

Cours d'électricité

Introduction

Mathieu BARDOUX

mathieu.bardoux@univ-littoral.fr

IUT Saint-Omer / Dunkerque
Département *Génie Thermique et Énergie*

1^{re} année





L'électron

Rappels et
définitions

Bref historique

Électron et
courant

L'électron
Courant électrique

Définitions des
grandeurs
fondamentales

Potentiel électrique
Tension

Puissance

Analogie fluide

Le terme **électricité** provient du grec $\eta\lambdaεκτρον$ (elektron) signifiant « ambre jaune ». Les savants grecs avaient déjà que l'ambre jaune, après avoir été frotté avec un morceau de fourrure, attirait de petits objets légers.

Bien que certains phénomènes électriques et magnétiques soient connus depuis la haute antiquité (foudre, électricité statique, aimants naturels), ce n'est qu'à partir du XVIII^e siècle que prend véritablement forme l'étude systématique des phénomènes électriques.



Quelques dates

Rappels et
définitions

Bref historique

Électron et
courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des
grandeurs
fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

Analogie fluide

- en 1733, François DU FAY met en évidence l'existence d'une électricité positive (ou « résineuse ») et d'une électricité négative (ou « vitreuse »).
- en 1752, Benjamin FRANKLIN invente le paratonnerre ;
- vers 1780, Luigi GALVANI mène des expériences sur les grenouilles et croit identifier une forme « d'électricité animale » ;
- en 1785, Charles DE COULOMB étudie l'interaction des corps électriques ;
- en 1799, Alessandro VOLTA invente la pile électrique ;
- en 1822, Peter BARLOW construit le premier « moteur électrique » ;
- en 1868, Henry WILDE fabrique la première dynamo ;
- en 1879, Thomas EDISON invente l'ampoule à incandescence ;
- en 1890, première locomotive électrique inaugurée pour le métro londonien ;
- en 1899, la *Jamais Contente* est la première voiture à dépasser les $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.



L'électron : description

Rappels et définitions

Bref historique

Électron et courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des grandeurs fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

Analogie fluide

L'électron est une particule élémentaire de la famille des *leptons*, ou particules légères. Il se caractérise par sa charge négative $-e$, où e est la charge élémentaire, qui vaut $1,602\,176\,535 \times 10^{-19}$ J. Avec les neutrons, de charge nulle, et les protons, de charge $+e$, il constitue les atomes.

Protons et neutrons forment le noyau, de charge positive. Les électrons gravitent autour du noyau. L'atome, pris dans son ensemble, est électriquement neutre : le nombre d'électrons est égal au nombre de protons.

Cependant, les électrons situés sur les couches périphériques, les moins liés au noyau, peuvent être arrachés à l'atome. Il apparaît alors un *déséquilibre de charges*. L'atome est alors chargé positivement : il devient un ion positif, ou cation. De même, un atome peut capturer un électron : il devient un ion négatif, ou anion

L'atome : structure et dimensions

Rappels et définitions

Bref historique

Électron et courant

L'électron

Courant électrique

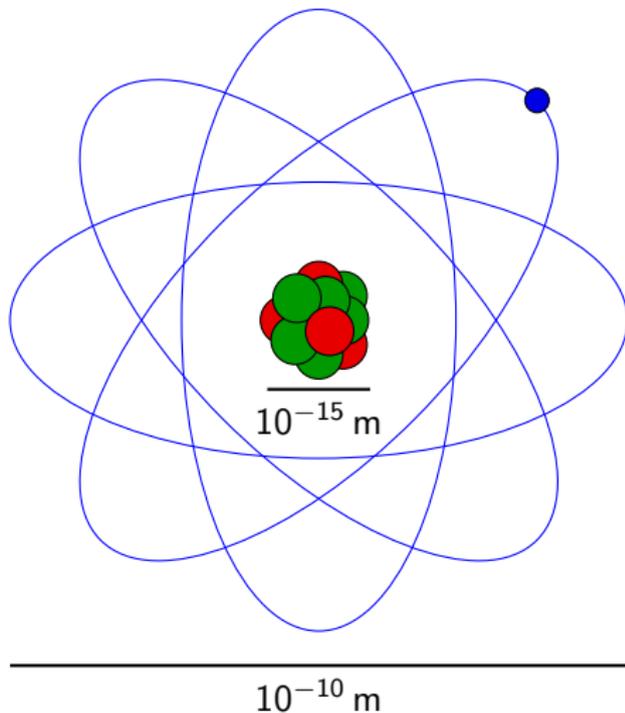
Définitions des grandeurs fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

Analogie fluide



Électrons périphériques

Rappels et définitions

Bref historique

Électron et courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des grandeurs fondamentales

Potentiel électrique

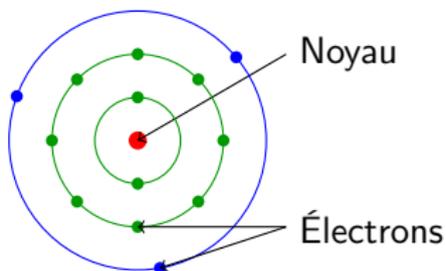
Tension

Puissance

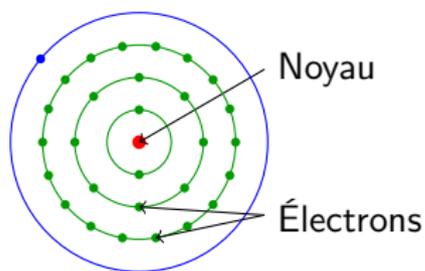
Analogie fluide

Les électrons des couches internes sont fortement liés au noyau, et ne participent ni aux liaisons moléculaires, ni au transport de courant. Les électrons périphériques situés sur les couches incomplètes, moins liés à leur atome, sont susceptibles d'en être arrachés.

Atome d'aluminium



Atome de cuivre





Conducteurs et isolants

Rappels et définitions

Bref historique

Électron et courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des grandeurs fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

Analogie fluide

En première approche, nous pouvons classer les corps en deux groupes : les corps *conducteurs* et les corps *isolants*.

Les corps conducteurs Ce sont les corps qui laissent passer l'électricité : la plupart des métaux (cuivre, or, aluminium, fer et leurs alliages), le carbone sous ses différentes formes (graphite, diamant, nanotubes), l'eau chargée en sels, le corps humain, le sol, etc

Les corps isolants Ce sont les corps qui s'opposent au passage des électrons : verre, porcelaine, émail, corindon, bakélite, bois sec, mica, soie, papier, caoutchouc, plastique, etc.



Le courant électrique

Rappels et définitions

Bref historique

Électron et courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des grandeurs fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

Analogie fluide

Un courant électrique est un *déplacement d'ensemble* de porteurs de charge électrique.

Ces déplacements de charge sont créés par l'action de la force électromagnétique : en présence d'un champ électrique dû à un déséquilibre de charges, les porteurs de charge se déplacent sous l'effet de la force subie.

En général, les porteurs de charge électrique sont les électrons.

Dans le cas d'un circuit électrique, c'est un générateur qui crée le courant. Il possède une borne (+), qui présente un déficit d'électrons (cations) et une borne (-), qui possède un surplus d'électrons. Lorsque les deux bornes sont reliées par un matériau conducteur, les électrons se dirigent de la borne (-) vers la borne (+) : un courant électrique apparaît.

Intensité du courant

Rappels et définitions

Bref historique

Électron et courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des grandeurs fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

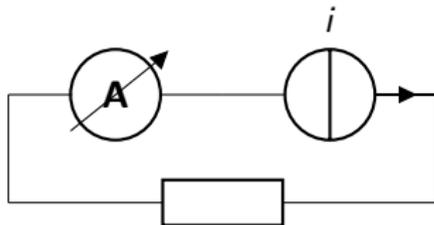
Analogie fluide

L'intensité du courant électrique (« ampérage »), ou tout simplement « courant », est définie comme le débit de charge électrique à travers le circuit :

$$i = \frac{dq}{dt}$$

où i est l'intensité du courant, q la charge électrique et t le temps. L'intensité du courant se mesure en ampères, symbole A. Par définition, un ampère est égal à un coulomb par seconde.

L'intensité se mesure à l'aide d'un ampèremètre branché en série.





Sens du courant

Rappels et définitions

Bref historique

Électron et courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des grandeurs fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

Analogie fluide

L'étude du courant électrique précède historiquement la compréhension de ses mécanismes : l'électron n'a pas encore été découvert, lorsque l'on détermine le *sens conventionnel du courant*.

Par convention, le courant électrique sort du générateur par la borne positive (+) et revient au générateur par sa borne négative (-). Cette convention est appelée *convention « récepteur »*.

À l'intérieur des générateurs, c'est la convention inverse qui s'applique : le courant est réputé circuler de la borne (-) vers la borne (+) : c'est la *convention « générateur »*.

Le sens conventionnel peut être différent du sens réel de déplacement des porteurs de charge. En particulier, les électrons se déplacent dans le sens inverse du sens conventionnel.



Vitesse de propagation du courant

Rappels et définitions

Bref historique

Électron et courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des grandeurs fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

Analogie fluide

La vitesse de propagation du courant électrique est proche de celle de la lumière : $273\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ dans un fil de cuivre.

Mais ceci *n'est pas* la vitesse des charges dans le circuit, qui se déplacent à quelques dixièmes de millimètres par seconde seulement.

L'information voyage plus vite que la matière. Imaginons les électrons comme les maillons d'une chaîne : lorsqu'on tire sur la chaîne, la traction se transmet *presque instantanément* à l'extrémité de la chaîne, c'est à dire bien plus vite (et bien plus loin) que le déplacement de chaque maillon.



Les effets du courant électrique

Rappels et
définitions

Bref historique

Électron et
courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des
grandeurs
fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

Analogie fluide

Ceux-ci sont de plusieurs types :

- Dégagement de chaleur (effet Joule)
- Décomposition chimique (électrolyse)
- Action mécanique (moteur)
- Création de champs magnétiques (électro-aimants)

Densité de courant

Rappels et définitions

Bref historique

Électron et courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des grandeurs fondamentales

Potentiel électrique

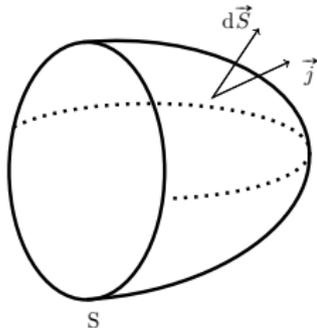
Tension

Puissance

Analogie fluide

La densité de courant est un vecteur décrivant le courant électrique à l'échelle locale. Il est orienté suivant la direction de déplacement des porteurs de charge, et sa norme correspond à l'intensité du courant par unité de surface. Elle est liée au courant électrique par la

relation suivante :

$$i = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$$


où i est l'intensité du courant, S

une surface, \vec{j} la densité de courant et $d\vec{S}$ le vecteur surface élémentaire. La densité de courant se mesure en ampères par mètre carré : $A \cdot m^{-2}$.



Loi de Coulomb, champ créé par une charge ponctuelle

Rappels et définitions

Bref historique

Électron et courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des grandeurs fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

Analogie fluide

Soit une charge électrique q_1 placée au point de rayon vecteur \vec{r}_1 . Cette charge crée autour d'elle un *champ électrique*, qui s'exprime au point \vec{r}_2 sous cette forme :

$$\vec{E}_1 = \frac{q_1 \vec{r}_{12}}{4\pi\epsilon_0 \|\vec{r}_{12}\|^3}$$

où $\vec{r}_{12} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$.

$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$ est une constante universelle appelée *constante diélectrique*, ou *permittivité du vide*. Le champ électrique est une grandeur *vectorielle*.

Si l'on place en \vec{r}_2 une charge q_2 , la force $\vec{F}_{1/2}$ exercée par la charge q_1 sur la charge q_2 s'écrit alors :

$$\vec{F}_{1/2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{r}_{12}}{\|\vec{r}_{12}\|^3}$$



Notion de potentiel électrique

Rappels et définitions

Bref historique

Électron et courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des grandeurs fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

Analogie fluide

La force électrostatique \vec{F} étant conservative, on dit que le champ électrique *dérive d'un potentiel*. Sous forme mathématique, on écrit :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V$$

Ce potentiel, noté V , s'exprime ainsi :

$$V_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 \|\vec{r}_{12}\|}$$

Il s'agit d'une grandeur *scalaire*, contrairement au champ électrique et à la force électrique, qui sont des grandeurs *vectérielles*.



Énergie potentielle électrique

Rappels et définitions

Bref historique

Électron et courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des grandeurs fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

Analogie fluide

Une particule de charge q , soumise à un potentiel électrique V , possède une *énergie potentielle électrique* $U = V \cdot q$.

On peut tenter une analogie avec le potentiel gravitationnel : la variation d'énergie potentielle d'une particule chargée se déplaçant dans un potentiel électrique est analogue à la variation d'énergie potentielle de gravitation d'une particule massive se déplaçant dans un potentiel gravitationnel. Le potentiel électrique est ainsi comparable à la "hauteur" d'une particule dans le champ gravitationnel terrestre.

Attention cependant : contrairement aux phénomènes gravitationnels, les phénomènes électriques font intervenir *le signe de la charge*. La même différence de potentiel peut donc avoir, sur deux particules distinctes, des effets opposés : attractif pour l'un, répulsif pour l'autre.

Potentiel créé par une distribution de charge

Rappels et
définitions

Bref historique

Électron et
courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des
grandeurs
fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

Analogie fluide

Soit à présent une distribution volumique de charge, sous la forme $\rho(x_1, y_1, z_1)$. Le potentiel électrique est désormais créé par la distribution des charges électriques dans l'espace, et non plus par une charge ponctuelle.

On utilise le principe de superposition pour appliquer la loi de Coulomb à une distribution volumique de charge :

$$V(x_2, y_2, z_2) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint \frac{\rho(x_1, y_1, z_1)}{r_{12}} dx_1 dy_1 dz_1$$

où $\rho(x_1, y_1, z_1)$ est la densité de charge au point (x_1, y_1, z_1) .



Relation entre potentiel et champ

Rappels et définitions

Bref historique

Électron et courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des grandeurs fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

Analogie fluide

On dit que le champ électrique *dérive d'un potentiel* :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V = -\frac{\partial V}{\partial x}\vec{e}_x - \frac{\partial V}{\partial y}\vec{e}_y - \frac{\partial V}{\partial z}\vec{e}_z$$

En partant de l'expression du potentiel électrique ci-dessus, on peut donc calculer le champ électrique à partir du potentiel :

$$\vec{E}(x_2, y_2, z_2) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint \frac{\rho(x_1, y_1, z_1)\vec{r}_{12}}{r_{12}^3} dx_1 dy_1 dz_1$$

Inversement, le potentiel électrique peut être retrouvé à partir du champ électrique :

$$V = \int \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Tension électrique : définition

Rappels et
définitions

Bref historique

Électron et
courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des
grandeurs
fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

Analogie fluide

La tension électrique est la circulation du champ électrique le long d'un circuit :

$$V_{AB} = \int_A^B E \, dl$$

En régime stationnaire, elle peut être assimilée à la *différence de potentiel* $V_B - V_A$ entre les deux points A et B.

Dans cas général, en régime variable, l'induction électromagnétique rend non conservative la circulation du champ électrique. Il est dès lors préférable d'abandonner la notion de différence de potentiel, pour préférer celle de tension.

Tension : notation et mesure

Rappels et définitions

Bref historique

Électron et courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des grandeurs fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

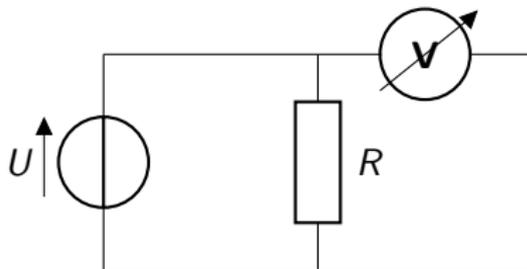
Analogie fluide

L'unité de mesure en est le volt, unité de symbole V .

Le symbole normalisé d'une tension électrique est U en monophasé et V en triphasé.

Remarque : dans un circuit électrique, s'il existe un courant électrique, c'est qu'il existe dans ce circuit un générateur entretenant une tension à ses bornes.

On peut mesurer la tension à l'aide d'un voltmètre ou d'un oscilloscope branché en *parallèle/dérivation* sur le circuit.





Puissance électrique

Rappels et définitions

Bref historique

Électron et courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des grandeurs fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

Analogie fluide

D'une manière générale en physique, la puissance correspond à une quantité d'énergie par unité de temps. Elle s'exprime en Watt : 1 W équivaut à $1 \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$, et 1 J équivaut à $1 \text{ W}\cdot\text{s}$.

La puissance correspond donc à un débit d'énergie : deux systèmes de puissances différentes pourront fournir le même travail (la même énergie), mais pour une durée différente.

Dans le cas d'un dipôle électrique, la puissance s'écrit sous la forme suivante en régime continu :

$$P = U \cdot I$$

En régime variable, on l'écrira ainsi :

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

avec p en Watts, u en Volts et i en Ampères.



Notion de résistance

Rappels et définitions

Bref historique

Électron et courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des grandeurs fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

Analogie fluide

La *résistance* d'un dipôle électrique exprime la capacité du dipôle à s'opposer au passage du courant.

Cette résistance a pour conséquence une *chute de tension* entre les deux bornes du dipôle : en d'autres termes, les électrons possèdent moins d'énergie après être passés dans le dipôle qu'avant d'y entrer. Ils ont dû *dépenser une partie de cette énergie* pour traverser le dipôle.

La résistance, notée R , s'exprime en Ohms, symbole Ω . La chute de tension aux bornes de la résistance est donnée par la *Loi d'Ohm*, et s'écrit ainsi :

$$U = R \cdot I$$

Ou encore $u(t) = R \cdot i(t)$ en régime variable.



Puissance dissipée par une résistance : effet Joule

Rappels et définitions

Bref historique

Électron et courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des grandeurs fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

Analogie fluide

La chute de tension au sein du composant électrique se traduit par un dégagement d'énergie (notamment sous forme de chaleur).
La *puissance instantanée* dissipée au sein du composant s'écrit :

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = R \cdot i^2(t) = \frac{u^2(t)}{R}$$

Et la *puissance moyenne* :

$$p(t) = R \cdot \overline{i^2(t)} = \frac{\overline{u^2(t)}}{R}$$

où $\overline{i^2(t)}$ est la moyenne de l'intensité au carré, et $\overline{u^2(t)}$ la moyenne de la tension au carré. Attention : la valeur moyenne du carré est différente du carré de la valeur moyenne.

Notion de valeur efficace

Rappels et définitions

Bref historique

Électron et courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des grandeurs fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

Analogie fluide

On peut définir des valeurs efficaces de la tension et de l'intensité :

$I_{eff} = \sqrt{i^2(t)}$ et $U_{eff} = \sqrt{u^2(t)}$. On peut alors écrire :

$$P = R \cdot I_{eff}^2 = \frac{U_{eff}^2}{R}$$

L'énergie totale dissipée est égale à l'intégrale de la puissance au cours du temps :

$$W = \int_t P dt$$

Dans le cas d'une résistance, on aura donc :

$$W = R \cdot I_{eff}^2 t$$

avec W en J, R en Ω , I_{eff} en A et t en s.



Analogie avec un écoulement fluide

Rappels et définitions

Bref historique

Électron et courant

L'électron

Courant électrique

Définitions des grandeurs fondamentales

Potentiel électrique

Tension

Puissance

Analogie fluide

Pour comprendre les notions de tension et d'intensité du courant, on peut tenter une analogie avec l'écoulement d'un fluide : par exemple, de l'eau dans une cascade.

Celle-ci s'écoule du haut vers le bas, en chutant d'une certaine hauteur. À chaque instant, une certaine quantité d'eau est présente dans la cascade. Pendant un temps donné (par exemple : une seconde), une certaine quantité d'eau s'écoule dans la cascade : c'est le débit.

En électricité, la charge électrique correspond à la quantité d'eau présente dans la cascade, et l'intensité de courant correspond au débit d'eau. La tension, ou la différence de potentielle, sont analogues à la différence de hauteur entre l'amont et l'aval de la cascade.

De même que le dénivelé met l'eau en mouvement, la tension entraîne le déplacement des électrons et crée le courant.

Limites de l'analogie : dans le cas de l'écoulement fluide, la vitesse de déplacement des particules est variable. Un vaste fleuve au cours paresseux peut avoir le même débit d'une rivière plus petite, au courant plus rapide. Dans le cas électrique, la vitesse de propagation des charges ne varie pas.