

Contenu du programme officiel :

Notions et contenus	Capacités exigibles
Charge électrique, intensité du courant. Potentiel, référence de potentiel, tension.	<ul style="list-style-type: none"> - Savoir que la charge électrique est quantifiée. - Exprimer l'intensité du courant électrique en termes de débit de charge. - Exprimer la condition d'application de l'ARQS en fonction de la taille du circuit et de la fréquence. Relier la loi des nœuds au postulat de la conservation de la charge. - Utiliser la loi des mailles. - Algébriser les grandeurs électriques et connaître les conventions récepteur et générateur. - Connaître les ordres de grandeur des intensités et des tensions dans différents domaines d'application.

En gras les points devant faire l'objet d'une approche expérimentale.

Table des matières

1 Le courant électrique	1
1.1 Charge et porteurs de charges.	1
1.2 Le courant et l'intensité du courant	2
2 Le potentiel électrique	3
2.1 Mise en évidence expérimentale.	3
2.2 Potentiel et tension.	4
2.3 La puissance électrique.	5
3 L'étude des circuits électriques	6
3.1 Le cadre de l'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS)	6
3.2 Description des circuits	7
3.3 Les lois de Kirchhoff	7

L'électrocinétique est le domaine de la physique qui étudie le mouvement des électrons et des charges, autrement dit les courants électriques. Cette étude se limite à celle des faibles puissances électrique, autrement dit nous n'étudions pas dans ce cadre les moteurs et machines tournantes. Son étude est fondamentale, vu les nombreux développements modernes de l'électronique.

1 Le courant électrique

1.1 Charge et porteurs de charges

La **charge électrique** Q mesurée en Coulombs (C) est une grandeur scalaire (c'est un nombre) algébrique (elle peut être positive ou négative) caractérisant la sensibilité d'une particule **porteuse de charge** à l'interaction électromagnétique.

La charge Q est toujours un multiple entier de la charge élémentaire notée e , c'est donc une grandeur **quantifiée** et on note $Q = \pm Ze$ avec $\pm Z$ le nombre de charges et $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C l'opposé de la charge d'un électron.

| **Remarque :** La charge s'exprime parfois en mA · h, sur les piles notamment.

Les porteurs de charges peuvent être de natures très différentes :

- ▷ dans un métal conducteur (comme les fils électriques en cuivre), il s'agit des électrons ;
- ▷ dans une solution ionique (comme les neurones ou les piles), il s'agit des ions (figure 1) ;

Exemple 1 : L'eau salée est une solution ionique, les ions en mouvements sont les ions Na^+ (charge $+e$) et les ions Cl^- (charge $-e$).

▷ dans les semi-conducteurs (dans les transistors et les LED), il s'agit des électrons et des lacunes électroniques (des « trous » de charge $+e$ se déplacent à l'opposé des électrons, figure 2).

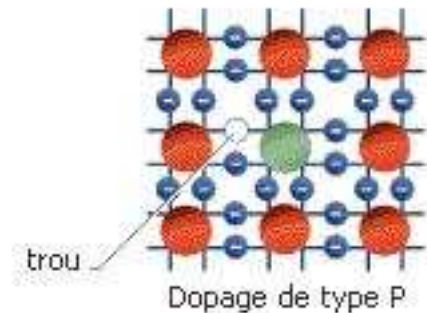
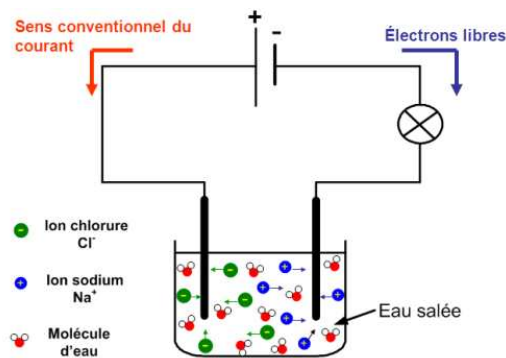


Fig. 1 – Conduction électrique par des ions en solution

Fig. 2 – Conduction par lacune électronique dans un semi-conducteur dopé P

► **Postulat fondamental de l'électrocinétique**

Théorème. La charge électrique se conserve. Il n'y a pas de disparition ou de création de charges. C'est une grandeur extensive (les charges s'ajoutent).

1.2 Le courant et l'intensité du courant

► **Le courant électrique**

Définition. Le **courant électrique** correspond au déplacement d'ensemble ordonné de porteurs de charges mobiles.

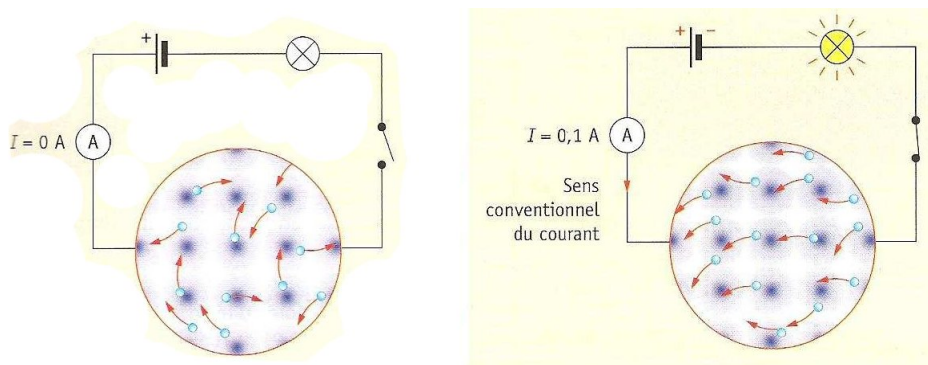


Fig. 3 – Schéma du mouvement désordonné (absence de courant) ou ordonné (présence de courant) des électrons dans un circuit.

► **L'intensité**

L'intensité électrique du courant mesure le débit de charges à travers la section du conducteur, autrement dit la quantité de charge électrique qui traverse la surface transverse du conducteur par unité de temps.

Exprimons cette grandeur. On note Σ la surface du conducteur. À un instant t , on note $n(t)$ le nombre de charges qui sont passées à travers Σ . À un instant légèrement après $t + \Delta t$, on note $n(t + \Delta t)$ ce même nombre.

Pendant l'intervalle de temps Δt , il y a donc $\Delta n = n(t + \Delta t) - n(t)$ charges qui sont passées à travers la surface Σ . On note q_e la charge portée par chaque porteur et on a donc $\Delta q = q_e \Delta n = q(t + \Delta t) - q(t)$ la charge électrique traversant Σ pendant le même temps, où l'on note $q(t) = q_e n(t)$.

Si Δq est constant au cours du temps, on a donc par définition le courant électrique $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ où Δq est la charge électrique traversant le conducteur pendant le temps Δt .

En pratique, le courant n'est pas indépendant du temps. Pour obtenir l'expression de l'intensité, il faut prendre l'intervalle de temps Δt le plus petit possible. On a

$$I(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{q(t + \Delta t) - q(t)}{\Delta t}$$

où l'on reconnaît l'expression mathématique de la dérivée de la fonction charge $q(t)$.

Définition. L'intensité électrique est la mesure de la quantité de charge dq qui traverse la section du conducteur pendant le temps infinitésimal dt . Elle s'exprime en ampère (A). On note

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = q'(t).$$

Il s'agit de la dérivée au sens mathématique de la fonction $t \mapsto q(t)$ qui compte la quantité de charge électrique étant passée par un point donné.

Remarque : L'intensité est donc le flux d'électrons dans le conducteur. Cette notion de flux est centrale en physique et nous la retrouverons plus tard dans l'année lors de l'étude de l'induction.

► Représentation et sens conventionnel du courant

Le courant est algébrique, il peut être positif ou négatif. On le représente par une flèche sur les fils électriques.

$$\xrightarrow{i} = \xleftarrow{-i}$$

Fig. 4 – Représentation du courant. C'est une grandeur algébrique, le courant $-i$ est équivalent au courant i allant dans le sens opposé.

On définit le **sens conventionnel** du courant comme le sens pour lequel i est positif. Ce sens matérialise le sens de déplacement des charges positives. Dans ce cas, comme les électrons sont de charge négative, il se déplacent dans le sens opposé au courant.



Fig. 5 – Le sens conventionnel du courant.

► Ordres de grandeurs

Courant	Composants ou appareils
10 mA	DEL commune
100 mA	Risque d'électrocution
0.5 A	ampoule à incandescence sous 230 V
10 A	Four/Chauffage/Chauffe-eau sous 230 V
100 A	Démarrateur automobile
10 kA–100 kA	Foudre

| *Application 1* : Calculer le nombre d'électrons traversant le circuit sous 1 A pendant 1 s.

2 Le potentiel électrique

2.1 Mise en évidence expérimentale

| *Expérience 1 : Machine de Wimshurst*

La friction entre deux corps métalliques induit un phénomène électrostatique, des électrons sont arrachés au métal. Dans la machine, ce phénomène se produit entre les balais et les traits métalliques sur les roues tournantes. Pour assurer la neutralité électrique, les électrons se déplacent et se retrouvent sur une boule métallique. Par conservation de la charge, l'autre boule est chargée positivement. Or les charges positives et négatives s'attirent, quand suffisamment de charges sont présentes, un éclair apparaît. Il s'agit d'un courant électrique qui rétablit la neutralité du dispositif. Cette expérience peut être revisualisée dans [la vidéo](#) [1].

2.2 Potentiel et tension

► **Le potentiel**

L'attraction entre les charges électriques mise en évidence dans l'expérience précédente se quantifie avec le **potentiel électrique** V . Plus un corps est à un potentiel élevé, plus il va attirer les charges négatives. Le potentiel s'exprime en Volts (V).

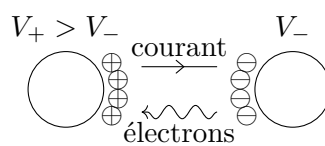


Fig. 6 – L'éclair matérialise le déplacement des électrons vers le potentiel électrique le plus élevé, un courant électrique apparaît donc en sens inverse.

► **Analogie hydraulique**

Si les charges électriques se déplacent spontanément vers les potentiels les plus élevés, le courant se déplace en sens inverse et se dirige vers les potentiels les plus faibles. Ainsi, on peut faire une analogie simple entre l'hydraulique et l'électrocinétique. Le potentiel est représenté par l'altitude (ou la pression lorsque l'on peut l'imposer) et le courant électrique est représenté par le débit d'eau.

| **Remarque :** Fondamentalement, cette analogie s'explique car ces deux phénomènes sont liés à des lois de conservations similaires.

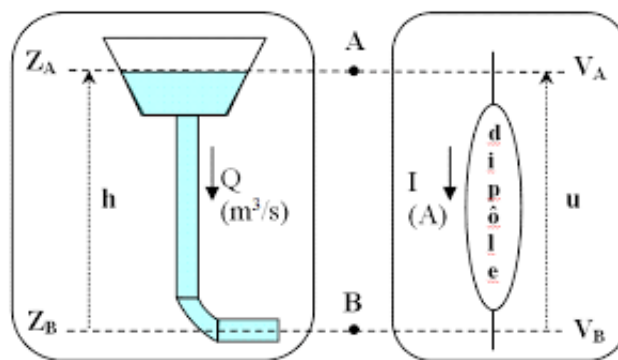


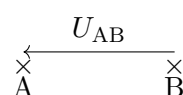
Fig. 7 – Analogie hydraulique/électrique

► **La tension ou différence de potentiel (ddp)**

Définition. La **tension électrique** entre deux points A et B correspond à la différence de potentiel électrique entre ces points. On la note

$$U_{AB} = V_A - V_B$$

et elle s'exprime en Volts (V). Dans les schémas électrique, les tensions se représentent par des flèches allant du point initial (B) vers le point final (A).



⚡⚡⚡ **Attention !** La différence de potentiel se mesure entre n'importe quels points, même s'il n'existe pas de chemin physique pour les porteurs de charges entre ces deux points. Il y a alors une tension sans courant électrique. Par contre, si un chemin physique existe, alors les charges auront tendance à transiter entre ces points d'autant plus vite que la tension est élevée. Il y a alors un courant électrique.

| **Exemple 2** : Dans l'exemple du schéma de la figure 6, la tension vaut $V_+ - V_-$ et est positive.

La grandeur physique mesurable qui traduit le mouvement des charges est bien cette différence de potentiel. Pour avoir accès au potentiel électrique en un point donné, on doit mesurer la tension avec un certain **potentiel de référence**. Ce potentiel de référence est généralement noté la masse ou la Terre. Le potentiel de ces points est fixé à 0 V.



Fig. 8 – Représentations électriques de la masse et de la Terre.

Remarque : La Terre est un fil profondément enfoui. La masse est généralement reliée au fil de Terre. Si ce n'est pas le cas, elle est reliée à une armature métallique d'un des appareils. On verra l'importance des problèmes de masse lors des différents TP d'électronique.

Les différences de potentiels peuvent être d'origine électrostatique, chimique ou magnétique.

► Ordres de grandeurs

Tension	Provenance
230 V	EDF (délivrée)
plusieurs kV	Industrielle
225 kV à 400 kV	Lignes haute tension
quelques V	Piles

Remarque : La tension n'est pas en soi dangereuse pour la santé [2], ce qui peut faire l'objet de spectacles impressionnants [3]. Le fait d'être à un certain potentiel n'est donc pas dangereux. Toutefois, ce potentiel peut induire un certain courant électrique, qui lui est dangereux.

2.3 La puissance électrique

La grandeur physique coûteuse n'est ni le courant, ni la tension, mais la puissance électrique fournie. On définit un dipôle électrique comme un composant électronique ayant deux branchements électriques. Sur un schéma, il faut représenter la tension aux bornes du dipôle et le courant le traversant. Deux choix sont possibles quant à l'orientation de ses grandeurs.

► La convention récepteur et la puissance reçue

Définition.

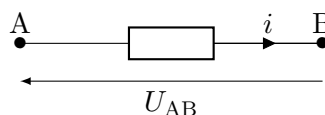


Fig. 9 – Dipôle en convention récepteur : courant et tension sont représentés dans un sens opposé.

Spontanément, le courant se dirige du potentiel le plus fort vers celui le plus faible. Ainsi, si la tension est dans un sens, le courant se dirige spontanément en sens inverse. Dans ce cas, le dipôle reçoit de l'énergie, comme une turbine reçoit de l'énergie d'un fluide. Lorsque l'on dessine la tension et le courant en sens opposé, on parle de **convention récepteur**.

Définition. La **puissance reçue** par un dipôle AB, lorsque le courant i et la tension U_{AB} sont en convention **récepteur**, est

$$\mathcal{P}_{\text{reçue}} = U_{AB} i .$$

La puissance s'exprime en Watts (W).

► La convention générateur et la puissance fournie

Définition.

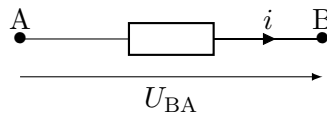


Fig. 10 – Dipôle en convention générateur : courant et tension sont représentés dans le même sens.

Lorsque le courant se dirige vers les hauts potentiels, c'est comme si on voulait faire remonter une montagne à l'eau d'une rivière. C'est possible uniquement grâce à une pompe qui fournit de l'énergie au fluide. Lorsque l'on dessine la tension et le courant dans le même sens, on parle de **convention générateur**.

La **puissance fournie** par un dipôle AB, lorsque le courant i et la tension U_{AB} sont en convention **générateur**, est

$$\mathcal{P}_{\text{fournie}} = U_{BA} i = -U_{AB} i = -\mathcal{P}_{\text{reçue}} .$$

La puissance fournie par un dipôle est l'opposé de sa puissance reçue.

► Caractère récepteur et générateur

Le sens des flèches des courants et des tensions est *a priori* purement arbitraire. En effet, il s'agit d'un dessin sur un schéma qui ne traduit pas forcément une réalité physique. La convention récepteur ou générateur ne traduit donc pas forcément le caractère récepteur ou générateur de courant.

Propriété. Pour savoir si un dipôle est **physiquement** récepteur de courant ou générateur de courant, il faut calculer sa puissance reçue $\mathcal{P}_{\text{reçue}}$.

Si $\mathcal{P}_{\text{reçue}} > 0$, le dipôle est réellement récepteur de puissance électrique (par exemple des résistances). À l'inverse, si $\mathcal{P}_{\text{reçue}} < 0$, alors $\mathcal{P}_{\text{fournie}} > 0$ et le dipôle est réellement générateur de puissance électrique (par exemple les sources de tension).

Lorsque c'est possible, on fera en sorte que les conventions et les caractères soient en accord.

3 L'étude des circuits électriques

3.1 Le cadre de l'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS)

► Vitesse de déplacement des porteurs de charges

Application 2 : Sachant qu'il y a environ 8×10^{28} électrons libres par mètre cube dans le cuivre, estimer la vitesse moyenne de déplacement des électrons dans un fil électrique traversé par un courant d'un ampère.

On retiendra que les porteurs de charges dans un fil électrique se déplacent très peu. Il faut considérer le circuit comme une grande chaîne, même si chaque chaînon se déplace très lentement, dès qu'une extrémité se met en mouvement, l'autre extrémité va quasiment instantanément suivre ce mouvement. Le déplacement global est donc une grandeur physique qui se déplace très vite.

En se déplaçant faiblement, les charges en mouvement provoquent l'apparition d'une onde électromagnétique, se traduisant par une onde de courant et une onde de potentiel. Cette onde porte l'énergie et se déplace à une fraction de la vitesse de la lumière. Ce point sera détaillé en seconde année.

► Hypothèse de l'ARQS

Prenons un fil électrique parcouru par aucun courant. À l'instant $t = 0$, on lance un courant à une extrémité. Si le fil est long, le courant se propage comme une onde et il va mettre un certain temps à arriver au bout du fil.

L'**approximation des régimes quasi-stationnaires** fait l'hypothèse que le temps de propagation des phénomènes électriques est négligeable devant la durée caractéristique des variations temporelles de

ces phénomènes. En notant L la taille du circuit, v la vitesse de propagation du courant et T la durée caractéristique des variations, cette approximation se réécrit



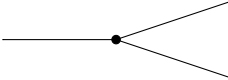
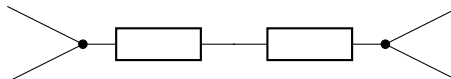
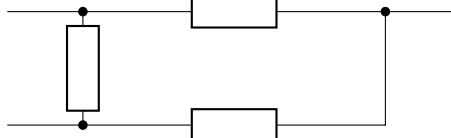
$$L \ll vT .$$

Propriété. L'ARQS permet d'assimiler le courant à un fluide incompressible. **L'intensité du courant et le potentiel électrique sont donc les mêmes le long d'un fil électrique.**

C'est dans ce cadre que se situera toute notre étude.

3.2 Description des circuits

► Vocabulaire du circuit électrique

- ▷ Un fil : 
- ▷ Une résistance ou un dipôle quelconque : 
- ▷ Un nœud - point auquel est connecté au moins 3 fils : 
- ▷ Une branche - portion entre deux nœuds parcourue par le même courant : 
- ▷ Une maille - portion de circuit fermée (succession de branches qui retournent au nœud de départ) : 

► Association en parallèle ou en série

Définition. Deux dipôles sur une même branches sont **en série**. Ils sont parcourus par le même courant.

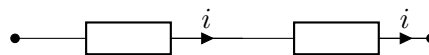


Fig. 11 – Deux dipôles en série.

Définition. Deux dipôles reliés à deux mêmes nœuds sont **en parallèle** (ou en dérivation). Ils sont soumis à la même tension.

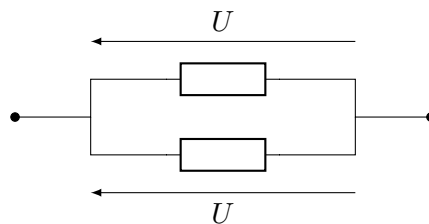


Fig. 12 – Deux dipôles en parallèle.

3.3 Les lois de Kirchhoff

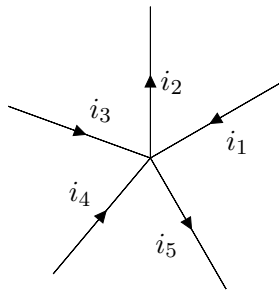
► La loi des nœuds

Il n'y a pas d'accumulation de charges dans un circuit électrique. Ainsi, dans le cadre de l'ARQS, toutes les charges apportées par un courant doivent immédiatement être évacuées par un autre courant.

Théorème. Au nœud d'un circuit, on a

$$\sum i_{\text{entrant}} = \sum i_{\text{sortant}} .$$

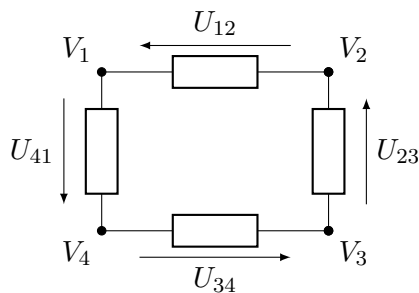
Exemple 3 :



La loi des nœuds indique : $i_1 + i_3 + i_4 = i_2 + i_5$.

► **La loi des mailles**

Soit la maille ci-dessous. Les notations V_i représentent les potentiels électriques en chacun des points.



Écrivons

$$\begin{aligned} 0 &= (V_1 - V_1) + (V_2 - V_2) + (V_3 - V_3) + (V_4 - V_4) ; \\ 0 &= (V_1 - V_2) + (V_2 - V_3) + (V_3 - V_4) + (V_4 - V_1) ; \\ 0 &= U_{12} + U_{23} + U_{34} + U_{41} . \end{aligned}$$

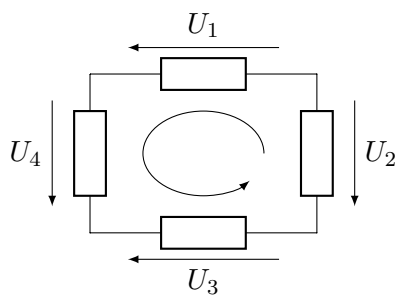
Théorème. La somme algébrique des tensions le long d'une maille dans un sens de parcours donné est nulle, soit

$$\sum u_k = 0 .$$

Pour appliquer cette loi fondamentale, il faut

- ▷ orienter la maille ;
- ▷ sommer toutes les tensions dans le même sens ;
- ▷ sommer toutes les tensions allant en sens inverse ;
- ▷ égaliser ces deux sommes.

Exemple 4 :



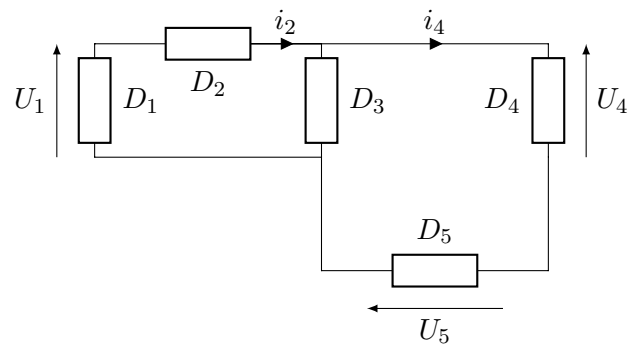
La flèche arrondie représente l'orientation positive de la maille. Les tensions U_1 et U_4 vont dans son sens et les tensions U_2 et U_3 vont en sens inverse. On a donc

$$U_1 + U_4 = U_2 + U_3 .$$

Remarque : On retiendra que pour parcourir une maille, « le chemin dans un sens égal le chemin dans l'autre sens ».

► **Application**

Application 3 : Dans le circuit ci-dessous, orienter puis préciser les valeurs des tensions et des courants manquants puis préciser le caractère récepteur ou générateur de chaque dipôle. On prend $U_1 = -2\text{V}$, $U_4 = -3\text{V}$, $U_5 = 1\text{V}$, $i_2 = -1\text{mA}$ et $i_4 = 1\text{mA}$.



Références

- [1] <https://www.youtube.com/watch?v=Zilvl9tS00g>
- [2] <https://www.youtube.com/watch?v=Zi4kXgDBFhw>
- [3] <https://www.youtube.com/watch?v=3Fpjc0WwiI4>