

## EL1a - Lois générales de l'électrocinétique

### Table des matières

<b>I. Courant électrique</b>	<b>2</b>
I.1. Définitions . . . . .	2
a) Conducteur . . . . .	2
b) Courant électrique . . . . .	2
I.2. Intensité d'un courant . . . . .	3
I.3. Propriété fondamentale de la charge et conséquences . . . . .	4
<b>II. Tension électrique ou différence de potentiel</b>	<b>5</b>
II.1. Notion de potentiel électrique . . . . .	5
II.2. Définition . . . . .	6
II.3. Choix d'un potentiel de référence . . . . .	7
a) Masse d'un circuit . . . . .	7
b) Terre . . . . .	7
II.4. Additivité des tensions . . . . .	7
<b>III. Lois générales des réseaux dans l'ARQS</b>	<b>8</b>
III.1. Quelques définitions . . . . .	8
III.2. Approximation des régimes quasi-stationnaire ARQS . . . . .	8
III.3. Lois des nœuds . . . . .	9
III.4. Lois des mailles . . . . .	9
<b>IV. Puissance électrique</b>	<b>10</b>

*L'électricité fait partie de notre quotidien. On se propose dans ce chapitre d'introduire les concepts de base qui nous seront utiles dans toute la suite du cours.*

*Il n'est pas si facile d'imaginer ce qu'est une "tension" ou un "courant électrique". La vidéo suivante de la série "Science étonnante" éclaire ces notions :*

*Que se passe-t-il (vraiment) dans un conducteur électrique?*

# I. Courant électrique

On étudiera plus en détail la conduction électrique dans le cours d'électromagnétisme. Nous allons cependant en définir les grandes lignes ici.

## I.1. Définitions

### a) Conducteur

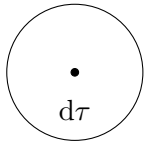
Un **conducteur** est un corps contenant des charges dites charges libres (ou porteurs de charges) susceptibles de se déplacer sous l'action d'une force si petite soit-elle.

Dans un métal, les porteurs de charges sont les électrons de conduction. Dans un électrolyte la conduction électrique est assurée par les déplacements des ions (anions négatifs et cations positifs) dans la solution.

### b) Courant électrique

En l'absence de champ électrique les électrons ont un mouvement désordonné d'agitation thermique. À la température ordinaire la vitesse d'agitation thermique est assez élevée (de l'ordre de  $10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Soient :



- $d\tau$  : un élément de volume suffisamment petit pour être considéré comme ponctuel, mais suffisamment grand pour contenir un grand nombre d'électrons (échelle mésoscopique).
- $N$  : le nombre d'électrons contenus à l'intérieur de  $d\tau$ .
- $\vec{v}_i$  la vitesse du  $i^{\text{eme}}$  électron.

On définit localement la vitesse d'ensemble des électrons par :

$$\vec{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{v}_i$$

On effectue donc une moyenne des vitesses sur le volume élémentaire  $d\tau$ .

En l'absence de champ électrique cette vitesse d'ensemble est nulle, l'agitation thermique étant totalement aléatoire.

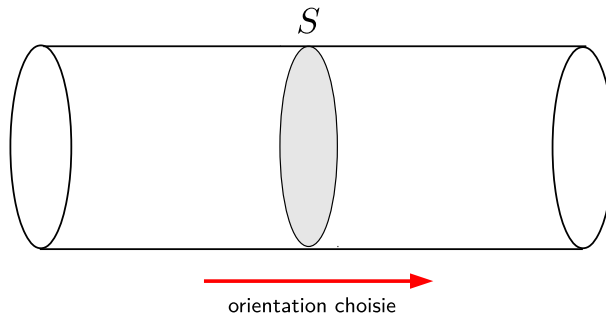
En présence d'un champ électrique  $\vec{E}$ , chaque électron subit une force  $-e\vec{E}$ . Un mouvement d'ensemble dans la direction du champ électrique se superpose alors au mouvement d'agitation thermique :

$$\vec{v} \neq 0$$

En général cette vitesse d'ensemble est beaucoup moins élevée que la vitesse d'agitation thermique. Par exemple dans un fil de cuivre de section  $1 \text{ mm}^2$  parcouru par un courant d'intensité  $1\text{A}$ , cette vitesse est de l'ordre de  $0,1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### I.2. Intensité d'un courant

L'intensité est une grandeur algébrique dont le signe dépend du sens d'orientation choisi.



L'intensité d'un courant traversant la section  $S$  du conducteur correspond à la charge traversant  $S$  par unité de temps.

$$I = \frac{\delta Q}{dt}$$

avec  $\delta Q$  la charge ayant traversé  $S$  dans le sens d'orientation choisi pendant  $dt$ .

Dimensionnellement  $[I] = A = C.s^{-1}$

$\delta Q$  peut être positive (exemple : déplacement de cations) ou négative (exemple : déplacement d'anions ou d'électrons de conduction)

On compte positivement les charges traversant  $S$  dans le sens d'orientation :

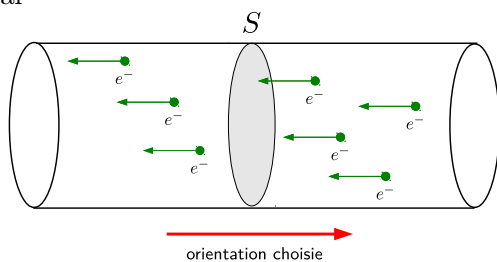
$$I = + \frac{\delta Q_{\rightarrow}}{dt}$$

On compte négativement les charges traversant  $S$  dans le sens opposé au sens d'orientation :

$$I = - \frac{\delta Q_{\leftarrow}}{dt}$$

Exemples :

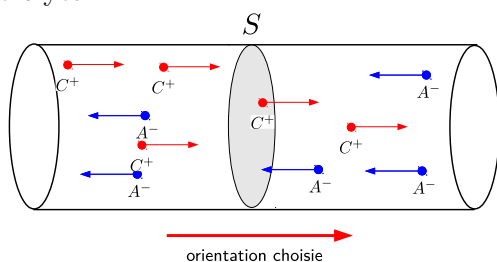
- métal



Préciser le sens de  $\vec{E}$  sur le schéma.

$$I = - \frac{\delta Q_{e^-}}{dt} > 0$$

- électrolyte



Préciser le sens de  $\vec{E}$  sur le schéma.

$$I = + \underbrace{\frac{\delta Q_{C^+}}{dt}}_{>0} - \underbrace{\frac{\delta Q_{A^-}}{dt}}_{>0} > 0$$

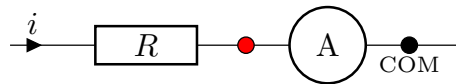
Un courant positif peut être dû à un déplacement de charges positives dans le sens d'orientation choisi ou à un déplacement de charges négatives dans le sens opposé au sens d'orientation choisi. Inverser le sens d'orientation revient à changer le signe de  $I$ .

Quelques ordres de grandeur :

Diode électroluminescente	$\simeq 10 \text{ mA}$
Électrocution	$\simeq 100 \text{ mA}$
Ampoule à incandescence	$\simeq 1 \text{ A}$
Radiateur 2 kW	$\simeq 10 \text{ A}$
Démarrreur auto	$\simeq 100 \text{ A}$
Éclair	$\simeq 10 \text{ à } 100 \text{ kA}$

Mesure d'une intensité :

- À l'aide d'un **ampèremètre**. On souhaite mesurer le courant traversant résistance  $R$ . Placer l'ampèremètre sur le schéma :



- Pour mesurer les intensités élevées on utilise une **pince ampèremétrique**.



On referme la pince autour du fil.

C'est donc une mesure sans contact.

Nous en reparlerons dans le cours sur l'induction.

### I.3. Propriété fondamentale de la charge et conséquences

La **charge électrique** est une **grandeur conservative**. La charge d'un système isolé se conserve.

*Vous avez peut-être déjà utilisé cette propriété en chimie pour équilibrer les réactions d'oxydo-réduction. Les réactions nucléaires doivent également la respecter.*

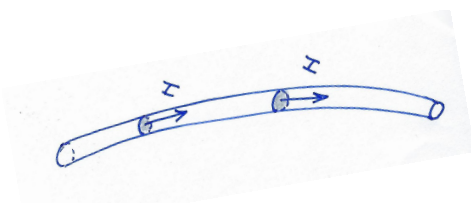
On se place en régime stationnaire :

En **régime stationnaire**, toutes les grandeurs physiques sont **indépendantes du temps**.

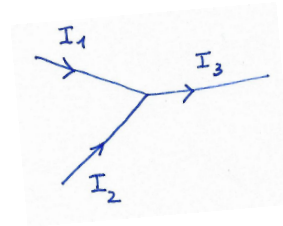
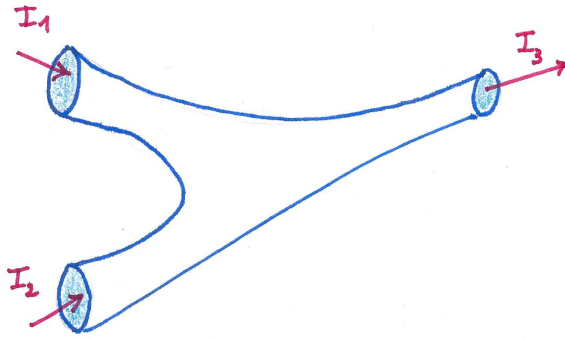
Conséquences :

- En régime stationnaire la charge contenue entre les deux sections de fil est constante. Pendant une durée donnée il entre donc autant de charge qu'il en sort : l'intensité du courant à travers chaque section est la même.

L'intensité du courant est la même à travers toute section d'un même fil conducteur.



• Loi des nœuds



$$I_1 + I_2 = I_3$$

## II. Tension électrique ou différence de potentiel

### II.1. Notion de potentiel électrique

On a déjà rencontré la notion d'énergie potentielle en mécanique.

Les charges libres ne peuvent circuler dans un circuit que s'il comporte un générateur. Lorsque les charges circulent elles perdent de l'énergie. Cette énergie devient de l'énergie thermique (effet Joule dans une résistance), de l'énergie cinétique dans la mise en rotation d'un moteur électrique, de l'énergie chimique dans un électrolyseur...

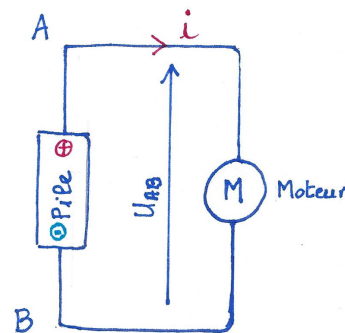
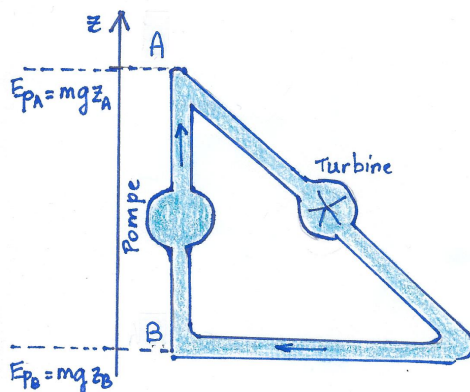
Les charges circulent car elle sont soumises à une force  $\vec{F} = q\vec{E}$  où  $q$  est la charge ( $q = -e$  pour un électron de conduction) et  $\vec{E}$  est le champ électrique. Cette force est associée à l'énergie potentielle  $E_p = qV$  où  $V$  est appelé potentiel électrique. Il se mesure en volt (V).

L'énergie potentielle d'une charge  $q$  en un point  $M$  donnée d'un circuit a pour expression

$$E_p(M) = qV(M)$$

où  $V(M)$  est le **potentiel électrique** au point  $M$ . Il est défini à une constante additive près.

L'unité SI du potentiel électrique est le volt (V).

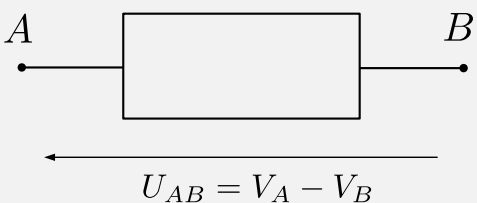


Analogie hydraulique

La pile peut être vue comme une "pompe à charge"... Les porteurs de charges y entrent "fatigués" (avec une énergie faible) et en ressortent "ragaillardis" (avec une énergie plus élevée). En circulant, ils vont perdre cette énergie jusqu'à repasser par la pile pour se requinquer, etc...

## II.2. Définition

On considère un dipôle, c'est-à-dire un système relié au réseau électrique par deux fils conducteur appelés bornes du systèmes.



La **tension** (ou différence de potentiel)  $U_{AB}$  est définie par

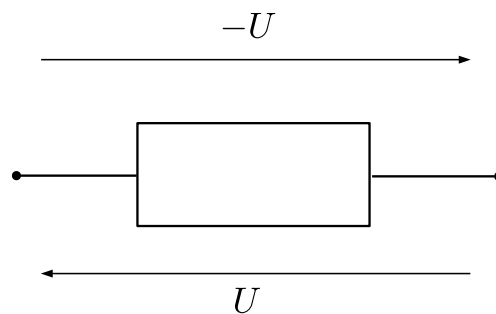
$$U_{AB} = V_A - V_B$$

avec

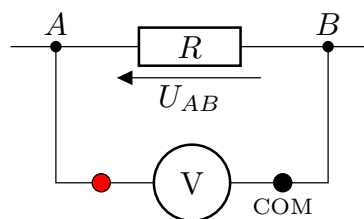
- $V_A$  le **potentiel électrique** en  $A$
- $V_B$  le **potentiel électrique** en  $B$

Son unité SI est le volt (V).

**Attention :** la tension est une grandeur algébrique (on ne nomme pas systématiquement les deux bornes  $A$  et  $B$ ).



On mesure la tension aux bornes d'un dipôle à l'aide d'un **voltmètre**. On souhaite mesurer la tension  $U_{AB}$  aux bornes d'une résistance  $R$ . Placer le voltmètre sur le schéma :



Quelques ordres de grandeur :

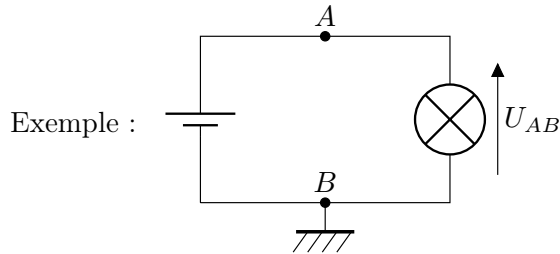
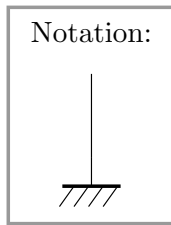
Électronique numérique	0 – 5 V
Tension d'alimentation d'un appareil nomade	6 – 12 V
Tension secteur	200 V
Ligne haute tension	150 à 500 kV
Tension entre la base d'un nuage d'orage et le sol	$\simeq$ 500 MV

### II.3. Choix d'un potentiel de référence

#### a) Masse d'un circuit

On ne mesure que des différences de potentiel (d.d.p.). Le potentiel électrique est défini à une constante additive près.

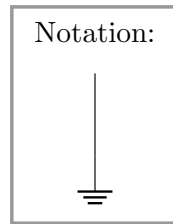
On peut donc choisir arbitrairement un potentiel nul en un point donné du circuit. Ce point correspond à la masse du circuit.



Par convention :  $V_B = 0$ .  $U_{AB} = V_A - V_B = V_A$ .

#### b) Terre

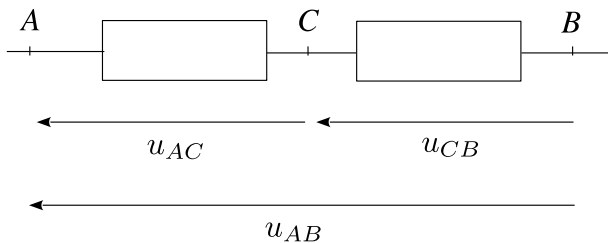
Certains appareils sont munis d'une prise de terre. Son rôle est de relier la carcasse métallique de l'appareil au sol. Le potentiel de l'appareil est égal au potentiel du sol il n'y a pas risque d'électrocution.



en TP : les oscilloscopes, les GBF sont munis de prise de terre. Dans ce cas leur masse (bornes noires) est directement reliées à la terre EDF. Il faudra parfois en tenir compte et veiller à ce que leurs masses soient toujours reliées entre elles (d'où l'intérêt de réserver la couleur noire aux fils reliés à la masse).

### II.4. Additivité des tensions

Les tensions dans un circuit suivent une loi d'additivité.



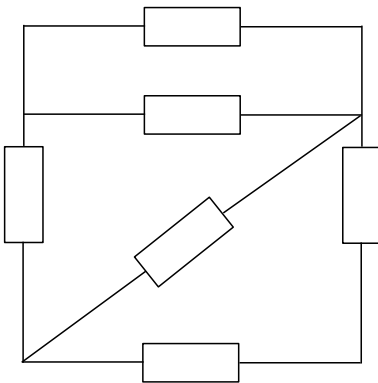
$$\begin{aligned}
 u_{AB} &= V_A - V_B \\
 &= V_A - V_C + V_C - V_B \\
 &= u_{AC} + u_{CB}
 \end{aligned}$$

### III. Lois générales des réseaux dans l'ARQS

#### III.1. Quelques définitions

<b>réseau</b>	système de dipôles reliés entre eux par des fils conducteurs parfaits ( $R = 0$ ). Ces fils sont des isopotentiels.
<b>nœud</b>	point du réseau relié à au moins trois dipôles
<b>branche</b>	tronçon de circuit compris entre deux nœuds
<b>maille</b>	ensemble de branches formant un circuit fermé

Exemple :



Compter le nombre :

- de nœuds
- de branches
- de mailles

#### III.2. Approximation des régimes quasi-stationnaire ARQS

Dans le cas où on ne se place plus en régime stationnaire peut-on toujours dire que l'intensité est la même en tout point d'un même fil électrique ?

Si on ferme un interrupteur, la lampe ne s'allume pas tout à fait instantanément. Les signaux électriques se propagent dans la ligne à une vitesse proche de  $c$ , célérité des ondes électromagnétiques dans le vide. Cela crée un retard à l'allumage de  $\Delta t = L/c$ ,  $L$  étant la longueur de ligne entre l'interrupteur et la lampe. Ainsi si on choisit  $L = 6$  m on trouve  $\Delta t = \frac{6}{3 \cdot 10^8} = 2 \cdot 10^{-8}$  s.

On considère à présent un circuit électrique alimenté par une source de tension variable, par exemple sinusoïdale de période  $T$ , et on note  $L$  la dimension caractéristique de ce circuit.

À quelle condition pourra-t-on considérer que l'intensité est la même en tout point d'un même fil conducteur, comme en régime stationnaire ?

▷ Il faut que le temps  $\Delta t$  mis par l'onde électromagnétique pour se déplacer sur toute la longueur  $L$  du fil soit très inférieur à la période  $T$  du signal :

$$\Delta t \ll T$$

ou de manière équivalente

$$\frac{L}{c} \ll T$$

$$L \ll cT$$

$$L \ll \lambda$$

avec  $\lambda$  longueur d'onde d'une onde électromagnétique de même période  $T$  que le signal.

Dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires, tous les effets dû à la propagation des signaux sous forme de tension ou de courant sont négligés.

Un circuit fonctionne dans l'ARQS si on peut négliger, à l'échelle du circuit, le temps de propagation  $\Delta t$  du signal électromagnétique devant le temps caractéristique  $T$  de variation de la source.

$$\Delta t \ll T \quad \text{ou de manière équivalente} \quad f = \frac{1}{T} \ll \frac{1}{\Delta t} \quad \text{ou} \quad L \ll \lambda$$

avec  $\Delta t = L/c$ ,  $L$  dimension caractéristique du circuit et  $\lambda$  la longueur d'onde d'une onde électromagnétique de période  $T$ .

Dans ce cas, l'intensité est la même tout le long d'un même fil et la loi des nœuds reste applicable.

Exemples :

- Réseau EDF

$$f = 50 \text{ Hz} \quad \lambda = cT = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{50} = 6 \cdot 10^6 \text{ m} = 6000 \text{ km.}$$

L'ARQS s'applique donc sans difficulté (même à l'échelle d'un département!).

- En TP, on dispose de GBF. Si on utilise une fréquence  $f = 1 \text{ MHz}$ , est-on dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires?

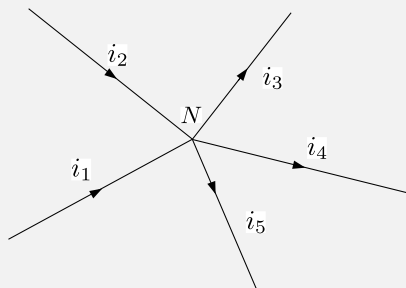
$$f = 1 \text{ MHz}, \quad \lambda = cT = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{10^6} = 3 \cdot 10^2 \text{ m} = 300 \text{ m}$$

qui reste très supérieure aux dimensions des circuits électriques réalisés.

### III.3. Lois des nœuds

On a montré en régime stationnaire que la conservation de la charge imposait que la somme des courants entrant soit égale à la somme des courants sortant. Cela reste applicable dans le cadre de l'ARQS.

#### Loi des nœuds



En un nœud  $N$  donné :

$$\sum_k \varepsilon_k i_k = 0$$

$\varepsilon_k = +1$  lorsque l'intensité  $i_k$  est orientée vers  $N$  (courant entrant).

$\varepsilon_k = -1$  lorsque l'intensité  $i_k$  est orientée à l'opposé de  $N$  (courant sortant).

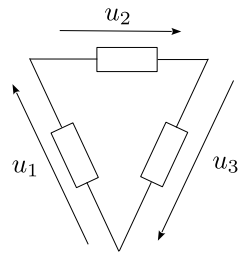
Cette formulation équivaut à :

$$\sum \text{courants entrants} = \sum \text{courants sortants}$$

Exprimer la loi des nœuds pour l'exemple ci-dessus :

### III.4. Lois des mailles

L'additivité des tensions reste applicable dans le cadre de l'ARQS. Ainsi, pour une maille fermée :



$$u_1 + u_2 + u_3 = 0$$

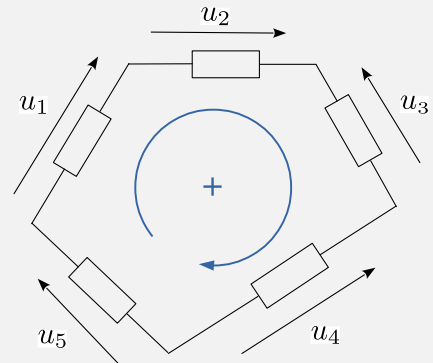
Loi des mailles

On aura donc pour une maille **orientée** :

$$\sum_k \varepsilon_k u_k = 0$$

$\varepsilon_k = +1$  lorsque la tension  $u_k$  est dans le sens de la maille.

$\varepsilon_k = -1$  lorsque la tension  $u_k$  est orientée dans le sens opposé



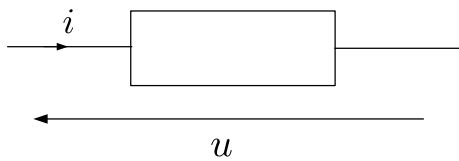
Appliquer la loi des mailles à l'exemple ci-dessus :

$$u_1 + u_2 - u_3 - u_4 + u_5 = 0$$

### IV. Puissance électrique

$$\mathcal{P} = ui$$

Convention récepteur



$$\mathcal{P} = ui$$

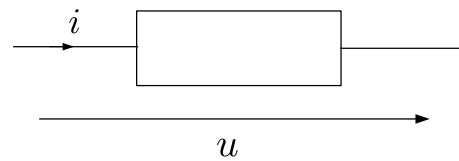
est la puissance électrique **reçue** par le dipôle.

Si  $\mathcal{P} > 0$  le dipôle reçoit de l'énergie électrique : c'est un dipôle récepteur.

*Exemple : ampoule, moteur...*

Si  $\mathcal{P} < 0$  le dipôle fournit de l'énergie électrique : c'est un dipôle générateur.

Convention générateur



$$\mathcal{P} = ui$$

est puissance électrique **fournie** par le dipôle.

Si  $\mathcal{P} > 0$  le dipôle fournit de l'énergie électrique : c'est un générateur.

*Exemple : pile, dynamo...*

Si  $\mathcal{P} < 0$  le dipôle reçoit de l'énergie électrique : c'est un dipôle récepteur.

Quelques ordres de grandeur :

Puissance consommée par une LED	$\simeq 1 \text{ W}$
Puissance ampoule à incandescence	$\simeq 50 \text{ W}$
Electroménager usuel	$\simeq 1 \text{ kW}$
Puissance réacteur nucléaire	$\simeq 100 \text{ MW}$

Extrait du programme :

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>12. Circuits électrique dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires</b>	
Approximation quasi stationnaire	Le critère de validité de l'approche quasi stationnaire est énoncé sans démonstration.
Lois des nœuds, loi des mailles Puissance électrique reçue ou fournie par un dipôle	Utiliser la loi des nœuds et la loi des mailles. Citer et utiliser les conventions récepteur et générateur  Citer des ordres de grandeurs des intensités, des tensions et des puissances mises en jeu dans différents domaines d'application.