

---

# ÉLECTROCINÉTIQUE

## PARTIE 1

---

CHARLES TUCHENDLER



MPSI 4 – LYCÉE SAINT-LOUIS

ANNÉE 2019/2020



# Table des matières

CHAPITRE II	BASES DE L'ÉLECTRODINAMIQUE	1
<b>Introduction</b>		<b>2</b>
<b>I Courant électrique</b>		<b>2</b>
I.1 Charge électrique		2
I.2 Structure d'un circuit électrique		3
I.3 Nature du courant électrique		4
I.4 Origines physiques du courant électrique		5
I.4.a Courant d'origine électrostatique		5
I.4.b Courant d'origine chimique		6
I.4.c Courant d'origine magnétique		7
I.5 Intensité du courant électrique		8
I.6 Approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS) ou quasi-permanents (ARQP)		8
I.7 Loi des noeuds		10
<b>II Tension électrique</b>		<b>11</b>
II.1 Potentiel et tension électriques		11
II.2 Loi des mailles		12

## CHAPITRE II

## BASES DE L'ÉLECTRODYNAMIQUE

## Sommaire

<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>I Courant électrique</b>	<b>2</b>
I.1 Charge électrique	2
I.2 Structure d'un circuit électrique	3
I.3 Nature du courant électrique	4
I.4 Origines physiques du courant électrique	5
I.4.a Courant d'origine électrostatique	5
I.4.b Courant d'origine chimique	6
I.4.c Courant d'origine magnétique	7
I.5 Intensité du courant électrique	8
I.6 Approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS) ou quasi-permanents (ARQP)	8
I.7 Loi des noeuds	10
<b>II Tension électrique</b>	<b>11</b>
II.1 Potentiel et tension électriques	11
II.2 Loi des mailles	12

## Introduction

Le but de ce chapitre est de poser les bases théoriques permettant de comprendre le fonctionnement des circuits électriques, structures plus ou moins complexes dans lesquelles circule un courant électrique.

Avant de nous intéresser aux composants électriques que l'on retrouve dans ces circuits, il est important de s'interroger sur la nature et l'origine du courant électrique, et de préciser le cadre de l'étude des circuits électriques, appelée **électrocinétique**.

## I Courant électrique

### I.1 Charge électrique

#### Définition II.1 – Charge électrique

La charge électrique est une caractéristique **intrinsèque** de la matière qui traduit l'existence de forces d'attraction et de répulsion entre deux corps dits *chargés*.

Deux types de corps chargés électriquement : ceux pour lesquels la charge électrique portée est positive et ceux pour lesquels la charge portée est négative.

Remarque : un corps non chargé (ou possédant autant de charges positives que de charges négatives) est dit *neutre*.

#### Définition II.2 – Porteurs de charge

Les entités chargées élémentaires sont appelés **porteurs de charges**. On s'intéressera principalement à deux types de porteurs de charge :

- ★ **les électrons** : l'électron est la charge élémentaire mise en évidence expérimentalement par J.J. Thomson vers 1900. Sa charge est négative et vaut  $-e$ , où  $e \simeq 1,602 \cdot 10^{-19}$  C.
- ★ **les ions** : atome ou molécule chargés que l'on distingue selon deux catégories :
  - les *anions* qui présentent un *excès d'électrons* par rapport à l'atome neutre.
  - les *cations* qui présentent un *défaut d'électrons* par rapport à l'atome neutre.

*Exemples d'ions* :  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ .

#### Définition II.3 – Conducteur

On dira qu'un milieu est **conducteur** s'il permet la libre circulation de porteurs de charges. Il sera dit **isolant** dans le cas contraire.

Remarque : il ne peut y avoir ni création, ni disparition de charges. Seule la répartition spatiale de celles-ci peut varier. C'est le **principe de conservation de la charge**<sup>a</sup>.

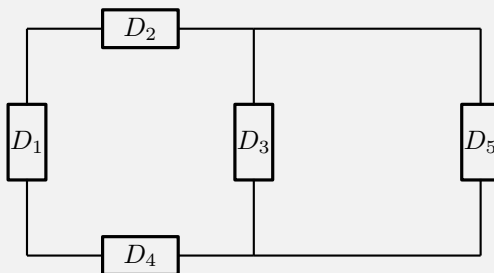
<sup>a</sup>. Un principe ne se démontre pas, il se vérifie par l'expérience au contraire d'un théorème.

## I.2 Structure d'un circuit électrique

### Définition II.4 – Autour de la notion de circuit électrique

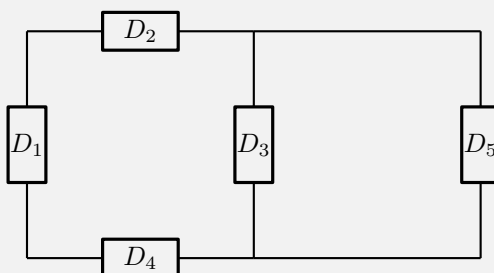
- ★ **Circuit électrique** : ensemble de composants électriques reliés par des conducteurs.
- ★ **Composant électrique** : il s'agit soit d'un dipôle possédant deux bornes de connexion, soit d'un multipôle possédant plus de deux bornes.
- ★ **Noeud** : point d'un circuit où se rejoignent directement les bornes d'au moins 3 composants différents.

#### Exercice II.1 – Nombre de noeuds dans un circuit



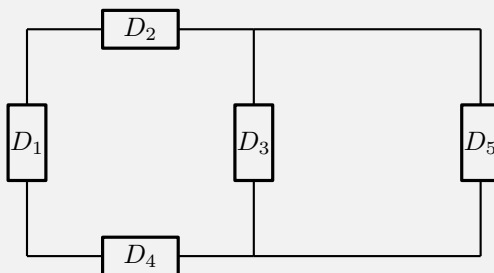
- ★ **Branch** : zone non ramifiée de circuit pouvant comprendre plusieurs dipôles et comprise entre deux noeuds successifs.

#### Exercice II.2 – Nombre de branches dans un circuit



- ★ **Maille** : boucle fermée de circuit obtenue à partir d'un ensemble de branches successives.

#### Exercice II.3 – Nombre de mailles dans un circuit



### I.3 Nature du courant électrique

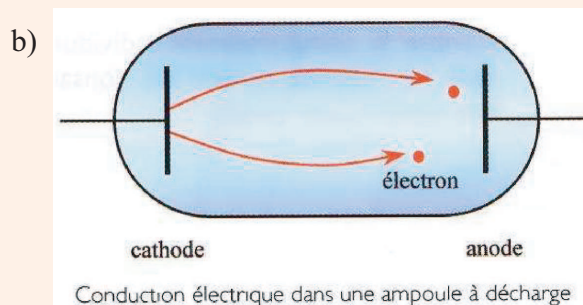
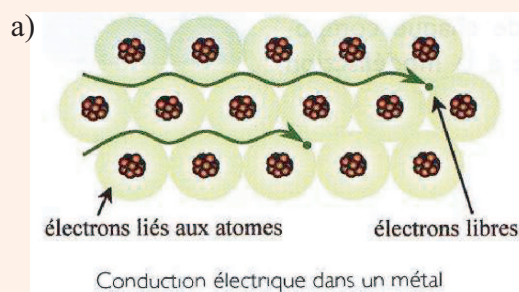
#### Définition II.5 – Courant électrique

Le courant électrique est un **déplacement d'ensemble, ordonné, de porteurs de charge sous l'effet d'un champ électrique extérieur**.

Remarque : il n'est pas nécessaire à ce stade de savoir précisément ce qu'est un champ électrique. Les notions du lycée sont suffisantes pour comprendre qu'il peut être la cause d'un mouvement de charge.

#### Propriété II.1 – Déplacement des porteurs de charges

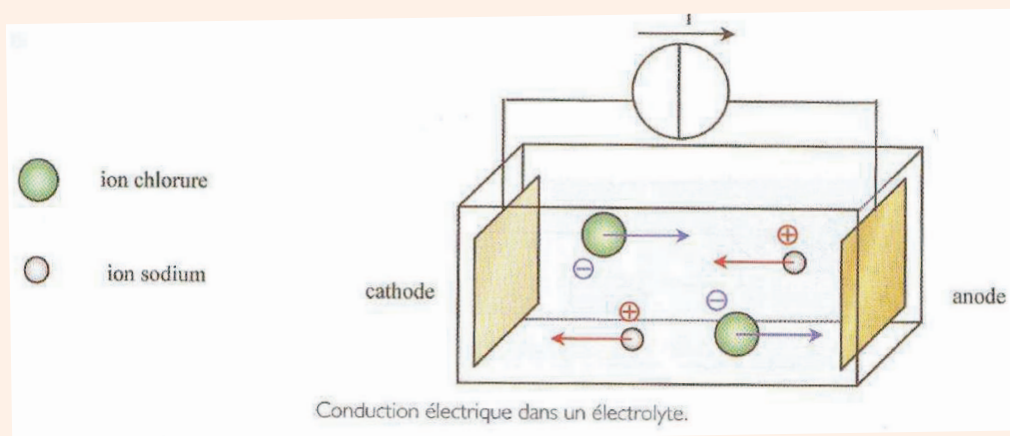
- ★ **Déplacement ordonné d'électrons** : c'est le cas dans les conducteurs métalliques, où les électrons sont susceptibles de se déplacer "librement" ( $e^-$  libres) sous l'effet d'un champ électrique extérieur <sup>a</sup> (a), mais aussi dans le vide sous la forme de décharges électriques (arcs) en présence d'un champ électrique dans un tube cathodique (b).



Dans les métaux, les électrons ont une vitesse de dérive de l'ordre de  $0,1 \text{ mm.s}^{-1}$ . Néanmoins, ce déplacement très lent des électrons permet une propagation de proche en proche du signal électrique (comme dans le cas de la corde vibrante, ou d'un tsunami) à très grande vitesse. Ce signal, tout comme le champ électrique extérieur, est de nature électromagnétique et se propage dans les métaux à une vitesse proche de celle de la lumière dans le vide :

$$c \simeq 3,00.10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

- ★ **Déplacement ordonné d'ions** : c'est le cas dans une solution conductrice appelée *électrolyte*. Là encore, le déplacement des ions est lent mais permet une propagation du signal électrique à une vitesse proche de  $c$ .

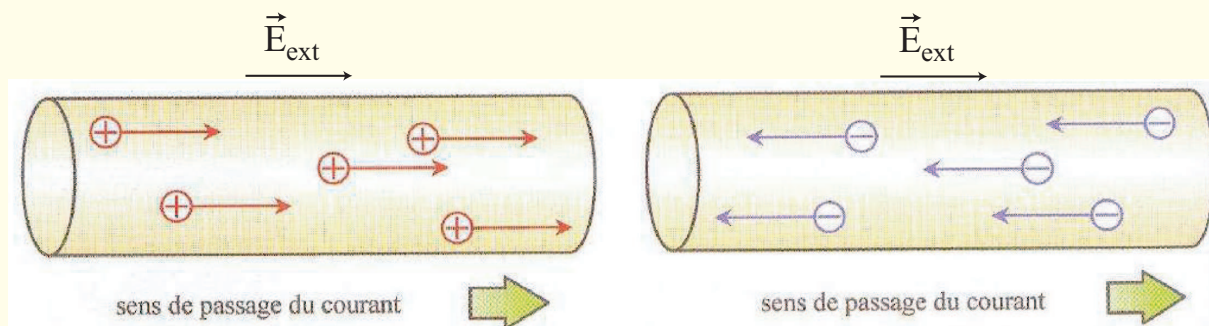


- ★ Autre processus : déplacement ordonné de paires "électron-trou" dans les semi-conducteur.

<sup>a</sup>. Il est important de noter que la présence de ce champ est nécessaire à l'établissement d'un courant et d'un mouvement d'ensemble des porteurs.

**Définition II.6 – Convention d'orientation du courant électrique**

On pose de façon arbitraire que le sens du courant électrique correspond au **sens de déplacement des charges positives**. Si le courant est assuré par des porteurs négativement chargés, le sens conventionnel du courant est opposé à celui du déplacement des porteurs de charge.



Remarque : cette convention correspond à l'orientation du sens du courant selon le champ électrique extérieur  $\vec{E}_{ext}$  lui donnant naissance. En effet, la force  $\vec{f}$  qu'exerce le champ sur une charge  $q$  vaut :  $\vec{f} = q\vec{E}_{ext}$  et aura tendance à déplacer les charges positives ( $q > 0$ ) dans le sens de  $\vec{E}_{ext}$  et les charges négatives ( $q < 0$ ) dans le sens opposé.

**I.4 Origines physiques du courant électrique****I.4.a Courant d'origine électrostatique**

C'est Thalès de Milet (-625,-547), qui montra le premier que la **friction** de deux corps l'un sur l'autre peut entraîner l'arrachement d'électrons d'un corps pour les céder à l'autre.

**Expérience II.1 – Friction d'un bâton d'ébonite ou d'ambre**

- ★ On frotte une peau de chat sur un bâton d'ébonite : la première voit certains des électrons des atomes qui la composent être arrachés et venir se fixer sur le bâton d'ébonite qui se retrouve donc chargé négativement <sup>a</sup>.
- ★ On peut reproduire facilement chez soi cette expérience en frottant une règle en plastique au niveau de sa nuque sur nos cheveux.

<sup>a</sup>. A l'origine, cette expérience était réalisée avec de l'ambre jaune, dont le terme grec ancien *elektron* est à l'origine du mot électron et de tous ses dérivés.

**Interprétation II.1 – Champ électrostatique**

Ceci produit une **séparation de charges** : un corps est chargé positivement et l'autre est négativement.

Nous verrons dans le cours d'électromagnétisme que ceci entraîne l'établissement d'un **champ électrostatique**, c'est-à-dire constant au cours du temps tant que les deux corps ne sont pas mis en contact par un conducteur.

**Propriété II.2 – Mise en contact de deux corps chargés**

Dès qu'un matériau conducteur les met en contact, les charges se déplacent sous l'effet du champ électrostatique jusqu'à rétablissement de la neutralité des deux corps. Il y a donc apparition d'un courant électrique.



### Expérience II.2 – Mise en évidence du champ électrostatique

Dans chacune des deux expériences précédentes, on peut mettre en évidence l'existence du champ électrostatique :

- ★ l'eau est un solvant polaire, c'est-à-dire que les molécules d'eau présentent un moment dipolaire (cf cours de chimie).
- ★ En présence d'un champ électrostatique, toutes les molécules d'eau s'orientent dans l'espace de façon à ce que tous leurs moments dipolaires soient alignés avec le champ électrostatique (cf cours de spé).
- ★ Une fois alignés, ces moments dipolaires sont attirés par les zones de champ fort c'est-à-dire qu'un filet d'eau sera dévié dans la direction du bâton d'ébonite ou de la règle plastique.

#### Remarques :

- ★ Cette technique a été utilisée dès le XVII<sup>ème</sup> siècle pour fabriquer la première machine électrostatique servant de générateur électrique (cf. Fig. II.1).
- ★ C'est aussi l'une des origines de la foudre : la friction des particules de glace au sein d'un nuage peut entraîner une séparation de charges et l'apparition d'un champ électrostatique important. Au delà d'une certaine valeur de ce champ, l'air devient subitement conducteur, on parle de *claquage*, et le retour à la neutralité a lieu en produisant un éclair.

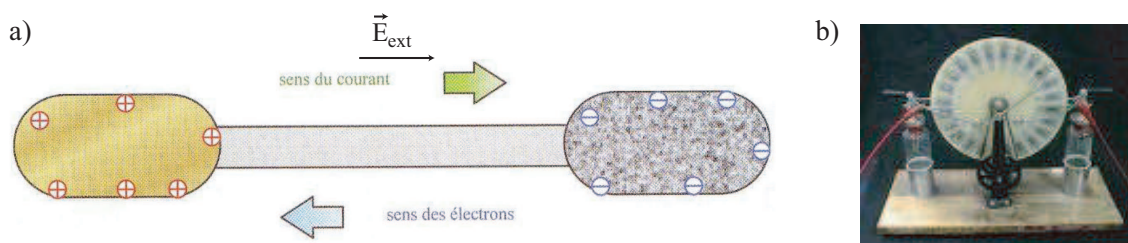


FIGURE II.1 – a) Courant électrique généré par le contact de deux corps chargé par friction. b) Machine électrostatique de Wimshurst (XIX<sup>ème</sup> siècle).

### Propriété II.3 – Courant dans un circuit ouvert

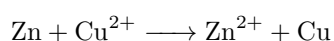
Un circuit ouvert peut être parcouru par un courant, mais le rétablissement de la neutralité est très bref (décharge d'un condensateur dans une résistance).

Remarque : on se reportera à l'expérience de Wimhurst et au chapitre sur les régimes transitoires.

#### I.4.b Courant d'origine chimique

Le 17 mars 1800, Alessandro Volta met au point la première pile électrique dont le fonctionnement ne se base pas sur la séparation des charges mais sur l'existence d'une **réaction chimique spontanée nécessitant un transfert de charge entre deux espèces chimiques**.

Son expérience consiste à empiler des couples de disques de zinc-cuivre en contact direct, chaque couple étant séparé du suivant par un morceau de tissu imbibé de saumure ( $\text{H}_2\text{O}, \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ ). Volta souligne le fait que, lorsqu'on les sépare, la lame de cuivre prend une charge négative, et celle de zinc une charge positive. L'équation de la réaction chimique s'écrit :



Dans cette réaction d'oxydoréduction, une espèce cède des électrons alors que l'autre les reçoit et il s'établit un courant électrique.

*Exemples* : pile Daniell, piles AAA, piles à combustibles...

**Expérience II.3 – La pile Daniell**

- ★ On réalise une pile zinc-cuivre comme représentée sur la figure II.2.
- ★ Lorsque les deux plaques sont mises en contact, on constate l'apparition d'un courant électrique que l'on peut lire sur un ampèremètre.
- ★ Lorsque le multimètre fonctionne en voltmètre, on constate l'existence d'une différence de potentiel entre les deux plaques. Nous reviendrons sur cette notion dans ce chapitre et tout au long de l'année.

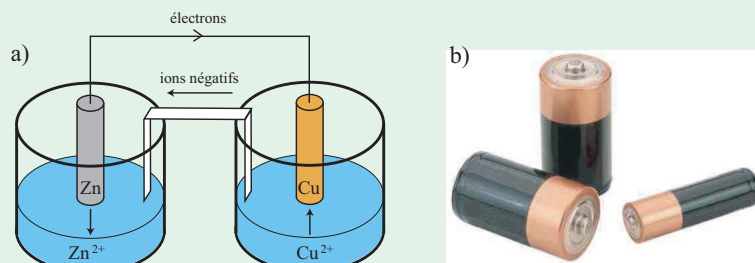


FIGURE II.2 – a) Pile Daniell. b) Piles classiques.

Le fonctionnement des piles sera vu en détail dans le cours de chimie.

**I.4.c Courant d'origine magnétique**

Des électrons peuvent être mis en mouvement par la présence d'un champ électrique variable, donnant naissance à un courant appelé *courant induit*. Les phénomènes d'induction seront vu en détail en fin d'année.

*Exemples* : chargement par induction, dynamo de vélo, turbines de centrale hydraulique...

**Expérience II.4 – Phénomène d'induction**

## I.5 Intensité du courant électrique

Remarques :

- ★ Une grandeur est algébrique lorsque son signe dépend d'une convention arbitraire : orientation de l'espace (mécanique, optique, électrocinétique), grandeur algébriquement reçue ou fournie par un système (énergie, puissance)
- ★ La circulation d'un courant électrique nécessite le recours à une telle convention car il y a une rupture de symétrie dans le circuit : le courant va dans un sens et pas dans l'autre à chaque instant et dans chaque conducteur.
- ★ On commencera toujours par orienter de façon arbitraire chaque portion de conducteur à l'aide d'une flèche pour quantifier algébriquement le courant électrique qui y circule.

### Définition II.7 – Intensité électrique

L'intensité électrique  $i$  est la mesure de la charge électrique algébrique nette qui traverse une section  $S$  de conducteur (on prendra l'exemple d'un métal) par unité de temps.

Elle s'exprime en ampère (A) et s'écrit :

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

Remarque :

- ★ L'intensité est une grandeur algébrique représentée par une flèche portée par le conducteur. Lorsque les charges positives se déplacent dans le sens de la flèche,  $i > 0$ .  $i < 0$  si la flèche est orientée dans le sens de circulation des électrons.
- ★ On la mesure à l'aide d'un ampèremètre.
- ★ **Ordres de grandeur :**

	Electronique	Domestique	TGV	Lignes H.T.	Foudre	Fours d'acierie
$i$	$10^{-9} - 10^{-3}$ A	fusibles 16 - 32 A	500 - 1000 A	1000 A	$10^4$ A	$10^5$ A

## I.6 Approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS) ou quasi-permanents (ARQP)

Le courant n'a pas nécessairement la même valeur en tout point d'un conducteur puisqu'il existe un temps de propagation du signal électrique entre deux points d'un conducteur. Cependant, lorsque la dimension du circuit conducteur est suffisamment petite, on peut considérer le courant comme *quasi-stationnaire* ou *quasi-permanent*, c'est-à-dire comme étant identique en tout point d'une branche à tout instant.

### Définition II.8 – Approximation des régimes quasi-stationnaires (A.R.Q.S.)

L'A.R.Q.S. consiste à pouvoir négliger le retard temporel de propagation des signaux électriques sur un circuit électrique devant le temps caractéristique du régime variable appliqué.

Remarque : soit  $L$  la longueur caractéristique du circuit et  $c$  la célérité des signaux dans le circuit, l'ARQS est vérifiée :

- en régime sinusoïdal forcé si  $L/c \ll T$  avec  $T$  la période du signal périodique émis,
- en régime transitoire si  $L/c \ll \tau$  avec  $\tau$  la constante de temps du circuit.

**Exercice II.4 – Taille limite du conducteur**

Étudions le cas d'une *impulsion électrique* de largeur  $T$  et considérons un élément de conducteur compris entre deux points  $A$  et  $B$ .

La propagation du signal électrique entre  $A$  et  $B$  correspond à un retard temporel  $\tau = \frac{AB}{c}$  où  $c$  est la vitesse de propagation du signal dans le conducteur.

Cherchons l'ordre de grandeur du circuit pour lequel le temps de propagation des signaux électriques peut être négligé, c'est-à-dire la taille limite pour laquelle, quels que soient  $A$  et  $B$ ,  $i_A(t) = i_B(t)$ .

Par définition on a :

$$i_B(t) = i_A\left(t - \frac{AB}{c}\right)$$

On pourra considérer que  $i_B(t) = i_A(t)$  si  $\frac{AB}{c} = \tau \ll T$ .

Ordre de grandeur :

Cas du réseau EDF :

**Propriété II.4 – Loi des branches**

La principale conséquence de l'ARQS est donc que l'intensité du courant électrique peut être considérée identique en tout point d'une branche.

Remarque : dans le cadre de cette approximation, il ne peut pas y avoir d'accumulation de charges et le courant dans le conducteur peut être considéré comme un fluide incompressible (eau...). Nous allons utiliser cette analogie pour introduire la loi des nœuds.

## I.7 Loi des noeuds

Dans le cadre de l'ARQS, il est facile de déduire de l'analogie avec un fluide incompressible (cf figure II.3) les propriétés suivantes :

### Théorème II.1 – Loi des noeuds - Première loi de Kirchhoff

★ **Loi des noeuds** : la somme algébrique des intensités parvenant à un noeud est nulle :

$$\sum_k \epsilon_k i_k = 0 \quad \text{avec} \quad \epsilon_k = \begin{cases} -1 & \text{si la flèche du courant s'éloigne du noeud} \\ +1 & \text{si la flèche du courant arrive au noeud} \end{cases}$$

★ Avec la loi des branches, la loi des noeuds traduit la **conservation de la charge** : il n'y a ni disparition ni création de charges dans le conducteur et dans le cadre de l'ARQS, il n'y a pas d'accumulation de charges pendant une durée  $dt$  quelconque :

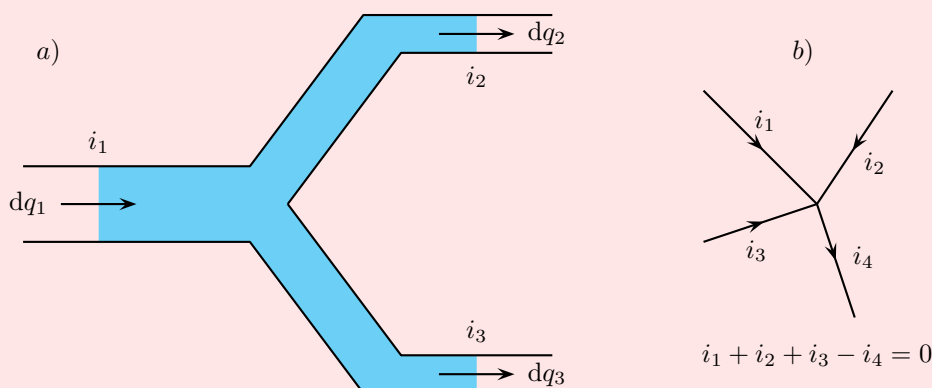


FIGURE II.3 – a) Compréhension de la loi des noeuds par analogie avec l'écoulement d'un fluide incompressible. b) Loi des noeuds dans des fils électriques.

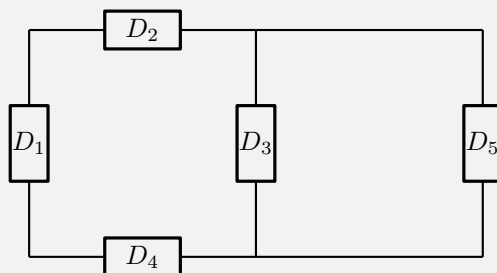
Dans l'exemple de la figure ci-dessus, on a :

$$dq_1 = dq_2 + dq_3$$

et donc en divisant les deux membres par  $dt$ , on obtient :

$$\frac{dq_1}{dt} = \frac{dq_2}{dt} + \frac{dq_3}{dt} \Rightarrow i_1 = i_2 + i_3$$

### Exercice II.5 – Ecrire la loi des noeuds



## II Tension électrique

### II.1 Potentiel et tension électriques

Afin de caractériser la possibilité de créer un courant entre deux corps chargés dans un milieu donné, nous utiliserons une grandeur appelée *potentiel électrique*, notée  $V$  (en volt), caractéristique de chaque corps.

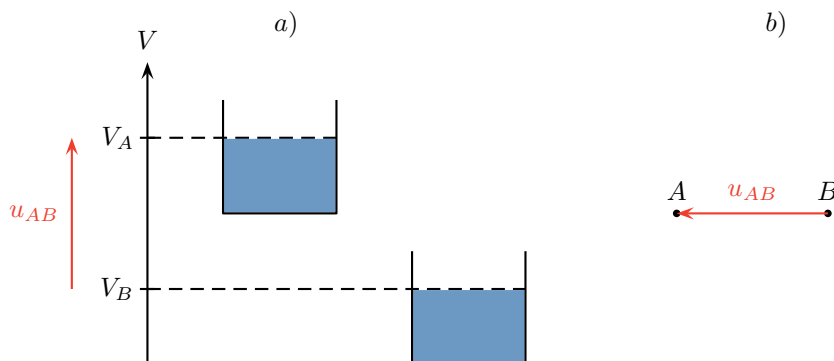


FIGURE II.4 – Potentiel et tension électriques. a) Analogie avec l'énergie potentielle. b) Schématisation en électrocinétique.

#### Définition II.9 – Tension électrique

On peut rapprocher le potentiel électrique  $V$  de l'énergie potentielle de pesanteur d'un corps  $E_p$ . Tout comme l'énergie potentielle,  $V$  est défini à une constante près et par rapport à un **potentiel de référence**, souvent appelé **masse**.

Expérimentalement, **seule une différence de potentiel est accessible**. Elle est appelée **tension électrique**, notée  $u$  (en volt), et caractérise la tendance des électrons à se rendre d'un point  $A$  à un point  $B$ . On la mesure à l'aide d'un voltmètre.

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

#### Propriété II.5 – Tension électrique

- ★ La tension est une grandeur algébrique :  $u_{BA} = -u_{AB}$ .
- ★ Par convention, la tension entre deux corps  $A$  et  $B$  est représentée par une flèche pointant de  $B$  vers  $A$  (cf figure II.4.b)). **Lorsque  $u_{AB} > 0$ , la flèche est orientée dans le sens des potentiels croissants car  $V_A > V_B$  (cf figure II.4.a)).**
- ★ Le potentiel électrostatique  $V$  est en général repéré par rapport à la **masse**<sup>a</sup> - qui est fournie pratiquement par la carcasse d'un appareil électrique ou par la Terre par l'intermédiaire d'une prise secteur. On attribuera arbitrairement un potentiel nul à la masse.
- ★ Nous verrons au chapitre suivant que c'est la nature du dipôle joignant les deux points  $A$  et  $B$  qui va contrôler les propriétés de l'établissement du courant.
- ★ **Ordres de grandeur :**

	Electronique	Domestique	Défibrillateur	Lignes H.T.	Foudre
$u$	$10^{-3} - 1 \text{ V}$	secteur 230 V	1000 V	300 kV	$10^8 \text{ V}$

- ★ On mesure la tension électrique aux bornes d'un dipôle à l'aide d'un voltmètre.

<sup>a</sup>. La masse est dite flottante lorsqu'un appareil électrique n'est pas relié à la Terre.

## II.2 Loi des mailles

### Théorème II.2 – Loi d'additivité algébrique des tensions

Puisque chaque point d'un circuit électrique est caractérisé par un potentiel électrique bien défini, la différence de potentiels entre deux points obéit à la **loi d'additivité algébrique des tensions**. Si on considère 3 points  $A, B, C$  d'un circuit électrique donné :

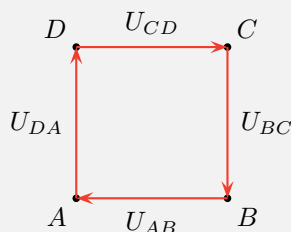
$$u_{AC} = u_{AB} + u_{BC}$$

### Démonstration II.1 – Additivité des tensions

### Exercice II.6 – Somme des tensions sur une maille - Additivité des tensions

Considérons quatre points  $A, B, C$  et  $D$  aux potentiels respectifs  $V_A, V_B, V_C$  et  $V_D$ . On remarque que la somme des tensions dans la boucle fermée  $ABCD$ , appelée **maille**, est nulle puisque :

$$\underbrace{V_A - V_B}_{u_{AB}} + \underbrace{V_B - V_C}_{u_{BC}} + \underbrace{V_C - V_D}_{u_{CD}} + \underbrace{V_D - V_A}_{u_{DA}} = 0$$



### Théorème II.3 – Loi des mailles - Seconde loi de Kirchhoff

La somme des tensions le long d'une maille orientée est nulle. Les tensions doivent être comptées algébriquement selon le sens dans lequel elles sont fléchées.

$$\sum_k \epsilon_k u_k = 0 \quad \text{avec} \quad \epsilon_k = \begin{cases} -1 & \text{si la flèche de la tension } u_k \text{ est orientée dans le sens opposé à la maille} \\ +1 & \text{si la flèche de la tension } u_k \text{ est orientée dans le sens de la maille} \end{cases}$$

La loi des mailles (ou seconde loi de Kirchhoff) traduit la **conservation de l'énergie**.

**Exercice II.7 – Application de la loi des mailles**

Déterminer le nombre de mailles du circuit ci-dessous et appliquer la loi des mailles à chacune d'entre elles.

