

I. Généralités

I.1. L'électrocinétique.

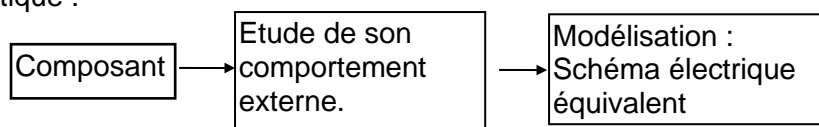
On appelle électrocinétique la branche de l'électromagnétisme qui étudie le mouvement des charges électriques.

Ce mouvement de charges à l'intérieur d'un conducteur n'est autre que le courant électrique.

L'étude électrocinétique d'un composé sera faite d'un point de vue externe au composant considéré. L'intérêt porte sur la description du fonctionnement de ce composant dans le montage et non aux principes physico-chimiques qui en rendent compte.

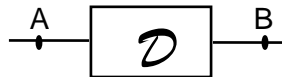
Le composant n'est plus alors qu'une « boîte noire » que l'on essaie de modéliser sous forme de schéma électrique simple équivalent, association de dipôles idéaux bien définis.

Electrocinétique :

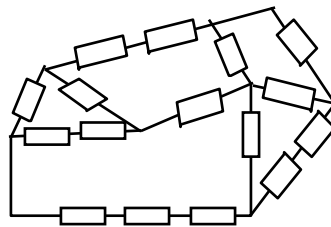


I.2. Définitions

- **Dipôle** électrocinétique, tout système relié à l'extérieur par deux bornes.

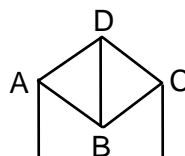
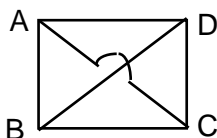


- **Réseau électrique** : Circuit plus ou moins complexe constitué de dipôles connectés entre eux par des fils de résistance négligeable.
- **Nœud** : point du réseau relié à plus de deux dipôles.
- **Branche** : portion du réseau comprise entre deux nœuds.
- **Maille** : parcours fermé constitué de branches et ne passant qu'une fois par un nœud donné.



- **Graphe** : schéma représentatif de la topologie du réseau indépendamment de sa forme réelle.

Chaque fois que ce sera possible, on choisira le graphe plan qui a le moins de chevauchement possible pour faciliter l'étude.



II. La charge et le courant

II.1. La charge

II.1.1. Notion de charge électrique

Comme la masse, la **charge électrique** est une grandeur caractéristique de la matière. À l'échelle macroscopique, les corps ne portent habituellement aucune charge totale ; nous disons qu'ils sont **neutres**.

En frottant certains corps, ils deviennent chargés. L'expérience montre l'existence de deux types de charge : la charge **positive** et la charge **négative**. Des corps portant des charges de même signe se repoussent et des corps portant des charges de signes opposés s'attirent.

À l'échelle microscopique, les atomes sont formés par des protons positifs, des neutrons neutres et des électrons négatifs.

La notion de charge électrique est obtenue grâce aux travaux de Coulomb de 1785 et à la découverte de l'électron en 1881 par Thomson.

II.1.2. Propriétés

La charge électrique est une grandeur scalaire positive ou négative vérifiant les propriétés suivantes.

→ Charge positive ou négative

Elle peut exister sous deux formes qu'on qualifie de positive et de négative. Le choix de l'électron comme porteur d'une charge négative est purement conventionnel mais admis de tous. Une charge sera donc positive si elle est attirée par un électron et négative si elle est repoussée par ce dernier. Ceci permet de satisfaire les phénomènes d'attraction et de répulsion observés expérimentalement.

→ Extensivité de la charge

La charge électrique est une grandeur extensive c'est-à-dire qu'elle dépend de la taille de l'échantillon, la charge ne dépend que de l'état du système et elle est égale à la somme algébrique des charges élémentaires qui le constituent.

On peut formuler cette définition en considérant un système formé de l'association de deux sous-systèmes, l'un de charge électrique q_1 , l'autre de charge électrique q_2

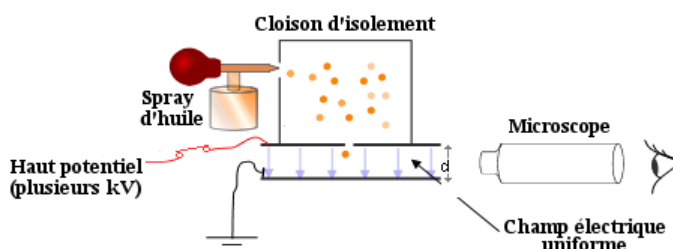
La charge q du système est : $q = q_1 + q_2$

→ Conservation de la charge

La charge électrique est une grandeur conservative au sens où la charge électrique totale d'un système isolé est constante au cours du temps. Les variations de la charge d'un système ne sont donc dues qu'aux échanges avec l'extérieur. Pour un système isolé, il n'y a ni création ni disparition de charges, sa charge électrique ne varie pas.

II.1.3 Quantification de la charge

L'expérience de la goutte d'huile Millikan (Université de Chicago, début du XXe siècle) consiste à pulvériser de minuscules gouttes d'huiles électrisées entre les deux électrodes horizontales d'un condensateur plan chargé. Les minuscules gouttes subissent plusieurs forces qui s'équilibrent rapidement et font que chaque goutte se déplace à vitesse constante mesurable avec une lunette de visée et un chronomètre.



Millikan, par simple mesure de vitesse par le rapport de la distance parcourue sur le temps mis pour la parcourir sur une gouttelette d'huile qu'il ionisait en l'irradiant par rayons X, observa expérimentalement que les valeurs d'ionisation étaient toutes multiples entières de $e = 1,592 \times 10^{-19} \text{ C}$, constante que l'on connaît aujourd'hui sous le nom de charge élémentaire (avec une valeur mise à jour légèrement différente : $e = 1,60217646 \times 10^{-19} \text{ C}$) et que l'on note traditionnellement e ; cette expérience s'est avérée être la première preuve de la quantification de la charge électrique qui est strictement toujours un multiple entier positif ou négatif de cette valeur fondamentale e .

Conclusion : Il existe une charge électrique élémentaire, notée e , égale à $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (en coulombs, unité de charge). Toute charge électrique est un multiple entier de cette charge élémentaire.

$$q = \pm Ze \text{ avec } Z \in \mathbb{N}$$

Les différents porteurs de charges :

- électrons : e^- particule élémentaire de charge $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
de masse $0,91 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$
- protons : p particule élémentaire de charge $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
de masse $1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kilogramme}$
- ions
- trous.

II.2. Le courant

L'électrocinétique est l'étude des courants électriques. Nous sommes concernés ici surtout par les courants dus au déplacement des électrons de conduction dans un conducteur soumis à la tension d'un générateur.

II.2.1. Définition

- L'intensité $i(t)$: grandeur scalaire qui mesure la charge qui traverse une section de dipôle pendant une unité de temps, exprimée en Ampères A : $i(t) = \frac{dq}{dt}$.

La valeur absolue de l'intensité mesure donc la quantité de charge traversant une section du conducteur par unité de temps. Une branche d'un circuit pouvant être traversée par le courant dans un sens ou dans l'autre, on choisit de représenter mathématiquement l'intensité par une **grandeur algébrique** : elle peut être positive ou négative.

Une fois que l'on a adopté une convention d'orientation de la branche où circule le courant, le *signe de l'intensité* nous renseigne sur le sens effectif du courant dans la branche. Si elle est constante au cours du temps on dit que le courant est continu.

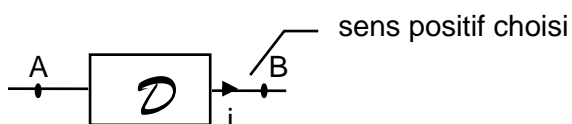
- Sens du courant

On a choisi le sens conventionnel du courant dans les conducteurs avant de découvrir qu'il était assuré par des électrons. Ainsi par convention :

Le sens du courant est le sens dans lequel se déplaceraient les charges positives.

II.2.2. Dans la pratique

Avant d'effectuer tout calcul on ne sait pas a priori dans quel sens sera le courant. Pour attribuer une valeur algébrique à l'intensité du courant il faut orienter arbitrairement le conducteur au moyen d'une flèche. Une fois ce choix effectué, par convention, $i(t)$ est une grandeur positive si le courant va effectivement dans le sens indiqué par la flèche, négative dans le cas contraire.



Notation, on note i_{AB} l'intensité du courant comptée positivement si le courant circule effectivement de la borne A vers la borne B.



II.2.3. Quelques ordres de grandeur

- Le fusible des appareils domestiques nous permet d'avoir une idée des ordres de grandeur d'intensités :
 - prise de courant classique 16A
 - chauffage 10 kW 5A
 - prises pour plaques électriques 32A
- En électronique un amplificateur opérationnel a un courant d'entrée d'intensité inférieure à 10^{-12} A alors que celle de sortie peut avoir une intensité de 20 mA.
- En industrie les ordres de grandeurs sont plus élevés.
 - TGV 500 A en régime de croisière, 1 000 A en pointes
 - fours d'aciéries 10^5 A

III. La tension

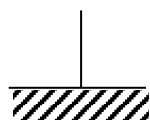
III.1. Définition

Le courant électrique décrit le mouvement des charges, mais n'explique pas pourquoi les charges se mettent à se déplacer. Cela n'est en fait pas si simple à expliquer !

On peut s'en faire une image par analogie avec l'écoulement d'un fleuve. Le sens spontané d'écoulement de l'eau se fait des zones de haute altitude (haute énergie potentielle de pesanteur) vers les zones de basse altitude. L'argument est semblable pour les charges électriques : il existe des zones de haute énergie potentielle électrique, et d'autres zones d'énergie potentielle électrique plus faible. L'énergie potentielle électrique dépend du type de charge : on admet (on le justifiera dans le cours de mécanique) qu'on peut définir un potentiel électrique V tel que qV_M soit l'énergie potentielle électrique d'une particule de charge q placée en un point (au nœud) M .

La tension ou différence de potentiels (ddp) est la grandeur mesurée entre deux points d'un circuit : $u(t)$. Elle s'exprime en Volt V. $u(t)$ est égale à la différence de potentiels qu'il existe entre ces deux points.

Puisqu'on ne sait mesurer que des différences de potentiels entre deux points et non le potentiel en un point donné, il est nécessaire de choisir une origine des potentiels dans le circuit. Cette origine avec un potentiel nul est appelée **masse**. Elle peut être reliée à la terre.



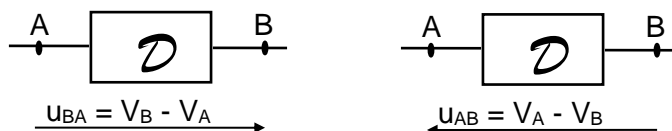
Symbole de la masse



Symbole de la terre

III.2. Dans la pratique

En ce qui concerne l'orientation de la tension, celle-ci est indépendante de celle du courant. On peut choisir comme ddp aux bornes du dipôle soit $V_A - V_B$ soit $V_B - V_A$, V_A et V_B étant les potentiels des points A et B.



La tension est une grandeur algébrique : elle peut être positive ou négative. Son signe permet de savoir lequel des deux points du circuit a le potentiel le plus élevé.

III.3. Quelques ordres de grandeur

Piles du commerce 1,5 V ; 4,5 V ; 9 V
 Batteries d'accumulateurs : 6 V ; 12 V ; 24 V
 Réseau de distribution E.D.F. : 127 V ; 230 V ; 380 V
 Tension d'alimentation du TGV : 25kV
 Ligne de transport à haute tension : 150 kV à 500 kV
 Alternateur de centrale électrique : 5 kV à 25 kV
 Foudre en ciel et terre pendant un orage : 100 000 kV à 500 000 kV

IV. Approximation des régimes quasi-stationnaires : ARQS

IV.1. Approximation

Soit un circuit simple, c'est à dire sans ramification ; M et N deux points quelconques de ce circuit simple.

Courant continu : L'intensité du courant est indépendante du temps, et a même valeur en tout point du circuit simple.

$$\forall t, i(t, M) = i(t_0, M) \text{ et } i(M) = i(N)$$

Courant variable : $i(t, M)$ dépend à priori de M: la variation de i dans le temps au point M ne peut se répercuter de façon instantanée en tout point du circuit (phénomène de propagation).

Ainsi, en régime variable, la valeur de l'intensité du courant électrique dépend en toute rigueur de l'instant considéré mais également du point considéré dans le circuit (même si ce dernier ne présente pas de dérivation). Pour deux points M et N situés sur la même branche d'un circuit, on a :

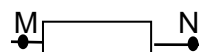
$$i(N, t) = i(M, t - NM/c)$$

L'intensité du courant électrique en N à l'instant t est égale à l'intensité du courant électrique qu'il y avait en M à l'instant $t - NM/c$ le temps de propagation est $\tau = NM/c$

Nous admettrons que pour des courants qui ne varient pas trop rapidement dans le temps les lois des courants continus restent valables à **chaque instant t**.

Dans le cadre de l'ARQS on utilisera les résultats suivants :

A un instant t donné l'intensité d'un courant est la même en tout point d'un circuit non bifurqué: $i(t, M) = i(t, N)$



IV.2. Domaine de validité

Considérons une vibration de période T , se propageant dans un milieu à la vitesse c . On lui associe une longueur d'onde : $\lambda = cT$ (cela correspond à la distance qu'il faut parcourir sur une photo prise à l'instant t pour que le signal se répète : période spatiale).

Les lois du régime continu demeurent valables si les variations du signal sont suffisamment lentes pour pouvoir négliger les délais de propagation (τ).

L'ARQS sera applicable si $\tau = L / c \ll T$ où L est la dimension du circuit, soit $L \ll \lambda$.

Exemples :

- Fréquences délivrées par les générateurs de signaux basses fréquences.

→ $\nu = 10$ MHz valeur limite haute

dans le vide $v = c = 3 \cdot 10^8$ m/s $\Rightarrow \lambda = v / \nu = 30$ m.

→ $\nu = 1$ kHz usuel

dans le vide $v = c = 3 \cdot 10^8$ m/s $\Rightarrow \lambda = v / \nu = 300$ km.

Dans la pratique pour les circuits électriques usuels l'ARQS est donc valable.

- Télécommunications spatiales : $\nu = 3$ GHz , dans le vide $v = 3 \cdot 10^8$ m/s $\Rightarrow \lambda = v/\nu = 0.1$ m.

Or le diamètre d'ouverture des antennes est de 1 m sur le satellite à 20 m sur terre.

L'ARQS n'est pas vérifiée, on ne peut pas négliger les phénomènes de propagation.

V. Les lois de l'électrocinétique

V.1. Les différents régimes de fonctionnement

- Régime **continu** : toutes les grandeurs électriques sont indépendantes du temps.
- Régime **variable** : c'est le cas contraire
- Régime **permanent** : les caractéristiques des grandeurs électriques ne varient pas au cours du temps (ex : régime continu, régime sinusoïdal forcé)
- Régime **transitoire** : régime durant lequel on passe d'un régime permanent à un autre

On va maintenant exprimer les deux lois fondamentales de l'électrocinétique en régime continu, et les généraliser au cas des régimes lentement variables. On les appelle parfois les **lois de Kirchhoff**.

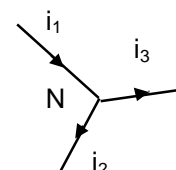
V.2. Loi des nœuds

• Démonstration

L'A.R.Q.S. dit que l'intensité est la même en tout point d'une branche d'un circuit. Il n'y a donc pas d'accumulation de charges en un point du circuit et en particulier à un nœud. Il y a autant de charges qui arrivent que de charges qui s'éloignent du nœud durant l'intervalle de temps dt .

→ Pendant l'intervalle de temps dt , il arrive une quantité de charge dq_A au nœud N :
 $dq_A = (i_1 + i_2)dt$

→ Pendant l'intervalle de temps dt , il repart une quantité de charge dq_R au nœud N :
 $dq_R = i_3 dt$



nœud N :

nœud N :

→ Or il n'y a pas d'accumulation de charges : $dq_A = dq_R \Rightarrow i_1 + i_2 = i_3$

• Énoncé

La somme algébrique des intensités des courants qui convergent vers un nœud est égale à zéro.
 $\sum i_K = 0$ avec $+i_K$ si vers le nœud, $-i_K$ si sens opposé au nœud.

V.3. Loi des mailles

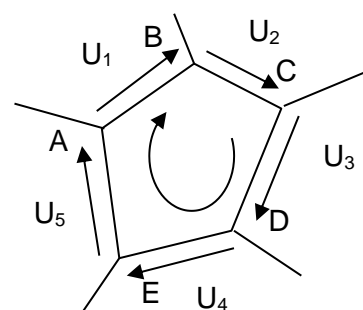
• Démonstration

On considère une maille et on choisit un sens positif représenté par la flèche centrale. Sachant que la différence de potentiels entre le point A et lui-même est nulle on a alors :

$$V_A - V_A = 0$$

$$\Rightarrow V_A - V_E + V_E - V_D + V_D - V_C + V_C - V_B + V_B - V_A = 0$$

$$\Rightarrow U_5 + U_4 + U_3 + U_2 + U_1 = 0$$



• Énoncé

La somme algébrique des tensions aux bornes des branches successives d'une maille parcourue dans un sens déterminé est nulle.

$$\sum u_K = 0.$$

VI. Puissance électrocinétique reçue par un dipôle

L'énergie est une grandeur que l'on retrouve dans tous les domaines de la physique et de la chimie. Le concept d'énergie constitue en quelque sorte « un pont » entre ces différents domaines, c'est ce qui le rend très utile.

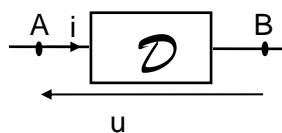
Quelques commentaires sur l'énergie :

- Différentes formes : électrique, nucléaire...
- L'énergie, considérée sous toutes ses formes, **se conserve**. Si une forme d'énergie diminue (électrique par exemple), cela implique qu'elle a été convertie sous une autre forme (thermique par exemple).
- On peut distinguer deux « types » d'énergie : l'énergie emmagasinée par le système étudié ; et l'énergie échangée par le système avec l'extérieur.

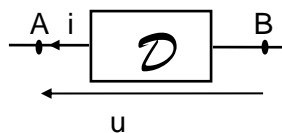
VI.1. Conventions d'orientation

Les choix d'orientation de l'intensité et de la tension sont indépendants. Il existe alors deux possibilités.

- **Convention récepteur** u et i sont orientés en sens contraire.



- **Convention générateur** u et i sont orientés dans le même sens.



Attention il s'agit simplement de conventions n'indiquant en aucune façon la nature du dipôle.

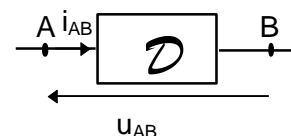
Rem si deux dipôles sont liés entre eux les conventions sont forcément récepteur pour l'un, générateur pour l'autre.

VI.2. Puissance électrocinétique reçue par un dipôle.

Le passage du courant dans un dipôle correspond à un échange d'énergie avec le reste du circuit.

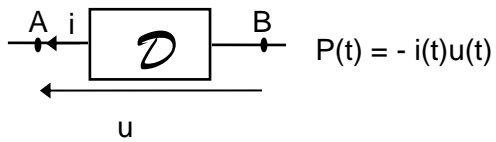
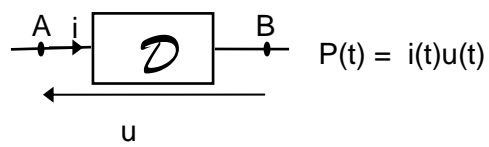
Energie reçue par le dipôle entre t et $t+dt$: $\delta W = i_{AB}(t)u_{AB}(t) dt$

Energie reçue : comptée positivement si l'échange a lieu dans le sens circuit \rightarrow dipôle, négativement si l'échange a lieu en sens inverse.



\Rightarrow Puissance électrocinétique reçue par un dipôle à l'instant t : $P = \frac{\delta W}{dt}$.

- Puissance électrocinétique instantanée reçue par le dipôle : $P(t) = i_{AB}(t)u_{AB}(t)$.

Convention générateurConvention récepteurVI.3. Nature des dipôles

- Si $\underline{P(t)} \geq \underline{0}$ le tronçon reçoit de l'énergie : il est globalement récepteur à l'instant \underline{t} .
- Si $\underline{P(t)} \leq \underline{0}$ le tronçon fournit de l'énergie au circuit : il est globalement générateur à l'instant \underline{t} .

I. Généralités	1
I.1. L'électrocinétique	1
I.2. Définitions	1
II. La charge et le courant	2
II.1. La charge	2
II.1.1. Notion de charge électrique	2
II.1.2. Propriétés	2
II.1.3 Quantification de la charge	2
II.2. Le courant	3
II.2.1. Définition	3
II.2.2. Dans la pratique	3
II.2.3. Quelques ordres de grandeur	4
III. La tension	4
III.1. Définition	4
III.2. Dans la pratique	4
III.3. Quelques ordres de grandeur	5
IV. Approximation des régimes quasi-stationnaires : ARQS	5
IV.1. Approximation	5
IV.2. Domaine de validité	5
V. Les lois de l'électrocinétique	6
V.1. Les différents régimes de fonctionnement	6
V.2. Loi des nœuds	6
V.3. Loi des mailles	6
VI. Puissance électrocinétique reçue par un dipôle	7
VI.1. Conventions d'orientation	7
VI.2. Puissance électrocinétique reçue par un dipôle	7
VI.3. Nature des dipôles	8