

Electrotechnique

Marc Kaiser
Serge Pittet

Bernard Chardonens
Frédéric Loup

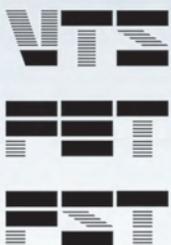
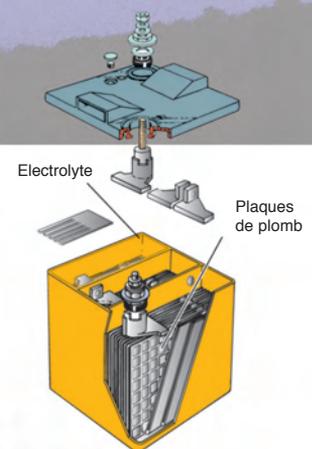
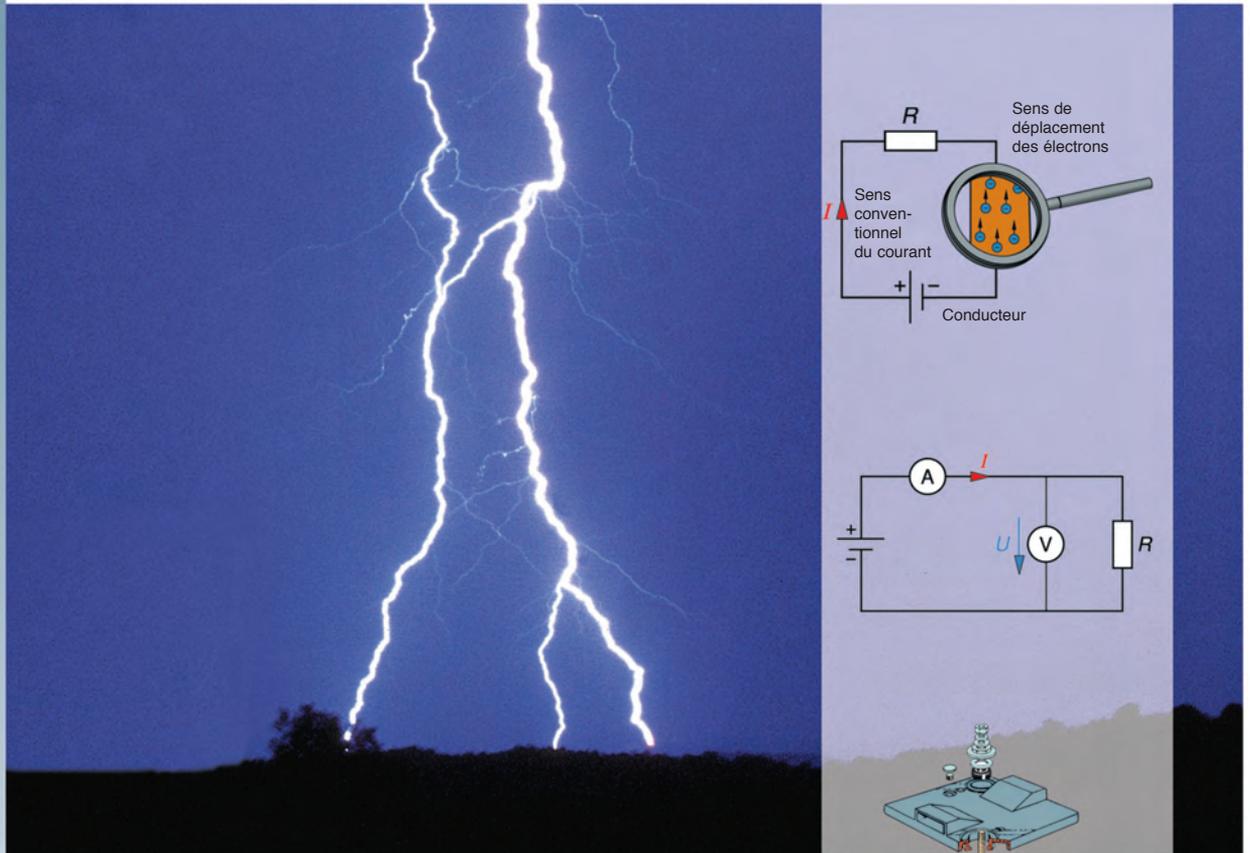
Marcel Haenni
Gérald Hugenin

André Imstepf
Jean-François Pochon

René Mauer

Michel Scheffel

Fascicule 1



VERBAND DER TECHNISCHEN SCHULEN
FEDERATION DES ECOLES TECHNIQUES
FEDERAZIONE DELLE SCUOLE TECNICHE

Fascicule 1

Cet ouvrage a été réalisé en collaboration avec le GREME
(Groupe romand d'experts pour les moyens d'enseignement).

Les auteurs en sont :

M. André Imstepf	Ecole professionnelle de Sion
M. Bernard Chardonens	Ecole professionnelle de Fribourg
M. Frédéric Loup	Centre professionnel du nord vaudois
M. Gérald Hugnenin	Haute école Arc à St-Imier
M. Jean- François Pochon	Centre professionnel du nord vaudois
M. Marc Kaiser	Ecole professionnelle de Genève
M. Marcel Haenni	Ecole professionnelle de Delémont
M. Michel Scheffel	Ecole professionnelle de Colombier
M. René Maurer	Ecole professionnelle de Saint-Imier
M. Serge Pittet	Centre professionnel du nord vaudois

avec la participation de :

M. Claude-Alain Jeanrichard	Ecole des Métiers de Lausanne
-----------------------------	-------------------------------

Sources historiques :	Encyclopédie Bordas Le Grand Larousse Illustré
-----------------------	---

Illustrations :	Leclanché SA (pages 1.9, 4.5, 6.6 et 6.11) Electrona SA (page 6.12)
-----------------	---

Conception graphique :	Graphit' La Chaux-de-Fonds
------------------------	----------------------------

Photos et illustrations :	Jean-François Robert Jean-Daniel Nicolet
---------------------------	---

Photolitho :	Repro litho-Corgémont SA, Corgémont
--------------	-------------------------------------

Imprimeur :	Imprimerie MTL SA, Villars-sur-Glâne (CH)
-------------	---

Imprimé en Suisse.

Tous droits de reproduction réservés – EF1f / Version 06.4 / Juillet 2014 / 5000 ex.

ISBN 2-940025-18-5

Editeur: Fédération des écoles techniques (FET), www.fet-edu.ch

Préface

Cet ouvrage constitue un cours sur les lois générales de l'électricité.

Conçu spécifiquement pour les apprentis en formation dans les écoles professionnelles et techniques, il s'adresse aussi aux personnes désirant s'initier ou compléter leurs connaissances en électricité.

Chaque notion est accompagnée d'un exemple, orienté sur la pratique, permettant ainsi de faire un lien direct entre la théorie et les situations professionnelles.

Les deux premiers fascicules comprennent la théorie de base. Les moteurs et les transformateurs, applications principales du magnétisme, sont étudiés dans le fascicule 3.

Les définitions, les grandeurs physiques et leurs unités, les prescriptions d'installations, les symboles et la schématique sont issus des normes suisses et internationales en vigueur à ce jour. Lorsque l'unité peut être confondue avec une grandeur, elle est entourée de crochets.

Ce cours complet d'électrotechnique comprend trois fascicules.

Fascicule 1

Chapitre 1 :	Notions fondamentales
Chapitre 2 :	Grandeurs fondamentales
Chapitre 3 :	Résistance électrique – Couplages
Chapitre 4 :	Energie – Puissance – Rendement
Chapitre 5 :	Effets calorifiques du courant
Chapitre 6 :	Sources chimiques de tension

Fascicule 2

Chapitre 7 :	Magnétisme - Electromagnétisme
Chapitre 8 :	Electrostatique - Condensateur
Chapitre 9 :	Instruments de mesure
Chapitre 10 :	Courant alternatif monophasé

Fascicule 3

Chapitre 11 :	Courant alternatif triphasé
Chapitre 12 :	Moteurs à courant alternatif
Chapitre 13 :	Moteurs à courant continu
Chapitre 14 :	Transformateurs
Chapitre 15 :	Eclairage

FET
Fédération des Ecoles techniques



Sommaire

1.	Notions fondamentales	
1.1	Qu'est-ce que l'électricité?	1.1
1.1.1	Structure de l'atome	1.1
1.1.2	Charges et forces agissant dans l'atome	1.1
1.1.3	Les ions	1.2
1.1.4	Formation d'électrons libres	1.2
1.2	Nature de l'électricité	1.3
1.2.1	Conduction électrique	1.3
1.2.2	Source de tension	1.3
1.2.3	Vitesse de déplacement des électrons libres	1.3
1.2.4	Sens du courant électrique	1.4
1.2.5	Différence de potentiel (ddp)	1.4
1.2.6	Les isolants	1.5
1.2.7	Les conducteurs électriques	1.5
1.2.8	Les semi-conducteurs	1.5
1.3	Effets du courant électrique	1.6
1.3.1	Effet calorifique	1.6
1.3.2	Effet magnétique	1.6
1.3.3	Effet chimique	1.7
1.3.4	Effet lumineux	1.7
1.3.5	Effet piézo-électrique	1.7
1.3.6	Effet électrostatique	1.8
1.3.7	Effet physiologique	1.8
1.4	Genre de courant	1.9
1.4.1	Courant continu	1.9
1.4.2	Courant alternatif	1.10
1.5	Production d'électricité	1.11
1.5.1	Par échauffement	1.11
1.5.2	Par induction magnétique	1.11
1.5.3	Par transformation chimique	1.11
1.5.4	Par la lumière	1.12
1.5.5	Par pression	1.12
1.5.6	Par friction	1.12
1.6	Exercices	1.13



2.	Grandeurs fondamentales	
2.1	Courant	2.1
2.2	Tension	2.3
2.3	Résistance	2.5
2.4	Loi d'Ohm	2.6
2.5	Exercices	2.8
3.	Résistance électrique - Couplages	
3.1	Résistivité	3.1
3.2	Résistance d'un conducteur	3.2
3.3	Couplages des résistances	3.4
3.3.1	Résistance équivalente	3.4
3.3.2	Couplage série	3.4
3.3.3	Différence entre potentiel et tension	3.8
3.3.4	Applications	3.9
	1) Résistance additionnelle	3.9
	2) Augmentation de l'étendue de mesure d'un voltmètre	3.9
	3) Chute de tension en ligne et résistance de ligne	3.11
3.3.5	Couplage parallèle	3.15
3.3.6	Applications	3.19
	1) Raccordement des récepteurs sur le réseau	3.19
	2) Augmentation de l'étendue de mesure d'un ampèremètre	3.20
3.3.7	Couplage mixte	3.21
3.3.8	Applications	3.24
	1) Diviseur de tension	3.24
	2) Potentiomètre	3.25
	3) Couplage en pont appelé pont de Wheatstone	3.29
3.4	Exercices	3.36



4.	Energie - Puissance - Rendement	
4.1	Masse	4.1
4.2	Force	4.2
4.3	Force de pesanteur	4.3
4.4	Energie	4.5
4.5	Energie mécanique ou travail	4.7
4.6	Puissance mécanique	4.10
4.7	Energie électrique	4.11
4.7.1	Mesure de l'énergie	4.12
4.8	Puissance électrique	4.13
4.8.1	Mesure de la puissance	4.15
4.9	Rendement	4.16
4.9.1	Rendement d'un groupe de machines	4.18
4.10	Exercices	4.19
5.	Effets calorifiques du courant	
5.1	Production de chaleur par l'énergie électrique	5.1
5.1.1	Quantité de chaleur fournie par un corps de chauffe	5.1
5.2	Energie calorifique fournie à un corps	5.2
5.2.1	Chaleur massique	5.2
5.2.2	Augmentation de température	5.2
5.2.3	Quantité de chaleur utile	5.3
5.3	Energie perdue par un appareil thermique ..	5.4
5.3.1	Rendement d'un appareil thermique	5.4
5.4	Inconvénients de l'effet Joule	5.5
5.4.1	Pertes dans les conducteurs	5.5
5.4.2	Densité de courant	5.6
5.5	Effets thermiques sur les résistances	5.7
5.5.1	Coefficient de température des résistances ...	5.7
5.5.2	Variation de la résistance avec la température	5.8
5.6	Exercices	5.9



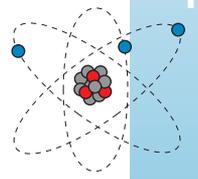
6.	Sources chimiques de tension	
6.1	Piles et accumulateurs: définitions	6.1
6.1.1	Système primaire	6.1
6.1.2	Système secondaire	6.1
6.1.3	Élément	6.1
6.1.4	Batterie	6.1
6.1.5	Capacité	6.1
6.1.6	Oxydoréduction	6.1
6.1.7	Force électromotrice	6.2
6.1.8	Quantité d'électricité	6.4
6.2	Piles	6.5
6.2.1	Généralités	6.5
6.2.2	Pile saline	6.6
6.2.3	Pile alcaline	6.6
6.2.4	Pile argent-zinc	6.7
6.2.5	Pile zinc-air	6.7
6.2.6	Pile lithium	6.7
6.2.7	Tableau comparatif des piles courantes	6.8
6.2.8	Caractéristiques de décharge	6.9
6.2.9	Normalisation et définition des piles	6.10
6.3	Accumulateurs	6.12
6.3.1	Généralités	6.12
6.3.2	Accumulateur au plomb	6.12
6.3.3	Accumulateur alcalin Ni-Cd	6.15
6.3.4	Accumulateurs et directives RoHS	6.16
6.3.5	Accumulateur alcalin Ni-MH	6.16
6.3.6	Accumulateur au lithium	6.17
6.3.7	Précautions lors de l'emploi d'accumulateurs	6.18
6.3.8	Charge et décharge des accumulateurs	6.19
6.3.9	Charge et décharge des accumulateurs au plomb	6.19
6.3.10	Charge et décharge des accumulateurs Ni-Cd et Ni-MH	6.20
6.3.11	Charge et décharge des accumulateurs au lithium	6.21
6.3.	Tableau comparatif des accumulateurs courants	6.22
6.4	Couplages des générateurs chimiques	6.23
6.4.1	Couplage série	6.23
6.4.2	Couplage parallèle	6.25
6.5	Élimination des piles et accumulateurs	6.27
6.6	Source de tension continue	6.27
6.7	Exercices	6.28



Réponses aux exercices R.1

Annexes

Symboles	A.1
Codage de la valeur des résistances	A.3
Codage de la valeur des condensateurs	A.4
Marquage des résistances CMS	A.5
Séries normalisées	A.6

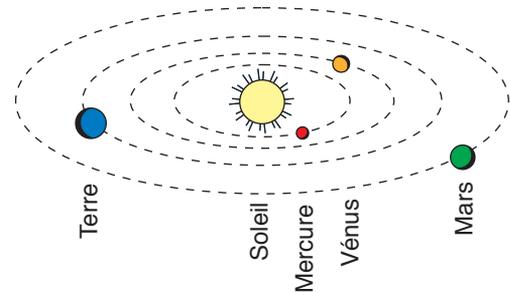


1.1 Qu'est-ce que l'électricité?

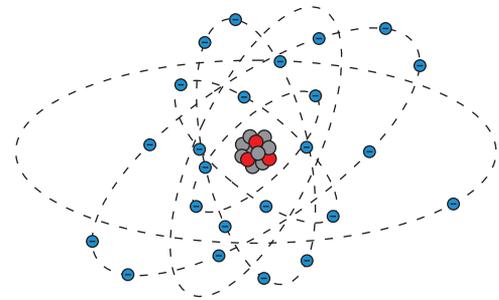
L'électricité est une forme d'énergie invisible, mais nous percevons ses effets dans son utilisation quotidienne.

1.1.1 Structure de l'atome

La physique nous enseigne que tous les corps sont composés de particules très petites appelées : les atomes. L'atome a un diamètre d'environ 100 pm. Chaque atome pourrait être comparé à une sorte de système solaire en miniature constitué par un noyau environ dix mille fois plus petit que l'atome. Autour de ce noyau tournent, sur des orbites différentes, les électrons.



Les électrons gravitent autour du noyau à la manière des planètes autour du soleil.



1.1.2 Charges et forces agissant dans l'atome

Les électrons et le noyau de l'atome s'attirent mutuellement, les électrons se repoussent les uns les autres. Ces phénomènes obéissent aux lois suivantes :

- les charges de même polarité se repoussent ;
- les charges de polarité différente s'attirent.

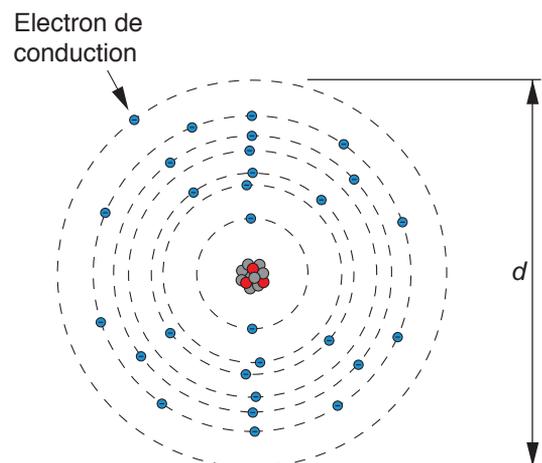
Le noyau de l'atome est composé de particules chargées positivement, les protons, et de particules non chargées, les neutrons.

Les électrons sont des particules de charge négative, ce sont les charges élémentaires d'électricité. A l'état naturel, l'atome est électriquement neutre, il comporte autant d'électrons que de protons.

Le modèle d'atome de cuivre d'après M. Bohr, est représenté en plan.

Vingt-neuf électrons gravitent sur des orbites différentes autour du noyau de l'atome de cuivre. L'électron isolé de la couche externe est l'électron de conduction.

Le diamètre d de l'atome est si petit que sur une longueur de 1 mm, 3 millions environ d'atomes pourraient prendre place les uns à côté des autres.

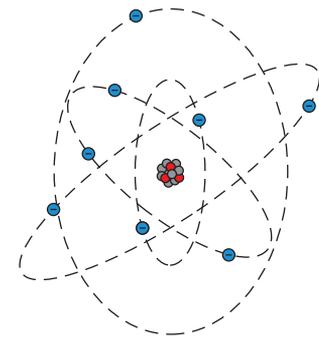


1.1.3 Les ions

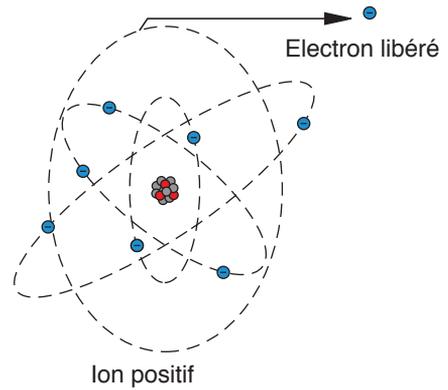
Si l'atome perd ou acquiert des électrons, il devient un ion. Le passage d'un atome à l'état de ion est le phénomène de ionisation qui est à l'origine de tout courant électrique.

Il est dit ion positif ou cation s'il a perdu un ou plusieurs électrons.

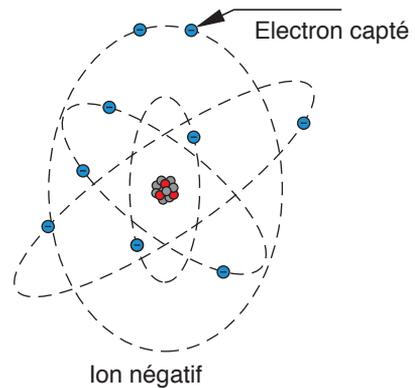
Il est dit ion négatif ou anion s'il a acquis un ou plusieurs électrons.



Atome électriquement neutre



Ion positif

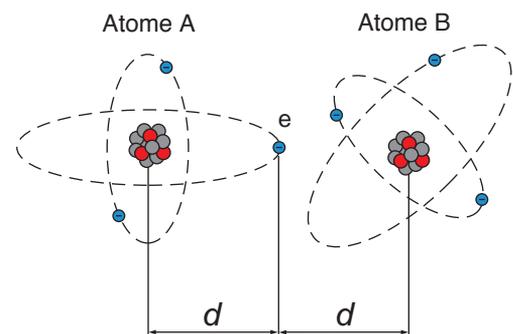


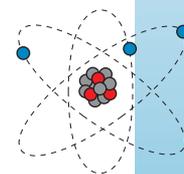
Ion négatif

1.1.4 Formation d'électrons libres

Dans les métaux, la structure atomique est très dense. Un électron d'un atome A peut se trouver à la même distance d du noyau d'un atome B que de son propre noyau. L'électron e est attiré avec la même force par les deux noyaux. Un tel électron est appelé électron libre.

Seuls les électrons situés sur la dernière couche électronique des atomes parviennent à se libérer de l'attraction des noyaux. Ils peuvent alors sauter en permanence d'un atome à l'autre, dans tous les sens.

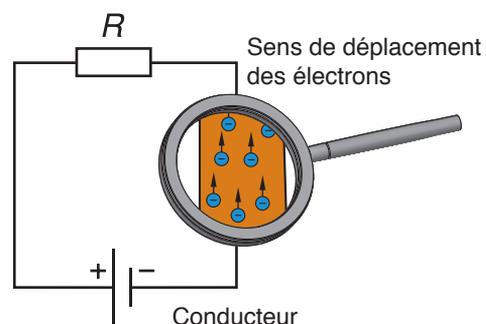




1.2 Nature de l'électricité

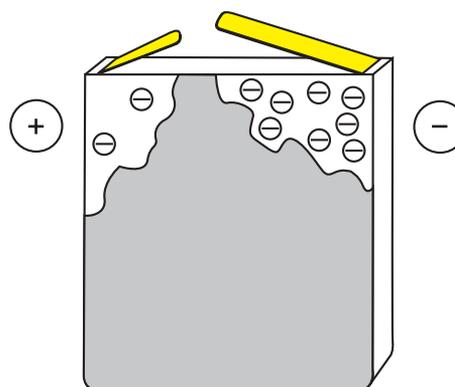
1.2.1 Conduction électrique

Si l'on réunit une borne négative (excès d'électrons) à une borne positive (manque d'électrons) par un conducteur électrique, les électrons se déplacent dans le conducteur de la borne négative vers la borne positive. Le mouvement d'électrons qui vient d'être décrit est appelé courant électrique.



1.2.2 Source de tension

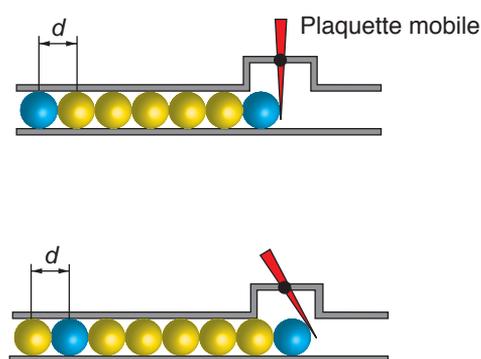
Une source de tension est un dispositif qui, dans une borne, crée un excès d'électrons et, dans une autre, un manque d'électrons. Le rôle de ce générateur est très exactement celui d'une pompe: il aspire les électrons extérieurs par son pôle positif et les refoule intérieurement vers son pôle négatif.



1.2.3 Vitesse de déplacement des électrons libres

La vitesse des électrons dans un conducteur est très lente: quelques millimètres par seconde. Lorsqu'on actionne l'interrupteur d'une lampe, celle-ci s'allume instantanément, indépendamment de la longueur de la ligne d'alimentation. Les électrons libres se repoussent mutuellement; ainsi tous les électrons libres dans le conducteur sont mis en mouvement en même temps. Le «courant» se propage alors à une vitesse proche de celle de la lumière (300 000 km/s). Toutefois, seule la «mise en mouvement» s'est propagée comme une onde.

Comparons les électrons à des billes placées dans un tube; si l'on introduit une nouvelle bille dans le tube, chaque bille avance de la distance d mais la dernière actionne instantanément la plaquette mobile. Tout se passe comme si la bille de gauche s'était subitement retrouvée à droite. En réalité, seule l'influence de la première bille s'est propagée rapidement, comme une onde.

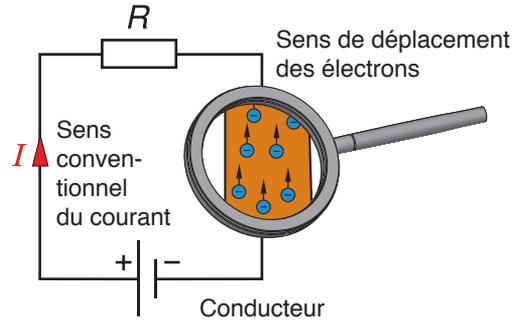


1.2.4 Sens du courant électrique

Comme déjà mentionné, les électrons libres se déplacent dans un circuit fermé, de la borne négative à la borne positive. Le sens réel (électronique) est donc celui des électrons.

Cependant, alors que la nature du courant électrique était encore inconnue, on a fixé le sens du courant de manière inverse.

Le sens conventionnel du courant dans un récepteur va du pôle positif (+) au pôle négatif (-).



1.2.5 Différence de potentiel (ddp)

La borne négative et la borne positive présentent des états de charge électrique différents. Il existe donc entre elles une différence de potentiel (ou pression d'électrons) qui a tendance à s'équilibrer; plus la différence de potentiel entre ces deux bornes est grande, plus la tension est élevée.

Différence de potentiel $\hat{=}$ Tension.

Pour qu'un courant électrique se manifeste, il faut qu'il existe une source de tension, un récepteur et que le circuit soit fermé par des conducteurs.

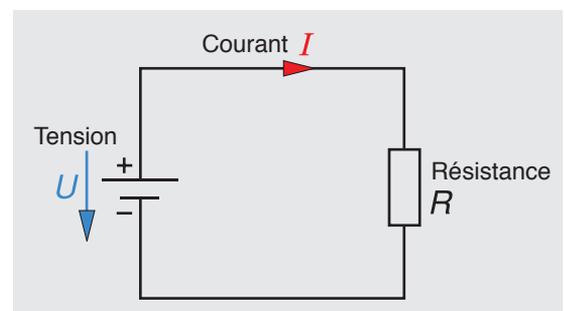
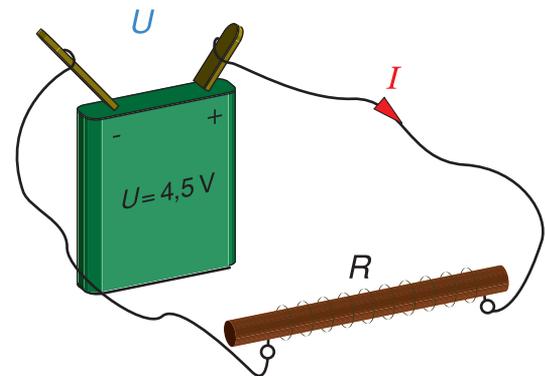
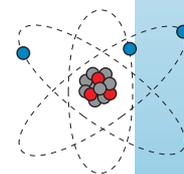


Schéma électrique équivalent



1.2.6 Les isolants

Ce sont des corps dans lesquels les électrons ne peuvent pas, ou alors très difficilement, passer d'un atome à l'autre. Il n'y a pratiquement pas d'électrons libres.

Exemples

- l'air ;
- le caoutchouc ;
- la porcelaine ;
- le papier ;
- le verre ;
- les matières synthétiques.



Isolateur en porcelaine pour ligne aérienne

1.2.7 Les conducteurs électriques

Ce sont des corps qui contiennent beaucoup d'électrons libres. La résistance électrique d'un corps dépend donc de la quantité d'électrons libres et de la mobilité de ces derniers.

Exemples

- le cuivre ;
- l'aluminium ;
- l'argent ;
- l'or ;
- le laiton ;
- l'étain.



Câble électrique avec conducteurs en cuivre

1.2.8 Les semi-conducteurs

Ce sont des matières qui ne comportent que peu d'électrons libres. Ils sont mauvais conducteurs de même que mauvais isolants. Les matières utilisées dans la production des semi-conducteurs ont pris une grande importance en électronique.

Exemples

- le silicium ;
- le germanium.



Transistor au silicium

1.3 Effets du courant électrique

Le passage du courant électrique au travers des récepteurs provoque divers effets.

1.3.1 Effet calorifique

L'augmentation du mouvement des électrons due au passage du courant dans un conducteur engendre plus de frottement entre ces électrons et les atomes, ce qui provoque un dégagement de chaleur.

Applications

- appareils de chauffage ;
- lampes à incandescence ;
- soudure électrique ;
- fusibles.

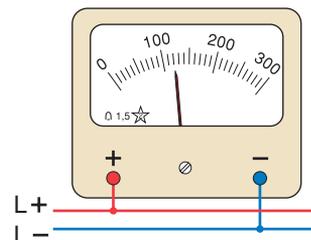
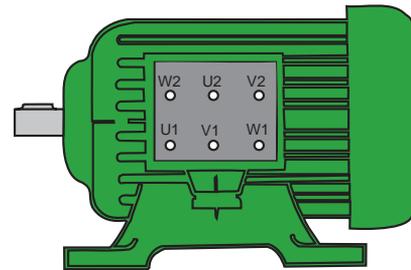


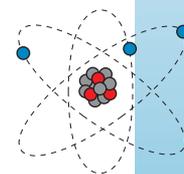
1.3.2 Effet magnétique

L'aiguille d'une boussole pivote à proximité immédiate d'un conducteur parcouru par un courant et revient en position initiale à la suppression du courant.

Applications

- moteurs ;
- relais ;
- électro-aimants ;
- sonneries ;
- instruments de mesures.



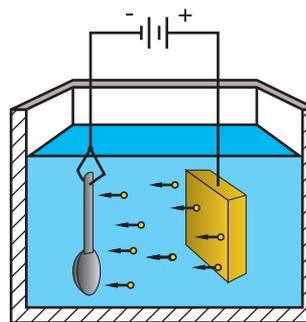


1.3.3 Effet chimique

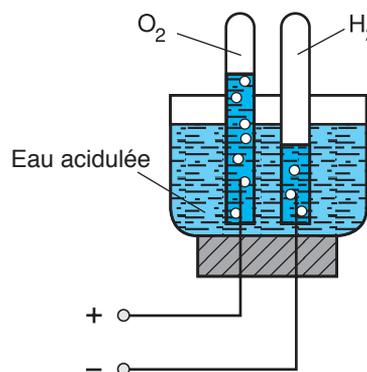
Si on applique une tension continue à deux électrodes plongées dans de l'eau acidulée, un courant circule entre les électrodes à travers l'eau. Les ions présents dans le liquide permettent le transfert des charges électriques. Ce phénomène est appelé électrolyse, ce qui correspond à une séparation des constituants.

Applications

- raffinage de métaux ;
- traitement de surface ;
- charge d'accumulateurs ;
- électrolyse de l'eau.



Traitement de surface



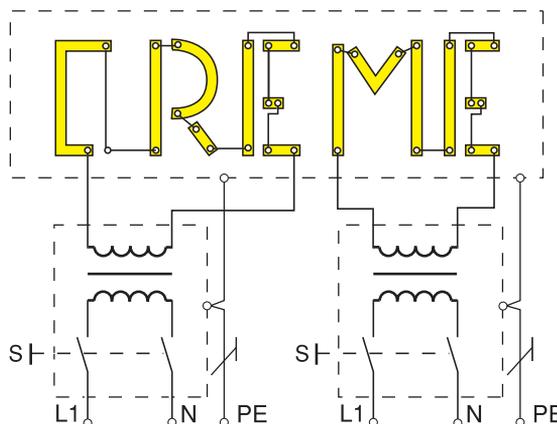
Electrolyse de l'eau

1.3.4 Effet lumineux

Des tubes remplis de gaz, dans des conditions déterminées, émettent de la lumière lorsqu'ils sont alimentés sous une tension électrique.

Applications

- tubes luminescents ;
- lampes à haute pression.



Enseigne haute-tension à tubes luminescents

1.3.5 Effet piézo-électrique

Si l'on soumet un cristal à un champ électrique, il va transformer l'énergie reçue en énergie mécanique.

Applications

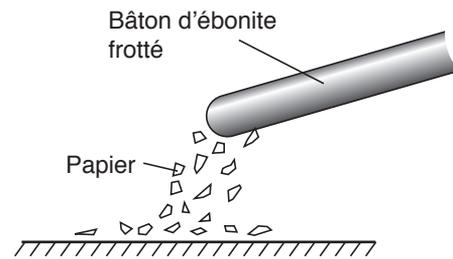
- sonneries électroniques ;
- montres à quartz ;
- systèmes de nettoyage à ultrasons.

1.3.6 Effet électrostatique

Des particules légères en présence d'un champ électrique sont soumises à des forces provoquant leur déplacement.

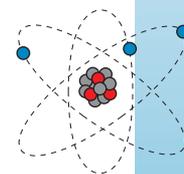
Applications

- dépôt de poudres ou de gouttelettes de peinture, par procédé électrostatique;
- filtres à poussière;
- fabrication de papier de verre.



1.3.7 Effet physiologique

Le courant électrique traversant le corps humain provoque des contractions musculaires (effet téтанisant), la fibrillation ventriculaire, les brûlures des tissus et la décomposition des liquides vitaux (effet chimique). Ces effets peuvent être amplifiés par un stress précédant l'accident.



1.4 Genre de courant

1.4.1 Courant continu

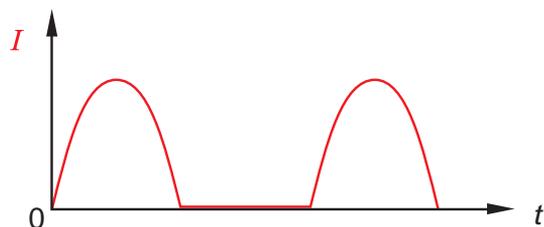
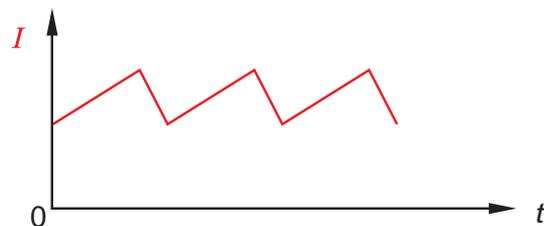
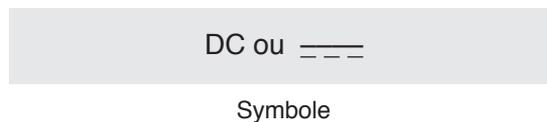
On nomme courant continu, un courant qui dans un conducteur va toujours dans le même sens. Toutes les sources de tension électrochimiques fournissent du courant continu.

Si le courant change de valeur sans changer de sens, périodiquement ou non, on parlera de courant continu pulsé.

Les piles, les accumulateurs, les cellules photovoltaïques et les dynamos sont des générateurs de courant continu.

Applications

- la technique du courant faible ;
- l'électronique ;
- l'électrotechnique dans l'automobile ;
- l'électrochimie.



Piles (non rechargeables)



Accumulateur (rechargeable)

1.4.2 Courant alternatif

Si le courant dans le conducteur change de sens on parle de courant alternatif.

Cette appellation s'applique aussi bien à un courant de forme quelconque que sinusoïdale.

On appelle fréquence du courant alternatif, le nombre de périodes par seconde.

En Europe, la période du courant alternatif du réseau est de 20 ms, ce qui correspond à une fréquence de 50 Hz. Sa valeur moyenne est nulle.

Les alternateurs triphasés et monophasés sont des générateurs de courant alternatif.

Applications

Les centrales électriques sont toutes équipées d'alternateurs. L'alternateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

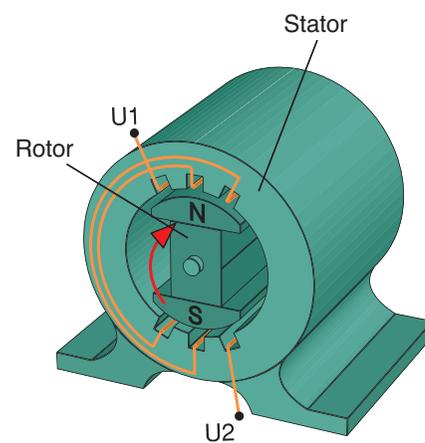
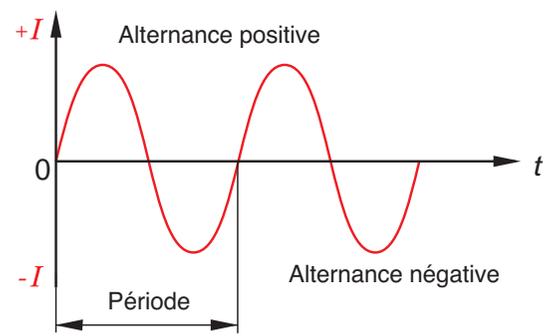
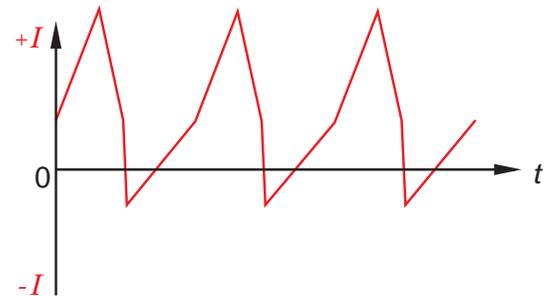
De plus, le courant alternatif peut être facilement modifié par un transformateur.

On utilise donc le courant alternatif pour :

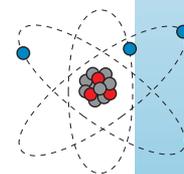
- le transport et la distribution de l'énergie électrique ;
- les appareils électriques domestiques et industriels.

AC ou \sim

Symbole



Alternateur monophasé



1.5 Production d'électricité

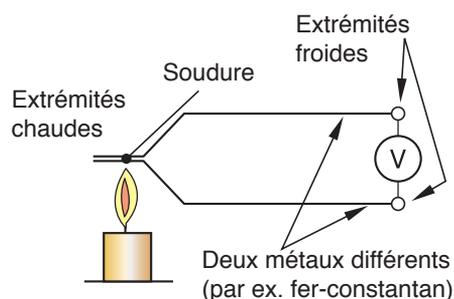
L'électricité est issue d'une transformation d'énergie. Les exploitants des centrales parlent cependant de «production» d'énergie électrique.

1.5.1 Par échauffement

Si l'on chauffe le point de soudure de deux métaux différents, une différence de potentiel (quelques millivolts) apparaît entre les extrémités libres des fils qui sont restées froides.

Applications

- thermocouples;
- mesure de température;
- contrôle de la flamme des chauffages à gaz.

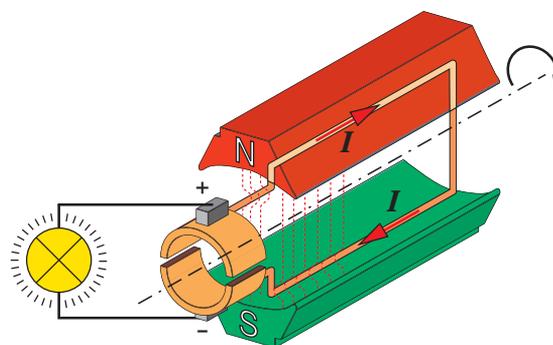


1.5.2 Par induction magnétique

Une spire, en rotation sur son axe, placée dans un champ magnétique est le siège d'une tension induite (quelques volts).

Applications

- alternateurs (AC);
- dynamos (DC).



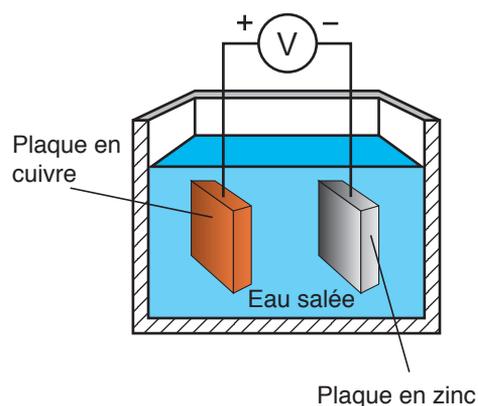
1.5.3 Par transformation chimique

Deux métaux de nature différente plongés dans un électrolyte (p.ex.: eau salée), provoquent un déplacement d'ions entre les deux électrodes.

On mesure ainsi une tension aux bornes des électrodes (quelques volts).

Applications

- piles;
- accumulateurs.



1.5.4 Par la lumière

Lorsque de la lumière atteint une matière semi-conductrice, il en résulte une tension électrique aux bornes de ce semi-conducteur (de 10 à 20 volts par panneau).

Application

- cellules photovoltaïques.

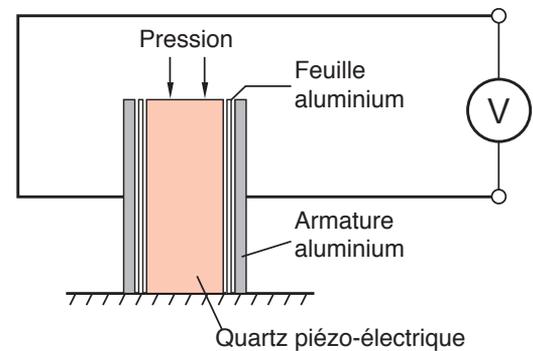


1.5.5 Par pression

Une pression exercée sur un quartz génère à ses bornes une tension (quelques kilovolts). Ce principe est appelé piézo-électrique.

Applications

- microphones ;
- briquets à quartz ;
- tourne-disques à aiguille.



1.5.6 Par friction

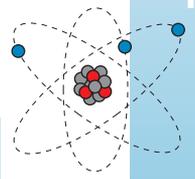
Le frottement de deux corps l'un contre l'autre provoque la séparation des charges électriques positive et négative, d'où l'apparition d'une tension (de plusieurs kilovolts à plusieurs centaines de kilovolts). C'est un phénomène électrostatique.

Applications

- décharges électrostatiques ;
- orages atmosphériques ;
- surface extérieure du tube cathodique des anciens téléviseurs



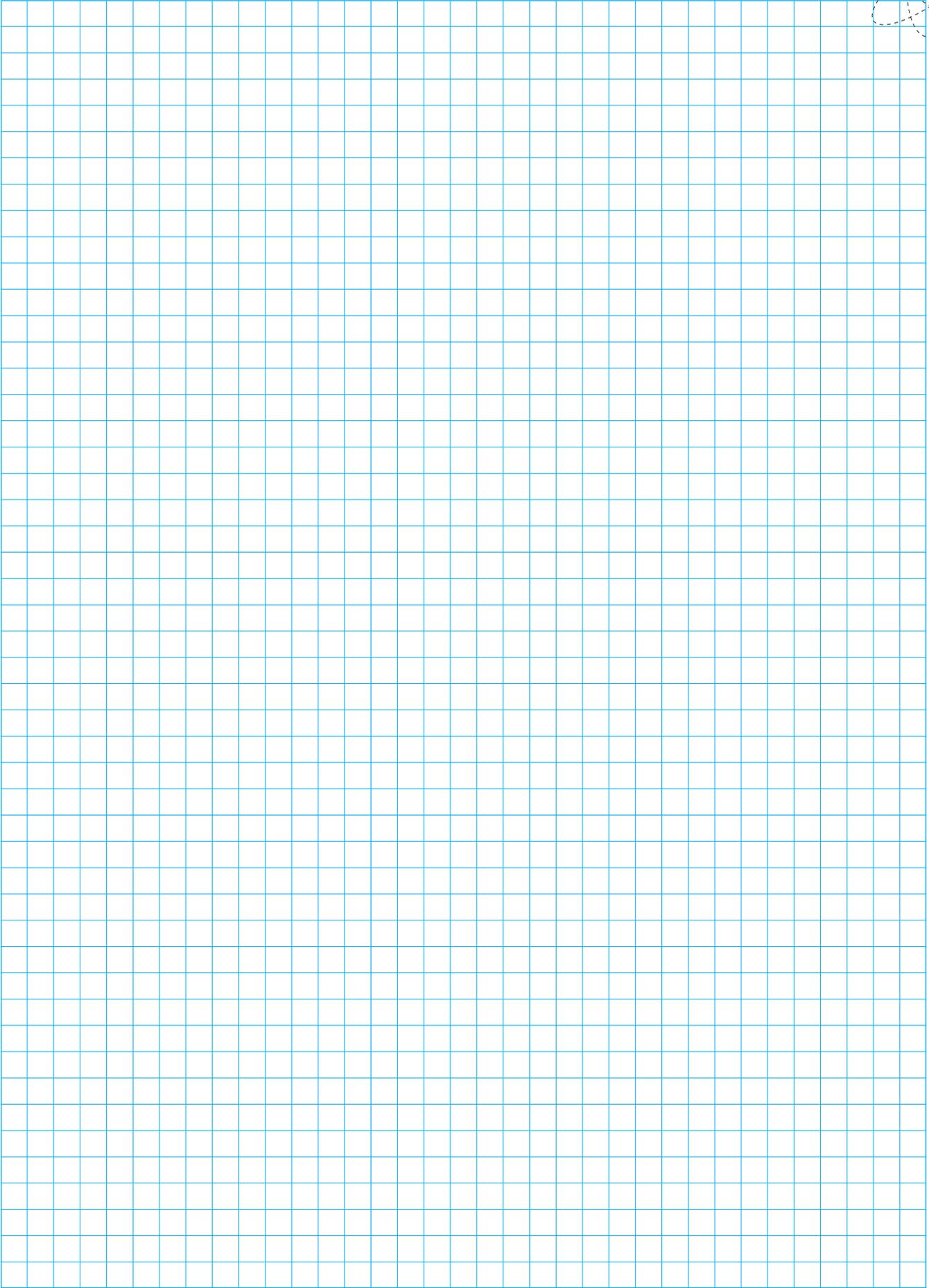
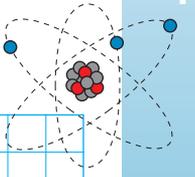
1.6 Exercices

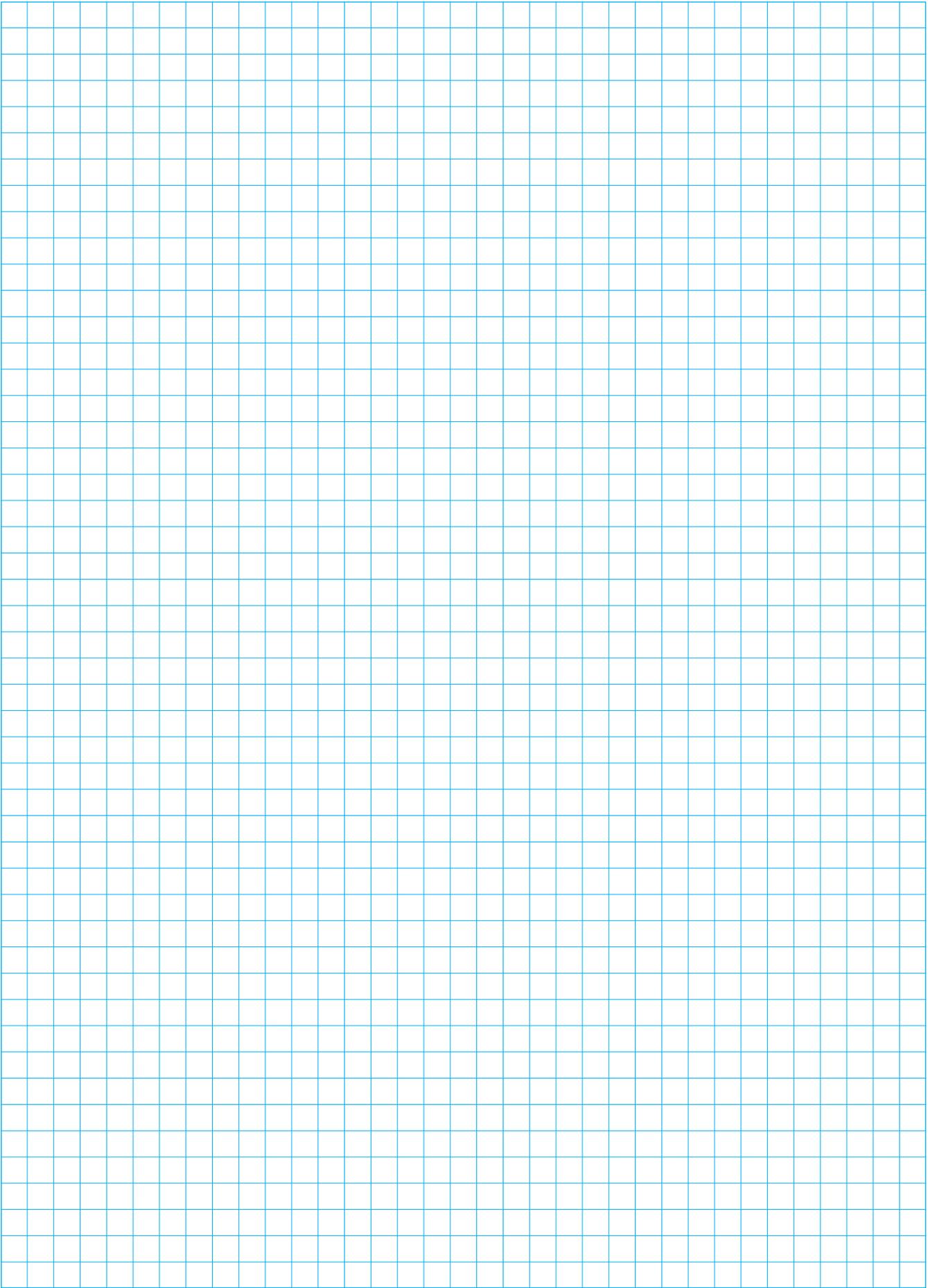


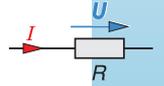
1. Qu'est-ce que l'électricité ?
2. De quoi se compose un atome ?
3. Qu'appelle-t-on un ion ?
4. Depuis quand transforme-t-on et utilise-t-on industriellement l'énergie électrique ?
5. Quels sont les avantages de cette forme d'énergie ? A-t-elle des inconvénients ?
6. Citer 3 appareils qui ne fonctionnent qu'avec du courant électrique.
7. Un atome de cuivre possède 29 protons et 35 neutrons. Combien possède-t-il d'électrons ?
8. Quels sont les électrons susceptibles de passer d'un atome à l'autre ?
9. Quel est le sens de déplacement des électrons dans un conducteur et pourquoi ?
10. Qu'appelle-t-on source de tension ?
11. Que se passe-t-il lorsque l'on ferme un circuit alimenté par une source de tension ?
12. Dessiner un circuit électrique fermé, composé d'une pile, d'une résistance et de conducteurs, et indiquer le sens conventionnel du courant.
13. Comment expliquer que le courant (ou l'ordre électrique) se propage à une vitesse proche de celle de la lumière, alors que le déplacement des électrons dans les conducteurs n'est que de quelques millimètres par seconde ?
14. Pourquoi n'a-t-on pas fixé le sens conventionnel du courant dans le sens de déplacement des électrons ?
15. Qu'appelle-t-on une différence de potentiel ?
16. Quelles sont les conditions pour qu'un courant électrique s'établisse ?
17. Quelle est la caractéristique des conducteurs électriques ?



18. Citer quelques exemples d'isolants, de conducteurs électriques et de semi-conducteurs.
19. Comment peut-on déceler le passage du courant électrique ?
20. Citer les principaux effets du courant électrique et donner chaque fois un ou deux exemples pratiques.
21. Quels sont les dangers de l'électricité ?
22. Que désigne le symbole DC ? D'où vient cette abréviation ?
23. Quelles sont les sources qui fournissent du courant continu ?
24. Citer deux récepteurs fonctionnant en courant continu.
25. Que désigne le symbole AC ? D'où vient cette abréviation ?
26. Quelles sont les sources qui fournissent du courant alternatif ?
27. Citer deux récepteurs fonctionnant en courant alternatif.
28. Citer deux façons de produire l'électricité.







2.1 Courant

Le courant électrique est caractérisé par un déplacement d'électrons libres dans des corps plus ou moins bons conducteurs. Les électrons sont des charges électriques négatives qui peuvent se déplacer dans la matière.

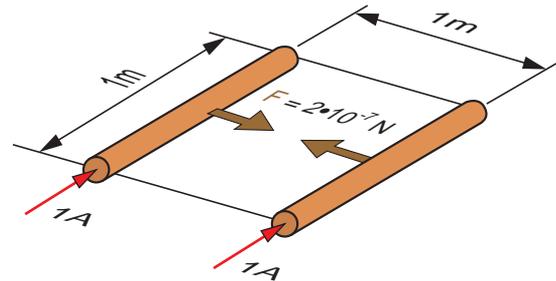
Lorsqu'il passe $6,24 \cdot 10^{18}$ électrons par seconde, l'intensité du courant est de un ampère.

Définition de la grandeur

L'intensité du courant représente une certaine quantité d'électricité qui passe chaque seconde dans un circuit électrique fermé.

Définition de l'unité

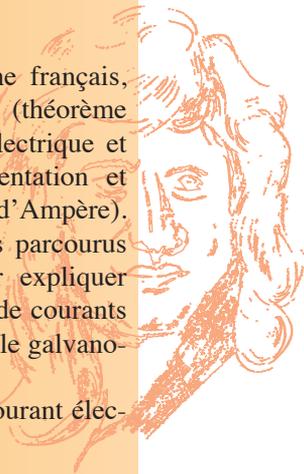
L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles et rectilignes, de longueur infinie et de section circulaire négligeable, placés à un mètre l'un de l'autre dans le vide, produit entre ces deux conducteurs une force de $2 \cdot 10^{-7}$ newton par mètre de longueur.



L'intensité du courant I s'exprime en ampères [A]

Ampère André-Marie, 1775-1836.

Physicien, chimiste, mathématicien et philosophe français, il est un des fondateurs de l'électromagnétisme (théorème d'Ampère). Il introduisit la notion de courant électrique et établit la relation mathématique donnant l'orientation et l'intensité du champ créé par ce courant (règle d'Ampère). Il détermina la force magnétique entre deux fils parcourus par des courants (expérience d'Ampère). Pour expliquer l'aimantation permanente, il proposa l'existence de courants microscopiques dans la matière. On lui doit aussi le galvanomètre, le télégraphe électrique et le solénoïde. On a donné son nom à l'unité de l'intensité du courant électrique.



Valeurs usuelles

Lampe à incandescence	: inférieur à 1 A
Fer à repasser	: environ 5 A
Radiateur mobile	: environ 10 A
Machine à laver la vaisselle	: environ 3×10 A
Cuisinière 4 plaques et four	: environ 3×15 A
Ascenseur	: environ 3×20 A
Fusibles normalisés	: 6 A, 10 A, 16 A, 25 A

Multiples et sous-multiples

$$1 \text{ kA} = 1000 \text{ A} = 1 \cdot 10^3 \text{ A}$$

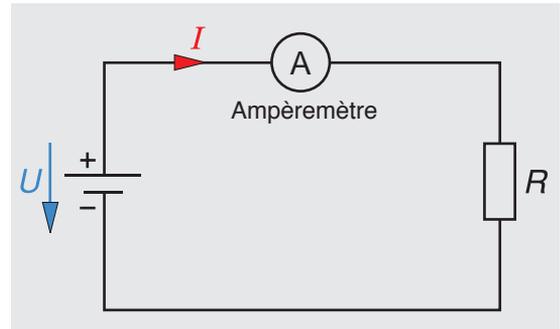
$$1 \text{ A} = 0,001 \text{ kA} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ kA} = 1000 \text{ mA} = 1 \cdot 10^3 \text{ mA}$$

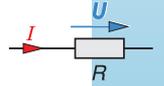
$$1 \text{ mA} = 0,001 \text{ A} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

$$1 \text{ } \mu\text{A} = 0,000001 \text{ A} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

Mesure de l'intensité du courant

L'intensité du courant se mesure avec un ampèremètre. Pour effectuer la mesure, il faut interrompre le circuit pour insérer l'ampèremètre en série dans le circuit.

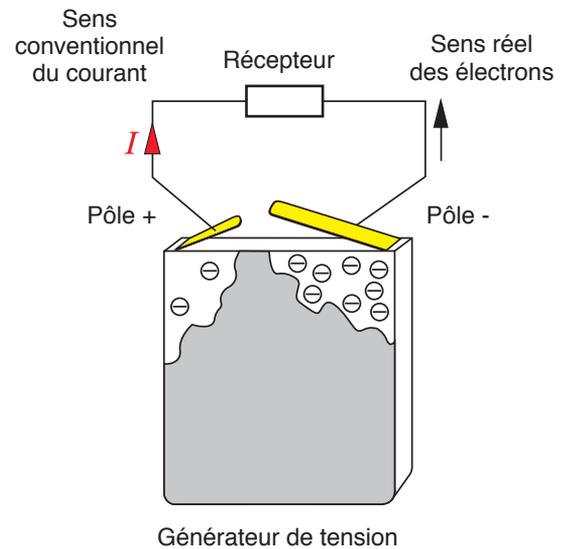




2.2 Tension

Pour mettre en mouvement les électrons dans un circuit électrique, il faut que celui-ci soit fermé et qu'une pression soit exercée sur les électrons.

Cette pression électrique est appelée tension. Elle est caractérisée par une différence de potentiel, c'est-à-dire par un excédent d'électrons sur l'un des pôles du générateur et un manque sur l'autre.



Définition de la grandeur

La tension représente une différence de potentiel entre deux points d'un circuit.

Définition de l'unité

Le volt est la tension qu'il faut pour faire passer un courant de un ampère dans une résistance de un ohm.

La tension U s'exprime en volts [V]

Volta Alessandro, 1745-1827.

Physicien italien. Il multiplia les découvertes dans les domaines de l'électricité et des gaz. Il s'intéressa particulièrement à l'électricité organique, à la suite des travaux de Galvani. Il mit au point, en 1800, la première pile électrique. Il créa ou perfectionna de nombreux appareils, dont le condensateur et l'électromètre.

L'unité de la tension électrique est dérivée de son nom.



Valeurs usuelles

Très basse tension de sécurité	TBTS : < 50 V, avec transformateur de séparation
Basse tension	BT : de 50 à 1000 V
Haute tension	HT : > 1000 V
Élément de pile « Leclanché »	: 1,5 V
Réseau de distribution	: 230 / 400 V
CFF	: 15 kV
Transport d'énergie	: 6 à 380 kV
Transports publics	: 600 V à 3000 V (DC) et 11 000 V à 25 000 V (AC)

Multiples et sous-multiples

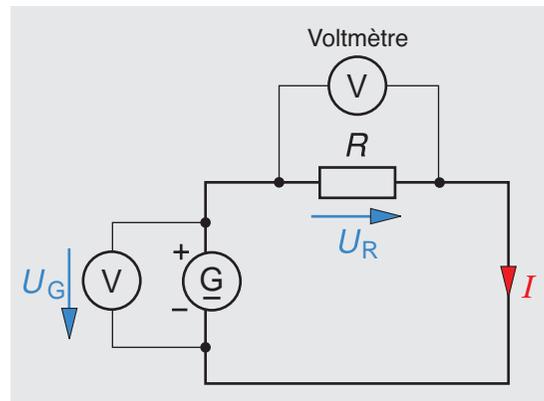
$$1 \text{ kV} = 1000 \text{ V} = 1 \cdot 10^3 \text{ V}$$

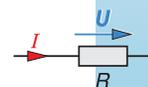
$$1 \text{ V} = 1000 \text{ mV} = 1 \cdot 10^3 \text{ mV} = 0,001 \text{ kV} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ kV}$$

$$1 \text{ mV} = 0,001 \text{ V} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ V}$$

Mesure de la tension

La tension se mesure avec un voltmètre branché en parallèle sur le générateur ou aux bornes d'un appareil.





2.3 Résistance

Tout matériau traversé par un courant présente de la résistance.

Dans un circuit, le récepteur présente une grande résistance vis-à-vis des conducteurs. Les conducteurs doivent avoir la plus petite résistance possible.

Définition de la grandeur

La résistance représente l'opposition plus ou moins grande que font les corps au passage du courant.

Définition de l'unité

L'ohm est la résistance entre deux points d'un circuit, lorsqu'une tension constante de un volt appliquée entre ces deux points produit un courant de un ampère.



Symbole de la résistance

La résistance R s'exprime en ohms [Ω]

Ohm Georg Simon, 1789-1854.

Physicien allemand, professeur à Berlin, Nuremberg puis Munich. Il a établi, en 1827, la loi fondamentale des courants électriques. Il introduit une terminologie scientifique dans les phénomènes d'électrocinétique, comparant le courant électrique à un débit liquide, la différence de potentiel à une différence de niveau, et définissant de façon précise la quantité d'électricité, le courant électrique et la force électromotrice. On a donné son nom à l'unité de la résistance électrique.



Valeurs usuelles

85,7 m de fil de Cu de 1,5 mm² : 1 Ω
 Lampe 230 V – 100 W : 529 Ω
 Radiateur 230 V – 1000 W : 52,9 Ω
 100 m de fil de Cu de 2,5 mm² : 0,7 Ω

Multiples et sous-multiples

1 M Ω = 1 000 000 Ω = 1 · 10⁶ Ω
 1 k Ω = 1000 Ω = 1 · 10³ Ω
 1 m Ω = 0,001 Ω = 1 · 10⁻³ Ω

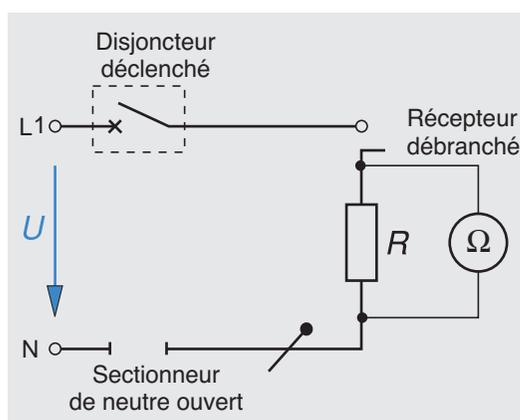
Mesure de la résistance

La résistance se mesure avec un ohmmètre ou un pont de Wheatstone (p. 3.22 et 9.16). On peut aussi la déterminer par la loi d'ohm en ayant mesuré la tension aux bornes de la résistance et l'intensité qui la traverse.

L'ohmmètre se branche aux bornes du récepteur.

La résistance à mesurer ne doit pas se trouver sous tension lors de l'emploi de l'ohmmètre. De plus, il ne faut pas que la mesure soit faussée par d'autres résistances placées sur le même circuit.

Il faut donc débrancher le récepteur pour mesurer sa résistance.



2.4 Loi d'Ohm

La loi d'Ohm est la loi qui régit les relations entre les trois grandeurs que nous venons d'étudier, soit la tension U , la résistance R et l'intensité du courant I .

Énoncé de la loi

Dans un circuit fermé, la tension fait circuler un courant proportionnel à cette tension et inversement proportionnel à la résistance du circuit.

Pour une résistance donnée, une variation de tension provoque une variation de l'intensité du courant.

Remarque

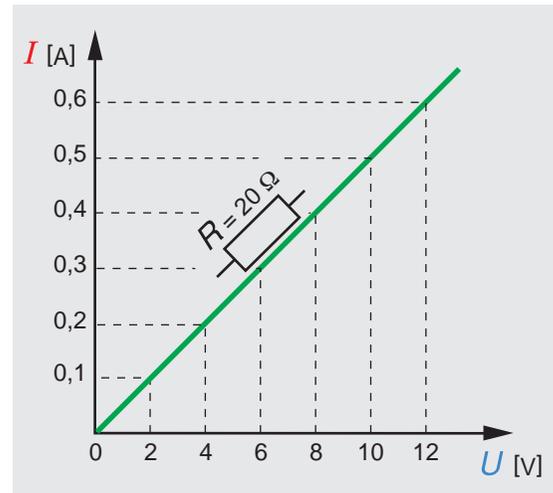
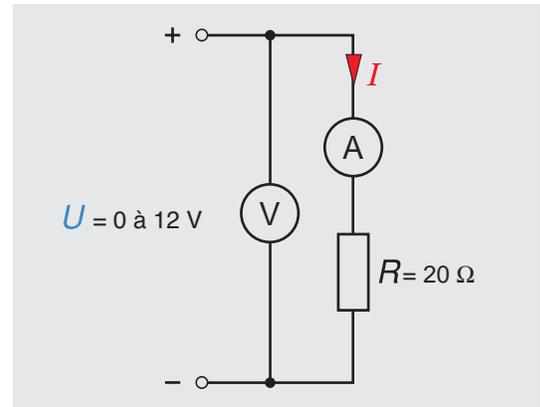
Pour un circuit donné, les grandeurs variables sont la tension et l'intensité du courant, seule la résistance peut être admise constante.

Formule

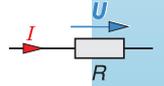
I intensité du courant en ampères [A]

U tension en volts [V]

R résistance en ohms [Ω]



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

**Exemple 1**

Calculer l'intensité du courant qui circule dans une résistance de 45Ω alimentée sous une tension de 230 V.

$$\text{Intensité du courant : } I = \frac{U}{R} = \frac{230}{45} = \mathbf{5,11 \text{ A}}$$

Exemple 2

Sous quelle tension est alimentée une lampe qui est parcourue par un courant de 430 mA et dont la résistance est de 529Ω ?

$$430 \text{ mA} \hat{=} 0,43 \text{ A}$$

$$\text{Tension : } U = R \cdot I = 529 \cdot 0,43 = \mathbf{227 \text{ V}}$$

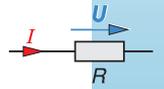
Exemple 3

Quelle est la résistance d'une plaque de cuisinière qui est parcourue par un courant de 4 A sous 400 V ?

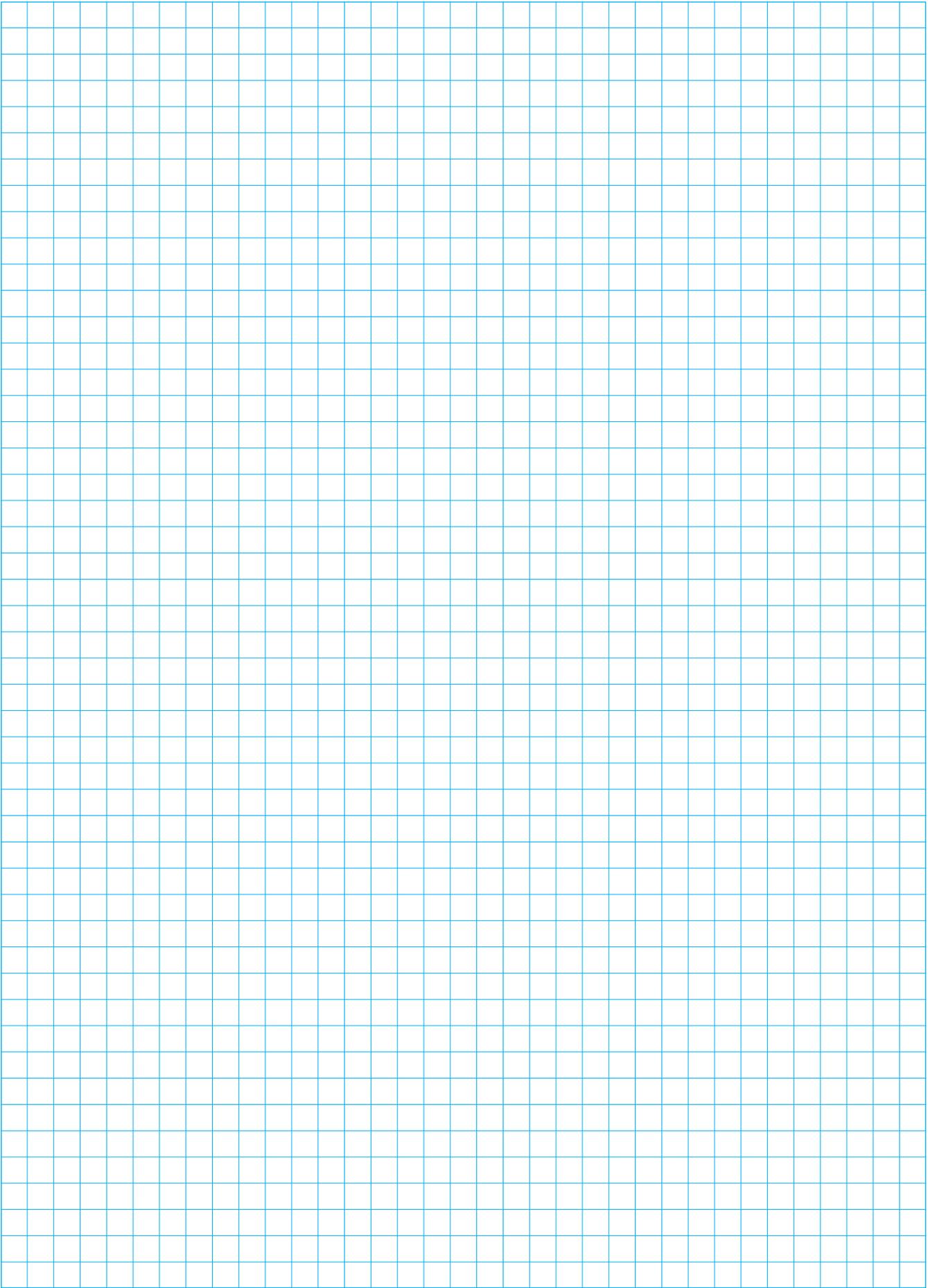
$$\text{Résistance : } R = \frac{U}{I} = \frac{400}{4} = \mathbf{100 \Omega}$$

2.5 Exercices

1. Qu'est-ce qu'un courant électrique ?
2. Quels sont les symboles de grandeur et d'unité du courant électrique ?
3. Quelle est l'expérience qui permet de réaliser l'unité d'intensité du courant ?
4. Pour quelle intensité du courant maximale les prises électriques domestiques sont-elles souvent prévues ?
5. Dessiner un schéma comportant une pile, une lampe comme récepteur ainsi qu'un ampèremètre permettant de mesurer l'intensité du courant parcourant la lampe.
6. Qu'est-ce que la tension ?
7. Quels sont les symboles de grandeur et d'unité de la tension électrique ?
8. Que vaut approximativement la tension :
 - a) d'une pile « carrée » pour lampe de poche
 - b) d'une batterie d'automobile
 - c) d'une prise électrique domestique
 - d) d'une ligne de trolleybus
 - e) d'une ligne CFF
 - f) d'une ligne de transport à haute tension
9. Dessiner un schéma comportant une pile, une lampe comme récepteur ainsi qu'un voltmètre permettant de mesurer la tension aux bornes de la lampe.
10. Qu'est-ce que la résistance électrique ?
11. Quels sont les symboles de grandeur et d'unité de la résistance ?
12. Comment est définie l'unité de résistance ?
13. Avec quel appareil mesure-t-on la résistance ? Comment le place-t-on dans un circuit et quelles sont les précautions à prendre ?
14. Calculer l'intensité du courant qui circule dans un récepteur de 25Ω , alimenté sous 230 V. Quelle sera la valeur nominale du fusible ?



15. Un récepteur est marqué: $R = 157 \Omega$ et $I = 1,45 \text{ A}$.
Sous quelle tension doit-il être alimenté ?
16. Calculer la valeur nominale du fusible permettant de protéger un récepteur de $11,3 \Omega$ alimenté sous 230 V .
17. Un récepteur est marqué: $R = 24 \Omega$ et $I = 4,58 \text{ A}$.
Peut-on le raccorder sur le réseau domestique ?
Sinon, dans quel pays peut-on l'utiliser ?
18. Représenter graphiquement la variation de la tension U aux bornes d'une résistance R de 10Ω , lorsque le courant I varie de 0 à 2 A . Répéter l'opération pour des résistances de 27 et 56Ω . Que peut-on constater ?



3.1 Résistivité

Dans les conducteurs métalliques, il existe toujours un nombre plus ou moins élevé d'électrons mobiles qui peuvent circuler facilement à l'intérieur du conducteur, ce sont les électrons libres.

Suivant la matière, le nombre d'électrons libres n'est pas identique.

Définition de la grandeur

La résistivité est la résistance par unité de longueur pour une même section et même température propre à chaque matériau.

La résistivité ρ (rhô) s'exprime en ohm mètre [$\Omega \text{ m}$]

La résistivité s'exprime dans la pratique en $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$, car la section des conducteurs s'exprime en mm^2 .

Définition de l'unité

La résistivité d'une matière est la résistance d'un conducteur ayant une section de 1 millimètre carré, une longueur de 1 mètre, à la température de 20 degrés Celsius.

Constantes physiques

Matières	Résistivité ρ à 20 °C en $[\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}]$	Résistivité ρ à 20 °C en [$\Omega \text{ m}$]
Argent	0,0165	$1,65 \cdot 10^{-8}$
Cuivre	0,0175	$1,75 \cdot 10^{-8}$
Aluminium	0,029	$2,90 \cdot 10^{-8}$
Chrome nickel	1,1 (environ)	$110 \cdot 10^{-8}$
Constantan	0,5 (environ)	$50 \cdot 10^{-8}$

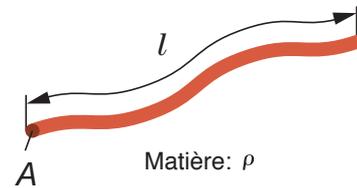
Conversion: $1 [\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}] \triangleq 1 \cdot 10^{-6} [\Omega \text{ m}]$

Pour d'autres matières, on consultera un formulaire technique sous la rubrique « constantes physiques ».

3.2 Résistance d'un conducteur

La résistance d'un conducteur est :

- proportionnelle à sa longueur ;
- inversement proportionnelle à sa section ;
- dépendante de la matière utilisée, caractérisée par sa résistivité.



Formules

R résistance du conducteur en ohms [Ω]

ρ résistivité du matériau utilisé en ohms millimètres carrés par mètre [$\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$]

l longueur du conducteur en mètres [m]

A section du conducteur en millimètres carrés [mm^2]

d diamètre en millimètres [mm] pour un conducteur circulaire

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

$$[\Omega] = \frac{[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}] \cdot [\text{m}]}{[\text{mm}^2]}$$

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Exemple 1

Un fil de cuivre long de 60 m a un diamètre de 0,5 mm. Quelle est la résistance du fil ?

$$\text{Section du fil : } A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,5^2}{4} = 0,196 \text{ mm}^2$$

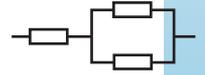
$$\text{Résistance : } R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{0,0175 \cdot 60}{0,196} = 5,36 \Omega$$

Exemple 2

Un corps de chauffe a une résistance de 40 Ω . Il est constitué d'un fil de chrome-nickel de 0,8 mm^2 de section.

Quelle est la longueur du fil du corps de chauffe ?

$$\text{Longueur du fil : } l = \frac{R \cdot A}{\rho} = \frac{40 \cdot 0,8}{1,1} = 29,1 \text{ m}$$



Exemple 3

Sur l'étiquette d'un rouleau de fil, il manque l'indication de la nature du matériau.

On mesure : longueur du fil = 3 m, diamètre = 0,8 mm, résistance = 3 Ω.

Quelle est la résistivité du matériau ?

De quelle matière est-il constitué ?

Section du fil :
$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,8^2}{4} = 0,503 \text{ mm}^2$$

Résistivité :
$$\rho = \frac{R \cdot A}{l} = \frac{3 \cdot 0,503}{3} = 0,503 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$$

Selon le formulaire technique : **constantan**.

Exemple 4

La résistance d'un conducteur en cuivre long de 80 m ne doit pas dépasser 0,14 Ω.

Quelle section faut-il choisir ?

Section :
$$A = \frac{\rho \cdot l}{R} = \frac{0,0175 \cdot 80}{0,14} = 10 \text{ mm}^2$$

3.3 Couplages des résistances

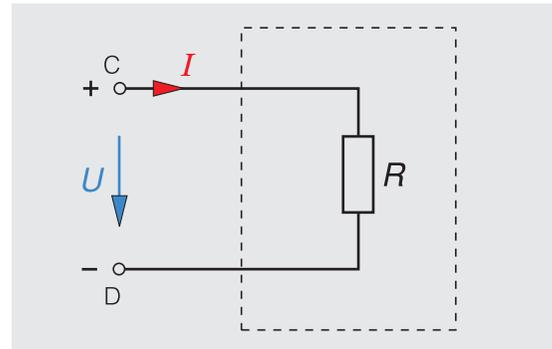
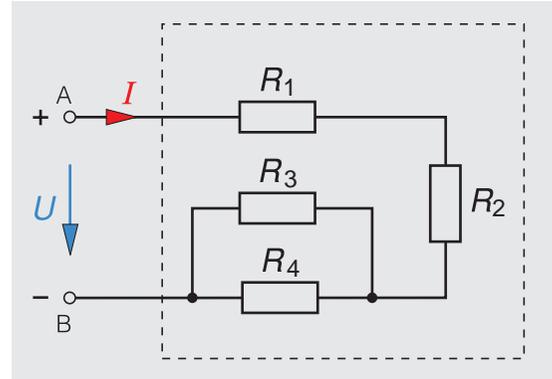
3.3.1 Résistance équivalente

Les deux circuits A-B et C-D sont équivalents si, soumis à la même tension U , ils sont parcourus par le même courant I .

La résistance mesurée entre A et B aura la même valeur que celle mesurée entre C et D. L'effet produit par la résistance R est le même que celui produit par l'ensemble des résistances R_1, R_2, R_3 et R_4 .

On appelle R_1, R_2, R_3 et R_4 les résistances partielles.

On appelle R la résistance équivalente.



Définition

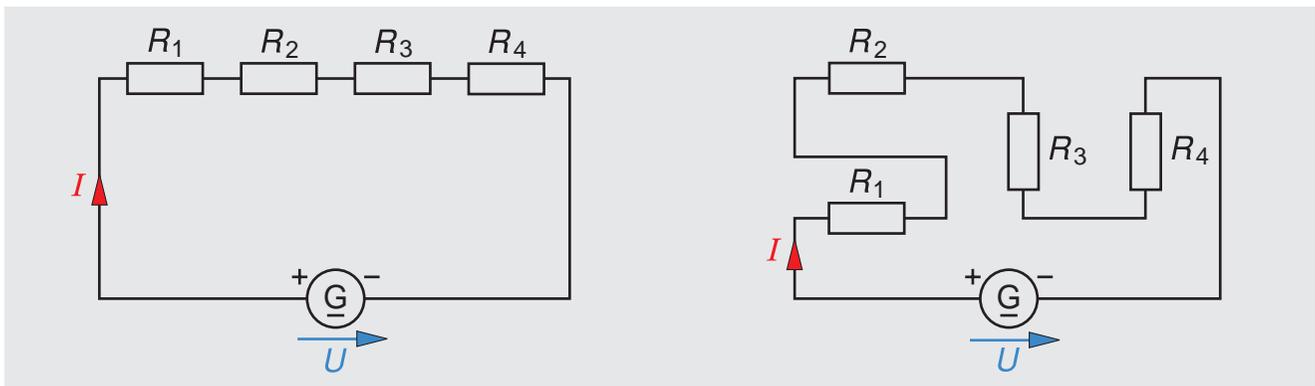
La résistance équivalente est une résistance unique qui remplace plusieurs résistances partielles, en produisant le même effet calorifique.

3.3.2 Couplage série

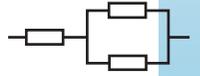
Lorsque deux ou plusieurs résistances sont reliées entre elles de telle manière que le courant soit partout le même et qu'il n'y ait qu'un seul parcours possible, elles sont alors couplées en série.

L'emplacement des unes par rapport aux autres n'est pas déterminant.

Exemples de couplage série

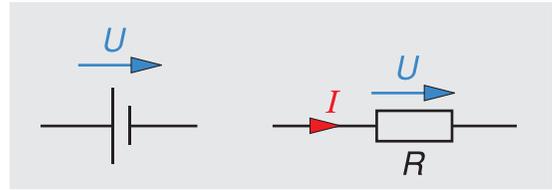


Ces deux schémas sont équivalents, dans chaque cas le courant n'a qu'un seul chemin possible. Les résistances sont montées en série.



Remarques

Le sens de la flèche de tension va du potentiel le plus élevé vers le potentiel le plus bas.



Les 3 ampèremètres indiquent une même valeur de courant. Ce courant est commun, donc partout le même.

$$I_1 = I_2 = I_3 = I$$

La résistance équivalente est celle qui, sous la tension U , est parcourue par le courant I .

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

Chacune des résistances utilise une partie de la tension totale U .

Loi de Kirchhoff (Loi des mailles)

La somme algébrique des tensions le long d'une maille de circuit est nulle.

$$U_1 + U_2 + U_3 = U$$

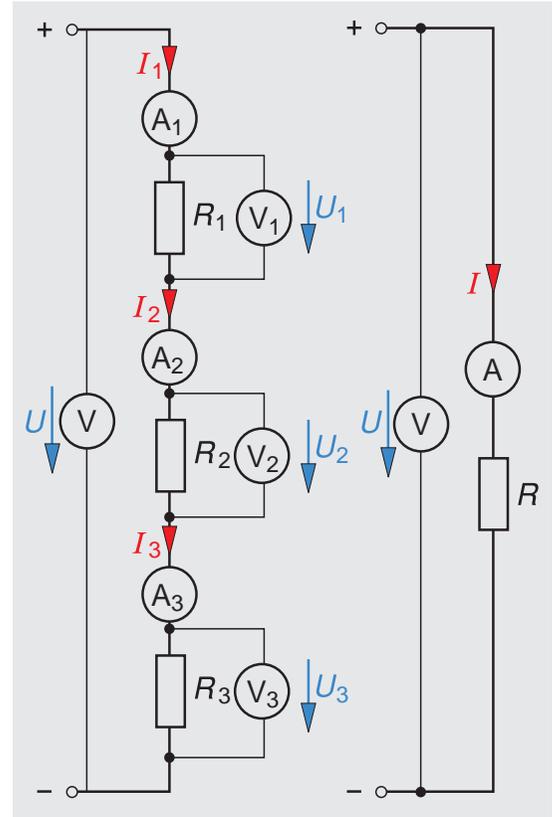
Selon la loi d'ohm :

$$U_1 = R_1 \cdot I \quad U_2 = R_2 \cdot I \quad U_3 = R_3 \cdot I \quad U = R \cdot I$$

En remplaçant et en simplifiant, on trouve :

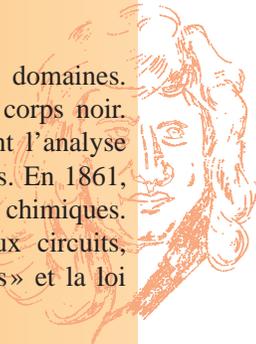
$$R_1 + R_2 + R_3 = R$$

La somme des résistances partielles d'un circuit série est égale à la résistance équivalente.



Kirchhoff Gustav Robert, 1824-1887.

Physicien allemand, actif dans de nombreux domaines. En thermodynamique, il imagina le concept du corps noir. En optique, il inventa le spectroscope permettant l'analyse de la lumière et énonça plusieurs lois importantes. En 1861, il découvrit avec Bunsen deux nouveaux éléments chimiques. En électricité, il énonça deux lois relatives aux circuits, appelées «lois de Kirchhoff» : la loi des «nœuds» et la loi des «mailles».



Formules I intensité du courant en ampères [A] U tension en volts [V] R résistance en ohms [Ω]

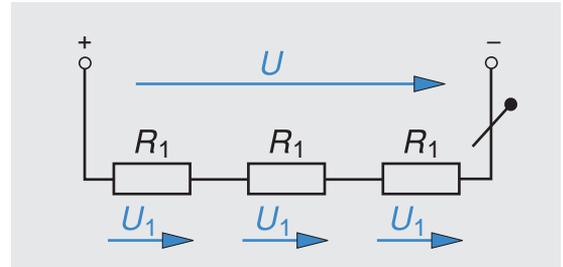
$$I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

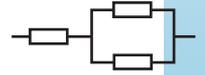
Plusieurs résistances d'égale valeur montées en série

Lorsque les résistances sont toutes identiques, les formules se simplifient.

**Formules** R résistance en ohms [Ω] n nombre de résistances partielles U tension en volts [V]

$$R = R_1 \cdot n$$

$$U = U_1 \cdot n$$

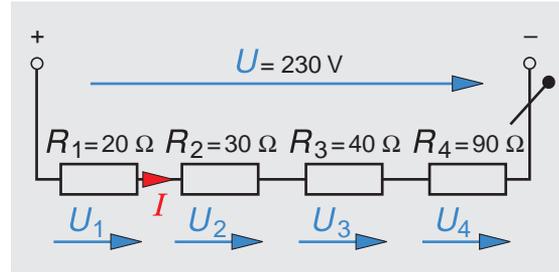


Exemple 1

Quatre résistances

$R_1 = 20 \Omega$, $R_2 = 30 \Omega$, $R_3 = 40 \Omega$ et $R_4 = 90 \Omega$ sont montées en série et raccordées sous 230 V.

Calculer la résistance équivalente, l'intensité du courant et les chutes de tension partielles.



Résistance équivalente :

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 20 + 30 + 40 + 90 = \mathbf{180 \Omega}$$

$$\text{Intensité du courant : } I = \frac{U}{R} = \frac{230}{180} = \mathbf{1,28 \text{ A}}$$

Chutes de tension partielles :

$$U_1 = R_1 \cdot I = 20 \cdot 1,28 = \mathbf{25,6 \text{ V}}$$

$$U_2 = R_2 \cdot I = 30 \cdot 1,28 = \mathbf{38,4 \text{ V}}$$

$$U_3 = R_3 \cdot I = 40 \cdot 1,28 = \mathbf{51,2 \text{ V}}$$

$$U_4 = R_4 \cdot I = 90 \cdot 1,28 = \mathbf{115 \text{ V}}$$

Vérification :

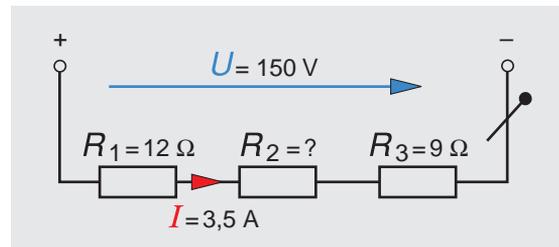
$$U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 = 25,6 + 38,4 + 51,2 + 115 = 230,2 \text{ V}$$

(erreur due à l'arrondi)

Exemple 2

Calculer :

- la résistance équivalente R ;
- la résistance partielle R_2 ;
- les chutes de tension U_1 , U_2 et U_3 .



$$\text{a) Résistance équivalente : } R = \frac{U}{I} = \frac{150}{3,5} = \mathbf{42,9 \Omega}$$

b) Résistance partielle R_2 :

$$R_2 = R - R_1 - R_3 = 42,9 - 12 - 9 = \mathbf{21,9 \Omega}$$

c) Chutes de tension :

$$U_1 = R_1 \cdot I = 12 \cdot 3,5 = \mathbf{42 \text{ V}}$$

$$U_2 = R_2 \cdot I = 21,9 \cdot 3,5 = \mathbf{76,7 \text{ V}}$$

$$U_3 = R_3 \cdot I = 9 \cdot 3,5 = \mathbf{31,5 \text{ V}}$$

Exemple 3

Quatre résistances égales de 25Ω , en série, sont parcourues par un courant de 3 A.

Calculer la tension aux bornes des résistances et la résistance équivalente.

Tension aux bornes des résistances :

$$U_1 = R_1 \cdot I = 25 \cdot 3 = \mathbf{75 \text{ V}}$$

Résistance totale :

$$R = R_1 \cdot n = 25 \cdot 4 = \mathbf{100 \Omega}$$

3.3.3 Différence entre potentiel et tension

Deux notions complémentaires et différentes sont trop souvent incomprises ou mélangées! Il s'agit de:

- Potentiel: Niveau de tension par rapport à un potentiel de référence fixé à 0 volt (masse)
- Tension: Différence entre deux potentiels

Pour une analyse efficace des circuits électriques et électroniques, ces deux notions doivent être utilisées.

U_A et U_B sont des potentiels. Il s'agit du niveau de tension par rapport à la référence fixée à 0 volt (masse). Cette référence du zéro volt doit être fixée à un endroit du circuit. Si le circuit ne contient qu'une seule alimentation, il est souvent placé sur le pôle moins de celle-ci.

La tension U_{AB} est la différence entre deux potentiels «A» et «B». Par convention, lorsque l'on écrit U_{AB} , la première lettre «A» est le niveau de départ de la flèche et la seconde «B» celui d'arrivée.

Le calcul suivant permet de déterminer cette tension:

$$U_{AB} = U_A - U_B$$

Analyse des potentiels dans un circuit purement série

Analysons le circuit suivant:

Par la loi d'Ohm, on obtient les résultats suivants pour le circuit ci-dessus:

Le courant: $I = 1 \text{ mA}$

Les tensions:

$$U_{R1} = U_{AB} = 1 \text{ V} ; U_{R2} = U_{BC} = 2 \text{ V} ; U_{R3} = U_{CD} = 3 \text{ V} ; U_{R4} = U_{DE} = 4 \text{ V}$$

Le calcul des potentiels nous donne:

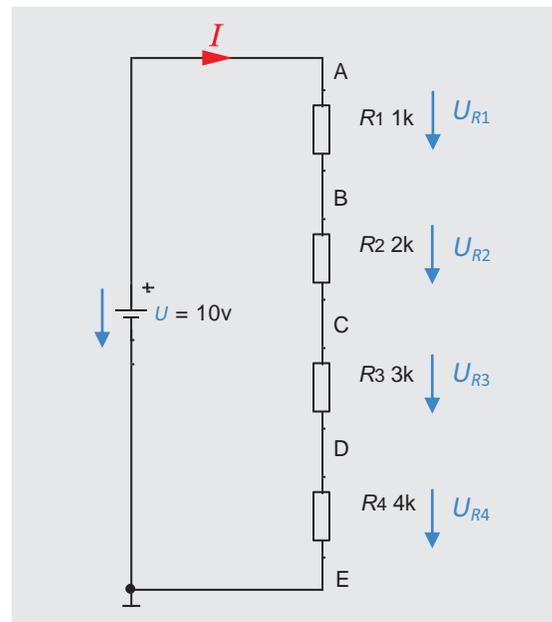
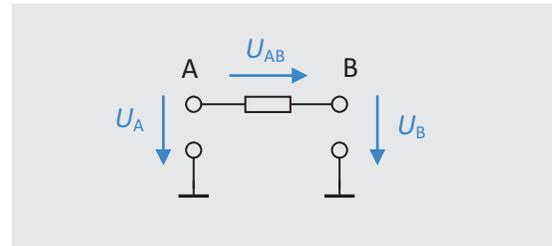
$$U_A = 10 \text{ V, il est fixé par l'alimentation.}$$

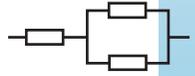
$$U_B = U_A - U_{R1} = 10 - 1 = 9 \text{ V}$$

$$U_C = U_B - U_{R2} = 9 - 2 = 7 \text{ V}$$

$$U_D = U_C - U_{R3} = 7 - 3 = 4 \text{ V}$$

$$U_E = U_D - U_{R4} = 4 - 4 = 0 \text{ V ; on est arrivé au potentiel de référence, la masse.}$$





3.3.4 Applications

1) Résistance additionnelle

Chaque récepteur est construit pour fonctionner sous une tension déterminée, appelée tension nominale.

Si la tension à disposition dépasse cette valeur, on peut brancher en série avec le récepteur une résistance dont la fonction est de créer une chute de tension. Cette résistance est appelée résistance additionnelle et désignée par R_a .

La résistance additionnelle R_a , parcourue par le même courant, va dissiper de l'énergie sous forme de chaleur. C'est pourquoi cette méthode est limitée aux cas où les puissances mises en jeu sont faibles.

Exemple

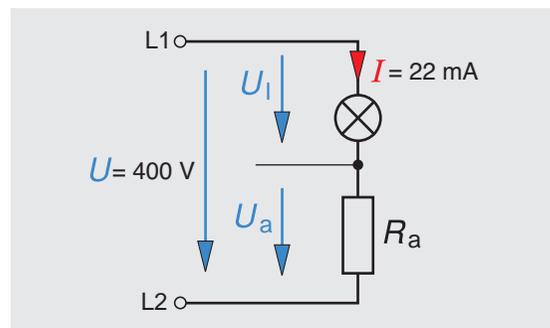
Une lampe témoin est parcourue par un courant de 22 mA sous 230 V.

Quelle résistance additionnelle faut-il brancher pour la raccorder sous 400 V ?

Chute de tension dans R_a :

$$U_a = U - U_l = 400 - 230 = 170 \text{ V}$$

$$\text{Résistance additionnelle: } R_a = \frac{U_a}{I} = \frac{170}{0,022} = 7730 \text{ } \Omega$$



2) Augmentation de l'étendue de mesure d'un voltmètre

Un voltmètre à cadre mobile est constitué par une bobine en fil très fin qui ne peut être parcourue que par des courants très petits, de quelques milliampères.

Si l'on désire augmenter l'étendue de mesure, il faut insérer des résistances additionnelles en série (chap. 9).

Exemple

Lorsque l'intensité du courant dans la bobine de mesure est de 2,5 mA, la déviation de l'aiguille est totale, soit 30 divisions d'échelle.

La résistance de cette bobine est de 100 Ω .

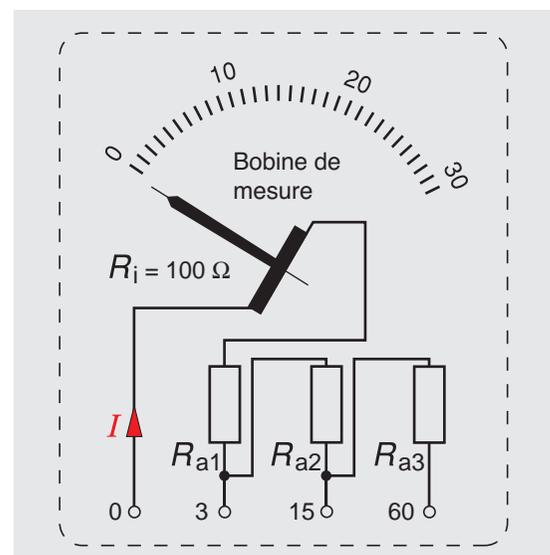
Calculer les résistances additionnelles R_{a1} , R_{a2} et R_{a3} permettant des mesures pour les calibres suivants :

0 - 3 V, 0 - 15 V et 0 - 60 V.

Résistance additionnelle pour calibre de 0 - 3 V :

$$R = \frac{U}{I} = \frac{3}{0,0025} = 1200 \text{ } \Omega$$

$$R_{a1} = R - R_i = 1200 - 100 = 1100 \text{ } \Omega$$



Résistance additionnelle pour calibre de 0 - 15 V:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{15}{0,0025} = 6000 \Omega$$

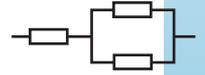
$$R_{a2} = R - (R_i + R_{a1}) = 6000 - (100 + 1100) = \mathbf{4800 \Omega}$$

Résistance additionnelle pour calibre de 0 - 60 V:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{60}{0,0025} = 24\,000 \Omega$$

$$R_{a3} = R - (R_i + R_{a1} + R_{a2})$$

$$R_{a3} = 24\,000 - (100 + 1100 + 4800) = \mathbf{18\,000 \Omega}$$



3) Chute de tension en ligne et résistance de ligne

Une ligne est l'ensemble des conducteurs destinés au raccordement d'un récepteur situé à distance l des coupe-surintensité (coupe-circuit à fusible, disjoncteur de canalisation).

Une ligne monophasée ou à courant continu comprend deux conducteurs actifs.

En courant alternatif monophasé : L et N

En courant continu : L+ et L-

l longueur de la ligne, distance entre le point d'alimentation et le point de raccordement en mètres [m]

A section du conducteur en millimètres carrés [mm²]

I intensité du courant dans la ligne en ampères [A]

R_1 résistance du récepteur en ohms [Ω]

R_c résistance d'un conducteur en ohms [Ω]

R_l résistance de la ligne en ohms [Ω]

U_1 tension au départ en volts [V]

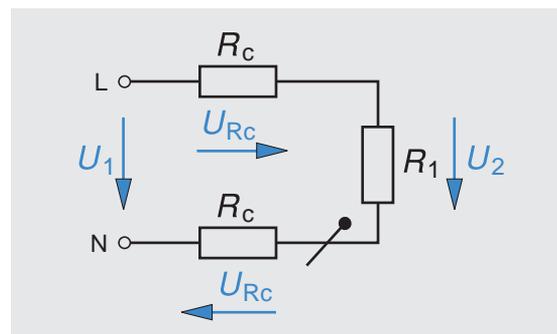
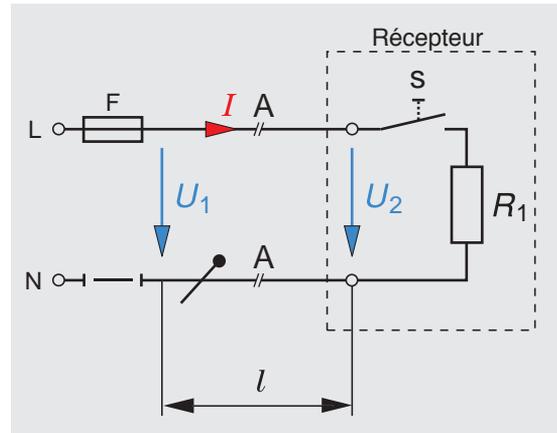
U_2 tension aux bornes du récepteur en volts [V]

ΔU chute de tension en ligne en volts [V]

Le conducteur « aller » $R_c = \frac{\rho \cdot l}{A}$ et le conducteur « retour » $R_c = \frac{\rho \cdot l}{A}$ sont deux résistances en série avec la résistance du récepteur R_1 .

Ces résistances sont en série. La résistance de la ligne est donc :

$$R_l = R_c + R_c = 2 \cdot R_c \text{ et } R_l = \frac{2 \cdot \rho \cdot l}{A}$$



Formules

- R_1 résistance de la ligne en ohms [Ω]
- ρ résistivité en ohms millimètres carrés par mètre [$\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$]
- l longueur de la ligne en mètres [m]
- A section du conducteur en millimètres carrés [mm^2]
- ΔU chute de tension dans la ligne en volts [V]
- I intensité du courant en ampères [A]
- U_1 tension au départ de la ligne en volts [V]
- U_2 tension aux bornes du récepteur en volts [V]
- $\Delta U_{\%}$ chute de tension dans la ligne en % de la tension de départ

$$R_1 = \frac{2 \cdot \rho \cdot l}{A}$$

$$\Delta U = R_1 \cdot I$$

$$\Delta U = U_1 - U_2$$

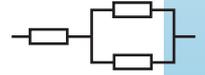
$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U \cdot 100}{U_1}$$

Remarques

La mesure de la chute de tension ΔU n'est pratiquement pas possible.

Par contre, en mesurant U_1 et U_2 on peut trouver ΔU .

Dans les installations électriques à basse tension, il faudra toujours s'assurer qu'en cas de court-circuit en bout de ligne, le courant de court-circuit fasse déclencher le coupe-surintensité dans les 5 secondes (appareils fixés à demeure) ou 0,4 seconde pour les appareils transportables. En règle générale, la chute de tension ne dépasse pas 4% de la tension au départ de la ligne.

**Exemple 1**

Un radiateur marqué 230 V et 5,5 A est raccordé à l'extrémité d'une ligne en cuivre de 1,5 mm² et longue de 30 m.

Déterminer :

- la tension aux bornes du radiateur, si la tension en début de ligne est de 230 V ;
- la chute de tension en % de la tension nominale.

a) Résistance du radiateur :

$$R_1 = \frac{U}{I} = \frac{230}{5,5} = 41,8 \, \Omega$$

Résistance de la ligne :

$$R_1 = \frac{2 \cdot \rho \cdot l}{A} = \frac{2 \cdot 0,0175 \cdot 30}{1,5} = 0,7 \, \Omega$$

Résistance du circuit: $R = R_1 + R_1 = 0,7 + 41,8 = 42,5 \, \Omega$

Intensité du courant dans la ligne :

$$I = \frac{U_1}{R} = \frac{230}{42,5} = 5,41 \, \text{A}$$

Chute de tension en ligne: $\Delta U = R_1 \cdot I = 0,7 \cdot 5,41 = 3,79 \, \text{V}$

Tension aux bornes du radiateur :

$$U_2 = U_1 - \Delta U = 230 - 3,79 = \mathbf{226 \, \text{V}}$$

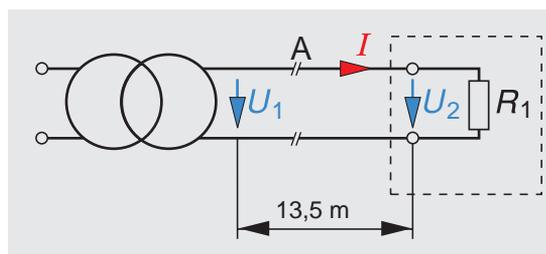
b) Chute de tension en % de U_1 :

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U \cdot 100}{U_1} = \frac{3,79 \cdot 100}{230} = \mathbf{1,65 \, \%}$$

Exemple 2

Dans un local mouillé, on doit raccorder sous une très basse tension de sécurité de 36 V, un corps de chauffe de $1,62 \Omega$ de résistance.

Calculer la section nécessaire d'une ligne en cuivre longue de 13,5 m, si la chute de tension ne doit pas dépasser 3% de 36 V. Calculer également la tension de départ.



Chute de tension admissible :

$$3\% \text{ de } 36 \text{ V} \Rightarrow \Delta U_{\%} = \frac{3 \cdot 36}{100} = 1,08 \text{ V}$$

Intensité du courant dans le circuit :

$$I = \frac{U_2}{R_1} = \frac{36}{1,62} = 22,2 \text{ A}$$

Résistance de la ligne :

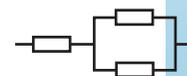
$$R_l = \frac{\Delta U}{I} = \frac{1,08}{22,2} = 0,0486 \Omega$$

Section du conducteur :

$$A = \frac{2 \cdot \rho \cdot l}{R_l} = \frac{2 \cdot 0,0175 \cdot 13,5}{0,0486} = 9,72 \text{ mm}^2$$

Section commerciale : **10 mm²**

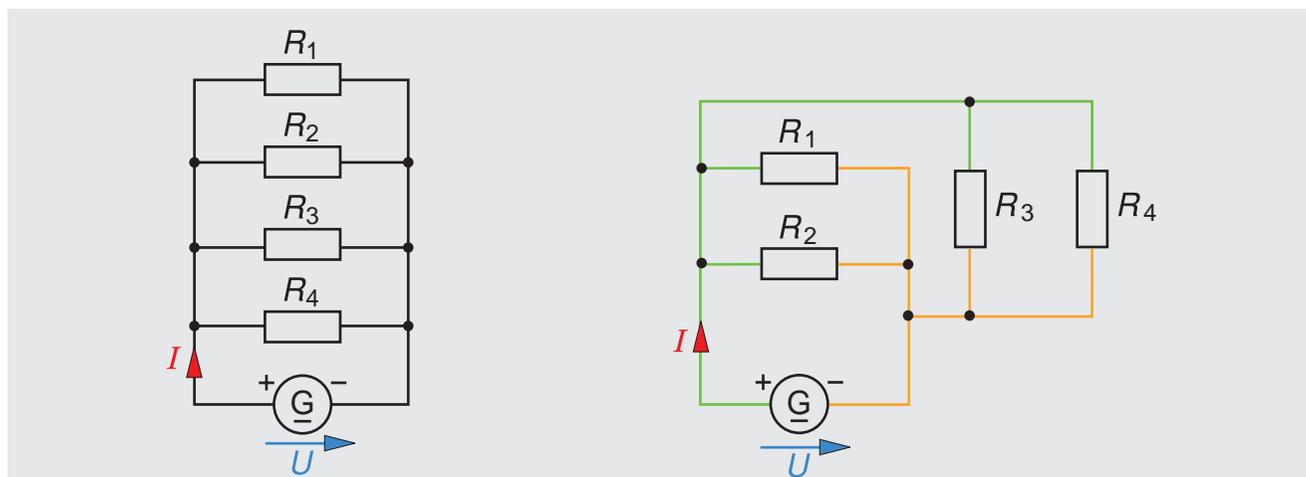
Tension au départ : $U_1 = U_2 + \Delta U = 36 + 1,08 = 37,1 \text{ V}$



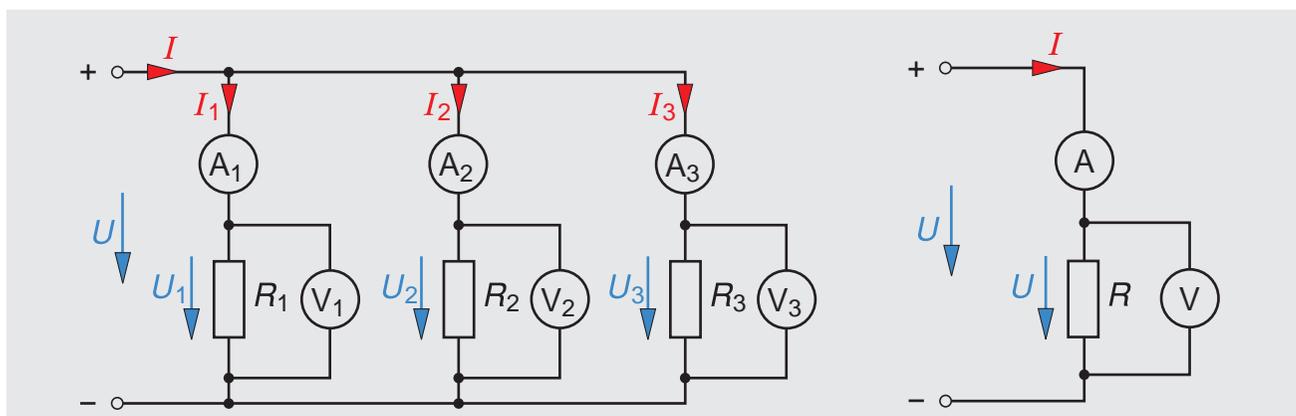
3.3.5 Couplage parallèle

Des résistances sont montées en parallèle lorsqu'elles sont toutes alimentées sous la même tension. L'emplacement des unes par rapport aux autres n'est pas déterminant.

Exemples de couplage parallèle



Ces deux schémas sont équivalents. Dans chaque cas les résistances sont alimentées sous la même tension. Elles sont raccordées en parallèle.



Les 3 voltmètres indiquent la même valeur de tension. Cette tension est commune, donc partout la même.

$$U = U_1 = U_2 = U_3$$

La résistance équivalente est celle qui, sous la tension U , est parcourue par le courant I .

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

Loi de Kirchhoff (Loi des nœuds)

Chacune des résistances est parcourue par une partie du courant total I .

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

$$I_1 + I_2 + I_3 = I$$

Selon la loi d'Ohm :

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

En remplaçant et en simplifiant, on trouve :

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{R}$$

La somme des inverses des résistances partielles d'un circuit parallèle est égale à l'inverse de la résistance équivalente.

Formule

U tension en volts [V]

I intensité du courant en ampères [A]

R résistance en ohms [Ω]

Pour deux résistances seulement, la formule se simplifie :

Plusieurs résistances d'égale valeur montées en parallèle

Lorsque les résistances sont toutes identiques, les formules se simplifient.

Formules

R résistance en ohms [Ω]

n nombre de résistances partielles

I intensité du courant en ampères [A]

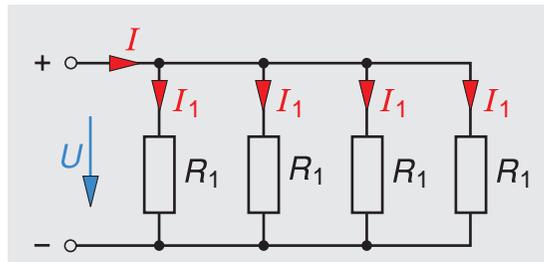
$$U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

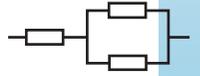
$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots}$$

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$



$$R = \frac{R_1}{n}$$

$$I = I_1 \cdot n$$



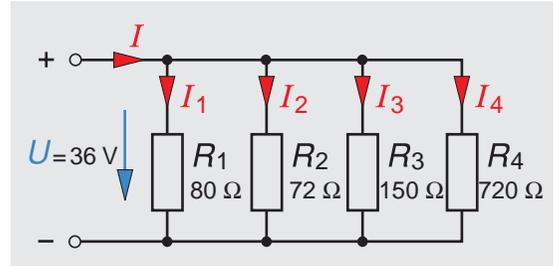
Remarque

La résistance équivalente de deux ou plusieurs résistances montées en parallèle est toujours plus petite que la plus petite des résistances partielles.

Exemple 1

Calculer pour le circuit donné :

- la résistance équivalente ;
- les intensités des courants partiels ;
- l'intensité du courant total.



- Résistance équivalente :

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{1}{\frac{1}{80} + \frac{1}{72} + \frac{1}{150} + \frac{1}{720}} = 29 \Omega$$

- Intensité des courants partiels :

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{36}{80} = 0,45 \text{ A} \quad I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{36}{72} = 0,5 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{36}{150} = 0,24 \text{ A} \quad I_4 = \frac{U}{R_4} = \frac{36}{720} = 0,05 \text{ A}$$

- intensité du courant total :

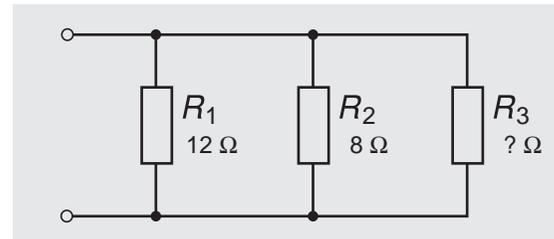
$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0,45 + 0,5 + 0,24 + 0,05 = 1,24 \text{ A}$$

Exemple 2

On désire obtenir une résistance équivalente de 4 Ω .
Quelle résistance R_3 faut-il choisir ?

Résistance partielle R_3 :

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R} - \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}} = \frac{1}{\frac{1}{4} - \frac{1}{12} - \frac{1}{8}} = 24 \Omega$$



Exemple 3

On dispose de 4 résistances identiques de 120 Ω chacune.
Calculer la résistance équivalente de 2 puis 3 et 4 résistances en parallèle.

Deux résistances en parallèle : $R = \frac{R_1}{n} = \frac{120}{2} = 60 \Omega$

Trois résistances en parallèle : $R = \frac{R_1}{n} = \frac{120}{3} = 40 \Omega$

Quatre résistances en parallèle : $R = \frac{R_1}{n} = \frac{120}{4} = 30 \Omega$

Analyse des potentiels dans un circuit purement parallèle

Dans un circuit purement parallèle, les récepteurs étant tous connectés entre les bornes plus et moins de l'alimentation, les tensions mesurées à leurs bornes sont toutes identiques.

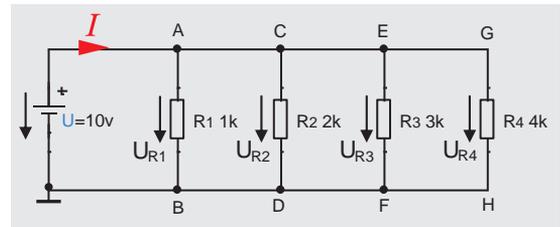
Si on regarde les potentiels sur le circuit ci-dessus:

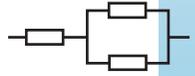
$$U_A = U_C = U_E = U_G = 10 \text{ V}$$

$$U_B = U_D = U_F = U_H = 0 \text{ V}$$

Quant aux tensions :

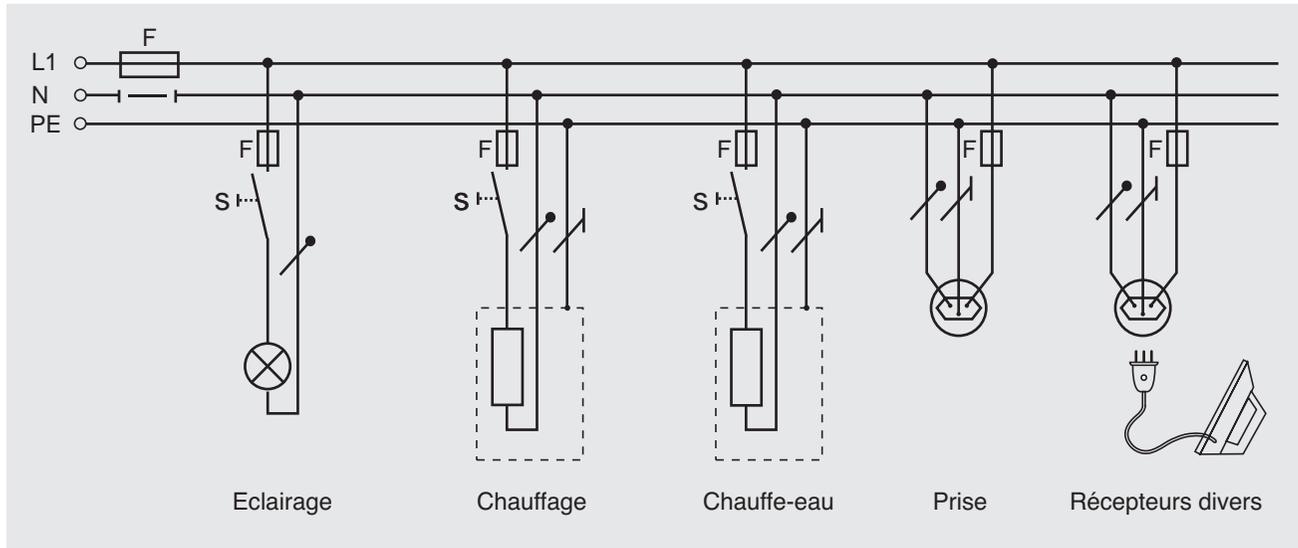
$$U = U_{AB} = U_{R1} = U_{CD} = U_{R2} = U_{EF} = U_{R3} = U_{GH} = U_{R4} = 10 - 0 = 10 \text{ V}$$





3.3.6 Applications

1) Raccordement des récepteurs sur le réseau



Sur le réseau, les récepteurs sont raccordés en parallèle. Ils sont construits pour une tension normalisée de 230 V. Il est possible de les enclencher ou les déclencher indépendamment les uns des autres.

Le conducteur de protection PE ne participe pas au circuit. Son rôle est de relier les enveloppes métalliques des récepteurs à la terre.

Ce système de protection est appelé mise au neutre selon le système TN-S.

Exemple

On enclenche simultanément sur le réseau 230 V :

- une lampe de 705 Ω ;
- un radiateur de 44 Ω ;
- un fer à repasser de 66 Ω .

Calculer :

- a) l'intensité du courant dans le radiateur ;
- b) l'intensité du courant dans la ligne.

a) Intensité du courant dans le radiateur :

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{230}{44} = 5,23 \text{ A}$$

b) Intensité du courant dans la lampe :

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{230}{705} = 0,326 \text{ A}$$

Intensité du courant dans le fer à repasser :

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{230}{66} = 3,48 \text{ A}$$

Intensité du courant dans la ligne :

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 5,23 + 0,326 + 3,48 = 9,04 \text{ A}$$

2) Augmentation de l'étendue de mesure d'un ampèremètre

Un ampèremètre à cadre mobile est constitué par une bobine en fil très fin qui ne peut être parcouru que par des courants très petits, de quelques milliampères. Si l'on désire augmenter l'étendue de mesure, il faut insérer en parallèle des résistances appelées shunts.

Exemple

L'aiguille de cet ampèremètre dévie complètement lorsque le courant dans la bobine est de 2,5 mA.

La résistance de la bobine mobile est de 100 Ω.

Calculer la valeur des shunts qui permettent les étendues de mesure:

a) 0 - 60 mA; b) 0 - 300 mA; c) 0 - 1,5 A.

a) Calibre 0 - 60 mA

Intensité du courant dans le shunt :

$$I_{s1} = I - I_i = 60 - 2,5 = 57,5 \text{ mA}$$

Tension aux bornes de la bobine :

$$U = R_i \cdot I_i = 100 \cdot 0,0025 = 0,25 \text{ V}$$

$$\text{Résistance shunt : } R_{s1} = \frac{U}{I_{s1}} = \frac{0,25}{0,0575} = \mathbf{4,35 \text{ } \Omega}$$

b) Calibre 0 - 300 mA

Intensité du courant dans le shunt :

$$I_{s2} = I - I_i = 300 - 2,5 = 297,5 \text{ mA}$$

Tension aux bornes de la bobine :

$$U = R_i \cdot I_i = 100 \cdot 0,0025 = 0,25 \text{ V}$$

$$\text{Résistance shunt : } R_{s2} = \frac{U}{I_{s2}} = \frac{0,25}{0,2975} = \mathbf{0,84 \text{ } \Omega}$$

c) Calibre 0 - 1500 mA

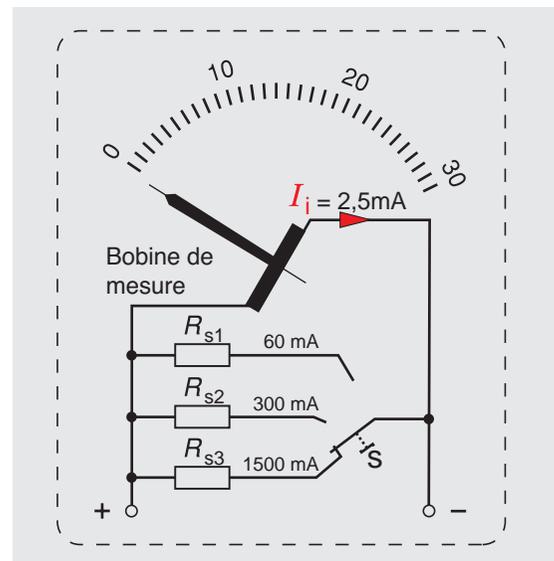
Intensité du courant dans le shunt :

$$I_{s3} = I - I_i = 1500 - 2,5 = 1497,5 \text{ mA}$$

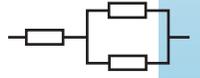
Tension aux bornes de la bobine :

$$U = R_i \cdot I_i = 100 \cdot 0,0025 = 0,25 \text{ V}$$

$$\text{Résistance shunt : } R_{s3} = \frac{U}{I_{s3}} = \frac{0,25}{1,4975} = \mathbf{0,167 \text{ } \Omega}$$



R_{s1} à $s3$: résistances shunts



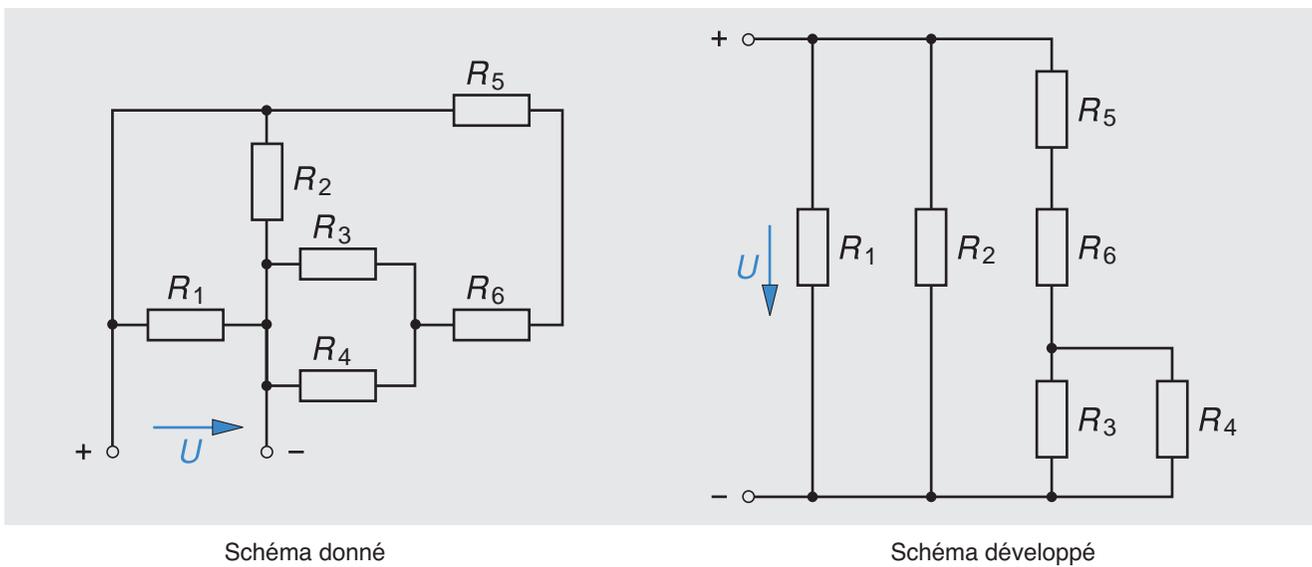
3.3.7 Couplage mixte

Un couplage mixte est une combinaison de couplages série et parallèle.

En remplaçant des éléments couplés en série par une résistance équivalente intermédiaire, et en appliquant le même procédé pour celles montées en parallèle, on simplifie progressivement le schéma donné.

Exemple de couplage mixte

Lorsqu'il est difficile de reconnaître le couplage des résistances partielles, il faut dessiner un schéma développé et y appliquer des couleurs.



Ces deux schémas sont équivalents.

Exemple

Quelle est la résistance équivalente du couplage ci-contre ?

Résistance équivalente de R_5 et R_6 :

$$R_{56} = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_5 + R_6} = \frac{2 \cdot 1}{2 + 1} = 0,67 \Omega$$

Résistance équivalente de R_2 et R_3 :

$$R_{23} = R_2 + R_3 = 5 + 4 = 9 \Omega$$

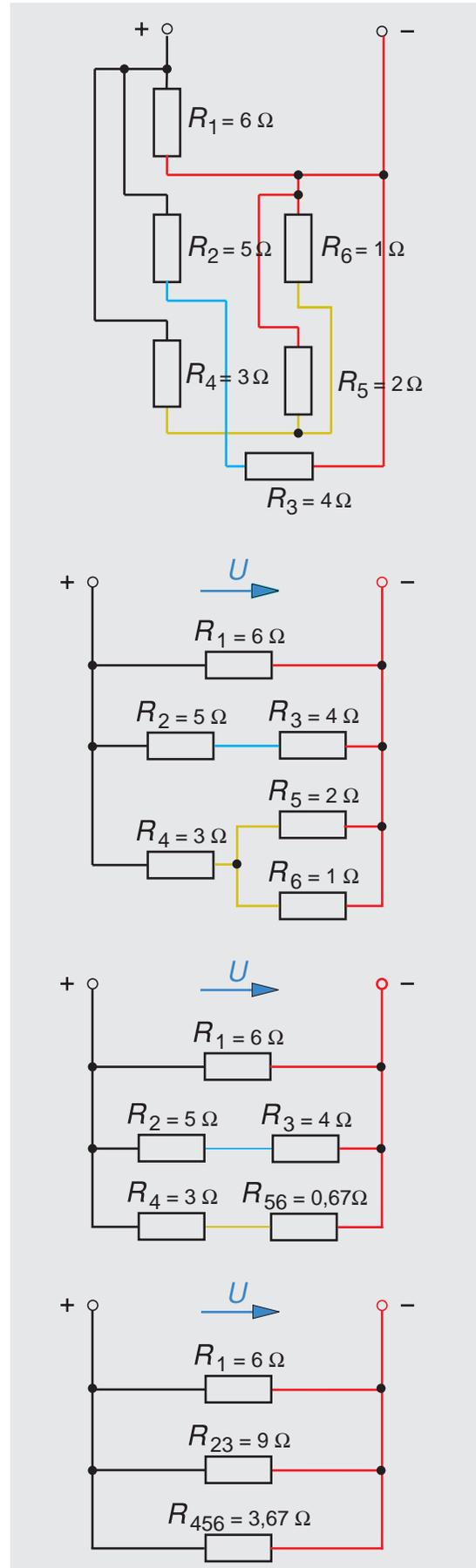
Résistance équivalente de R_4 et R_{56} :

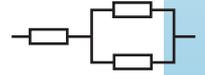
$$R_{456} = R_4 + R_{56} = 3 + 0,67 = 3,67 \Omega$$

Résistance équivalente du circuit :

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{23}} + \frac{1}{R_{456}}} =$$

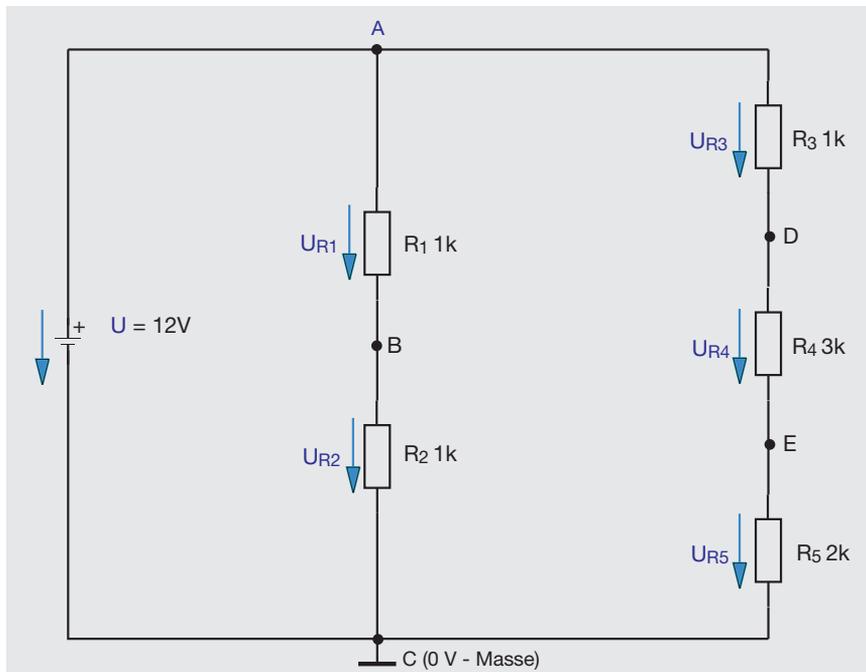
$$R = 1,82 \Omega$$





Analyse des potentiels dans un circuit mixte

Pour l'analyse d'un circuit mixte, cette notion de potentiels est encore plus importante!



Par la loi d'Ohm, on obtient les résultats suivants pour le circuit ci-dessus:

Le courant: $I_{R1} = I_{R2} = 6 \text{ mA}$

$I_{R3} = I_{R4} = I_{R5} = 2 \text{ mA}$

Les tensions: $U_{R1} = U_{AB} = 6 \text{ V}$; $U_{R2} = U_{BC} = 6 \text{ V}$

$U_{R3} = U_{AD} = 2 \text{ V}$; $U_{R4} = U_{DE} = 6 \text{ V}$;

$U_{R5} = U_{ED} = 4 \text{ V}$

Le calcul des potentiels nous donne:

$U_A = 12 \text{ V}$, il est fixé par l'alimentation.

$U_B = U_A - U_{R1} = 12 - 6 = 6 \text{ V}$

$U_C = U_B - U_{R2} = 6 - 6 = 0 \text{ V}$; on est arrivé au potentiel de référence, la masse.

$U_D = U_A - U_{R3} = 12 - 2 = 10 \text{ V}$

$U_E = U_D - U_{R4} = 10 - 6 = 4 \text{ V}$

$U_C = U_E - U_{R5} = 4 - 4 = 0 \text{ V}$; on est arrivé au potentiel de référence, la masse.

Il est possible de déterminer d'autres tensions, par exemple :

$U_{BD} = U_B - U_D = 6 - 10 = -4 \text{ V}$

$U_{DB} = U_D - U_B = 10 - 6 = 4 \text{ V}$

$U_{BE} = U_B - U_E = 6 - 4 = 2 \text{ V}$

$U_{EB} = U_E - U_B = 4 - 6 = -2 \text{ V}$

Etc ...

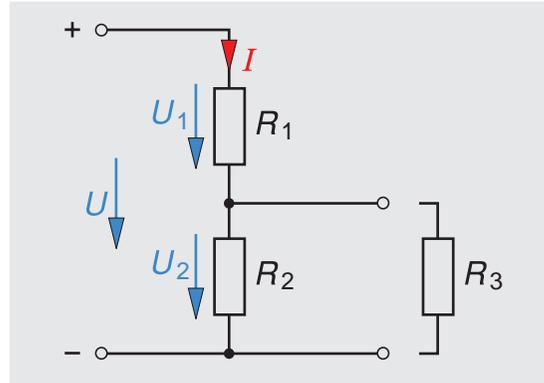
3.3.8 Applications

1) Diviseur de tension

A vide, la tension U se répartit proportionnellement aux résistances R_1 et R_2 .

En raccordant la charge R_3 , la tension U_2 diminue par suite d'une chute de tension dans R_1 .

Le couplage est mixte.



Exemple

On donne : $U = 24 \text{ V}$, $R_1 = 60 \text{ } \Omega$, $R_2 = 120 \text{ } \Omega$, $R_3 = 240 \text{ } \Omega$.
Calculer :

- a) les tensions U_1 et U_2 à vide ;
- b) la tension U_2 en charge.

a) A vide

Intensité du courant :

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{24}{60 + 120} = 0,133 \text{ A}$$

Tensions :

$$U_1 = R_1 \cdot I = 60 \cdot 0,133 = \mathbf{7,98 \text{ V}}$$

$$U_2 = R_2 \cdot I = 120 \cdot 0,133 = \mathbf{16 \text{ V}}$$

b) En charge

Résistance équivalente de R_2 et R_3 :

$$R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{120 \cdot 240}{120 + 240} = 80 \text{ } \Omega$$

Résistance du circuit :

$$R = R_1 + R_{23} = 60 + 80 = 140 \text{ } \Omega$$

Intensité du courant :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{24}{140} = 0,171 \text{ A}$$

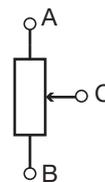
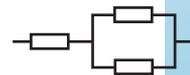
Tensions :

$$U_1 = R_1 \cdot I = 60 \cdot 0,171 = \mathbf{10,3 \text{ V}}$$

$$U_2 = R_{23} \cdot I = 80 \cdot 0,171 = \mathbf{13,7 \text{ V}}$$

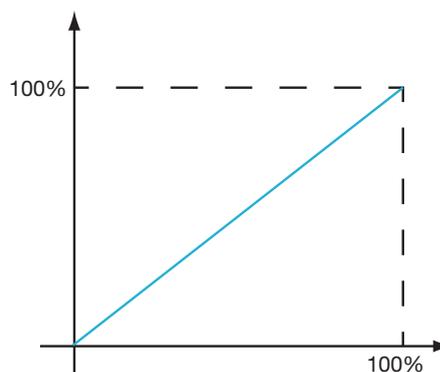
2) Potentiomètre

Un potentiomètre est un type de résistance variable à trois bornes, dont une est reliée à un curseur se déplaçant sur une piste résistante terminée par les deux autres bornes. Ce système permet de recueillir, entre la borne reliée au curseur et une des deux autres bornes, une tension qui dépend de la position du curseur et de la tension à laquelle est soumise la résistance.



Potentiomètre linéaire

% de R_{pot} .



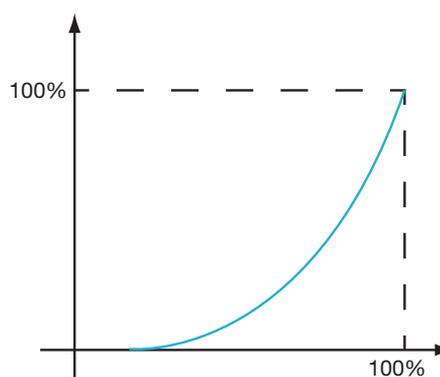
Position en % de la course totale

Sans indication, la résistance varie proportionnellement à l'angle de rotation du potentiomètre



Potentiomètre rotatif

% de R_{pot} .



Position en % de la course totale

Avec l'indication "LOG", la résistance varie de manière logarithmique avec l'angle de rotation du potentiomètre



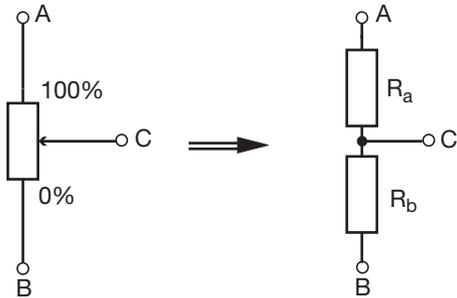
LOG

Potentiomètre rotatif

Astuce: la méthode pour résoudre un exercice incluant un potentiomètre est de décomposer le potentiomètre en deux résistances de valeur fixe.

Exemple 1: Potentiomètre

Un potentiomètre de 250Ω est réglé à 33%. Calculer R_a et R_b



- 1) On commence par calculer la résistance qui se trouve du côté du 0%. Dans cet exercice c'est la borne B.

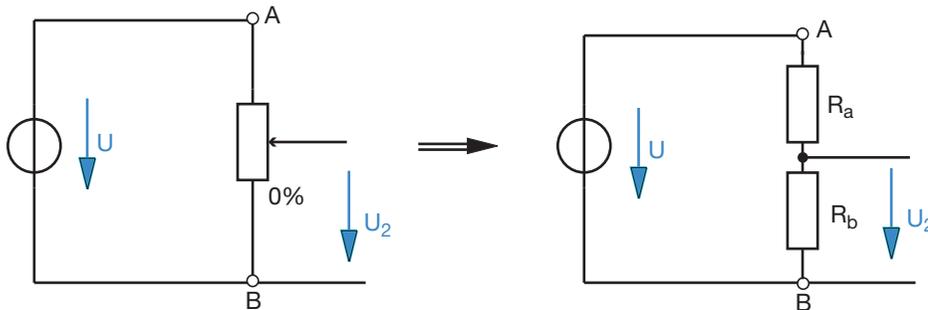
$$R_b = R\% \cdot R_{pot.} = 0,33 \cdot 250 = 82,5 \Omega$$

- 2) On calcule la seconde résistance en faisant la différence entre la résistance totale du potentiomètre et celle obtenue au point 1.

$$R_a = R_{pot} - R_b = 250 - 82,5 = 167,5 \Omega$$

Exemple 2: Potentiomètre à vide

Un potentiomètre de 150Ω est réglé à 76%. Calculer la tension de sortie U_2 lorsque $U = 120 V$



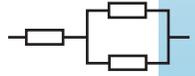
- 1) On commence par calculer la résistance qui se trouve du côté du 0%. Dans cet exercice c'est la borne B.

$$R_b = R\% \cdot R_{pot.} = 0,76 \cdot 150 = 114 \Omega$$
- 2) On calcule la seconde résistance en faisant la différence entre la résistance totale du potentiomètre et celle obtenue au point 1.

$$R_a = R_{pot} - R_b = 150 - 114 = 36 \Omega$$

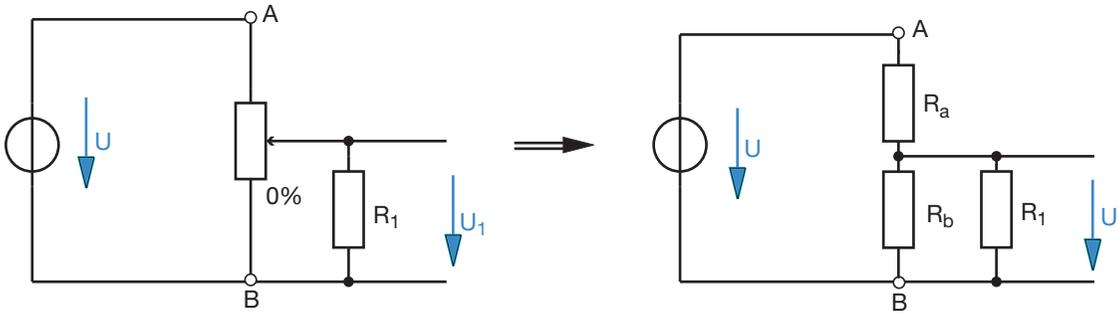
3) La suite se résout comme pour un diviseur de tension.

$$U_2 = \frac{U \cdot R_b}{R_a + R_b} = \frac{120 \cdot 114}{36 + 114} = 91,2 V$$



Exemple 3: Potentiomètre en charge.

Un potentiomètre de $200\ \Omega$ est réglé à 25%. Une résistance R_1 de $50\ \Omega$ est placée selon le schéma ci-dessous. Calculer la tension U_1 lorsque $U = 90\ \text{V}$



- 1) On commence par calculer la résistance qui se trouve du côté du 0%. Dans cet exercice c'est la borne B.

$$R_b = R\% \cdot R_{\text{pot.}} = 0,25 \cdot 200 = 50\ \Omega$$

- 2) On calcule la seconde résistance en faisant la différence entre la résistance totale du potentiomètre et celle obtenue au point 1.

$$R_a = R_{\text{pot.}} - R_b = 200 - 50 = 150\ \Omega$$

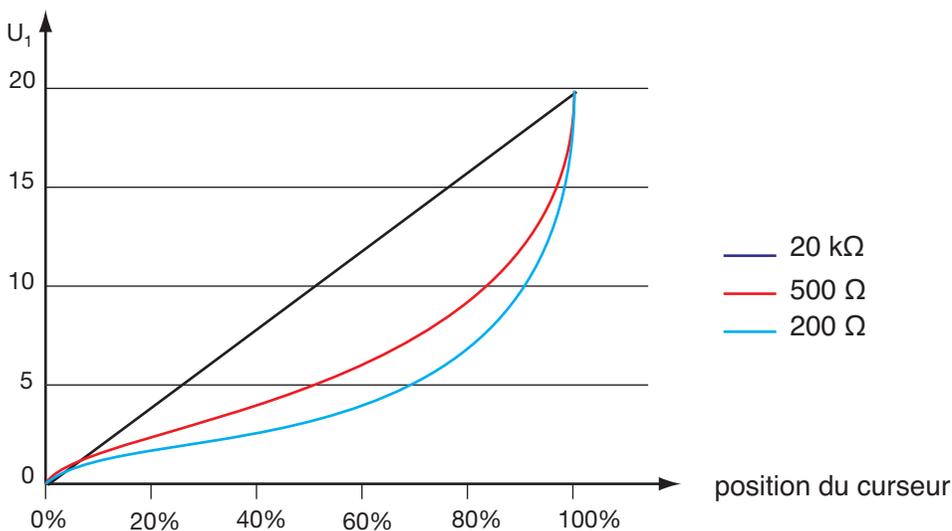
- 3) La suite se résout comme pour un circuit mixte. On calcule la résistance équivalente de R_b et R_1

$$R_{b1} = \frac{R_b \cdot R_1}{R_b + R_1} = \frac{50 \cdot 50}{50 + 50} = 25\ \Omega$$

On calcule la tension aux bornes de R_{b1} .

$$U_1 = \frac{U \cdot R_{b1}}{R_a + R_{b1}} = \frac{90 \cdot 25}{150 + 25} = 12,85\ \text{V}$$

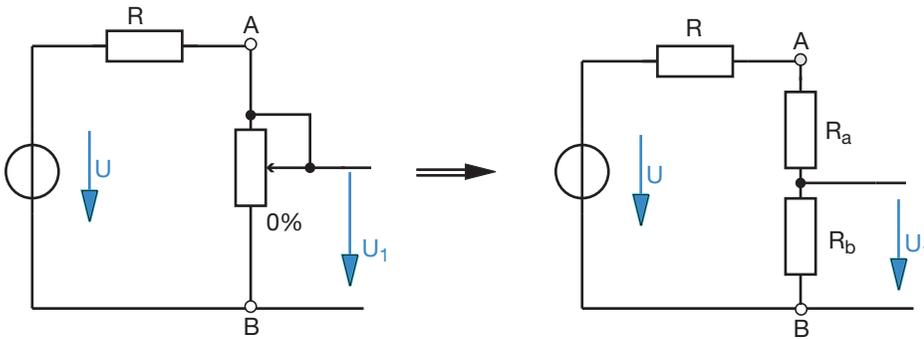
Représentation de l'évolution de la tension de sortie U_1 en fonction de la résistance de charge.



Exemple 4: Potentiomètre avec portion court-circuitée
 Un potentiomètre de 200 Ω est en série avec une résistance de 50 Ω.

Pour $U = 24 \text{ V}$:

- Calculer la tension U_1 lorsque le potentiomètre est réglé à 47%
- Calculer la tension U_1 lorsque le potentiomètre est réglé à 100%
- Calculer la tension U_1 et le courant de source lorsque le potentiomètre est réglé à 0%



- 1) La partie supérieure <<Ra>> du potentiomètre est court-circuitée. Il ne reste du potentiomètre que la résistance R_b .

Calcul de R_b :

$$R_b = R\% \cdot R_{\text{pot.}} = 0,47 \cdot 200 = 94 \text{ } \Omega$$

- 2) Calcul de la tension U_1 pour le potentiomètre réglé à 47%

$$U_1 = \frac{U \cdot R_b}{R + R_b} = \frac{24 \cdot 94}{50 + 94} = 15,7 \text{ V}$$

- 3) Calcul de la tension U_1 pour le potentiomètre réglé à 100%.

A 100%, $R_b =$ l'entier de la résistance du potentiomètre. $R_b = 200 \text{ } \Omega$. ($R_a = 0 \text{ } \Omega$)

$$U_1 = \frac{U \cdot R_b}{R + R_b} = \frac{24 \cdot 200}{50 + 200} = 19,2 \text{ V}$$

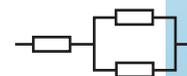
- 4) Calcul de la tension U_1 pour le potentiomètre réglé à 0%.

A 0%, $R_b = 0 \text{ } \Omega$, le potentiomètre est complètement court-circuité. La tension de sortie est égale au potentiel de la masse.

$$U_1 = 0 \text{ V}$$

- 5) Calcul du courant de source pour le potentiomètre réglé à 0%.

$$I_S = \frac{U}{R} = \frac{24}{50} = 480 \text{ mA}$$



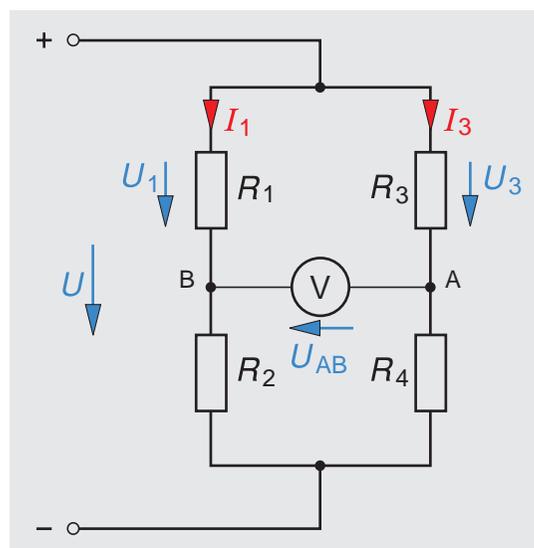
3) Couplage en pont appelé pont de Wheatstone

Les résistances R_1 et R_2 sont en série, ainsi que R_3 et R_4 .
Les deux groupes de résistances sont en parallèle sous la tension U .

La chute de tension $U_1 = R_1 \cdot I_1$

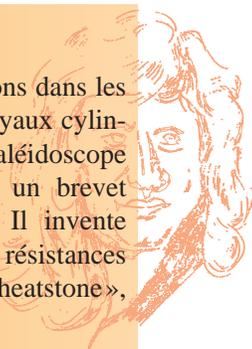
La chute de tension $U_3 = R_3 \cdot I_3$

Un voltmètre relié entre A et B indiquera la différence de potentiel entre ces deux points ou la différence entre les chutes de tension U_1 et U_3 .



Wheatstone sir Charles, 1802-1875.

Physicien anglais. Il étudie la transmission des sons dans les fils métalliques, les vibrations de l'air dans les tuyaux cylindriques et coniques. En 1837, il imagine le kaléidoscope phonique et invente le stéréoscope. Il dépose un brevet concernant un télégraphe électrique à cadran. Il invente ensuite, en 1844, un appareil de mesure des résistances électriques connu sous le nom de «pont de Wheatstone», ainsi que d'autres appareils électriques.



Exemple d'un couplage en pont

Soit les valeurs suivantes :

$R_1 = 20 \Omega$, $R_2 = 10 \Omega$, $R_3 = 30 \Omega$, $R_4 = 60 \Omega$ et $U = 18 \text{ V}$.
Déterminer la tension indiquée par le voltmètre.

Intensités des courants :

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{18}{20 + 10} = 0,6 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3 + R_4} = \frac{18}{30 + 60} = 0,2 \text{ A}$$

Chute de tension :

$$U_1 = R_1 \cdot I_1 = 20 \cdot 0,6 = 12 \text{ V}$$

$$U_3 = R_3 \cdot I_3 = 30 \cdot 0,2 = 6 \text{ V}$$

Le voltmètre indiquera : $U_{AB} = U_1 - U_3 = 12 - 6 = 6 \text{ V}$

Le potentiel de A est positif par rapport à celui de B.

Condition d'équilibre

Si le voltmètre indique 0 V, les potentiels de A et B sont au même niveau. Dès lors, un milliampèremètre sensible appelé galvanomètre relié entre A et B n'indique aucun courant.

Le pont est dit en équilibre lorsque le galvanomètre indique 0 A.

La chute de tension U_1 est égale à la chute de tension U_3 .
La chute de tension U_2 est égale à la chute de tension U_4 .

On pose les égalités suivantes :

$$R_1 \cdot I_1 = R_3 \cdot I_3$$

$$R_2 \cdot I_1 = R_4 \cdot I_3$$

Formule

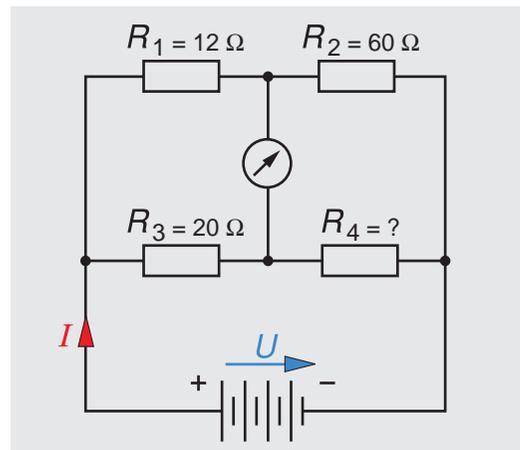
R_1 , R_2 , R_3 et R_4 résistances du pont en ohms [Ω]

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

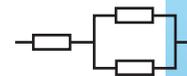
Exemple d'un couplage en pont équilibré

Quelle résistance R_4 faut-il monter pour obtenir l'équilibre ?

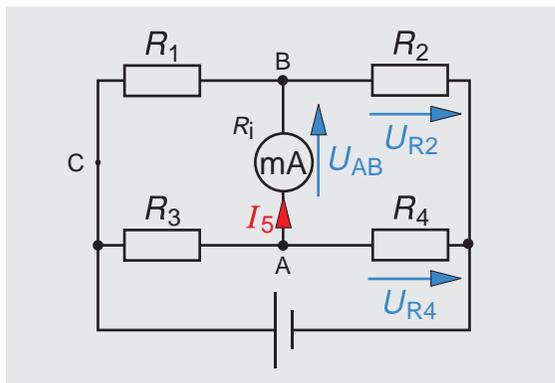
$$\text{Résistance } R_4: R_4 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} = \frac{60 \cdot 20}{12} = 100 \Omega$$



Pour en savoir plus ...



Exemple d'un couplage en pont non équilibré

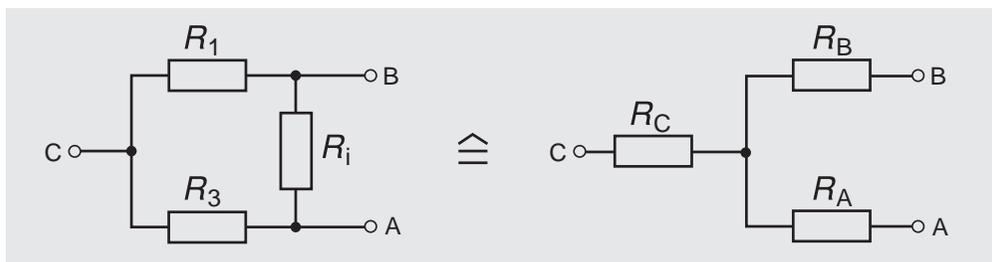


NB : le sens de I_5 est arbitraire.

Si ce pont n'est pas équilibré, alors $\frac{R_1}{R_2} \neq \frac{R_3}{R_4}$

Le potentiel de A n'est pas le même que celui de B, et un courant I_5 circule dans le milliampèremètre de résistance interne R_i . Pour déterminer ce courant, il faut calculer la différence de potentiel entre A et B. On peut utiliser les lois de Kirchhoff, mettre en équations le circuit et résoudre algébriquement (voir plus loin).

Une méthode plus simple consiste à dessiner un schéma équivalent, en transformant un couplage de trois résistances en triangle (par exemple : R_1 , R_3 et R_i) en un couplage de trois résistances en étoile.



avec :

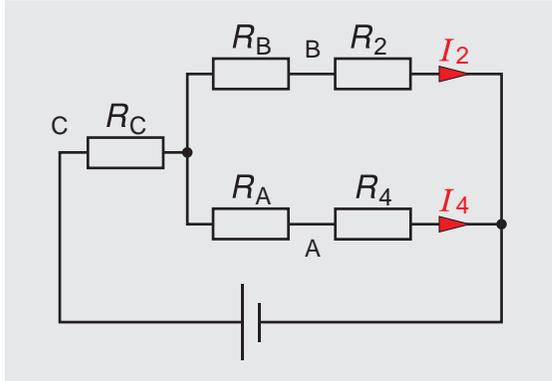
$$R_A = \frac{R_3 \cdot R_i}{R_1 + R_3 + R_i}$$

$$R_B = \frac{R_1 \cdot R_i}{R_1 + R_3 + R_i}$$

$$R_C = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3 + R_i}$$



Ce montage transformé devient :



Dans ce montage équivalent, on peut facilement calculer I_2 et I_4 , puis U_{R2} et U_{R4} .
 On revient ensuite au montage d'origine et on détermine $U_{AB} = U_{R4} - U_{R2}$.
 Puis enfin : $I_5 = U_{AB} / R_1$.

Remarque

Si on trouve $I_5 < 0$, cela signifie qu'il va de B vers A (et non de A vers B).

Lois de Kirchhoff

Loi des nœuds

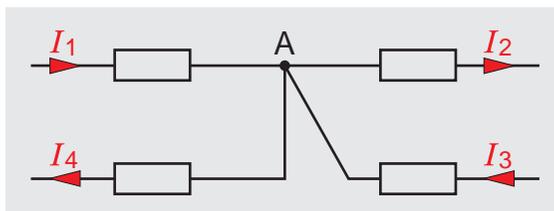
La somme algébrique des courants dans un nœud de circuit est nulle.

$$\sum_{\text{alg}} I = 0$$

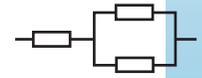
Un nœud de circuit est constitué par un ensemble d'au moins trois conducteurs reliés.

Cette loi est basée sur le principe de la conservation des charges électriques : les électrons circulant dans un circuit ne disparaissent pas et ne s'accumulent pas dans une portion du circuit.

Exemple de nœud :



Convention habituelle : $I > 0$ lorsqu'il entre dans le nœud.
 Pour le nœud A, la loi donne : $I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0$.

**Loi des mailles**

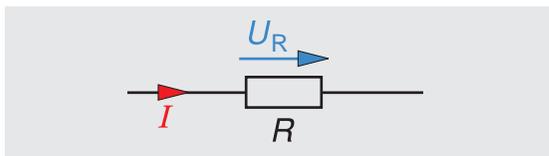
La somme algébrique des tensions le long d'une maille de circuit est nulle.

$$\sum_{\text{alg}} U = 0$$

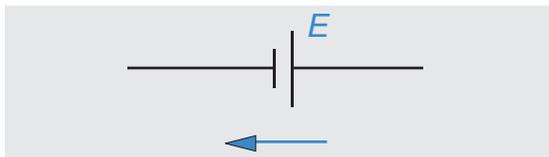
Une maille de circuit est constituée d'un parcours fermé. Cette loi est basée sur le principe de la conservation de l'énergie.

Convention habituelle pour les flèche de tension : la flèche est dessinée du potentiel le plus positif vers le potentiel le plus négatif, ce qui donne :

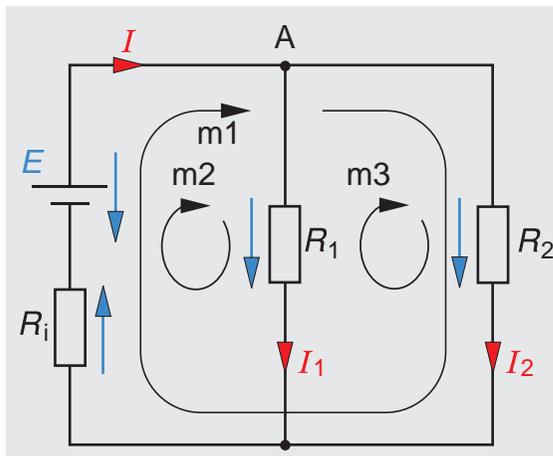
pour un récepteur : U_R dans le sens de I



pour un générateur : E du \oplus vers le \ominus



Exemple de circuit comportant des mailles :



Dans le circuit ci-dessus, on peut définir trois mailles m_1 à m_3 , dont les sens sont arbitraires.

La loi des mailles donne, en partant par exemple du point A :

$$m_1: + R_2 I_2 + R_i I - E = 0$$

$$m_2: + R_1 I_1 + R_i I - E = 0$$

$$m_3: + R_2 I_2 - R_1 I_1 = 0$$

Remarque

Les tensions sont comptées positivement si leur flèche est dans le sens de la maille choisie, négativement dans le cas contraire.



Utilisation des lois de Kirchhoff pour la mise en équations des circuits

La méthode proposée est la suivante : (il en existe d'autres)

- a) Indiquer dans chaque branche un nom et un sens de courant ; choisir le sens le plus probable (une branche est un ensemble de fils et de récepteurs en série, entre deux nœuds).
- b) Indiquer sur chaque élément la flèche de tension correspondante, selon la convention.
- c) Ecrire toutes les équations des nœuds, moins une.
- d) Compléter le système d'équations en écrivant les équations de quelques mailles différentes, afin que le système comporte autant d'équations que de courants inconnus.
- e) Résoudre algébriquement le système ainsi obtenu.

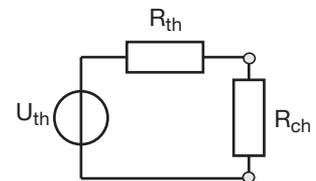
Remarque

Si la résolution donne pour un courant une valeur négative, cela signifie que le sens de ce courant est inversé par rapport au sens choisi au départ sur le schéma.

Méthode de Thévenin

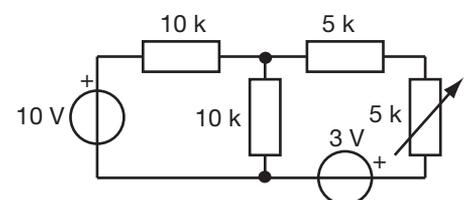
Cette méthode est un moyen de transformer un circuit quelconque en un circuit type plus simple et ainsi permettre la simplification du calcul ultérieur des courants et tensions dans une partie de celui-ci.

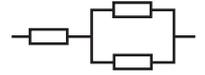
La méthode de Thévenin aboutit invariablement au circuit suivant soit une source de tension, une résistance série (correspond à la R_i de la source) et une résistance de charge. La résistance de charge est une des résistances du circuit initial pour laquelle nous voulons déterminer les valeurs de courant et de tension.



Pour illustrer les règles d'utilisation du théorème de Thévenin, nous nous appuyerons sur un exemple simple. Cette méthode est valable pour des circuits comportant des impédances quelconques, des sources de tension et/ou de courant.

Le circuit suivant comporte deux sources et un potentiomètre. Nous voudrions connaître les valeurs du courant dans le potentiomètre et de la tension à ses bornes pour plusieurs valeurs de résistance du potentiomètre.



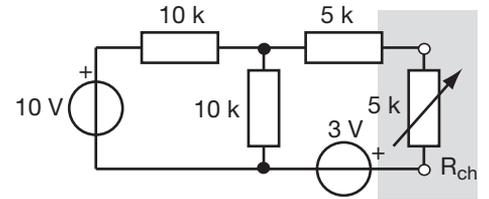


La méthode:

1. Identifier la charge.

Vous pouvez choisir pour R_{ch} n'importe laquelle des résistances du circuit. Nous saurons alors quel sera le courant et la tension pour cette résistance.

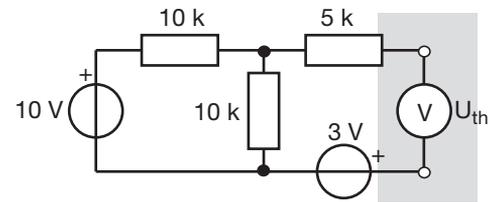
Dans le cas qui nous occupe, nous nous attachons à déterminer I et U pour notre potentiomètre, c'est donc lui qui sera R_{ch} .



2. Déconnecter la charge et mesurer/calculer la tension aux bornes.

Cette tension est la tension de Thévenin.

Dans notre cas, il n'y a plus de courant dans la résistance de 5 k, il reste donc une source (10 V) et un diviseur de tension par deux (donc 5 V), moins la source de 3 V (reste 2 V). Le voltmètre indique donc 2 V.



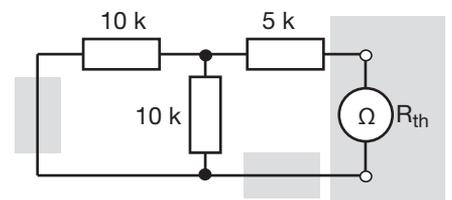
3. Enlever «les cercles» des alimentations et mesurer la résistance aux bornes.

Une source de tension:  devient un court-circuit: 

et une source de courant:  devient un circuit ouvert: 

Calcul/mesure de la résistance entre les bornes: c'est R_{th} .

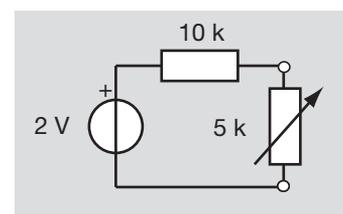
Dans notre exemple, il s'agit de 10 k en parallèle avec 10 k = 5 k en série avec 5 k = 10 k.



Résultat:

Voici donc le circuit équivalent de Thévenin vu des bornes du potentiomètre.

Son comportement vis à vis de celui-ci est strictement le même que le comportement du circuit avant transformation.

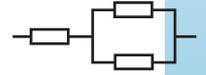




3.4 Exercices

1. Qu'appelle-t-on résistivité ?
2. Quels sont les symboles de grandeur et d'unité de la résistivité ?
3. Un fil de cuivre a-t-il plus ou moins de résistance qu'un fil d'argent de même section et de même longueur ?
4. De quels paramètres dépend la résistance d'un conducteur ?
5. Que devient la résistance d'un fil si :
 - a) on multiplie sa longueur par 4 tout en gardant le même diamètre ?
 - b) on divise son diamètre par 2 tout en gardant la même longueur ?
6. On dispose d'un fil conducteur de longueur l et de diamètre d . On le coupe en trois brins égaux que l'on tord très légèrement ensemble. Que vaut la résistance de ce « câble » en fonction de celle du fil de départ ?
7. Quelle est la résistance d'un fil de cuivre de 25 m de longueur et de $2,5 \text{ mm}^2$ de section ?
8. Calculer la résistance d'un fil d'argent de 0,2 m de long et de 0,3 mm de diamètre.
9. Les caractéristiques d'un fil sont les suivantes :
 $l = 355 \text{ cm}$ et $d = 1 \text{ mm}$.
 Lorsque ce fil est soumis à une tension de 12 V, l'intensité du courant est de 5,3 A. De quelle matière ce fil est-il constitué ?
10. Un récepteur est parcouru par un courant de 6,6 A sous 230 V. Son corps de chauffe est en alliage chromenickel et sa longueur est de 4,5 m. Calculer la section du fil et son diamètre.
11. Compléter le tableau suivant :

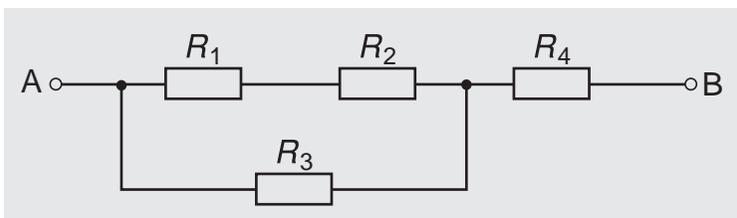
Matière	Résistivité	Longueur	Diamètre	Section	Résistance
	$[\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}]$	$[\text{m}]$	$[\text{mm}]$	$[\text{mm}^2]$	$[\Omega]$
Cuivre		78	1,2		
Cuivre				4	0,164
Aluminium		250		1,5	
	0,13		3		5,5



12. Que peut-on dire du courant dans un circuit série ?
13. Comment calcule-t-on la résistance totale dans un circuit série ?
14. Calculer la résistance équivalente de trois résistances en série de 3Ω , 6Ω et 9Ω .
15. Trois résistances $R_1 = 13 \Omega$, $R_2 = 16 \Omega$ et $R_3 = 90 \Omega$ sont placées en série sous une tension totale de 24 V . Calculer tous les courants et tensions de ces résistances.
16. Dans un circuit série comportant trois résistances, on mesure aux bornes de $R_2 = 6 \Omega$ une tension de 12 V . Calculer la tension d'alimentation si $R_1 = 4 \Omega$ et $R_3 = 122 \Omega$.
17. Qu'appelle-t-on « résistance additionnelle » ? Quels sont ses emplois ?
18. Calculer la résistance additionnelle qu'il faut placer en série avec une petite lampe marquée $U = 12 \text{ V}$ et $R = 500 \Omega$ pour qu'elle puisse être alimentée sous 30 V .
19. Calculer la résistance additionnelle d'un voltmètre dont les caractéristiques sont les suivantes :
 $U = 300 \text{ V}$ 150 divisions $I_{\max} = 2 \text{ mA}$ $R_i = 80 \Omega$
20. Qu'appelle-t-on « chute de tension en ligne » ?
21. Pourquoi faut-il prendre le double de la longueur de la ligne lorsque l'on calcule la chute de tension en ligne ?
22. Comment peut-on diminuer la chute de tension en ligne si celle-ci dépasse les valeur prescrites ?
23. On raccorde un récepteur marqué $U = 230 \text{ V}$ et $R = 10 \Omega$ au bout d'une ligne en cuivre de 15 m de longueur et de 6 mm^2 de section. Calculer la chute de tension en ligne (en volts et en %) si la tension d'alimentation au départ est de 230 V .
24. Un radiateur marqué $U = 230 \text{ V}$ et $R = 24,5 \Omega$ est raccordé au bout d'une ligne en cuivre de 100 m de longueur et de $1,5 \text{ mm}^2$ de section. Sachant que la tension au départ vaut 230 V , vérifier si la chute de tension est dans les limites prescrites. Corriger si nécessaire la section du fil.

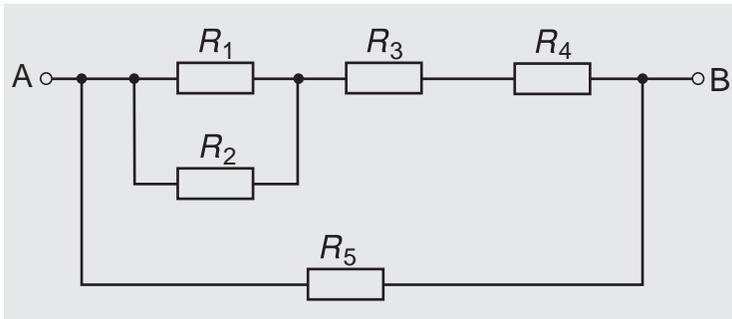


25. A quoi reconnaît-on un couplage « parallèle » de récepteurs ?
26. Comment calcule-t-on la résistance équivalente dans un circuit parallèle ?
27. Calculer la résistance équivalente de trois résistances en parallèle de $10\ \Omega$, $5,6\ \text{k}\Omega$ et $3000\ \Omega$.
28. Trois résistances $R_1 = 3\ \Omega$, $R_2 = 6\ \Omega$ et $R_3 = 9\ \Omega$ sont placées en parallèle sous une tension de $24\ \text{V}$. Calculer tous les courants et tensions de ces résistances.
29. Dix résistances de $5\ \Omega$ sont placées en parallèle. Calculer la résistance équivalente.
30. Dans un circuit comportant trois résistances en parallèle, on mesure un courant de $6\ \text{A}$ dans la résistance $R_2 = 10\ \Omega$. Calculer le courant total si $R_1 = 100\ \Omega$ et $R_3 = 1000\ \Omega$.
31. On branche sur une même boîte de dérivation une lampe de $529\ \Omega$ et un radiateur de $30\ \Omega$. Calculer le courant dans chaque récepteur si la tension est de $230\ \text{V}$. Indiquer l'intensité du fusible de la ligne alimentant la boîte de dérivation.
32. Qu'appelle-t-on « résistance shunt » et quels sont ses emplois ?
33. Calculer la valeur de la résistance shunt d'un ampèremètre dont les caractéristiques sont :
 $I_{\text{imax}} = 2\ \text{mA}$ $R_i = 80\ \Omega$ $I = 6\ \text{A}$
34. On doit fabriquer un shunt d'ampèremètre de $0,01\ \Omega$ avec un ruban de chrome-nickel. Le ruban doit avoir une longueur de $15\ \text{cm}$ et une épaisseur de $0,5\ \text{mm}$. Quelle largeur faut-il donner au ruban ?
35. Calculer R_{tot} , I_{tot} ainsi que tous les courants et tensions de ces résistances, si $U_{\text{AB}} = 48\ \text{V}$.



$$R_1 = 1\ \Omega \quad R_2 = 2\ \Omega \quad R_3 = 3\ \Omega \quad R_4 = 4\ \Omega$$

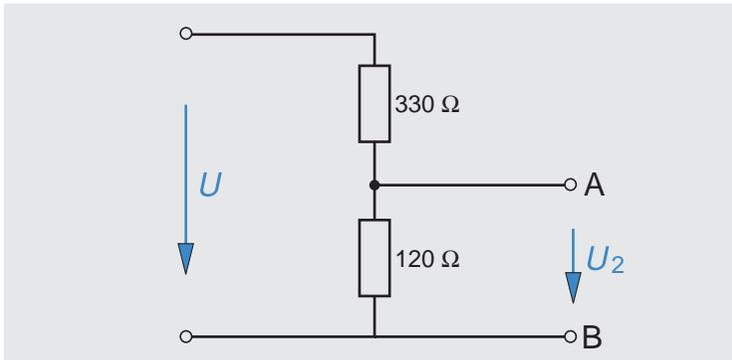
36. Calculer R_{tot} , I_{tot} ainsi que tous les courants et tensions de ces résistances, si $U_{AB} = 230 \text{ V}$.



$$R_1 = 15 \Omega \quad R_2 = 13 \Omega \quad R_3 = 100 \Omega$$

$$R_4 = 2 \Omega \quad R_5 = 52 \Omega$$

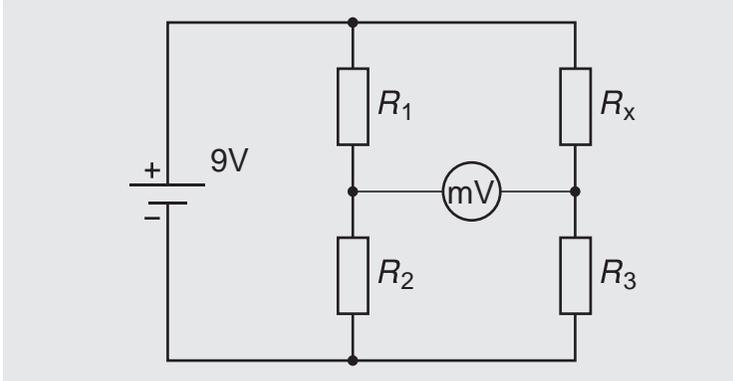
37. On réalise le montage suivant, appelé « diviseur de tension ».



- a) Calculer U_2 si $U = 15 \text{ V}$.
- b) On place ensuite une résistance R comme récepteur entre A et B.
Calculer U_2 si $R = 10 \Omega$, 100Ω ou 1000Ω .
Que remarque-t-on ?



38. Montage en pont équilibré :

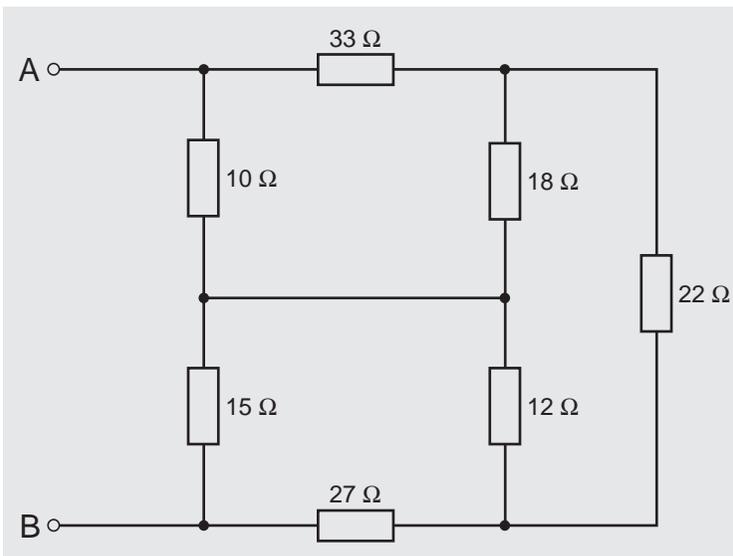


On donne : $R_1 = 150 \Omega$
 $R_2 = 680 \Omega$
 $R_3 = 560 \Omega$

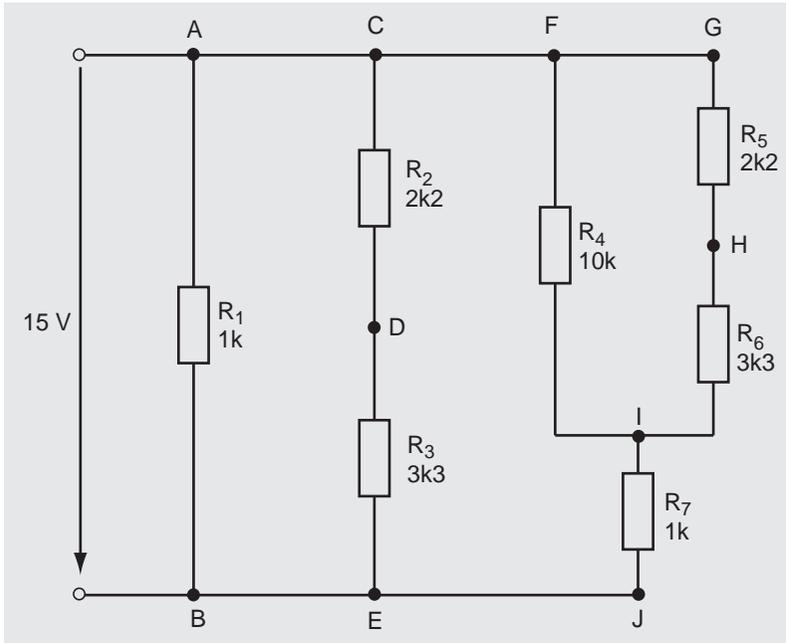
- Calculer R_x sachant que l'instrument indique zéro.
- Calculer les tensions aux bornes de R_2 et R_3 . Comparer ces deux tensions.

39. Transformation triangle - étoile :

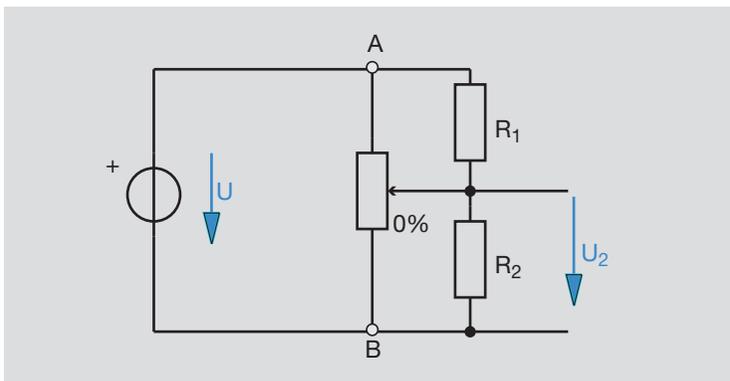
Calculer la résistance équivalente vue entre les points A et B.



40. Calculer les tensions et potentiels suivants:
 U_{AB} , U_{CD} , U_{DE} , U_{FI} , U_{GH} , U_{HI} , U_{IJ} , U_D , U_H et U_I



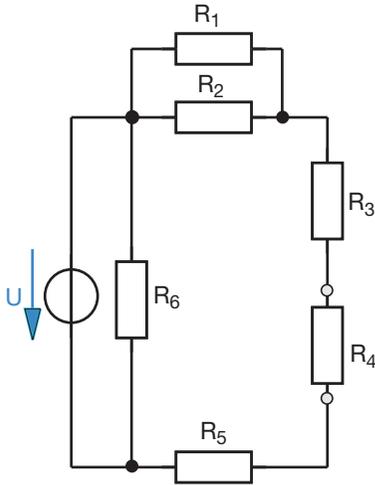
41. Un potentiomètre de 500Ω est réglé à 36%. Deux résistances, $R_1 = 80 \Omega$ et $R_2 = 90 \Omega$, sont branchées selon le schéma ci-dessous. Calculer la tension de sortie U_2 lorsque $U = 24 \text{ V}$.





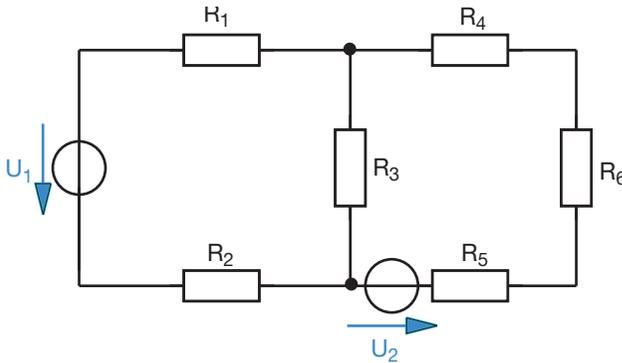
42. Calculer la source équivalente de Thévenin vu de R_4 pour le circuit suivant:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 1 \text{ k}\Omega \quad U = 12 \text{ V}$$



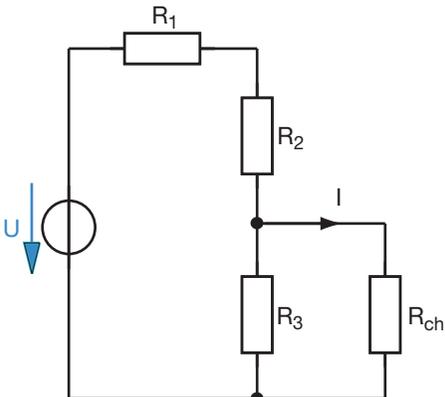
43. Déterminer la source équivalente de Thévenin vue de R_6 en deux étapes pour le circuit suivant:

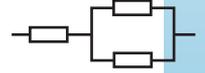
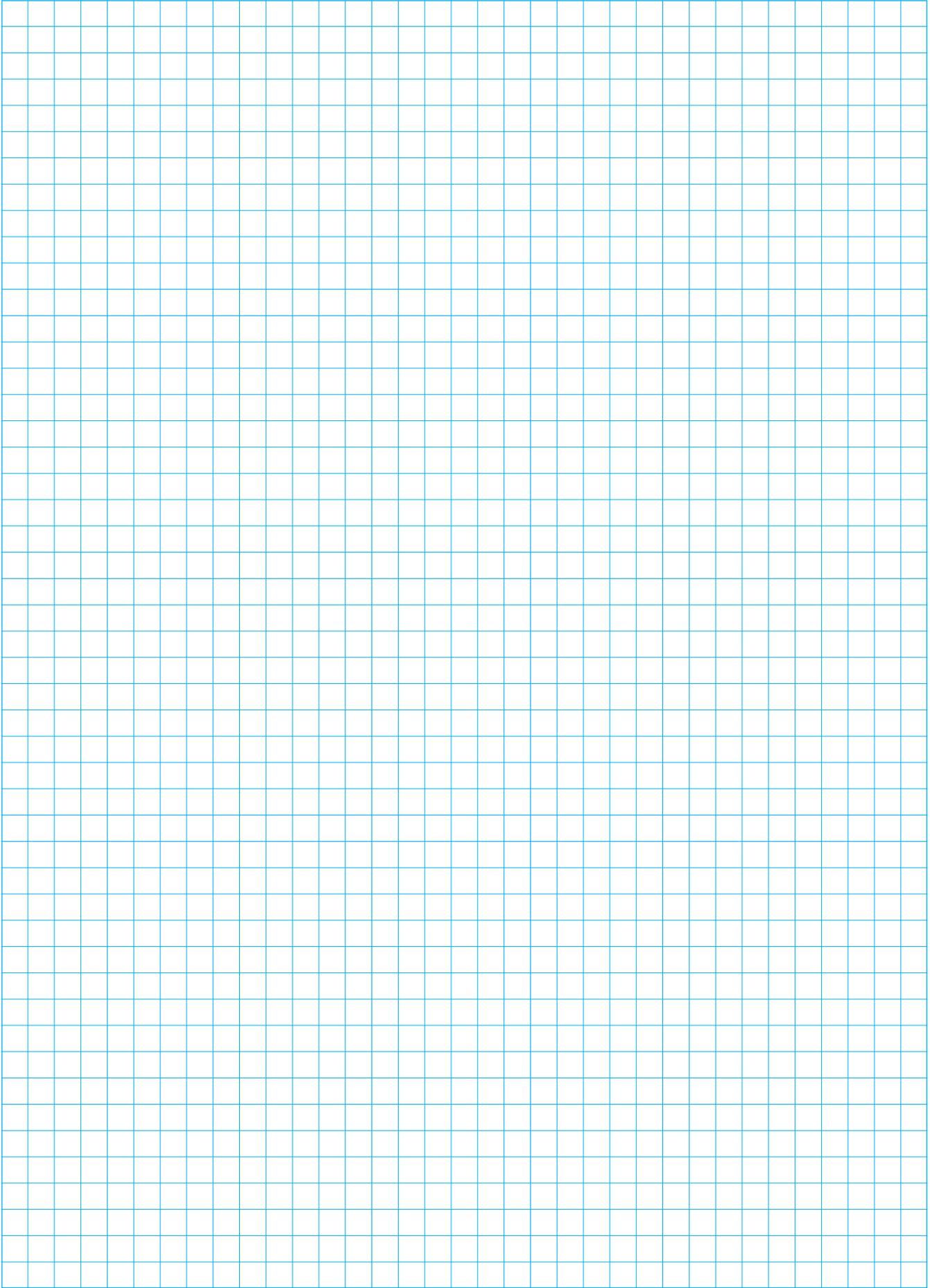
$$R_1 = 2.2 \text{ k}\Omega ; R_2 = 3.3 \text{ k}\Omega ; R_3 = 6.8 \text{ k}\Omega ; R_4 = 4.7 \text{ k}\Omega ; \\ R_5 = 1 \text{ k}\Omega ; R_6 = 8.2 \text{ k}\Omega ; U_1 = 10 \text{ V} ; U_2 = 8 \text{ V}$$

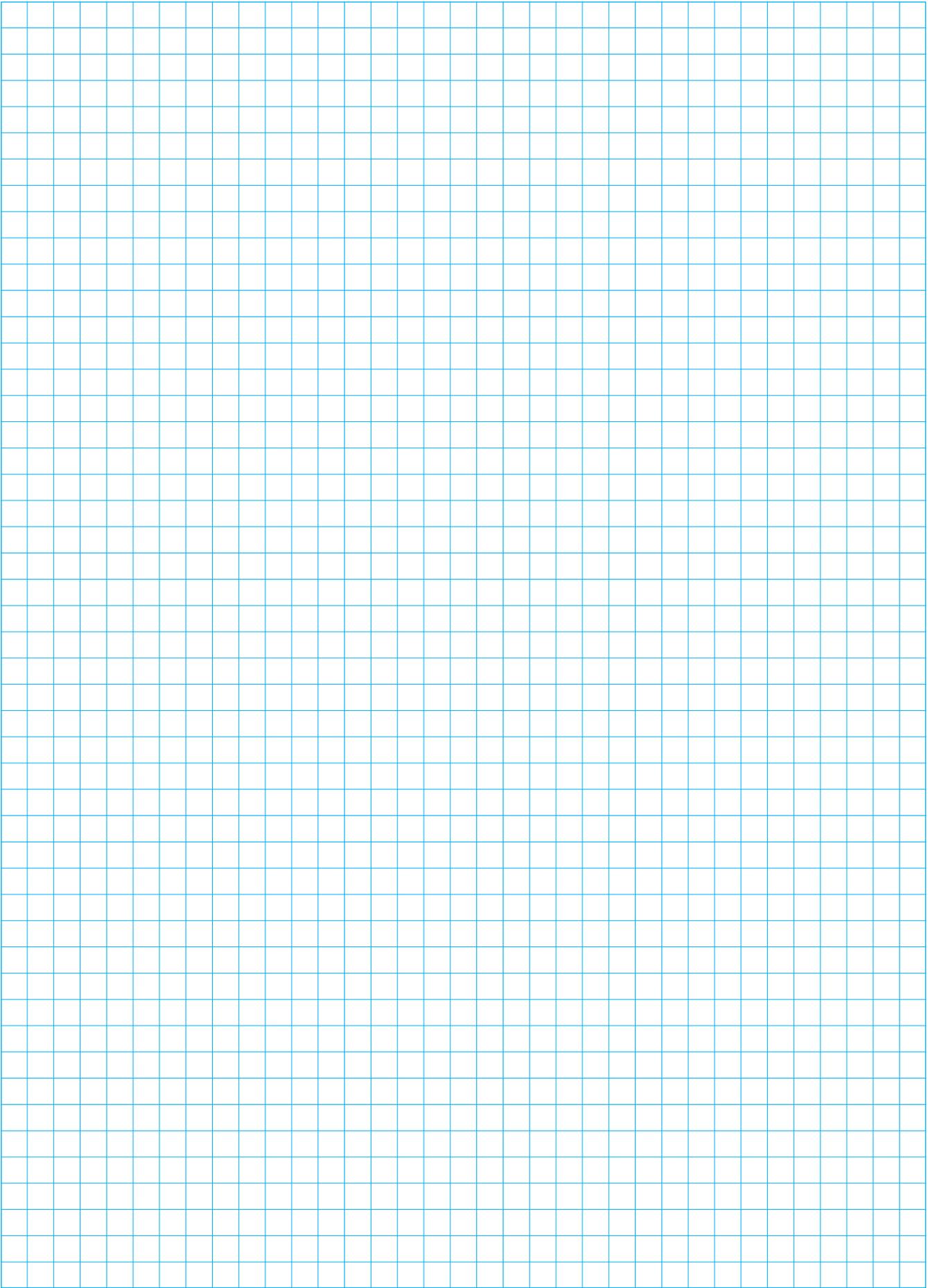


44. Calculer R_{ch} pour que le courant I soit égal à 1 mA

$$R_1 = 2,2 \text{ k}\Omega ; R_2 = 1 \text{ k}\Omega ; R_3 = 3.3 \text{ k}\Omega ; U = 15 \text{ V}$$







4.1 Masse

Définition de la grandeur

La masse d'un corps est la quantité de matière contenue dans ce corps.

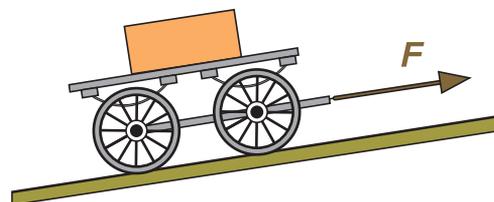
La masse d'un corps est indépendante du lieu, c'est-à-dire qu'un objet a la même masse sur la Terre que sur la Lune.

La masse m s'exprime en kilogrammes [kg]

4.2 Force

Définition de la grandeur

La force est la cause capable de modifier l'état de repos, de mouvement ou de déformation d'un corps.



La force F s'exprime en newtons [N]

Formule

F force en newtons [N]

m masse en kilogrammes [kg]

a accélération en mètres par seconde au carré [$\frac{m}{s^2}$]

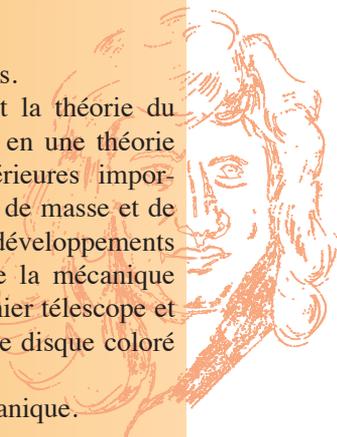
$$F = m \cdot a$$

Newton sir Isaac, 1642-1727.

Physicien, mathématicien et astronome anglais.

Son apport principal aux mathématiques est la théorie du calcul infinitésimal. En mécanique, il réunit en une théorie scientifique complète les acquisitions antérieures importantes. Newton définit clairement les notions de masse et de force. Sa théorie est à la base de tous les développements ultérieurs de la mécanique des fluides et de la mécanique céleste. En optique, il réalise en 1671 le premier télescope et s'intéresse à la théorie des couleurs. Il crée le disque coloré qui porte son nom.

On a donné son nom à l'unité de la force mécanique.

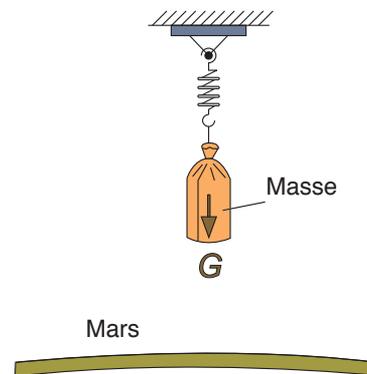
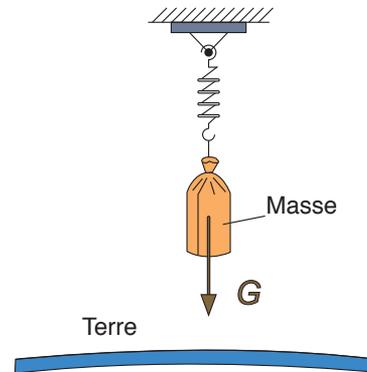


4.3 Force de pesanteur

Définition de la grandeur

La force de pesanteur d'un corps est la force exercée par l'attraction d'une planète ou d'un satellite sur ce corps. Chaque planète ou satellite exerce une force de pesanteur différente sur un corps.

Il s'agit d'un cas particulier de la loi précédente (2^{ème} loi de Newton) dans laquelle on remplace F par G et a par g .



La force de pesanteur G s'exprime en newtons [N]

$$G = m \cdot g$$

Formule

G force de pesanteur en newtons [N]

m masse en kilogrammes [kg]

g accélération de la pesanteur en mètre par seconde au carré [$\frac{m}{s^2}$]

Valeurs usuelles

Sur la Terre : $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Sur Mars : $g = 3,72 \text{ m/s}^2$

Sur la Lune : $g = 1,63 \text{ m/s}^2$

Exemple

Quelle sera la force de pesanteur d'une barre de cuivre de 8,2 kg sur la Terre et sur la Lune ?

Force de pesanteur sur la Terre :

$$G = m \cdot g = 8,2 \cdot 9,81 = \mathbf{80,4 \text{ N}}$$

Force de pesanteur sur la Lune :

$$G = m \cdot g = 8,2 \cdot 1,63 = \mathbf{13,4 \text{ N}}$$

4.4 Energie

Définition de la grandeur

On appelle énergie toute cause capable de produire du travail.

L'énergie W s'exprime en joules [J]

L'énergie peut se présenter sous différentes formes. Ces différentes énergies peuvent se transformer d'une forme à une autre.

Nous ne pouvons donc ni créer, ni détruire de l'énergie. Dans les transformations d'énergie, une partie de celle-ci se convertit toujours en chaleur.

Par exemple, dans une lampe de poche, l'énergie chimique de la pile se transforme en énergie électrique puis lumineuse et thermique.

Joule James Prescott, 1818-1889.

Physicien anglais. Il étudia l'échauffement des conducteurs par le passage du courant électrique, et énonça en 1841 la loi qui porte son nom. L'année suivante, il détermina grâce à une expérience célèbre, l'équivalent mécanique de la calorie. Il effectua ensuite de nombreuses expériences dans le domaine de la théorie cinétique des gaz.

On a donné son nom à l'unité de l'énergie.



On rencontre, entre autres, les énergies suivantes :

L'énergie mécanique ou travail

C'est l'énergie fournie par un corps en mouvement. Elle peut se présenter elle-même sous deux formes :

- l'énergie cinétique est l'énergie due au mouvement ; par exemple : un véhicule en marche, l'eau qui tombe dans une conduite et qui actionne une turbine ;
- l'énergie potentielle est une énergie mise en réserve pour pouvoir être utilisée au moment voulu ; par exemple : l'eau retenue dans un barrage fournit une énergie cinétique lorsqu'on ouvre les vannes ou une automobile arrêtée sur une pente se met en mouvement lorsqu'on desserre ses freins.



L'énergie chimique

C'est l'énergie sous forme chimique capable de se transformer en énergie électrique ; par exemple : une pile alimente une lampe.



L'énergie solaire

C'est l'énergie sous forme de radiations capable de se transformer en énergie électrique ou thermique; par exemple: un générateur à cellules photovoltaïques, un four solaire.



L'énergie nucléaire

C'est l'énergie sous forme de fission nucléaire capable de se transformer en énergie thermique; par exemple: le réacteur des centrales nucléaires.



L'énergie électrique

C'est une énergie qui est obtenue à partir d'une autre forme d'énergie. Elle est produite à l'instant même où elle est consommée, elle n'est donc pas en réserve.



Les réserves d'énergie

L'augmentation rapide de la consommation d'énergie dans le monde épuise rapidement certaines réserves. C'est pourquoi on fait la différence entre les énergies non-renouvelables et renouvelables.

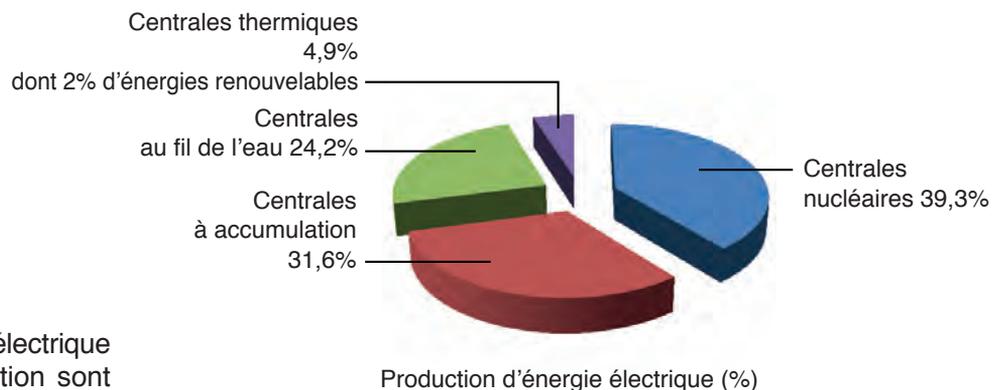
Une énergie non renouvelable est une énergie qui est consommée plus rapidement qu'elle n'est naturellement créée. Les différents types d'énergies non-renouvelables sont:

- L'énergie fossile (charbon, gaz naturel, pétrole, etc.)
- L'énergie nucléaire (uranium, thorium)

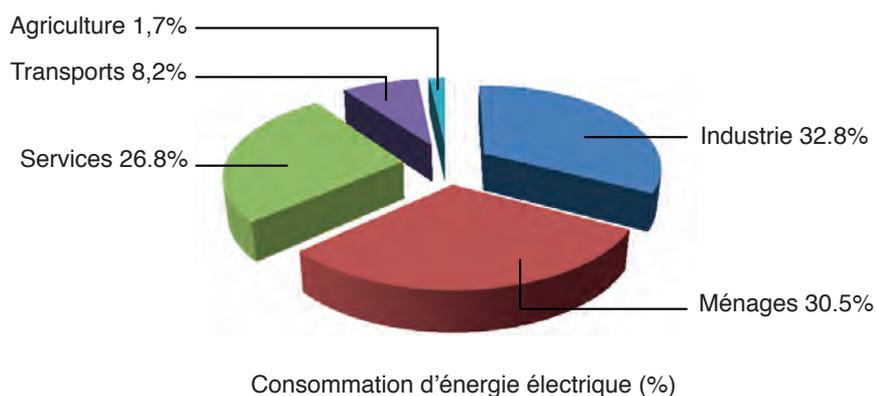
Une énergie renouvelable est une énergie dont les réserves ne s'épuisent pas lorsqu'elle est exploitée par l'homme. Elle doit se former plus rapidement qu'on ne l'utilise. Les différents types d'énergies renouvelables sont:

- Energie solaire
 - Énergie solaire thermique
 - Énergie photovoltaïque
- Energie éolienne (production d'électricité, pompage d'eau, recharge de batteries, etc.)

- Energie hydraulique (énergie gravitationnelle, cycle de l'eau, marée, vagues, etc.)
- Energie géothermique (peu profonde à basse température, profonde à haute température, etc.)
- Biomasse (combustion, production de gaz, extraction d'huiles, etc.)

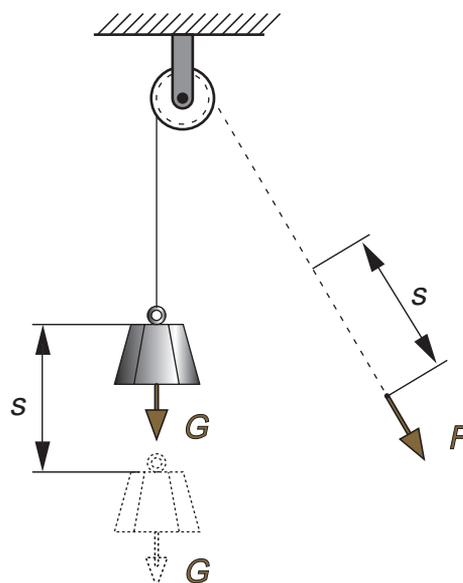


La production d'énergie électrique ainsi que sa consommation sont illustrées par les deux figures ci-contre pour l'année 2009.



4.5 Energie mécanique ou travail

On dit qu'une force fournit un travail quand son point d'application se déplace sur la ligne d'action de cette force. Pour exprimer l'énergie mécanique, on utilise le terme de travail.



Formules

W travail en joules [J]

F force en newtons [N]

s déplacement selon la direction de la force en mètres [m]

G force de pesanteur en newtons [N]

$$W = F \cdot s$$

$$W = G \cdot s$$

Exemple

Déterminer le travail que fournit un apprenti qui soulève à une hauteur de 0,5 m sa caisse à outils d'une masse de 11,5 kg.

Force de pesanteur: $G = m \cdot g = 11,5 \cdot 9,81 = 113 \text{ N}$

Travail: $W = G \cdot s = 113 \cdot 0,5 = 56,5 \text{ J}$

En savoir plus...



On peut utiliser, pour calculer le travail d'une force, une relation plus générale faisant intervenir le produit scalaire des vecteurs \vec{F} et \vec{s}

W travail effectué par la force [J]

\vec{F} vecteur force

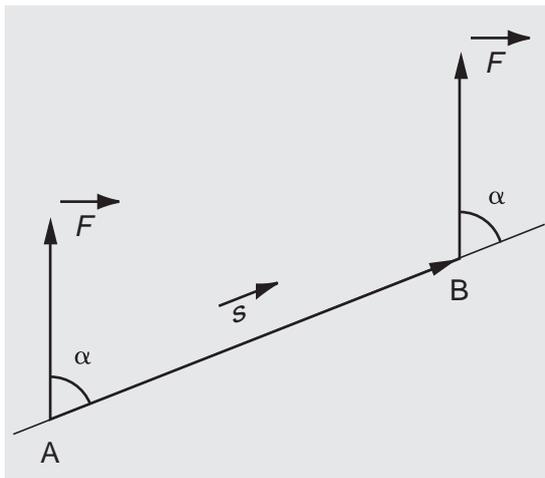
\vec{s} vecteur représentant le déplacement du point d'application de la force

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s}$$

Cette relation peut s'appliquer à n'importe quel cas de déplacement d'une force.

Exemple

La force \vec{F} a déplacé son point d'application de A vers B. Le déplacement est donné par le vecteur \vec{s} .



Travail effectué :

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s} = \|\vec{F}\| \cdot \|\vec{s}\| \cdot \cos \alpha$$

$\|\vec{F}\|$ module ou amplitude de \vec{F} [N]

$\|\vec{s}\|$ module ou amplitude de \vec{s} [m]

α angle entre \vec{F} et \vec{s} [°]

Remarques

- Si $\alpha > 90^\circ$, le travail W de la force \vec{F} est négatif.
- On peut montrer que la forme du trajet entre A et B n'a pas d'importance. Un trajet courbe serait plus difficile à calculer mais donnerait le même résultat.
- Dans le cas particulier où $\alpha = 0$, on trouve $W = F \cdot s$

4.6 Puissance mécanique

Définition de la grandeur

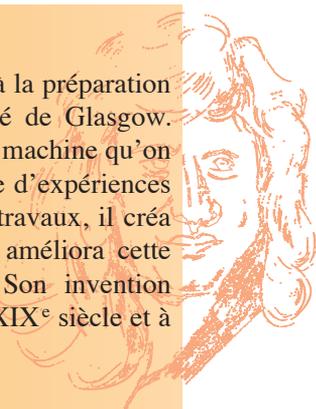
La puissance d'une machine est le travail qu'elle effectue chaque seconde.

La puissance P s'exprime en watts [W]

Watt James, 1736-1819.

Ingénieur et mécanicien écossais. Il travailla à la préparation d'instruments et d'appareils pour l'université de Glasgow. Intrigué par le mauvais fonctionnement d'une machine qu'on lui demandait de réparer, il entreprit une série d'expériences sur la vaporisation de l'eau. Après de longs travaux, il créa la machine à vapeur qui porte son nom. Il améliora cette machine et déposa de nombreux brevets. Son invention ouvrit la route à la révolution industrielle du XIX^e siècle et à l'ère de la vapeur.

On a donné son nom à l'unité de la puissance.



Formule

P puissance en watts [W]

W travail en joules [J]

t temps en secondes [s]

$$P = \frac{W}{t}$$

Remarque

La relation ci-contre donne en réalité la puissance moyenne pendant le temps t .

Exemple

Une machine soulève 110 kg en 3 minutes et 20 secondes sur une hauteur de 15 m.
Calculer la puissance de la machine.

Force de pesanteur: $G = m \cdot g = 110 \cdot 9,81 = 1079 \text{ N}$

Travail: $W = G \cdot s = 1079,10 \cdot 15 = 16185 \text{ J}$

Puissance: $P = \frac{W}{t} = \frac{16185}{200} = 81 \text{ W}$

4.7 Energie électrique

La tension aux bornes d'un circuit fermé provoque un courant, donc un mouvement d'électrons.

Le passage du courant dans un récepteur alimenté sous une tension pendant un temps donné est appelé énergie électrique.

Définition de l'unité

Le joule est l'énergie dissipée par une résistance parcourue par un courant de un ampère sous une tension de un volt pendant une seconde.

L'énergie électrique W
s'exprime en joules [J]

L'énergie électrique s'exprime dans la pratique en kilowattheures [kWh].

Formule

W énergie en joules [J]

U tension en volts [V]

I intensité du courant en ampères [A]

t temps en secondes [s]

ou

W énergie en wattheures [Wh]

U tension en volts [V]

I intensité du courant en ampères [A]

t temps en heures [h]

$$W = U \cdot I \cdot t$$

Correspondance d'unités

$$1 \text{ kWh} \hat{=} 3\,600\,000 \text{ J} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ J} \hat{=} 0,00000028 \text{ kWh} = 0,28 \cdot 10^{-6} \text{ kWh} = 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ Wh}$$

Exemple

Une lampe raccordée sous 230 V et parcourue par un courant de 0,435 A est allumée pendant 1 heure.

Calculer l'énergie consommée par la lampe, en J et en kWh.

Energie en J: 1 h $\hat{=} 3600$ s

$$W = U \cdot I \cdot t = 230 \cdot 0,435 \cdot 3600 = 360\,000 \text{ J} = \mathbf{360 \text{ kJ}}$$

Energie en kWh: 1 kWh $\hat{=} 3\,600\,000$ J

$$W = \frac{3,6 \cdot 10^5}{3,6 \cdot 10^6} = \mathbf{0,1 \text{ kWh}}$$

4.7.1 Mesure de l'énergie

L'énergie électrique est enregistrée par un compteur. Le compteur électrique mesure des kilowattheures [kWh].

Le disque du compteur est mis en rotation par l'alimentation des deux bobines tension et courant.

La bobine tension se raccorde en parallèle sur la ligne comme un voltmètre. La bobine courant se raccorde en série dans la ligne comme un ampèremètre.

Le temps est donné par la durée de rotation du disque. La constante marquée sur le compteur indique le nombre de tours du disque pour une consommation de 1 kWh.

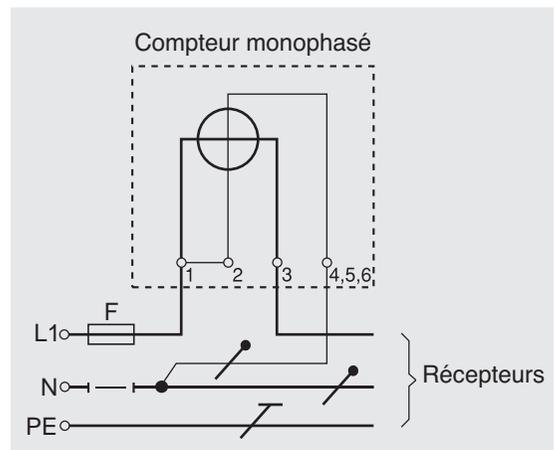
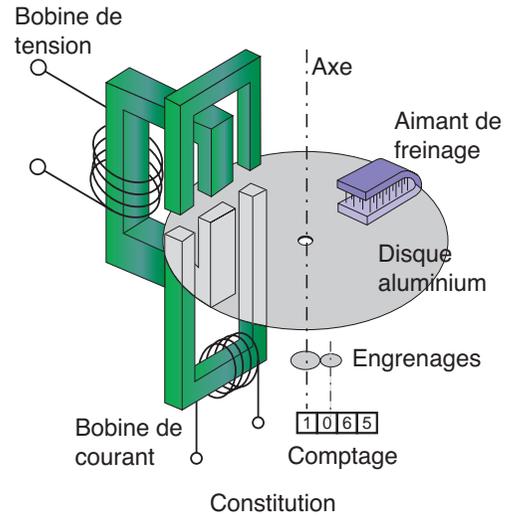


Schéma de raccordement



Compteur d'énergie

4.8 Puissance électrique

Définition de la grandeur

La puissance d'une machine est l'énergie qu'elle transforme chaque seconde.

Définition de l'unité

Le watt est la puissance d'une machine transformant une énergie de un joule chaque seconde.

Formules

P puissance en watts [W]

W énergie en joules [J]

t temps en secondes [s]

ou

P puissance en watts [W]

W énergie en wattheures [Wh]

t temps en heures [h]

U tension en volts [V]

I intensité du courant en ampères [A]

Par transformation avec la loi d'Ohm, on obtient :

R résistance en ohms [Ω]

La puissance P s'exprime en watts [W]

$$P = \frac{W}{t}$$

$$P = U \cdot I$$

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

$$P = R \cdot I^2$$

Valeurs usuelles

Les indications se trouvant sur les plaquettes signalétiques des moteurs et des générateurs se rapportent à la puissance débitée ou utile désignée par P_2 .

Pour les lampes, les appareils thermiques, les appareils électroménagers et l'outillage électrique, il s'agit de la puissance absorbée désignée par P_1 .

Perceuse : environ 500 W (P_1)

Lampe : 15 à 1000 W (P_1)

Cuisinière : environ 8 kW (P_1)

Moteur d'ascenseur : environ 10 kW (P_2)

Exemple 1

On a relevé sur un compteur électrique une consommation de 19 kWh pour une durée de 5 h 15 min.
Quelle est la puissance du récepteur ?

Temps: $t = 5 \text{ h } 15 \text{ min} \hat{=} 5,25 \text{ h}$

Puissance: $P = \frac{W}{t} = \frac{19}{5,25} = \mathbf{3,62 \text{ kW}}$

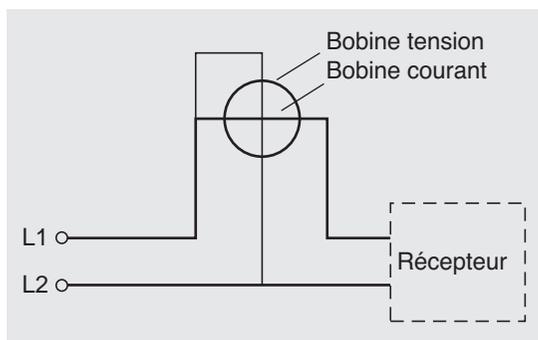
Exemple 2

Sur une lampe, il est indiqué 250 V et 100 W.
Quel est le courant parcourant la lampe ?

Intensité du courant: $I = \frac{P}{U} = \frac{100}{250} = \mathbf{0,4 \text{ A}}$

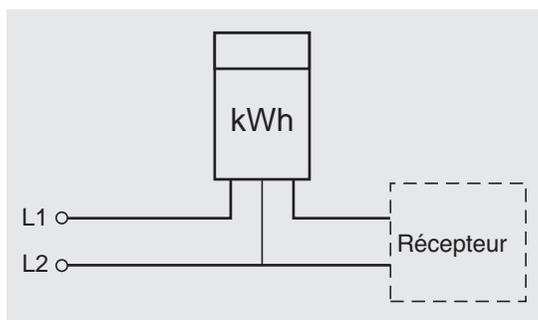
4.8.1 Mesure de la puissance

La puissance est mesurée par un wattmètre.
Le wattmètre est composé d'une bobine tension à raccorder en parallèle sur la ligne et d'une bobine courant à raccorder en série sur la ligne.
Le wattmètre est surtout utilisé en alternatif.



Calcul de la puissance à l'aide d'un compteur

Le compteur enregistre une énergie.
La constante c , marquée sur le compteur, indique le nombre de tours du disque pour une consommation de 1 kWh.
Si l'on connaît la constante du compteur et que l'on mesure le nombre de tours du disque pendant un temps donné, il est possible de calculer la puissance du récepteur.



Formule

- P puissance en kilowatts [kW]
- n nombre de tours pendant le temps t
- c constante du compteur en nombre de tours par kilowattheure [$\frac{\text{tr}}{\text{kWh}}$]
- t temps [s]

$$P = \frac{3600 \cdot n}{c \cdot t}$$

Remarque

Pour les compteurs électroniques avec affichage numérique, la constante de temps c est donnée en nombre d'impulsions par kWh, p. ex. : $c = 1000 \text{ imp/kWh}$ et n représente le nombre d'impulsions pendant le temps t (diode clignotante).

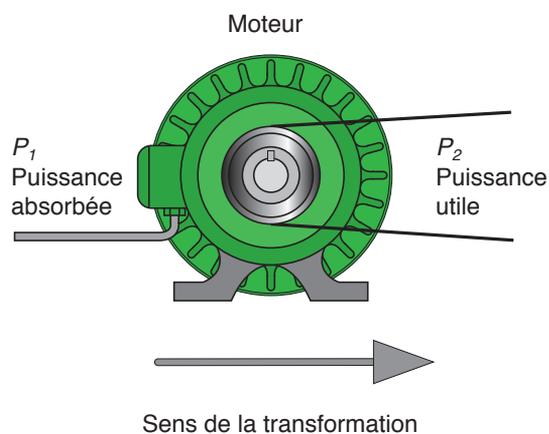
Exemple

Un corps de chauffe est raccordé à un compteur dont la constante $c = 1200 \text{ tr/kWh}$.
On a compté 16 tours de disque en 40 s.
Quelle est la puissance absorbée par l'appareil ?

Puissance: $P = \frac{3600 \cdot n}{c \cdot t} = \frac{3600 \cdot 16}{1200 \cdot 40} = 1,2 \text{ kW}$

4.9 Rendement

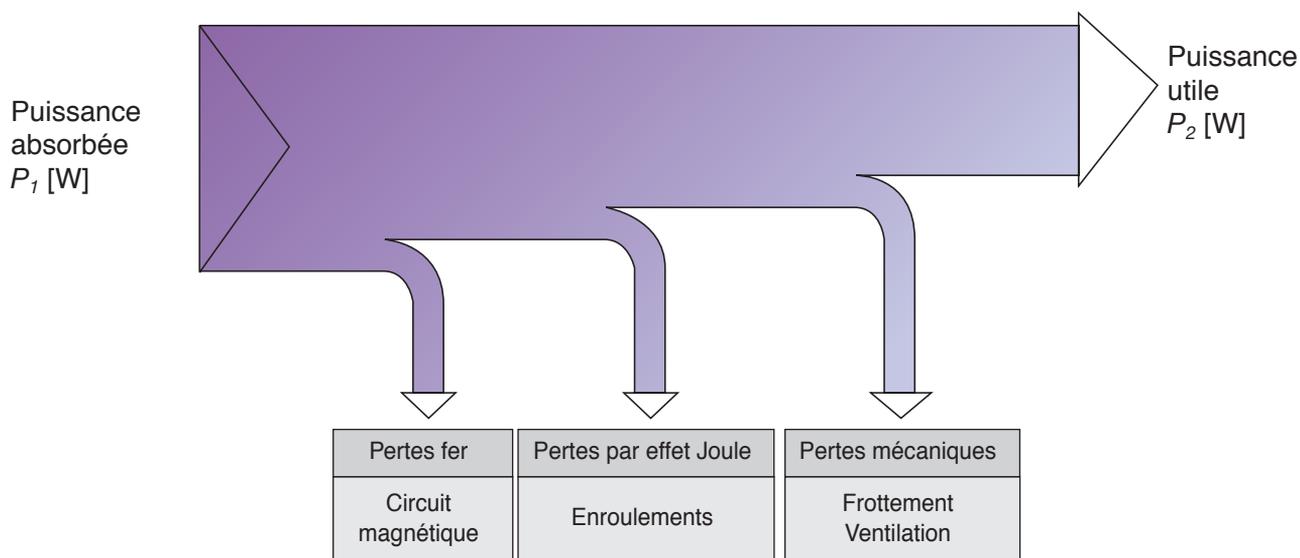
Chaque transformation d'énergie donne lieu à des pertes. C'est-à-dire que l'énergie (ou la puissance) absorbée par le récepteur est toujours plus grande que l'énergie (ou la puissance) utile du récepteur.



Définition de la grandeur

Le rendement exprime le rapport entre l'énergie (ou la puissance) débitée ou utile et l'énergie (ou la puissance) absorbée.

Le rendement η (êta) n'a pas d'unité mais peut être indiqué en %



Formules η rendement [-] P_2 puissance débitée ou utile en watts [W] P_1 puissance absorbée en watts [W] W_2 énergie débitée ou utile en joules [J] W_1 énergie absorbée en joules [J] ΔP pertes de puissance en watts [W] ΔW pertes d'énergie en joules [J]

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

$$\eta = \frac{W_2}{W_1}$$

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

$$\Delta W = W_1 - W_2$$

Remarque

Le rendement est toujours plus petit que 1 (ou que 100%).

Valeurs usuelles

Lampes à incandescence : environ 5%
(95% en chaleur)

Moteurs électriques : 80 à 90%

Transformateurs de distribution : 99 à 99,99%

Exemple

La plaque signalétique d'un moteur indique 8,2 kW.

Il absorbe une puissance de 10 kW.

Quel est son rendement et la perte de puissance ?

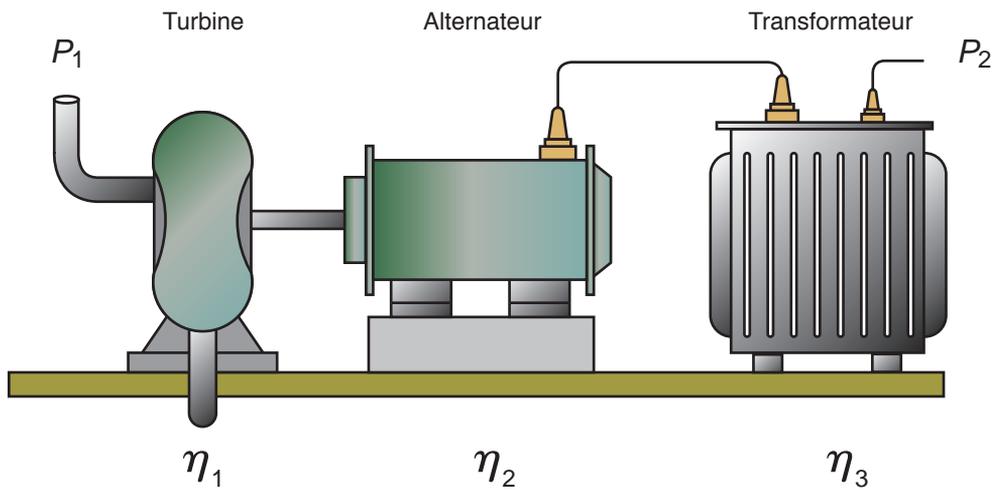
Rendement : $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{8,2}{10} = 0,82 \hat{=} 82\%$

Perte : $\Delta P = P_1 - P_2 = 10 - 8,2 = 1,8 \text{ kW}$

4.9.1 Rendement d'un groupe de machines

Lorsque plusieurs machines se succèdent, le rendement global de l'ensemble est donné par le produit des rendements des différentes machines.

Le rendement global de l'ensemble peut être aussi donné par le rapport entre la puissance débitée ou utile de la dernière machine et la puissance absorbée par la première machine.



Formules

η rendement [-]

P_2 puissance débitée ou utile en watts [W]

P_1 puissance absorbée en watts [W]

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \dots$$

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

Exemple

Calculer le rendement global d'un alternateur de $\eta_1 = 0,92$ raccordé à un transformateur de $\eta_2 = 0,99$ raccordé à un moteur de $\eta_3 = 0,88$.

Rendement global :

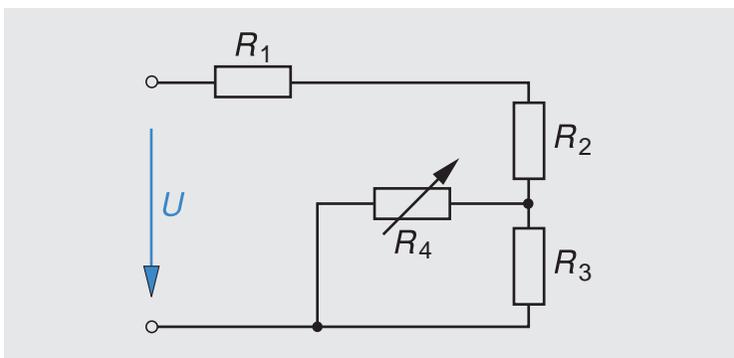
$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = 0,92 \cdot 0,99 \cdot 0,88 = \mathbf{0,8 \hat{=} 80\%}$$

4.10 Exercices

1. Citer trois formes d'énergie différentes.
2. A partir de quelles sources énergétiques produit-on l'énergie électrique en Suisse et quelles sont les parts respectives ?
3. Une installation hydro-électrique alimente une région. Expliquer les différentes étapes de transformation de l'énergie, en partant du barrage et en terminant à une lampe dans un appartement.
4. Quels sont les symboles de grandeur et d'unité de l'énergie ?
5. Quelle est l'unité pratique de l'énergie électrique ?
6. Quel est le prix approximatif de cette unité d'énergie ?
7. Comment s'appelle l'appareil qui mesure l'énergie électrique ?
8. Qu'indique la constante c sur un compteur ?
9. Un radiateur électrique de 2000 W fonctionne pendant 8 heures. Quelle est l'énergie consommée ?
10. L'énergie absorbée par un appareil est de 7,6 kWh. Quelle est l'intensité du courant et la valeur du fusible si l'appareil a fonctionné de 8 h à 14 h sous une tension de 230 V ? Calculer aussi sa résistance.
11. Qu'est-ce que la puissance électrique ?
12. Quels sont les symboles de grandeur et d'unité de la puissance ?
13. On lit sur la plaquette signalétique d'un radiateur $P = 1200$ W. De quelle puissance s'agit-il ?
14. Comment s'appelle l'appareil qui mesure la puissance ?
15. La consommation d'un appareil est de 756 MJ pendant 3 heures et 20 minutes. Quelle est sa puissance ?
16. Un ampèremètre placé sur le conducteur de phase alimentant un radiateur monophasé indique 4 A. Quelle est la puissance du récepteur si la tension est de 228 V ?



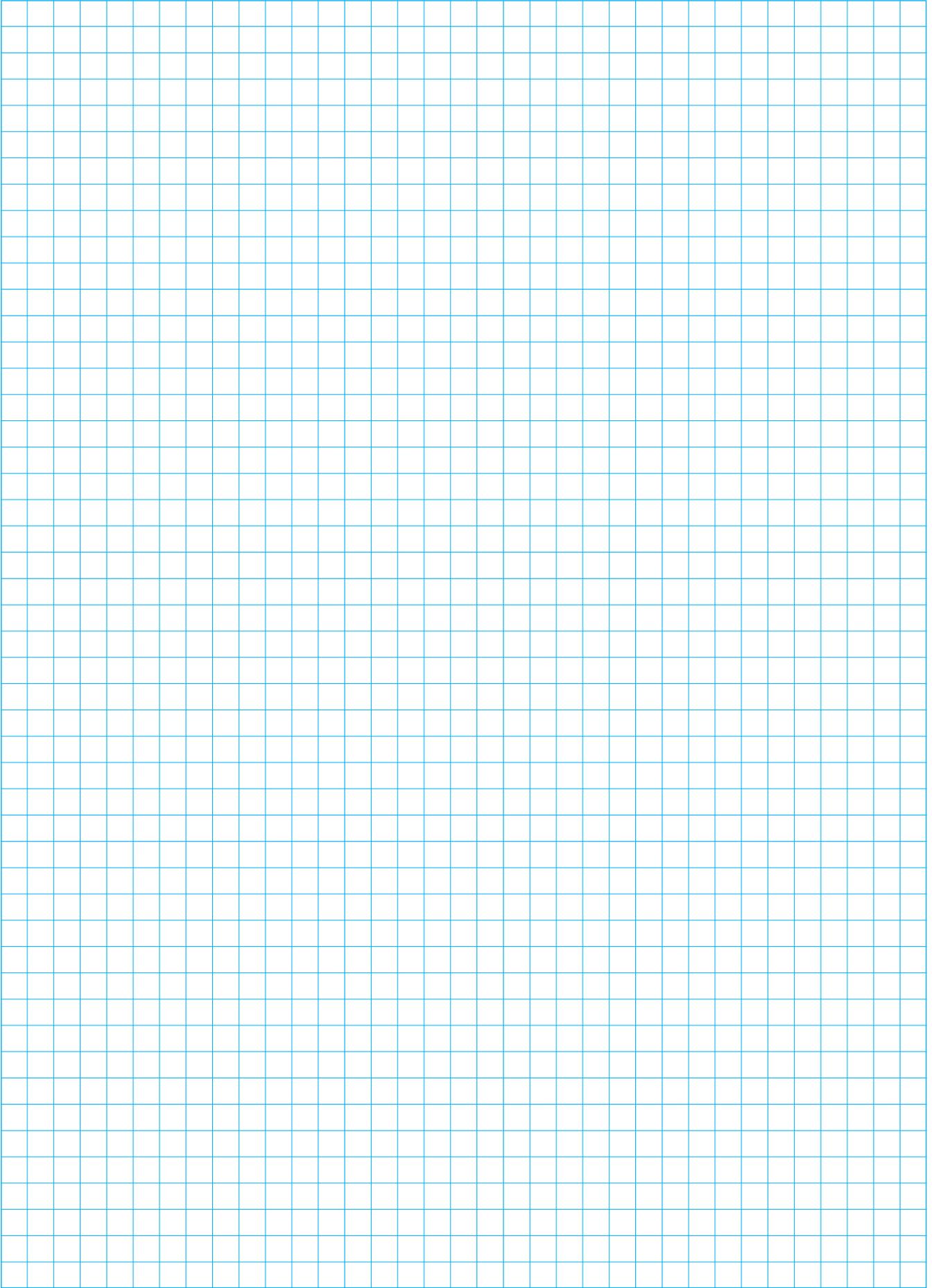
17. Une plaque signalétique de cuisinière indique $P = 1500$ W et $U = 400$ V. Par erreur, elle est raccordée sur une tension de 230 V. Calculer la nouvelle puissance.
18. Un circuit, constitué de quatre résistances, est alimenté sous une tension U de 50 V. Calculer la valeur à donner à R_4 pour que la puissance dissipée dans R_1 soit de 5,5 W.
 $R_1 = 15$ [Ω] $R_2 = 13$ [Ω] $R_3 = 100$ [Ω]
 R_4 : ajustable, max. 150 Ω

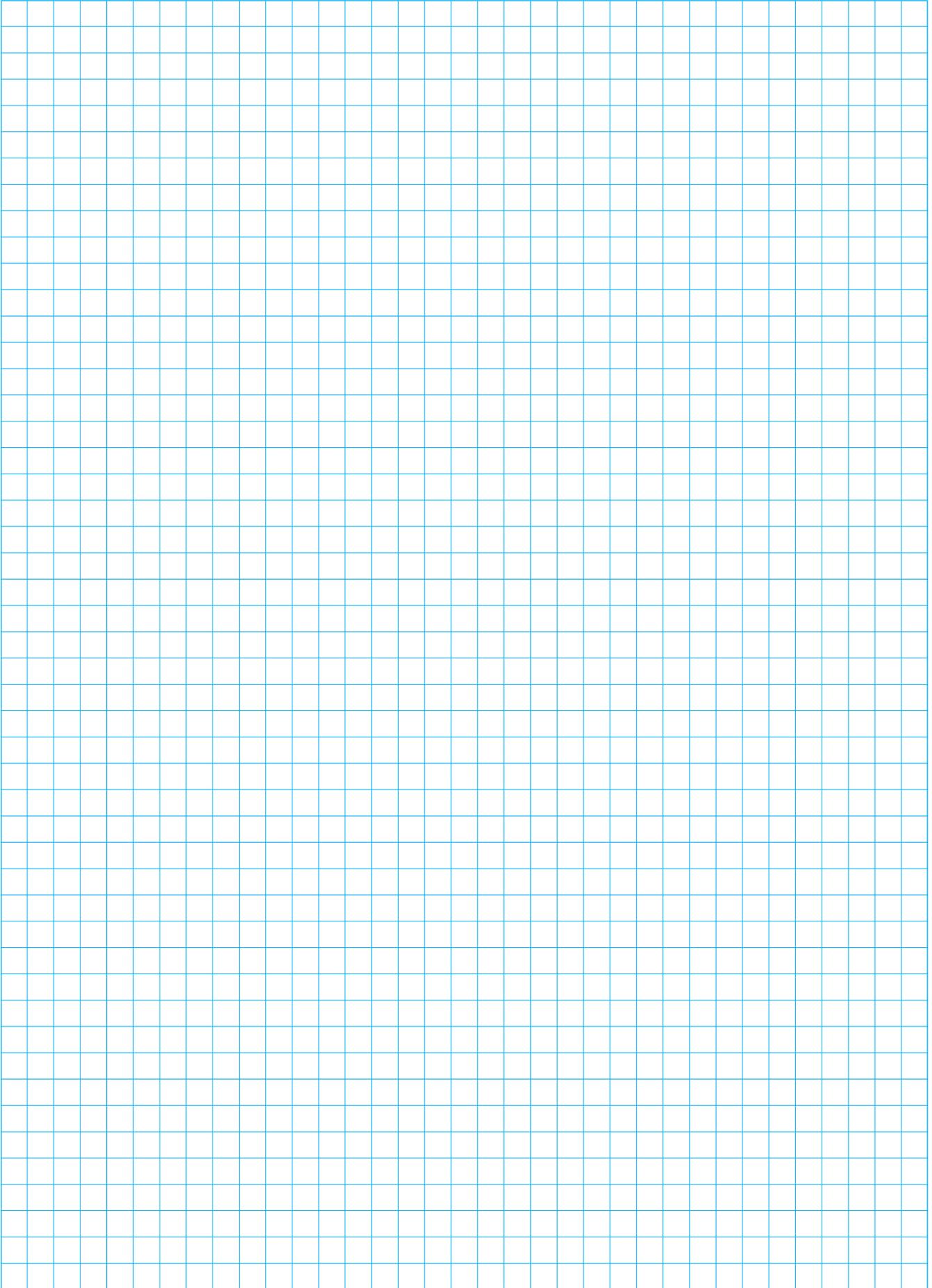


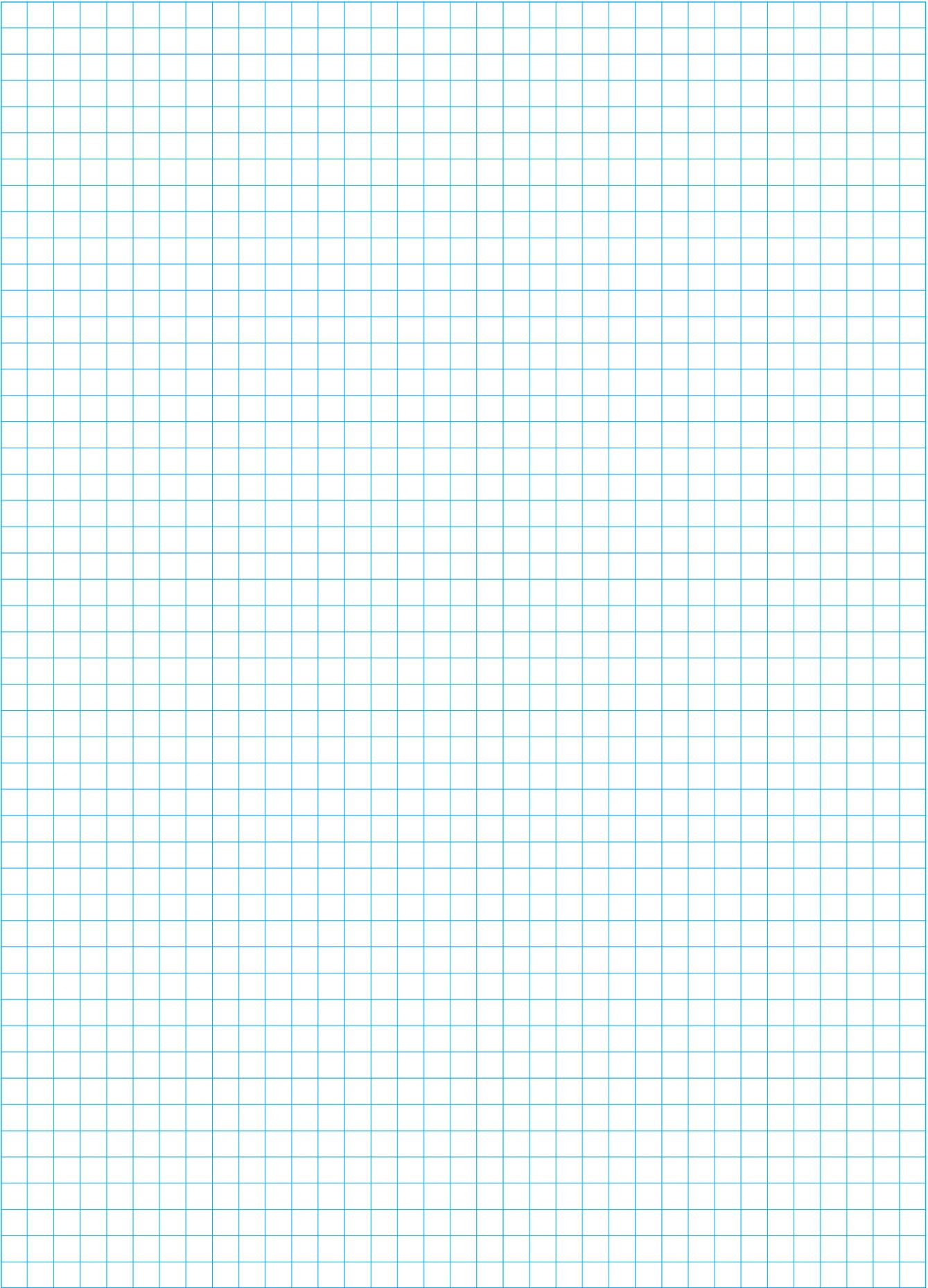
19. Un poste de TV couleur a une puissance de 150 W. Il fonctionne tous les jours de 18 h 30 à 22 h. Le prix du kWh est de 15 ct. Quelle est, en francs, la dépense pour 30 jours d'utilisation ?
20. On désire vérifier le bon fonctionnement d'un radiateur électrique dont la plaque signalétique indique $P = 2200$ W. On mesure à l'aide d'un compteur les valeurs suivantes: $U = 230$ V, $c = 600$ tr/kWh, le disque fait 22 tours en 1 minute. Le radiateur est-il en ordre ?
21. Combien de tours par minute devra effectuer le disque d'un compteur si le récepteur a une puissance de 3 kW et que la constante du compteur est de 900 tr/kWh ?
22. Qu'est-ce que le rendement d'un appareil ?
23. Comment s'appellent les deux puissances mises en jeu dans le calcul du rendement et quelle est la plus petite ?
24. Quels sont les symboles de grandeur et d'unité du rendement ?
25. La puissance d'un moteur est de 1,5 kW et son rendement de 77,5%. Calculer la puissance absorbée par ce moteur.



26. Calculer le rendement global d'un moteur de rendement 0,85 relié à un alternateur de rendement 0,92.
27. On dispose d'une installation comportant un moteur électrique entraînant un treuil. Rendement du moteur: 0,8. Rendement du treuil: 0,75
Ce système est capable de monter verticalement une masse de 200 kg à la vitesse de 1,5 m/s. Calculer la puissance indiquée sur la plaquette signalétique du moteur et le courant absorbé au réseau si la tension de ce dernier est 230 V ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$).
28. On désire pomper de l'eau hors d'une cave inondée. Le moteur de la pompe absorbe 4,3 A sous 230 V. Le rendement du moteur est de 0,8 et celui de la pompe de 0,7. Sachant que l'eau doit être remontée d'une hauteur de 4,5 m, calculer le temps nécessaire pour le pompage s'il y a 12 m^3 d'eau à évacuer ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$).





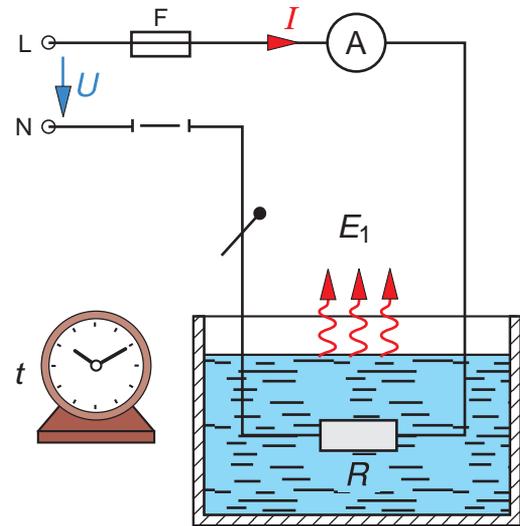


5.1 Production de chaleur par l'énergie électrique

Dans de nombreux appareils électriques, on transforme l'énergie électrique en énergie calorifique afin d'obtenir une augmentation de température.

Le passage du courant électrique dans une résistance, appelée corps de chauffe, dégage de la chaleur.

On utilise des radiateurs, des réchauds, des cuisinières électriques, des fers à repasser, des chauffe-eau, etc., pour produire un dégagement de chaleur.



5.1.1 Quantité de chaleur fournie par un corps de chauffe

Loi de Joule

L'énergie électrique transformée en chaleur dans un récepteur est proportionnelle à la résistance de ce récepteur, à l'intensité du courant qui le traverse et à la durée.

On lui donne le nom de quantité de chaleur. La quantité de chaleur fournie Q_1 peut aussi être appelée énergie électrique absorbée W_1 .

Formule

Q_1 quantité de chaleur fournie en joules [J]

R résistance en ohms [Ω]

I intensité du courant en ampères [A]

t temps en secondes [s]

Exemple

Un corps de chauffe de $52,9 \Omega$ est parcouru par un courant de $4,35 \text{ A}$.

Calculer la quantité de chaleur fournie par le corps de chauffe en J et en kWh pendant 30 minutes.

Quantité de chaleur fournie en joules :

$$Q_1 = R \cdot I^2 \cdot t = 52,9 \cdot 4,35^2 \cdot (30 \cdot 60) = \mathbf{1,8 \text{ MJ}}$$

Quantité de chaleur fournie en kWh :

$$1 \text{ kWh} \hat{=} 3,6 \text{ MJ}$$

$$Q_1 = \frac{1,8 \cdot 10^6}{3,6 \cdot 10^6} = \mathbf{0,5 \text{ kWh}}$$

La quantité de chaleur fournie Q_1 s'exprime en joules [J]

$$Q_1 = R \cdot I^2 \cdot t$$

5.2 Energie calorifique fournie à un corps

La température d'un corps placé sur une source de chaleur s'élève; cette source lui fournit une énergie ou quantité de chaleur.

5.2.1 Chaleur massique

Définition de la grandeur

La chaleur massique est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de différents corps (eau, huile, cuivre) pour une même différence de température et une même quantité de matière.

Définition de l'unité

La chaleur massique d'un corps est la quantité de chaleur nécessaire en joules, pour élever de un degré Celsius une masse de un kilogramme de ce corps.

La chaleur massique c
s'exprime en joules par kilogramme
et par degré $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \right]$

Constantes physiques

Matières	Chaleur massique c à 20°C en $\frac{\text{J}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$
Eau	4187
Huile comestible	2000
Pétrole	2090
Aluminium	904
Cuivre	394

Pour d'autres matières, on consultera un formulaire technique sous la rubrique « constantes physiques ».

5.2.2 Augmentation de température

Si l'on veut chauffer un corps, il faut que la source de chaleur ait une température plus élevée que ce corps.

Pour calculer l'élévation de température d'un corps en degrés Celsius, il suffit de calculer la différence entre la température finale et la température initiale.

La différence de température $\Delta\theta$
s'exprime en degrés Celsius [°C]

Formule

$\Delta\theta$ différence de température en degrés Celsius [°C]

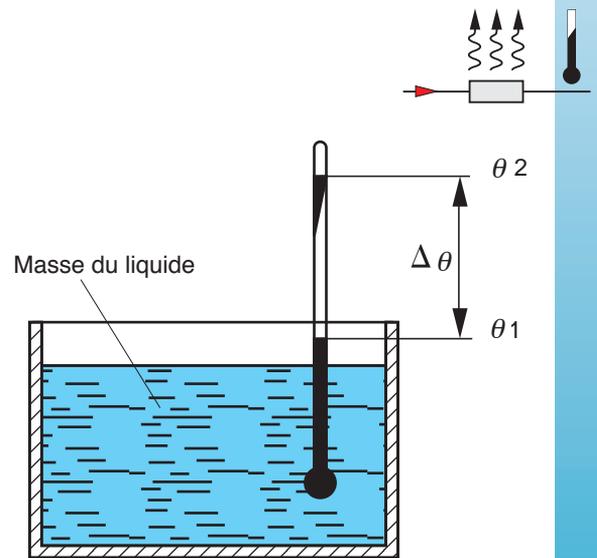
θ_2 température finale en degrés Celsius [°C]

θ_1 température initiale en degrés Celsius [°C]

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$$

5.2.3 Quantité de chaleur utile

L'énergie calorifique transmise à un corps est égale au produit de la masse de ce corps par sa chaleur massique et par la différence de température qu'il a subie.



La quantité de chaleur utile Q_2 peut aussi être appelée énergie calorifique utile W_2 .

La quantité de chaleur utile Q_2 s'exprime en joules [J]

Formules

Q_2 quantité de chaleur utile en joules [J]

m masse en kilogrammes [kg]

c chaleur massique en joules par kilogramme et degré Celsius $[\frac{\text{J}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}]$

Δ différence de température en degrés Celsius [$^\circ\text{C}$]

$$Q_2 = m \cdot c \cdot \Delta \theta$$

$$[\text{J}] = [\text{kg}] \cdot [\frac{\text{J}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}] \cdot [^\circ\text{C}]$$

Exemple

On désire chauffer 2 l d'eau de 20°C à 90°C .
Quelle quantité de chaleur utile cette eau a-t-elle emmagasinée ?

Quantité de chaleur utile :

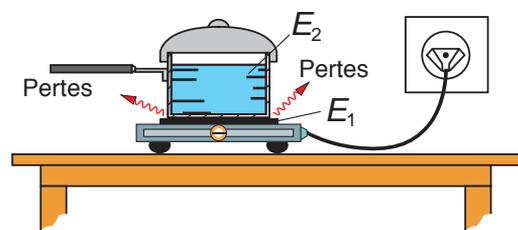
$$Q_2 = m \cdot c \cdot \Delta \theta = 2 \cdot 4187 \cdot (90 - 20) = 586 \text{ kJ}$$

5.3 Energie perdue par un appareil thermique

Lorsqu'une énergie est transformée en une autre énergie, il se produit des pertes.

Toute l'énergie est transformée en chaleur, cependant elle n'est pas entièrement transmise à la masse à chauffer. Il y a des pertes.

La quantité de chaleur utile est plus petite que la quantité de chaleur fournie par le corps de chauffe.



5.3.1 Rendement d'un appareil thermique

On désigne par rendement le rapport entre la quantité de chaleur utile et la quantité de chaleur fournie.

Formule

η rendement [-]

Q_2 quantité de chaleur utile en joules [J]

Q_1 quantité de chaleur fournie en joules [J]

$$\eta = \frac{Q_2}{Q_1}$$

Remarque

Le rendement est toujours plus petit que 1 (ou que 100%).

Valeurs usuelles

Plaque de cuisson : environ 0,60

Chauffe-eau : environ 0,90

Bouilloire rapide : environ 0,95

Thermoplongeur : environ 0,95

Exemple

Un chauffe-eau, dont la puissance est de 1,4 kW, élève 100 l d'eau de 20°C à 65°C en 4 heures.

Quel est son rendement ?

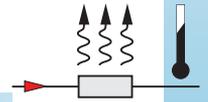
Quantité de chaleur fournie :

$$Q_1 = P \cdot t = 1400 \cdot (4 \cdot 3600) = 20,2 \text{ MJ}$$

Quantité de chaleur utile :

$$Q_2 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 100 \cdot 4187 \cdot (65 - 20) = 18,8 \text{ MJ}$$

$$\text{Rendement : } \eta = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{18,8}{20,2} = 0,93 \approx 93\%$$



5.4 Inconvénients de l'effet Joule

Chaque fois que le dégagement de chaleur n'est pas recherché, l'effet Joule est nuisible.

Les pertes diminuent le rendement des appareils; elles causent un échauffement qui pourrait les détériorer.

Elles imposent une limitation de cet échauffement à une valeur compatible avec le bon fonctionnement des appareils.

5.4.1 Pertes dans les conducteurs

Le courant passant dans un conducteur électrique l'échauffe.

Cet échauffement représente des pertes.

La loi de Joule permet de calculer ces pertes; celles-ci représentent une énergie perdue.

Formule

W énergie électrique absorbée en joules [J]

R résistance en ohms [Ω]

I intensité du courant en ampères [A]

t temps en secondes [s]

$$W = R \cdot I^2 \cdot t$$

Exemple

Un courant de 25 A circule dans un conducteur en cuivre de 6 mm² et de 10 m de longueur.

Calculer l'énergie perdue en 24 heures.

Résistance du conducteur:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{0,0175 \cdot 10}{6} = 0,0292 \Omega$$

Energie perdue:

$$W = R \cdot I^2 \cdot t = 0,0292 \cdot 25^2 \cdot 24 = 438 \text{ Wh} = 0,438 \text{ kWh}$$

5.4.2 Densité de courant

Il est important de limiter l'intensité du courant dans les conducteurs. Si le courant est trop important, le conducteur s'échauffe et risque de provoquer un incendie.

On limite l'intensité du courant à travers la section du conducteur ; on parle alors de densité de courant.

Les Normes sur les Installations à Basse Tension (NIBT) renseignent sur les limites à ne pas dépasser.

Définition de la grandeur

La densité de courant dans un conducteur est l'intensité du courant qui le traverse par unité de section.

La densité de courant s'exprime dans la pratique en ampères par millimètre carré [$\frac{A}{mm^2}$]

Formule

J densité de courant en ampères par millimètre carré [$\frac{A}{mm^2}$]

I intensité du courant en ampères [A]

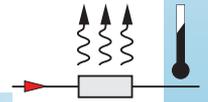
A section en millimètres carrés [mm^2]

$$J = \frac{I}{A}$$

Exemple

Quelle est la densité de courant dans un fil de 2,5 mm² parcouru par un courant de 16 A ?

Densité de courant : $J = \frac{I}{A} = \frac{16}{2,5} = 6,4 \frac{A}{mm^2}$



5.5 Effets thermiques sur les résistances

La résistance de la plupart des matériaux conducteurs (cuivre, aluminium, argent) augmente avec la température en raison de l'agitation accrue des atomes.

Par contre, la résistance du carbone et des matériaux semi-conducteurs employés dans la fabrication de certaines résistances, diodes, transistors, etc. diminue lorsque la température augmente.

Des alliages, comme le constantan et le chrome-nickel ont une résistance presque constante lorsque la température varie.

5.5.1 Coefficient de température des résistances

Définition de la grandeur

Le coefficient de température représente la variation de résistance de différentes matières pour une même élévation de température à partir de 20° C.

Définition de l'unité

Le coefficient de température indique la variation de résistance en ohms, pour une résistance de un ohm lorsque sa température varie de un degré Celsius.

Si le coefficient est positif, la résistance augmente avec la température.

Si le coefficient est négatif, la résistance diminue avec la température.

Si le coefficient est nul, la résistance ne varie pas avec la température.

Constantes physiques

Matières	Coefficient de température α à 20° C en $\frac{1}{^{\circ}\text{C}}$
Cuivre	0,004
Tungstène	0,005
Chrome-nickel	0,0002
Constantan	0,00004
Charbon	- 0,0003

Pour d'autres matières, on consultera un formulaire technique sous la rubrique « constantes physiques ».

Le coefficient de température α (alpha) s'exprime en ohms par ohm et par degré $[\frac{\Omega}{\Omega^{\circ}\text{C}}]$ ou $[\frac{1}{^{\circ}\text{C}}]$

5.5.2 Variation de la résistance avec la température

La variation de résistance est proportionnelle à la variation de température ainsi qu'à la valeur de la résistance à 20 °C.

Formules

ΔR variation de la résistance en ohms [Ω]

R_{20° résistance à 20 °C en ohms [Ω]

α coefficient de température [$\frac{1}{^\circ\text{C}}$]

R_θ résistance à la température donnée en ohms [Ω]

θ température donnée [$^\circ\text{C}$]

La variation de résistance ΔR s'exprime en ohms [Ω]

$$\Delta R = R_{20^\circ} \cdot \alpha \cdot (\theta - 20)$$

$$R_\theta = R_{20^\circ} + \Delta R$$

d'où:

$$R_\theta = R_{20^\circ} \cdot (1 + \alpha \cdot (\theta - 20))$$

Remarques

Le coefficient de température est donné pour une température de 20 °C.

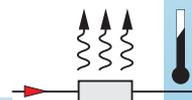
R_{20° est donc toujours la résistance pour une température de 20 °C (température de référence).

Exemple

Quelle est la résistance d'un fil de cuivre à 56 °C, si sa résistance à 20 °C est de 9,8 Ω ?

Résistance à chaud :

$$R_\theta = R_{20^\circ} \cdot (1 + \alpha \cdot (\theta - 20)) = 9,8 \cdot (1 + 0,004 \cdot (56 - 20)) = \mathbf{11,2 \Omega}$$

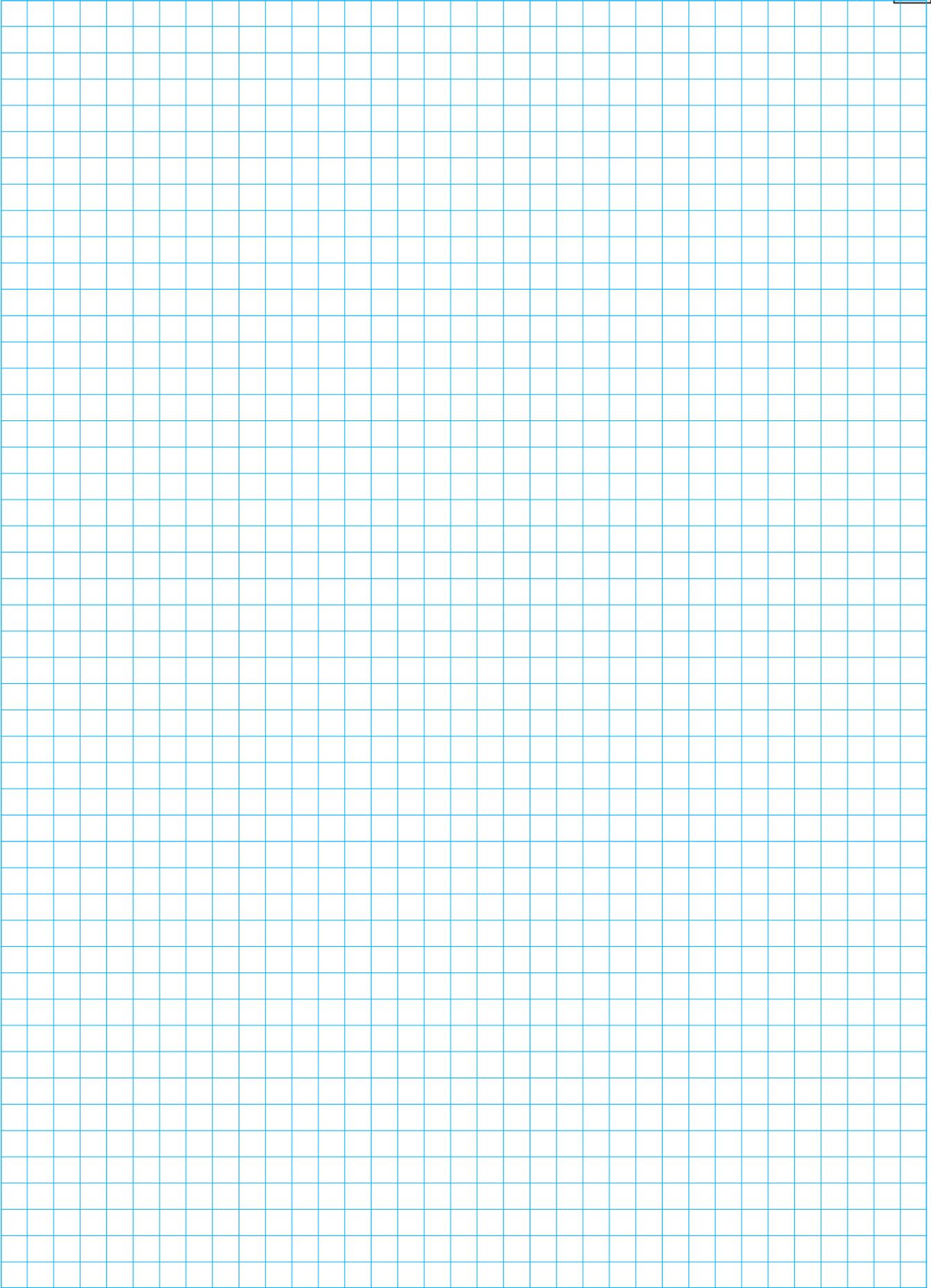
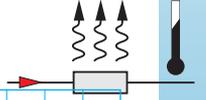


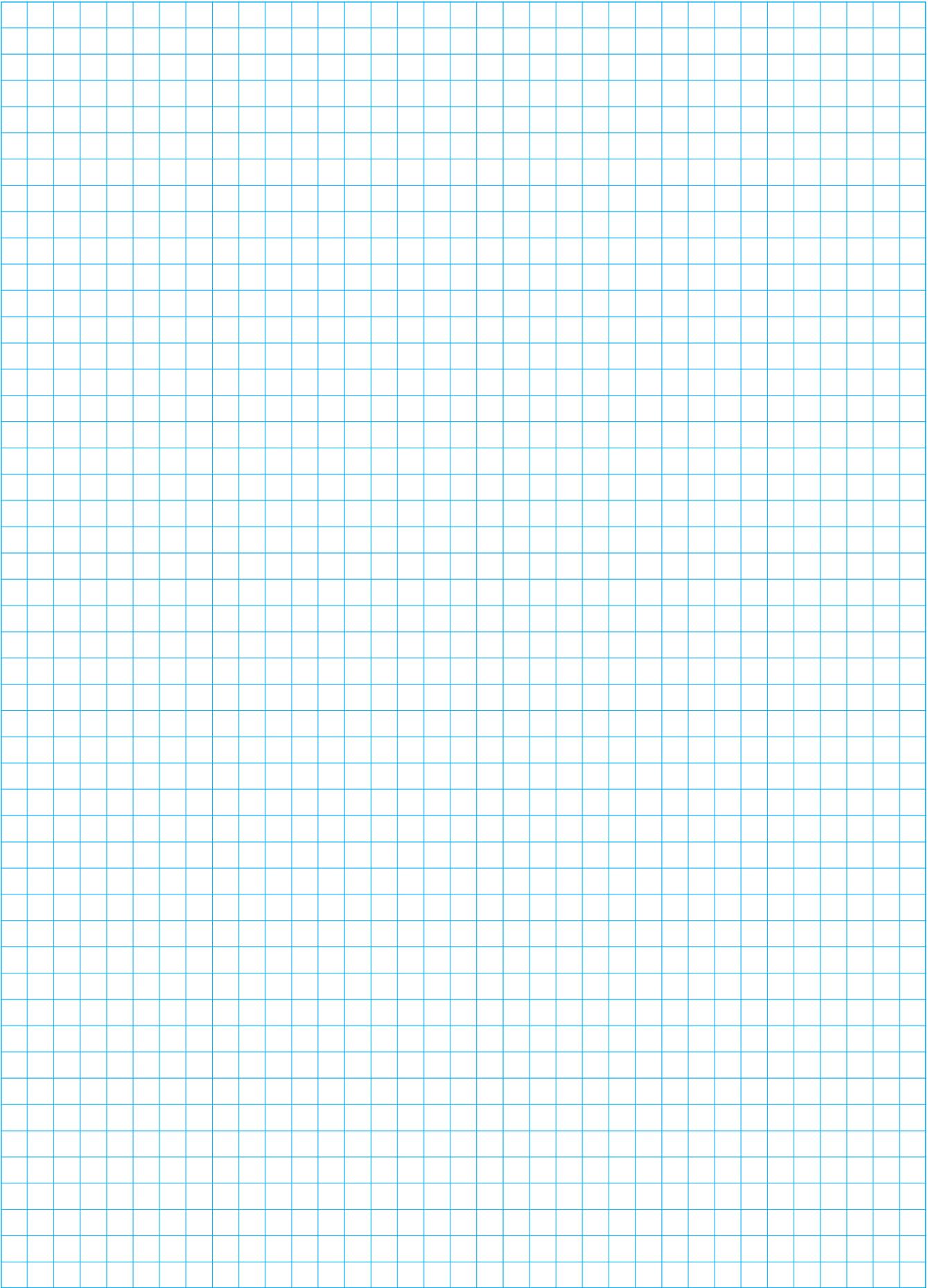
5.6 Exercices

1. Que se passe-t-il lorsqu'un courant traverse une résistance ?
2. Quelle est l'énergie dégagée par une résistance de 34Ω parcourue par un courant de $6,76 \text{ A}$ pendant 65 minutes ?
3. Qu'est-ce que la chaleur massique ?
4. Quels sont les symboles de grandeur et d'unité de la différence de température ?
5. Calculer l'énergie nécessaire pour chauffer 300 litres d'eau de 12°C à 85°C .
6. De quoi dépend l'énergie calorifique utile ?
7. On dispose d'une bouilloire de 1 kW pour élever la température d'un litre d'eau de 20°C à 100°C . Le rendement est de 92% . Combien de minutes seront nécessaires pour chauffer cette eau ?
8. Calculer la puissance d'une friteuse devant élever de 60°C la température de 2 litres d'huile (masse volumique $\rho = 0,91 \text{ kg/dm}^3$). Le rendement est de 90% et la durée de chauffe ne doit pas dépasser 4 minutes.
9. Quelle est l'énergie perdue pendant 3 heures dans une ligne en cuivre de 20 m de longueur et de $1,5 \text{ mm}^2$ de section si le courant est de $9,2 \text{ A}$?
10. Qu'est-ce que la densité de courant ?
11. Quels sont les symboles de grandeur et d'unité de la densité de courant ?
12. Calculer la densité de courant dans une ligne en cuivre de 150 m de longueur, réalisée en fil de $3,5 \text{ mm}$ de diamètre, et parcourue par un courant de 40 A .
13. Qu'est-ce que le coefficient de température ?
14. Quels sont les symboles de grandeur et d'unité du coefficient de température ?
15. Comment se comporte la résistance d'un conducteur en cuivre que l'on chauffe ?
16. Quels sont les matériaux dont la résistance diminue lorsque la température augmente ?



17. La résistance d'une bobine de fil de cuivre est de $4,6 \Omega$ à 20°C . Quelle sera sa résistance lorsque la bobine aura atteint une température de 55°C ?
18. Le filament d'une lampe à incandescence a une résistance de $35,5 \Omega$ à 20°C . En service normal, cette lampe est parcourue par un courant de 450 mA sous une tension de 230 V . Calculer la température du filament en fonctionnement.
19. Un appareil thermique dissipe une puissance de 1200 W sous 230 V . Son corps de chauffe est constitué d'un fil de chrome-nickel de section $0,48 \text{ mm}^2$ et atteint en service 640°C .
Calculer :
 - a) la longueur du fil utilisé ;
 - b) la nouvelle puissance si on a enlevé 15% de la longueur du fil et que la tension a chuté à 215 V .
20. Une résistance a une valeur de $12,4 \Omega$ à 85°C . Calculer sa valeur à 210°C , sachant que son coefficient de température est de $0,0035$ à 20°C .
21. Une résistance a une valeur de $12,4 \Omega$ à 5°C . Calculer sa valeur à 210°C , sachant que son coefficient de température est de $0,0035$ à 20°C .
22. Une résistance a une valeur de $12,4 \Omega$ à -5°C . Calculer sa valeur à 210°C , sachant que son coefficient de température est de $0,0035$ à 20°C .







6.1 Piles et accumulateurs: définitions

6.1.1 Système primaire

C'est un système non rechargeable, communément appelé «pile», constitué d'une anode et d'une cathode ainsi que d'un électrolyte.

6.1.2 Système secondaire

C'est un système rechargeable, communément appelé «accumulateur», constitué d'une anode et d'une cathode ainsi que d'un électrolyte.

6.1.3 Élément

L'élément est composé d'un système primaire ou d'un système secondaire. Il comporte donc une seule anode et une seule cathode.

6.1.4 Batterie

Il s'agit d'un assemblage d'éléments permettant d'obtenir une tension plus élevée que celle fournie par un seul élément.

6.1.5 Capacité

La capacité représente la quantité d'électricité stockée dans un élément. Elle dépend des conditions de décharge.

6.1.6 Oxydoréduction

La réaction d'oxydoréduction est une réaction chimique au cours de laquelle se produit un transfert d'électrons. Cette réaction est à la base du fonctionnement des systèmes primaires et secondaires.

6.1.7 Force électromotrice

Une différence de potentiel est produite à l'intérieur d'un générateur.

A vide, lorsqu'aucun courant ne circule, cette différence de potentiel se nomme force électromotrice E (FEM).

En charge, lorsqu'un courant circule, la tension aux bornes diminue par suite de la chute de tension dans la résistance interne du générateur.

La résistance interne dépend de :

- la résistance ohmique de l'électrolyte et des électrodes ;
- la résistance ohmique due aux changements apportés aux électrodes et à l'électrolyte par les réactions chimiques.

Cette seconde partie varie en fonction :

- du courant de décharge ;
- de la température ;
- du vieillissement ;
- de l'état de la charge.

Définition de la grandeur

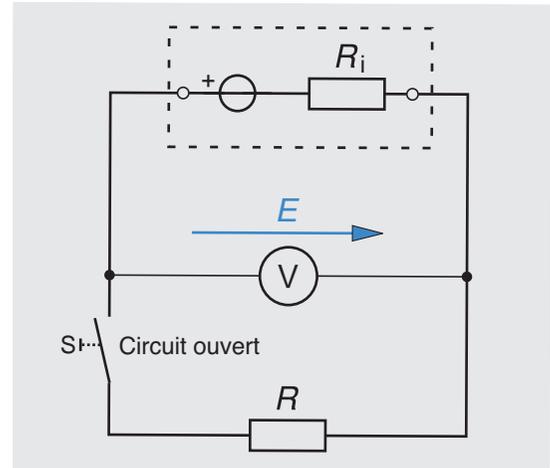
La force électromotrice est la différence de potentiel mesurée aux bornes d'un générateur lorsque le circuit est ouvert. On l'appelle aussi «tension à vide».

La tension aux bornes de l'élément et la chute de tension due à la résistance interne du générateur sont données par la loi d'ohm :

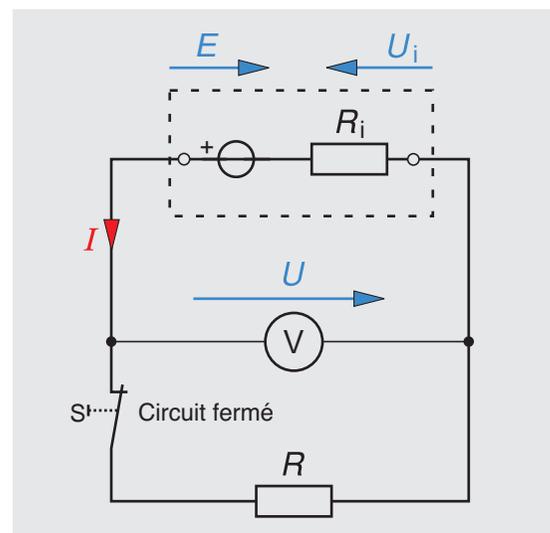
$$U = R \cdot I \quad \text{et} \quad U_i = R_i \cdot I$$

La FEM est la somme de la tension aux bornes du récepteur et de la chute de tension due à la résistance interne :

$$E = U + U_i \quad \text{ou} \quad E = U + R_i \cdot I$$



Générateur à vide



Générateur en charge

**La force électromotrice E
s'exprime en volts [V]**



Formules

U tension aux bornes en volts [V]

R résistance du récepteur en ohms [Ω]

I intensité du courant en ampères [A]

U_i chute de tension due à la résistance interne du générateur en volts [V]

R_i résistance interne du générateur en ohms [Ω]

E force électromotrice en volts [V]

$$U = R \cdot I$$

$$U_i = R_i \cdot I$$

$$E = U + U_i$$

$$U = E - R_i \cdot I$$

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

Exemple

Une pile de FEM $E = 1,5 \text{ V}$ et de résistance interne $R_i = 1,2 \Omega$, débite un courant de 200 mA dans un circuit. Calculer la tension aux bornes de la pile.

Tension aux bornes : $U = E - R_i \cdot I = 1,5 - 1,2 \cdot 0,2 = 1,26 \text{ V}$

6.1.8 Quantité d'électricité

Définition de la grandeur

La quantité d'électricité représente le nombre d'électrons ou de charges électriques.

C'est également la quantité totale d'électricité que peut débiter un générateur chimique. Cette quantité d'électricité est appelée plus communément capacité.

Définition de l'unité

Le coulomb est la quantité d'électricité transportée en une seconde par un courant de un ampère.

Un coulomb représente la charge électrique de $6,25 \cdot 10^{18}$ électrons.

La quantité d'électricité s'exprime plus facilement en ampèreheures [Ah].

La quantité d'électricité Q
s'exprime en coulombs [C]

Coulomb Charles de, 1736-1806.

Physicien français. Connu pour ses travaux sur l'électricité et le magnétisme, son invention du pendule de torsion et ses travaux sur les frottements. Il établit les bases expérimentales et théoriques du magnétisme et de l'électrostatique. Il développa la théorie de l'électrisation superficielle des conducteurs, énonça l'effet d'écran produit par des conducteurs creux et introduisit la notion de moment magnétique. On a donné son nom à l'unité de la quantité d'électricité.



Formule

Q quantité d'électricité en coulombs [C]
ou en ampèreheures [Ah]

I intensité du courant en ampères [A]

t temps en secondes [s] ou en heures [h]

$$Q = I \cdot t$$

Correspondance d'unités

$$1 \text{ Ah} \hat{=} 3600 \text{ C} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ C}$$

$$1 \text{ C} \hat{=} 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s}$$

$$1 \text{ Dh} \hat{=} 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ h}$$

$$1 \text{ C} \hat{=} 0,000278 \text{ Ah} = 0,278 \cdot 10^{-3} \text{ Ah} = 0,278 \text{ mAh}$$

Exemple

Un accumulateur a une capacité de 100 Ah. Calculer le temps de décharge de cet accumulateur si l'intensité moyenne du courant est de 3,2 A.

$$\text{Temps: } t = \frac{Q}{I} = \frac{100}{3,2} = 31,3 \text{ h} \hat{=} 31 \text{ h}$$



6.2 Piles

6.2.1 Généralités

Une pile est un générateur de tension continue qui transforme l'énergie chimique en énergie électrique.

Constitution

Pour constituer une pile, il faut :

- deux électrodes composées de matériaux de nature différente. La différence de potentiel d'oxydoréduction de ces matériaux détermine la tension à vide de la pile;
- un électrolyte liquide.

Une des électrodes est positive (cathode), l'autre est négative (anode).

Remarque

Cette pile fut inventée en 1800 par le physicien italien A. Volta. Elle permet, pour la première fois, d'obtenir un courant électrique constant dans le temps. La pile Volta n'est plus utilisée de nos jours.

Principe de fonctionnement

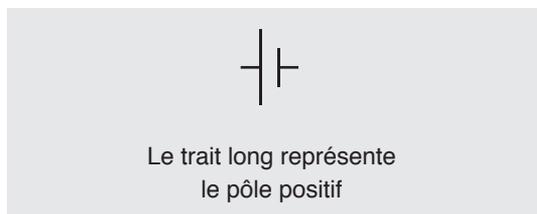
Si on réunit les électrodes par un conducteur, un courant s'établit :

- du pôle + au pôle – à l'extérieur du générateur
- du pôle – au pôle + à l'intérieur du générateur

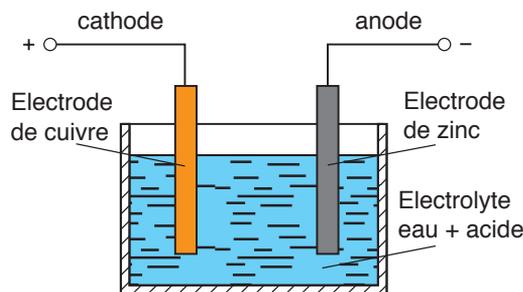
Dans le cas d'une pile constituée d'une électrode en cuivre et d'une autre en zinc, on constate également :

- un dégagement d'hydrogène sur l'électrode de cuivre ;
- une diminution du volume de l'électrode de zinc ;
- l'apparition dans l'électrolyte de sulfate de zinc (seulement si l'électrolyte contient de l'acide sulfurique).

Ce principe apparaît pour tout générateur chimique, seules les matières changent.



Symbole d'un élément de pile



Principe de la pile Volta

6.2.2 Pile saline

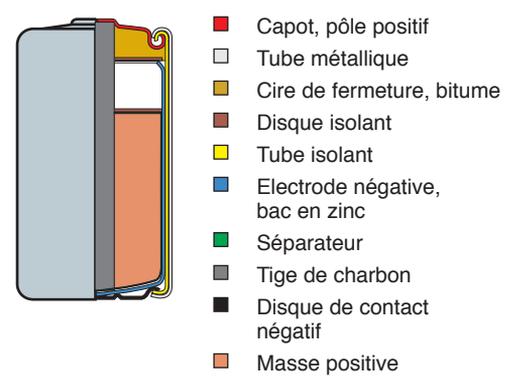
Cette pile est aussi appelée pile charbon-zinc ou «pile Leclanché» , nom donné par son inventeur: Georges Leclanché en 1868. Cette pile est de moins en moins utilisée au profit de la pile alcaline.

Constitution

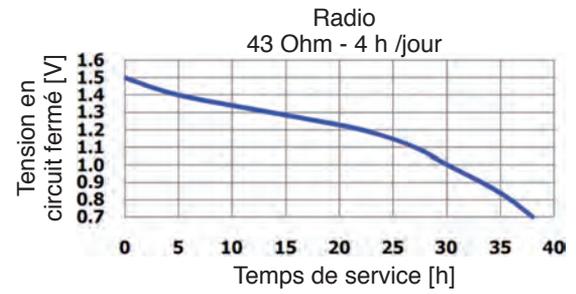
- Pôle + : bioxyde de manganèse et carbone.
- Pôle - : bac en zinc.
- Electrolyte : chlorure d'ammonium, chlorure de zinc et eau.

Fonctionnement

L'électrode positive est constituée de dioxyde de manganèse mélangé à du carbone.
 Ce bioxyde se réduit, lors de la décharge, en recevant des électrons qui lui sont transmis par l'intermédiaire de la tige de carbone.
 L'électrode négative est en zinc. Lors de la décharge, le zinc formant le bac s'oxyde et se dissout en formant du chlorure de zinc.



Elément de pile saline au bioxyde de manganèse - zinc



Décharge d'une pile saline R6 (Source: Energizer)

6.2.3 Pile alcaline

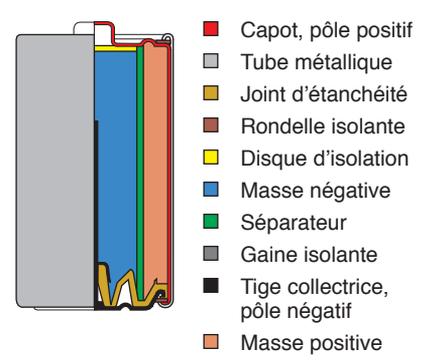
La pile alcaline est apparue sur le marché en 1959 et correspond au type de pile le plus utilisé actuellement, car ses caractéristiques sont nettement meilleures que celles de la pile saline:

- plus grande capacité pour le même volume;
- Résistance interne plus faible.

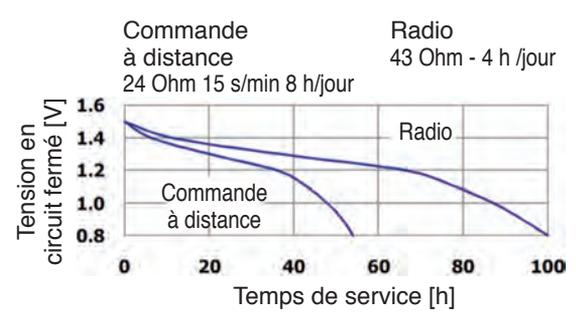
(La différence par rapport à la pile saline consiste à utiliser un électrolyte sous forme de gel.)

Constitution

- Pôle + : bioxyde de manganèse et carbone.
- Pôle - : zinc en poudre.
- Electrolyte : solution de potasse (KOH).



Elément de pile alcaline au bioxyde de manganèse - zinc

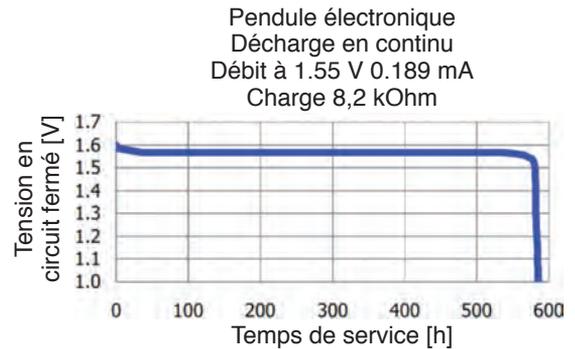


Décharge d'une pile alcaline R6 (Source: Energizer)



6.2.4 Pile argent-zinc

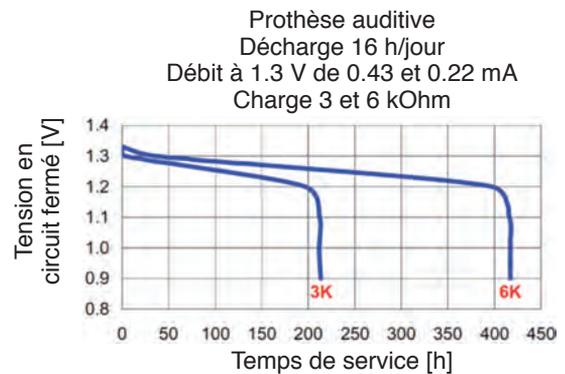
Cette pile est constituée d'une cathode en argent et d'une anode en zinc. Les courants que l'on peut tirer de cette pile sont nettement inférieurs à ceux fournis par une pile alcaline. On l'utilise principalement dans le domaine de l'horlogerie.



Décharge d'une pile argent-zinc SR43
(source: Energizer)

6.2.5 Pile zinc-air

La cathode de cette pile présente la particularité d'être réalisée par l'air ambiant. L'anode est réalisée en zinc. Cette façon de procéder permet d'obtenir une grande capacité sous un volume restreint. Ici aussi, les courants disponibles sont nettement plus faibles que ceux fournis par une pile alcaline. On l'utilise principalement dans le domaine des prothèses auditives.



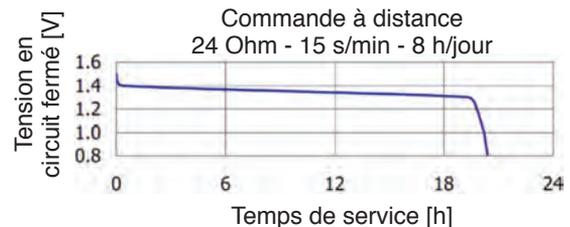
Décharge d'une pile zinc-air PR70
(source: Energizer)

6.2.6 Pile lithium

Dans ce type de piles, l'anode est réalisée à base de lithium. Diverses solutions existent pour la cathode (à base de soufre, de manganèse, sous forme solide ou liquide).

Ces piles présentent les avantages suivants par rapport à la pile saline:

- Faible volume
- Faible poids
- Tension par élément généralement plus élevée
- Faible auto décharge (< 1% par an)
- Grande période de stockage (> 10 ans)
- Courbe de décharge très plate
- Capacité peu dépendante du courant de décharge



Décharge d'une pile lithium L92
(Source: Energizer)

6.2.7 Tableau comparatif des piles courantes

	Saline	Alcaline	Argent-zinc	Zinc-air	Lithium
Force électromotrice	1,5 V	1,5 V	1,55 V	1,4 V	1,5 V/3 V/3,6 V Dépend de la technologie
Energie par unité de poids	70 Wh/kg	120-130 Wh/kg	130-140 Wh/kg	200-350 Wh/kg	230 – 600 Wh/kg
Anode	Zinc	Zinc	Zinc	Zinc	Lithium
Cathode	Dioxyde de manganèse	Dioxyde de manganèse	Oxyde d'argent	Air (réaction avec du carbone catalytique)	Bisulfite de fer
Electrolyte	Chlorure d'ammonium, chlorure de zinc	Hydroxyde de potassium	Hydroxyde de potassium ou de sodium	Hydroxyde de potassium	Sel de lithium et solvant organique
Applications	Pratiquement abandonnée dans les produits actuels et réservée aux appareils présentant une consommation moyenne	Pratiquement tous les appareils électroniques actuels	Calculatrices Prothèses auditives	Prothèses auditives	Appareils électroniques «grand public» (radios, MP3, caméras, calculatrices, horlogerie batteries de sauvegarde PC)

Remarque

L'énergie par unité de poids permet la comparaison des différentes technologies utilisées. Elle se calcule de la manière suivante:

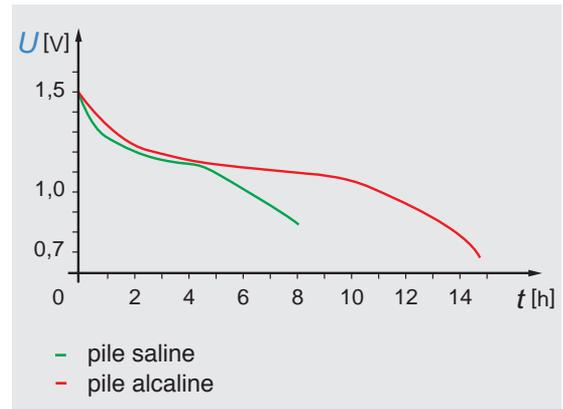
$$\text{Energie massique} = \frac{U \cdot I \cdot T}{m} = \frac{U \cdot Q}{m}$$



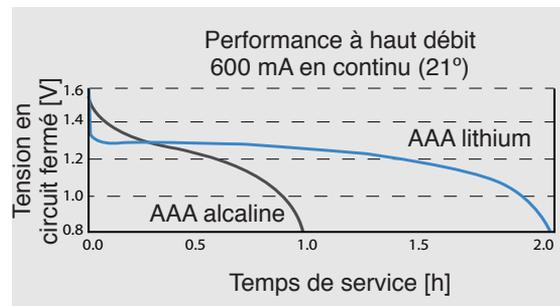
6.2.8 Comparaison des caractéristiques de décharge

On constate qu'à volume égal, la pile alcaline a une capacité plus grande que la pile saline. Pour cette raison les piles salines sont de moins en moins utilisées.

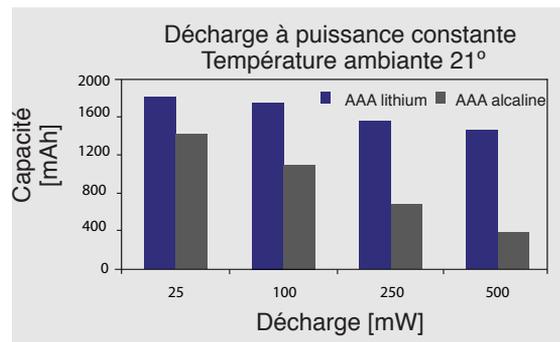
La pile au lithium a une capacité plus élevée que la pile alcaline. De plus, et contrairement à la pile alcaline, sa capacité ne dépend pratiquement pas du courant de décharge.



Décharge de piles sur une résistance de 10Ω pendant 1 heure par jour (20°C)



Décharge d'une pile alcaline et lithium à courant constant (Source: Energizer)



Capacité de piles alcaline et lithium en fonction du courant (Source: Energizer)

6.2.9 Normalisation et définition des piles

Le nombre toujours croissant de types de piles a incité la CEI (Commission Electrotechnique Internationale) à utiliser un système de normalisation pour reconnaître les divers types de piles (norme CEI -86-1).

Les critères utilisés sont les suivants :

- nombre d'éléments et FEM totale ;
- système électrochimique ;
- forme, dimension et connexion.

La normalisation CEI utilise à cet effet une série de chiffres et lettres ; par exemple : SR 4400.



1) Le premier chiffre indique le nombre d'éléments (sans chiffre avant la ou les lettres, la pile n'a qu'un élément).

2) Une seule lettre ou la seconde indique la forme de l'élément.

Exemples : R : éléments cylindriques (ronds) ;

F : éléments plats (montés en empilages) ;

S : éléments parallélépipédiques.

L'absence d'une seconde lettre indique que la pile est du type saline, soit $E = 1,5$ V par élément.

3) La première lettre indique un système électrochimique autre que saline (Leclanché).

Exemples :

L : alcaline-manganèse $E = 1,5$ V par élément ;

M : oxyde de mercure $E = 1,35$ V par élément ;

S : oxyde d'argent $E = 1,55$ V par élément ;

B,C,E,G ou U : lithium $E = 1,5 ; 3 ; 3,6$ V par élément.

4) Le ou les dernier(s) chiffre(s) informe(nt) sur les dimensions géométriques (diamètre, hauteur, forme) et sur le type de connexion de la pile.

Remarques :

Les piles au mercure sont interdites depuis 1998.

On trouve également les dénominations suivantes pour les piles :

Appellation commerciale	Code pile	Code pile CEI
-	AAAA	(L)R61
Micro	AAA	(L)R3
Mignon (penlight)	AA	(L)R6
Baby	C	(L)R14
Mono	D	(L)R20
Bloc 9 V	PP3	6(L)F22 ou 6(L)R61

LR61 LR3 LR6 LR14 LR20 6LR61





Exemples

- Pile 3 R 12 :
 - 3 => nombre d'éléments
 - R => forme des éléments (ronds à l'intérieur de la pile)
 - => système électrochimique bioxyde de manganèse
 - $E = 3 \cdot 1,5 \text{ V} = 4,5 \text{ V}$
 - 12 => dimension

- Pile 6 LR 61 :
 - 6 => nombre d'éléments
 - L => système électrochimique alcalino-manganèse,
 - $E = 6 \cdot 1,5 \text{ V} = 9 \text{ V}$
 - R => forme des éléments (ronds)
 - 61 => dimension

Note : ce type de pile se trouve également sous la dénomination de 6F22. Il s'agit dans ce cas d'un empilement de 6 éléments plats de 1,5V.



6.3 Accumulateurs

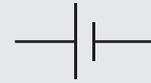
6.3.1 Généralités

L'accumulateur est un générateur de tension continue qui permet de stocker l'énergie électrique sous forme électro-chimique.

A la charge, l'énergie électrique est accumulée sous forme d'énergie chimique.

L'accumulateur fonctionne comme récepteur.

A la décharge, l'énergie chimique est restituée sous forme d'énergie électrique. L'accumulateur fonctionne comme générateur.



Symbole d'un élément d'accumulateur

6.3.2 Accumulateur au plomb

L'accumulateur au plomb est le premier type d'accumulateur qui a été inventé (1859, G. Planté). Ce type d'accumulateur équipe actuellement tous les véhicules à moteur pourvus d'un démarreur électrique.

Constitution

Plaques ou cadres en plomb contenant les matières actives (à l'état chargé) :

- pôle + : bioxyde de plomb.
- pôle – : plomb pur spongieux
- électrolyte : acide sulfurique ($\approx 30\%$) et eau distillée.

Fonctionnement

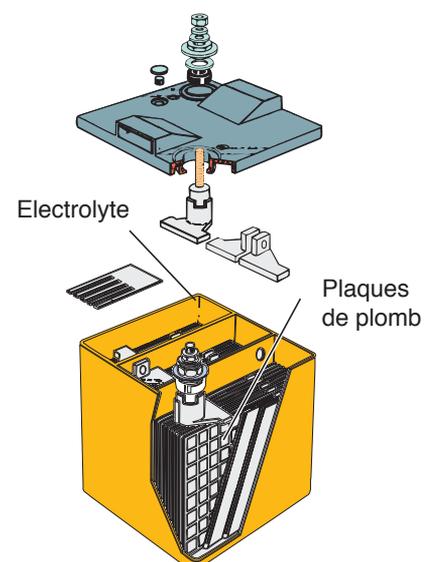
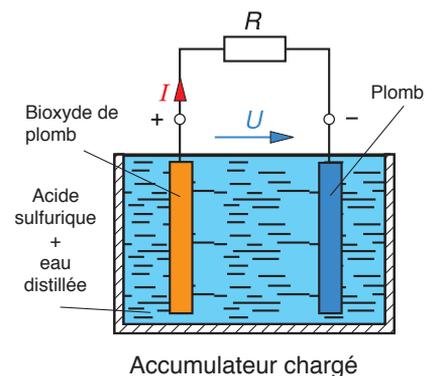
Lors de la décharge, le plomb s'oxyde et le bioxyde de plomb se réduit. Ils se combinent avec l'acide sulfurique et donnent du sulfate de plomb. L'accumulateur est déchargé lorsque les deux plaques sont recouvertes de sulfate de plomb.

A l'état déchargé, la concentration d'acide sulfurique dans l'électrolyte est la plus faible.

Lors de la charge, le sulfate de plomb se transforme en plomb à l'électrode négative et en bioxyde de plomb à l'électrode positive en libérant de l'acide sulfurique.

A l'état chargé, la concentration d'acide sulfurique dans l'électrolyte est la plus élevée.

La mesure de la densité de l'électrolyte permet donc de contrôler l'état de charge de l'accumulateur.





Charge d'un accumulateur au plomb

Lors de la charge, l'accumulateur est raccordé à une source de tension continue ou pulsée.

Les polarités doivent être respectées: + sur +, - sur - .
Le courant de charge reforme les matières actives des électrodes.

La densité de l'électrolyte et la FEM de l'élément augmentent progressivement.

L'accumulateur fonctionne comme récepteur, de force contre-électromotrice E' (FCEM). Le chargeur doit fournir une tension U supérieure à E' .

$$U = E' + U_i = E' + R_i \cdot I$$

Exemple

Accumulateur automobile en fin de charge :

- plaque positive (+) : bioxyde de plomb ;
- plaque négative (-) : plomb ;
- électrolyte : acide sulfurique et eau ;
- densité : $d = 1,28$ (a augmenté) ;

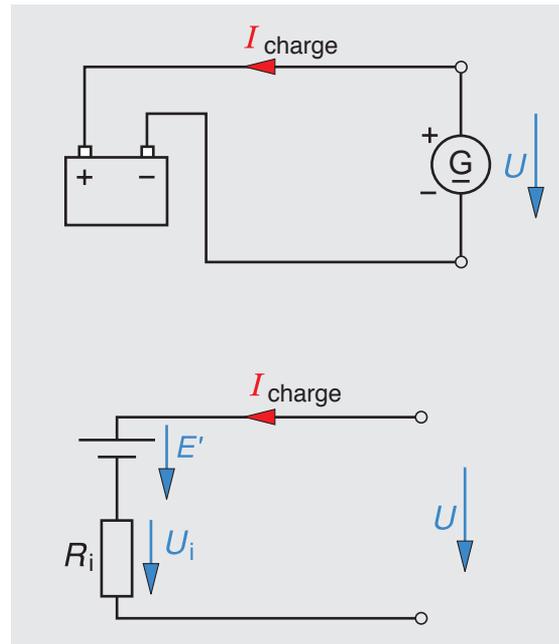
Exemple de charge

Batterie 12 V - 55 Ah

$I_{\text{charge}} = 5,5$ A pendant 11-12 h

(rendement 0,8 - 0,9)

Attention : les gaz dégagés en fin de charge sont explosifs.



Décharge d'un accumulateur au plomb

En fermant le circuit sur le récepteur, un courant de décharge de sens contraire s'établit et transforme les matières actives des plaques.

L'acide sulfurique produit le sulfatage de l'accumulateur. La densité de l'électrolyte et la FEM de l'élément diminuent progressivement.

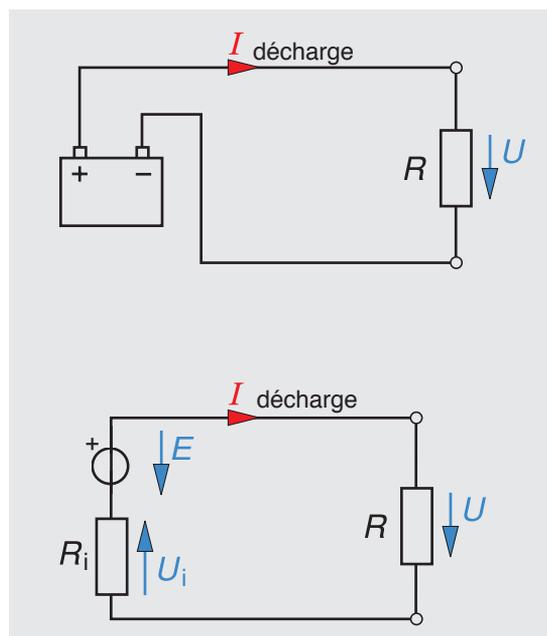
L'accumulateur fonctionne comme générateur. La tension U aux bornes est plus faible que la force électromotrice E .

$$U = E - U_i = E - R_i \cdot I$$

Exemple

Accumulateur automobile en fin de décharge :

- plaque positive (+) : sulfate de plomb ;
- plaque négative (-) : sulfate de plomb ;
- électrolyte : acide sulfurique et eau ;
- densité : $d = 1,16$ (a diminué) ;



Entretien et contrôle

Electrolyte liquide:

Un accumulateur au plomb ne doit pas être laissé déchargé trop longtemps, sinon la recharge de l'accumulateur n'est plus possible (sulfatage des plaques).

Les plaques doivent être recouvertes d'au moins 1 cm d'électrolyte. Le niveau doit être complété uniquement par de l'eau distillée.

L'état de charge de l'accumulateur doit être contrôlé à l'aide d'un pèse-acide (contrôle de la masse volumique) ou d'un réfractomètre.

Le courant de charge et de décharge est en principe calculé pour une durée de 10 h (1/10 de la capacité de l'accumulateur).

Electrolyte solide (gel):

La plupart des accumulateurs au plomb actuellement disponibles sur la marché sont scellés et ne nécessitent aucun entretien.

Un accumulateur au plomb inutilisé subit une autodécharge de 3 à 4 % par mois.



6.3.3 Accumulateur alcalin Ni-Cd

L'accumulateur au cadmium-nickel (Cd-Ni) est apparu sur le marché aux alentours des années 1950 en même temps que les appareils portables (à transistors). Il tend à être remplacé actuellement par les accumulateurs au nickel – métal – hydrure (Ni-MH), ceci principalement à cause de la grande toxicité du cadmium.

Constitution

- Pôle + : oxyde de nickel hydraté.
- Pôle – : cadmium métallique spongieux.
- Electrolyte : hydroxyde de potassium.

Principe de fonctionnement

Lors de la décharge, le cadmium s'oxyde et devient hydroxyde de cadmium et l'oxyde de nickel se réduit en hydroxyde de nickel. L'électrolyte ne participe que peu à la réaction et sa mesure n'est pas une indication de l'état de charge de l'élément.

Entretien

L'accumulateur alcalin (Ni-Cd) ne nécessite pratiquement aucun entretien et a une durée de vie plus grande que l'accumulateur au plomb.

L'électrolyte des accumulateurs de grande capacité doit être remplacé tous les 2 à 3 ans.

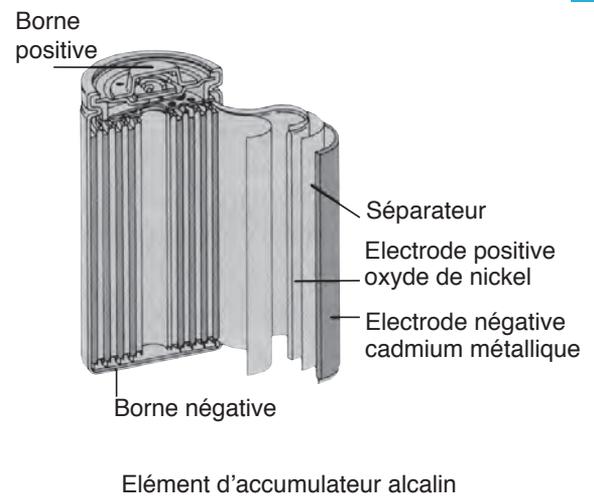
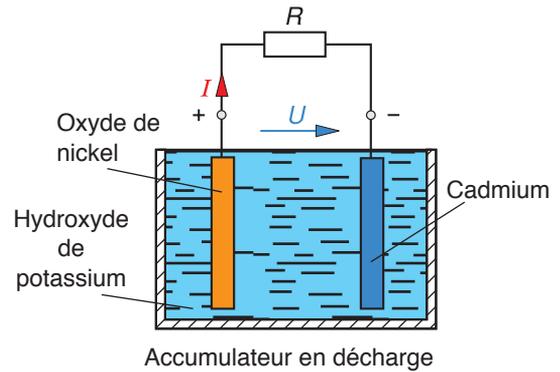
Avant de recharger l'accumulateur, il faut le décharger complètement afin d'éviter le phénomène de « mémoire » (perte de capacité).

Remarques

On réalise de plus en plus d'accumulateurs alcalins étanches. Ils peuvent, dans bien des cas, remplacer les piles ordinaires (attention à la différence de FEM E).

Ils existent aussi sous forme de boutons.

Il ne faut pas confondre « piles alcalines » et « accumulateurs alcalins ».



6.3.4 Accumulateurs et directives RoHS

La directive RoHS¹ entrée en vigueur le 1^{er} juillet 2006 interdit l'usage (entre autres) du plomb et du cadmium pour les appareils électriques et électroniques. Cependant, les piles et les accumulateurs font l'objet d'une réglementation spécifique et n'entrent pas dans le cadre de la directive RoHS.

6.3.5 Accumulateur alcalin Ni - MH

Cet accumulateur possède des caractéristiques proches de celles du Ni-Cd. Cependant, il ne contient pas de métaux concernés par la norme RoHS. A capacité égale, comparé à un accumulateur Ni-Cd, il est un peu plus léger mais le courant maximum qu'il peut fournir reste inférieur.

En charge rapide ($> 1C$), cet accumulateur est très sensible à la surcharge et nécessite de ce fait un chargeur «intelligent», capable de détecter avec précision la fin de la charge. Deux principes peuvent être utilisés, séparément ou conjointement:

- 1) Détection de l'augmentation de la température des éléments. Lors de la charge, il se produit une réaction exothermique; en fin de charge, on observe un pic de température qui correspond à l'augmentation de la pression interne de l'élément. Cette élévation de pression risque de faire éclater les éléments. On surveille donc la température des éléments au moyen d'un circuit électronique et interrompt la charge dès que cette dernière dépasse un certain seuil.
- 2) Détection de la variation de tension. En fin de charge, la tension aux bornes de l'élément passe par un maximum puis redescend. Les chargeurs de qualité détectent cette baisse de tension et interrompent la charge. On parle de détection $-\Delta U$.

¹ De l'anglais «**R**estriction of the use of certain **H**azardous **S**ubstances in electrical and electronic equipment», soit en français «restriction de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques».



6.3.6 Accumulateur au lithium

Ce type d'accumulateur, apparu sur le marché dès 1993, présente une tension de 3,6 V ou 3,7 V par élément. La valeur précise de la tension dépend de la technologie employée. A capacité égale, il est plus léger que le Ni-Cd ou le Ni-MH. Il est cependant assez coûteux. Cet accumulateur est extrêmement sensible à la surcharge (risque d'explosion). Le chargeur doit donc être «intelligent» afin de contrôler le processus de charge. Cet accumulateur doit être équipé d'un circuit de protection qui entre en fonction lorsque les conditions de charge, décharge, courant maximum ou température sont critiques. Dans certains modèles, sa conception est telle qu'elle permet une certaine dilatation de l'élément en fonction de son état de charge.

Note: les accumulateurs au lithium peuvent prendre feu lors de mauvaises conditions de charge ou de décharge. Ce type d'accident peut également se produire lors de défaut dans les matériaux (qualité de la technologie). Ceci est dû au fait que le lithium est un métal qui s'enflamme très rapidement en contact avec l'oxygène (air ou eau). L'aspect spectaculaire de l'explosion des accumulateurs au lithium ne doit pas faire oublier que les autres types d'accumulateurs ainsi que les piles peuvent également prendre feu en cas de mauvaise utilisation.

Actuellement, on trouve sur le marché trois grandes catégories d'accumulateurs au lithium :

- Accumulateurs au lithium-ion (Li-ion). Ce sont historiquement les premiers types d'accumulateurs au lithium. Cet accumulateur est composé d'une anode en carbone et d'une cathode en alliage d'oxyde de cobalt et de lithium plongées dans un électrolyte de chlorure de lithium déposé dans un solvant organique (carbonate de propylène). La tension par élément est de 3,6 V.
- Accumulateurs au lithium-polymères (Li-po). Ce type d'accumulateur présente une structure identique à celle d'un accumulateur lithium-ion. Seul l'électrolyte est de nature différente et composé d'un polymère (polyvinyle fluorite par exemple). La tension par élément est de 3,7 V.
- Accumulateurs au lithium-phosphate de fer (Li-Fe ou LiFePo_4). Ce type d'accumulateur est identique à l'accumulateur lithium-ion mais avec une cathode en phosphate de fer. Ce type d'accumulateur supporte une charge rapide (80% de la capacité en 2 heures) et des courants de décharge importants. La tension par élément est de 3,3 V.

Le premier type est surtout utilisé dans les appareils mobiles (PC portables). Les deux derniers types s'emploient surtout lorsque les courants de décharge sont importants et lorsque le temps de charge doit être court (téléphones). Ces deux types d'accumulateurs s'imposent actuellement dans l'alimentation des véhicules électriques (vélos, scooters et voitures).



Accumulateur Li-po avec circuit de protection.



Hélicoptère-jouet après explosion de l'accumulateur Li-po.

6.3.7 Précautions lors de l'emploi d'accumulateurs

Les accumulateurs sont des éléments sensibles dont le fonctionnement et la durée de vie dépendent beaucoup des conditions d'utilisation. Ils sont capables de stocker une énergie importante dans un faible volume mais peuvent présenter des dangers pour l'utilisateur ou pour les appareils en cas de mauvaise manipulation.

Les fabricants recommandent de respecter les précautions suivantes :

- ne pas charger, utiliser ou stocker les accumulateurs à trop haute température.
(un stockage de 20 jours à 60 °C équivaut à un stockage de 1 an à 20 °C)
- utiliser si possible un chargeur «intelligent», limitant la surcharge
- ne pas court-circuiter un accumulateur ou inverser les polarités
- ne pas mélanger des types d'accumulateurs différents (tension, grandeur ou provenance)
- éviter la mise en pression, le dégazage (gaz inflammable) et la fuite d'électrolyte (corrosif)
- ne pas démonter, souder, percer ou déformer un accumulateur
- ne pas immerger ou exposer à l'humidité
- recycler les accumulateurs en respectant l'environnement (ne pas les incinérer)

Note: les points ci-dessus (à l'exception faite de ceux qui concernent la charge) sont également valables pour les piles.



6.3.8 Charge et décharge des accumulateurs

Charge

On distingue trois façons de procéder pour charger les accumulateurs:

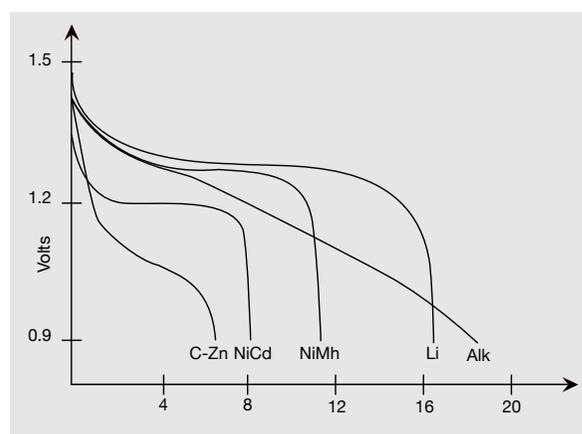
- Charge à tension constante
- Charge à courant constant
- Charge à courant constant puis à tension constante

Le choix de l'une ou l'autre de ces façons de procéder dépend du type d'accumulateur.

Le courant de charge est exprimé en fonction de la capacité. Par exemple un accumulateur de 500 mAh prévu pour être chargé à $C/10$ sera chargé à $500 \text{ mA}/10 = 50 \text{ mA}$ pendant 14 h environ. (La lettre C dans ce cas correspond à la valeur de la capacité en Ah).

Décharge

En ce qui concerne la décharge, le fabricant indique le courant maximum admissible en décharge continue ou en valeur crête par un multiple de la capacité. Il indiquera par exemple un courant de décharge de 50 C en crête et de 30 C en moyenne (la lettre C dans ce cas correspond au courant disponible pendant une heure). Dans le cas d'un accumulateur de 2,3 Ah, ceci se traduit par un courant de crête disponible d'au maximum $2,3 \text{ A} \cdot 50 = 115 \text{ A}$ et d'un courant moyen de $2,3 \text{ A} \cdot 30 = 69 \text{ A}$.



6.3.9 Charge et décharge des accumulateurs au plomb

Charge

Ces accumulateurs peuvent être chargés de deux manières:

- Charge à tension constante
- Charge à courant constant puis à tension constante

La charge à tension constante s'effectue en appliquant une tension continue de 2,45 V par élément, ceci pour une température ambiante comprise entre 20°C et 25°C. La charge est terminée lorsque le courant de charge tombe au dessous d'un certain seuil. Attention, il y a risque de surcharge et de détérioration de l'accumulateur si la tension est supérieure à 2,45 V par élément et si le temps de charge dépasse de façon importante la fin de charge.

La charge à courant constant puis à tension constante consiste à charger dans un premier temps à 0,4 C, puis lorsque la tension atteint 2,45 V par élément, à tension constante. Dans ce cas, la charge prend 6 à 12 heures selon l'état de décharge.

Décharge

En ce qui concerne la décharge, ces accumulateurs supportent mal une décharge complète. Par exemple, pour un type d'accumulateur, le fabricant garantit 1200 cycles charge-décharge lorsque la décharge n'est que de 30% de la capacité. Cette valeur tombe à 200 cycles charge-décharge lorsque la décharge est de 100%.

6.3.10 Charge et décharge des accumulateurs Ni-Cd et Ni-MH**Charge**

Ces accumulateurs sont chargés à courant constant. Une charge standard s'effectue à C/10 pendant 12 à 14 heures. Dans ce cas, l'élévation de température est faible et il n'est pas nécessaire de détecter une éventuelle augmentation de cette dernière. Le circuit de charge se résume donc à une source de courant constant. Une charge modérée peut être effectuée (durée de 2 à 3 heures) avec un chargeur «intelligent» qui va mesurer l'élévation de température et/ou la variation de tension (dU/dt) en fin de charge. Il est possible de charger des éléments Ni-MH à plus de 1 C, mais ceci diminue fortement leur durée de vie. Les accumulateurs Ni-Cd supportent mieux la charge rapide.

Décharge

En ce qui concerne la décharge, les accumulateurs Ni-MH supportent des courants de décharge de l'ordre de 2C alors que les Ni-Cd supportent des courants de décharge de l'ordre de 10 C. Les accumulateurs Ni-Cd sont donnés avec un nombre de cycle charge-décharge dépassant 500 cycles alors que les Ni-MH dépassent les 1000 cycles.

Effet mémoire

Les accumulateurs Ni-Cd doivent impérativement être complètement déchargés avant la recharge. Si ce point n'est pas respecté, il se produit une dégradation irréversible de l'électrolyte qui se traduit par une perte de capacité. Ce phénomène est connu sous le nom «d'effet mémoire».



6.3.11 Charge et décharge des accumulateurs au lithium

Charge

Ces accumulateurs doivent être chargés à courant constant puis à tension constante. La charge à courant constant s'effectue jusqu'à 1 C pour les lithium-ions et jusqu'à 10 C pour certains lithium-polymères. Lorsque la tension de l'élément atteint 4,1 V pour les lithium-ions, 4,2 V pour les lithium-polymères et 3,6 V pour les lithium-fer, la charge se poursuit à tension constante. La tension doit être garantie avec une précision élevée. Une charge typique dure environ 3 heures et les 80% de la capacité sont déjà atteints après une heure environ. Sur certains lithium-polymères, la charge peut être très rapide (moins d'une heure).

Décharge

Pour les accumulateurs lithium-ions, la décharge est de l'ordre de 1 C. Pour les lithium-polymères, la décharge peut être de 40 C en continu et atteindre 90 C en valeur de pointe.

Remarque

Ces accumulateurs ne présentent pas d'effet mémoire. Il est donc conseillé de les recharger dès que possible.

6.3.12 Tableau comparatif des accumulateurs courants

	Plomb	Cadmium-nickel (Ni-Cd)	Nickel-métal-hydrures (Ni-MH)	Lithium-ion (Li-ion)	Lithium-polymère (Li-po)
Force électromotrice par élément	2,1 V	1,2 V	1,2 V	3,6 V	3,6 V ou 3.7 V
Energie par unité de poids	30 à 50 Wh/kg	40 à 60 Wh/kg	60-120 Wh/kg	160 Wh/kg	130 – 200 Wh/kg
Anode	Plomb	Cadmium	Terre rare + nickel	Carbone	Carbone
Cathode	Plomb	Nickel	Nickel	Lithium	Lithium
Electrolyte	Acide sulfurique	Hydroxyde de potassium	Hydroxyde de potassium	Chlorure de lithium et carbonate de propylène	Polymère (polyvinyle fluorite par exemple)
Autodécharge	3% à 4% par mois	20% par mois	30% par mois	10% par mois	10% par mois
Durée de vie (cycles)	500 à 800	500	1000	> 500	> 500
Applications	Batteries de voiture Batteries stationnaires (stockage d'énergie)	Pratiquement abandonné au profit des Ni-MH	Appareils électroniques «grand public» (radios, lecteurs MP3, caméras, téléphones sans fils,...)	Ordinateurs portables Téléphones mobiles	Ordinateurs portables Téléphones mobiles Caméras Lecteurs MP3 Véhicules électriques
Stockage	Chargé	Déchargé	Chargé	Mi-chargé	Mi-chargé
Tension de fin de décharge	1,7 à 1,8 V	0,9V	0,9 V	2,7 à 3 V	2,7 V
Tension de fin de charge	2,45 V	1,95 V	1,8 V	4,2 V	4,2 V



6.3.13 Perspectives futures

Le marché des piles et surtout celui des accumulateurs est en pleine expansion, ceci à cause de l'usage de plus en plus intensif des dispositifs mobiles (téléphones, PC, lecteurs MP3, ...). On sait déjà que l'avenir des accumulateurs au Lithium sera limité par les réserves naturelles. Ceci sera particulièrement sensible si on envisage d'utiliser ce genre d'accumulateurs dans les véhicules à moteurs. Pour cette raison, de nombreuses recherches sont effectuées pour trouver d'autres solutions qui permettent le stockage de l'électricité sous un faible volume. Dans ce contexte, les technologies qui semblent actuellement (2012) les plus prometteuses sont:

- Technologie au Nickel-Zinc
- Technologie au Nickel-Lithium
- Pile à combustible

D'autres recherches sont effectuées, on peut citer par exemple la réalisation de nano-centrales nucléaires de la taille d'une pièce de monnaie.

Technologie au Nickel-Zinc

Il s'agit en fait d'une technologie très ancienne, qui n'était plus employée à cause du faible nombre de cycle charge-décharge qu'elle autorisait. Les derniers progrès technologiques semblent indiquer que ce point a été réglé. Ces éléments présentent une tension nominale de 1,65V, une densité d'énergie massique du même ordre que les Li-po et ils se chargent à courant constant suivit d'une charge à tension constante (même profil de charge que les Li-xx).

Technologie au Nickel-Lithium

Cette technologie combinerait les avantages des technologies Ni-MH et Li-xx. On obtiendrait des densités d'énergie double par rapport aux technologies Lithium «classiques». Ceci permettrait donc d'économiser de façon importante nos réserves de Lithium. La tension de ce type d'élément se situe aux alentours de 3,5V.

Pile à combustible

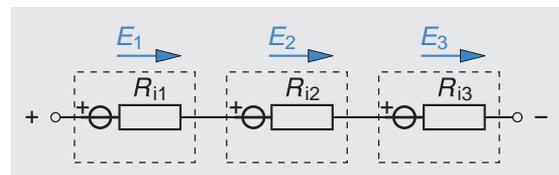
Cette technologie est ancienne et a surtout été développée dans le contexte spatial. Le principe est d'utiliser la recombinaison de l'hydrogène et de l'oxygène pour générer de l'électricité (électrolyse inverse). La recharge de ces éléments se fait en ajoutant du «combustible» (oxygène et hydrogène). On a donc un élément qui se situe entre la pile (usure des composés électrochimique) et de l'accumulateur (recharge possible en ajoutant du combustible). Les premières piles utilisaient du platine comme électrodes, avec ce que ceci implique en termes de coûts. Ces dernières années, différents progrès techniques ont été effectués et on trouve des piles équipées d'électrodes composées de nickel, chrome et lithium. Différentes voies sont explorées pour éviter l'usage direct de l'hydrogène, ceci afin de trouver une solution sûre au problème du stockage. On trouve actuellement des piles alimentées au méthanol par exemple. Plusieurs fabricants d'ordinateurs portables présentent des prototypes alimentés par des piles à combustible.

6.4 Couplages des générateurs chimiques

6.4.1 Couplage série

Des générateurs chimiques sont couplés en série lorsque le pôle positif (+) de l'un des éléments est relié au pôle négatif (-) de l'autre élément et ainsi de suite.

Ce couplage, très utilisé, donne la possibilité d'obtenir des tensions élevées.



Trois éléments couplés en série

Formules

La FEM du groupement est égale à la somme des FEM de chacun des éléments.

E force-électromotrice en volts [V]

Pour n éléments identiques :

n nombre d'éléments

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots$$

$$E = E_1 \cdot n$$

La résistance interne R_i du groupement est égale à la somme des résistances internes de chacun des éléments.

R_i résistance interne en ohms [Ω]

$$R_i = R_{i1} + R_{i2} + R_{i3} + \dots$$

$$R_i = R_{i1} \cdot n$$

Pour n éléments identiques :

n nombre d'éléments

La capacité Q du groupement n'est pas augmentée par la mise en série de plusieurs éléments, car chaque élément débite le même courant durant le même temps.

Il faut donc brancher en série des éléments de même capacité.

Q capacité en ampèreheures [Ah]

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots$$

Le courant I d'un circuit série dépend de la FEM totale et de la résistance totale.

I intensité du courant en ampères [A]

R_t résistance totale en ohms [Ω]

R résistance du récepteur en ohms [Ω]

$$I = \frac{E}{R_t} = \frac{E_1 \cdot n}{R + R_i \cdot n}$$



Exemple 1

Trois piles LR03 alimentent une lampe de $13,5 \Omega$. La résistance interne de chaque pile est de $0,3 \Omega$ et la capacité est de $0,6 \text{ Ah}$. Déterminer toutes les grandeurs du circuit.

FEM de la batterie : $E = E_1 \cdot n = 1,5 \cdot 3 = \mathbf{4,5 \text{ V}}$

R_i de la batterie : $R_i = R_{i1} \cdot n = 0,3 \cdot 3 = \mathbf{0,9 \Omega}$

Capacité : $Q = Q_1 = \mathbf{0,6 \text{ Ah}}$

Courant débité : $I = \frac{E_1 \cdot n}{R + R_i} = \frac{1,5 \cdot 3}{13,5 + 0,9} = \mathbf{0,31 \text{ A}}$

Tension à la lampe : $U = R \cdot I = 13,5 \cdot 0,31 = \mathbf{4,22 \text{ V}}$

Chute de tension interne : $U_i = R_i \cdot I = 0,9 \cdot 0,31 = \mathbf{0,28 \text{ V}}$

Temps d'utilisation : $t = \frac{Q}{I} = \frac{0,6}{0,31} = \mathbf{1 \text{ h } 55 \text{ min}}$

Exemple 2

On raccorde en série une pile, un ampèremètre de résistance $R_1 = 0,8 \Omega$ et une résistance de charge $R_2 = 1,2 \Omega$. L'ampèremètre indique $0,5 \text{ A}$.

On court-circuite la pile tout en gardant l'ampèremètre, le courant est de $1,1 \text{ A}$.

Calculer la résistance interne de la pile.

Tension aux bornes de la pile avec $R_2 = 1,2 \Omega$:

$$U_1 = (R_2 + R_1) \cdot I = (1,2 + 0,8) \cdot 0,5$$

$$U_1 = 1 \text{ V}$$

Tension aux bornes de la pile en court-circuit :

$$U_2 = R_1 \cdot I = 0,8 \cdot 1,1 = 0,88 \text{ V}$$

Différence de chute de tension interne :

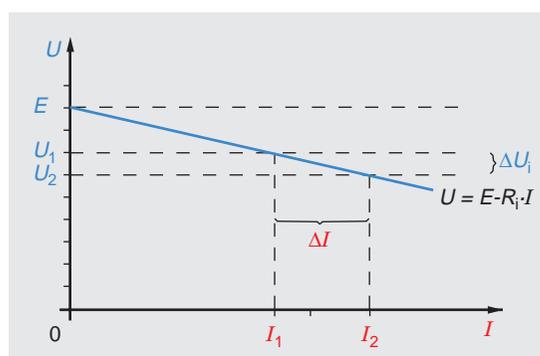
$$\Delta U_i = U_1 - U_2 = 1 - 0,88 = 0,12 \text{ V}$$

Différence de courant :

$$\Delta I = I_2 - I_1 = 1,1 - 0,5 = 0,6 \text{ A}$$

Résistance interne :

$$R_1 = \frac{\Delta U_i}{\Delta I} = \frac{0,12}{0,6} = \mathbf{0,2 \Omega}$$



La pente représente la résistance interne de la pile

6.4.2 Couplage parallèle

Des générateurs chimiques sont couplés en parallèle lorsque :

- les pôles positifs (+) des éléments sont reliés entre eux ;
- les pôles négatifs (-) des éléments sont reliés entre eux.

Ce couplage donne la possibilité d'obtenir des courants élevés en augmentant la capacité. Par exemple : les plaques de même polarité d'un accumulateur au plomb sont en parallèle.

Remarque

On ne peut coupler en parallèle que des accumulateurs. En effet, les forces électromotrices ne peuvent être rigoureusement identiques. L'élément présentant la tension la plus élevée va donc se décharger dans les éléments de tension plus faible. Dans le cas d'accumulateurs, ceci a pour effet d'équilibrer les charges. Dans le cas de piles, cette décharge va se traduire par un échauffement (pertes dans la résistance interne) et, dans le pire des cas, par la destruction des éléments.

Notation

Pour indiquer la configuration d'une batterie d'accumulateurs, on désigne par la lettre S la mise en série et la lettre P la mise en parallèle. Exemple 3S2P signifie que l'on a 6 éléments au total dont deux groupes de 3 éléments mis en série, ces deux groupes étant connectés en parallèle.

Formules

(valables pour des accumulateurs)

La FEM du groupement est égale à celle d'un élément

E force électro-motrice en volts [V]

La résistance interne R_i du groupement est plus faible que celle d'un élément

R_i résistance interne du groupement en ohms [Ω]

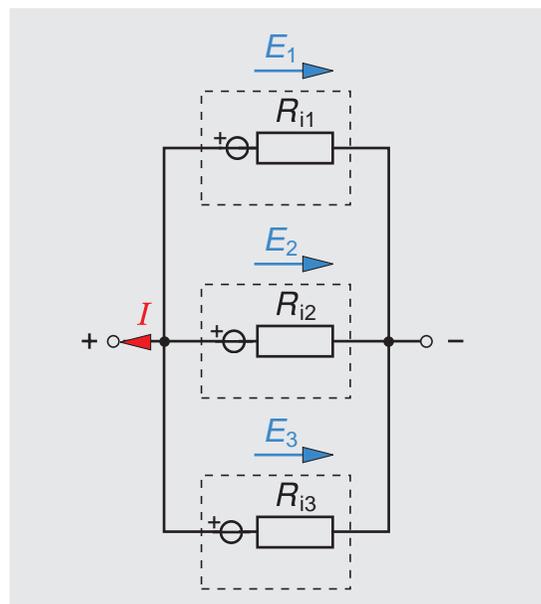
R_{i1} résistance interne d'un élément en ohms [Ω]

n nombres d'éléments identiques

La capacité du groupement est égale à la somme des capacités des éléments

Q capacité du groupement en ampèreheures [Ah]

Q_1 capacité d'un élément en ampèreheures [Ah]



Trois éléments identiques couplés en parallèle

$$E = E_1 = E_2 = E_3 = \dots$$

$$R_i = \frac{R_{i1}}{n} = \frac{R_{i2}}{n} = \frac{R_{i3}}{n}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots$$



Le courant I total délivré par un branchement parallèle dépend de la FEM et de la résistance interne d'un élément, du nombre n d'éléments et de la résistance R du récepteur

I intensité du courant en ampère [A]
 R résistance du récepteur en ohms [Ω]

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

6.5 Elimination des piles et accumulateurs

La plupart des piles et accumulateurs contiennent des matières polluantes. Une fois la pile ou l'accumulateur hors d'usage, il faut les rapporter au point de vente ou à un centre de collecte pour le recycler.

Ne jamais jeter de piles ou accumulateurs à la poubelle!

L'énergie produite par les piles est extrêmement chère (plusieurs centaines de francs pour 1 kWh). Il est donc préférable de remplacer les piles par des accumulateurs pour les récepteurs que l'on utilise fréquemment (tenir compte des FEM E).

Tout utilisateur en Suisse paie une taxe anticipée d'élimination qui sert à financer le recyclage: CTAR (taxe anticipée de recyclage) et TEA (taxe d'élimination anticipée). En 2009 seuls 71% des piles et accumulateurs vendus ont été recyclés.



6.6 Source de tension continue

Dans de nombreux appareils, la tension continue n'est pas délivrée par une pile ou un accumulateur, mais provient d'un circuit électronique spécifique. Souvent, celui-ci permet de régler cette tension de façon précise. On parle alors de régulateur de tension.

Ces sources de tension peuvent être désignées par un symbole différent de celui d'une pile ou d'un accumulateur.

U_0 tension à vide en [V]

Si la source n'est pas idéale, on peut compléter son schéma équivalent au moyen d'une résistance série R_i , symbolisant la résistance interne de cette source.

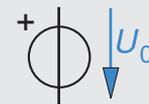
R_i résistance interne en [Ω]

I intensité du courant en [A]

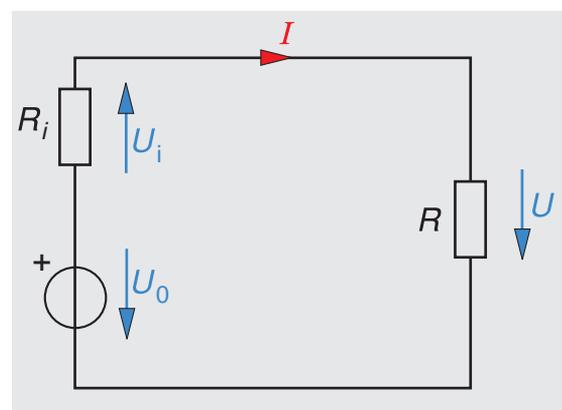
U_i chute de tension interne en [V]

U tension aux bornes en [V]

La relation entre les différentes grandeurs est identique à celle donnée pour les piles et accumulateurs (p 6.3).



Symbole général d'une source de tension DC



$$U = U_0 - U_i = U_0 - R_i \cdot I$$



6.7 Exercices

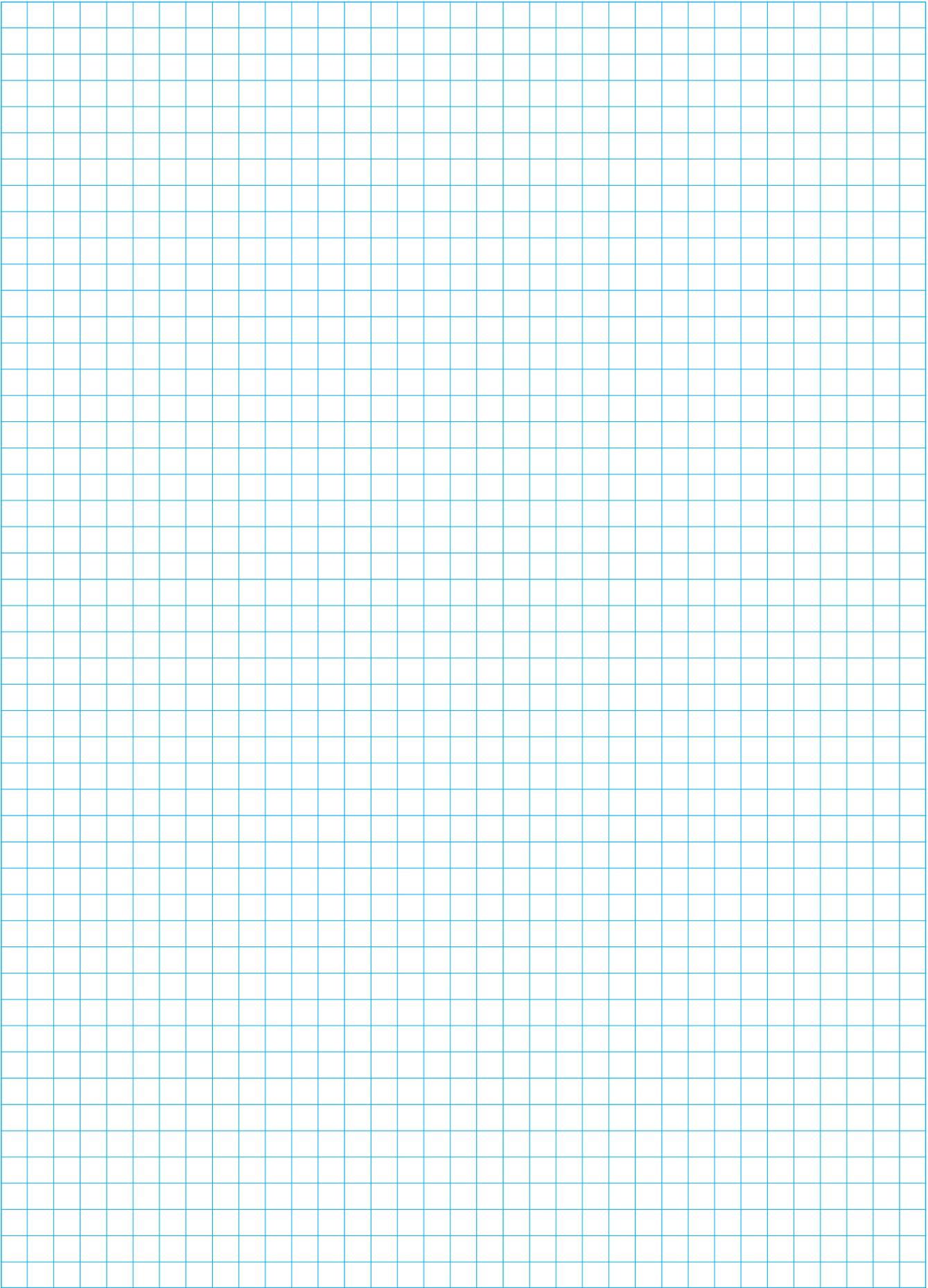
1. Qu'est-ce qu'une pile ?
2. De façon générale, comment est constituée une pile et quel est son fonctionnement ?
3. Quels sont les symboles de grandeur et d'unité de la FEM ?
4. Quelle différence existe-t-il entre la force électromotrice et la tension U aux bornes d'une pile ?
5. Qu'est-ce que la quantité d'électricité ?
6. Quels sont les symboles de grandeur et d'unité de la quantité d'électricité ?
7. Citer trois genres de piles et leur FEM approximative.
8. Comment fonctionne une pile de type saline ?
9. Une pile de FEM 1,5 V débite un courant de 0,25 A dans une résistance de 5 Ω . Calculer dans ce cas la tension aux bornes de la pile et la résistance interne de la pile.
10. Une pile de type LR6 de 1,5 V a une capacité de 2,5 Ah pour un prix de vente d'environ Fr. 1,00. Calculer le prix du kWh de l'énergie fournie par la pile. De combien cette énergie est-elle plus chère que l'énergie fournie par le réseau, si celle-ci coûte 11 cts le kWh ?
11. Une pile a une FEM E de 1,5 V. Elle est mise en court-circuit par un ampèremètre de résistance interne négligeable, qui indique 12 A. Quelle est la résistance interne de la pile et la tension au moment du court-circuit ?
12. Qu'est-ce qu'un accumulateur ?
13. Comment est constitué un accumulateur au plomb et quel est son fonctionnement ?
14. Que peut-on dire des caractéristiques d'un ensemble d'éléments ou d'accumulateurs branchés en série ?
15. Que peut-on dire des caractéristiques d'un ensemble d'accumulateurs branchés en parallèle ?

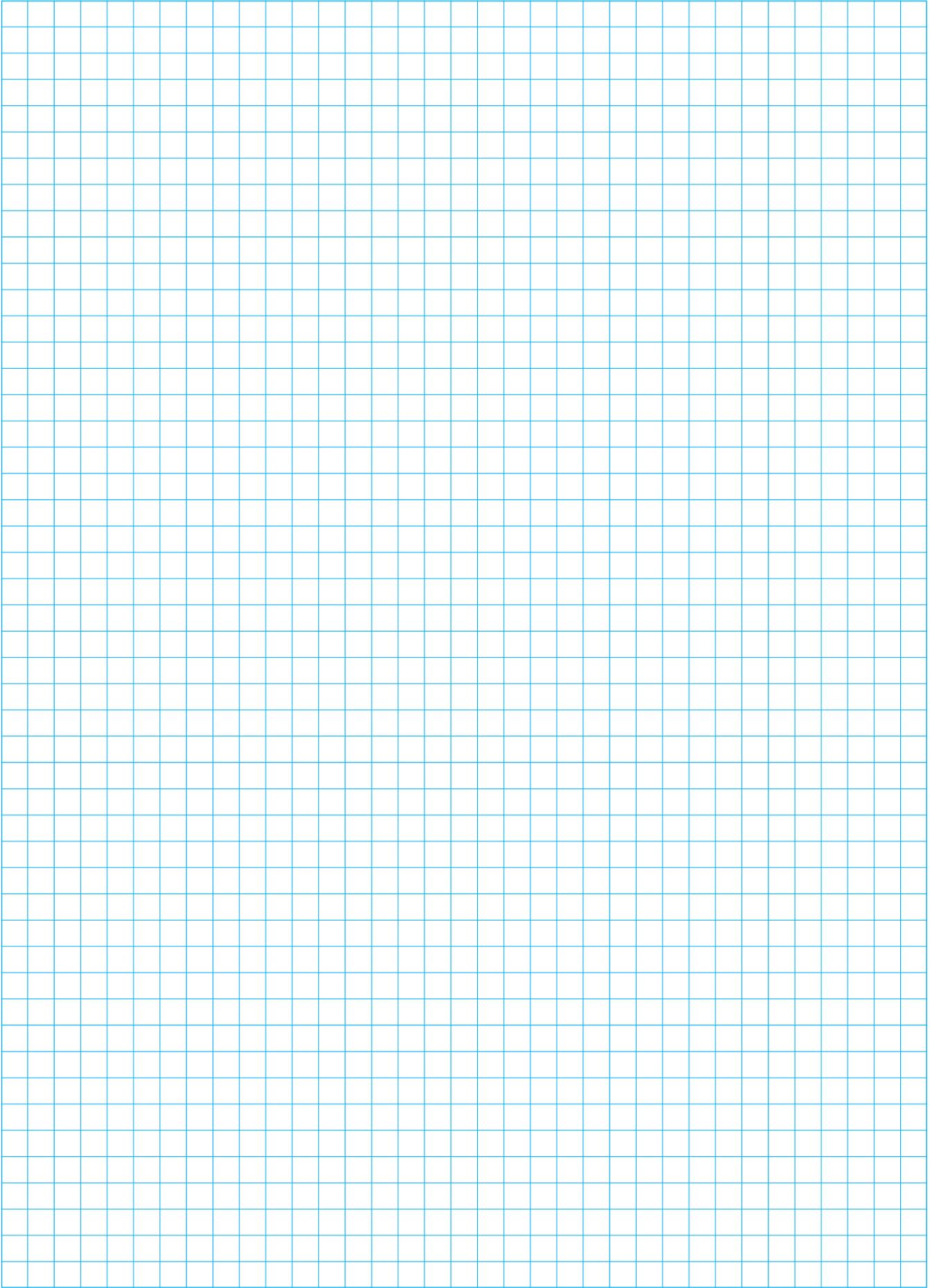


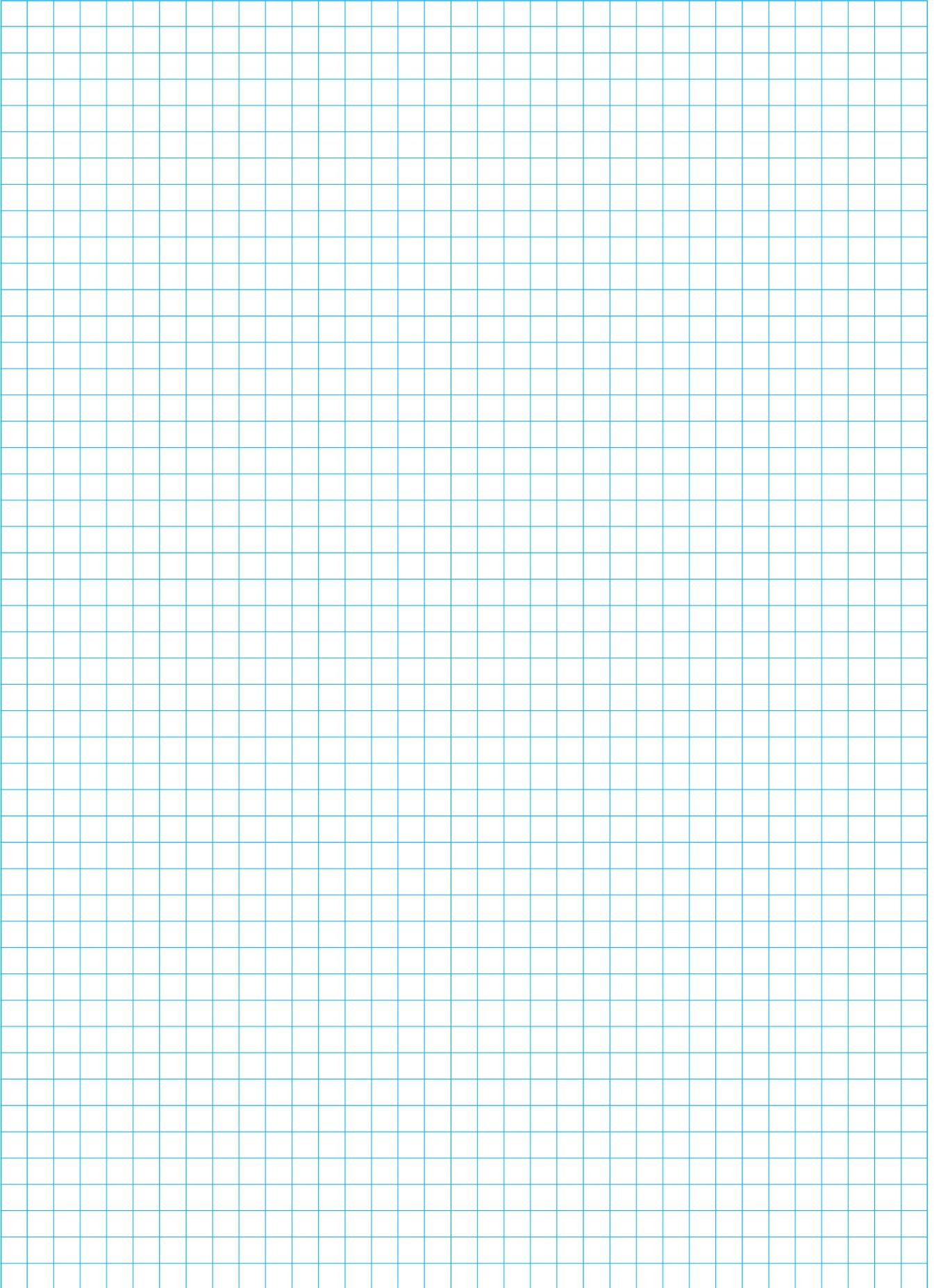
16. Une batterie est composée de 6 éléments de résistance interne de $0,1 \Omega$ chacun. On raccorde cette batterie à une résistance de 4Ω . Calculer l'intensité du courant dans le circuit.
17. Une batterie de piles est composée de trois éléments raccordés en série.
Caractéristiques d'un élément: $R_i = 0,5 \Omega$ et $E = 1,5 \text{ V}$.
Cette batterie de piles débite sur une résistance de 3Ω .
Calculer:
- l'intensité du courant dans le circuit
 - la tension aux bornes du récepteur
18. Un accumulateur a une capacité de 80 Ah . Il débite un courant constant de 6 A pendant $5,5$ heures. Calculer la quantité d'électricité débitée. Pendant combien de temps pourra-t-il encore fournir un courant de 6 A ?
19. Trois éléments d'accumulateur au plomb dont la FEM est de 2 V et la résistance interne de $0,01 \Omega$ pour chaque élément, débitent en série sur une résistance de $0,4 \Omega$.
On demande :
- la FEM totale
 - l'intensité du courant dans le circuit
 - la tension aux bornes de l'accumulateur lors de la décharge
 - la chute de tension dans la batterie
 - l'intensité du courant pour la charge de l'accumulateur et la durée de cette charge si la capacité est de 65 Ah (charge à tension constante)
 - la tension aux bornes de l'accumulateur lors de la charge
20. Trois éléments identiques d'accumulateur Li-ion sont couplés en parallèle. Chaque élément possède les caractéristiques suivantes : Capacité 850 mAh
Tension $3,6 \text{ V}$ Résistance interne $50 \text{ m}\Omega$
Ils alimentent un récepteur de résistance $R = 22 \Omega$
Calculer :
- l'intensité du courant délivré par chaque élément
 - la puissance dissipée par le récepteur
 - le temps de fonctionnement si le courant est supposé constant
 - l'énergie totale fournie au récepteur
 - l'intensité du courant à travers chaque élément si on admet qu'un des éléments n'a qu'une tension de $2,8 \text{ V}$ au départ (partiellement chargé) et que le récepteur n'est pas branché.



21. Un hélicoptère jouet est équipé d'un accu Li-po de 3,6 V 350 mAh. La durée d'un vol est de 8 minutes.
- Calculer le courant consommé par le moteur
 - Calculer la puissance fournie au moteur en vol
 - Calculer le travail fourni pendant le vol
 - En sachant que l'hélicoptère pèse 40 g, calculer de quelle hauteur il faudrait déplacer cette masse pour fournir le même travail







Chapitre 2

14. $I = 9,2 \text{ A}$ fusible 10 A ou disjoncteur 13 A
 15. $U = 228 \text{ V}$
 16. fusible 25 A
 17. non aux USA

Chapitre 3

5. a) $R_2 = 4 R_1$ b) $R_2 = 4 R_1$
 6. la résistance est 9 fois plus faible
 7. $R = 175 \text{ m}\Omega$
 8. $R = 46,7 \text{ m}\Omega$
 9. constantan
 10. $A = 0,142 \text{ mm}^2$ $d = 0,425 \text{ mm}$
 11. $A_1 = 1,13 \text{ mm}^2$ $R_1 = 1,21 \Omega$
 $l_2 = 37,5 \text{ m}$ $d_2 = 2,26 \text{ mm}$
 $d_3 = 1,38 \text{ mm}$ $R_3 = 4,83 \Omega$
 $l_4 = 299 \text{ m}$ $A_4 = 7,07 \text{ mm}^2$
 14. $R = 18 \Omega$
 15. $I_1 = I_2 = I_3 = 202 \text{ mA}$
 $U_1 = 2,63 \text{ V}$ $U_2 = 3,23 \text{ V}$ $U_3 = 18,2 \text{ V}$
 16. $U = 264 \text{ V}$
 18. $R_{\text{add}} = 750 \Omega$
 19. $R_{\text{add}} = 150 \text{ k}\Omega$
 23. $\Delta U = 2 \text{ V}$ ou 0,87 % de U_1
 24. $\Delta U = 20 \text{ V}$ ou 8,68 % de U_1 donc fil de 6 mm^2
 27. $R = 9,95 \Omega$
 28. $U_1 = U_2 = U_3 = 24 \text{ V}$
 $I_1 = 8 \text{ A}$ $I_2 = 4 \text{ A}$ $I_3 = 2,67 \text{ A}$
 29. $R = 0,5 \Omega$



30. $I = 6,66 \text{ A}$
31. $I_L = 0,435 \text{ A}$ $I_R = 7,67 \text{ A}$ fusible 10 A ou disjoncteur 13 A
33. $R_s = 26,7 \text{ m}\Omega$
34. largeur = 33 mm
35. $R_{\text{tot}} = 5,50 \Omega$ $I_{\text{tot}} = I_4 = 8,73 \text{ A}$
 $U_1 = 4,36 \text{ V}$ $U_2 = 8,73 \text{ V}$ $U_3 = 13,1 \text{ V}$ $U_4 = 34,9 \text{ V}$
 $I_1 = I_2 = 4,36 \text{ A}$ $I_3 = 4,36 \text{ A}$
36. $R_{\text{tot}} = 35,2 \Omega$ $I_{\text{tot}} = 6,53 \text{ A}$
 $I_1 = 0,98 \text{ A}$ $I_2 = 1,14 \text{ A}$ $I_3 = I_4 = 2,11 \text{ A}$ $I_5 = 4,42 \text{ A}$
 $U_1 = U_2 = 14,7 \text{ V}$ $U_3 = 211 \text{ V}$ $U_4 = 4,22 \text{ V}$
37. a) $U_2 = 4 \text{ V}$
 b) $U_2 = 0,408 \text{ V}$; 2,13 V; 3,68 V
38. $R_x = 123 \Omega$ $U_{R2} = 7,37 \text{ V}$ $U_{R3} = 7,37 \text{ V}$
39. $R_{AB} = 18,3 \Omega$
40. $U_{AB} = 15 \text{ V}$, $U_{CD} = 6 \text{ V}$
 $U_{DE} = 9 \text{ V}$, $U_{FI} = 11,7 \text{ V}$
 $U_{GH} = 4,7 \text{ V}$, $U_{HI} = 7 \text{ V}$
 $U_{IJ} = 3 \text{ V}$, $U_D = 9 \text{ V}$
 $U_H = 10,3 \text{ V}$, $U_I = 3,3 \text{ V}$
41. $U_2 = 11,6 \text{ V}$
42. $U_{\text{th}} = 12 \text{ V}$
 $R_{\text{th}} = 2500 \Omega$
43. $U_{\text{th}} = 13,5 \text{ V}$
 $R_{\text{th}} = 8,74 \text{ k}\Omega$
44. $R_{\text{ch}} = 6 \text{ k}\Omega$

Chapitre 4

9. $W = 16 \text{ kWh}$
10. $I = 5,50 \text{ A}$ fusible 10 A ou disjoncteur 13 A $R = 41,7 \Omega$
15. $P = 63 \text{ kW}$
16. $P = 912 \text{ W}$
17. $P = 496 \text{ W}$



- 18. $R_4 = 120 \Omega$
- 19. Fr. 2,35
- 20. le radiateur est en ordre
- 21. 45 tr/min
- 25. $P_a = 1940 \text{ W}$
- 26. $\eta = 0,782$
- 27. $P_m = 4 \text{ kW}$ $I = 21,32 \text{ A}$
- 28. $t = 15 \text{ min } 56,48 \text{ s}$

Chapitre 5

- 2. $W = 1,68 \text{ kWh}$
- 5. $W = 25,4 \text{ kWh}$
- 7. $t = 6 \text{ min}$
- 8. $P = 1010 \text{ W}$
- 9. $W = 118 \text{ Wh}$
- 12. $J = 4,16 \text{ A/mm}^2$
- 17. $R_2 = 5,25 \Omega$
- 18. $\theta = 2700 \text{ }^\circ\text{C}$
- 19. $l = 17,1 \text{ m}$ $P = 1230 \text{ W}$
- 20. $R_{210} = 16,8 \Omega$
- 21. $R_{210} = 21,8 \Omega$
- 22. $R_{210} = 22,6 \Omega$

Chapitre 6

- 9. $U = 1,25 \text{ V}$ $R_i = 1 \Omega$
- 10. Fr. 267.– par kWh, soit 2430 fois plus cher
- 11. $R_i = 125 \text{ m}\Omega$ $U = 0 \text{ V}$



16. $I = 1,96 \text{ A}$
17. a) $I = 1 \text{ A}$ b) $U = 3 \text{ V}$
18. $Q = 33 \text{ Ah}$ $t = 7 \text{ h } 50 \text{ min}$
19. a) $W_{\text{tot}} = 6 \text{ V}$ b) $I = 14 \text{ A}$
c) $U = 5,58 \text{ V}$ d) $\Delta U_i = 0,42 \text{ V}$
e) $I = 6,5 \text{ A}$ $t = 10 \text{ h}$
f) $U = 6,19 \text{ V}$
20. a) $I_1 = I_2 = I_3 = 54,5 \text{ mA}$ b) $P = 0,588 \text{ W}$
c) $t = 15,6 \text{ h}$ d) $W = 33 \text{ kJ}$
e) $I_1 = 10,6 \text{ A}$ $I_2 = I_3 = 5,33 \text{ A}$
21. a) $I = 2,63 \text{ A}$
b) $P = 9,45 \text{ W}$
c) $W = 4,54 \cdot 10^3 \text{ J}$
d) $h = 11,6 \text{ Km}$

Annexe 1 Symboles

Identification
du matériel

(Par ordre d'apparition)

Pile (générateur électrique chimique de tension continue)

Résistance ou récepteur ohmique

Courant continu

Courant alternatif

Transformateur de tension (permet d'abaisser ou d'élever la tension)

Voltmètre (appareil de mesure permettant de mesurer une différence de potentiel)

Ampèremètre (appareil de mesure permettant de mesurer une quantité d'électricité passant chaque seconde dans un conducteur)

Générateur électrique de tension continue (symbole général)

Ohmmètre (appareil de mesure permettant de mesurer la résistance électrique d'un récepteur, appareil ou ligne)

Bobine ou inductance

Fusible

Sectionneur de neutre

Interrupteur

Wattmètre (appareil de mesure permettant de mesurer une puissance électrique)

Source de tension continue

	G
	R
	DC
	AC
	T
	P
	P
	G
	P
	L
	F
	Q
	S
	P
	G

Lampe d'éclairage ou de signalisation

Résistance variable

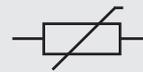
Résistance dépendant de la tension (VDR)



H



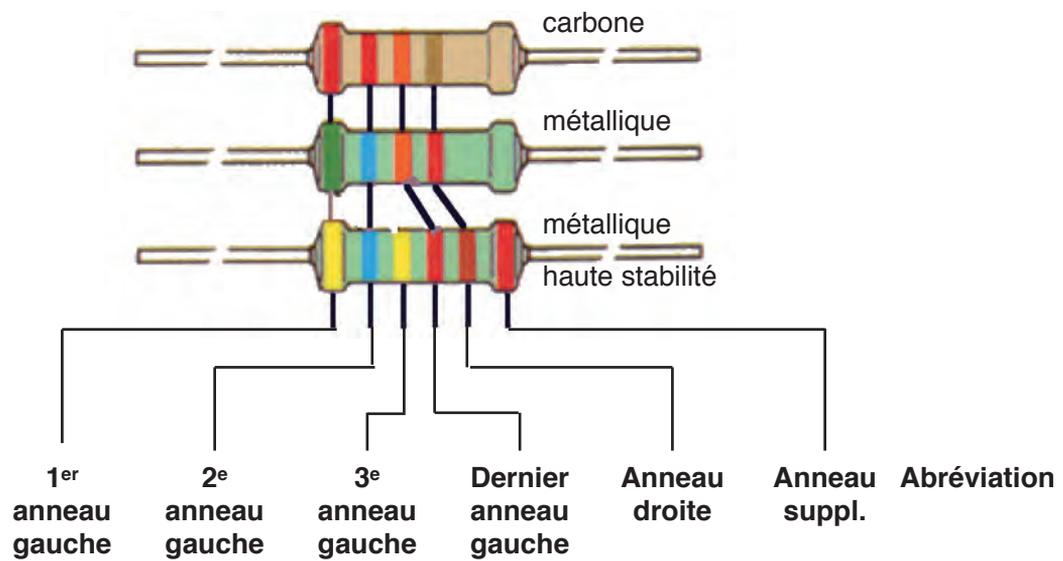
R



R

Identification
du matériel

Annexe 2 Codage de la valeur des résistances



Couleur	1 ^{er} chiffre	2 ^e chiffre	3 ^e chiffre	Multiplicateur	Tolérance	Coef. temp.	Couleur	
	Noir	0	0	0	$10^0=1$	200 ppm	BK	
	Marron	1	1	1	10^1	$\pm 1\%$	100 ppm	BN
	Rouge	2	2	2	10^2	$\pm 2\%$	50 ppm	RD
	Orange	3	3	3	10^3		15 ppm	OG
	Jaune	4	4	4	10^4		25 ppm	YW
	Vert	5	5	5	10^5	$\pm 0,5\%$		GN
	Bleu	6	6	6	10^6	$\pm 0,25\%$		BU
	Violet	7	7	7	10^7	$\pm 0,10\%$		VT
	Gris	8	8	8	10^8	$\pm 0,05\%$		GY
	Blanc	9	9	9	10^9			WT
	Or				0,1	$\pm 5\%$		GD
	Argent				0,01	$\pm 10\%$		SR
	(absent)					$\pm 20\%$		

La valeur caractéristique de la résistance n'est représentée par 3 anneaux que lorsque sa tolérance est inférieure à 2%
ppm: partie par million

Annexe 3 Codage de la valeur des condensateurs



1^{er} anneau gauche 2^e anneau gauche Dernier anneau gauche Anneau droite Anneau suppl. Abréviation

Couleur	1 ^{er} chiffre	2 ^e chiffre	Multiplicateur	Tolérance	Isolation	Couleur	
	Noir	0	0	$10^0=1$	20%	BK	
	Marron	1	1	10^1	1%	100 V	BN
	Rouge	2	2	10^2	2%	250 V	RD
	Orange	3	3	10^3			OG
	Jaune	4	4	10^4		400 V	YW
	Vert	5	5	10^5			GN
	Bleu	6	6	10^6		630 V	BU
	Violet	7	7	10^7			VT
	Gris	8	8	10^8			GY
	Blanc	9	9	10^9			WT
	Or			0,1	5%		GD
	Argent			0,01	10%		SR
	(absent)						

La lecture d'un condensateur se fait par le premier anneau (le plus éloigné des pattes) et à l'opposé de l'isolation.

Annexe 4 Marquage des résistances CMS

Jusqu'à la taille 0603

Les résistances montées en surface sont marquées d'un code numérique de trois ou quatre chiffres.

- Avec le marquage à quatre chiffres, les trois premiers représentent la valeur, le quatrième est le multiplicateur en puissance de dix; pour les valeurs inférieures à 100 la position du séparateur décimal est représentée par la lettre R.
- Avec le marquage à trois chiffres, les deux premiers représentent la valeur, le troisième est le multiplicateur en puissance de dix; pour les valeurs inférieures à 10 la position du séparateur décimal est représentée par la lettre R.

Exemples		
Valeur	3 chiffres	4 chiffres
0,01 ohm	R01	0R01
0,22 ohm	R22	0R22
1,5 ohm	1R5	1R50
15 ohms	150	15R0
100 ohms	101	1000
4,7 kilohms	472	4701
12 mégohms	126	1205



Taille 0603

Il existe un autre type de marquage, appelé «EIA-96». Il utilise deux chiffres pour la valeur et une lettre pour le multiplicateur, selon les correspondances ci-dessous.

Valeur:

01 = 100	13 = 133	25 = 178	37 = 237	49 = 316	61 = 422	73 = 562	85 = 750
02 = 102	14 = 137	26 = 182	38 = 243	50 = 324	62 = 432	74 = 576	86 = 768
03 = 105	15 = 140	27 = 187	39 = 249	51 = 332	63 = 442	75 = 590	87 = 787
04 = 107	16 = 143	28 = 191	40 = 255	52 = 340	64 = 453	76 = 604	88 = 806
05 = 110	17 = 147	29 = 196	41 = 261	53 = 348	65 = 464	77 = 619	89 = 825
06 = 113	18 = 150	30 = 200	42 = 267	54 = 357	66 = 475	78 = 634	90 = 845
07 = 115	19 = 154	31 = 205	43 = 274	55 = 365	67 = 487	79 = 649	91 = 866
08 = 118	20 = 158	32 = 210	44 = 280	56 = 374	68 = 499	80 = 665	92 = 887
09 = 121	21 = 162	33 = 215	45 = 287	57 = 383	69 = 511	81 = 681	93 = 909
10 = 124	22 = 165	34 = 221	46 = 294	58 = 392	70 = 523	82 = 698	94 = 931
11 = 127	23 = 169	35 = 226	47 = 301	59 = 402	71 = 536	83 = 715	95 = 953
12 = 130	24 = 174	36 = 232	48 = 309	60 = 412	72 = 549	84 = 732	96 = 976

Multiplicateur:

Y ou S = 0,01 X ou R = 0,1 A = 1 B = 10 C = 100 D = 1000 E = 10 000 F = 100 000

Annexe 5 Séries normalisées

Séries normalisées												
E3	E6	E12	E24	E96								
10	10	10	10	100	200	301	402	511	604	712	806	909
			11	102	2005	309	412	523	619	732	825	931
		12	12	105	210	316	422	536	634	750	845	953
			13	107	215	321	432	519	649	768	866	976
			15	110	221	332	42	562	665	787	887	
		15	15	15	15	113	226	340	453	576	681	
			16	113	226	340	453	576	681			
			18	18	18	115	226	348	464	590	698	
			20	118	232	357	475					
		22	22	22	22	121	237	365	487			
24	124				243	374	499					
27	27			147	249	383						
	30			130	255	392						
	33			133	261							
33	33			33	33	137	267					
	36			137	267							
	39			39	39	140	274					
	43			143	280							
47	47			47	47	147	287					
		51	150		294							
		56	56	154								
			62	158								
			68	162								
		68	68	68	68	162						
			75	165								
			82	82	82	169						
			91	174								
						178						
				182								
				187								
				191								
				196								

Tolérance des séries normalisées:

- E3 : 20%
- E6 : 10%
- E12 - E24 : 5%
- E96 : 1%

Ce cours complet d'électrotechnique comprend 3 fascicules:

Fascicule 1

- Chapitre 1 : Notions fondamentales
- Chapitre 2 : Grandeurs fondamentales
- Chapitre 3 : Résistance électrique - Couplages
- Chapitre 4 : Energie - Puissance - Rendement
- Chapitre 5 : Effets calorifiques du courant
- Chapitre 6 : Sources chimiques de tension



Fascicule 2

- Chapitre 7 : Magnétisme - Electromagnétisme
- Chapitre 8 : Electrostatique - Condensateur
- Chapitre 9 : Instruments de mesure
- Chapitre 10 : Courant alternatif monophasé



Fascicule 3

- Chapitre 11 : Courant alternatif triphasé
- Chapitre 12 : Moteurs à courant alternatif
- Chapitre 13 : Moteurs à courant continu
- Chapitre 14 : Transformateurs
- Chapitre 15 : Eclairage



VERBAND DER TECHNISCHEN SCHULEN
FEDERATION DES ECOLES TECHNIQUES
FEDERAZIONE DELLE SCUOLE TECNICHE

