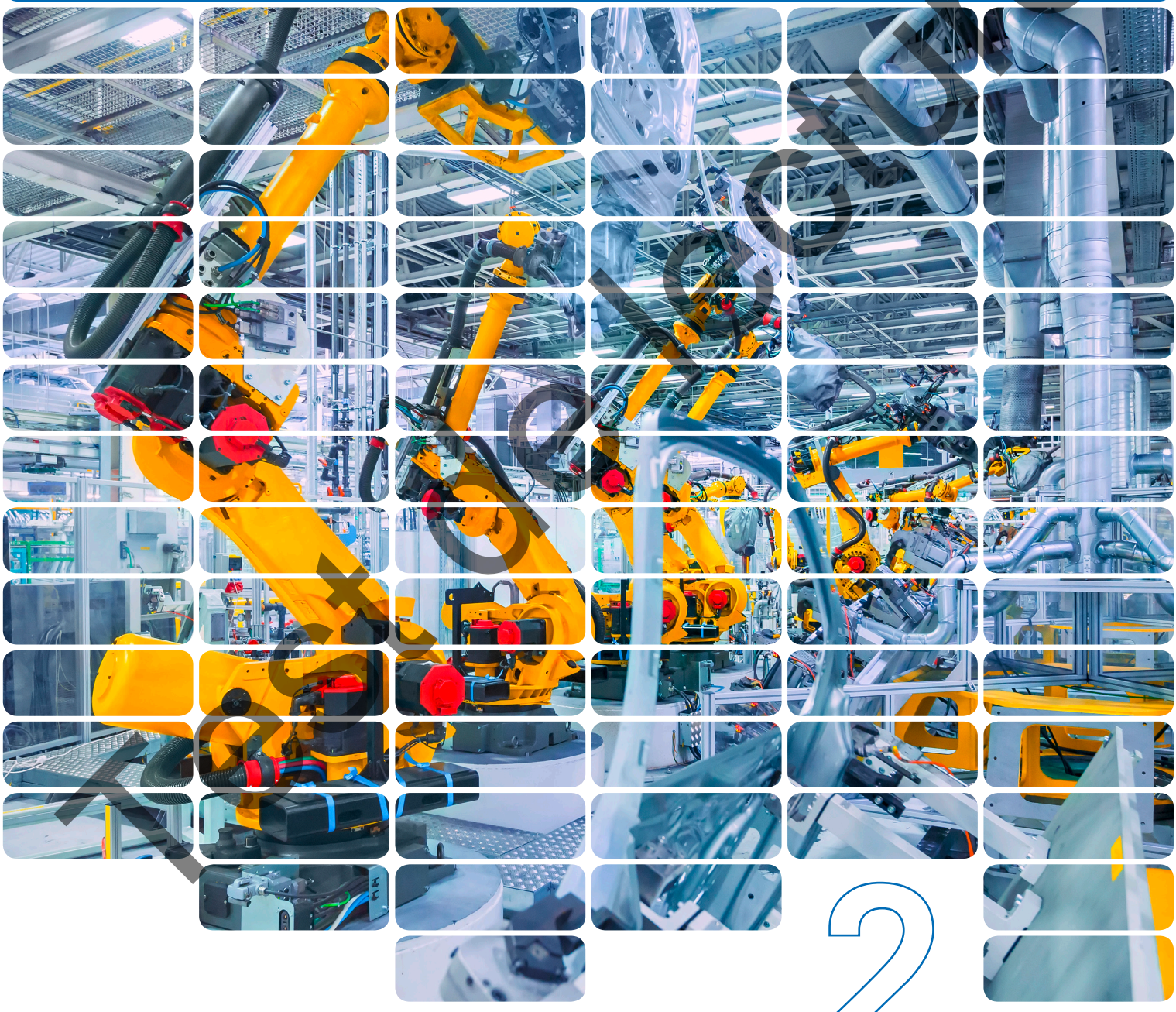
TopAutomation

Electrotechnique et électronique pour
les automaticiennes et automaticiens, les monteuses-automaticiennes et monteurs-automaticiens

Edition avec les solutions



2

Extrait de lecture

Editions Swissmem

SWISSMEM
Formation professionnelle

Pour des propositions d'amélioration, corrections ou remarques:
https://www.swissmem-berufsbildung.ch/feedback-tool

Editeur:	Editions Swissmem
Intitulé:	«TopAutomation» Volume 2 Unités de formation pour les automaticiennes et automaticiens, monteuses-automaticiennes et monteurs-automaticiens
Direction du projet	Michael Kummer, Swissmem Formation professionnelle
Maquette et conception graphique	Bruno Burger, Swissmem Formation professionnelle
Auteurs	Gody Berger Peter Meier-Herzog Heinz Renggli Mauro Sbriz
Version:	2e édition 2020 revue et mise à jour en 2020
Impression:	Imprimé en Suisse
ISBN:	978-3-03866-324-9
Commandes:	Swissmem Formation professionnelle Brühlbergstrasse 4 CH-8400 Winterthur Téléphone +41 52 260 55 55 Téléfax +41 52 260 55 59 vertrieb.berufsbildung@swissmem.ch www.swissmem-berufsbildung.ch

Droits d'auteur: Tous droits réservés. Cet ouvrage et ses différentes parties sont protégés par des droits d'auteur. Toute utilisation autre que celles prévues par la loi doit faire l'objet d'une autorisation écrite de la part de l'éditeur.

Test de lecture

Dans l'industrie des machines, des équipements électriques et des métaux (industrie MEM), les installations de production destinées à une clientèle internationale sont développées et fabriquées sur la base d'un cahier des charges. Ce travail requiert des connaissances approfondies de la construction d'installations dans sa globalité. Le guide méthodique **TopAutomation** dispense aussi bien les bases techniques que les aspects écologiques et de sécurité.

Ce guide méthodique couvre la partie scolaire de la profession d'automaticien-ne CFC de quatre ans dans sa totalité. Il est, comme cela a été souhaité, conçu sur la base du catalogue des compétences-ressources (CoRe; début d'apprentissage 2016) de la profession d'automaticien-ne CFC. La numérotation des chapitres correspond au CoRe. Les contenus comportent aussi bien les parties théoriques que des exemples pratiques.

Pour faciliter la recherche des thèmes, ce guide méthodique comporte, outre la table des matières, un répertoire de mots-clés. Ce guide méthodique est complété à la fin par une description plus détaillée du CoRe.

Certains contenus peuvent également être utilisés pour la profession de monteur/automaticien/monteuse-automaticienne CFC de trois ans.

Nous vous remercions d'avoir opté pour ce guide méthodique axé sur la pratique pour l'enseignement professionnel et vous souhaitons beaucoup de plaisir et de réussite.

Test de lecture

Test de lecture

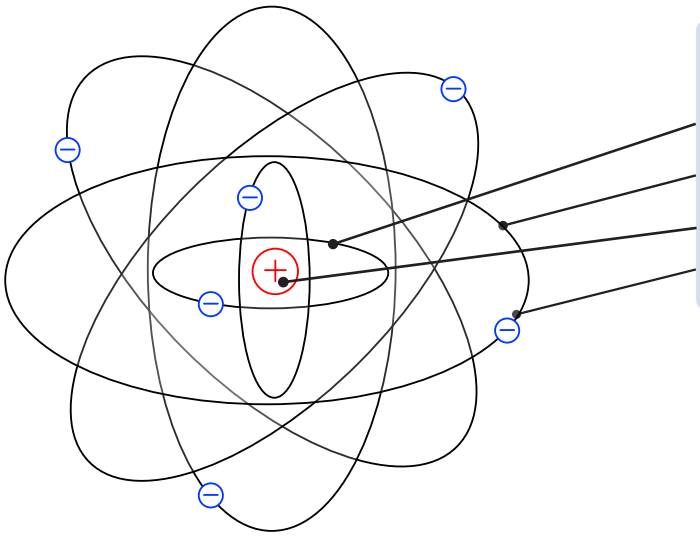
2.1 Connaissances de base **7**
2.1.1 Charge, tension, courant et densité de courant 7
2.1.2 Lois d'Ohm et de Kirchhoff 17
2.1.3 Résistance 21
2.1.4 Courants et tensions dans les couplages mixtes 35
2.1.5 Branchement d'instruments de mesure (mesure du courant et de la tension) 40
2.1.6 Puissance, énergie, rendement 45
2.1.7 Chaleur par effet Joule 52
2.1.8 Eléments galvaniques 58
2.1.9 Tension, résistance interne, types de charge 66
2.2 Technique analogique **69**
2.2.1 Résistances non linéaires 69
2.2.2 Diodes et transistors 71
2.2.3 Semi-conducteurs de puissance 79
2.3 Champ électrique **85**
2.3.1 Notions fondamentales du champ électrique 85
2.3.2 Condensateur 89
2.4 Champ magnétique **103**
2.4.1 Magnétisation, lignes de champ 103
2.4.2 Courant, champ magnétique, effets de force magnétique 105
2.4.3 Circuit magnétique 107
2.4.4 Induction, auto-induction, inductance 112
2.4.5 Applications 125
2.5 Normes **127**
2.5.1 Notions fondamentales des normes 127
2.5.2 Plages de tension, désignations des conducteurs 135
2.5.3 Principe de protection des personnes et des choses 143
2.5.4 Mesures de protection des personnes 163
2.5.5 Système de protection IP 174
2.5.6 Protection contre les surintensités 177
2.6 Courant alternatif **197**
2.6.1 Grandeurs caractéristiques du courant alternatif 197
2.6.2 Récepteurs électriques 200
2.6.3 Types de puissance 206
2.6.4 Courant triphasé 207
2.6.5 Mesure de la puissance 221
2.7 Technique d'entraînement, machines électriques **223**
2.7.1 Transformateurs monophasés et triphasés, transformateurs de mesure 223
2.7.2 Machines rotatives 237
2.7.3. Variateurs de vitesse (convertisseurs) 266
2.7.4. Applications 276
2.8 Enseignement individuel Electrotechnique **291**
2.8.1 Courant de défaut, courant de fuite et compatibilité électromagnétique (CEM) 291
2.8.2 Directives de machines 307
index des mots clés **323**
Catalogue des compétences et des ressources **325**

Test de lecture

Test de lecture

2.1.1 Charge, tension, courant et densité de courant

Bases électrophysiques relatives aux notions de **charge**, **tension** et **courant**



Inscrivez les désignations correctes

1re couche électronique

2e couche électronique

Noyau constitué de protons et de neutrons

Electron

Le **noyau d'un atome** se compose de particules lourdes stationnaires, les protons chargés positivement et les neutrons électriquement neutres.

La couche électronique se compose de minuscules particules en mouvement, les électrons chargés négativement.

Dans certains matériaux, les électrons de la couche située la plus à l'extérieur peuvent se déplacer vers d'autres atomes (**conducteurs électriques**).

Dans un **non-conducteur**, tous les électrons sont solidement reliés au noyau.

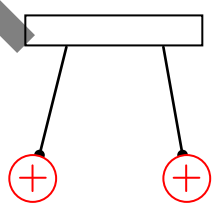
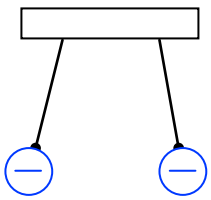
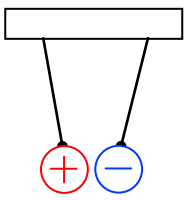
On appelle un **déplacement d'électrons** courant électrique.

Une **accumulation d'électrons** est appelée charge électrique.

L'**électricité** (l'«interaction» entre les électrons) est une **forme d'énergie** qui se transporte facilement ou se transforme dans d'autres formes d'énergie, p.ex. en chaleur, rayonnement (lumière) ou énergie mécanique.

Propriétés de la charge électrique

Il existe deux types de charges électriques:

1. Charge électrique positive	2. Charge électrique négative	Charges opposées
		
se repoussent	se repoussent	s'attirent

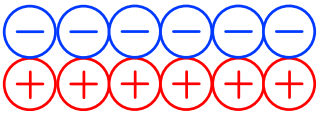
Conclusion:
Les charges de même signe se repoussent, les charges de signes contraires s'attirent.

Test de lecture

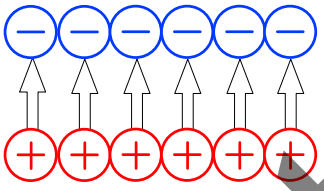
Tension électrique *U* en volts [V]

Les notions déjà acquises:
Il existe des charges positives et négatives. Elles s'attirent mutuellement. Normalement, elles sont uniformément réparties et, par conséquent, se neutralisent. Si l'on parvient à déplacer des charges négatives en appliquant une énergie, les charges positives seront en surnombre en un endroit et les charges négatives à un autre. Entre les deux groupes de charge, un état s'installe appelé différence de potentiel.

La tension s'obtient par: **séparation des charges**



absence de tension



présence d'une tension électrique

La tension ainsi générée est également appelée tension de source (U_o).
La tension de source est le quotient du travail, formé par l'énergie *W*, nécessaire pour la séparation des charges et de la charge associée *Q*.

$$U_0 = \frac{W}{Q}$$

Une tension peut exister sans courant!
Sans tension, il ne peut pas y avoir de courant.

Unité de la tension électrique: **1 volt [V]**

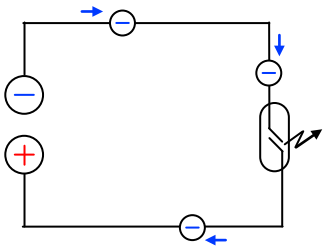
Exemples de tensions

Elément galvanique	1,5 V
Lumière/force	3 x 400 V/230 V
Tram, trolleybus	500 – 800 V
CFF, caténaire	15 000 V
Ligne aérienne	jusqu'à 400 kV (750 kV)
Téléphone	48 – 60 V

Test de lecture

Courant électrique *I* en ampères [A]

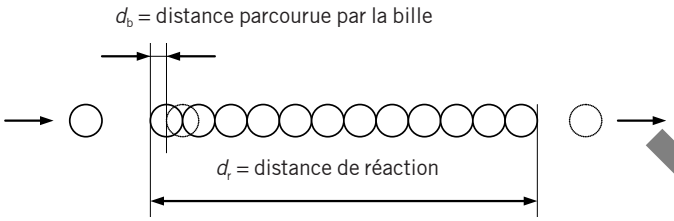
Si l'on relie des charges de polarité différente à un fil, les charges s'équilibrent. L'équilibrage des charges peut être visualisé à l'aide d'un tube de néon. Le tube de néon montre, par un bref éclairement, le passage d'une charge à l'intérieur du tube.



Le courant électrique est une charge en mouvement

appelé dans les métaux flux d'électrons.

Comparaison du flux d'électrons avec des billes:



$v_{impuls} = \frac{d_r}{t}$ → importante

$v_{bille} = \frac{d_b}{t}$ → faible

Vitesse de déplacement des électrons libres:

≈ 300 000 km/s

Vitesse propre des électrons libres:

≈ 0,4 mm/s

Unité du courant électrique:

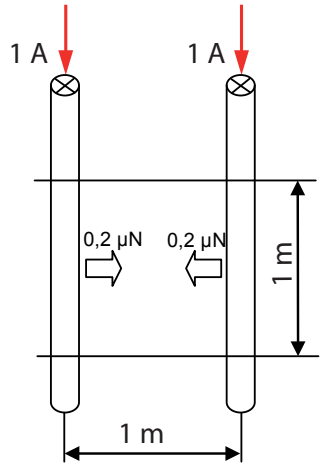
1 ampère [A]

Exemples de courants:

Contrôleur de phase	1 mA
Microphone piézo	10 – 20 mA
Eclairage	0,1 – 10 A
Fabrication d'aluminium	plus de 100 000 A

Test de lecture

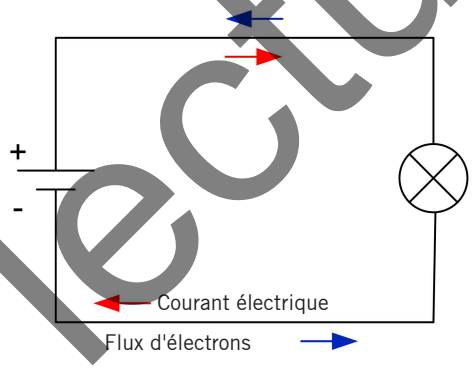
Un ampère est l'intensité d'un courant constant qui, s'il est maintenu dans deux conducteurs linéaires et parallèles, de longueurs infinies, de sections négligeables et distants d'un mètre dans le vide, produirait entre ces deux conducteurs une force linéaire égale à $2 \cdot 10^{-7}$ N par mètre.



Un ampère correspond au transport de 6,24150948 · 10^{18} charges élémentaires *e* par seconde à travers la section d'un fil.

Sens du courant

Le sens du courant conventionnel est basé sur une définition historique partant de l'idée que le courant est porteur de charges positives se déplaçant de la borne de tension positive vers la borne de tension négative. A l'époque de cette définition, les savants ignoraient encore la réalité des électrons qui, chargés négativement, se déplacent dans un conducteur métallique du pôle négatif vers le pôle positif et par conséquent dans le sens contraire du sens du courant conventionnel. Cependant, la définition du sens du courant conventionnel est restée après la découverte des électrons.



Exemples:

Le conducteur de cuivre reliant l'interrupteur électrique à la lampe a une longueur de 8 m. Combien de temps faut-il à un électron pour parcourir cette distance?

Solution:

$$t = \frac{d}{v} = \frac{8}{0{,}0004} = 20\,000\,\text{s} = 5{,}55\,\text{h}$$

Combien de temps met l'impulsion de courant pour parcourir la même distance?

$$t = \frac{d}{v} = \frac{8}{300 \cdot 10^{6}} = 0{,}0266 \cdot 10^{-6} s = 26{,}6\,\text{ns}$$

La batterie d'une voiture a une capacité de 120 Ah. Sa charge résiduelle s'élève à 40 Ah. A combien doit s'élever le courant de charge pour qu'elle soit complètement rechargée au bout de 12 h?

Solution:

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

$$Q \cdot U = U \cdot I \cdot t \quad \Rightarrow \quad Q = I \cdot t$$

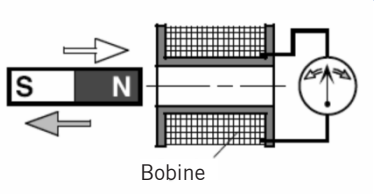
$$I = \frac{Q}{t} = \frac{80}{12} = 6{,}66\,A$$

Test de lecture

Génération de la tension

La «pression» nécessaire au déplacement de porteurs de charge libres — la tension électrique — peut être générée de différentes manières:

par induction (champs magnétiques alternatifs)



Lorsque le flux magnétique se modifie dans une spire d'un fil, une tension est induite. Si le circuit est fermé, un courant circule.

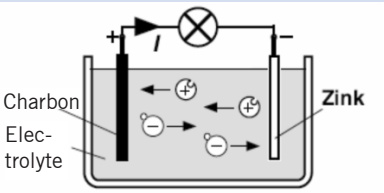
Applications und Exemples:

C'est la manière la plus courante pour générer de l'énergie électr.

Alternateur, dynamo de vélo

Microphone dynamique

par réaction chimique (électrochimie)



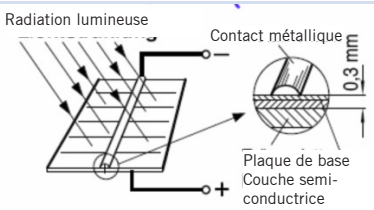
En plongeant deux plaques conductrices dans un électrolyte, p.ex. dans une solution acide, une tension apparaît entre les deux plaques. Dans le système nerveux des êtres vivants, des procédés électrochimiques permettent également de générer des tensions et des courants.

Piles (éléments galvaniques)

Accumulateurs

Corrosion électrochimique

par la lumière (photovoltaïque)

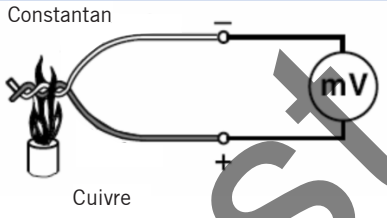


Un photoélément transforme la lumière, p.ex. le rayonnement solaire, en énergie électrique. L'élément semi-conducteur actif avec un pôle négatif et positif est le plus souvent composé de rondelles minces en silicium. Une incidence lumineuse sur la cellule génère une tension.

Cellules photoélectriques

Energie alternative

par la chaleur (thermocouple)

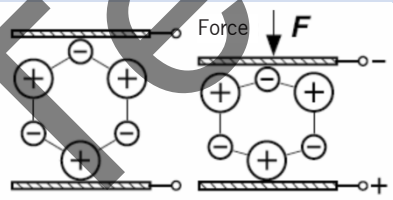


En chauffant le point de contact de deux métaux, une tension est créée qui augmente proportionnellement à la température. L'énergie électrique produite présente un rapport très défavorable par rapport à l'énergie thermique fournie.

Mesure de la température (températures élevées)

Source d'énergie dans l'aérospatial

par modification des dimensions des cristaux (piézoélectrique)



De nombreux cristaux, en particulier les quartz, ont la propriété, lorsqu'ils sont soumis à une traction ou à une pression mécanique, de pouvoir charger la grille ionique par déformation et ainsi générer des tensions.

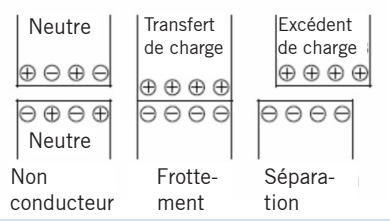
Microphone piézoélectrique

Lecteur de disques vinyles

Allume-feu (briquet)

Capteurs de pression

par frottement (influence électrique)



Le frottement ou la séparation de matières isolantes, mais également le transvasement de liquides non conducteurs génèrent des charges et des tensions élevées. Cette électricité statique est souvent générée de manière involontaire.

Appareils de dépoussiérage

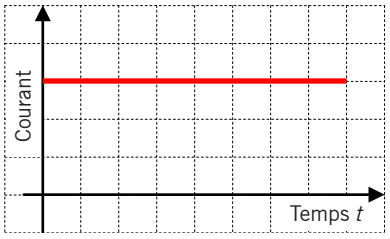
Effet secondaire indésiré dans la vie de tous les jours

Risque d'explosion

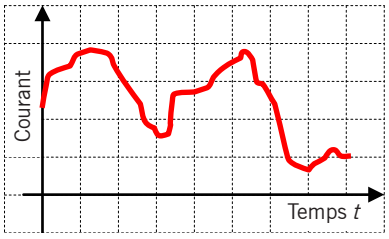
Test de lecture

Genres de courant

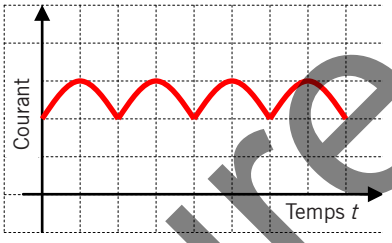
Courant continu **Symbole:** — **ou** DC **(direct current)**



courant continu constant



courant continu variable

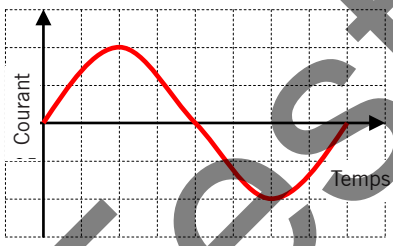


courant continu ondulé

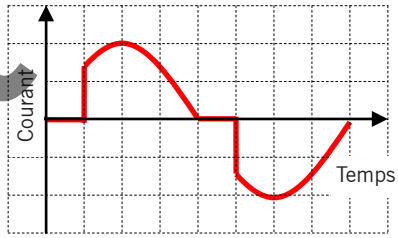
Générateur:
- Batterie ou pile
- Génératrice de courant continu
- Redresseur

Applications:
- Electrochimie
- Téléphonie
- Electronique de régulation

Courant alternatif **Symbole:** ~ **ou** AC **(alternating current)**



forme sinusoïdale



forme sinusoïdale interrompue



forme rectangulaire

Générateur:
- Générateur de courant alternatif
- Transformateur pour la distribution d'énergie

Applications:
- Installations domestiques
- CFF
- Electronique de régulation
- Réseau de distribution

Test de lecture

Le courant électrique n'est décelable qu'aux effets qu'il produit.

Effets du courant électrique

Certains effets se produisent toujours, ils ne peuvent pas être évités, alors que d'autres, nous les observons uniquement dans certaines conditions. Les principaux effets sont:

Effet calorifique, apparaît toujours (effet thermique).

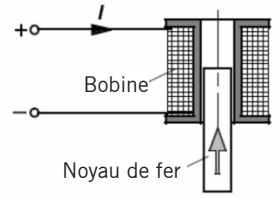


Lorsqu'un courant traverse une résistance, elle s'échauffe; de l'énergie électrique est transformée en énergie thermique. Dans les appareils de chauffe, cet effet est souhaité. Dans les conducteurs et les bobines, il fait partie des effets subis.

Applications et exemples:

- Chauffage, cuisinière
- Panne à souder, bimétal
- Coupe-circuit à fusibles
- Appareil de fusion

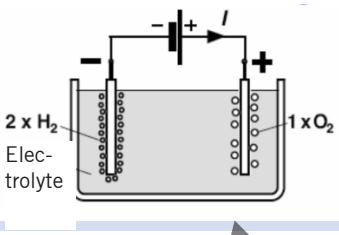
Effet magnétique, apparaît toujours.



Chaque conducteur parcouru par un courant est entouré d'un champ magnétique. Cet effet peut générer des forces.

- Electroaimant (relais)
- Moteur électrique
- Instrument de mesure
- Sonnette d'entrée

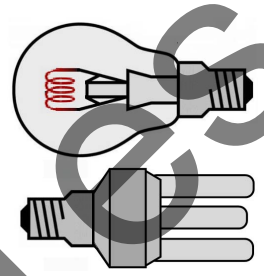
Effet chimique en présence d'un courant dans un liquide



Dans les liquides conducteurs (acides, lessives alcalines, solutions salines), le flux de courant se compose d'ions. Ce courant «transporte» du matériel (galvanoplastie), ou le liquide est chimiquement décomposé (électrolyse).

- Electrolyse pour la production d'«H»
- Analyse
- Galvanisation

Effet lumineux par incandescence et en présence de courant dans les gaz



Dans les lampes à incandescence, un filament en tungstène devient incandescent sous l'effet de la chaleur et émet une lumière. A peine 5 % de l'énergie électrique est transformé en lumière.
Dans les lampes à décharge, la lumière est produite par une décharge de courant dans un gaz sous faible pression. (Collision d'atomes, d'ions et d'électrons). Rendement env. 20 %.

- Lampe à incandescence
- Lampe halogène
- Lampe à décharge de gaz
- (lampe au néon, tube fluorescent,
- lampe à vapeur métallique)

Effet irritant en cas de courant dans les êtres vivants (effet physiologique)



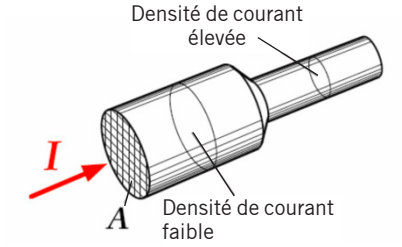
L'électricité irrite et influence le système nerveux des êtres vivants. En cas de dépassement d'un certain seuil, le courant électrique génère des contractions musculaires. Des faibles courants (dès 30 mA) déjà peuvent provoquer un arrêt cardiaque, des courants plus importants occasionnent des brûlures et peuvent entraîner la mort.

Seuil général dès 50 mA danger de mort. Tension alternative dès 50 V et tension continu dès 120 V danger de mort.

- Accidents dus à l'électricité
- Electromédecine
- (stimulateur cardiaque,
- électrochoc)
- Clôture électrique

Test de lecture

Densité de courant J en $\frac{A}{mm^2}$

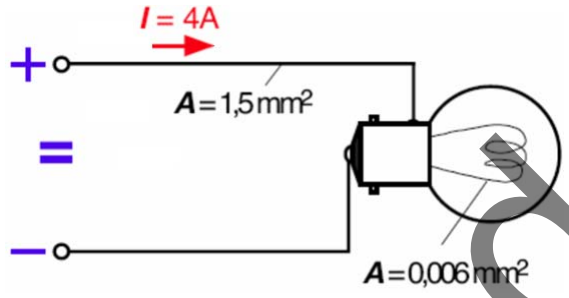




Exemple:
Le circuit électrique représenté ci-dessous montre les différentes sections de conducteur. Le conducteur d'alimentation (conducteurs aller et retour) a une section de 1,5 mm². Pour que le filament d'une lampe à incandescence brille, la densité de courant doit s'élever à 500 A/mm² au moins.

a) A combien s'élève la densité de courant dans le conducteur d'alimentation?
b) A combien s'élève la densité de courant dans le filament incandescent?

Solution:



$$J_{cond} = \frac{I}{A_{cond}} = \frac{4}{1,5} = 2,67\,\frac{A}{mm^2}$$

$$J_{lampe} = \frac{I}{A_{lampe}} = \frac{4}{0,006} = 667\,\frac{A}{mm^2}$$

Section A en mm²	Courant en A	Densité de courant J en A/mm²
1	6	6
1,5	16	10,67
2,5	20	8
4	25	6,25
6	32	5,33
10	40	4
16	63	3,93
25	80	3,2
35	100	2,86
50	125	2,5

Les intensités maximales admissibles et par conséquent la protection par fusibles des conducteurs de cuivre fixes sont définies par la NIBT (norme sur les installations électriques à basse tension) et la norme EN60204. Elles dépendent de la section du conducteur et du mode de pose. Le mode de pose influence le refroidissement des conducteurs.

Un échauffement excessif du conducteur entraîne la destruction de l'isolation du conducteur.

La chaleur est évacuée par la surface extérieure du conducteur, raison pour laquelle la densité de courant maximale admissible est plus faible pour les sections plus importantes. Le rapport entre la surface extérieure du conducteur et la section par mm² diminue à mesure que la section du conducteur augmente.

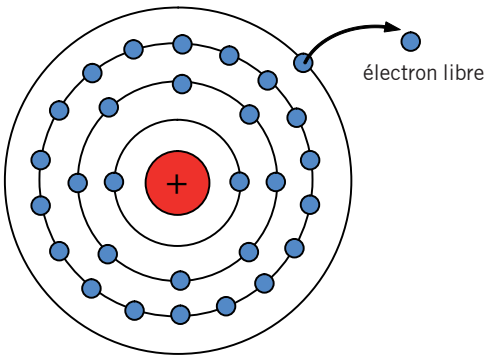
De plus, l'échauffement dépend de la résistivité du matériau conducteur et des possibilités de refroidissement existantes.

Test de lecture

Conducteurs, non-conducteurs et semi-conducteurs

Conduction du courant dans les métaux

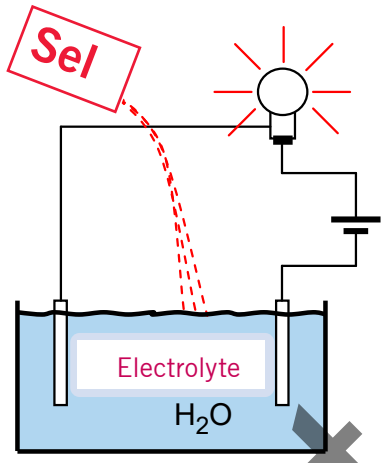
Atome de cuivre: numéro atomique 29 ⇒ 29 protons
29 électrons



Les porteurs de charge responsables du courant électrique dans le cuivre et les métaux sont les électrons libres situés sur les couches électroniques périphériques.
Les électrons situés sur la couche la plus à l'extérieur, souvent non saturée, ne sont que très faiblement attirés par le noyau et peuvent, par conséquent, quitter facilement l'atome. Dans le cas du cuivre, l'atome situé sur la 4e couche peut, grâce à une petite impulsion générée par le mouvement thermique du réseau atomique, quitter l'atome et vagabonder d'un atome à un autre. Ainsi, les électrons libres sont à la base du courant circulant dans les métaux.

Dans les métaux, les porteurs de charge sont les électrons.

Conduction du courant dans les liquides

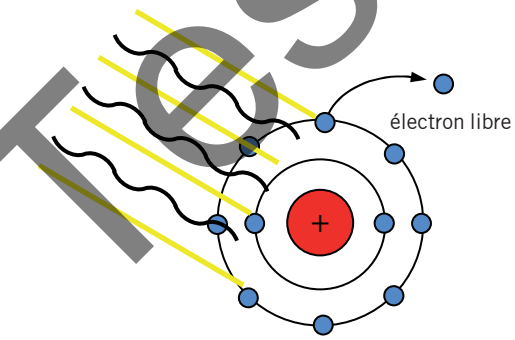


L'eau distillée est non conductrice. Aucun courant ne peut y circuler. En ajoutant du sel, l'eau distillée devient conductrice. Les molécules de sel se décomposent en ions sodium et ions chlorure.

$NaCl \Rightarrow Na^+$ et Cl^-

Dans les liquides, les porteurs de charge sont les ions.

Conduction du courant dans les gaz



A l'état normal, les gaz sont non conducteurs parce qu'ils ne possèdent pas d'électrons libres. Moyennant un apport d'énergie, il est toutefois possible d'arracher des électrons de leur couche. Il en résulte des électrons et des atomes à charge positive qui se déplacent librement.

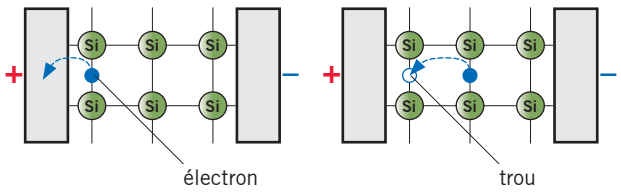
Les conditions physiques suivantes provoquent une ionisation:
– la chaleur
– les champs électriques
– les champs magnétiques
– le rayonnement radioactif et cosmique
– la haute tension (lampes à décharge de gaz)

Dans les gaz, les porteurs de charge sont les ions et les électrons.

Test de lecture

Conduction du courant dans les matériaux semi-conducteurs

Les principaux matériaux semi-conducteurs utilisés sont les semi-conducteurs élémentaires silicium et germanium ou des liaisons chimiques, comme l'arséniure de gallium ou l'antimoniure d'indium. Les matériaux semi-conducteurs doivent être d'une très grande pureté.
A très basse température, les matériaux semi-conducteurs sont des non-conducteurs. Ils deviennent seulement conducteurs par l'ajout d'impuretés, par émission de lumière ou l'application d'un champ électrique ou magnétique.
On utilise les matériaux semi-conducteurs pour la fabrication de composants électroniques (diodes, diodes Zener, thermistances NTC et PTC, IBGT, etc.).



Les atomes des semi-conducteurs forment un réseau cristallin. Le silicium a quatre électrons de valence sur la couche périphérique.
En appliquant une tension, on crée un champ électrique qui pousse les atomes libres du pôle négatif vers le pôle positif. Lorsqu'un électron de valence quitte sa liaison atomique, il crée un trou. Un électron de valence voisin peut alors reboucher ce trou, de sorte que le trou migre du pôle positif en direction du pôle négatif.

Dopage: Pour doper le silicium, on ajoute des atomes étrangers possédant un nombre inférieur d'électrons de valence, par exemple 3, ou un nombre supérieur d'électrons de valence, par exemple 5.

Tous les métaux, le carbone, la terre humide et certains liquides sont conducteurs.
Font partie des non-conducteurs (isolants) l'air, le caoutchouc, le verre ou les matières plastiques.
Le silicium et le germanium sont des semi-conducteurs.

Test de lecture

2.1.2 Lois d'Ohm et de Kirchhoff

Résistance électrique *R* en ohms [Ω]

Les porteurs de charge qui se déplacent dans un matériau sont plus ou moins freinés dans leur mouvement. Cette entrave est due au frottement entre les porteurs de charge (p.ex. les électrons) et les atomes du matériau (p.ex. conducteur métallique). Les électrons se déplacent entre les atomes dans une trajectoire en«zigzag» où ils rencontrent une résistance dans leur mouvement.

Conductance *G* en Siemens [S]

La valeur inverse de la résistance électrique est la **conductance** à ne pas confondre avec la **conductivité**. La conductance est surtout utilisée si la résistance électrique est très faible.

Symbole: *R*

Unité: 1 ohm (1 Ω)

$$R = \frac{1}{G}$$

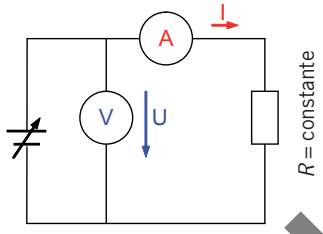
Symbole: *G*

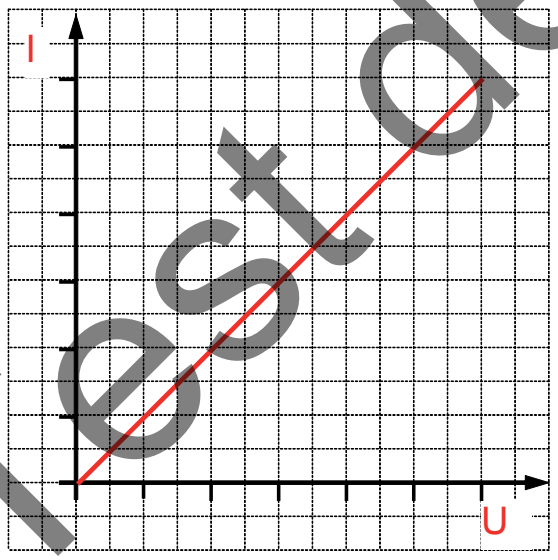
Unité: 1 siemens (1 S)

$$G = \frac{1}{R}$$

La loi d'Ohm

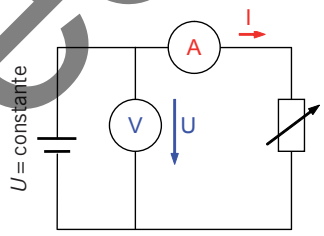
Essai 1:
Comportement du courant avec une tension variable et une résistance constante.

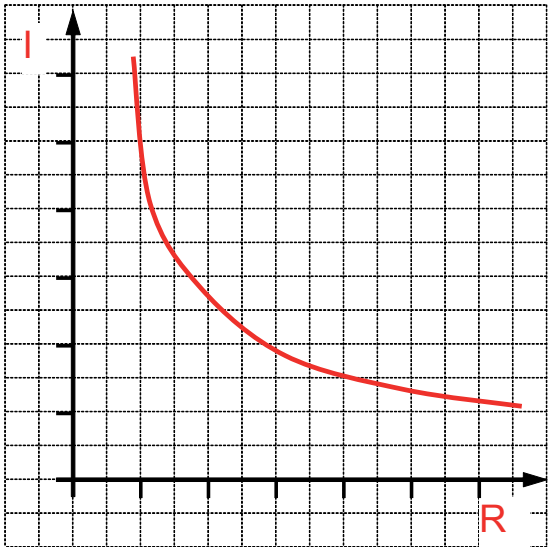




Résultat:
L'intensité du courant est proportionnelle à la tension.

Essai 2:
Comportement du courant avec une résistance variable et une tension constante.





Résultat:
L'intensité du courant est inversement proportionnelle à la résistance.

Récapitulation des résultats des essais 1 et 2:

1. *I* est proportionnel à *U*
2. *I* est inversement proportionnel à *R* = proportionnel à $\frac{1}{R}$ ⇒ soit: $I = \frac{U}{R}$ **Loi d'Ohm**

Test de lecture

Calculs concernant la loi d'Ohm

1. Un relais d'une résistance de 40 kΩ est raccordé à une tension continue de 48 V. A combien s'élève le courant circulant dans la bobine?

Solution:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{48\ \text{V}}{40\ \text{k}\Omega} = 1{,}2\ \text{mA}$$

2. Une lampe à incandescence raccordée à une tension continue 24 V absorbe 250 mA. Calculez la résistance de la lampe à incandescence.

Solution:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{24\ \text{V}}{250\ \text{mA}} = 96\ \Omega$$

3. A travers une résistance de 22 Ω doit circuler un courant de 8,5 A. Quelle tension est nécessaire?

Solution:

$$U = R \cdot I = 22\ \Omega \cdot 8{,}5\ \text{A} = 187\ \text{V}$$

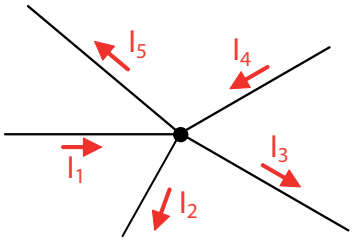
4. A la mise sous tension, un courant circule dans une résistance ohmique. Cochez si les informations suivantes sont correctes ou fausses.

Solution:

Correct	Faux	
	X	En augmentant la tension, le courant diminue.
X		En diminuant la résistance, le courant augmente.
X		Pour maintenir l'intensité constante, la résistance doit être augmentée en même temps que la tension.

Test de lecture

Loi des nœuds (1re loi de Kirchhoff)



La 1re loi de Kirchhoff dit: la somme des courants entrant en un nœud du circuit est égale à la somme des courants sortant de ce nœud.

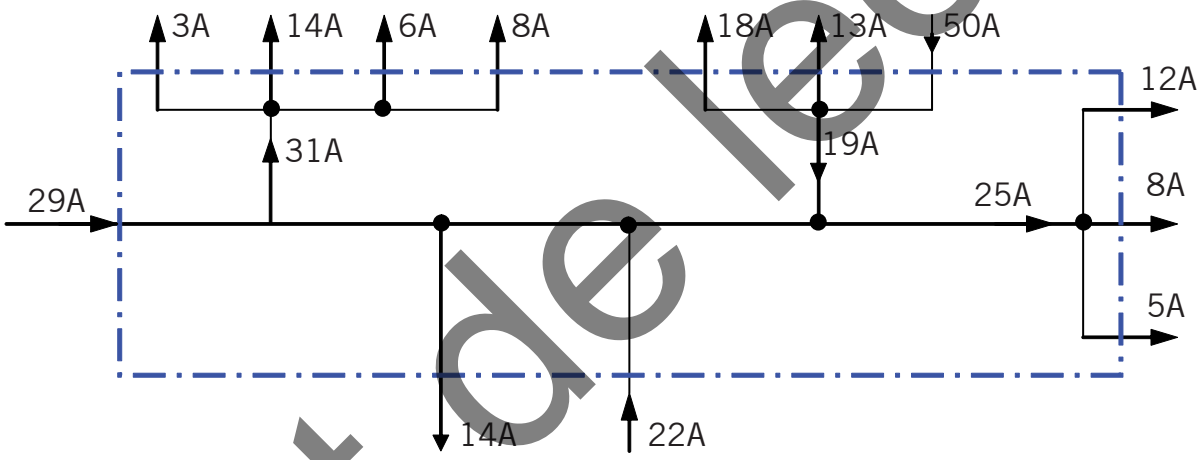
En un nœud, la somme algébrique de tous les courants est nulle.

Les courants entrant dans un nœud sont précédés d'un signe positif et les courants sortant de ce nœud d'un signe négatif.

$$\sum I = 0$$

$$I_1 - I_2 - I_3 + I_4 - I_5 = 0$$

Exemple:
Déterminez pour les différentes parties de circuit le courant *I* et inscrivez le sens du courant correspondant.



Essai:

Courants entrants: 29 A + 22 A + 50 A = 101 A

Courants sortants: 3 A +14 A + 6 A + 8 A + 18 A + 13 A + 12 A + 8 A + 5 A + 14 A = 101 A

Test de lecture