

Énergie électrique : circuits, puissance et rendement

COURS • P04 • PREMIÈRE

Spécialité de première, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

Ce que tu dois savoir faire	1
Cours	1
Exemples résolus	6
Méthodes et pièges	7
Vers le PASS	7
Exercices	7
Corrigés	9

Ce que tu dois savoir faire

- Relier l'intensité d'un courant continu au débit de charges électriques : $I = Q / \Delta t$, et identifier les porteurs de charge (électrons, ions).
- Définir la tension comme une différence de potentiel et la mesurer, ainsi que l'intensité, avec le bon branchement.
- Appliquer la loi des nœuds et la loi des mailles dans un circuit comportant une ou plusieurs mailles.
- Utiliser la loi d'Ohm et calculer la résistance équivalente d'associations en série et en dérivation.
- Modéliser une source réelle de tension par une source idéale en série avec une résistance : $U = E - r I$, et exploiter sa caractéristique.
- Calculer une puissance électrique ($P = U I$) et une énergie électrique ($E = P \Delta t$), en joules et en kilowattheures.
- Exprimer et calculer la puissance dissipée par effet Joule : $P = R I^2 = U^2 / R$, et citer des applications et des inconvénients de cet effet.
- Établir le bilan de puissance d'un générateur et d'un récepteur (résistor, moteur).
- Définir et calculer le rendement d'une conversion d'énergie, et le rendement global d'une chaîne de conversions.

Cours

1. Courant électrique et intensité

Un **courant électrique** est un déplacement d'ensemble de porteurs de charge. Dans les métaux, ce sont les **électrons libres** ; dans les solutions (électrolytes) et dans les liquides du corps humain, ce sont les **ions** (Na^+ , K^+ , Cl^- ...), qui se déplacent dans les deux sens selon leur signe.

Par **convention**, le courant circule à l'extérieur du générateur de la borne positive vers la borne négative. Les électrons, négatifs, se déplacent en sens inverse du sens conventionnel.

L'**intensité** I du courant est le débit de charge électrique : si une charge Q traverse une section du conducteur pendant la durée Δt , en régime continu,

$$I = Q / \Delta t$$

- I en ampères (A), Q en coulombs (C), Δt en secondes (s) ; $1 \text{ A} = 1 \text{ C} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Le nombre d'électrons correspondant est $N = Q / e$, avec $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$.

L'intensité se mesure avec un **ampèremètre** branché **en série** (le courant doit le traverser). Dans un circuit en série sans dérivation, l'intensité est la même en tout point.

Ordres de grandeur : quelques milliampères pour une diode électroluminescente, environ 0,4 A pour une lampe de 100 W sous 230 V, quelques ampères pour un radiateur, plusieurs centaines d'ampères pour un démarreur de voiture.

2. Tension électrique et potentiel

À chaque point d'un circuit on associe un **potentiel électrique** V (en volts). La **tension** entre deux points A et B est la différence de potentiel :

$$U(AB) = V(A) - V(B), \text{ et donc } U(BA) = -U(AB).$$

On représente une tension par une flèche allant de B vers A (la pointe vers le premier point cité). On choisit en général la masse (le fil relié à la borne – du générateur) comme référence des potentiels, $V = 0$. La tension se mesure avec un **voltmètre** branché **en dérivation** (en parallèle) entre les deux points.

Le lien avec le chapitre sur les champs : entre deux plaques, $E = U / d$. La tension mesure l'énergie qu'un générateur peut communiquer à chaque coulomb de charge qui circule : une charge q qui traverse un dipôle soumis à la tension U échange l'énergie $q \times U$.

Conventions d'orientation. Pour un **récepteur** (résistor, lampe, moteur), on utilise la convention récepteur : la flèche de la tension est opposée au sens du courant ; U et I sont alors positifs tous les deux. Pour un **générateur**, on utilise la convention générateur : flèche de tension et courant dans le même sens.

3. Loi des nœuds et loi des mailles

Un **nœud** est un point du circuit où se rejoignent au moins trois fils. Une **branche** est une portion de circuit entre deux nœuds. Une **maille** est un chemin fermé du circuit.

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

$$\sum I(\text{entrants}) = \sum I(\text{sortants})$$

Justification : la charge électrique se conserve et ne s'accumule pas dans un fil. Tout ce qui entre dans le nœud par seconde doit en ressortir.

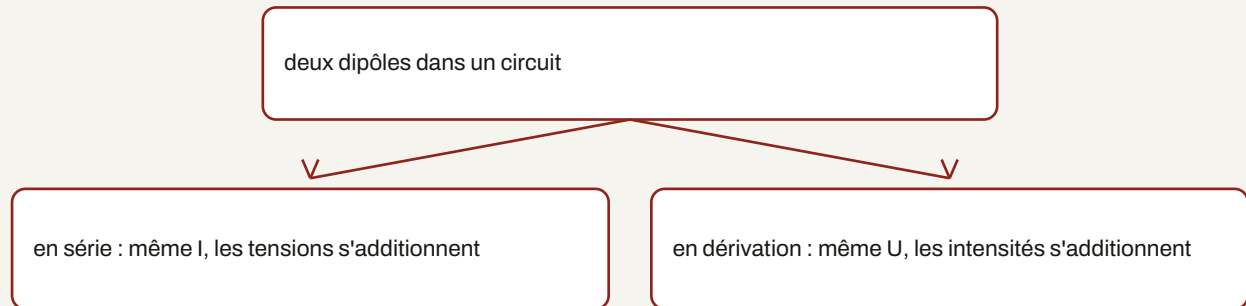
Loi des mailles. Dans une maille, la somme algébrique des tensions est nulle : en parcourant la maille dans un sens choisi, on compte positivement les tensions dont la flèche est dans le sens du parcours et négativement les autres.

Justification : le potentiel en un point a une valeur unique ; en revenant au point de départ, la somme des différences de potentiel rencontrées est nulle.

Conséquences, à connaître par cœur :

- **dipôles en série** : même intensité ; la tension totale est la somme des tensions (additivité) ;
- **dipôles en dérivation** : même tension ; l'intensité totale est la somme des intensités.

Série ou dérivation ?



Deux branches distinctes • ce schéma ne relie pas les deux issues entre elles

4. La loi d'Ohm et les associations de résistances

Un **conducteur ohmique** (résistor) est un dipôle pour lequel la tension à ses bornes est proportionnelle à l'intensité qui le traverse, en convention récepteur :

$$U = R \times I$$

- R est la **résistance**, en ohms (Ω) ; $1 \Omega = 1 \text{ V} \cdot \text{A}^{-1}$.
- Sa **caractéristique** $U = f(I)$ est une droite passant par l'origine, de coefficient directeur R.
- Elle dépend du matériau et des dimensions du conducteur : un fil plus long ou plus fin a une résistance plus grande.

La loi d'Ohm est un **modèle** : elle n'est valable que pour certains dipôles (pas pour une diode, ni pour une lampe à incandescence dont la résistance augmente fortement quand le filament chauffe).

Association en série. Avec la même intensité I : $U = U_1 + U_2 = R_1 I + R_2 I$, d'où

$R(\text{eq}) = R_1 + R_2$ (la résistance équivalente est plus grande que chacune).

Association en dérivation. Avec la même tension U : $I = I_1 + I_2 = U / R_1 + U / R_2$, d'où

$1 / R(\text{eq}) = 1 / R_1 + 1 / R_2$, soit pour deux résistors $R(\text{eq}) = R_1 \times R_2 / (R_1 + R_2)$ (plus petite que chacune).

Exemple court : $6,0 \Omega$ en dérivation avec 12Ω donnent $R(\text{eq}) = 72 / 18 = 4,0 \Omega$.

Pont diviseur de tension. Deux résistors en série soumis à la tension U : la tension aux bornes de R_2 vaut $U_2 = U \times R_2 / (R_1 + R_2)$. C'est ainsi que l'on obtient une tension plus faible à partir d'une source.

5. La source réelle de tension

Une pile ou une batterie n'est pas une source idéale : la tension entre ses bornes diminue quand elle débite un courant plus intense. On la modélise par une **source idéale de tension** de force électromotrice E en série avec une **résistance interne** r. En convention générateur :

$$U(PN) = E - r \times I$$

- E (en V) est la tension à vide, mesurée quand $I = 0$;
- r (en Ω) traduit les pertes internes ;
- la caractéristique $U = f(I)$ est une droite décroissante, d'ordonnée à l'origine E et de coefficient directeur $-r$.

L'intensité de **court-circuit** (bornes reliées par un fil de résistance nulle, $U = 0$) vaut $I(cc) = E / r$. Elle peut être très grande pour une batterie (r faible) : c'est dangereux pour le matériel.

Circuit simple. Une source (E, r) alimente un résistor R. La loi des mailles donne $E - r I = R I$, donc :
 $I = E / (R + r)$

Résoudre un circuit à une maille

1. flécher le courant et les tensions • 2. écrire $U(PN) = E - r I$ pour la source • 3. écrire $U = R I$ pour chaque récepteur • 4. loi des mailles : $E = (r + \text{somme des } R) \times I$ • 5. calculer I, puis chaque tension

6. Puissance et énergie électriques

La **puissance électrique** reçue par un dipôle (convention récepteur) ou fournie par un dipôle (convention générateur) est :

$$P = U \times I$$

- P en watts (W), U en volts (V), I en ampères (A).

L'**énergie électrique** transférée pendant une durée Δt , à puissance constante :

$$E = P \times \Delta t$$

- en joules (J) si P est en W et Δt en s ;
- en **kilowattheures** (kWh) si P est en kW et Δt en h, unité des factures d'électricité. $1 \text{ kWh} = 1\,000 \text{ W} \times 3\,600 \text{ s} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$.

On retrouve $P = U \times I$ à partir de la tension : pendant Δt , la charge $Q = I \Delta t$ traverse le dipôle et échange l'énergie $Q \times U = U I \Delta t$.

Pour une batterie, la capacité est souvent donnée en ampère-heures (A·h) : c'est une **charge**, $1 \text{ A} \cdot \text{h} = 3\,600 \text{ C}$. L'énergie stockée vaut capacité $\times$ tension, en wattheures (W·h).

7. L'effet Joule

Le passage du courant dans un conducteur s'accompagne d'un dégagement de chaleur : c'est l'**effet Joule**. Microscopiquement, les porteurs de charge cèdent de l'énergie au réseau du matériau, dont l'agitation thermique augmente.

Pour un conducteur ohmique, toute l'énergie électrique reçue est convertie en transfert thermique. En combinant $P = U I$ et $U = R I$:

$$P(J) = R \times I^2 = U^2 / R$$

- **Applications utiles** : radiateurs, bouilloires, fers à repasser, plaques chauffantes, fusibles (un fil fond si I dépasse une valeur limite), dégivrage des vitres.

- **Inconvénients** : pertes dans les lignes électriques, échauffement des câbles et des composants, des moteurs, des chargeurs. Ces pertes croissent comme le **carré** de l'intensité.

C'est pourquoi le courant est transporté sur de longues distances sous très haute tension (jusqu'à 400 kV en France) : pour une même puissance $P = U I$, une tension 100 fois plus grande permet une intensité 100 fois plus faible, donc des pertes Joule 10 000 fois plus faibles (exercice 8).

8. Bilans de puissance et rendement

Bilan d'un générateur réel. En multipliant $U = E - r I$ par I :

$$U I = E I - r I^2, \text{ soit } E I = U I + r I^2$$

- $E I$ est la puissance **produite** (convertie à partir d'une autre forme d'énergie : chimique pour une pile, mécanique pour un alternateur, rayonnante pour une cellule photovoltaïque) ;
- $U I$ est la puissance **électrique fournie** au circuit extérieur ;
- $r I^2$ est la puissance **perdue** par effet Joule dans le générateur.

Bilan d'un moteur. Un moteur reçoit la puissance électrique $U I$; il fournit une puissance mécanique utile ; il perd une partie de l'énergie par effet Joule dans ses bobinages ($r' I^2$, avec r' la résistance de ses bobinages) et par frottements.

$$P(\text{reçue}) = P(\text{utile}) + P(\text{pertes})$$

Rendement. Le **rendement** d'un convertisseur est le rapport de la puissance utile (ou énergie utile) sur la puissance reçue (ou énergie reçue) :

$$\eta = P(\text{utile}) / P(\text{reçue}) = E(\text{utile}) / E(\text{reçue})$$

- η est sans unité, compris entre 0 et 1 (souvent exprimé en %), toujours strictement inférieur à 1 pour un convertisseur réel ;
- l'énergie qui n'est pas utile n'est pas perdue au sens de la conservation : elle est dégradée, le plus souvent en transfert thermique vers l'environnement.

Chaîne énergétique d'un moteur électrique

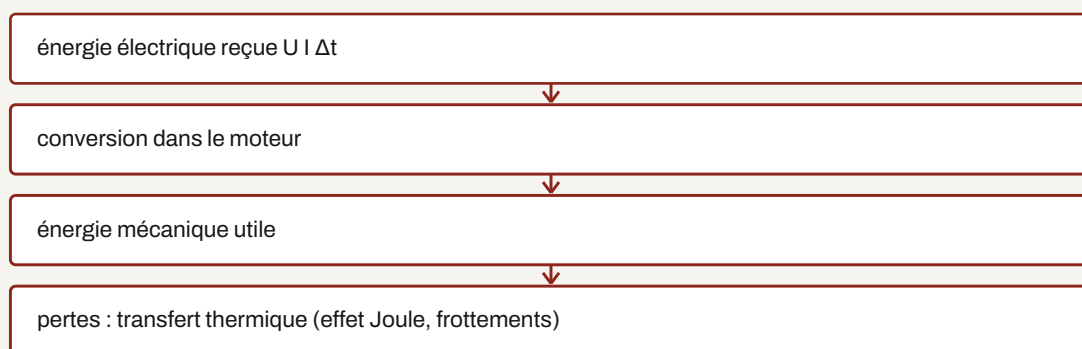


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

Chaîne de conversions. Quand plusieurs convertisseurs se suivent, le rendement global est le **produit** des rendements : $\eta(\text{global}) = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3$. Il est toujours plus faible que le plus petit des rendements de la chaîne.

Ordres de grandeur : moteur électrique 80 à 95 % ; alternateur de centrale 95 à 99 % ; panneau photovoltaïque 15 à 25 % ; moteur thermique de voiture 25 à 40 % ; lampe à DEL environ 30 à 40 % de la puissance convertie en lumière, lampe à incandescence moins de 5 %.

Pour un générateur, le rendement électrique vaut $\eta = U I / (E I) = U / E$: il est d'autant meilleur que l'intensité débitée est faible devant $I(cc)$.

Exemples résolus

Exemple 1 : circuit série alimenté par une source réelle

Énoncé. Une batterie de force électromotrice $E = 12 \text{ V}$ et de résistance interne $r = 1,0 \Omega$ alimente deux résistors en série, $R_1 = 4,0 \Omega$ et $R_2 = 7,0 \Omega$. a) Calcule l'intensité du courant. b) Calcule la tension aux bornes de la batterie et aux bornes de chaque résistor. Vérifie la loi des mailles. c) Fais le bilan de puissance de la batterie et calcule son rendement.

Résolution. a) Loi des mailles : $E - r I = R_1 I + R_2 I$, d'où $I = E / (r + R_1 + R_2) = 12 / (1,0 + 4,0 + 7,0) = 12 / 12 = 1,0 \text{ A}$. b) $U(PN) = E - r I = 12 - 1,0 \times 1,0 = 11 \text{ V}$. $U_1 = R_1 I = 4,0 \text{ V}$; $U_2 = R_2 I = 7,0 \text{ V}$. Vérification : $U_1 + U_2 = 11 \text{ V} = U(PN)$. c) Puissance produite : $E I = 12 \times 1,0 = 12 \text{ W}$. Puissance fournie au circuit : $U I = 11 \text{ W}$. Pertes Joule internes : $r I^2 = 1,0 \text{ W}$. On vérifie $12 = 11 + 1$. Rendement : $\eta = U I / (E I) = 11 / 12 = 0,92$, soit 92 %. Les 11 W fournis sont entièrement dissipés par effet Joule dans R_1 (4,0 W) et R_2 (7,0 W).

Exemple 2 : circuit avec dérivation

Énoncé. Une source réelle ($E = 9,0 \text{ V}$, $r = 2,0 \Omega$) alimente deux résistors montés en dérivation : $R_1 = 6,0 \Omega$ et $R_2 = 12 \Omega$. a) Calcule la résistance équivalente à la dérivation. b) Calcule l'intensité débitée par la source et la tension entre ses bornes. c) Calcule les intensités I_1 et I_2 et vérifie la loi des nœuds.

Résolution. a) $R(\text{eq}) = R_1 \times R_2 / (R_1 + R_2) = 6,0 \times 12 / 18 = 4,0 \Omega$. b) $I = E / (r + R(\text{eq})) = 9,0 / (2,0 + 4,0) = 1,5 \text{ A}$. $U(PN) = E - r I = 9,0 - 3,0 = 6,0 \text{ V}$. c) Les deux résistors sont soumis à $U = 6,0 \text{ V}$: $I_1 = 6,0 / 6,0 = 1,0 \text{ A}$; $I_2 = 6,0 / 12 = 0,50 \text{ A}$. Loi des nœuds : $I_1 + I_2 = 1,5 \text{ A} = I$. Remarque : le résistor de plus faible résistance est traversé par le courant le plus intense.

Exemple 3 : rendement d'un moteur qui soulève une charge

Énoncé. Un petit moteur de treuil, alimenté sous $U = 12 \text{ V}$, est traversé par un courant $I = 2,5 \text{ A}$. La résistance de ses bobinages vaut $r' = 0,80 \Omega$; on néglige les frottements. Donnée : $g = 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$. a) Calcule la puissance électrique reçue, la puissance perdue par effet Joule et la puissance mécanique utile. b) Calcule le rendement du moteur. c) Le moteur soulève une charge de $5,0 \text{ kg}$ à vitesse constante pendant 10 s . De quelle hauteur la monte-t-il ?

Résolution. a) $P(\text{reçue}) = U I = 12 \times 2,5 = 30 \text{ W}$. $P(\text{Joule}) = r' I^2 = 0,80 \times 2,5^2 = 0,80 \times 6,25 = 5,0 \text{ W}$. $P(\text{utile}) = 30 - 5,0 = 25 \text{ W}$. b) $\eta = 25 / 30 = 0,83$, soit 83 %. c) En 10 s , l'énergie mécanique utile vaut $25 \times 10 = 250 \text{ J}$. À vitesse constante, elle sert à augmenter l'énergie potentielle de pesanteur : $m g h = 250 \text{ J}$, donc $h = 250 / (5,0 \times 9,81) = 5,1 \text{ m}$.

Méthodes et pièges

- **Méthode type** : fais un schéma, flèche le courant et les tensions (convention récepteur pour les récepteurs, générateur pour la source), écris les lois des mailles et des nœuds, remplace par les lois des dipôles ($U = R I$, $U = E - r I$), résous, puis vérifie avec une loi non utilisée.
- **Série ou dérivation** : en série, même intensité ; en dérivation, même tension. Repère d'abord les nœuds pour savoir quels dipôles sont en dérivation.
- **Résistance équivalente en dérivation** : n'additionne pas les résistances ; additionne leurs inverses. Le résultat est plus petit que la plus petite résistance, ce qui permet de te contrôler.
- **Source réelle** : la tension à ses bornes n'est égale à E qu'à vide. Dès qu'elle débite, $U = E - r I$.
- **Unités d'énergie** : $1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$; des W et des s donnent des J , des kW et des h donnent des kWh . Ne mélange pas.
- **Ampère-heure** : c'est une charge, pas une énergie ; multiplie par la tension pour obtenir une énergie.
- **Effet Joule** : utilise $R I^2$ quand tu connais I , U^2 / R quand tu connais la tension aux bornes du résistor (pas celle du générateur).
- **Rendement** : il est toujours inférieur à 1. Si ton calcul donne plus de 1, tu as inversé utile et reçu.
- **Chaîne de conversions** : les rendements se multiplient, ils ne s'additionnent pas.

Vers le PASS

En PASS, l'électricité sert à décrire le vivant. La membrane cellulaire est modélisée par un circuit : des **conductances** ioniques (l'inverse de résistances, en siemens) en dérivation, des générateurs qui représentent les potentiels d'équilibre de chaque ion, et un **condensateur** pour la bicouche lipidique. Les lois des nœuds et des mailles permettent alors d'écrire le potentiel de repos, et la charge du condensateur membranaire explique la propagation du potentiel d'action. L'effet Joule intervient dans le bistouri électrique et dans la sécurité électrique (un courant traversant le corps chauffe les tissus), et la notion de rendement se retrouve dans le bilan énergétique du muscle, dont le rendement mécanique est d'environ 20 à 25 %. On y ajoute le **condensateur** (charge, décharge, constante de temps), qui n'est pas au programme de Première.

Suite en PASS : Champs électriques, circuits et condensateurs

Exercices

Niveau 1 : s'entraîner

1. Un fil de cuivre est parcouru par un courant d'intensité $I = 0,20 \text{ A}$ pendant 5,0 min. Donnée : $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$.
 - a) Calcule la charge électrique qui a traversé une section du fil. b) Calcule le nombre d'électrons correspondant.
2. Lois des nœuds et des mailles.
 - a) Un courant de 2,0 A arrive à un nœud, d'où partent deux branches. L'une est parcourue par 0,80 A. Calcule l'intensité dans l'autre. b) Un générateur délivre $U(PN) = 12 \text{ V}$ à un résistor et une lampe montés en série. La tension aux bornes du résistor vaut 4,5 V. Calcule la tension aux bornes de la

lampe.

3. Un résistor de résistance $R = 220 \, \Omega$ est soumis à une tension $U = 5,0 \, \text{V}$. Calcule l'intensité qui le traverse, en A puis en mA, et la puissance qu'il dissipe.
4. Une bouilloire de puissance $P = 2\,000 \, \text{W}$ fonctionne pendant 3,0 min. Calcule l'énergie électrique consommée en joules puis en kilowattheures.
5. Une pile a une force électromotrice $E = 4,5 \, \text{V}$ et une résistance interne $r = 1,5 \, \Omega$.
a) Calcule la tension à ses bornes quand elle débite $I = 0,40 \, \text{A}$. b) Calcule son intensité de court-circuit.

Niveau 2 : type bac

6. Caractéristique d'une source réelle. On relève la tension U aux bornes d'une batterie en fonction de l'intensité I qu'elle débite :

$I \, (\text{A})$	0	0,50	1,00	1,50	2,00
$U \, (\text{V})$	6,00	5,40	4,80	4,20	3,60

- a) Montre que les mesures sont compatibles avec le modèle $U = E - r I$ et détermine E et r . b) Calcule l'intensité de court-circuit. c) On branche aux bornes de la batterie un résistor $R = 3,6 \, \Omega$. Calcule I , U , la puissance fournie au résistor et le rendement de la batterie.
7. Radiateur électrique. Un radiateur porte l'indication « 230 V ; 1 500 W ». On le modélise par un conducteur ohmique.
a) Calcule l'intensité qui le traverse en fonctionnement normal. b) Calcule sa résistance. c) Calcule l'énergie consommée en 2,0 h de fonctionnement, en kWh puis en J. d) Sous quelle forme cette énergie est-elle transférée ? Quel est le rendement de ce radiateur, si l'on considère comme utile le transfert thermique vers la pièce ?
8. Pourquoi la haute tension ? Une ligne de résistance totale $R(L) = 0,50 \, \Omega$ doit acheminer une puissance $P = 100 \, \text{kW}$.
a) Calcule l'intensité dans la ligne si l'on transporte cette puissance sous 400 V, puis les pertes par effet Joule dans la ligne. Quel pourcentage de P représentent-elles ? b) Reprends le calcul sous 20 kV. c) Conclus.
9. Batterie de téléphone. Une batterie porte les indications « 3,85 V ; 4 000 mA·h ».
a) Calcule la charge électrique qu'elle peut débiter, en coulombs. b) Calcule l'énergie qu'elle stocke, en wattheures puis en joules. c) Le chargeur a un rendement de 85 %. Quelle énergie est prélevée sur le réseau pour une recharge complète ? Sous quelle forme est la différence ?

Niveau 3 : vers le PASS

10. Circuit mixte. Une source ($E = 12 \, \text{V}$, $r = 1,0 \, \Omega$) alimente un résistor $R_1 = 3,0 \, \Omega$ en série avec un ensemble formé de $R_2 = 6,0 \, \Omega$ et $R_3 = 3,0 \, \Omega$ montés en dérivation.
a) Calcule la résistance équivalente de l'ensemble (R_2 , R_3), puis celle du circuit extérieur. b) Calcule l'intensité débitée et la tension aux bornes de la source. c) Calcule les tensions U_1 et U_{23} , puis les intensités I_2 et I_3 . d) Calcule la puissance dissipée dans chaque résistor et dans la résistance interne. Vérifie que leur somme est égale à $E \times I$.

11. Adaptation de puissance. Une source ($E = 6,0 \text{ V}$, $r = 1,2 \Omega$) alimente un résistor de résistance R variable.

a) Montre que la puissance reçue par le résistor vaut $P(R) = E^2 R / (R + r)^2$. b) Calcule P pour $R = 0,60 \Omega$, $R = 1,2 \Omega$ et $R = 2,4 \Omega$. c) Pour quelle valeur de R parmi celles-ci la puissance est-elle la plus grande ? Calcule alors le rendement de la source. Commente.

12. Rendement d'une chaîne. Dans une centrale hydroélectrique, la turbine a un rendement de 90 %, l'alternateur de 95 % et le transport jusqu'à l'utilisateur de 97 %. Chaque seconde, $1,0 \times 10^3 \text{ kg}$ d'eau descendent d'une hauteur de 100 m. Donnée : $g = 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

a) Calcule le rendement global. b) Calcule la puissance mécanique reçue par la turbine (énergie potentielle perdue par l'eau en une seconde). c) Calcule la puissance électrique disponible chez les utilisateurs et la puissance totale dissipée.

13. Vrai ou faux ? Justifie.

a) Deux résistors de 10Ω en dérivation équivalent à 20Ω . b) La tension aux bornes d'une pile réelle augmente quand elle débite plus de courant. c) Le kilowattheure est une unité de puissance. d) Si l'intensité double dans un résistor, la puissance dissipée par effet Joule double. e) Dans un circuit en série, l'intensité est la même partout. f) Un moteur électrique peut avoir un rendement de 105 %.

Corrigés

1. a) $\Delta t = 5,0 \times 60 = 300 \text{ s}$. $Q = I \times \Delta t = 0,20 \times 300 = 60 \text{ C}$.

b) $N = Q / e = 60 / 1,60 \times 10^{-19} = 3,8 \times 10^{20}$ électrons ($3,75 \times 10^{20}$).

2. a) Loi des nœuds : $2,0 = 0,80 + I_2$, donc $I_2 = 1,2 \text{ A}$.

b) Loi des mailles (ou additivité des tensions en série) : $U(PN) = U(R) + U(L)$, donc $U(L) = 12 - 4,5 = 7,5 \text{ V}$.

3. $I = U / R = 5,0 / 220 = 0,0227 \text{ A} = 2,3 \times 10^{-2} \text{ A}$, soit **23 mA**. $P = U I = 5,0 \times 0,0227 = 0,11 \text{ W}$ (ou $U^2 / R = 25 / 220 = 0,114 \text{ W}$).

4. $\Delta t = 3,0 \text{ min} = 180 \text{ s}$. $E = P \times \Delta t = 2\,000 \times 180 = 3,6 \times 10^5 \text{ J}$. En kWh : $2,0 \text{ kW} \times 0,050 \text{ h} = 0,10 \text{ kWh}$ (vérification : $3,6 \times 10^5 / 3,6 \times 10^6 = 0,10$).

5. a) $U = E - r I = 4,5 - 1,5 \times 0,40 = 4,5 - 0,60 = 3,9 \text{ V}$.

b) $I(cc) = E / r = 4,5 / 1,5 = 3,0 \text{ A}$.

6. a) Quand I augmente de $0,50 \text{ A}$, U diminue chaque fois de $0,60 \text{ V}$: les points sont alignés sur une droite décroissante, ce qui correspond au modèle $U = E - r I$. Ordonnée à l'origine : $E = 6,00 \text{ V}$. Coefficient directeur : $-0,60 / 0,50 = -1,2 \Omega$, donc $r = 1,2 \Omega$.

b) $I(cc) = E / r = 6,00 / 1,2 = 5,0 \text{ A}$. c) $I = E / (R + r) = 6,00 / (3,6 + 1,2) = 6,00 / 4,8 = 1,25 \text{ A}$. $U = R I = 3,6 \times 1,25 = 4,5 \text{ V}$ (ou $6,00 - 1,2 \times 1,25 = 4,5 \text{ V}$). $P = U I = 4,5 \times 1,25 = 5,6 \text{ W}$. $\eta = U / E = 4,5 / 6,00 = 0,75$, soit 75 %.

7. a) $I = P / U = 1\,500 / 230 = 6,5 \text{ A}$.

b) $R = U^2 / P = 230^2 / 1\,500 = 52\,900 / 1\,500 = 35 \Omega$ ($35,3 \Omega$). c) $E = 1,5 \text{ kW} \times 2,0 \text{ h} = 3,0 \text{ kWh}$, soit $3,0 \times 3,6 \times 10^6 = 1,1 \times 10^7 \text{ J}$ ($1,08 \times 10^7 \text{ J}$). d) Par effet Joule, toute l'énergie électrique est convertie en **transfert thermique**. Si ce transfert est l'effet utile, le rendement vaut $\eta = 1$ (100 %) : c'est le seul cas où un convertisseur atteint ce rendement, parce que la forme « dégradée » de l'énergie est précisément celle que l'on cherche.

8. a) $I = P / U = 1,00 \times 10^5 / 400 = 250 \text{ A}$. $P(J) = R(L) \times I^2 = 0,50 \times 250^2 = 0,50 \times 62\,500 = 3,1 \times 10^4 \text{ W}$, soit 31 250 / 100 000 = 31 % de P.

b) $I = 1,00 \times 10^5 / 2,0 \times 10^4 = 5,0 \text{ A}$. $P(J) = 0,50 \times 25 = 12,5 \text{ W}$, soit 0,0125 % de P. c) Multiplier la tension par 50 divise l'intensité par 50 et les pertes par $50^2 = 2\,500$. **Le transport sous haute tension réduit considérablement les pertes par effet Joule.**

9. a) $Q = 4,000 \text{ A} \times 3\,600 \text{ s} = 1,44 \times 10^4 \text{ C}$.

b) $E = 4,000 \text{ A} \cdot h \times 3,85 \text{ V} = 15,4 \text{ W} \cdot h$; en joules : $15,4 \times 3\,600 = 5,54 \times 10^4 \text{ J}$ (ou $Q \times U = 14\,400 \times 3,85 = 55\,440 \text{ J}$). c) $E(\text{prélevée}) = E(\text{utile}) / \eta = 5,54 \times 10^4 / 0,85 = 6,5 \times 10^4 \text{ J}$. La différence (environ $1,0 \times 10^4 \text{ J}$) est dissipée sous forme de **transfert thermique** (échauffement du chargeur et de la batterie).

10. a) $R_{23} = 6,0 \times 3,0 / (6,0 + 3,0) = 18 / 9,0 = 2,0 \Omega$. Circuit extérieur : $R = R_1 + R_{23} = 3,0 + 2,0 = 5,0 \Omega$.

b) $I = E / (R + r) = 12 / 6,0 = 2,0 \text{ A}$. $U(\text{PN}) = 12 - 1,0 \times 2,0 = 10 \text{ V}$. c) $U_1 = R_1 I = 3,0 \times 2,0 = 6,0 \text{ V}$. $U_{23} = R_{23} I = 2,0 \times 2,0 = 4,0 \text{ V}$ (vérification : $6,0 + 4,0 = 10 \text{ V}$). $I_2 = 4,0 / 6,0 = 0,67 \text{ A}$; $I_3 = 4,0 / 3,0 = 1,33 \text{ A}$; loi des nœuds : $0,67 + 1,33 = 2,0 \text{ A}$. d) $P_1 = R_1 I^2 = 3,0 \times 4,0 = 12 \text{ W}$; $P_2 = U_{23}^2 / R_2 = 16 / 6,0 = 2,67 \text{ W}$; $P_3 = 16 / 3,0 = 5,33 \text{ W}$; $P(r) = r I^2 = 1,0 \times 4,0 = 4,0 \text{ W}$. Somme : $12 + 2,67 + 5,33 + 4,0 = 24 \text{ W}$, et $E \times I = 12 \times 2,0 = 24 \text{ W}$. Le bilan est vérifié.

11. a) $I = E / (R + r)$ et $P = R I^2$, donc $P(R) = E^2 R / (R + r)^2$.

b) $E^2 = 36 \text{ V}^2$. $R = 0,60 \Omega$: $P = 36 \times 0,60 / 1,8^2 = 21,6 / 3,24 = 6,7 \text{ W}$. $R = 1,2 \Omega$: $P = 36 \times 1,2 / 2,4^2 = 43,2 / 5,76 = 7,5 \text{ W}$. $R = 2,4 \Omega$: $P = 36 \times 2,4 / 3,6^2 = 86,4 / 12,96 = 6,7 \text{ W}$. c) **La puissance est la plus grande pour $R = r = 1,2 \Omega$** (on admet qu'il s'agit du maximum, $P(\text{max}) = E^2 / (4r)$). Le rendement vaut alors $\eta = U / E = R / (R + r) = 0,50$, soit 50 %. Commentaire : tirer le maximum de puissance d'une source impose de gaspiller la moitié de l'énergie produite dans sa résistance interne. Pour une alimentation, on préfère un bon rendement (R grand devant r) ; pour transmettre un signal faible, on préfère la puissance maximale.

12. a) $\eta(\text{global}) = 0,90 \times 0,95 \times 0,97 = 0,83$, soit 83 %.

b) En une seconde, l'énergie potentielle perdue vaut $m g h = 1,0 \times 10^3 \times 9,81 \times 100 = 9,81 \times 10^5 \text{ J}$, donc $P(\text{reçue}) = 9,8 \times 10^5 \text{ W}$ (0,98 MW). c) $P(\text{utilisateurs}) = 0,829 \times 9,81 \times 10^5 = 8,1 \times 10^5 \text{ W}$. Puissance dissipée : $9,81 \times 10^5 - 8,14 \times 10^5 = 1,7 \times 10^5 \text{ W}$, principalement sous forme de transfert thermique.

13. a) **Faux** : en dérivation, $R(\text{éq}) = 10 \times 10 / 20 = 5,0 \Omega$, plus petite que chacune.

b) **Faux** : $U = E - r I$ diminue quand I augmente. c) **Faux** : c'est une unité d'énergie, $1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$.

d) **Faux** : $P = R I^2$, elle est multipliée par $2^2 = 4$. e) **Vrai** : conséquence de la loi des nœuds (pas de nœud, donc pas de partage du courant). f) **Faux** : un rendement supérieur à 1 signifierait que le moteur fournit plus d'énergie qu'il n'en reçoit, ce qui est contraire à la conservation de l'énergie.