

Chapitre 3

Électricité

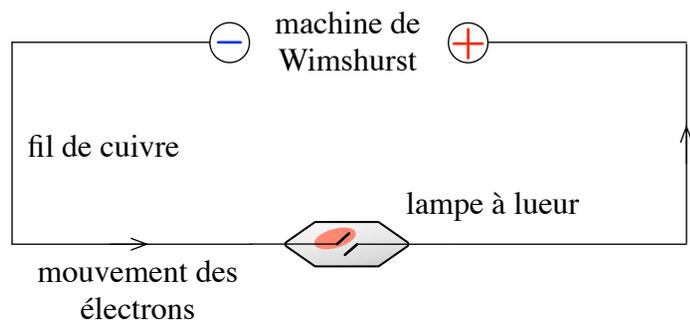
3.1 Tension et énergie électriques

3.1.1 Énergie électrique

Expérience 3.1 On relie les calottes d'une lampe à lueur aux sphères métalliques d'une machine de Wimshurst (figure 3.1). Les liaisons sont réalisées avec des fils de cuivre. On fait fonctionner la machine.



(a) Machine de Wimshurst



(b) Circuit électrique comprenant une lampe à lueur

FIGURE 3.1 – Transformation d'énergie électrique

Observation :

En actionnant en permanence la manivelle de la machine, la lampe à lueur brille de façon continue.

Interprétation :

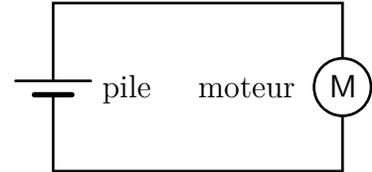
En tournant la manivelle de la machine, des électrons sont transférés d'une sphère métallique vers l'autre. Sur les deux sphères se trouvent des charges électriques de signes contraires. Dans le fil de cuivre en contact avec la sphère négative, les électrons sont repoussés et se déplacent vers la lampe à lueur. Les électrons traversent la lampe en la faisant briller et se déplacent vers la sphère positive.

Rappel : ce déplacement d'électrons dans les fils de cuivre constitue un courant électrique.

Le travail mécanique effectué pour tourner la manivelle augmente l'*énergie potentielle électrique* des électrons sur la sphère négative. Les électrons transportent cette énergie électrique dans le circuit jusqu'à la lampe à lueur. La lampe transforme l'énergie électrique en *énergie rayonnante*.

Le dispositif utilisé constitue un *circuit électrique* fermé, la machine de Wimshurst joue le rôle du *générateur* et la lampe à lueur est un *récepteur*.

Exemple 3.1 Considérons un circuit électrique simple comprenant une pile et un moteur électrique. La pile est un générateur et transforme de l'énergie chimique en énergie électrique. Le moteur est un récepteur et transforme de l'énergie électrique en énergie cinétique.



Définition Un *récepteur* est un dipôle qui reçoit de l'énergie électrique et la transforme en d'autres formes d'énergie (rayonnée, chimique, mécanique).

Exemples :

- L'ampoule transforme de l'énergie électrique en énergie rayonnée.
- L'électrolyseur transforme de l'énergie électrique en énergie chimique.
- Le moteur électrique transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique.

Définition Un *générateur électrique* est un dipôle qui transforme différentes formes d'énergie (chimique, mécanique, rayonnée) en énergie électrique.

Exemples :

- La pile transforme de l'énergie chimique en énergie électrique.
- La dynamo transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique.
- La photopile transforme de l'énergie rayonnée en énergie électrique.

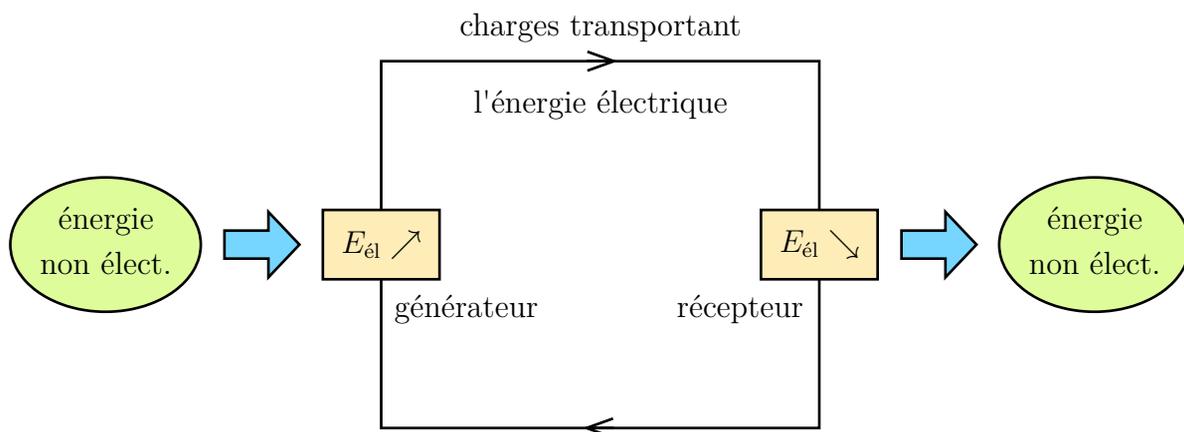


FIGURE 3.2 – Transformations d'énergie électrique

Remarques :

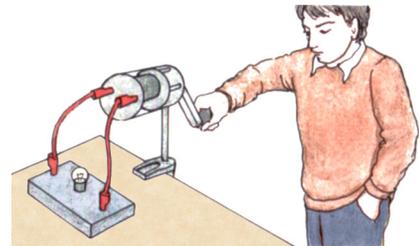
- Un dipôle électrique est un composant d'un circuit électrique possédant deux bornes.
- Les transformations d'énergie s'accompagnent toujours d'une dissipation de chaleur. Si l'énergie électrique est entièrement transformée en énergie interne, le récepteur est appelé *récepteur thermique*.

Les notions introduites et leur signification dans un circuit électrique simple sont représentées à l'aide du schéma de la figure 3.2.

3.1.2 La tension électrique

La notion de tension électrique

Expérience 3.2 Plusieurs lampes sont branchées en parallèle sur une dynamo pourvue d'une manivelle. On fait tourner la manivelle de sorte que chaque lampe brille toujours avec le même éclat, indépendamment du nombre de lampes branchées.



Observations :

Il faut tourner la manivelle avec la même vitesse, indépendamment du nombre de lampes branchées. Le travail nécessaire pour tourner la manivelle est proportionnel au nombre de lampes qui brillent.

Interprétation :

Pour faire briller une lampe, une quantité de charge Q doit être déplacée pour transporter l'énergie électrique $E_{\text{él}}$ nécessaire. Pour deux lampes, la charge déplacée double de même que l'énergie électrique. Ces deux grandeurs sont proportionnelles :

$$E_{\text{él}} \sim Q$$

Le facteur de proportionnalité est appelé *tension électrique*. C'est une caractéristique du générateur et, dans le cas de la dynamo, dépend de la vitesse de rotation.

Définition Le rapport de l'énergie électrique $E_{\text{él}}$ transformée dans un dipôle par la charge Q transportant cette énergie est égal à la tension électrique U au bornes du dipôle considéré :

$$U = \frac{E_{\text{él}}}{Q}$$

La tension est exprimée en *volts* (V) : $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$.

Remarques :

- La tension électrique est une grandeur physique qui caractérise la différence des états électriques entre deux points du circuit électrique. Elle est tout à fait différente de l'intensité du courant qui traduit le nombre d'électrons déplacés par seconde.

- Pour un circuit ouvert, l'intensité du courant s'annule alors que la tension aux bornes du générateur reste pratiquement inchangée. L'énergie électrique résulte d'un déplacement interne de charges électrique dans le générateur.

La mesure de la tension électrique

La tension électrique est mesurée à l'aide d'un *voltmètre*.

Pour connaître la tension électrique aux bornes d'un dipôle, le voltmètre est mis en parallèle avec ce dipôle.

Les sources de tension

Il existe différentes méthodes pour créer des tensions électriques et de mettre en mouvement des charges électriques.

- Un clou de fer et un fil de cuivre sont piqués dans un citron (figure 3.3a) ou dans une pomme. Des réactions chimiques font apparaître une tension d'environ 0,5 V entre le clou et le fil.



(a) Citron



(b) Piles sèches

FIGURE 3.3 – Sources de tension électrique

- La structure d'une pile est comparable à celle du citron. Le clou et le fil sont remplacés par un boîtier en zinc et une tige centrale en carbone, le citron est remplacé par un électrolyte gélatineux. On parle de batterie dans le cas d'un groupement de plusieurs piles (figure 3.3b).
- Une dynamo entraînée par une roue de bicyclette fournit une tension maximale d'environ 6 V.
- Les piles solaires utilisent l'énergie solaire pour propulser les charges électriques.

3.2 Puissance électrique

Pour faire fonctionner un récepteur électrique, un générateur déplace des charges grâce à l'existence d'une tension électrique et effectue ainsi un travail électrique. Le récepteur transforme l'énergie électrique ainsi reçue en une autre forme d'énergie (en émettant de la lumière, en dissipant de la chaleur, en effectuant un mouvement, ...).

La puissance reçue est une grandeur caractéristique du récepteur et indique le travail consommé par unité de temps.

Expérience 3.3 Mesurons la tension U aux bornes du générateur et l'intensité I du courant qu'il débite lorsqu'une lampe fonctionne normalement (figure 3.4).

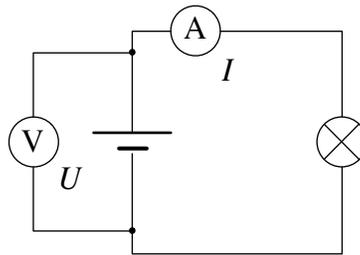


FIGURE 3.4 – Puissance d'une lampe

Reprenons les mesures lorsqu'une deuxième lampe identique à la première est branchée au générateur, d'abord en série, puis en parallèle (figure 3.5). Les deux lampes fonctionnent normalement de sorte que la puissance fournie par le générateur est double. Nous allons comparer les valeurs mesurées à celles mesurées pour une lampe.

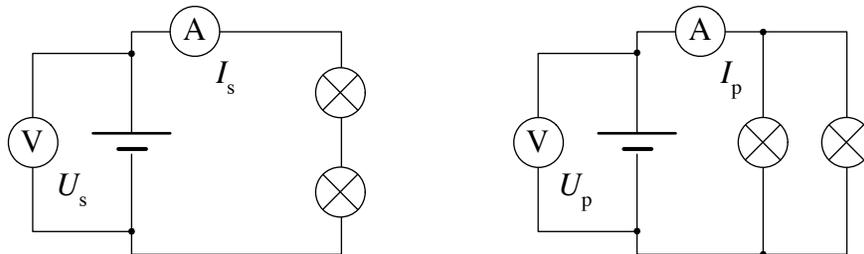


FIGURE 3.5 – Puissance de deux lampes identiques

Observations :

- Dans le cas du circuit série, l'intensité du courant n'a pas changé mais la tension a doublé.
- Dans le cas du circuit parallèle, la tension n'a pas changé mais l'intensité du courant a doublé.

Conclusion :

La puissance électrique fournie par le générateur est

- proportionnelle à la tension quand l'intensité est constante ;
- proportionnelle à l'intensité quand la tension est constante.

Dans le cas d'une seule lampe, la puissance reçue par la lampe est égale à celle fournie par le générateur. On peut donc appliquer les mêmes conclusions à la puissance reçue par la lampe.

Puissance électrique La puissance électrique $P_{\text{él}}$ fournie par un générateur ou reçue par un récepteur est égale au produit de la tension U entre ses bornes et de l'intensité I du courant qui le traverse :

$$P_{\text{él}} = U \cdot I$$

La puissance électrique s'exprime en watts (W), avec : $1 \text{ W} = 1 \text{ V A}$.

L'énergie électrique transportée par le courant électrique du générateur au récepteur est obtenue en multipliant la puissance électrique par la durée t :

$$E_{\text{él}} = P_{\text{él}} t = U I t$$

L'énergie électrique s'exprime en joules (J), avec : $1 \text{ J} = 1 \text{ V A s}$.

Remarque : souvent on exprime l'énergie en *kilowatt-heure* (kWh) :

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}.$$

Le tableau 3.1 donne les puissances de quelques appareils électriques.

<i>Système</i>	<i>Puissance</i>
Calculatrice de poche	0,4 mW
Phare de bicyclette	3 W
Téléviseur	100 W
Congélateur	200 W
Fer à repasser	1 kW
Cuisinière électrique	6 kW
Locomotive électrique	3 MW
Pile solaire	5 mW
Monocellule	2 W
Générateur de centrale électrique	300 MW

TABLE 3.1 – Exemples de puissances électriques

3.2.1 Exercices

Exercice 3.1 Que se passe-t-il lorsque tu branches une ampoule de 3,5 V sur une monocellule de tension 1,5 V ?

Exercice 3.2 Pourquoi ne faut-il pas brancher un appareil conçu pour 110 V sur une source de 230 V ?

Exercice 3.3 La puissance d'une plaque de cuisinière électrique est de 1000 W. Quelle est l'énergie transformée dans cette plaque chauffante en 20 min ? Exprime le résultat en kJ et en kWh.

Exercice 3.4 Une petite chute d'eau transporte 100 l d'eau par seconde. La dénivellation est de 12 m.

Imagine que l'énergie potentielle de l'eau puisse être entièrement transformée en énergie électrique. Combien d'ampoules de 100 W chacune pourrait-on alimenter avec l'énergie ainsi produite ?

Exercice 3.5 Un radiateur électrique dont la puissance est de 2 kW est traversé par un courant de 10 A. Quelle est la tension à ses bornes ?

Exercice 3.6 Une ampoule électrique domestique de 25 W a environ le même éclat que le feu de stop d'une voiture (21 W).

La tension d'alimentation est de 230 V pour la lampe domestique et de 12 V pour le feu de stop.

Calcule l'intensité du courant à travers chaque lampe.

Exercice 3.7 Un accumulateur d'automobile porte l'inscription « 44 Ah ». Quelle est l'énergie totale emmagasinée dans l'accumulateur ?

Exercice 3.8 Pourquoi ne peut-on pas brancher une machine à laver (3,3 kW) sur une prise protégée par un fusible de 10 A ? Justifie ta réponse par un calcul.

Exercice 3.9 Le démarreur d'une voiture est traversé par un courant d'intensité 100 A. Le courant à travers une foreuse électrique est d'environ 2,5 A.

Pourtant la puissance du démarreur n'est que le double de la puissance de la foreuse. Explique.

Exercice 3.10 Pour que la pizza soit bien croustillante, il faut la cuire à 230° pendant 12 min. Le four électrique a une puissance de 2,4 kW.

Calcule le prix de cette opération sachant qu'il faut compter 20 min pour préchauffer le four, et que 1 kWh coûte 0,1646 €.

3.3 Résistance électrique et loi d'Ohm

3.3.1 Définition de la résistance

Expérience 3.4 Dans une première étape on branche un mince fil de cuivre en série avec une source de tension et une lampe (figure ci-contre). Dans une seconde étape, on le remplacera par un mince fil de constantan.

Observation :

La lampe brille avec moins d'éclat après introduction du fil de constantan.

Conclusion :

Le fil de constantan freine le passage des électrons.

Interprétation :

Dans un métal, les atomes sont disposés régulièrement et ne peuvent quitter leur place fixe (réseau). Les atomes libèrent un ou deux de leurs électrons et se transforment en ions positifs. Les électrons peuvent se déplacer dans le métal.

Lorsqu'on applique une tension aux extrémités du fil métallique, les électrons se mettent en mouvement et heurtent continuellement les ions du métal. Lors d'un choc, une partie de l'énergie de l'électron est transférée au réseau. Il en suit que l'électron est freiné et que la température du métal augmente.

Définition On appelle *résistance électrique* la propriété des matériaux à s'opposer au déplacement des électrons. Quantitativement, la résistance R d'un conducteur est le rapport entre la tension U appliquée à ses bornes et l'intensité I du courant qui le traverse.

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

La résistance est mesurée en *ohms* (Ω) : $1 \Omega = 1 \text{ V/A}$

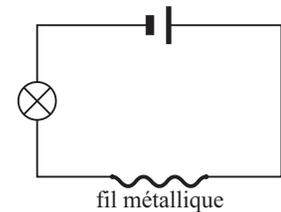
Remarques :

- La résistance d'un conducteur dépend de ses dimensions, du matériau et de sa température.
- Un bon conducteur a une résistance faible, un isolant a une résistance très élevée.

3.3.2 La loi d'Ohm

Expérience 3.5 On étudie la variation de la tension U mesurée aux extrémités d'un fil de constantan en fonction de l'intensité I du courant qui le parcourt. La figure 3.6a montre le schéma du circuit utilisé.

En faisant augmenter l'intensité, on prend garde à ce que la température reste proche de la température ambiante.



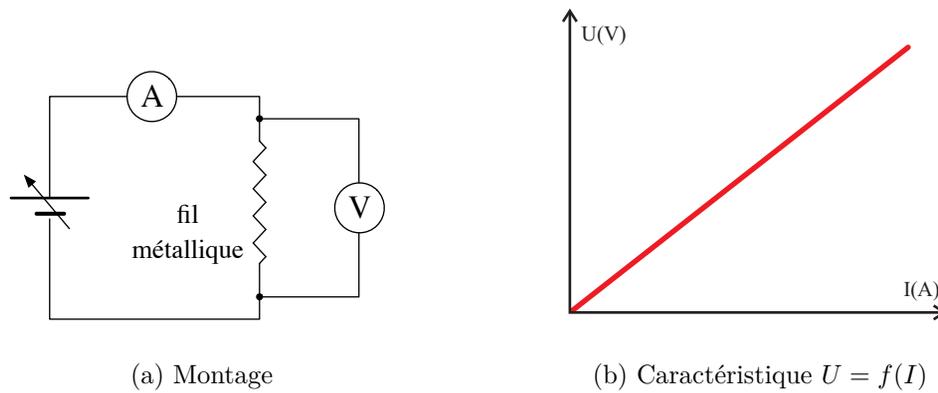


FIGURE 3.6 – Relation entre tension et intensité pour un fil métallique

Observation :

La caractéristique $U = f(I)$ du fil, c'est-à-dire la représentation graphique de la tension en fonction de l'intensité (figure 3.6b) prend l'allure d'une droite passant par l'origine.

Conclusion :

La tension U aux bornes du fil et l'intensité I du courant qui le parcourt varient proportionnellement :

$$U \sim I.$$

En tenant compte de la définition de la résistance :

$$\boxed{\frac{U}{I} = R = \text{constante}}$$

où R correspond à la pente de la droite.

Loi d'Ohm *Un conducteur obéit à la loi d'Ohm si la tension appliquée à ses bornes est proportionnelle à l'intensité du courant qui le traverse :*

$$\boxed{U \sim I}$$

Remarques :

- Un conducteur qui vérifie la loi d'Ohm est appelé conducteur *ohmique*.
- Un dipôle pour lequel la caractéristique passe par l'origine ($I = 0 ; U = 0$) est un *dipôle passif*.
- En travaux pratiques nous allons relever et interpréter les caractéristiques d'autres dipôles passifs.

3.3.3 Résistivité électrique

Reprenons l'expérience 3.5 avec des fils de matériaux et de dimensions différents. Nous étudions la variation de la résistance R lorsqu'on change une de ces caractéristiques.

Conclusions :

- Pour des fils de même matériau et de même section S , la résistance R est proportionnelle à la longueur ℓ :

$$R \sim \ell.$$

- Pour des fils de même matériau et de même longueur ℓ , la résistance R est inversement proportionnelle à la section S :

$$R \sim \frac{1}{S}.$$

Nous pouvons résumer ces deux relations en une proportionnalité :

$$R \sim \frac{\ell}{S}.$$

Le facteur de proportionnalité est appelé *résistivité électrique* ρ et dépend du matériau et de la température du fil conducteur. On en déduit la relation :

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

Comme :

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

la résistivité est mesurée en $\Omega \text{ m}$. En pratique on utilise également l'unité :

$$1 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} = 10^{-6} \Omega \text{ m}.$$

Le tableau 3.2 montre quelques résistivités électriques à 20 °C.

<i>Matériau</i>	<i>Résistivité en $1 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$</i>
Argent	0,0159
Constantan	0,49
Tungstène	0,056
Cuivre	0,0168
Fer	0,0971
Nickel	0,0684
Eau	$2 \cdot 10^{11}$
PVC	10^{20}
Verre	10^{23}

TABLE 3.2 – Exemples de résistivités électriques

3.3.4 Exercices

Exercice 3.11 Une lampe à incandescence de 75 W est traversée par un courant de 330 mA lorsqu'elle est branchée sur une prise de 230 V. L'intensité qui correspond à 10 V est 75 mA. Calcule la résistance du filament pour ces deux tensions.

Exercice 3.12 Une résistance est branchée sur une batterie de tension 9 V. La valeur de la résistance est $300\ \Omega$ à 5% près.

Que signifie cette indication ? Que peut-on dire de l'intensité du courant électrique dans le circuit ?

Exercice 3.13 Une ampoule marquée « 60 W/230 V » est munie d'un filament en tungstène d'environ 0,02 mm de diamètre et $67\ \Omega$ de résistance à $20\ ^\circ\text{C}$.

1. Quelle est la longueur du filament de cette ampoule ?
2. Calculer l'intensité du courant qui traverse le filament lorsqu'on allume la lampe. Comment varie cette intensité ensuite ?

3.4 Les lois de Kirchhoff

3.4.1 La loi des nœuds

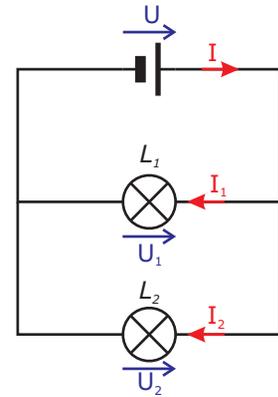
Un circuit-parallèle comprend deux lampes L_1 et L_2 (figure ci-contre).

La tension aux bornes de chaque lampe équivaut à celle du générateur : $U = U_1 = U_2$. Dans un circuit parallèle, les branches parallèles sont soumises à la même tension.

La somme des intensités des courants qui parcourent les deux lampes est égale à l'intensité du courant qui est délivré par le générateur : $I = I_1 + I_2$.

Loi des nœuds Dans un circuit-parallèle, l'intensité du courant dans la branche principale est égale à la somme des intensités des courants dans les branches dérivées.

$$I = \sum_{i=1}^N I_i = I_1 + I_2 + \dots + I_N.$$



3.4.2 La loi des mailles

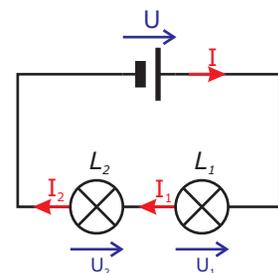
Un circuit-série comprends deux lampes L_1 et L_2 (figure ci-contre).

Ces deux lampes en série sont traversées par un même courant : $I = I_1 = I_2$. L'intensité du courant à la même valeur en tout point d'un circuit-série.

La somme des tensions aux bornes des lampes équivaut à celle du générateur : $U = U_1 + U_2$.

Loi des mailles La tension aux bornes d'un ensemble de récepteurs en série est égale à la somme des tensions aux bornes de chacun d'eux.

$$U = \sum_{i=1}^N U_i = U_1 + U_2 + \dots + U_N.$$



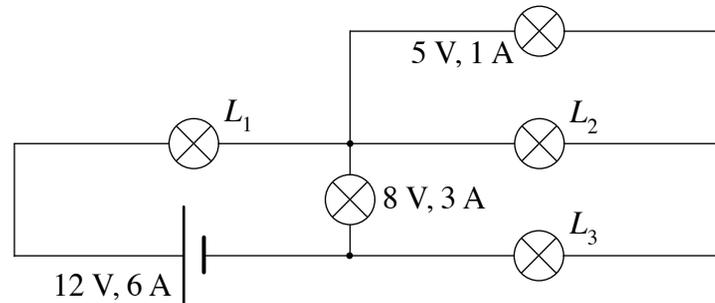
3.4.3 Exercices

Exercice 3.14 Il existe des guirlandes de Noël à 16 et à 10 « bougies ».

Tu veux acheter des ampoules de rechange pour ta guirlande à 16 bougies. Tu trouves dans le supermarché des bougies avec l'inscription « 14 V », d'autres avec l'inscription « 23 V ». Lesquelles choisis-tu ? Justifie ta réponse.

Exercice 3.15 Deux lampes L_1 et L_2 sont branchées en parallèle sur un générateur qui débite un courant d'intensité 12 A. Calcule les intensités partielles sachant que la puissance de L_1 est le triple de la puissance de L_2 .

Exercice 3.16 Détermine les tensions et intensités partielles des lampes L_1 , L_2 et L_3 de la figure ci-dessous.



3.5 Associations de résistances

3.5.1 Montage en série

Le circuit de la figure 3.7a comporte deux résistances R_1 et R_2 montées en série. En mesurant la tension U aux bornes du générateur et l'intensité du courant I qui le traverse, on constate que le rapport U/I est supérieur à chacune des résistances R_1 et R_2 . Ce rapport est appelé *résistance équivalente* R_{12} aux résistances R_1 et R_2 .

En désignant par U_1 et U_2 les tensions aux bornes des résistances R_1 et R_2 , la loi des mailles permet d'écrire :

$$U = U_1 + U_2$$

$$\frac{U}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I}.$$

D'où, pour les deux résistances R_1 et R_2 montées en série :

$$R_{12} = R_1 + R_2.$$

Définition On appelle *résistance équivalente* $R_{\text{éq}}$ la résistance qui permet de remplacer une association de plusieurs résistances.

Résistances en série La résistance équivalente $R_{\text{éq}}$ à un ensemble de résistances R_i montées en série est égale à la somme de ces résistances.

$$R_{\text{éq}} = \sum_{i=1}^N R_i = R_1 + R_2 + \dots + R_N$$

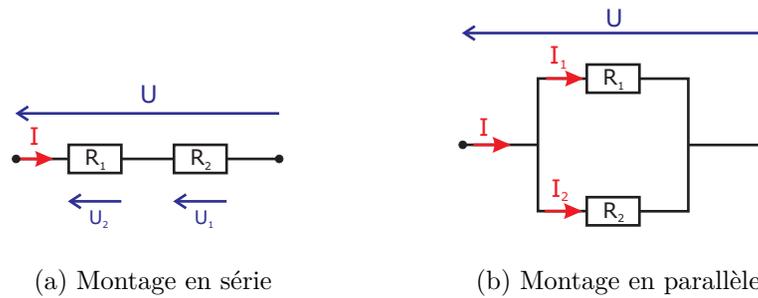


FIGURE 3.7 – Associations de deux résistances

3.5.2 Montage en parallèle

Le circuit de la figure 3.7b comporte deux résistances R_1 et R_2 montées en parallèle. En mesurant la tension U aux bornes du générateur et l'intensité du courant I qui le traverse, on constate que la résistance équivalente $R_{12} = U/I$ est inférieure à chacune des résistances R_1 et R_2 .

En désignant par I_1 et I_2 les intensités des courants qui traversent les résistances R_1 et R_2 , la loi des nœuds permet d'écrire :

$$I = I_1 + I_2$$

$$\frac{I}{U} = \frac{I_1}{U} + \frac{I_2}{U}.$$

D'où, pour les deux résistances R_1 et R_2 montées en parallèle :

$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Résistances en parallèle *L'inverse de la résistance équivalente $R_{\text{éq}}$ d'un ensemble de résistances R_i montées en parallèle est égal à la somme des inverses de ces résistances.*

$$\boxed{\frac{1}{R_{\text{éq}}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}}$$

3.5.3 Exercices

Exercice 3.17 Lorsqu'une plaque de cuisinière est réglée sur le plus bas degré de chauffage, trois résistances sont branchées en série ($R_1 = 64 \Omega$, $R_2 = 193 \Omega$, $R_3 = 97 \Omega$).

La plaque est branchée sur 230 V.

Détermine les tensions et les puissances partielles des trois résistances, ainsi que la puissance totale de la plaque.

Exercice 3.18 Une calculatrice de poche fonctionne sous 3 V, elle est alors parcourue par un courant d'intensité 10 mA.

On veut l'alimenter avec une batterie de 9 V. Quelle est la valeur de la résistance qu'il faut brancher en série ?

Exercice 3.19 Trois résistances ($R_1 = 33 \Omega$, $R_2 = 100 \Omega$, $R_3 = 180 \Omega$) sont branchées en parallèle aux bornes d'un générateur de tension 4 V .

Calcule la résistance équivalente, les intensités et puissances partielles.

Exercice 3.20 Les deux phares d'une automobile ont une puissance de 55 W chacun. La puissance de chaque feu arrière est de 6 W . Les phares et les feux arrière sont branchés en parallèle sur l'accumulateur de tension 12 V .

Calcule la résistance équivalente à l'ensemble des lampes et l'intensité du courant débité par la batterie.

Exercice 3.21 Un radiateur contient deux résistances chauffantes ($R_1 = R_2 = 46 \Omega$). En position 1 du commutateur, les deux résistances sont branchées en série, en position 2 elles sont branchées en parallèle. La tension du secteur étant 230 V , calcule l'intensité et la puissance du radiateur pour chaque degré de chauffe.

Exercice 3.22 Comment les tensions partielles sont-elles modifiées lorsqu'on ferme l'interrupteur de la figure ci-dessous ?

