergie électrique emmagasinée.
- 5 Quelle serait la surface des armatures d'un condensateur plan de capacité $1\ \text{F}$ dont le diélectrique serait une couche d'air de $1\ \text{mm}$ d'épaisseur ?
Commenter le résultat.

16 Résistor et condensateur en série

L'association d'une résistance R et d'un condensateur C constitue un circuit RC. Nous allons voir comment se comporte ce circuit en courant continu.

AVANT DE DÉMARRER...

Nous allons développer une application du circuit RC, qui nécessite la connaissance de deux composants : la porte NAND et le trigger de Schmitt.

► La porte NAND

La porte NAND (fig. 1) est constituée de deux entrées et d'une sortie.

Chaque entrée peut prendre deux états logiques : 0 ou 1.

La sortie sera fonction de l'état des deux entrées.

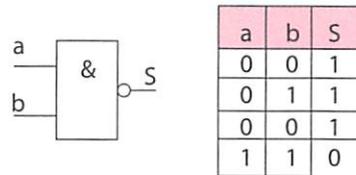


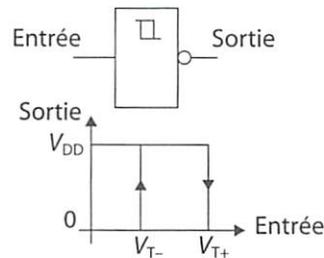
Fig. 1 Symbole de la porte NAND et table de vérité.

► Le trigger de Schmitt

Le trigger de Schmitt est une porte logique qui commute pour deux seuils de tension d'entrée. La caractéristique entrée-sortie forme un cycle d'hystérésis (fig. 2).

Quand la tension d'entrée est égale à V_{T-} , la sortie passe à V_{DD} .
Quand la tension d'entrée est égale à V_{T+} , la sortie passe à V_{SS} .

Fig. 2 Symbole d'un trigger et cycle de fonctionnement.



OBSERVONS

● Montage utilisant un circuit RC

Nous avons placé successivement deux condensateurs dans le montage de la figure 3.

Dans les deux cas :

- relevons les oscillogrammes de la tension aux bornes du condensateur et de la tension de sortie ;
- calculons la période et la fréquence du signal de sortie ;
- calculons le produit RC.

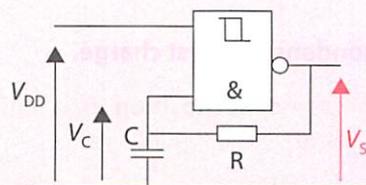


Fig. 3 Montage RC.

● Résultats

1^{er} cas : $C = 100 \mu\text{F}$

– Calcul de la période :
 $T = 3,2 \times 100 \times 10^{-3} = 320 \text{ ms}$.

– Calcul de la fréquence :
 $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{320 \times 10^{-3}} = 3,1 \text{ Hz}$.

– Calcul du produit RC :
 $RC = 4,7 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-6}$;
 $RC = 0,47$.

2^e cas : $C = 470 \mu\text{F}$

– Calcul de la période :
 $T = 3 \times 500 \times 10^{-3} = 1,5 \text{ s}$.

– Calcul de la fréquence :
 $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,5} = 0,666 \text{ Hz}$.

– Calcul du produit RC :
 $RC = 4,7 \times 10^3 \times 470 \times 10^{-6}$;
 $RC = 2,2$.

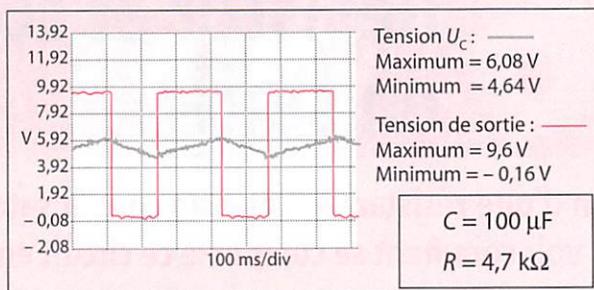


Fig. 4 Oscillogrammes avec $C = 100 \mu\text{F}$.

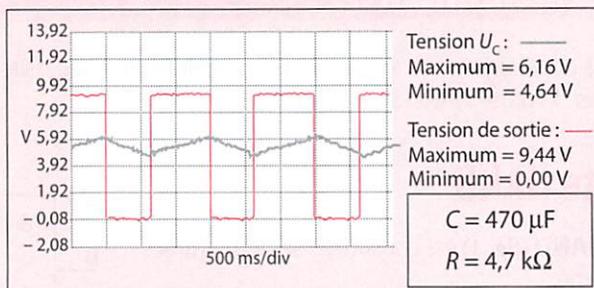


Fig. 5 Oscillogrammes avec $C = 470 \mu\text{F}$.

Constatation : la période du signal est fonction de la valeur de C . Nous pourrions aussi vérifier que la période est également fonction de R .

À SAVOIR

1. Charge et décharge à travers un résistor

Un condensateur C est mis en série avec un résistor R . Un interrupteur K permet la mise sous tension du circuit sur un générateur de courant continu (fig. 6).

• **À la fermeture de K (position 1)**, la tension aux bornes du condensateur est nulle, elle croît rapidement et atteint la valeur de la tension d'alimentation. À l'ouverture de K (position 0), le voltmètre indique toujours la valeur de la tension d'alimentation :

Le condensateur est chargé.

• **À la fermeture de K (position 2)**, la tension aux bornes du condensateur diminue rapidement jusqu'à une valeur nulle.

À l'ouverture de K (position 0), le voltmètre indique toujours une valeur nulle :

Le condensateur est déchargé.

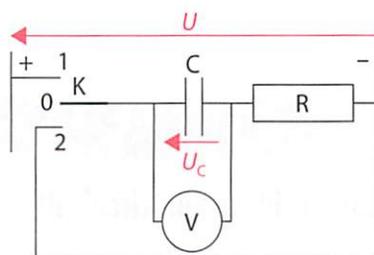


Fig. 6 Montage RC série.

2. La constante de temps

La charge et la décharge du condensateur à travers un résistor ne sont pas instantanées, l'évolution de la tension aux bornes du condensateur dépend de la constante de temps du circuit.

La constante de temps τ est :

$$\tau = RC \quad \left\{ \begin{array}{l} R \text{ en ohms } (\Omega) \\ C \text{ en farads (F)} \\ \tau \text{ en secondes (s).} \end{array} \right.$$

La charge ou la décharge d'un condensateur est terminée pour 5τ .

3. Courbes universelles

Les courbes universelles (fig. 7) de charge ou de décharge d'un condensateur à travers un résistor sont la représentation graphique de la tension aux bornes du condensateur (exprimée en pourcentage de la tension du générateur) en fonction du rapport $\frac{t}{\tau}$.

Cette courbe nous permet de définir :

- la résistance R ;
- la capacité du condensateur C ;
- le temps de charge t ;
- la tension de charge U ;
- la tension aux bornes du condensateur U_C .

À partir de quatre variables, nous pouvons déterminer la cinquième.

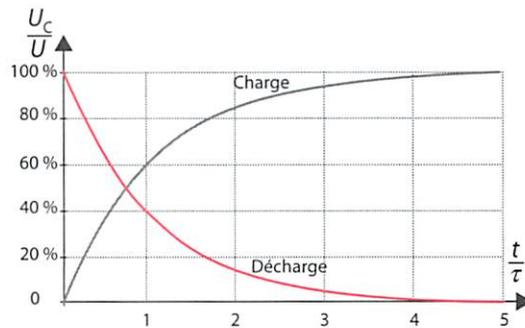


Fig. 7 Courbes universelles.

4. Exemple d'utilisation des courbes

Un condensateur et une résistance sont montés en série, comme sur la figure 6. L'interrupteur vient de basculer dans la position 1, le condensateur se charge.

On donne : $R = 220 \text{ k}\Omega$, $C = 17 \text{ }\mu\text{F}$, $U = 15 \text{ V}$.

On cherche la tension U_C aux bornes du condensateur après 5 s.

1° Calcul de la constante de temps τ :

$$\tau = RC = 220 \times 10^3 \times 17 \times 10^{-6} = 3,74 \text{ s.}$$

2° Calcul de $\frac{t}{\tau}$:

$$\frac{t}{\tau} = \frac{5}{3,74} = 1,33.$$

3° Nous relevons, à l'intersection de la droite et de la courbe de charge, la

valeur du rapport $\frac{U_C}{U}$:

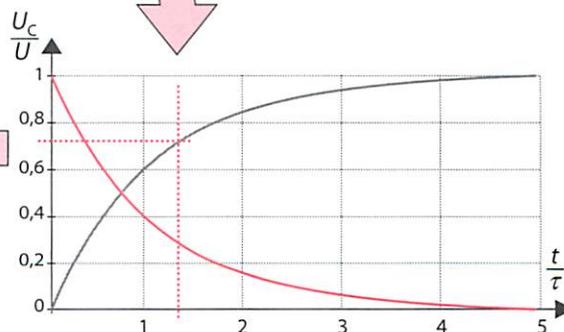
$$\frac{U_C}{U} = 0,725.$$

4° Nous calculons U_C :

$$U_C = 15 \times 0,725 = 10,87 \text{ V.}$$

Tracer une droite à 1,33

Lire : 0,725



5. Un exemple d'application

Reprenons le montage de la **figure 3** : ce montage est appelé « **Horloge** », il utilise la **charge** et la **décharge** d'un condensateur à travers un résistor de résistance R .

• **Le condensateur se charge** : v_C tend vers V_{DD} en passant par le seuil V_{T+} ; à cet instant, la tension de sortie v_S bascule à 0.

• **Le condensateur se décharge** : v_C tend vers 0 en passant par le seuil V_{T-} ; à cet instant, la tension de sortie v_S bascule à V_{DD} ... et le cycle recommence.

• **Les tensions V_{T+} et V_{T-}** sont visibles sur les oscillogrammes des **figures 4 et 5**. De plus, elles sont notées tensions maximale et minimale sur le côté droit de l'oscillogramme et ont pour valeur environ 6,1 V et 4,6 V. Ces valeurs correspondent aux valeurs typiques données par les constructeurs.

TESTEZ VOS CONNAISSANCES

- 1 Une résistance et un condensateur sont en série. On vous donne les courbes suivantes (**fig. 8**) où le point de fonctionnement A est positionné.

1. Quel temps met le condensateur pour se charger ?

a) 0,1 s. b) 0,2 s. c) 0,3 s. d) 0,4 s. e) 0,5 s.

2. Quelle est la tension aux bornes du condensateur ?

a) 10 V. b) 14 V. c) 17 V. d) 5 V. e) 20 V.

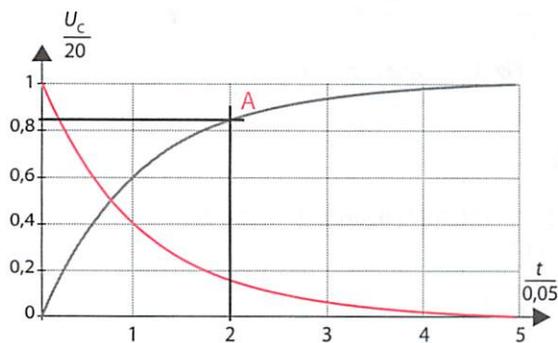


Fig. 8.

- 2 Un condensateur de $100 \mu\text{F}$ se charge à travers une résistance de $10 \text{ k}\Omega$ sous une tension de 24 V. En combien de temps la tension aux bornes du condensateur atteindra-t-elle 20 V ?

a) 1,6 s. b) 1,7 s. c) 1,8 s. d) 1,9 s. e) 2 s.

- 3 Calculer la valeur de la résistance à mettre en série avec un condensateur de capacité $470 \mu\text{F}$, sachant qu'il a été chargé sous une tension de 24 V, et que 6 s après le début de la décharge, sa tension n'est plus que de 5 V.

- 4 Un condensateur de capacité $C = 100 \mu\text{F}$ est mis en série avec un résistor variable. La tension d'alimentation est de 12 V.

Le condensateur est déchargé.

- Calculer la valeur à donner au résistor variable pour que la tension aux bornes du condensateur atteigne 90 % de la tension d'alimentation en 35 s.
- Déterminer, dans la série E 48, la valeur de la résistance la plus proche.
- Calculer le nouveau temps de charge.

Le condensateur est chargé à 90 % de la tension d'alimentation.

- Calculer le temps de décharge, en prenant la valeur du résistor déterminée ci-dessus, pour que la tension du condensateur atteigne 40 % de la tension d'alimentation.

17 Réacteurs et électromagnétisme

Les bobines sont à l'origine des effets magnétiques du courant électrique. Nous allons étudier ces effets pour un fonctionnement en courant continu.

AVANT DE DÉMARRER...

► L'aimant – Les substances ferromagnétiques

Un barreau d'acier aimanté constitue un aimant, il fait dévier une boussole. Une extrémité de l'aimant attire un pôle de la boussole, l'autre extrémité attire l'autre pôle : **un aimant possède de un pôle Nord et un pôle Sud.**

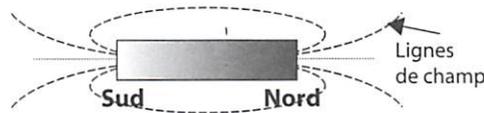


Fig. 1.

Un aimant crée **un champ magnétique** autour de lui : là où il influence la boussole.

- Approchons un aimant d'un morceau de fer ou d'acier : il y a attraction. **Le champ magnétique est capable de produire un travail** (énergie mécanique).

Le pôle Nord d'un aimant repousse le pôle Nord d'un autre aimant. Il y a **répulsion** entre pôles de **même nom**, mais il y a **attraction** entre pôles de **noms contraires**.

- **Les substances ferromagnétiques** sont principalement le fer, le nickel, le cobalt et beaucoup de leurs alliages.

En milieu ferromagnétique, les propriétés magnétiques se trouvent amplifiées.

Un aimant permanent est constitué d'une substance dont les propriétés magnétiques sont permanentes (elles ne s'altèrent que très lentement).

En général, les circuits magnétiques des machines électriques n'ont pas d'aimantation permanente et réagissent seulement en présence d'un champ magnétique externe.

OBSERVONS

● Une bobine parcourue par un courant électrique

Un réacteur est constitué d'une bobine montée sur un circuit magnétique (**fig. 2**).

– Approchons l'ensemble d'un récipient contenant des clous. Il ne se passe rien.

– Lorsque la bobine est traversée par un courant électrique (interrupteur K fermé), les clous sont attirés.

– À l'ouverture de l'interrupteur, les clous retombent dans le récipient.

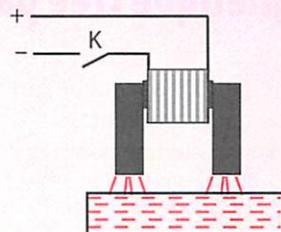


Fig. 2 Les clous en acier sont attirés.

Analyse :

La bobine et son circuit magnétique se comportent comme un aimant : **le courant électrique crée un champ magnétique.**

● **Influence du champ sur un conducteur parcouru par un courant**

Un conducteur parcouru par un courant électrique d'intensité I peut se déplacer librement sur les deux rails conducteurs fixes qui le supportent.

Alimentons en courant continu une bobine magnétisant le circuit magnétique (fig. 3) qui entoure le conducteur et les rails.

Dès la fermeture de l'interrupteur K, le champ magnétique est créé et **le conducteur se déplace spontanément.**

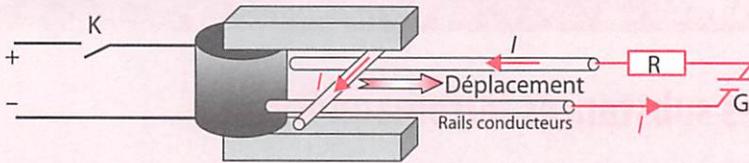


Fig. 3 Lorsque K est fermé, une force F déplace le conducteur vers la droite.

Analyse :

Un conducteur parcouru par un courant électrique et placé dans un champ magnétique est soumis à une force qui tend à le déplacer.

À SAVOIR**1. Champ magnétique**

Le champ magnétique est une grandeur physique traduite par une structure vectorielle :

\vec{B} est le vecteur champ magnétique.

Le vecteur champ magnétique est défini en tous points de l'espace où les effets magnétiques sont décelables.

Il est tangent à la ligne de champ.

Son module s'exprime en teslas (T).

Un champ magnétique est **uniforme** si, en tous points de l'espace, le vecteur \vec{B} est égal à un vecteur constant.

Les lignes de champ sont alors parallèles et l'intensité (module) du champ est constante.

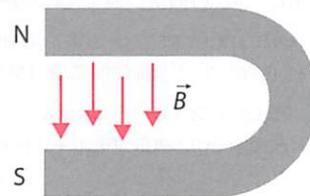


Fig. 4 Entre les branches d'un aimant en U, le champ est uniforme.

2. Champ magnétique créé par une bobine

Nous avons constaté qu'une bobine, avec ou sans fer, crée un champ magnétique dès qu'elle est parcourue par un courant.

Au centre de la bobine existe un champ qui est proportionnel :

- au nombre n de spires ;
- à l'intensité I du courant qui circule.

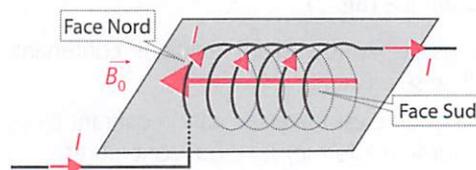


Fig. 5 Une bobine parcourue par un courant I crée le champ B_0 dans l'air.

Ce champ dépend aussi des dimensions de la bobine et des propriétés magnétiques du milieu dans lequel est installée cette bobine.

Notons que la **présence de fer** (circuit magnétique) **augmente considérablement l'intensité du champ magnétique**.

Retenons que le réacteur est chargé de créer le champ magnétique.

3. Force électromagnétique et loi de Laplace

L'observation nous a montré l'existence de la force électromagnétique (ou force de Laplace).

- **Loi de Laplace** : le module de la force électromagnétique est proportionnel à :
 - l'intensité B du champ magnétique ;
 - l'intensité I du courant électrique qui circule dans le conducteur ;
 - la longueur du conducteur soumis au champ :

$$F = B I \ell \quad \left\{ \begin{array}{l} B \text{ en teslas (T)} \\ I \text{ en ampères (A)} \\ \ell \text{ en mètres (m)} \\ F \text{ en newtons (N).} \end{array} \right.$$

- **Sens de la force \vec{F}** : sa direction est perpendiculaire au plan formé par \vec{B} et I et son sens est déterminé par la règle de la main droite (**fig. 6**).

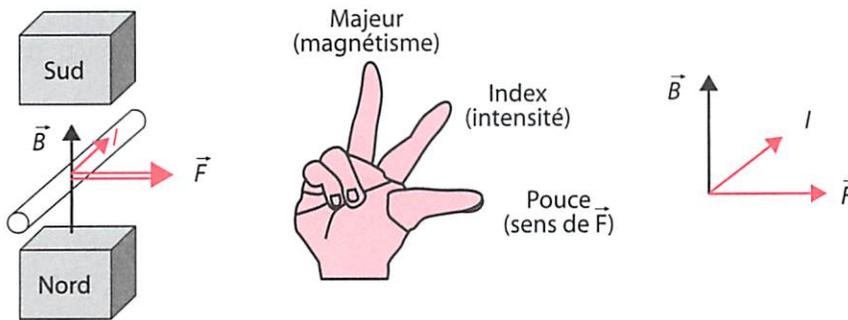


Fig. 6 Force électromagnétique et règle de la main droite.

Notons que si le conducteur est parallèle à la direction du champ B , la force est nulle.

En réalité, $F = B I \ell \sin \alpha$, avec α angle formé par les directions de I et \vec{B} .

4. Inductance d'une bobine

Nous savons que le réacteur est caractérisé par son inductance L exprimée en henrys (H).

Pour une bobine longue sans noyau ferromagnétique, l'inductance est :

$$L_0 = \mu_0 \frac{N^2 S}{\ell} \quad \left\{ \begin{array}{l} \mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} : \text{perméabilité magnétique de l'air} \\ N : \text{nombre de spires} \\ S : \text{section droite de la bobine (en m}^2\text{)} \\ \ell : \text{longueur de la bobine (en m).} \end{array} \right.$$

L'inductance L d'un réacteur dépend des caractéristiques de la bobine et, en particulier, de son nombre de spires.

Si cette bobine enserre un circuit magnétique fermé, l'inductance est multipliée par μ_r , perméabilité relative du matériau ferromagnétique : $L = \mu_r L_0 \gg L_0$.

L'inductance L d'un réacteur dépend aussi des propriétés du circuit magnétique.

5. Phénomène d'auto-induction

Une force électromotrice d'auto-induction apparaît aux bornes d'une bobine parcourue par un courant d'intensité variable. Elle tend à s'opposer à ces variations d'intensité.

Cette fém peut s'exprimer ainsi :

$$E = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta i \text{ est la variation de l'intensité (en A)} \\ \Delta t \text{ est la durée de cette variation (en s)} \\ L \text{ est l'inductance du réactor (en H)} \\ E \text{ est la fém moyenne développée (en V).} \end{array} \right.$$

Le réactor réel (de résistance R et d'inductance L) suit donc une loi d'Ohm équivalente à celle qui est suivie par un dipôle récepteur actif : $u = L \frac{\Delta i}{\Delta t} + Ri$.

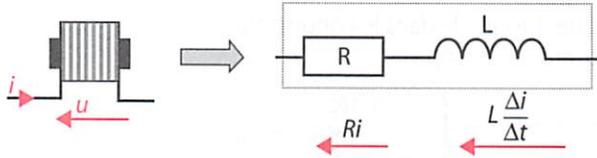


Fig. 7 Décomposition de la tension aux bornes d'un réactor.

• **En courant continu**, en régime permanent, le terme $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ est nul et donc $u = Ri$: la bobine se comporte comme un simple résistor.

Notons que les phénomènes d'auto-induction existent en courant continu durant l'établissement du courant I (mise sous tension), ou durant la disparition de I (coupure du circuit) : des fém importantes peuvent apparaître durant les états transitoires.

• **En régime variable (alternatif)**, le terme $L \frac{\Delta i}{\Delta t}$ peut devenir important : on appelle réactor parfait (ou inductance pure) une bobine dont le produit Ri serait négligeable devant la fém d'auto-induction, et son équation deviendrait $u = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$.

En sinusoïdal, nous utiliserons le modèle du réactor parfait.

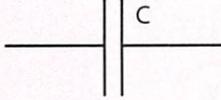
TESTEZ VOS CONNAISSANCES

- En courant continu, pendant les commutations, des surtensions fugitives importantes peuvent apparaître aux bornes d'un réactor. Est-ce vrai ?
a) Oui. b) Non.
- Une bobine a une inductance de 4 mH. On la dote d'un noyau de fer dont la perméabilité est : $\mu_r = 1\,200$. Que devient la valeur de l'inductance ?
a) 3 H. b) 300 mH. c) 4,8 H.
- Un conducteur, de 20 cm de longueur, traversé par un courant de 10 A est placé perpendiculairement à un champ magnétique de 0,8 T. Quelle est la force électromagnétique appliquée au conducteur ?
a) $F = 1,6$ N. b) $F = 160$ N. c) $F = 8$ N.
- Une bobine de laboratoire réglée sur 1 H est traversée par un courant permanent d'intensité 2 A. L'établissement du courant s'est effectué en 10 ms. Calculer la force électromotrice d'auto-induction développée durant la manœuvre.
- Un réactor a une inductance de 12 H et une résistance de 575 Ω . Il est alimenté par une tension continue de 230 V.
L'établissement du courant dure 10 ms.
1. Quelle est l'intensité du courant qui circule ?
2. Quelle est la force électromotrice induite qui apparaît aux bornes de la bobine durant la fermeture du circuit ?

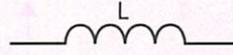
PRÉPARATION À L'EXAMEN

L'ESSENTIEL

- Un **condensateur** est caractérisé par sa **capacité C** exprimée en **farads (F)**.



- Un **réactor** (bobine inductive) est caractérisé par son **inductance L** exprimée en **henrys (H)**.



- Le **condensateur se charge** dès qu'il est raccordé à une source de tension continue U . Il possède alors une quantité d'électricité et de l'énergie électrique :

$$\text{Charge accumulée : } Q = CU.$$

$$\text{Énergie emmagasinée : } W = \frac{1}{2} CU^2.$$

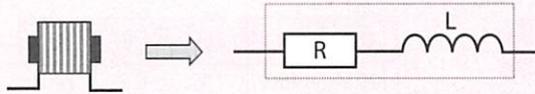
Il restitue ces quantités vers un récepteur pendant la décharge.

- Le **réactor est une bobine** souvent placée autour d'un circuit magnétique. Traversé par un courant électrique, le réactor crée un **champ magnétique B** exprimé en **teslas (T)**.

Le champ magnétique génère des forces :

- sur les **masses ferromagnétiques** → force portante de l'électroaimant ;
- sur les **conducteurs parcourus par un courant continu** → force électromagnétique donnée par la loi de Laplace : $F = BI'l$.

- Le **réactor réel** est une bobine qui comporte nécessairement une résistance, celle des conducteurs qui la constituent. C'est un dipôle RL série.



En régime établi en courant continu, le réactor se comporte comme un **résistor de résistance R** .

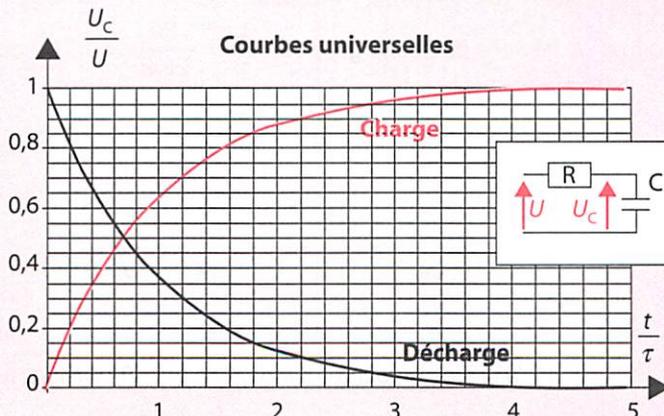
Lorsque I varie, le réactor développe une force électromotrice induite de valeur $E = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$.

- **Circuits RC série en courant continu**

- Un condensateur de capacité C placé en série avec un résistor de résistance R voit sa charge ou sa décharge s'effectuer en fonction de la constante de temps $\tau = RC$.

La charge (ou la décharge) est considérée terminée pour $t = 5 \tau$.

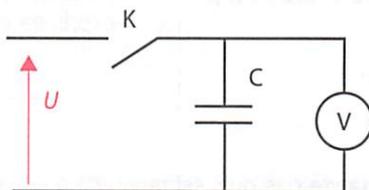
- L'évolution de la tension U_C aux bornes du condensateur obéit aux courbes universelles :



Exercice résolu

ÉNONCÉ

Un voltmètre est branché aux bornes d'un condensateur de capacité $C = 47 \mu\text{F}$. Le voltmètre est analogique, sa résistance spécifique est $20 \text{ k}\Omega/\text{V}$ (la résistance interne R_v est proportionnelle au calibre utilisé). La tension continue vaut $U = 24 \text{ V}$.



1. Le calibre du voltmètre est 30 V . Quelle est l'indication de l'aiguille du voltmètre lorsque K est fermé, sachant que l'échelle comporte 150 divisions ?
2. Quelle est la résistance interne du voltmètre ?
3. Si nous ouvrons l'interrupteur K , la déviation de l'aiguille décroît lentement. Quelle sera, vingt secondes après l'ouverture de K , l'indication du voltmètre ?

SOLUTION

1. Le voltmètre mesure $U = 24 \text{ V}$:

Cal	N	L	K	U
30 V	150	120	0,2	24 V

L'aiguille du voltmètre indiquera 120 divisions

2. La résistance interne du voltmètre est :

$$R_v = V \times \text{cal} \Rightarrow R_v = 20 \times 30$$

soit :

$$R_v = 600 \text{ k}\Omega$$

3. Le condensateur se décharge dans le voltmètre.

La constante de temps est :

$$\tau = R_v C \Rightarrow \tau = 600 \times 10^3 \times 47 \times 10^{-6} = 28,2 \text{ s.}$$

Sur la courbe universelle de décharge, pour $\frac{t}{\tau} = \frac{20}{28,2} = 0,71$, nous lisons :

$$\frac{U_c}{U} \approx 0,49.$$

$$U_c = 0,49 U = 0,49 \times 24$$

soit :

$$U_c = 11,8 \text{ V}$$

Cal	N	L	K	U_c
30 V	150	59	0,2	11,8 V

L'aiguille du voltmètre indique alors 59 divisions

Entraînement

1 Quelle est l'inductance d'une bobine sans circuit magnétique de longueur 20 cm comportant 2 500 spires enroulées sur un cylindre creux de section 3 cm² ?

Cette bobine est constituée de conducteur de cuivre de 0,5 mm² de section ; la longueur moyenne d'une spire est de 6,4 cm. Quelle est la résistance de ce réactor ?

Résultats : $L = 11,8 \text{ mH}$; $R = 5,12 \Omega$.

2 Quelle est l'énergie emmagasinée par un condensateur de 2 200 μF chargé par une tension de 48 V ?

Résultat : $W = 2,53 \text{ J}$.

3 Le condensateur de 2 200 μF chargé précédemment sous 48 V est déchargé dans un résistor de résistance 1 k Ω .

Calculer le temps nécessaire pour une décharge complète.

Résultat : $t = 11 \text{ s}$.

4 Un réactor a une inductance de 15 H et sa résistance est 1 500 Ω .

Il est alimenté par une source de tension continue de 120 V.

1. Calculer l'intensité du courant permanent qui s'établit dans cette bobine.
2. Ce courant disparaît en 5 ms ; calculer la valeur de la force électromotrice auto-induite durant cette opération.

Résultats : $I = 80 \text{ mA}$; $E = 240 \text{ V}$.

5 Un condensateur de capacité 100 μF est chargé sous une tension de 48 V à travers un résistor de résistance 33 k Ω .

Déterminer le temps de charge nécessaire pour que la tension aux bornes du condensateur atteigne 40 V.

6 Une bobine sans fer présente une inductance de 5 mH. On place un noyau ferromagnétique de perméabilité relative $\mu_r = 160$.

1. Calculer l'inductance de la bobine avec fer.
2. Lors de l'établissement d'un courant continu d'intensité 5 A apparaît, aux bornes du réactor, une force électromotrice moyenne de 50 V. Quelle a été la durée d'établissement du courant ?

7 Un électroaimant de levage permet de soulever un bloc d'acier :



Charge (ferromagnétique) transportée

La force portante (en newtons) d'un électroaimant est donnée par la relation : $G = 400\,000 B^2 S$
 B est le champ (en T) dans les noyaux ;
 S est la surface de contact entre noyaux et charge (en m²).

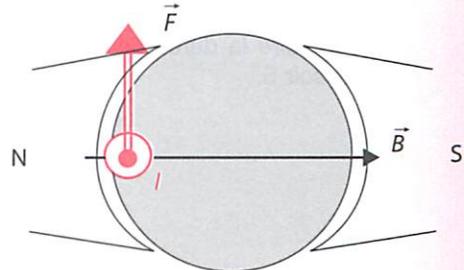
1. Le champ est de 1,5 T ; quelle surface faut-il donner aux pôles de l'électroaimant pour obtenir une force portante de 10⁵ N ?
2. Quelle masse peut soulever un électroaimant dont les pôles ont une surface de 100 cm² si le champ est $B = 0,8 \text{ T}$?

8 Dans l'expérience des rails de Laplace, la longueur utile du conducteur mobile est 15 cm. L'intensité du courant qui le traverse est de 16 A.

Le module du champ magnétique uniforme (perpendiculaire au rail) est $B = 0,5 \text{ T}$.

1. Calculer la force électromagnétique qui déplace le conducteur mobile.
2. Calculer le travail produit par cette force pour un déplacement sur une longueur de 40 cm.

9 Dans l'encoche du rotor (partie tournante) d'un moteur à courant continu sont placés 25 conducteurs qui, en série, sont traversés par un courant d'intensité 20 A.



Le champ magnétique uniforme dans lequel est placé le rotor a un module de 1,6 T.

Calculer l'intensité de la force qui tend à faire tourner ce rotor si la longueur utile des conducteurs est de 15 cm.

10 Un dispositif de temporisation est contrôlé par un circuit série associant un résistor réglable et un condensateur de capacité $C = 470 \mu\text{F}$.

Sous la tension source $U = 5 \text{ V}$, la temporisation est terminée lorsque la charge du condensateur atteint $4,75 \text{ V}$.

1. Calculer la durée de la temporisation si le résistor réglable à une résistance de $22 \text{ k}\Omega$.
2. Calculer la valeur à donner à R pour que cette temporisation dure une minute.

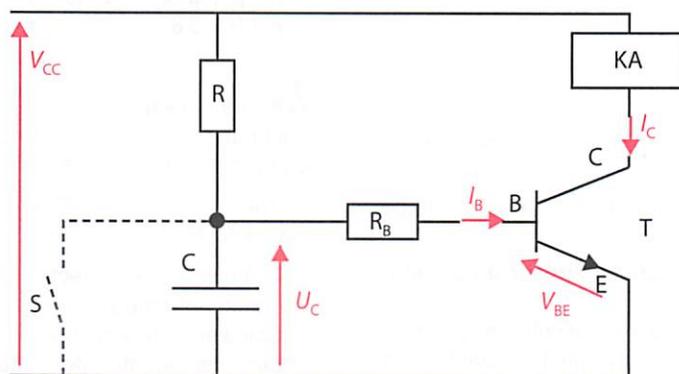
11 Quatre condensateurs identiques portent les indications $5 \mu\text{F}/160 \text{ V}$. Définir les caractéristiques (capacité et tension de service) du condensateur équivalent pour :

1. les quatre condensateurs montés en série ;
2. les quatre condensateurs montés en dérivation.

Problème d'examen

- 12** Le montage ci-dessous permet d'obtenir un enclenchement retardé du relais KA :
- pour $S = 1$, le condensateur C est court-circuité et le transistor T est bloqué (non passant), le relais KA n'est pas enclenché ;
 - pour $S = 0$, le condensateur se charge à travers R , dès que la tension aux bornes de C est suffisante, le transistor conduit le courant nécessaire à l'enclenchement de KA.

On donne : $V_{CC} = 12 \text{ V}$; $R = 10 \text{ k}\Omega$; $R_B = 68 \text{ k}\Omega$; $C = 470 \mu\text{F}$.
 20 mA est l'intensité du courant d'enclenchement du relais KA.



1. Sachant que l'amplification du transistor $\beta = \frac{I_C}{I_B}$ est 200, calculer le courant I_B présent lors de l'enclenchement du relais.
 En déduire la chute de tension aux bornes du résistor R_B .
2. Quelle devra être la tension aux bornes du condensateur C pour obtenir l'enclenchement (on prendra $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$) ?
 En déduire la durée de la temporisation comptée à partir du relâchement du bouton-poussoir S .