

Chapitre 4 : Lois générales de l'électrocinétique dans l'ARQS

1 Courant électrique et tension

1.1 Charge électrique

Le courant électrique est créé par un mouvement de *porteurs de charges*, c'est-à-dire des espèces qui portent une charge électrique non nulle. Ces porteurs de charges peuvent être des électrons (dans un métal par exemple) ou des ions (dans une solution électrolytique). Une espèce chargée électriquement possède toujours une charge électrique q qui est un multiple entier relatif de la charge élémentaire $e = 1,6.10^{-19} \text{ C}$.

Un électron possède une charge $q = -e = -1,6.10^{-19} \text{ C}$. On appelle **cation** un ion chargé positivement (Na^+ , Cu^{2+} , H_3O^+) et **anion** un ion chargé négativement (Br^- , OH^- , SO_4^{2-}). De manière générale, un cation noté C^{p+} possède une charge $q = pe$ et un anion noté A^{n-} possède une charge $q = -ne$.

1.2 Définition du courant électrique

Un courant électrique est un *déplacement d'ensemble de charges libres*. En général, on met des charges électriques en mouvement à l'aide d'un champ électrique extérieur \vec{E} . Celui-ci exerce sur les charges électriques une force d'interaction électrostatique $\vec{F} = q\vec{E}$. Le sens de cette force dépend du signe de la charge. Ainsi, dans un circuit électrique, des charges de signes opposés se déplacent en sens opposés. Pour déterminer le sens du courant électrique, il faut donc faire un choix arbitraire. C'est André-Marie Ampère, en 1822, qui fixe une convention universelle :

Le sens positif du courant électrique est le sens de déplacement des charges **positives**.

1.3 Intensité du courant électrique

1.3.1 Définition

L'intensité du courant électrique qui traverse une section de conducteur est égale à la quantité de charge qui la traverse par unité de temps.

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

L'intensité correspond à un *débit de charge* à travers un conducteur. Dans un circuit électrique, le sens de déplacement des charges est a priori inconnu. Il faut donc choisir **arbitrairement** un sens pour i (on le représente par une flèche sur un schéma). Le signe de i (obtenu par le calcul ou expérimentalement à l'aide d'un ampèremètre) permettra de conclure sur le sens réel de déplacement des charges.

1.3.2 Intensité d'un faisceau monocinétique de particules identiques

Imaginons un conducteur électrique filiforme de section droite S qui contient n particules identiques (de charge électrique q) par unité de volume, se déplaçant toutes avec le même vecteur vitesse \vec{v} . On montre que le courant électrique qui parcourt le conducteur est proportionnel à la section de ce conducteur et s'exprime sous la forme :

$$i = nqvS$$

1.4 Potentiel électrique

Le potentiel électrique est une grandeur *locale* (c'est-à-dire qu'on parle du potentiel *en un point M de l'espace*) et *algébrique* (il peut être positif ou négatif). Il décrit la capacité d'un point de l'espace à attirer ou repousser des charges électriques.

- les particules de charge positive se déplacent spontanément en direction des zones où le potentiel est le plus faible.
- les particules de charge négative se déplacent spontanément en direction des zones où le potentiel est le plus fort.

Si jamais deux points d'un conducteur électrique ne sont pas au même potentiel, il apparaît généralement un flux de charges d'un point vers l'autre, c'est-à-dire un courant électrique.

1.5 Tension

La tension entre deux points A et B d'un circuit électrique est égale à la différence de potentiel (ddp) entre ces points :

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

Rq : la tension est *additive* ($u_{AC} = u_{AB} + u_{BC}$) et *antisymétrique* ($u_{BA} = -u_{AB}$).

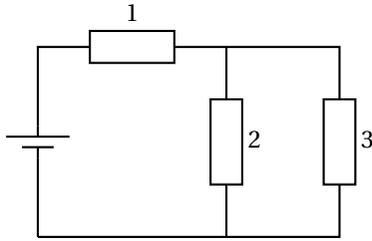
1.6 Masse d'un circuit électrique

En électricité, seule la **différence de potentiel entre deux points** constitue une information concrète qui permet de prévoir le comportement des charges dans un circuit. Si l'on choisit par exemple de rajouter la même valeur à tous les potentiels d'un circuit, cela ne modifie en rien sa description. On dit que le potentiel électrique est défini *à une constante près*, que l'on peut choisir **arbitrairement**. Cela revient à dire que l'on peut choisir arbitrairement un point de référence dans le circuit pour lequel le potentiel est *exactement* égal à zéro. Tous les autres potentiels du circuit sont ensuite définis sans ambiguïté à partir de cette référence, appelée la **"masse"** du circuit.

La masse d'un circuit électrique constitue un point arbitrairement choisi comme référence pour les potentiels électriques. Par définition, **le potentiel électrique de la masse est rigoureusement nul**.

2 Schéma d'un circuit électrique

Dans cette partie, on s'intéresse à la représentation schématisée d'un circuit électrique et à la manière dont vous pouvez le lire, l'interpréter, éventuellement le transformer, etc. Cette année, on étudiera principalement des circuits contenant des **dipôles**. Le schéma d'un tel circuit est constitué d'un ensemble de dipôles, reliés électriquement entre eux par des fils conducteurs, formant un réseau plus ou moins complexe. On y trouve un certain nombre de **branches**, connectées les unes aux autres par des **nœuds** et formant des **mailles**, comme l'illustre l'exemple ci-dessous.



2.1 Nœuds, branches, mailles

Un nœud est le point d'intersection d'au moins 3 fils électriques.

Une branche est une portion de circuit **située entre deux nœuds consécutifs**.

Une maille est une portion d'un circuit **formant un contour fermé** que l'on peut parcourir en ne passant qu'une seule fois par chaque nœud intermédiaire.

Application : dénombrer les nœuds, branches et mailles de ce circuit.

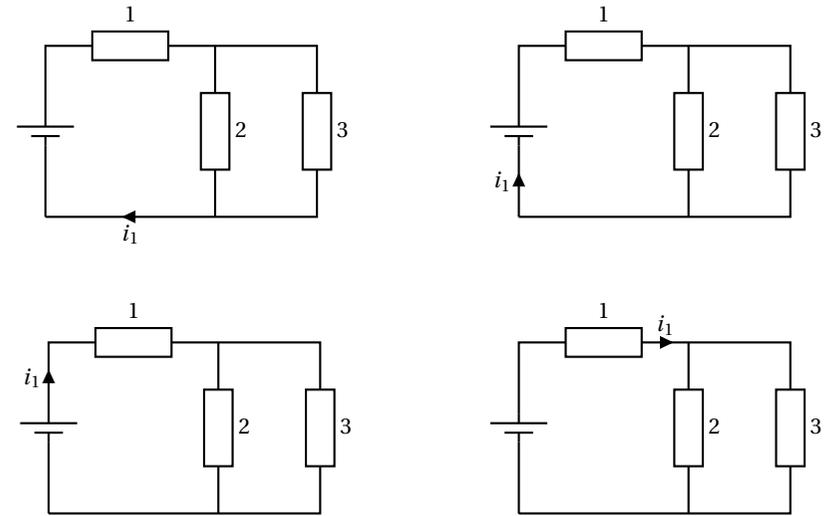
2.2 Conventions de représentation pour les intensités et les tensions

2.2.1 Intensité du courant

L'intensité du courant électrique est représentée par une flèche "à cheval" sur un fil conducteur. Son signe dépend du sens de la flèche. **Dans le schéma d'un circuit électrique, on peut choisir arbitrairement le sens d'un courant.**

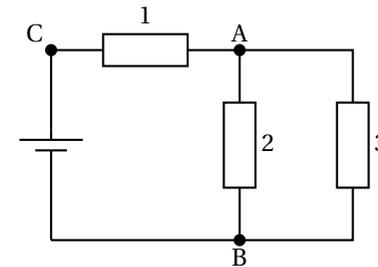
 Cette année, on se placera **toujours** dans des conditions qui permettent de supposer que **l'intensité du courant est identique en tout point d'une branche** (voir paragraphe 3.4.).

Dans une branche, on pourra donc placer arbitrairement la flèche de l'intensité. Par exemple, les schémas ci-dessous sont tous identiques.



2.2.2 Potentiel électrique

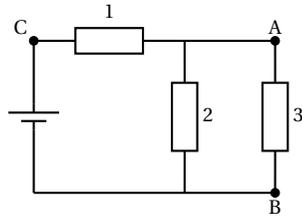
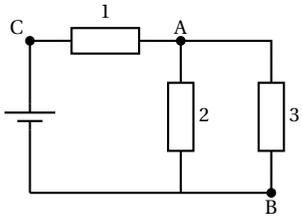
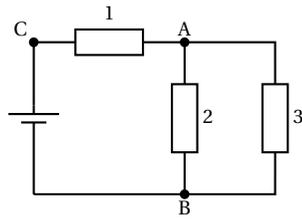
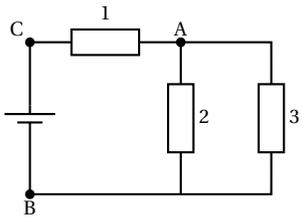
Sur un schéma, on n'écrit pas explicitement le potentiel électrique en un point d'un circuit. En revanche, il peut être utile d'attribuer un nom (généralement une lettre) aux différents points du circuit, afin de pouvoir nommer leur potentiel (voir l'exemple ci-dessous avec trois points A, B et C).



Le potentiel électrique étant défini en chaque point du circuit, on peut parler des potentiels électriques V_A , V_B et V_C .

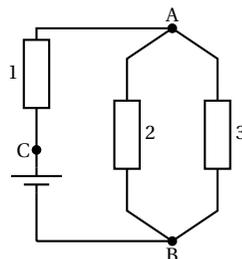
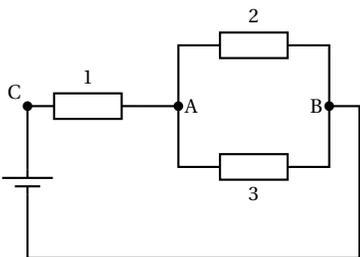
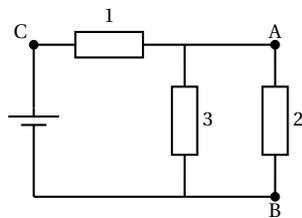
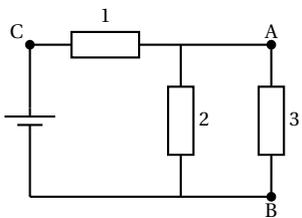
 Les fils conducteurs qui sont représentés sur le schéma d'un circuit électrique sont des objets idéaux supposés sans résistance électrique. Cette année, on se placera **toujours** dans des conditions qui permettent de supposer que **le potentiel électrique est identique en tout point d'un fil conducteur non résistif** (voir paragraphe 3.4.).

Sur un schéma, on pourra choisir arbitrairement le point d'un fil conducteur pour y définir le potentiel électrique. Par exemple, les schémas ci-dessous sont tous identiques.



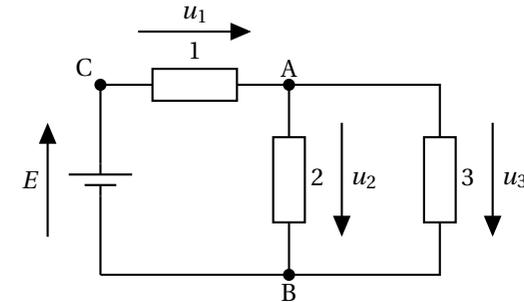
On notera que le point B garde le même potentiel même si l'on change de branche. **Tous les points d'un circuit qui sont reliés entre eux par des fils conducteurs non résistifs ont le même potentiel électrique.**

Les fils conducteurs que l'on voit sur un schéma peuvent représenter des objets physiques (des fils de connexion), mais pas obligatoirement. Il faut plutôt les voir comme des objets graphiques qui permettent de visualiser la façon dont les différents dipôles sont connectés les uns aux autres. Comme on va le voir, cela autorise une certaine liberté dans la représentation schématique des circuits. On peut librement modifier le schéma d'un circuit tant que l'on ne modifie pas sa structure, c'est-à-dire la manière dont les dipôles sont connectés les uns aux autres. Par exemple, les circuits ci-dessous sont tous identiques.



2.2.3 Tension

Une tension est représentée par une flèche allant d'un point d'un circuit électrique à un autre. Elle est le plus souvent représentée **aux bornes d'un dipôle**, mais ça n'est pas obligatoirement le cas. Comme pour l'intensité, le signe d'une tension dépend du sens dans lequel on la définit. **Dans le schéma d'un circuit électrique, on peut choisir arbitrairement le sens d'une tension.**



Sur ce schéma, il faut comprendre que $E = V_C - V_B$ et $u_1 = V_A - V_C$. On remarque que les tensions u_2 et u_3 sont identiques car $u_2 = u_3 = V_B - V_A$. Dans ce cas, on ne représente généralement qu'une seule flèche pour alléger le schéma.

2.3 Dipôles en série, en dérivation

Pour simplifier l'analyse d'un schéma électrique, l'une des premières choses à faire consiste à déterminer s'il existe des dipôles associés en série ou en dérivation/parallèle.

Deux (ou plus) dipôles sont en série **s'ils sont dans la même branche d'un circuit électrique**.
Deux dipôles en série sont parcourus *par la même intensité*.

Deux (ou plus) dipôles sont en parallèle (en dérivation) **s'ils partagent les mêmes bornes**.
Deux dipôles en parallèle ont *la même tension à leurs bornes*.

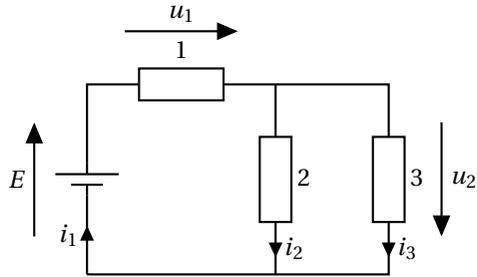
Application : Y a-t-il des dipôles en série ou en dérivation dans le circuit ? Si oui, lesquels ?

2.4 Annoter un schéma

Si vous rencontrez un schéma sans indication sur les tensions ou les intensités, c'est à vous de les définir. Pour cela, on attribue un nom :

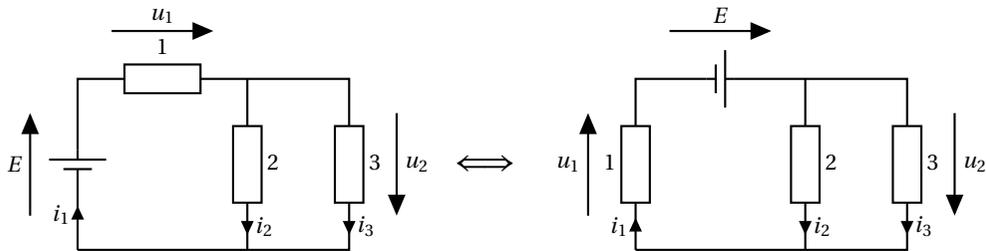
- au courant qui circule dans chaque branche,
- à la tension aux bornes de chacun des dipôles,
- éventuellement à certain points du circuit pour y définir leur potentiel.

Par exemple, on peut proposer le schéma suivant :



2.5 Notion de schémas équivalents

Dans un circuit électrique, les tensions aux bornes des différents dipôles ainsi que les intensités qui circulent dans les différentes branches sont inchangées si l'on intervertit la place de plusieurs dipôles branchés en série. Lorsque deux circuits sont différents mais que leur comportement électrique est identique (mêmes tensions, mêmes intensités), on dit qu'ils sont **équivalents**. Schématiquement, on pourra par exemple représenter les choses de cette manière :

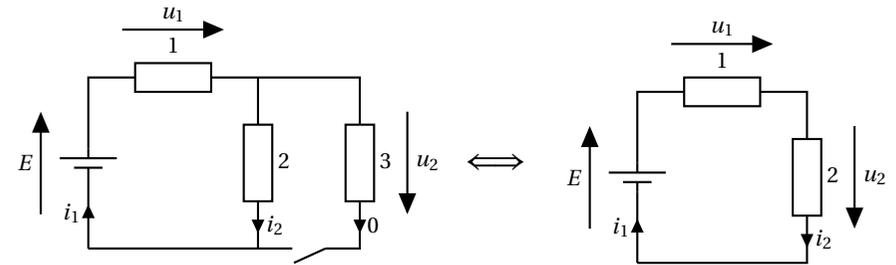


Contrairement aux exemples que l'on a vu dans les paragraphes précédents, ces deux circuits ne sont pas identiques car le potentiel du point situé entre la pile et le dipôle 1 n'est pas le même sur les deux schémas. En revanche, ce sont des circuits équivalents. Les tensions E , u_1 , u_2 et les intensités i_1 , i_2 et i_3 sont identiques pour les deux circuits.

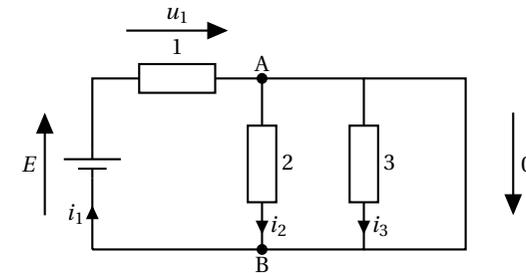
2.6 Interrupteur ouvert, court-circuit

Imaginons un circuit fermé dans lequel les intensités sont *a priori* non nulles dans les différentes branches. On réalise un interrupteur ouvert lorsque l'on ouvre une de ces branches. On retient qu'un interrupteur ouvert impose **un courant nul en tout point de la branche dans laquelle il se trouve**.

Une branche ouverte n'a pas d'influence sur le comportement électrique du reste du circuit. On peut donc la supprimer du schéma. Par exemple :



Imaginons un circuit fermé dans lequel les potentiels électriques sont *a priori* différents de part et d'autre des différents dipôles. On réalise un court-circuit lorsque l'on connecte deux de ces points avec un fil conducteur non résistif. On retient qu'un court-circuit impose **une tension nulle à ses bornes**.



Dans le circuit ci-dessus, les dipôles 2 et 3 sont court-circuités. On force $V_A = V_B$ donc la tension aux bornes de ces dipôles est nulle.

2.7 Ampèremètre, voltmètre

Un multimètre est un appareil électrique qui permet de mesurer une intensité (**ampèremètre**), une tension (**voltmètre**) ou une résistance électrique (**ohmmètre**). On l'utilise en mode DC (—) pour effectuer un mesurage en régime **continu** ou bien en mode AC (~) pour réaliser un mesurage en régime **alternatif**.

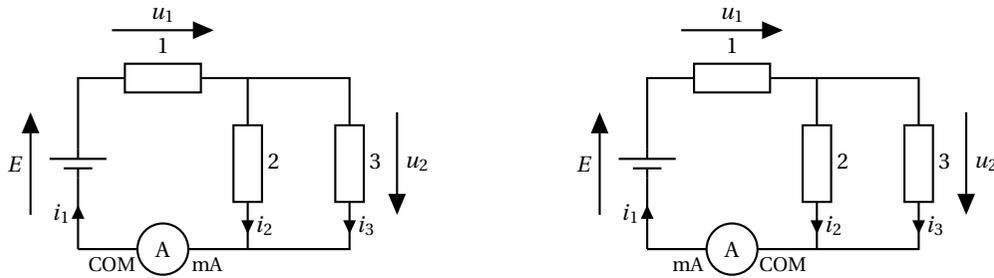
Quel que soit son mode d'utilisation, il possède différents **calibres** qui permettent d'obtenir un affichage précis sur une échelle très large de valeurs. On retient la consigne suivante :

On place par défaut le multimètre sur le calibre le plus élevé puis, une fois la valeur affichée sur l'écran, on obtient une précision maximale en choisissant **le calibre immédiatement au-dessus de la valeur affichée**.



L'ampèremètre permet de mesurer l'intensité (algébrique) du courant qui circule dans une branche. Selon le sens dans lequel il est branché, il affichera une valeur positive ou négative. Pour le brancher dans un circuit, on utilise les bornes **A** et **COM** (pour des intensités importantes) ou bien les bornes **mA** et **COM** (pour des intensités plus faibles). On retient la convention suivante :

Un ampèremètre mesure l'intensité du courant dans le sens qui **entre par la borne A (ou mA) et sort par la borne COM**.

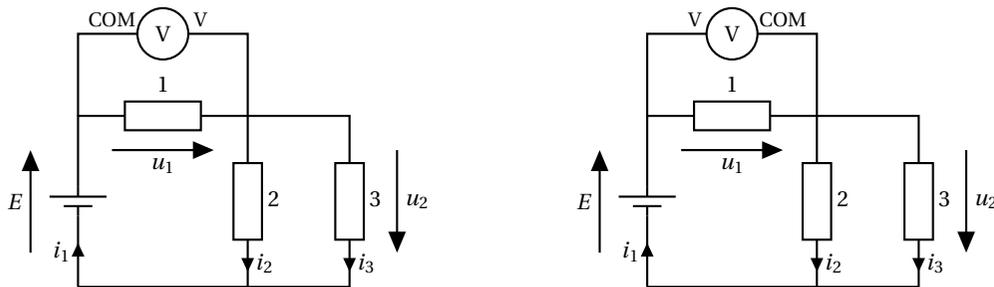


Sur la figure de gauche, l'ampèremètre mesure i_1 tandis que sur la figure de droite, il mesure $-i_1$.

Lorsqu'un ampèremètre est utilisé pour mesurer l'intensité du courant qui traverse un dipôle, il doit être branché **en série** avec ce dipôle.

Le voltmètre permet de mesurer la tension (algébrique) entre deux points d'un circuit électrique. Selon le sens dans lequel il est branché, il affichera une valeur positive ou négative. Pour le brancher dans un circuit, on utilise les bornes **V** et **COM**. On retient la convention suivante :

Un voltmètre mesure la tension $V_V - V_{COM}$.



Sur la figure de gauche, le voltmètre mesure u_1 tandis que sur la figure de droite, il mesure $-u_1$.

Lorsqu'un voltmètre est utilisé pour mesurer la tension aux bornes d'un dipôle, il doit être branché **en dérivation** avec ce dipôle.

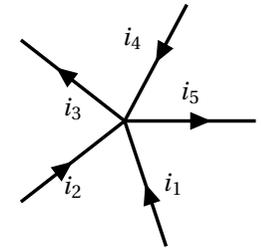
3 Lois de Kirchhoff en régime stationnaire

3.1 Conservation de la charge

La charge électrique ne peut être ni créée, ni détruite.

3.2 Loi des nœuds

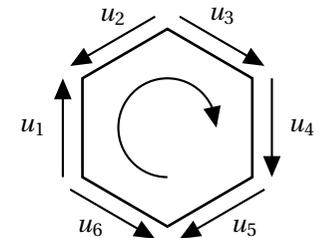
En régime stationnaire, la conservation de la charge implique que la quantité de charge qui arrive au niveau d'un nœud est égale à la quantité de charge qui quitte le nœud.



Loi des nœuds : La somme des courants se dirigeant vers un nœud est égale à la somme des courants qui s'en éloignent.

3.3 Loi des mailles

Pour établir la loi des mailles, il convient d'orienter **arbitrairement** la maille dans un sens ou dans l'autre.

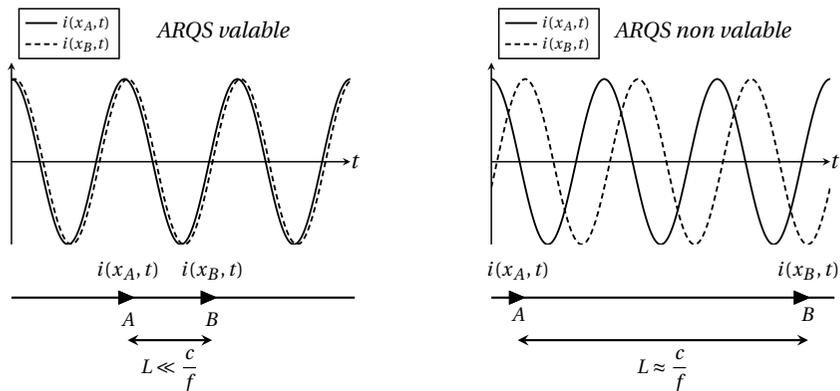


Loi des mailles : Dans une maille orientée arbitrairement, la somme des tensions orientées dans le sens arbitraire est égale à la somme des tensions orientées en sens contraire.

3.4 Approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS)

Lorsque les tensions et les intensités dépendent du temps, on est en régime **variable**. Dans un circuit électrique, les signaux se propagent sous la forme d'ondes dont la célérité c est proche de $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Contrairement au régime stationnaire, l'intensité et le potentiel électrique ne sont plus nécessairement les mêmes en tout point d'une branche.

Pour un circuit de taille caractéristique L , le retard temporel qui apparaît entre deux points d'une même branche est de l'ordre de L/c . Dans le cas où le temps de propagation est très faible devant le temps caractéristique de variation de $V(x, t)$ et $i(x, t)$ alors on peut faire l'approximation que les potentiels et les intensités sont les mêmes en tout point d'une branche (voir figure ci-dessous). Cela constitue le domaine de l'ARQS.



Dans l'ARQS, on fait l'approximation que l'intensité et le potentiel électrique ont la même valeur en tout point d'une branche. Cela revient à négliger le temps de propagation des signaux électriques au sein du circuit. Pour un signal périodique de fréquence f , le domaine de l'ARQS correspond aux fréquences qui vérifient :

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

Dans l'ARQS, les lois de Kirchhoff s'appliquent de la même manière qu'en régime stationnaire.

4 Puissance électrique

4.1 Puissance et énergie

- Un **générateur** est un appareil qui fournit de l'énergie électrique au circuit, un **récepteur** est un appareil qui consomme de l'énergie électrique. Il existe des appareils qui peuvent se comporter soit comme un générateur soit comme un récepteur (ex: batterie rechargeable)
- Un dipôle électrique échange avec le circuit une puissance $\mathcal{P} = \pm u(t)i(t)$ (nous verrons la question du signe plus tard). L'énergie électrique que ce dipôle échange avec le circuit entre deux dates t_1 et t_2 vaut :

$$\mathcal{E} = \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{P}(t) dt$$

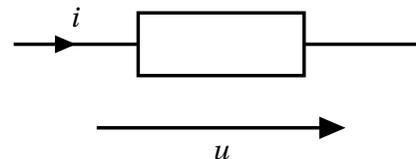
Dans le cas particulier d'un appareil qui consomme une puissance \mathcal{P} constante cette expression se simplifie de la manière suivante : $\mathcal{E} = \mathcal{P}\Delta t$ avec $\Delta t = t_2 - t_1$ l'intervalle de temps sur lequel l'énergie est consommée.

La puissance s'exprime en **watts** (W), l'énergie en **joules** (J). On verra dans ce chapitre qu'on calculera des puissances reçues et des puissances fournies. Ces grandeurs sont **algébriques** (il revient au même de dire pour un appareil que la puissance reçue vaut 30W ou bien que la puissance fournie vaut -30W).

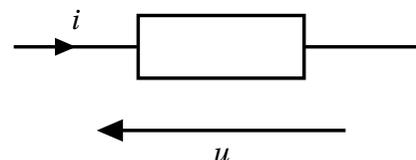
4.2 Convention générateur et récepteur

Les conventions générateur et récepteur sont des **conventions de représentation schématique** des dipôles électriques.

- En **convention générateur**, la tension aux bornes d'un dipôle et l'intensité qui le traverse sont orientées dans le même sens.



- En **convention récepteur**, la tension aux bornes d'un dipôle et l'intensité qui le traverse sont orientées en sens opposés.



4.3 Puissance échangée entre un dipôle et un circuit

On a vu que la puissance échangée entre un dipôle et un circuit est égale à $\pm u(t)i(t)$. Selon que l'on parle de puissance reçue ou fournie et suivant la convention de représentation choisie pour $u(t)$ et $i(t)$, on écrira cette puissance avec un signe - ou un signe +. Ces signes sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

convention \ puissance	reçue	fournie
	récepteur	$+ui$
générateur	$-ui$	$+ui$

- on dit qu'un dipôle se comporte comme un générateur s'il fournit au circuit une puissance électrique positive ;
- on dit qu'un dipôle se comporte comme un récepteur s'il reçoit du circuit une puissance positive.