

CHAPITRE I

COURANT ET RESISTANCE ELECTRIQUES

A. COURS

Les charges fixes sont étudiées par l'**électrostatique**¹. Par contre, l'**électrocinétique** est une branche de l'**électromagnétisme** consacrée à l'étude des courants électriques (c.à.d. des charges en mouvement).

Les applications de l'électrocinétique sont multiples et variées. Selon leur nature, on les classe en trois domaines: l'électronique, l'électronique de puissance et l'électrotechnique (science des machines électriques).

- **L'électronique** est l'étude des systèmes dans lesquels interviennent les électrons libres. Dans cette branche de l'électrocinétique, le courant électrique est essentiellement utilisé comme véhicule de l'information. Les puissances électriques mises en jeu sont alors généralement faibles (télécommande, capteur, calculatrice, téléphone mobile, ...).
- **L'électronique de puissance** est l'étude des régimes transitoires des systèmes de forte puissance. Cette nouvelle discipline scientifique s'est développée depuis quelques décennies avec l'utilisation de dispositifs à faibles coûts mais néanmoins efficaces, tels que les variateurs de vitesse, les onduleurs, etc.
- **L'électrotechnique** est l'étude des systèmes dans lesquelles le courant électrique intervient comme véhicule de l'énergie. Les puissances électriques mises en jeu sont en général importantes (radiateur, locomotive, tramway, transformateur, ...).

Dans ce chapitre, on définira le courant électrique comme un déplacement de porteurs de charges. Les notions d'intensité et de vecteur densité de courant seront examinées. On abordera ensuite les effets (calorifique, chimique, magnétique, ...) du courant électrique.

Selon la nature du matériau, le passage du courant électrique est plus ou moins facile à obtenir. On caractérise donc un matériau par sa résistance électrique. On verra que cette caractéristique dépend de la nature du matériau et de sa température. Au passage, on étudiera la loi d'**Ohm**² comme un résultat expérimental. Puis, on décrira un modèle classique de conduction des électrons dans les métaux qui permet de retrouver la loi d'Ohm sous sa forme microscopique (ou locale). Finalement, on abordera les notions d'énergie et de puissance électriques.

1. Courant électrique

1.1. Conducteurs hors d'équilibre électrostatique

Considérons deux conducteurs A et B en équilibre électrostatique. Ils sont portés respectivement aux potentiels V_A et V_B ($V_A > V_B$ et $Q_A > Q_B$) puis isolés de leurs sources. On

¹ Du même auteur, **Electrostatique**, cours, applications et exercices corrigés, Ellipses, Paris (2016).

² Georg Simon **Ohm** (1787-1854) : physicien allemand.

supposera également qu'ils sont isolés de tout autre conducteur, en particulier de la Terre. On relie les deux conducteurs à l'aide d'un fil métallique fin, très long et de capacité négligeable (Fig. I.1).

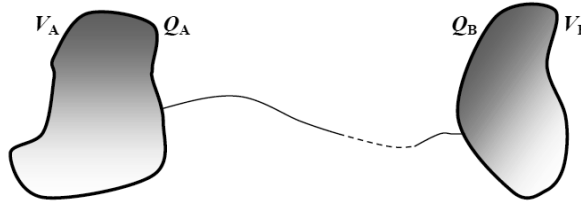


Fig. I.1

Les deux conducteurs reliés entre eux forment un conducteur unique. Un déplacement de charges a lieu du conducteur A vers le conducteur B jusqu'à égalité de leurs potentiels. Ce bref courant électrique se manifeste alors par un réchauffement du fil.

L'existence d'une d.d.p. entre les conducteurs A et B , implique l'établissement d'un champ électrique dirigé de A vers B (vers les potentiels décroissants). Sous l'effet de ce champ électrique, les charges sont soumises à une force électrique qui assurent leur déplacement.

Si on veut maintenir un courant continu entre les deux conducteurs A et B , on doit les brancher respectivement aux bornes $+$ et $-$ d'un générateur G (batterie) qui maintient une différence de potentiel constante entre les deux conducteurs (Fig. I.2).

Les forces électriques ne peuvent pas déplacer les charges électriques du conducteur B vers le conducteur A car V_B est supérieur à V_A .

Par conséquent, ce sont des forces non électriques qui assurent le transport des charges à l'intérieur du générateur, de la borne $-$ vers la borne $+$, maintenant un courant continu entre A et B . Ces forces non électriques existant dans le générateur fournissent le travail moteur. Donc, le générateur doit posséder de l'énergie.

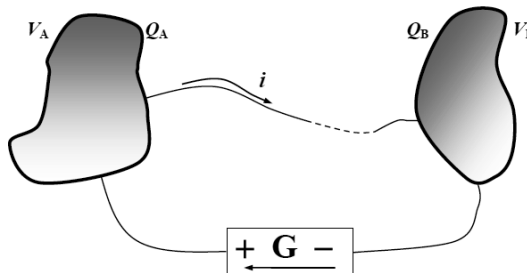


Fig. I.2

- Le schéma représenté dans la figure I.2 représente un **circuit électrique**.
- Pour établir un courant électrique continu, il est nécessaire d'avoir un circuit électrique.

1.2. Notion de courant électrique

1.2.1. Introduction

Sous l'effet d'un champ électrique, les particules chargées se déplacent. Ce déplacement de porteurs de charges est appelé **courant électrique**.

Dans le vide, le mouvement des particules chargées est accéléré. C'est le cas des électrons dans le tube cathodique d'un téléviseur, ou d'un faisceau de protons dans un accélérateur de particules. Par analogie, on peut comparer ce mouvement à la chute libre d'un corps.

Mais en général, dans un solide, les porteurs de charges sont des électrons plus ou moins liés aux atomes du réseau cristallin selon que le matériau est isolant ou conducteur.

1.2.2. Définitions

- On appelle courant électrique tout déplacement ou migration de charges électriques.
- Par convention, le sens du courant électrique correspond au sens du déplacement des charges positives.
- L'intensité du courant I dans un conducteur est égale au débit des charges à travers la surface du conducteur :

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

- L'unité d'intensité de courant est l'ampère.

$$[I] = \frac{[Q]}{[t]} \Leftrightarrow 1A = 1 \frac{C}{s}$$

1.3. Classification des courants

• Courant de conduction

Les métaux et les électrolytes possèdent des porteurs de charge en perpétuelle agitation thermique. Quand on applique un champ électrique extérieur, les porteurs de charges se déplacent dans le métal ou la solution électrolytique.

Selon la nature du milieu conducteur, les porteurs de charges mobiles sont :

- des **électrons** (dans les métaux et alliages);
- ou des **ions** positifs et des ions négatifs (dans les solutions électrolytiques); dans ce cas le courant est la superposition de deux courants de sens contraires.

Ce sont essentiellement les courants de conduction qui seront traités dans ce cours.

• Courants de convection

Ces courants sont obtenus en chargeant un conducteur (ou un isolant) que l'on déplace ensuite. Il y a transport d'électricité accompagné d'un transport de matière.

L'expérience de **Rowland**³ a montré que la rotation de disques métalliques chargés donne naissance à des courants circulaires qui produisent un champ magnétique. Dans ce cas, il n'y a pas de dissipation d'énergie par effet **Joule**⁴.

• Courants de particules

Quand on communique aux électrons une énergie supplémentaire, ils peuvent quitter le métal et on observe l'émission d'un faisceau électronique dans le vide.

Suivant la nature de l'énergie fournie, on distingue:

- l'émission **thermoélectronique** (énergie thermique),
- l'émission **photoélectrique** (énergie lumineuse),
- l'émission **secondaire** (bombardement par des particules extérieures),
- l'émission par **effet de champ** (champ électrique intense).

On distingue aussi les courants de **particules** (ions, protons, deutons, ...) qu'on rencontre notamment dans les accélérateurs de particules.

1.4. Densité de courant et vitesse de dérive

Considérons un conducteur métallique de section droite S constante. A température ambiante, les atomes du métal vibrent autour d'une position d'équilibre à l'intérieur du

³ Henry Augustus **Rowland** (1848 – 1901) : physicien américain.

⁴ James Prescott **Joule** (1818 – 1889) : physicien anglais.

réseau cristallin. Les électrons acquièrent alors des vitesses de l'ordre de 10^5 m.s^{-1} . Comme ce mouvement thermique des électrons est aléatoire (Fig. I.3.a), il n'y a aucun mouvement d'ensemble de ces porteurs de charges dans une direction privilégiée. Donc, en l'absence de champ électrique extérieur, le courant électrique est nul.

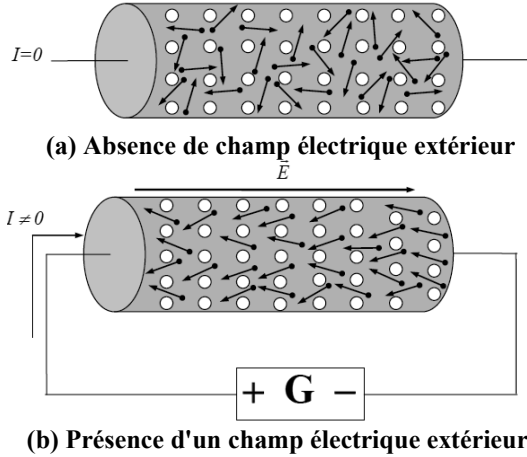


Fig. I.3

En présence d'un champ électrique extérieur, le mouvement des électrons devient ordonné. Ces électrons libres du métal se faufilent alors entre les ions fixes du réseau cristallin et circulent sans s'accumuler quelque part (Fig. I.3.b). Leur mouvement est un mouvement d'ensemble caractérisé par une vitesse moyenne uniforme, appelée **vitesse de dérive**, notée \vec{v}_d . Notons que le mouvement des électrons est de sens contraire à celui du champ électrique \vec{E} .

On appelle vecteur **densité de courant** \vec{j} dans un conducteur de section S , le courant par unité d'aire de section :

$$j = \frac{I}{S} \text{ ou } I = j S$$

La direction de la densité de courant est celle du champ électrique.

En général, lorsque la densité de courant n'est pas uniforme, le courant s'exprime par:

$$I = \iint_{\text{surface}} \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

où l'intégration est étendue à toute la surface S de toute section du conducteur (Fig. I.4).

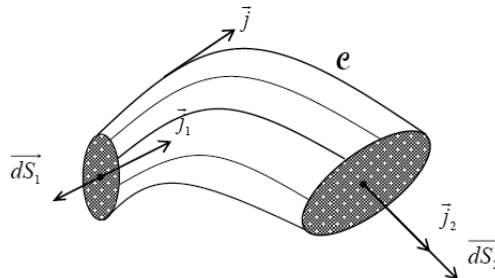


Fig. I.4

On peut dire également que l'intensité I du courant est égale au flux du vecteur \vec{j} à travers la surface S .

On appelle **ligne de courant**, une ligne où en chaque point le vecteur densité de courant \vec{j} est tangent.

Le sens d'une ligne de courant est par définition le sens de déplacement des porteurs de charges positifs.

Un **tube de courant** est un ensemble de lignes de courant s'appuyant sur un contour fermé C .

Soit un fil conducteur de section droite S parcouru par un courant I . Ce conducteur renferme n électrons libres, animés d'une vitesse \vec{v}_d (Fig. I.5). Dans un intervalle de temps t , ces électrons parcourent une distance $l = v_d t$. S'il y a n électrons libres par unité de volume, le nombre de ces porteurs de charges qui traversent la section droite S du conducteur pendant le temps t est égal à $n l S = n v_d t S$.

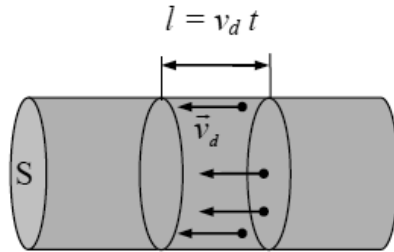


Fig. I.5

La quantité de charge électrique qui traverse cette surface S pendant le temps t équivaut à :

$$Q = n e l S = n e v_d t S$$

où e est la valeur absolue de la charge d'un électron.

■ ne représente la densité volumique de charges mobiles ρ_m ($\rho_m = ne$).

Puisque, l'intensité du courant circulant dans le fil conducteur est :

$$I = \frac{Q}{t} = n e v_d S$$

La densité de courant devient :

$$j = \frac{I}{S} = n e v_d$$

où I s'exprime en ampère et S en mètre carré dans le Système International ($[j] = A.m^{-2}$).

La densité de courant étant une grandeur vectorielle, elle s'écrit :

$$\vec{j} = -n e \vec{v}_d$$

où le signe moins indique que le sens positif du courant est opposé à celui du déplacement des électrons.

La vitesse de dérive des électrons dans un métal est inférieure à 1 mm.s^{-1} . Le fait que cette vitesse soit limitée n'est pas en contradiction avec la rapidité d'établissement du courant électrique lorsqu'on ferme un interrupteur. Un mouvement lent peut se propager très rapidement. En effet, dès qu'on appuie sur l'interrupteur, la lampe s'allume presque instantanément. Car, la vitesse de propagation du signal électrique est assez proche de la vitesse de la lumière. Tous les électrons de conduction se mettent en mouvement en même temps. Pour bien comprendre ce phénomène, imaginez une file de voitures à l'arrêt devant

un feu rouge. Dès que le feu passe au vert, tous les véhicules (du premier au dernier) démarrent presque instantanément. Le signal indiquant aux voitures de démarrer est transmis à une vitesse proche de celle de la lumière ($c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$). Il en va de même pour les électrons dans le fil électrique. Tout se passe aussi comme quand on ouvre le robinet d'un tuyau d'arrosage : si le tuyau est plein, l'eau sort immédiatement de la pomme d'arrosage. Mais cela ne veut pas dire que la goutte, qui vient de passer le robinet, est déjà parvenue à l'autre bout du tuyau : elle n'y arrivera que beaucoup plus tard.

Dans un métal, ce sont les électrons qui se déplacent mais dans un gaz ionisé (plasma), ou dans un électrolyte, ce sont des ions positifs et négatifs qui assurent la conduction. Dans un semi-conducteur de type N , les porteurs de charges sont des électrons (l'électron a une charge $-e$), alors que dans un semi-conducteur de type P , les charges en mouvement sont des lacunes ou trous (le trou a une charge $+e$).

Dans le cas général, il existe plusieurs espèces de porteurs de charges et la densité de courant s'écrit alors :

$$\vec{j} = \sum_{\alpha} n_{\alpha} q_{\alpha} \vec{v}_{d_{\alpha}}$$

où la sommation est effectuée sur toutes les espèces de porteurs de charges (cations, anions et électrons) en présence dans le milieu conducteur.

1.5. Equation de continuité

Le courant électrique est un déplacement de porteurs de charges. Supposons un conducteur de volume \mathcal{V} rempli d'un seul type de porteurs de charges mobiles : les électrons qui se déplacent à la vitesse \vec{v}_d . En vertu du principe fondamental de conservation de l'électricité, il n'y a ni création ni annihilation des charges électriques. Il y a seulement redistribution des charges à l'intérieur du volume, la quantité de charges électriques étant conservée. Par conséquent, la circulation d'un courant électrique à l'intérieur du volume \mathcal{V} doit s'accompagner d'une augmentation de la charge électrique à l'intérieur du même volume \mathcal{V} . Le principe de conservation de la charge permet donc d'écrire :

$$\oiint_S \vec{j} \cdot \vec{dS} = -\frac{dq_i}{dt}$$

où q_i est la charge contenue à l'intérieur du volume \mathcal{V} , à l'instant t . Si on appelle $\rho(t)$ la densité volumique de charges à l'instant t , la charge q_i s'écrit :

$$q_i = \iiint_{\mathcal{V}} \rho(t) d\mathcal{V}$$

Par conséquent :

$$\oiint_S \vec{j} \cdot \vec{dS} = \iiint_{\mathcal{V}} \rho(t) d\mathcal{V}$$

où S est la surface entourant le volume \mathcal{V} .

En procédant de la même manière que dans le cas de l'équation de **Poisson** (cf. Electrostatique, § 5, chapitre 6, page 188), on peut établir une relation locale entre la densité de courant en un point M et la densité volumique de charges en ce point.

Le flux de la densité de courant $\vec{j}(t)$ s'écrit alors :

$$\oiint_S \vec{j} \cdot \vec{dS} = \iiint_{\mathcal{V}} \text{div} \vec{j} \cdot d\tau$$

et
$$\iiint_{\tau} \text{div} \vec{j} \cdot d\tau = -\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\tau} \rho(t) d\tau$$

Finalement, l'expression de la forme différentielle de l'équation de continuité (théorème

d'Ostrogradsky⁵ s'écrit :

$$\operatorname{div} \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

Dans le cas des courants continus (en régime permanent, $\rho = Cte$), toutes les grandeurs électriques sont indépendantes du temps et l'équation de continuité se réduit à :

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0$$

On dit que le flux de \vec{j} est conservatif.

En appliquant le théorème d'Ostrogradsky, on montre que l'intensité du courant est la même dans toute section d'un tube de courant (Fig. I.5).

En effet,

$$I_1 = - \oiint_{S_1} \vec{j}_1 \cdot d\vec{S}_1 = \oiint_{S_2} \vec{j}_2 \cdot d\vec{S}_2 = I_2$$

1.6. Effets du courant électrique

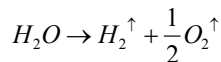
Le passage d'un courant dans un circuit électrique fermé n'est pas observable. Cependant, ce déplacement d'électrons est toujours accompagné d'effets divers dont l'observation nous permet d'apprécier l'intensité du courant électrique.

1.6.1. Effet calorifique

Un fil métallique à travers duquel on fait passer un courant électrique s'échauffe. Dans le cas d'une lampe électrique, le dégagement de chaleur est suffisant pour porter à l'incandescence le filament de la lampe. Il peut faire fondre le fil métallique et même le transformer en vapeur. C'est ce qui se passe notamment dans un fusible, lorsque l'intensité du courant dépasse une certaine valeur.

1.6.2. Effet chimique

Le passage du courant à travers certains conducteurs (solutions d'acides, de sels et de bases, ...) provoque leur décomposition en éléments constitutifs. C'est le cas, par exemple, de l'électrolyse de l'eau :



1.6.3. Effet magnétique

Un courant électrique circulant dans un conducteur crée un champ magnétique autour du conducteur. L'effet magnétique du courant est utilisé notamment dans les moteurs électriques.

On met en évidence l'existence du champ magnétique créé par le courant, à l'aide d'une aiguille aimantée mobile sur son pivot et parallèle à un fil métallique rectiligne et horizontal. Quand on fait passer un courant dans le fil, l'aiguille aimantée dévie et tend à se placer perpendiculairement au fil.

1.6.4. Effet lumineux

Une décharge électrique dans une atmosphère gazeuse sous faible pression provoque l'émission de lumière. C'est le principe de fonctionnement d'un tube au néon. L'éclair généré par la foudre est un effet lumineux spectaculaire de l'électricité atmosphérique.

La lampe au néon est un long tube de verre rempli de néon, muni de culots métalliques aux deux extrémités. Les forces générées par la décharge électrique peuvent être suffisantes

⁵ Mikhail Vassilievitch **Ostrogradsky** (1801 – 1861) : mathématicien et physicien russe.

pour ioniser un certain nombre d'atomes de néon. Les ions et les électrons ainsi produits sont accélérés par la différence de potentiel appliquée au tube. Lorsqu'un ion et un électron se rencontrent, ils se recombinent avec émission de lumière (luminescence).

1.6.5. Effet physiologique

Un courant électrique de quelques dizaines de milliampères affecte dangereusement le système nerveux et peut parfois être mortel. On peut considérer le système nerveux comme un réseau de communication entre le cerveau et les différents organes du corps humain. Les nerfs sont constitués de cellules biologiques appelées neurones qui laissent passer des signaux électriques pour la transmission des commandes nécessaires au bon fonctionnement du corps humain. Lorsqu'il y a choc électrique (électrocution, foudroiement) des courants électriques extérieurs se superposent aux courants véhiculés par les neurones et perturbent la respiration ou le rythme cardiaque.

Le neurone est une cellule nerveuse formée d'une partie centrale appelée le corps cellulaire, et une longue partie étroite appelée l'axone (Fig. I.6). Le rôle des neurones est de transmettre, d'une part, les informations sensorielles au cerveau, et d'autre part les ordres du cerveau vers les muscles. Ces transmissions sont de nature électrique.

L'axone est entouré d'une membrane qui laisse passer certains ions. Par différents mécanismes, il se produit une séparation entre les ions potassium K^+ , plus nombreux à l'intérieur de la membrane, et les ions sodium Na^+ plus nombreux à l'extérieur de celle-ci.

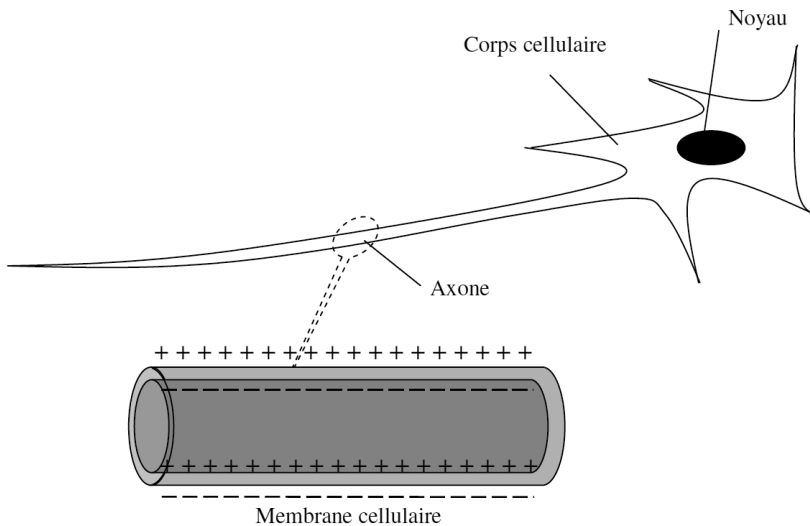


Fig. I.6 – Schéma d'un neurone

Quand une cellule est au repos, elle ne transmet pas de signal électrique. Néanmoins, elle est formée d'une couche chargée négativement à l'intérieur de la membrane cellulaire, et d'une couche chargée positivement à l'extérieur de la membrane et à proximité de celle-ci. Cette polarisation électrique de la membrane est liée aux différences de concentration en ions de part et d'autre de cette membrane; les ions potassium K^+ sont majoritaires à l'intérieur tandis que les ions sodium Na^+ sont majoritaires à l'extérieur. Cela est possible grâce à une pompe métabolique qui refoule les ions K^+ vers l'intérieur de la membrane cellulaire. On observe une différence de potentiel de -70 mV entre la couche interne et la couche externe de cette membrane. C'est le potentiel de repos. Au repos, la membrane du neurone est imperméable aux ions et dépense une bonne partie de l'énergie de l'organisme pour maintenir stables ces différences de concentrations en ions.