

Le saviez-vous ?

La vitesse des électrons dans les fils^{*}

par D. MANSION
Ingénieur Supélec Radio - 06000 Nice

Très rares sont les ouvrages traitant cette question qui semble d'ailleurs élémentaire. Aussi, bien des ingénieurs seraient-ils embarrassés si on la leur posait.

Et pourtant ce problème est facile à résoudre.

Nous savons que le passage d'un courant électrique dans un conducteur est rendu possible par la présence d'électrons libres entre les atomes qui le constituent. Dans le cas du cuivre, par exemple, le nombre d'électrons libres, par centimètre cube de métal, est de :

$$k = 8,5 \times 10^{22}$$

CAS DU COURANT CONTINU

Lorsque l'on applique une différence de potentiel continue entre les deux extrémités du conducteur, les électrons libres sont attirés vers le pôle positif et il en résulte un courant d'intensité I . Calculons la vitesse moyenne v des électrons. Par définition, cette vitesse est le quotient du trajet parcouru a par le temps t mis à le parcourir ($v = a/t$).

Si l'on désigne par S la section droite du conducteur, au bout du temps t , tous les électrons libres contenus dans le volume $S \cdot a$ auront traversé cette section (voir figure).

Le nombre d'électrons libres contenus dans ce volume est :

$$k \cdot S \cdot a = k \cdot S \cdot v \cdot t$$

* Cet article a été publié en 1961 dans la Revue générale d'électronique - n° 172.

On sait que la charge électrique d'un électron est :

$$e = 1,59 \times 10^{-19} \text{ coulomb}$$

Donc, la charge totale des électrons qui ont traversé S est :

$$Q = k \cdot S \cdot v \cdot t \cdot e$$

Par définition, l'intensité I d'un courant continu est le nombre de coulombs qui s'écoulent par seconde :

$$I = Q/t$$

Donc :

$$k \cdot S \cdot v \cdot t \cdot e = I \cdot t$$

La vitesse des électrons est alors :

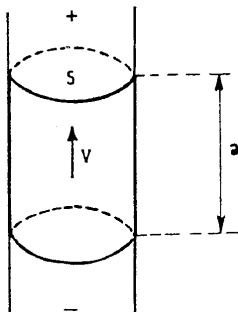
$$v = \frac{I}{k \cdot S \cdot e} = \frac{J}{k \cdot e}$$

en désignant par $J = I/S$ la densité de courant dans le conducteur. Nous avons fait intervenir ce coefficient, car c'est lui qui limite pratiquement l'intensité que l'on peut faire circuler dans un conducteur, par suite de l'échauffement de celui-ci. C'est ainsi que l'on dépasse rarement $J = 5 \text{ A/mm}^2$ ($= 500 \text{ A/cm}^2$).

Les valeurs numériques des trois termes de la formule étant connus, on peut calculer v :

$$v = \frac{500}{8,5 \times 10^{22} \times 1,59 \times 10^{-19}} = 0,037 \text{ cm/s}$$

soit par heure : $v = 0,037 \times 3\,600 = 133 \text{ cm/h}$



Cette lenteur a quelque chose de surprenant et il faut alors expliquer la rapidité des transmissions électriques. Celle-ci est simplement due à la vitesse de propagation de l'*ébranlement* et non pas à la vitesse de déplacement des électrons. On peut comparer ce phénomène à celui qui se produit lorsque l'on ouvre le robinet d'alimentation d'un tuyau déjà rempli d'eau : celle-ci s'écoule immédiatement à l'autre extrémité du tuyau, quoique la vitesse d'écoulement de l'eau puisse être très lente.

CAS DU COURANT ALTERNATIF

La plupart des manuels d'électricité présentent le courant alternatif comme un écoulement d'électrons dans un sens, pendant l'alternance positive, suivi d'un écoulement dans le sens inverse pendant l'alternance négative. Cette conception très répandue est erronée.

Ceci devient intuitif à la lumière de ce qui précède. En effet, étant donné l'extrême lenteur des électrons, le chemin qu'ils peuvent parcourir pendant chaque alternance est très court. On peut d'ailleurs calculer celui-ci de plusieurs manières ; nous indiquerons la plus rapide qui utilise les résultats précédents.

Le courant étant alternatif, de pulsation $\omega = 2 \pi f$, la densité instantanée du courant varie sinusoïdalement :

$$J = J_{max} \cdot \cos \omega t$$

et la vitesse instantanée d'un électron peut s'écrire :

$$v = \frac{J_{max}}{k \cdot e} \cdot \cos \omega t.$$

Pendant un temps infinitésimal dt , l'électron se déplace de da à la vitesse v indiqué ci-dessus. On a toujours, par définition :

$$v = \frac{da}{dt}$$

donc :

$$da = \frac{J_{max}}{k \cdot e} \cdot \cos \omega t \cdot dt$$

$$\text{D'où : } a = \frac{J_{max}}{k \cdot e} \int \cos \omega t \cdot dt = \frac{J_{max}}{k \cdot e \cdot \omega} \cdot \sin \omega t$$

L'amplitude des oscillations de l'électron est donc :

$$A = \frac{J_{max}}{k \cdot e \cdot \omega} = \frac{J_{eff} \cdot \sqrt{2}}{k \cdot e \cdot \omega}$$

soit :

$$A = \frac{J_{eff}}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot k \cdot e \cdot f}$$

En prenant, comme dans l'exemple précédent, $J_{eff} = 5 \text{ A/mm}^2$, on a :

$$A = \frac{0,037}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot f} \text{ cm} = \frac{0,0833}{f} \text{ mm}$$

Pour $f = 50 \text{ Hz}$, on trouve $A = 0,00166 \text{ mm}$, soit un peu plus d'un micron et demi.

Pour $f = 50 \text{ MHz}$, l'amplitude est un million de fois plus petite.

On voit que l'on ne peut pas parler d'un *écoulement* d'électrons dans un sens, puis dans l'autre, mais plutôt de *vibration* des électrons, avec une amplitude de l'ordre de micron (à 50 Hz).

La résistance de contact électrique

La notion de résistance de contact est enseignée aux élèves électriciens, à l'occasion de l'étude des shunts pour courants forts et du pont double de Thomson (alias Lord Kelvin) qui sert à mesurer les faibles résistances (0,1 à 0,001 Ω).

Par la suite peu de cours y font allusion et c'est dommage car on la retrouve, par exemple, dans la pratique de l'électricité sur automobiles. Dans celles-ci la distribution du courant de la batterie d'accumulateurs vers les divers organes (démarrreur, phares, avertisseur, etc...) se fait à l'aide d'un seul câble isolé, le retour étant assuré par la «masse» du châssis de la voiture. La batterie et chacun de ces organes sont démontables grâce à des câbles terminés par des cosse qui doivent résister aux vibrations et à l'oxydation. Avec le temps et l'humidité, l'oxydation augmente la résistance de contact des cosse.

Comparons deux automobiles, l'une utilisant une batterie de 6 volts, l'autre de 12 volts. Toutes les deux ont un démarreur ayant un moteur de même puissance, par exemple 2 400 Watts. Supposons que les résistances de contact des cosse soit 0,005 Ω dans les deux cas. Le tableau suivant illustre l'avantage des batteries de 12 volts sur celles de 6 volts utilisées autrefois. C'est pourquoi tous les constructeurs actuels ont adopté la tension de 12 volts.

Tension nominale de la batterie (U_N)	6 V	12 V
Puissance du démarreur (P)	2 400 W	2 400 W
Courant de démarrage $I = P / U_N$	400 A	200 A
Résistance de contact (R_C)	0,005 Ω	0,005 Ω
Chute de tension aux bornes de R_C ($U_C = R_C I$)	2 V	1 V
Tension aux bornes du démarreur ($U_N - U_C$)	4 V	11 V
Soit en % de U_N	66,6 %	91,6 %
Le démarreur tourne	Non	Oui