

# Fondements de l'électrocinétique en régime quasi-stationnaire

Toute l'étude de l'électronique que nous allons faire cette année se place dans le cadre de l'électrocinétique des régimes quasi-stationnaire. L'objectif de ce premier chapitre est donc de le définir précisément et de donner les lois générales qui gouvernent les circuits électriques dans ces hypothèses. Ce sera aussi l'occasion de présenter les principaux dipôles avec lesquels on sera amenés à travailler, et d'introduire la notion importante et générale d'équivalence entre circuits.

## I - Cadre de l'étude

### I.1 - L'électrocinétique

Espace 1

C'est donc un monde de la physique extrêmement vaste, qui recouvre des phénomènes aussi différents que la transmission de l'influx nerveux, la retouche d'une photo numérique ou l'alimentation d'un four industriel. On distingue traditionnellement les domaines suivants :

- ▷ l'**électrostatique** qui fait le lien entre le déplacement des particules chargées et les forces qu'elles subissent, c'est dans ce cadre qu'on explique la foudre ou le fait que les cheveux collent à un ballon de baudruche ;
- ▷ l'**électrotechnique** ou **génie électrique** qui s'intéresse au transport de l'énergie électrique ;
- ▷ l'**électronique** qui concerne le traitement de l'information encodée dans les signaux électriques.

***Remarque :** L'électronique et l'électrotechnique sont deux limites opposées : en électronique, les signaux portent peu d'énergie mais beaucoup d'information, alors qu'en électrotechnique les « signaux » contiennent beaucoup d'énergie mais aucune information.*

L'**électrocinétique** se situe au carrefour de ces domaines et vise à donner une description effective du mouvement des charges dans les circuits formés de conducteurs électriques. Par « description effective », on entend que les lois sont cohérentes avec une modélisation microscopique plus précise mais n'y font pas directement appel. Ces lois sont valables dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires, que nous allons définir au paragraphe suivant.

***Remarque :** Un autre exemple de description effective est le passage des lois de Descartes de la réfraction aux relations de conjugaison des lentilles minces.*

### I.2 - Approximation des régimes quasi-stationnaires

« L'électricité » ne se propage pas instantanément : elle le fait sous forme d'onde électromagnétique, à une vitesse égale à celle de la lumière  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Attention à ne pas confondre : ce n'est pas la vitesse à laquelle les particules chargées se déplacent, mais celle à laquelle elles se mettent en mouvement.

***Analogie :** On peut comprendre la différence par analogie avec le démarrage des véhicules à un feu qui vient de passer au vert : toutes les voitures de la file ne démarrent pas en même temps, il faut un certain temps pour que l'information « remonte la file » et que la dernière voiture démarre. Cette vitesse à laquelle l'information remonte est liée au temps de réaction des conducteurs et n'a rien à voir avec les 50 km/h auxquels se déplacent les voitures une fois qu'elles peuvent rouler librement. À titre indicatif, les électrons dans un fil se déplacent à une vitesse de l'ordre de  $10^5$  à  $10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , qui est donc 100 à 1000 fois plus faible que  $c$ .*

Si le circuit a une taille  $L$ , le temps que met l'information pour aller d'une extrémité à l'autre du circuit est de l'ordre de  $\Delta t = L/c$ . Pour savoir s'il est important de tenir compte de ce temps de propagation, il faut le comparer au temps caractéristique de variation des signaux, qui peut être par exemple leur période  $T$ .

Espace 2

**Analogie :** Les porteurs de charges ne sont plus des voitures mais des wagons attachés derrière une locomotive. Lorsque la signalisation ferroviaire passe au vert, le train se met en mouvement d'un bloc.

Conclusion : l'ARQS est valable si

$$\Delta t \ll T.$$

En reprenant l'expression de  $\Delta t$ , on peut aussi donner ce critère en fonction de la taille du circuit,

$$\frac{L}{c} \ll T \quad \text{soit} \quad L \ll cT \quad \text{donc} \quad L \ll \lambda.$$

Le circuit doit être beaucoup plus petit que la longueur d'onde de l'onde électromagnétique assurant le transport de l'information dans le circuit.

### Exercice C1 : Validité de l'ARQS

- 1 - Rappeler la fréquence de la tension délivrée par EDF. Une ligne électrique de longueur  $L = 300$  km peut-elle être étudiée dans l'ARQS ?
- 2 - Même question pour une puce électronique de côté  $a = 1$  cm, sachant que les signaux n'y dépassent pas une fréquence  $f \sim 10$  MHz.

Espace 3

## II - Intensité et tension

### II.1 - Vocabulaire de description d'un circuit

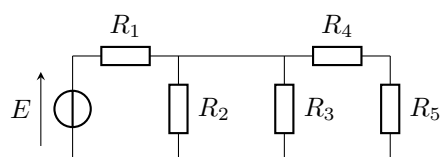
On appelle **dipôle** un composant électrique connecté au reste du circuit par deux bornes.

**Exemple :**

Espace 4

**Remarque :** Tous les composants ne sont pas des dipôles, certains possèdent plus que deux bornes.

- Exemple de circuit :



**Remarque :** Le schéma est fait avec un générateur et des résistances, mais les définitions qui suivent valent évidemment pour n'importe quels dipôles !

- **Branche :**

On appelle **branche** un ensemble de dipôles montés bout à bout sans que rien de supplémentaire ne soit branché entre eux.

*Exemple :* colorées sur le schéma.

Deux dipôles appartenant à une même branche sont dits **montés en série**.

*Exemple :*

Espace 5

- **Maille :**

On appelle **maille** un ensemble de branches formant une boucle fermée.

*Exemple :*

Espace 6

- **Nœud :**

On appelle **nœud** un point de jonction entre plusieurs dipôles.

On distingue parfois les nœuds principaux, qui constituent la jonction entre trois dipôles au moins, donc entre plusieurs branches. Ce sont en pratique les seuls qui ont un intérêt.

*Exemple :* voir schéma.

Nous expliquerons par la suite que du point de vue des tensions, tous les points reliés entre eux par un fil peuvent être considérés comme un seul et même nœud.

Deux dipôles dont les bornes sont connectées aux deux mêmes nœuds sont dits **montés en parallèle** ou **en dérivation**.

*Exemple :*

Espace 7

## II.2 - Intensité du courant électrique

### a) Charge et courant

La charge électrique est une propriété fondamentale des particules qui constituent la matière.

- ▷ La charge est une propriété qu'on qualifie d'*intrinsèque*, au même titre que la masse : deux particules de même nature (p.ex. deux électrons) ont toujours la même masse et la même charge, mais pas forcément la même vitesse, qui n'est pas une propriété intrinsèque.
- ▷ Il existe deux types de charges différentes, qu'on appelle par convention **positive** et **négative**.
- ▷ Elle s'exprime en **Coulomb**.
- ▷ Il existe une **charge élémentaire**,

$$e = 1,602\,176\,62 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

C'est la charge portée par un proton, et l'opposée de la charge portée par un électron. Toutes les charges que l'on peut rencontrer dans la nature sont des multiples de la charge élémentaire : on dit que la charge est **quantifiée**.

- ▷ Postulat fondamental : **principe de conservation de la charge**

La charge électrique ne peut pas être créée ni détruite, mais seulement transportée d'un point à un autre.

Dans l'ARQS, elle ne peut pas non plus s'accumuler en un point du circuit.

Espace 8

**Exemples de porteurs de charge :**

Espace 9

**Remarque :** Qu'il y ait ou non présence de courant, les porteurs de charge sont toujours animés d'un mouvement désordonné appelé agitation thermique. Le fait que le déplacement soit ordonné est donc important pour la définition.

Le courant électrique est un déplacement : il a donc un sens.

Par convention, le sens du courant est celui du déplacement des porteurs de charges positives.

Conséquence importante :

Espace 10

**b) Définition microscopique de l'intensité**

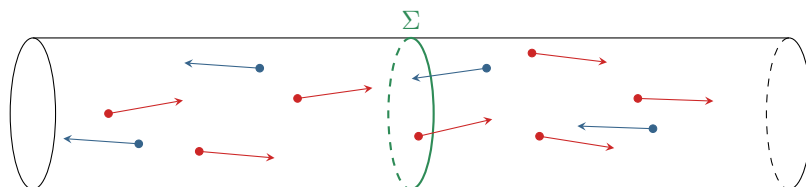
L'intensité est la grandeur physique qui quantifie le courant électrique circulant dans un conducteur, ou en d'autres termes le débit de charge électrique dans le conducteur. Elle compte la charge nette  $\delta q$  qui traverse une section  $\Sigma$  du fil pendant une durée  $\delta t$  :

▷ intensité moyenne pendant  $\delta t$  :  $i = \frac{\delta q}{\delta t}$  ;

▷ intensité instantanée :  $i(t) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta q}{\delta t}$ .

Comme l'intensité compte une charge qui traverse, il est nécessaire de préciser dans quel sens se fait la traversée.

**Exemple :** Sur le schéma ci-dessous, les électrons se propagent dans un sens ou l'autre comptent différemment dans l'intensité. Le passage au travers de  $\Sigma$  d'un électron allant vers la droite est compensé par celui d'un électron allant vers la gauche.



Espace 11

Si  $i > 0$  alors  $\delta q > 0$  donc il y a eu un déplacement global de charges positives dans le sens dans lequel le fil est orienté. On en déduit

- ▷ si  $i > 0$  alors le sens réel du courant est le sens d'orientation du fil ;
- ▷ si  $i < 0$  alors le sens réel du courant est le sens opposé à celui d'orientation du fil.

### c) Mesure et ordres de grandeur

L'intensité électrique s'exprime en ampères, de symbole A.

$$1 \text{ A} = 1 \text{ C} \cdot \text{s}^{-1}.$$

On la note traditionnellement  $I$  pour un courant constant et  $i$  pour un courant qui varie au cours du temps.

**Remarque historique :** L'ampère est une unité de base du système international, ainsi nommée en hommage à André-Marie Ampère, physicien lyonnais ayant vécu entre 1775 et 1836. Autodidacte, il est très reconnu pour ses travaux sur l'électricité et le magnétisme. C'est par exemple lui qui a proposé les noms « courant » et « tension ».

Une intensité se mesure à l'aide d'un **ampèremètre**, qui se place directement dans la branche où on souhaite mesurer l'intensité : on dit souvent que « un ampèremètre se monte en série ». Le sens du courant affiché par l'ampèremètre est relié au sens de branchement.

Espace 12

#### Ordres de grandeur :

- ▷ circuits électroniques : 10 à 100 mA ;
- ▷ ampoule électrique : 1 A ;
- ▷ moteur de TGV : 1 kA ;
- ▷ éclairs d'orages :  $10^5$  A ;
- ▷ seuil de perception par le corps : 1 mA ;
- ▷ seuil léthal : 40 mA pendant 3 s, 300 mA pendant 0,1 s.

### d) Loi des nœuds et conservation de la charge

**Remarque :** Les démonstrations qui suivent sont qualitatives. Elles ne sont pas à retenir, et seront refaites plus rigoureusement en PT. L'idée importante à retenir est que la loi des nœuds est une conséquence du principe de conservation de la charge.

#### • Au sein d'une branche :

Considérons un fil au sein d'une branche. On y définit une surface de contrôle délimitée par la surface extérieure du fil et deux sections droites orientées, notées  $\Sigma_1$  et  $\Sigma_2$ , voir figure 1. Comme la charge ne peut pas être créée ou disparaître ni s'accumuler (car ARQS), on en déduit que la charge sortant par  $\Sigma_2$  pendant un petit intervalle de temps  $\delta t$  est exactement compensée par celle entrant par  $\Sigma_1$ . En faisant tendre  $\delta t \rightarrow 0$  pour faire apparaître l'intensité, on en déduit que  $i_1 = i_2$ .

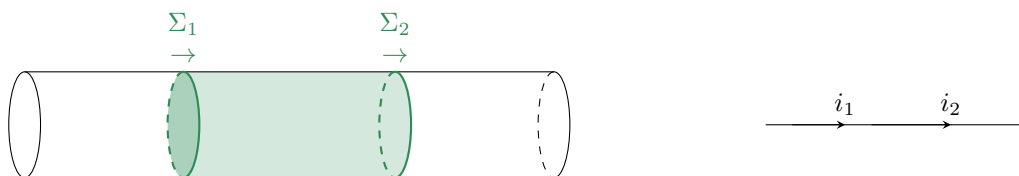


Figure 1 – Surface de contrôle au sein d'un fil.

Ce résultat se généralise :

Espace 13

- **Au niveau d'un nœud :**

Considérons maintenant un nœud, autour duquel on définit une surface de contrôle délimitée par la surface extérieure des fils et trois sections droites orientées, notées  $\Sigma_1$  à  $\Sigma_3$ , voir figure 2. On déduit de la loi de conservation de la charge que la charge sortant par  $\Sigma_3$  pendant un petit intervalle de temps  $\delta t$  est exactement compensée par celle entrant par  $\Sigma_1$  et  $\Sigma_2$ . En faisant tendre  $\delta t \rightarrow 0$  pour faire apparaître l'intensité, on en déduit que  $i_1 + i_2 = i_3$ , ce qui peut aussi s'écrire sous la forme  $i_1 + i_2 - i_3 = 0$  : le signe de  $i_n$  est attribué en fonction de l'orientation donnée à la surface  $\Sigma_n$ .

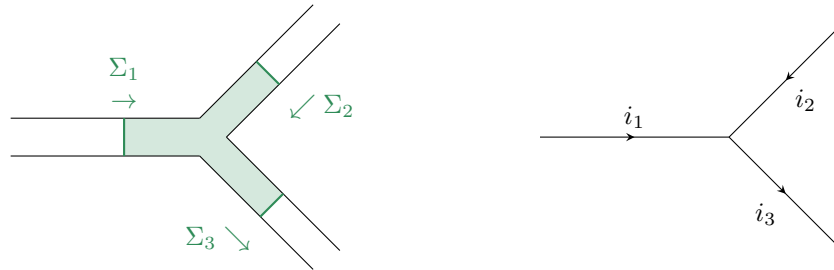


Figure 2 – Surface de contrôle autour d'un nœud.

Là encore, le résultat se généralise :

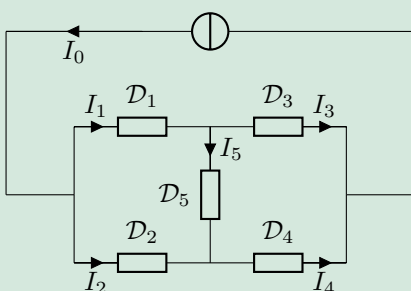
**Loi des nœuds ou première loi de Kirchoff :**

Espace 14

La loi des nœuds est l'une des lois fondamentales de l'électrocinétique.

**Remarque historique :** Gustav Kirchoff est l'un des plus grands scientifiques du XIX<sup>e</sup> siècle. Outre ses lois de l'électrocinétique, formulées en 1845, il a également beaucoup travaillé sur les rayonnements et il est le fondateur de la spectroscopie. Il est le premier à avoir remarqué que le spectre d'émission d'un corps était caractéristique de sa composition.

**Exercice C2 : Application de la loi des nœuds**



Dans le circuit ci-contre, des ampèremètres non représentés mesurent  $I_0 = 4 \text{ A}$ ,  $I_1 = 1 \text{ A}$  et  $I_4 = 2 \text{ A}$ . Les dipôles  $\mathcal{D}$  sont inconnus.

- 1 - Déterminer les intensités  $I_2$ ,  $I_3$  et  $I_5$ .
- 2 - Calculer le nombre d'électrons qui traversent  $\mathcal{D}_4$  en une minute.

Espace 15

## II.3 - Potentiel et tension

### a) 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)  $M$ .

Espace 16

⚡ ⚡ ⚡ **Attention !** Contrairement à un vecteur, la flèche de tension pointe vers le *premier* point nommé.

Espace 17

Comme l'intensité, on note traditionnellement une tension par une majuscule lorsqu'elle est constante et par une minuscule lorsqu'elle dépend du temps.

### b) Mesure et ordres de grandeur de tensions

La tension électrique s'exprime en volts, de symbole  $V$ .

**Remarque historique :** Le volt est nommé en hommage à Alessandro Volta, contemporain d'Ampère ayant vécu entre 1745 et 1827. Il est l'inventeur de la pile, par empilement de plaques de cuivre et de zinc séparées de chiffons imbibés de saumure.

Une tension se mesure à l'aide d'un **voltmètre**, qui se branche entre les points  $A$  et  $B$  où on veut mesurer la tension, donc en parallèle du ou des dipôles qui s'y trouvent déjà. Pour mesurer la tension  $U_{AB}$  il faut placer la borne  $V$  au point  $A$  et la borne  $COM$  au point  $B$ .

Espace 18

#### Ordres de grandeur :

- |   |   |
|---|---|
| ▷ secteur : 230 V efficace, soit 325 V en amplitude ; | ▷ signaux nerveux : 75 mV ;                 |
| ▷ piles : quelques volts ;                            | ▷ alimentation TGV : 25 kV efficace ;       |
| ▷ circuits électroniques : centaines de millivolts ;  | ▷ ligne haute tension : 150 à 1200 kV ;     |
| ▷ bruit de fond électrique : 5 mV ;                   | ▷ juste avant un éclair d'orage : $10^8$ V. |

### c) Référence de potentiel

Il est impossible de mesurer directement le potentiel électrique, seules les tensions sont accessibles.

C'est une conséquence de la définition en termes d'énergie potentielle, on y reviendra en mécanique.

**Conséquence :** si on redéfinit le potentiel  $V' = V + V_0$  en y ajoutant une constante  $V_0$  alors toutes les tensions gardent la même valeur. En effet,

$$U_{AB} = V_A - V_B = (V'_A - V_0) - (V'_B - V_0) = V'_A - V'_B.$$

↪ on peut donc choisir librement la valeur du potentiel en un point d'un circuit.



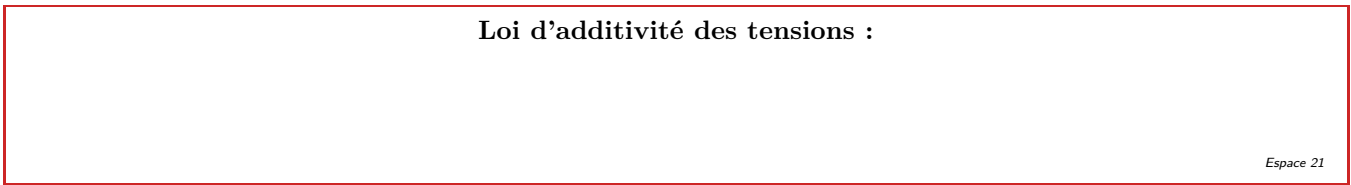
Espace 19

Notation symbolique :

Espace 20

**Remarque :** Les appareils directement branchés sur le réseau EDF sont généralement reliés à la Terre. Toutes les prises de terre sont alors au même potentiel. Il est donc très souvent pratique de faire coïncider la masse et la terre, à tel point qu'on confond parfois les deux. L'existence d'un même potentiel de terre sur les appareils branchés peut aussi être source de difficultés appelées conflits de masse. Nous en parlerons en TP.

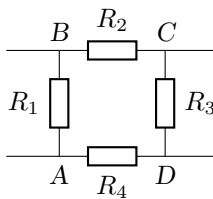
d) Additivité des tensions et loi des mailles



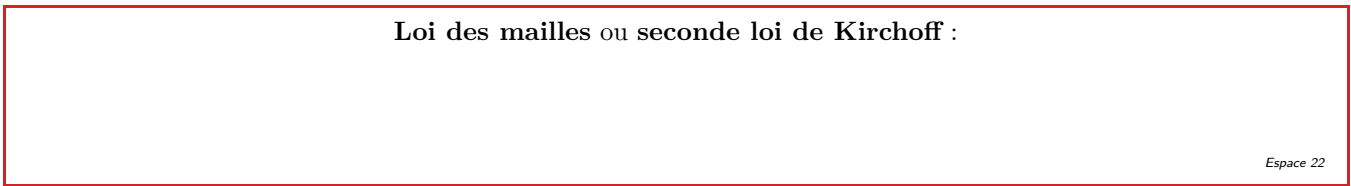
Loi d'additivité des tensions :

Espace 21

Démonstration sur un exemple :



La loi d'additivité s'utilise de façon analogue à la relation de Chasles.



Loi des mailles ou seconde loi de Kirchoff :

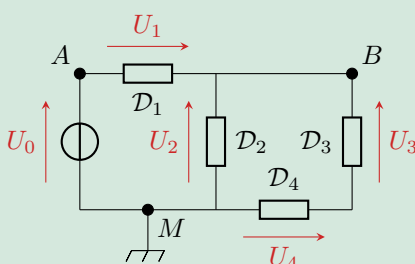
Espace 22

La démonstration est analogue à la précédente : il suffit d'écrire chaque tension comme une différence de potentiel.

Retour sur l'exemple :

Espace 23

Exercice C3 : Application de la loi des mailles



Dans le circuit ci-contre, des voltmètres non représentés mesurent  $U_0 = 5\text{V}$ ,  $U_2 = 1\text{V}$  et  $U_3 = 3\text{V}$ . Les dipôles  $\mathcal{D}$  sont inconnus.

- 1 - Déterminer les tensions  $U_1$  et  $U_4$ .
- 2 - Déterminer le potentiel des nœuds A et B.



