

# Circuits électriques dans l'ARQS

## Sommaire

<b>I Courant électrique et intensité</b>	<b>3</b>
I/A Charge électrique	3
I/B Courant électrique	3
I/C Sens conventionnel du courant	3
I/D Intensité du courant	4
<b>II Tension et potentiel</b>	<b>5</b>
II/A Définition	5
II/B Référence du potentiel : la masse	6
II/C Analogie électro-hydraulique	6
<b>III Vocabulaire des circuits électriques</b>	<b>7</b>
III/A La base	7
III/B Décrire un circuit	7
III/C Conventions générateur et récepteur	7
III/D Relation entre dipôles	8
III/E Mesures de tensions et d'intensités	9
<b>IV Lois fondamentales des circuits électriques dans l'ARQS</b>	<b>9</b>
IV/A L'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS)	9
IV/B Loi des nœuds	10
IV/C Loi des mailles	10
IV/D Puissance électrocinétique	11

## Capacités exigibles

- |  |  |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> Justifier que l'utilisation de grandeurs électriques continues est compatible avec la quantification de la charge électrique. | <input type="checkbox"/> Relier la loi des nœuds au postulat de la conservation de la charge.                                |
| <input type="checkbox"/> Exprimer l'intensité du courant électrique en termes de débit de charge.  | <input type="checkbox"/> Citer les ordres de grandeur des intensités et des tensions dans différents domaines d'application. |
| <input type="checkbox"/> Exprimer la condition d'application de l'ARQS en fonction de la taille du circuit et de la fréquence.                         | <input type="checkbox"/> Utiliser la loi des mailles et la loi des nœuds.  |
|  | <input type="checkbox"/> Algébriser les grandeurs électriques et utiliser les conventions récepteur et générateur.           |

## ✓ L'essentiel

## ☰ Définitions

<input type="checkbox"/> E1.1 : Charge électrique . . . . .	3
<input type="checkbox"/> E1.2 : Courant électrique . . . . .	3
<input type="checkbox"/> E1.3 : Sens conventionnel . . . . .	3
<input type="checkbox"/> E1.4 : Intensité d'un courant . . . . .	4
<input type="checkbox"/> E1.5 : Potentiel et tension . . . . .	5
<input type="checkbox"/> E1.6 : Masse d'un circuit . . . . .	6
<input type="checkbox"/> E1.7 : Circuit, schéma, dipôle . . . . .	7
<input type="checkbox"/> E1.8 : Décrire un circuit . . . . .	7
<input type="checkbox"/> E1.9 : Conventions récepteur et générateur . . . . .	8
<input type="checkbox"/> E1.10 : Dipôles en série . . . . .	8
<input type="checkbox"/> E1.11 : Dipôles en parallèle . . . . .	8
<input type="checkbox"/> E1.12 : Régimes continu et variable . . . . .	10
<input type="checkbox"/> E1.13 : Puissance récepteur, générateur . . . . .	11

## ⚙️ Propriétés

<input type="checkbox"/> E1.1 : Charge électrique et conservation . . . . .	3
<input type="checkbox"/> E1.2 : Expression de l'intensité . . . . .	4
<input type="checkbox"/> E1.3 : Voltmètre et ampèremètre . . . . .	9
<input type="checkbox"/> E1.4 : Conservation de l'énergie . . . . .	12

## ⚙️ Lois

<input type="checkbox"/> E1.1 : ARQS . . . . .	9
<input type="checkbox"/> E1.2 : Loi des branches . . . . .	10
<input type="checkbox"/> E1.3 : Loi des nœuds . . . . .	10
<input type="checkbox"/> E1.4 : Loi des mailles . . . . .	10

## 💡 Interprétations

<input type="checkbox"/> E1.1 : ARQS . . . . .	9
--	---

## » Implications

<input type="checkbox"/> E1.1 : Signe et sens réel du courant . . . . .	4
<input type="checkbox"/> E1.2 : Signe d'une tension . . . . .	5

## ✎ Notations

<input type="checkbox"/> E1.1 : Représentation du sens . . . . .	4
<input type="checkbox"/> E1.2 : Potentiel et tension . . . . .	5

## 📊 Ordres de grandeur

<input type="checkbox"/> E1.1 : Intensités . . . . .	4
<input type="checkbox"/> E1.2 : Tensions . . . . .	6

## 🔧 Applications

<input type="checkbox"/> E1.1 : Débit et nombre d'électrons . . . . .	5
<input type="checkbox"/> E1.2 : Série ou dérivation ? . . . . .	9
<input type="checkbox"/> E1.3 : Validité de l'ARQS . . . . .	10
<input type="checkbox"/> E1.4 : Lois des nœuds, lois des mailles . . . . .	11

## ❤️ Points importants

<input type="checkbox"/> E1.1 : Dipôles en série et intensité . . . . .	8
<input type="checkbox"/> E1.2 : Dipôles en parallèle et tension . . . . .	8
<input type="checkbox"/> E1.3 : Bilan sur les puissances . . . . .	11

## ⚠️ Erreurs communes

<input type="checkbox"/> E1.1 : Courant et intensité . . . . .	4
--	---

Pendant toute cette année nous nous plaçons dans un cadre particulier pour l'étude de l'électrocinétique, celui de l'*approximation des régimes quasi-stationnaires*, ou ARQS. Dans ce premier chapitre, nous nous attachons à définir ce cadre et donnons les lois générales des circuits électriques que nous pouvons alors établir.

# I Courant électrique et intensité

## I/A Charge électrique

### ♥ Définition E1.1 : Charge électrique

La charge électrique d'une particule, notée  $q$ , est une grandeur scalaire, caractérisant sa sensibilité aux interactions électromagnétiques.

#### Unités

La charge électrique s'exprime en Coulomb, de symbole C.

La matière ordinaire est constituée d'atomes, formés par :

- ◇ des **neutrons**, électriquement neutres (de charge nulle) ;
- ◇ des **protons**, de charge positive et fondamentale :  $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$  ;
- ◇ des **électrons**, de charge négative opposée à celle des protons.

### ♥ Propriété E1.1 : Charge électrique et conservation

Un système électrique de charge totale  $Q$  possède les propriétés suivantes :

- 1)  $Q$  est **algébrique** : elle peut être  $\leq 0$  ;
- 2)  $Q$  est **additive** :  $N$  particules de charges  $q_1, \dots, q_N$  forment une charge  $Q = \sum_{i=1}^N q_i$  ;
- 3)  $Q$  est quantifiée :  $Q = k \times e$  avec  $k \in \mathbb{Z}$  et  $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$  ;
- 4) Si le système est isolé, alors  $Q$  est constante.

## I/B Courant électrique

### ♥ Définition E1.2 : Courant électrique

Le courant électrique est un **mouvement d'ensemble** de particules chargées, appelées *porteurs de charges*, dû à une action extérieure, le champ électrique  $\vec{E}$ .

#### Exemple E1.1 : Porteurs de charges

On étudiera deux types de porteurs :

- 1) Les **électrons libres** dans les conducteurs métalliques ;
- 2) Les **ions en solutions** dites électrolytiques.

## I/C Sens conventionnel du courant

Les particules sont déplacées par un champ électrique  $\vec{E}$  selon le sens algébrique de leur charge, avec une force  $\vec{F} = q\vec{E}$  (voir mécanique première année) : les charges avec  $q > 0$  sont déplacées dans le même sens que  $\vec{E}$ , celles de  $q < 0$  dans le sens opposé. Ils apportent cependant la *même variation de charge* en valeur absolue. Avant de connaître quelles particules se déplaçaient dans les circuits électriques (les électrons), il a fallu choisir un sens conventionnel :

### ♥ Définition E1.3 : Sens conventionnel

Le sens **conventionnel du courant** est le sens de déplacement des **porteurs charges positives** (réels ou hypothétiques). Les charges négatives se déplacent en sens contraire.

## I/D Intensité du courant

### ♥ Définition E1.4 : Intensité d'un courant

L'intensité électrique quantifie le **débit** de charges à travers une section orientée, c'est-à-dire un **nombre de charges par unité de temps** dans la section étudiée. Une charge est comptée  $+q$  si elle traverse la section dans le même sens que son orientation (avec  $q \geq 0$ ), et  $-q$  sinon.

#### Unités

L'intensité se mesure en ampère, de symbole A. De la définition, on a  $1 \text{ A} = 1 \text{ C} \cdot \text{s}^{-1}$ .

#### Notation

Par convention,  $i$  si elle varie,  $I$  si elle est fixe.

### ♥ Propriété E1.2 : Expression de l'intensité

Soit un système électrique de **section orientée**  $S$  traversée par des charges électriques. Si une quantité de charge  $\delta q$  (discontinue puisque quantifiée par  $e$ ) la traverse entre deux instants  $t$  et  $t + \delta t$ , l'intensité  $i$  du courant sera  $i = \delta q / \delta t$ . En prenant la limite continue

$$i(t) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta q}{\delta t} = \frac{dq}{dt}$$

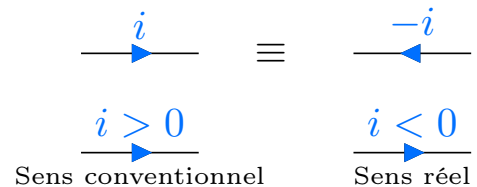
### ♥ Implication E1.1 : Signe et sens réel du courant

Si  $i > 0$ , alors  $\delta q > 0$  : pendant  $dt$ , il y a eu une traversée de charges avec résultante positive *dans le sens orienté*. Comme le sens conventionnel est **celui des charges positives**, on retiendra

- ◇ si  $i > 0$ , le sens conventionnel est respecté ;
- ◇ si  $i < 0$ , le sens conventionnel est opposé à l'orientation choisie.

### ♥ Notation E1.1 : Représentation du sens

En représentant un fil électrique par un trait rectiligne, on oriente la section avec une flèche. La grandeur ainsi définie peut être  $\leq 0$ . Si on la flèche dans l'autre sens, sa valeur est opposée.



### ♥ Attention E1.1 : Courant et intensité

Il vous faut savoir différencier le courant et l'intensité du courant :

Le courant est le *phénomène physique*.

L'intensité est la *quantification algébrique*.

### ♥ Ordre de grandeur E1.1 : Intensités

Les valeurs mesurées sont :

- ◇  $\approx 1 \text{ mA}$  pour l'électronique du quotidien (téléphone) ;
- ◇  $[1 ; 10] \text{ A}$  pour l'électroménager (four, aspirateur...) ;
- ◇  $\approx 10^2 \text{ A}$  pour l'électrotechnique (TGV :  $[500 ; 1000] \text{ A}$ ).

Le seuil létal pour le corps dépend de la durée de traversée, mais est **très faible** :  $40 \text{ mA}$  pendant 3 secondes, ou  $300 \text{ mA}$  pendant 0,1 seconde.

### ♥ Application E1.1 : Débit et nombre d'électrons

Un générateur délivre une intensité  $I = 3,0 \text{ A}$ . Quel est le nombre d'électrons émis chaque seconde ? Quelle durée faut-il à ce générateur pour émettre 1000 électrons ?

Par définition,  $I = \Delta Q / \Delta t$ , et  $\Delta Q = Ne$  avec  $N$  le nombre d'électrons et  $e$  la charge élémentaire. Ainsi,

$$N = \frac{\Delta Q}{e} = \frac{I \Delta t}{e} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} I = 3,0 \text{ A} \\ \Delta t = 1 \text{ s} \\ e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \end{cases} \quad \text{A.N. : } \underline{N \approx 1,9 \times 10^{19}}$$

On inverse la relation pour trouver

$$\Delta t = \frac{1000e}{I} = \underline{5,3 \times 10^{-17} \text{ s}}$$

## II Tension et potentiel

### II/A Définition

#### ♥ Définition E1.5 : Potentiel et tension

On appelle **potentiel** électrique la grandeur physique quantifiant la *capacité d'un point de l'espace à attirer les charges négatives* : plus le potentiel est élevé plus il les attire.

On appelle **tension** ou **différence de potentiel** entre deux points la *différence entre les valeurs du potentiel* en chacun des points.

#### Unités

Le potentiel, et par extension la différence de potentiel, s'exprime en Volt, de symbole V.

#### Notation

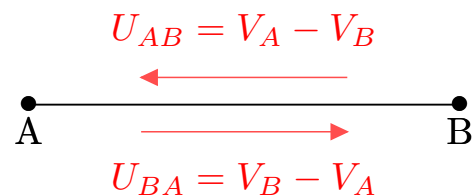
$u$  si variable,  $U$  sinon.

#### En pratique

Seules les tensions se mesurent.

#### ♥ Notation E1.2 : Potentiel et tension

Il est convenu d'écrire le potentiel en un point A :  $V_A$ , et la tension **entre les points** A et B :  $U_{AB} = V_A - V_B$ . Sur un schéma, la tension est représentée par une flèche partant du **second potentiel vers le premier**.



#### ♥ Implication E1.2 : Signe d'une tension

- ◇  $U_{AB} > 0$  si  $V_A > V_B$  et inversement ;
- ◇  $U_{AB} = -U_{BA}$  ;
- ◇  $U_{AB} = U_{AC} + U_{CB}$ .

**Attention** cependant, la flèche est opposée au sens usuel pour un vecteur  $\overrightarrow{AB}$ .

## ♥ Ordre de grandeur E1.2 : Tensions

Les valeurs mesurées sont :

- ◇  $\approx [0,100 ; 5]$  V pour l'électronique du quotidien (téléphone) ;
- ◇  $\approx 220$  V pour l'électroménager (four, aspirateur...);
- ◇  $\approx [100 ; 1000]$  kV pour l'électrotechnique (lignes hautes tensions).

## II/B Référence du potentiel : la masse

### ♥ Définition E1.6 : Masse d'un circuit

L'origine des potentiels d'un circuit est appelée la **masse** du circuit. C'est le point où  $V = 0$ . Elle sert de référence et est choisie arbitrairement, les tensions pouvant être négatives, et permet la mesure des tensions.

Dans un circuit électrique, elle est représentée par l'un de ces deux symboles



## II/C Analogie électro-hydraulique

Les phénomènes régissant la tension et le courant électrique sont en tous points semblables à ceux régissant le dénivelé et le courant dans un circuit hydraulique. Cette vision permet de mieux comprendre le vocabulaire employé.

Considérons une analogie hydraulique : dans une conduite d'eau horizontale entre deux récipients, l'eau ne s'écoulera pas. Un courant d'eau apparaîtra si on surélève l'un des récipients par rapport à l'autre, et ce courant sera **vers le plus bas**. Le récipient surélevé va finir par se vider et le courant d'eau cessera. C'est la **différence d'altitude** entre les deux récipients qui permet la **circulation du courant**. Les deux sens ne sont pas équivalents, le courant d'eau ne se produit spontanément que vers le bas.

Par analogie avec la **différence d'altitude**  $h$  de la canalisation, on définit le **potentiel** électrique  $V$ . Ainsi, un courant électrique apparaît spontanément dans le sens des **potentiels décroissants**. Pour que le courant remonte les potentiels, il faut « pomper » les charges à l'aide d'un générateur. L'équivalent électrique du dénivelé (différence d'altitudes) en hydraulique est la tension (différence de potentiels). Voir [ce site](#) et l'animation flash.

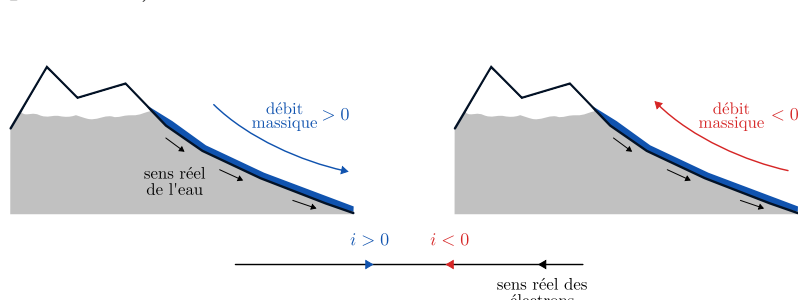


FIGURE 1.1 – Analogie courant-débit

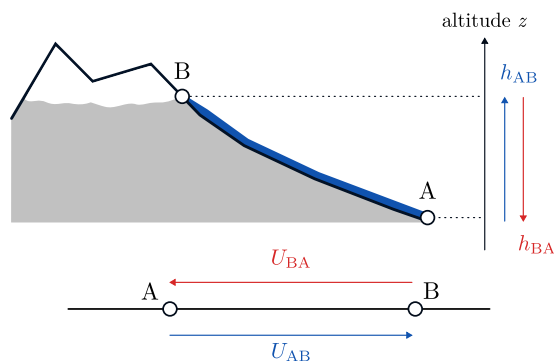


FIGURE 1.2 – Analogie hauteur-tension

On définit de la même manière la puissance : pour l'hydraulique, la puissance d'un courant est égal au produit du dénivelé et du débit, en électrocinétique on aura donc

$$|P| = U \cdot I$$

Nous discutons de son signe dans la section suivante.

### III Vocabulaire des circuits électriques

#### III/A La base

##### ♥ Définition E1.7 : Circuit, schéma, dipôle

###### Circuit électrique

Ensemble de composants électriques reliés entre eux par des fils métalliques conducteurs.

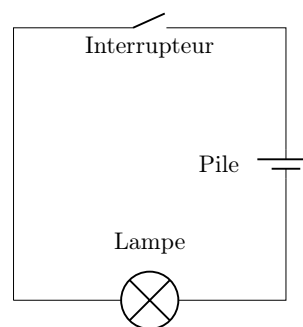
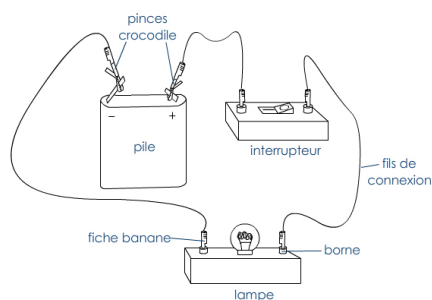
###### Schéma électrique

Représentation simplifiée d'un circuit dans laquelle les composants sont représentés par des symboles standardisés et les fils les reliant par des traits.

###### Dipôle

Composant électriques comportant deux bornes sur lesquelles sont branchés des fils conducteurs.

##### Exemple E1.2 : Circuit et schéma



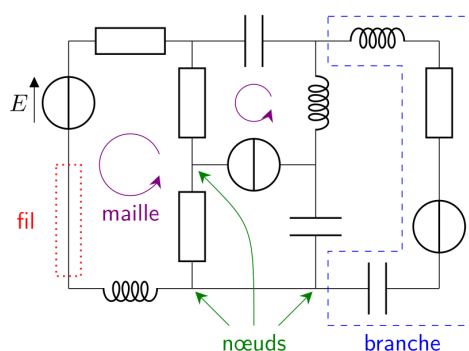
#### III/B Décrire un circuit

##### ♥ Définition E1.8 : Décrire un circuit

**Nœud** : point où se rejoignent au moins 3 fils.

**Branche** : portion du circuit entre deux nœuds voisins.

**Maille** : succession de branches partant et retournant au même point.



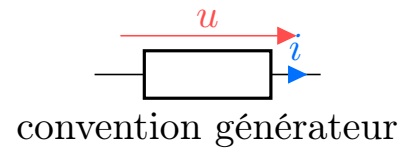
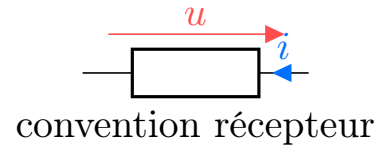
#### III/C Conventions générateur et récepteur

Chacune des orientations de l'intensité et de la tension est arbitraire. Pour étudier le comportement d'un dipôle, il nous faut choisir une dernière convention donnant l'orientation relative de la tension  $u$  à ses bornes et de l'intensité  $i$  du courant la traversant. Celle-ci dépend de la nature génératrice ou réceptrice d'un dipôle afin de respecter leurs physiques respectives.

### ♥ Définition E1.9 : Conventions récepteur et générateur

En convention **récepteur**, l'intensité  $i$  traversant un dipôle et la tension  $u$  à ses bornes sont orientées en **sens contraires**.

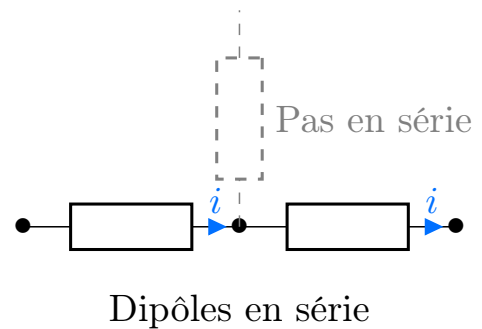
En convention **générateur**, l'intensité  $i$  traversant un dipôle et la tension  $u$  à ses bornes sont orientées en **dans le même sens**.



## III/D Relation entre dipôles

### ♥ Définition E1.10 : Dipôles en série

Deux dipôles sont dits **en série** s'ils partagent **une et une seule borne** qui **n'est pas un nœud** (de laquelle ne part aucune autre branche).

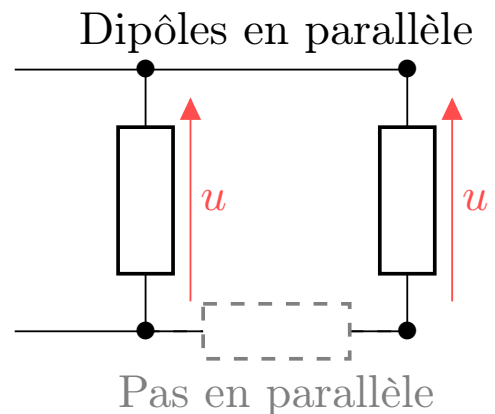


### ♥ Important E1.1 : Dipôles en série et intensité

Deux dipôles **en série** sont traversés par la **même intensité**.

### ♥ Définition E1.11 : Dipôles en parallèle

Deux dipôles sont dits **en dérivation/en parallèle** s'ils partagent leurs **deux bornes**.



### ♥ Important E1.2 : Dipôles en parallèle et tension

Deux dipôles **en parallèle/dérivation** ont la **même tension** à leurs bornes.

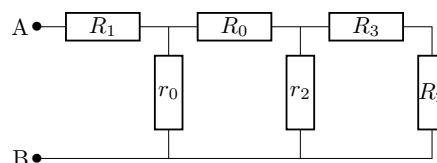
### Remarque E1.1 : Série et dérivation

Deux dipôles peuvent n'être ni en série, ni en dérivation.



### ♥ Application E1.2 : Série ou dérivation ?

Pour le schéma ci-dessous, indiquer si les couples de dipôles suivants sont en série, en parallèle ou ni l'un ni l'autre :  $(R_1 \text{ et } R_0)$  ;  $(r_0 \text{ et } r_2)$  ;  $(R_2 \text{ et } R_0)$  ;  $(R_3 \text{ et } R_2)$ .



$(R_1 \text{ et } R_0)$  : rien.  $(r_0 \text{ et } r_2)$  : rien.  $(R_2 \text{ et } R_0)$  : rien.  $(R_3 \text{ et } R_2)$  : série.

## III/E Mesures de tensions et d'intensités

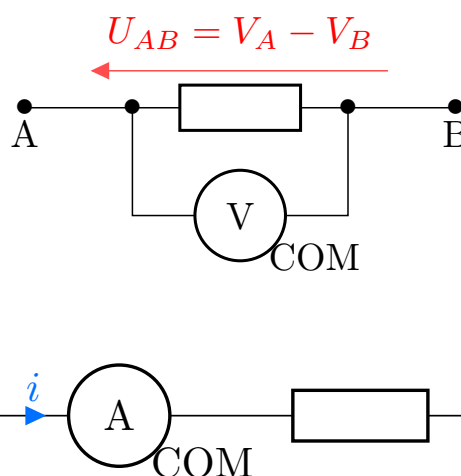
### ♥ Propriété E1.3 : Voltmètre et ampèremètre

#### Voltmètre

- ◇ Mesure une **tension**.
- ◇ Un voltmètre se monte en **parallèle**.
- ◇ Pour mesurer la tension  $U_{AB}$  il faut placer la borne COM au point B.

#### Ampèremètre

- ◇ Mesure une **intensité**.
- ◇ Un ampèremètre se monte en **série**.
- ◇ Le sens du courant affiché par l'ampèremètre est relié au sens de branchement.



## IV Lois fondamentales des circuits électriques dans l'ARQS

### IV/A L'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS)

#### ♥ Loi E1.1 : ARQS

L'approximation des régimes quasi-stationnaires correspond à considérer que les variations des grandeurs électriques se propagent *instantanément* dans la totalité d'un circuit. Si sa longueur totale est  $L$  et si la fréquence de variation du signal électrique est  $f$  (ou temps de variation  $T$ ), l'ARQS est applicable si

$$L \ll \frac{c}{f} \iff L \ll cT \iff T \gg \frac{L}{c}$$

#### ♥ Interprétation E1.1 : ARQS

Dans un fil, les électrons sont mis en mouvement par un champ électrique. La théorie électromagnétique nous montre que le champ électrique est une onde qui se déplace à la célérité  $c \approx 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ainsi, la variation du potentiel dans un fil se fait à vitesse finie et il y a en général un **retard à la propagation**. Si le champ varie dans le temps avec une période  $T$ , il varie dans l'espace avec une période  $\lambda = cT$ . On peut alors considérer que le champ électrique est le même le long d'un fil si sa taille est beaucoup plus petite que la longueur d'onde  $\lambda$ .

### ♥ Application E1.3 : Validité de l'ARQS

Vérifier si l'ARQS est valable pour les 3 cas suivants :

- ◇ En travaux pratiques avec  $f = 1 \text{ kHz}$  ;
- ◇ Sur une ligne à haute tension de 100 km à basse fréquence (50 Hz) ;
- ◇ À l'intérieur d'une carte mère d'un ordinateur de 10 cm à  $f \approx 1 \text{ GHz}$ .

Oui, si  $L \ll 300 \text{ km}$  ; oui, si  $L \ll 6000 \text{ km}$  ; non,  $Lf = 1 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \neg \ll c$ .

### ♥ Définition E1.12 : Régimes continu et variable

#### Régime continu

Toutes les intensités et les tensions du circuit sont constantes au cours du temps.

#### Régime variable

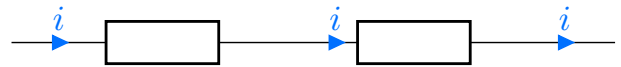
Au moins une tension ou une intensité du circuit varie au cours du temps.

## IV/B Loi des nœuds

Dans le cadre de l'ARQS, il ne peut y avoir d'accumulation de charges en un point du circuit : toutes les charges apportées par un courant doivent immédiatement être évacuées par un autre courant, donnant lieu aux lois des branches et des nœuds :

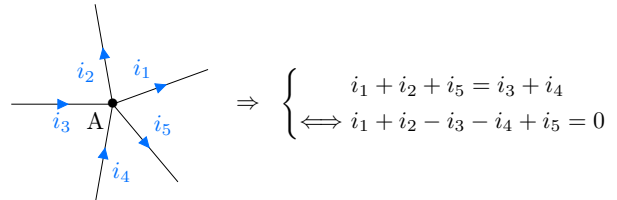
### ♥ Loi E1.2 : Loi des branches

L'intensité est la même le long d'une branche.



### ♥ Loi E1.3 : Loi des nœuds

La somme des intensités dirigées vers un nœud est égale à la somme de celles dirigées à l'opposé, ou la somme algébrique des intensités en un point est nulle.

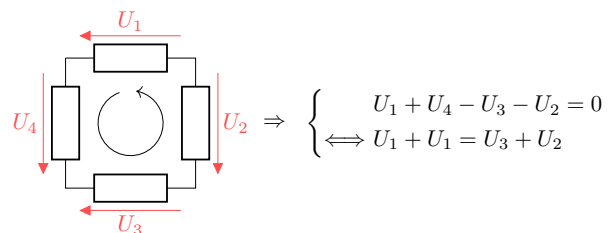


## IV/C Loi des mailles

Avec le principe d'additivité des tensions, on en déduit la loi des mailles.

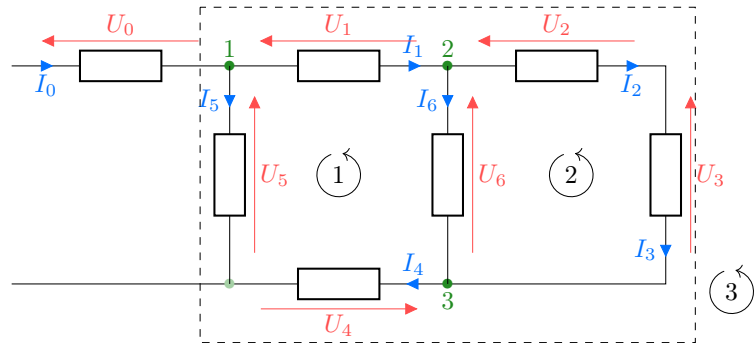
### ♥ Loi E1.4 : Loi des mailles

Dans une maille orientée, la somme algébrique des tensions est nulle, ou la somme des tensions dans le sens de la maille est égale à la somme des tensions dans le sens opposé



## ♥ Application E1.4 : Lois des nœuds, lois des mailles

Pour le circuit ci-contre, établir les liens entre les différents courants et les différentes tensions.



## Lois des nœuds

- ◇  $I_2 = I_3$  par unicité à droite ;
- ◇  $I_0 = I_1 + I_5$  par LdN 1 ;
- ◇  $I_1 = I_2 + I_6$  par LdN 2 ;
- ◇  $I_3 + I_6 = I_4$  par LdN 3.

Le dernier nœud, non numéroté, donne une relation redondante avec les autres.

## Lois des mailles

- ◇  $U_4 + U_6 + U_1 = U_5$  par LdM 1 ;
- ◇  $U_3 + U_2 = U_6$  par LdM 2 ;

La LdM 3 donne une relation redondante avec les deux premières :  $U_4 + U_2 + U_3 + U_1 = U_5$  est la somme des deux.

## IV/D Puissance électrocinétique

## ♥ Définition E1.13 : Puissance récepteur, générateur

## Récepteur

Un dipôle fonctionne comme récepteur s'il **reçoit de l'énergie** du reste système. Dans ce cas-là, sa puissance *en convention récepteur* est  $P_{\text{reçue}} = u \times i > 0$ . Si après calcul une puissance reçue est négative, c'est que le dipôle est en fait générateur.

## Générateur

Un dipôle fonctionne comme **générateur** s'il **fournit de l'énergie** au reste système. Dans ce cas-là, sa puissance *en convention générateur* est  $P_{\text{fournie}} = u \times i > 0$ . Si après calcul une puissance fournie est négative, c'est que le dipôle est en fait récepteur.

## ♥ Important E1.3 : Bilan sur les puissances

	Dipôle récepteur	Dipôle générateur
Convention récepteur $P_{\text{reçue}}$		
Convention générateur $P_{\text{fournie}}$		



### ♥ Propriété E1.4 : Conservation de l'énergie

L'énergie est une **grandeur conservative**. Elle ne peut être créée ou détruite. Elle ne peut qu'être convertie d'une forme en une autre et/ou transférée d'un système à un autre. Il en découle que dans une maille, les **puissances reçues sont égales aux puissances émises**, c'est-à-dire

$$\sum P_{\text{fournies}} = \sum P_{\text{reçues}}$$