

Électrodynamique

L'unité naturelle de charge est la charge de l'électron. Dû à une faute d'orthographe historique, cette charge s'appelle

$$-e$$

Dû à un choix d'unités assez absurde, l'unité SI de charge est le « Coulomb » [C], qui est la charge d'un nombre énorme d'électrons:

$$1 \text{ [C]} \approx 6 \cdot 10^{18} e$$

La charge d'un électron est donc

$$-e \approx -1,6 \cdot 10^{19} \text{ [C]}$$

tandis que la charge d'un proton est l'opposée

$$e \approx 1,6 \cdot 10^{19} \text{ [C]}$$

La charge électrique se conserve.

L'addition de toutes les charges électriques (avec leur signe, bien sûr) dans un volume donné est une constante. On l'appelle la charge électrique contenue dans le volume. Elle ne peut changer que si on rajoute ou enlève des charges. Il est impossible de créer ou détruire de la charge électrique.

Il n'y a aucun processus dans l'univers qui change la charge électrique d'un système isolé; il est toujours vrai que

$$\text{Charge électrique avant} = \text{Charge électrique après}$$

Il est par contre vrai que les charges peuvent se déplacer.

Quand des charges se déplacent, elles créent un courant électrique. Dans un fil conducteur, quand les électrons se déplacent de A à B, on dit qu'il y a un courant électrique de B à A (dû à la faute d'orthographe pour le signe de la charge de l'électron).

Si $6 \cdot 10^{18}$ électrons ($= -1\text{[C]}$) traversent un fil conducteur en une seconde, on dit que l'intensité du courant vaut 1 ampère [A].

$$I = \Delta Q / \Delta t \quad (1 \text{ [A]} = 1 \text{ [C]} / 1 \text{ [s]})$$

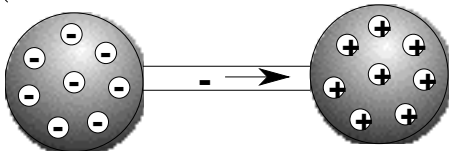
Comme la charge se conserve, l'addition de tous les courants qui arrivent à un point quelconque de l'univers égale l'addition de tous les courants qui quittent ce point. A chaque instant, autant de charge arrive comme part.

La charge électrique se conserve.

L'addition de toutes les charges électriques (avec leur signe, bien sûr) dans un volume donné est constante. Elle ne peut changer que si on y rajoute ou on en enlève des charges. Il n'y a aucun processus dans l'univers qui change la charge électrique; il est toujours vrai que

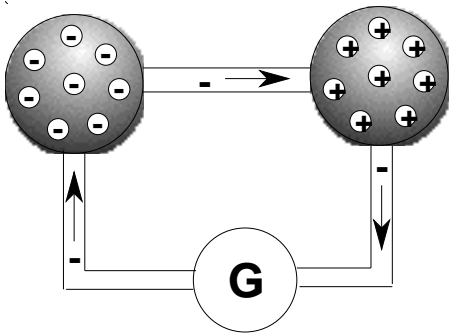
$$\text{Charge électrique avant} = \text{Charge électrique après}$$

Nous avons vu que les charges électriques de signes opposés s'attirent. Si deux sphères chargées sont reliées par un fil conducteur, des électrons vont se déplacer.



Le **déplacement de charges** crée un **courant électrique** qui dure une fraction de seconde jusqu'à l'équilibre (étincelle dans les expériences d'électricité statique).

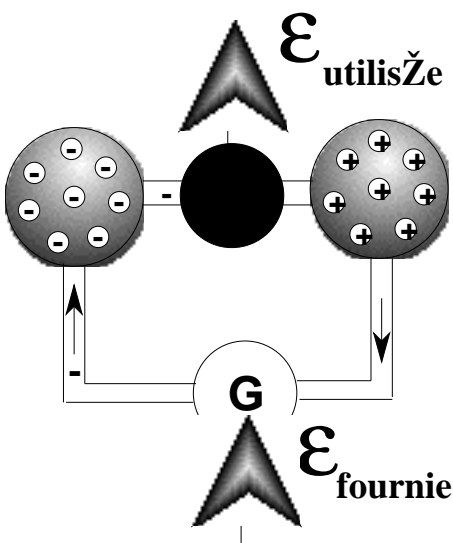
Que faut-il faire pour créer un courant durable dans le conducteur ?



Il faut **maintenir le déséquilibre de charge** entre les deux sphères. C'est le rôle du **générateur**.

Le générateur fournit de l'énergie aux électrons, qui la perdent par frottement avec les atomes statiques. L'énergie fournie par le générateur pour faire tourner les électrons finit par chauffer la matière dans laquelle les électrons se déplacent.

Un **circuit électrique** possède donc, au minimum, un **générateur** (qui **fournit l'énergie**) et un **récepteur** (qui **utilise l'énergie**). Ces éléments sont reliés par des fils conducteurs.



Exemples de générateurs :

- pile,
- alternateur (dynamo) de vélo,
- alternateur d'une centrale électrique,
- cellule photovoltaïque,
- pile à combustible.

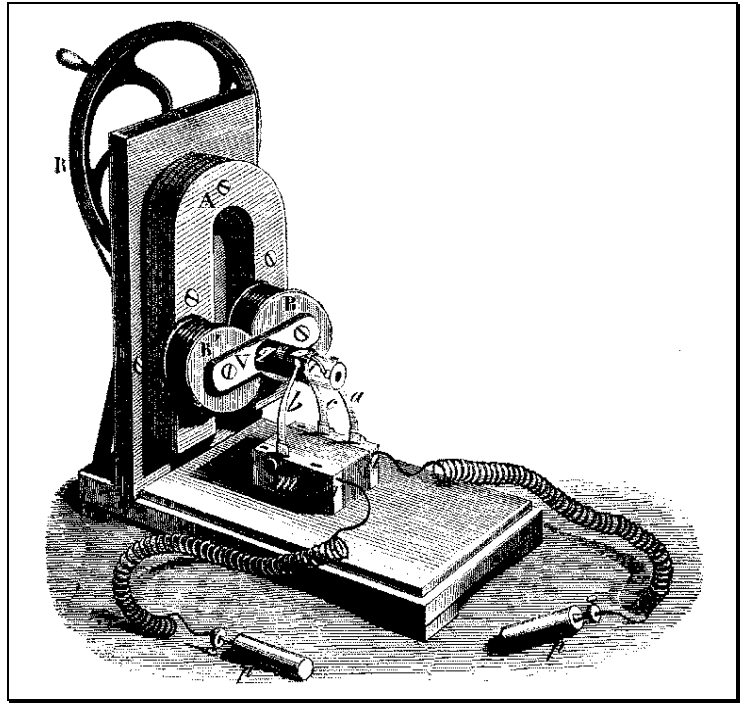
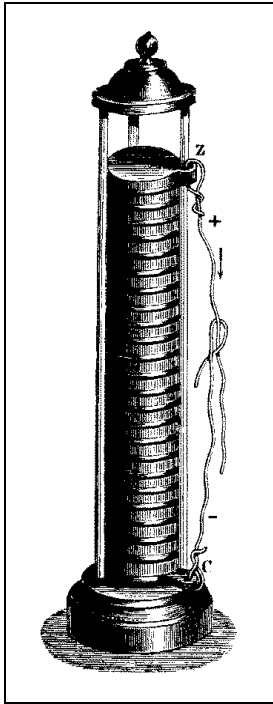
Exemples de récepteurs :

- ampoule électrique,
- tube fluorescent,
- moteur,
- radiateur,
- plaque chauffante,
- cuve à électrolyse.

Dans les générateurs, **diverses formes d'énergie** sont transformées en **énergie électrique**. Alors que dans les récepteurs c'est l'**énergie électrique** qui est transformée en **d'autres formes d'énergie**.

L'empilement des éléments de cuivre et de zinc de la pile de Volta inventée vers 1800 nous permet de comprendre pour quelle raison nous parlons encore aujourd'hui de "pile électrique".

Vers 1832 la première machine produisant de l'électricité par induction fut construite par Pixii. Elle combinait un aimant en fer à cheval (A) fixe et deux bobines (B et B') qui tournaient autour d'un axe horizontal entraînée par la manivelle à l'arrière-plan. C'est l'ancêtre de nos alternateurs.



L'énergie se conserve.

L'addition de toutes les énergies dans un volume donné est constante. Elle ne peut changer que si on y rajoute ou on en enlève de l'énergie.

Il n'y a aucun processus dans l'univers qui change l'énergie d'un système isolé; il est toujours vrai que

$$\text{Énergie avant} = \text{Énergie après}$$

Il est impossible de créer ou de détruire de l'énergie.

2. Courant électrique

Un courant électrique est un déplacement de charges électriques. Ce déplacement peut se produire dans un solide conducteur, un liquide ou un gaz. Le courant électrique se mesure par son débit de charges électriques. L'unité de l'intensité du courant électrique est l'ampère [A].

$$I = \Delta q / \Delta t$$

Δq : quantité de charge déplacée
pendant le temps Δt .

Δq : [C]

Δt : [s]

I : intensité du courant électrique

I : [A] = [C]/[s]

Comme la charge électrique est conservée, le courant électrique qui arrive à un point donné doit être égal au courant électrique qui en sort.

Si tout le courant électrique est confiné dans un câble conducteur, le courant électrique n'importe où dans le câble est toujours le même.

Si trois ou plusieurs câbles se rejoignent à un point (appelé noeud) alors

La somme des intensités des courants qui arrivent au noeud
est **égale** à

la somme des intensités des courants qui quittent le noeud.

On peut également définir les courants qui arrivent au noeud comme positifs et ceux qui quittent le noeud comme négatifs. Dans ce cas

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots = 0$$

3. Puissance, énergie et tension électrique

Puissance et énergie électrique

Nous avons l'habitude de lire la puissance électrique des récepteurs ménagers, par exemple des ampoules (destinées au réseau 220 [V]) sont marquées 60 W et 100 W et un radiateur peut avoir deux positions 600 W et 1200 W. Nous savons que l'ampoule de **100 W éclaire plus** que celle de **60 W** et que le radiateur **chauffe davantage** sur **1200 W** que sur **600 W**.

Mais nous savons également que l'énergie consommée par un récepteur (pour un temps donné) dépend de la puissance du récepteur : pour le même temps l'ampoule de 100 W consommera plus d'énergie que celle de 60 W et le radiateur consommera plus d'énergie si on place l'interrupteur sur 1200 W que sur 600 W.

Le lien entre la puissance et l'énergie est :

$$\Delta \mathcal{E} = P \cdot \Delta t$$

$\Delta \mathcal{E}$: joules [J]
P : watts [W]=[J]/[s]
 Δt : secondes [s]

Puissance, énergie électrique, courant et tension

La puissance électrique d'un récepteur (ou d'un générateur) ne dépend pas seulement de l'intensité du courant électrique.

Une ampoule de **60 [W]**
branchée sur le secteur (220 [V])
est traversée par un courant de **0,27 [A]**.

Une ampoule de **1,2 [W]**
branchée sur une pile plate de 4,5 [V]
est traversée par un courant de **0,27 [A]**.

Les 2 récepteurs, traversés par le **même courant**, n'ont absolument **pas la même puissance** !
La puissance (et donc l'énergie) doit tenir compte de la tension :

$$P = U \cdot I$$

I : intensité du courant électrique.
U : tension électrique.

I : [A]
U : [V]
P : [W]

Reprenons la dernière expression, remplaçons P par $\Delta \mathcal{E}/\Delta t$ et I par $\Delta q/\Delta t$:

$$\Delta \mathcal{E} = U \cdot \Delta q \quad \text{on en tire} \quad U = \Delta \mathcal{E}/\Delta q$$

Ainsi la tension peut être définie comme :

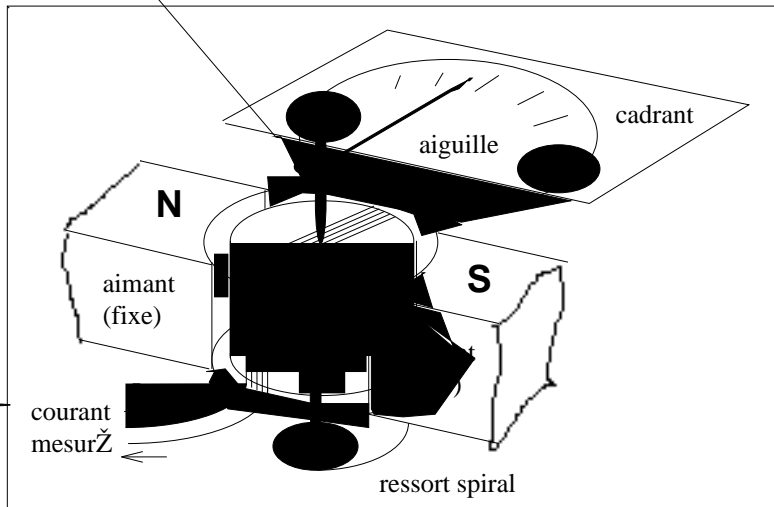
L'énergie par unité de charge.

Cette énergie est dissipée dans un récepteur et fournie au circuit par un générateur.

La tension se mesure entre **deux** points, couramment les deux bornes d'un appareil électrique. Le courant, par contre, est une quantité locale, c'est à dire une grandeur qui se mesure à chaque point.

4. Appareils de mesure

Le galvanomètre



Le galvanomètre à bobine (cadre) mobile permet de mesurer un courant par l'interaction entre un aimant et une bobine traversée par le courant.

L'interaction fait tourner le cylindre central jusqu'à la position d'équilibre.

L'équilibre s'établit entre l'interaction aimant-bobine et la force de rappel du ressort.

L'ampèremètre

Cet appareil doit se placer sur le trajet des électrons.

Il faut le brancher **en série** de l'élément traversé par le courant à mesurer.

Il faut "couper" un fil pour placer l'ampèremètre et ainsi, dans un circuit en fonctionnement, intercepter le courant électrique passant dans ce fil.

L'ampèremètre mesure le courant qui le traverse.

Le voltmètre

Il compare l'énergie par unité de charge entre deux points du circuit. Souvent, on le branche pour mesurer l'énergie par unité de charge entre l'entrée et la sortie d'un élément du circuit.

Il faut le brancher **en parallèle** ou en **dérivation**.

Le voltmètre se plaçant en parallèle, le circuit **n'est pas interrompu** pour les mesures de tension.

L'voltmètre mesure la tension entre ses deux bornes.

Le multimètre

Le multimètre peut être analogique (appareil à "aiguille" utilisant un galvanomètre) ou digital (électronique). Il possède plusieurs fonctions et échelles. On peut l'utiliser en voltmètre ou en ampèremètre en positionnant correctement le commutateur (sélecteur) et, surtout, **en le branchant comme il faut**, en parallèle (voltmètre) ou en série (ampèremètre).

5. Résistance électrique, résistivité

La **résistance électrique** est une "mesure" de l'**opposition au passage d'un courant électrique**, d'un élément quelconque d'un circuit (récepteur, fil conducteur, générateur...).

La résistance électrique de symbole R est définie par le rapport :

$$R = U / I$$

L'unité de la résistance est l'**Ohm** de symbole $[\Omega]$:

$$[\Omega] = [V] / [A]$$

Que se passe-t-il au niveau microscopique ?

Avant de comprendre ce qui freine le passage des charges, il est nécessaire de savoir quelles sont les charges qui se déplacent et créent le courant.

Quelles sont les charges qui peuvent se déplacer dans un solide, un liquide et un gaz ?

Dans un solide	Les atomes d'un solide ne peuvent se déplacer, ils sont liés par l'intermédiaire de leurs électrons (liaisons chimiques). Les protons, contenus dans le noyau de l'atome, ne peuvent ainsi en aucun cas participer à un courant électrique.	Les électrons des couches profondes ne peuvent pas non plus se déplacer, en revanche, les électrons des couches externes peuvent, dans certains cas, se déplacer et créer un courant électrique.
Dans l'eau	Les molécules d'eau peuvent se déplacer, mais elles sont neutres et ne créent ainsi pas de courant électrique. (Pas de courant possible dans l'eau distillée).	Pour observer un courant électrique, il faut des charges électriques et ces charges sont les ions présents dans l'eau . (Dissolution de sel : dissociation en ions).
Dans un gaz	Les atomes ou molécules peuvent se déplacer, mais ils sont neutres et ne créent ainsi pas de courant électrique.	Pour avoir un courant électrique, il faut ioniser le gaz . Les ions ainsi créés peuvent se déplacer et former un courant électrique.

Résistance d'un solide

Dans les solides, le comportement des électrons est donc de deux types :

- Les électrons faiblement liés à l'atome peuvent se déplacer dans le réseau cristallin (d'un atome à l'autre) : c'est un électron de conduction (électrons « collectifs »).
- Les électrons fortement liés à l'atome ne peuvent pas se déplacer (électrons « privés »).

La résistance du solide dépend donc du comportement de ses électrons.

Conducteurs (métaux) cuivre, or, argent, aluminium...	résistance faible (augmente avec une élévation de température)	Présence d' électrons de conduction (même à basse température) qui, en se déplaçant, créent un courant.
Isolants porcelaine, plastique, papier, bois ...	résistance très élevée	Pas d'électrons de conduction.
Semi-conducteurs silicium, germanium...	résistance moyenne (diminue avec une élévation de température)	Pas d'électrons de conduction à basse température. A température ambiante, l'agitation thermique libère des électrons qui, en se déplaçant, créent un courant.
Supra-conducteurs niobium... céramiques spéciales	résistance nulle	Les électrons de conduction n'interagissent plus avec le réseau cristallin. Il faut des températures très basses.

Remarque :

L'agitation thermique joue un rôle important. Si la température s'élève, les vibrations des atomes dans le solide augmentent et freinent de plus en plus le passage des électrons (la résistance des conducteurs augmente pour une élévation de température). Pour les semi-conducteurs, ce phénomène est masqué par l'augmentation du nombre d'électrons qui peuvent se déplacer (la résistance diminue pour une élévation de température).

Résistance d'un fil, résistivité

Beaucoup de récepteurs sont constitués par des fils résistants : filament d'une ampoule, fil chauffant dans un radiateur, fil enrobé de porcelaine dans un corps de chauffe, fil bobiné dans un moteur etc. D'autre part le transport du courant se fait dans divers câbles et fils.

Il est donc utile de s'intéresser à la résistance d'un fil :

$$R = \rho \cdot L/S$$

ρ : résistivité (coefficient qui dépend de la matière) ρ : [Ωm]

L : longueur du fil

L : [m]

S : section (surface)

S : [m^2]

L'ohmmètre (multimètre)

La plupart des multimètres sont alimentés par une pile et peuvent ainsi mesurer le courant qui traverse une résistance pour une tension de référence donnée. L'échelle adaptée permet de lire directement la valeur de la résistance : c'est l'**ohmmètre**.

Attention, cette résistance est calculée avec une tension de quelques volts et est souvent éloignée de la résistance de l'appareil lors de son fonctionnement !

Résistance du voltmètre et de l'ampèremètre

L'ampèremètre est monté en **série** :

L'ampèremètre est traversé par le courant mesuré. Sa résistance doit être aussi **faible** que possible pour ne pas "modifier" le circuit (en pratique : $R \approx 1 [\Omega]$).

Le voltmètre est monté en **parallèle** :

Le voltmètre dévie une infime partie du courant pour mesurer la tension aux bornes d'un élément. Sa résistance doit être aussi **grande** que possible pour ne pas "modifier" le circuit (en pratique : $R \approx 50'000 [\Omega]$).

Même avec des instruments de qualité on ne peut pas éviter une modification du circuit !
Avec un montage judicieux des instruments, on peut, dans certains cas, minimiser leur effet.

Mesure d'une résistance :

1) Si R est faible

2) Si R est élevée

Le voltmètre mesure bien U_R
L'ampèremètre mesure $I_R + I_V$,
mais comme $R_V \gg R$,
 $I_V \ll I_R$,
l'erreur est minime.

L'ampèremètre mesure bien I_R
Le voltmètre mesure $U_R + U_A$,
mais comme $R_A \ll R$,
 $U_A \ll U_R$,
l'erreur est minime.

Alimentation stabilisée :

Pour le travail au laboratoire, on préfère souvent utiliser des générateurs pour lesquels on peut fixer la tension aux bornes du générateur indépendamment de la résistance extérieure ou, à l'inverse, fixer l'intensité du courant I qui traverse le circuit. Les alimentations stabilisées, à l'aide d'une électronique de régulation complexe, permettent ces choix.

6. Circuits électriques

résistances branchées en série	résistances branchées en parallèle
---------------------------------------	---

$I_1 = I_2 = I$	$I_1 + I_2 = I$
$U_1 + U_2 = U$	$U_1 = U_2 = U$

7. Résistances équivalentes

Définition : on appelle résistance équivalente, de deux ou plusieurs résistances, la résistance qui **remplacerait** les résistances considérées sans modifier le reste du circuit.

Calcul de la résistance équivalente

1er cas : deux résistances **en série**

Rappel : $I_1 = I_2 = I$ et $U_1 + U_2 = U$

$$R_{\text{équivalente}} = (U_1 + U_2) / I = U_1 / I + U_2 / I = R_1 + R_2$$

$$R_{\text{équivalente}} = R_1 + R_2$$

2e cas : deux résistances **en parallèle**

Rappel : $I_1 + I_2 = I$ et $U_1 = U_2 = U$

$$R_{\text{équivalente}} = U / (I_1 + I_2) \Rightarrow$$

$$1 / R_{\text{équivalente}} = (I_1 + I_2) / U = I_1 / U + I_2 / U = 1/R_1 + 1/R_2$$

Finalement :

$$R_{\text{équivalente}} = \left(1/R_1 + 1/R_2 \right)^{-1}$$

Remarque :

La calculette permet un calcul rapide à l'aide de la touche $1/x$ (ou x^{-1}).

Calculer la résistance équivalente de 6,0 [Ω] et 9,0 [Ω]

Sur la calculette, nous pianotons :

$$R_{\text{équivalente}} = \left(1/(6,0 [\Omega]) + 1/(9,0 [\Omega]) \right)^{-1}$$

$$\left(6 \ 1/x + 9 \ 1/x \right) 1/x$$

ce qui donne directement $R_{\text{éq}} = 3,6 [\Omega]$

Quelques exemples intéressants :

a) Deux résistances de même valeur branchées en série :

$$R_{\text{éq}} = 10 [\Omega] + 10 [\Omega] = 20 [\Omega]$$

$$R_{\text{éq}} = 2 R$$

b) Deux résistances de même valeur branchées en parallèle :

$$R_{\text{éq}} = (1/(10 [\Omega]) + 1/(10 [\Omega]))^{-1} = 5,0 [\Omega]$$

$$R_{\text{éq}} = R/2$$

c) Une petite résistance branchée en série d'une grande résistance :

$$\begin{aligned} R_{\text{éq}} &= 20 [\Omega] + 0,10 [\Omega] \\ &= 20 [\Omega] = R_{\text{grande}} \end{aligned}$$

d) Une petite résistance branchée en parallèle d'une grande résistance :

$$\begin{aligned} R_{\text{éq}} &= (1/(20 [\Omega]) + 1/(0,10 [\Omega]))^{-1} \\ &= (0,050 [\Omega^{-1}] + 10 [\Omega^{-1}])^{-1} \\ &= (10 [\Omega^{-1}])^{-1} = 0,10 [\Omega] = R_{\text{petite}} \end{aligned}$$

e) Une résistance nulle (**court-circuit**) branchée en parallèle d'une autre résistance :

$$R_{\text{éq}} = (R^{-1} + 0^{-1})^{-1} = (\infty)^{-1} = 0 [\Omega]$$

Remarques :

La résistance équivalente de deux résistances branchées en série est toujours plus grande que la valeur de la résistance la plus grande.

La résistance équivalente de deux résistances branchées en parallèle est toujours comprise entre la valeur de la résistance la plus petite et sa moitié :

$$R_1 \leq R_2 \quad \Rightarrow \quad R_1 / 2 \leq R_{\text{équivalente}} \leq R_1$$

Limiter le courant électrique

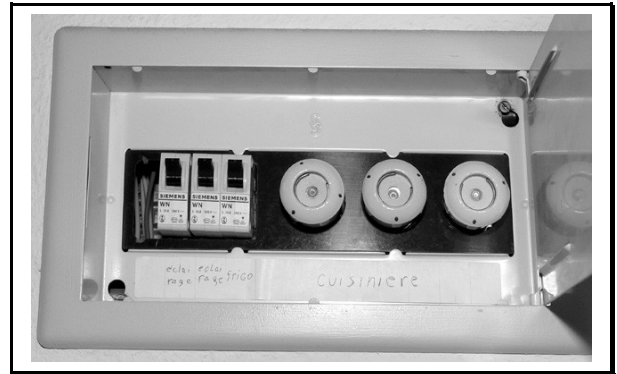
Lors d'un **court-circuit** (généralement accidentel), la résistance équivalente est pratiquement nulle et un très grand courant peut passer et détruire le circuit ou l'installation. Dans ces conditions on place sur l'appareil ou sur l'installation un **coupe-circuit** (ou fusible) dont le but est de **protéger l'installation ou l'appareil**.

Pour protéger les lignes électriques, on installe des limiteurs de courant : coupe-circuit ou fusible, à l'entrée des installations.

L'armoire électrique d'un appartement comporte trois coupe-circuits magnétiques et trois fusibles.

Les coupe-circuits limitent le courant à 10 [A] pour les pièces : éclairage, appareils ménagers, télévision etc.

Les fusibles limitent le courant pour la cuisinière 3 x 15 [A].



Un fusible est constitué d'un cylindre en porcelaine traversé par un fil conducteur qui relie les extrémités métalliques.

Lorsque le courant dépasse la valeur prévue (6 A) le fil fond et le courant est interrompu.

Attention :

Les fusibles et coupe-circuits ci-dessus protègent l'installation mais pas les gens !



Actuellement, on installe dans les pièces d'eau (salles de bain) des coupe-circuits à courant de défaut (ou différentiel). Ceux-ci détectent les courants de fuite (différence de courant entre l'entrée et la sortie d'un récepteur) et les limite à des valeurs comprises entre 10 à 30 [mA] et protègent ainsi efficacement les personnes.

8. Circuits compliqués

Dans un circuit électrique complexe, comportant des noeuds et des boucles, **les intensités des courants qui circulent satisfont la conservation de la charge (première loi de Kirchhoff) :**

La **somme algébrique des intensités des courants qui arrivent au noeud** est nulle.

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + \dots = 0$$

Puisque la charge électrique est toujours conservée, ce n'est pas suprenant qu'elle soit conservée aussi à chaque noeud du circuit.

Remarque :

On peut également définir les courants qui arrivent au noeud comme positifs, et ceux qui quittent le noeud comme négatifs (ou l'inverse).

La conservation de la charge s'énonce alors comme

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

Dans un circuit électrique complexe, comportant des noeuds et des boucles, **les tensions entre les bornes des composants du circuit satisfont la conservation de l'énergie (deuxième loi de Kirchhoff) :**

La **somme algébrique des tensions** sur une boucle fermée est **nulle**.

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

Le signe de chaque tension doit être défini. On suppose que le sens des courants est connu et l'on choisit le sens de parcours de la boucle (A->B->C->A).

La tension d'un composant du circuit mesure l'énergie qu'une unité de charge acquiert (ou perd, selon le signe) lorsque celle-ci traverse le composant. Si une charge fait un tour complet (en suivant une boucle du circuit), elle revient à l'endroit du départ, et elle n'a acquis ni perdu de l'énergie. Chaque fois qu'elle traverse un composant du circuit, la charge peut gagner ou perdre de l'énergie, mais après un tour complet elle n'a rien gagné ni perdu.

Choix du signe des tensions :

	<p>sens du déplacement = sens du courant</p> <p>Chute de tension (énergie dissipée) dans la résistance en allant de A à B</p> <p>$U_{AB} < 0$ (on "descend" la chute)</p>
	<p>sens du déplacement \neq sens du courant</p> <p>Chute de tension (énergie dissipée) dans la résistance en allant de B à A</p> <p>$U_{AB} > 0$ (on "remonte" la chute)</p>
	<p>Le générateur apporte de l'énergie aux charges (+) qui se déplaceraient dans le sens du parcours de la boucle.</p> <p>$U_{AB} > 0$</p>
	<p>Le générateur retire de l'énergie (en opposition) aux charges (+) qui se déplaceraient dans le sens du parcours de la boucle.</p> <p>$U_{AB} < 0$</p>

Méthode pour le choix des signes des tensions :

- 1) Déterminer le sens des courants (si celui-ci est inconnu on le choisit).
- 2) Choisir le sens de parcours de la boucle.
- 3) Déterminer le signe de chaque tension.

Remarques :

- Si, au départ, le choix du sens du courant n'est pas correct, le résultat du courant sera négatif et ne perturbe aucunement la résolution des équations.
- Les lois de Kirchhoff permettent d'établir un système de $2n$ équations à $2n$ inconnues pour un circuit comportant n composants. Sa résolution, bien que sans difficultés, est souvent longue et ennuyeuse. L'ordinateur est indispensable dès que le circuit comporte beaucoup de composants.