
Chapitre 4

Lois générales de l'électrocinétique

I. Cadre d'étude

1. Régime stationnaire ou variable
2. Approximation des régimes quasi-stationnaires

II. Intensité d'un courant électrique

1. Définitions
2. Intensité dans une branche
3. Loi des nœuds

III. Tension électrique aux bornes d'un dipôle

1. Définitions
2. Loi des mailles

IV. Description d'un dipôle électrique

1. Conventions d'orientation
2. Puissance électrique
3. Caractéristique courant-tension

4. Propriétés

- 4.1 Dipôle linéaire
- 4.2 Dipôles passifs et actifs
- 4.3 Dipôles symétriques et polarisés

V. Exemples de dipôles linéaires

1. Dipôle linéaire passif : le résistor
 - 1.1 Loi d'Ohm
 - 1.2 Caractéristique
 - 1.3 Aspect énergétique : effet Joule
 - 1.4 Associations de résistors
2. Dipôle linéaire actif
 - 2.1 Sources idéales
 - 2.2 Modélisation linéaire d'une source réelle
3. Association d'un dipôle actif et d'un dipôle passif



AC ⚡ DC

Le cours

I. Cadre d'étude

L'électrocinétique vise à donner une description efficace du mouvement des charges et de l'énergie dans des circuits électriques en s'appuyant sur des grandeurs mesurables que sont le courant et la tension, sans avoir besoin de décrire précisément le comportement microscopique.

1. Régime stationnaire ou variable

Le régime est dit stationnaire ou continu si les grandeurs ne dépendent pas du temps. Les grandeurs sont alors généralement notées en majuscules (I, U, Q, \dots).

Dans le cas contraire, le régime est dit variable : les grandeurs électriques dépendent du temps. Les grandeurs sont notées en minuscules ($i(t), u(t), q(t), \dots$).

2. Approximation des régimes quasi-stationnaires

Les variations du courant et de la tension électrique se propagent dans un circuit à une vitesse proche de la vitesse de la lumière dans le vide : ses grandeurs sont associées à des ondes.

Elles dépendent donc du point du circuit considéré à l'instant t . Le signal en un point N à l'instant t et situé à une distance l d'un point M est le même que le signal en M à l'instant $t - \tau$.

Nous verrons, dans le chapitre 9 traitant des signaux et des ondes, comment écrire une grandeur se propageant: $i_N(t) = i_M(t - \tau)$ où $\tau \approx \frac{l}{c}$ est le retard dû à la propagation entre M et N .

Si les temps caractéristiques intervenant dans l'étude du circuit (période si le régime est périodique, temps d'acquisition des mesures, durée du régime transitoire, ...) sont très grands devant la durée de propagation alors on pourra négliger le phénomène de propagation. Cette approximation s'appelle l'approximation des régimes quasi stationnaires (ARQS).

Voyons si l'ARQS est vérifiée au laboratoire de TP : Considérons pour cela des régimes périodiques. Les fréquences maximales sont de l'ordre de $f_{max} \approx 1$ MHz et la période minimale est donc $T_{min} = 1/f_{max}$: les grandeurs électriques évolueront avec des temps caractéristiques supérieurs à T_{min} .

Condition ARQS : $T_{min} \gg \tau$ soit $l \ll \frac{c}{f_{max}}$ d'où $l \ll 300$ m. La longueur des fils est de l'ordre du mètre en TP donc cette condition est largement vérifiée.

II. Intensité d'un courant électrique

1. Définitions

La charge électrique est une grandeur scalaire conservative positive ou négative, exprimée en coulombs (symbole C) qui permet à la matière d'interagir par le biais de champs électromagnétiques. La charge électrique est quantifiée : toute charge électrique rencontrée dans la nature est un multiple entier relatif de la charge élémentaire $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

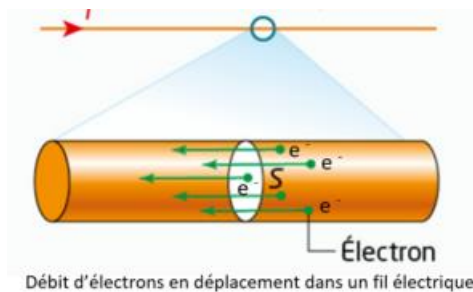
A l'échelle macroscopique, le nombre d'électrons ou d'ions est de l'ordre du nombre d'Avogadro $N_a = 6,022 \cdot 10^{23}$. La quantification de la charge n'est pas perceptible car la charge totale est en général très supérieure à e : **la charge est considérée continue à l'échelle macroscopique.**

Le courant électrique résulte du déplacement d'ensemble de particules chargées.

Par convention, le sens positif du courant est celui des charges positives.

Exemples de particules chargées :

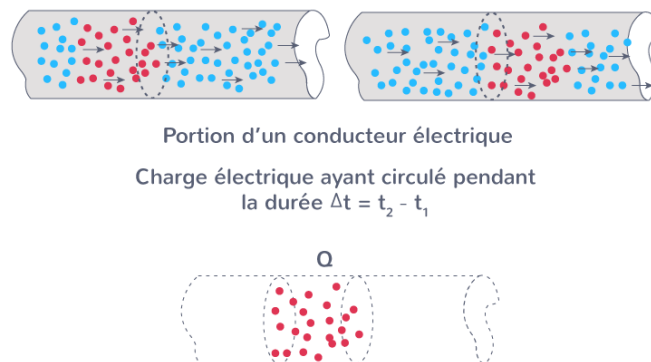
- Ions (déplacement en une solution électrolytique),
- Électrons (déplacement dans les métaux)



L'intensité électrique d'un courant à travers une section S est la quantité de charge électrique qui traverse S par unité de temps.

Elle s'exprime en Ampère (A).

On considère une portion conductrice dans laquelle se déplacent des particules chargées. On s'intéresse à la charge Q ayant traversé une section du conducteur entre 2 instants t_1 et t_2 .



$$\text{L'intensité moyenne pendant } \Delta t \text{ est } I_{\text{moy}} = \frac{Q}{\Delta t}.$$

Si on fait une étude sur une durée très courte notée dt , la charge élémentaire ayant traversé la section est alors notée δq et l'intensité (instantanée) est $i(t) = \frac{\delta q}{dt}$.

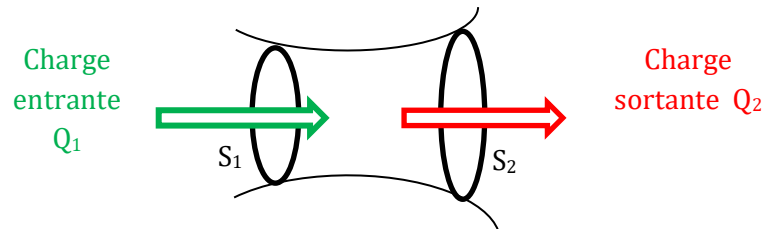
Ordres de grandeur :

- Dans une DEL $I = 10 \text{ mA}$
- Dans une ampoule, $I = 1 \text{ A}$
- Dans un démarreur auto $I = 100 \text{ A}$
- Electrocution $I = 75 \text{ mA}$

2. Intensité dans une branche

Etudions pendant une durée Δt une portion d'un conducteur parcourue par un courant et comprise entre deux sections S_1 et S_2 .

On note Q_1 la charge traversant S_1 pendant Δt et I_1 l'intensité associée ainsi que Q_2 la charge traversant S_2 pendant la même durée Δt et I_2 l'intensité associée.



En régime stationnaire, la charge Q se conserve : la variation $\Delta Q = 0$ donc $Q_1 = Q_2$

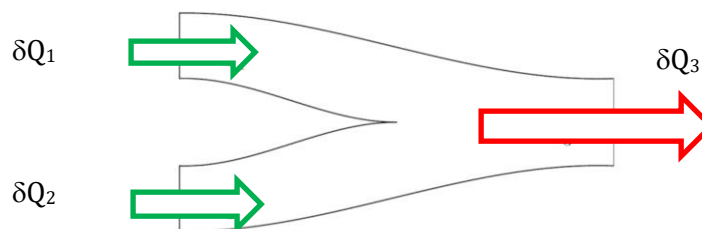
Les intensités I_1 et I_2 sont donc égales : $\frac{Q_1}{\Delta t} = \frac{Q_2}{\Delta t} \Rightarrow I_1 = I_2$

Dans l'ARQS, intensité d'un courant électrique est la même en tout point d'une branche.

3. Loi des nœuds

Dans l'ARQS, il n'y a pas d'accumulation de charge dans une portion de conducteur : $Q = \text{constante}$.

Considérons une portion de conducteur autour d'un nœud en régime stationnaire ou dans l'ARQS.



Pendant une durée dt : charge entrante = charge sortante $\Rightarrow \delta Q_1 + \delta Q_2 = \delta Q_3$

Ainsi $i_1 + i_2 = i_3$

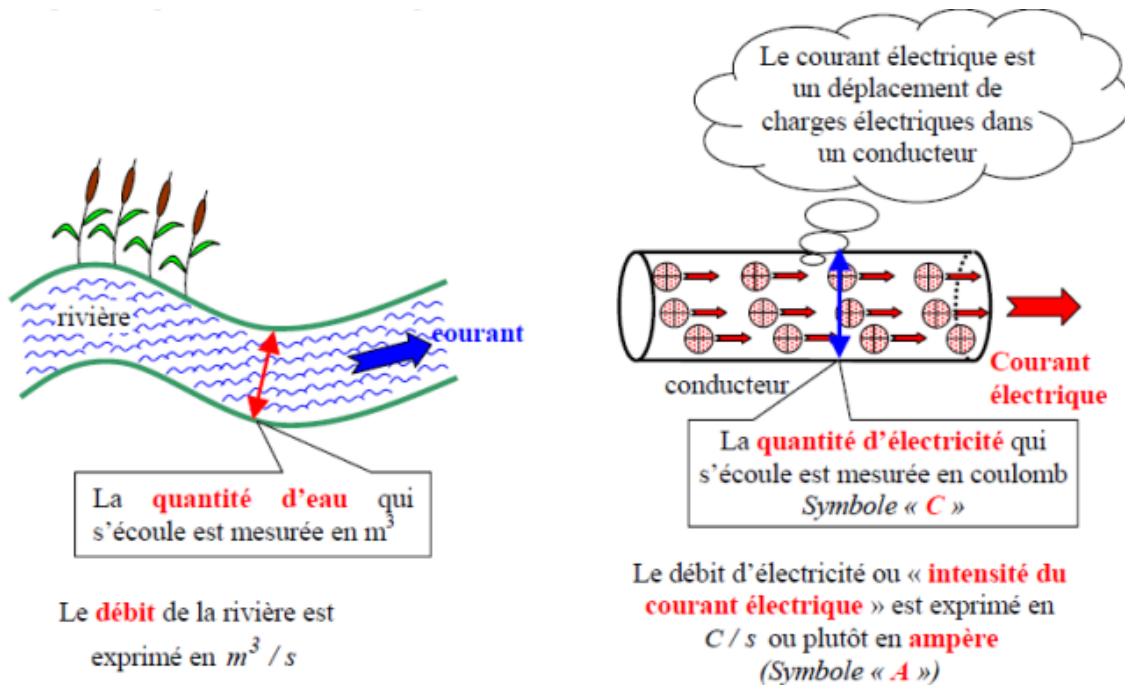
Loi des nœuds

En régime stationnaire et dans l'ARQS, la somme des intensités des courants arrivant en un nœud est égale à la somme des courants qui en repartent.

Pour un nœud reliant n branches, $\sum_{k=1}^n \varepsilon_k i_k = 0$

où $\varepsilon_k = 1$ si i_k est dirigée vers le nœud et $\varepsilon_k = -1$ sinon.

Remarque : On peut comparer le courant électrique à un écoulement d'eau dans une rivière.

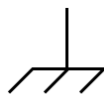


III. Tension électrique aux bornes d'un dipôle

1. Définitions

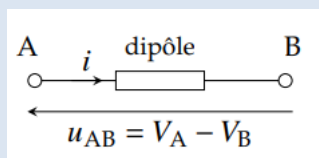
Le potentiel électrostatique en un point correspond à l'énergie potentielle électrostatique que posséderait une charge électrique de 1 C située en ce point. Il s'exprime en Volt (V).

Dans un circuit, l'origine des potentiels est choisie arbitrairement, elle s'appelle **la masse**. Les potentiels des autres points du circuit sont repérés par rapport à cette référence.



Symbole de la masse

En régime stationnaire et dans l'ARQS, la tension électrique entre deux points A et B d'un circuit est égale à la différence de potentiel entre A et B :



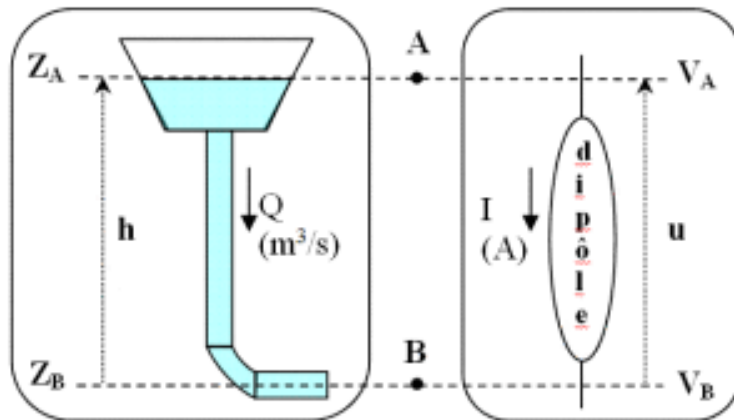
Elle s'exprime en Volt (V).

Ordres de grandeur :

- Pile : $U = 1.5V ; 9 V...$
- Réseau EDF domestique : $U = 230 V$ (220-240 en Europe)
- TGV : $U = 25 kV$
- Ligne THT : $U = 225 \text{ à } 400 kV$

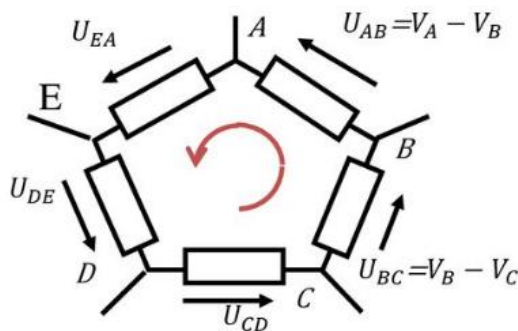
La tension aux bornes d'un fil est nulle.

Remarques : On peut là aussi faire une analogie avec l'écoulement de l'eau. Dans une chute d'eau : l'eau descend, elle se déplace naturellement vers les zones où son énergie potentielle de pesanteur (fonction croissante de l'altitude) est plus petite : déplacement des hautes altitudes vers les basses altitudes. Les charges positives elles aussi ont un mouvement naturel des hauts potentiels vers les bas potentiels. Par contre, à l'image d'une pompe hydraulique qui remonte l'eau, à l'intérieur d'un générateur électrique, le mouvement est forcé : les charges positives se déplacent vers les zones de plus fort potentiel électrique.



2. Loi des mailles

En régime stationnaire et dans l'ARQS, la tension U_{AB} est définie comme la différence de potentiel entre les points A et B. On peut exprimer la tension U_{AA} (qui est nulle par définition) en utilisant une relation similaire à la relation de Chasles (on fait le tour de la maille) :



$$U_{AB} + U_{BC} + \dots + U_{EA} = 0$$

$$(V_A - V_B) + (V_B - V_C) \dots$$

$$(V_E - V_A) =$$

$$(V_A - V_A) = 0$$

Généralisons :

Loi des mailles

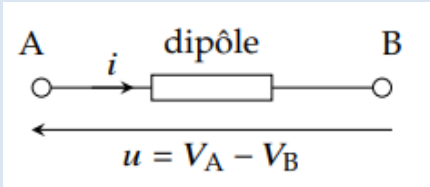
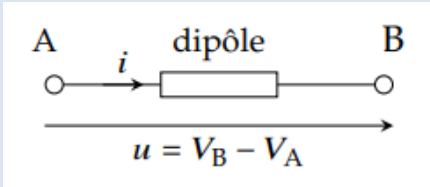
Dans une maille orientée, en régime stationnaire et dans l'ARQS, la somme des tensions orientées dans le sens de la maille est nulle :

$$\sum_{\text{maille}} \epsilon_k \cdot u_k = 0$$

où $\epsilon_k = 1$ si la tension est dirigée dans le sens choisi de la maille et $\epsilon_k = -1$ sinon.

IV. Description d'un dipôle électrique

1. Conventions d'orientation

Convention récepteur :	Convention générateur :
Les flèches de tension et de courant sont en sens opposés	Les flèches de tension et de courant sont de même sens
	

2. Puissance électrique

De manière générale : $P(t) = u(t) i(t)$ La puissance électrique s'exprime en watt (W).

En convention récepteur : $P(t) = u(t) i(t)$ est la puissance algébriquement reçue.

- Si $ui > 0$ alors le dipôle reçoit de l'énergie électrique du reste du circuit : c'est un **récepteur**.
- Si $ui < 0$ alors le dipôle fournit de l'énergie électrique au reste du circuit : c'est un **générateur**

En convention générateur : $P = ui$ est la puissance algébriquement fournie.

- Si $ui > 0$ alors le dipôle fournit de l'énergie électrique au reste du circuit : c'est un **générateur**
- Si $ui < 0$ alors le dipôle reçoit de l'énergie électrique du reste du circuit : c'est un **récepteur**.

La convention est arbitraire et ne présume en rien le rôle générateur ou récepteur du dipôle.

Ordre de grandeur des puissances :

DEL : 1mW

Lampe : 30 W

Appareil électroménager : quelques kW

Moteur TGV : 1MW

Il faudra préciser la convention utilisée pour chaque dipôle dès le début de l'étude d'un circuit électrique en fléchant les courants et les tensions et préciser si les puissances calculées sont les puissances reçues ou cédées.

AP 3

3. Caractéristique courant-tension

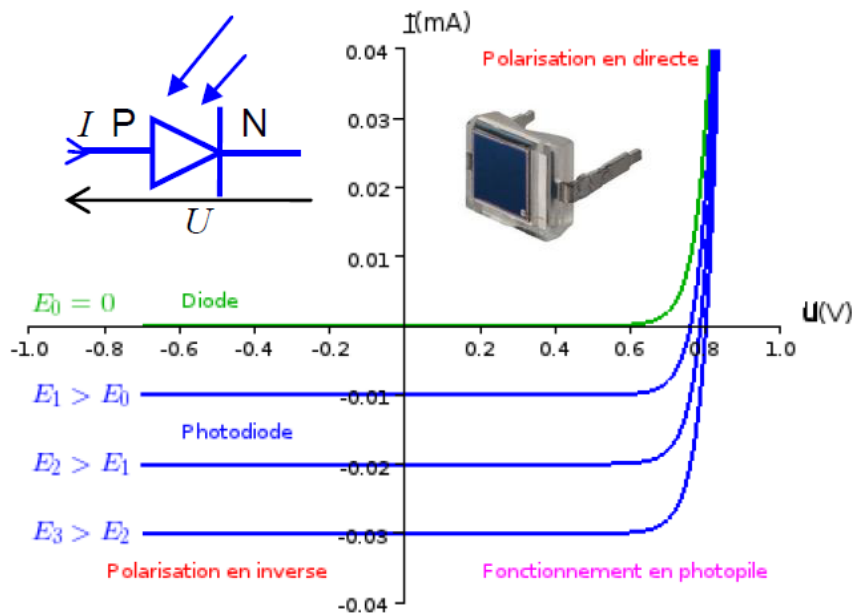
On appelle caractéristique courant-tension d'un dipôle la courbe $i(u)$ représentant les variations du courant i le traversant en fonction de la tension u à ses bornes.

Lors du fonctionnement du dipôle, le point M donnant u et i est appelé le point de fonctionnement.

En régime permanent, on parle de caractéristique statique. Le principe de sa construction expérimentale sera vu en TP.

Une caractéristique est associée à un choix de convention ! Exemple : caractéristique statique d'une photodiode en convention récepteur

Exemple : Une photodiode. On voit qu'on obtient plusieurs courbes selon l'éclairement de la photodiode. On remarque aussi que selon le point de fonctionnement (U, I) sur la caractéristique, le composant aura un comportement récepteur (UI > 0) ou générateur (UI < 0).



4. Propriétés

4.1 Dipôle linéaire

Un dipôle est linéaire si la tension $u(t)$ à ses bornes et l'intensité du courant $i(t)$ qui le traverse sont reliées par une équation différentielle à coefficients constants :

$$a_0 u(t) + a_1 \frac{du(t)}{dt} + a_2 \frac{d^2 u(t)}{dt^2} + \dots + b_0 i(t) + b_1 \frac{di(t)}{dt} + b_2 \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + \dots = F(t)$$

En régime permanent, la caractéristique statique est une droite.

Contre exemples : Une diode, une photodiode sont des dipôles non linéaires.

4.2 Dipôles passifs et actifs

La caractéristique statique d'un dipôle passif passe par l'origine.

Exemples : La diode est un dipôle passif, la photodiode est un dipôle actif.

4.3 Dipôles symétriques et polarisés

Un dipôle est symétrique si le fonctionnement du circuit est inchangé lorsqu'on permute ses bornes, un changement de i en $(-i)$ entraîne un changement de u en $(-u)$.

La caractéristique statique d'un dipôle symétrique est symétrique par rapport à l'origine. Sinon le dipôle est dit polarisé.

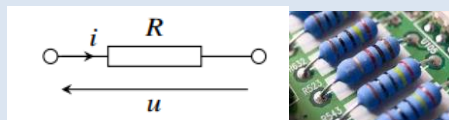
Exemple : la diode est un dipôle polarisé.

V. Exemples de dipôles linéaires

1. Dipôle linéaire passif : le résistor

1.1 Loi d'Ohm

Un conducteur ohmique ou résistor est un dipôle vérifiant la loi d'Ohm.



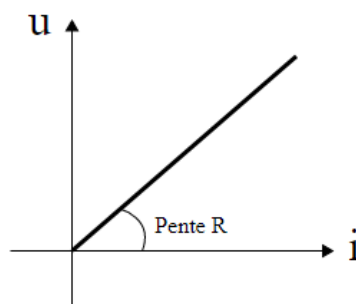
En convention récepteur, $u = Ri$. R est la résistance, elle s'exprime en ohm (Ω).

Remarque :

- La résistance d'un fil est supposée nulle donc la tension aux bornes d'un fil est nulle.
- Un interrupteur ouvert peut être vu comme une résistance infinie : le courant est nul dans sa branche mais sa tension est à priori non nulle.

1.2 Caractéristique

Une résistance est un dipôle linéaire, passif et symétrique.



1.3 Aspect énergétique : effet Joule

En convention récepteur, la puissance électrique instantanée reçue par le résistor :

$$p(t) = u(t)i(t) = Ri(t)^2 = \frac{u(t)^2}{R}$$

La puissance reçue est toujours positive, elle provoque une augmentation de l'énergie dans le dipôle qui ne peut la stocker. Cette énergie doit donc être évacuée, ce qui provoque un échauffement de la résistance.

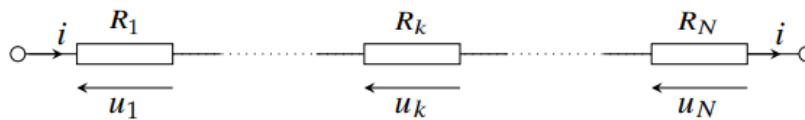
Un résistor est un récepteur qui convertit l'énergie électrique reçue en chaleur, c'est l'effet Joule.

Applications : chauffage électrique, lampe à incandescence.

1.4 Associations de résistors

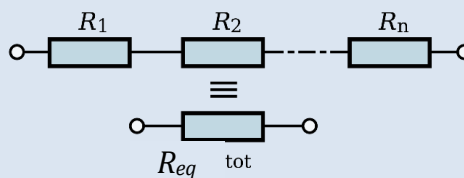
✓ Association en série

Les résistances appartiennent à la même branche et sont parcourues par le même courant.



Résistance équivalente :

Lorsque l'on associe plusieurs conducteurs ohmiques en série, leurs résistances s'ajoutent.



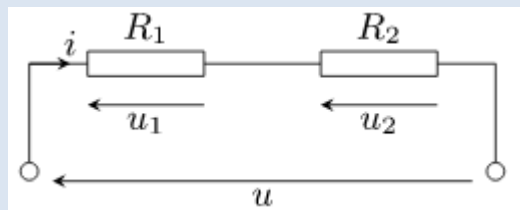
$$R_{eq} = \sum_{k=1}^n R_k$$

Pont diviseur de tension :

Le pont diviseur de tension consiste à exprimer la tension aux bornes d'un conducteur ohmique en fonction de sa résistance, de la résistance équivalente et de la tension aux bornes de l'ensemble. Il traduit la proportionnalité à courant constant entre u et R dans le cas d'une résistance : c'est donc une conséquence directe de la loi d'Ohm.

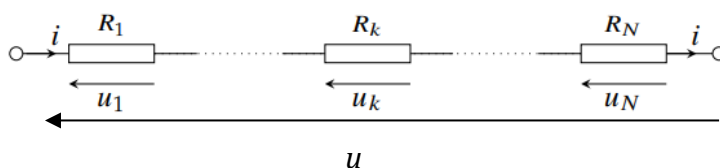
Pont diviseur de tension : applicable pour un ensemble de résistances en série

Cas de 2 résistances :



La tension aux bornes de la résistance R_1 est $u_1 = u \frac{R_1}{R_1+R_2}$

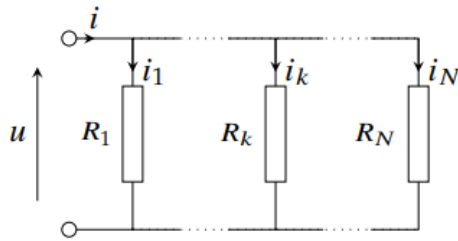
Remarque : cas de n résistances en série



$$u_k = u \frac{R_k}{\sum_{k=1}^n R_k}$$

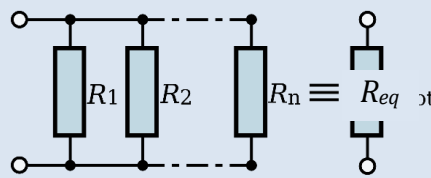
✓ Association en parallèle

Les résistances sont branchées entre les mêmes nœuds et sont soumises à la même tension.



Résistance équivalente :

Lorsque l'on associe plusieurs conducteurs ohmiques en parallèles, leurs conductances s'ajoutent.



$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}$$

Cas particulier de 2 résistances : $R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$

Cas particulier de n résistances R identiques : $R_{eq} = \frac{R}{n}$

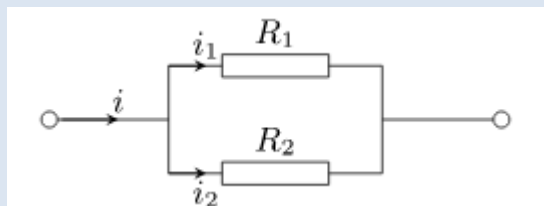
Pont diviseur de courant :

Le pont diviseur de courant consiste à exprimer l'intensité traversant un conducteur ohmique en fonction de sa résistance, de la résistance équivalente et de l'intensité du courant traversant l'ensemble.

Il traduit la proportionnalité à tension constante entre i et $\frac{1}{R}$ dans le cas d'une résistance : c'est donc une **conséquence directe de la loi d'Ohm.**

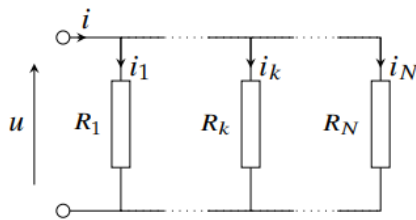
Pont diviseur de courant : applicable pour un ensemble de résistances en parallèle.

Cas de 2 résistances :



L'intensité traversant la résistance R_1 est : $i_1 = i \frac{R_2}{R_1 + R_2}$

Remarque : cas de n résistances en parallèles :



$$i_k = i \frac{\frac{1}{R_k}}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}}$$

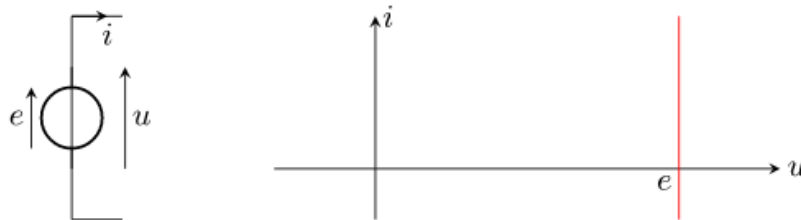
AP 4 et 5

2. Dipôle linéaire actif

2.1 Sources idéales

✓ Source idéale de tension

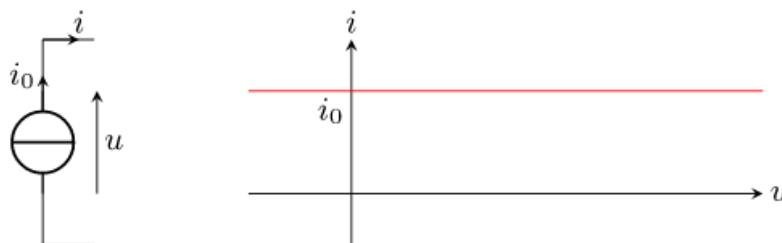
Une source idéale de tension est un dipôle capable d'imposer une tension à ses bornes indépendamment de l'intensité débitée. On appelle force électromotrice la quantité e telle que $u = e \forall i$



Remarque : La tension d'un tel générateur est parfaitement connue mais pas l'intensité du courant délivré qui dépend du circuit auquel il est branché.

✓ Source idéale de courant

Une source idéale de courant est un dipôle capable de débiter une intensité constante indépendamment de la tension à ses bornes. On appelle courant électromoteur la quantité i_0 telle que $i = i_0 \forall u$.

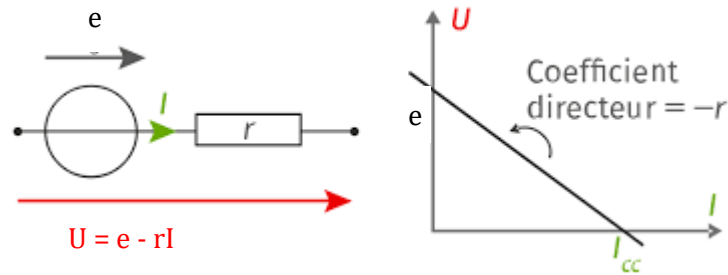


Remarque : Le courant débité par un tel générateur est parfaitement connu mais la tension à ses bornes dépend du circuit auquel il est branché.

2.2 Modélisation linéaire d'une source réelle

On modélise une source réelle par une source idéale en série avec une résistance r dite résistance interne.

Ce modèle est appelé modèle équivalent de Thévenin (MET).

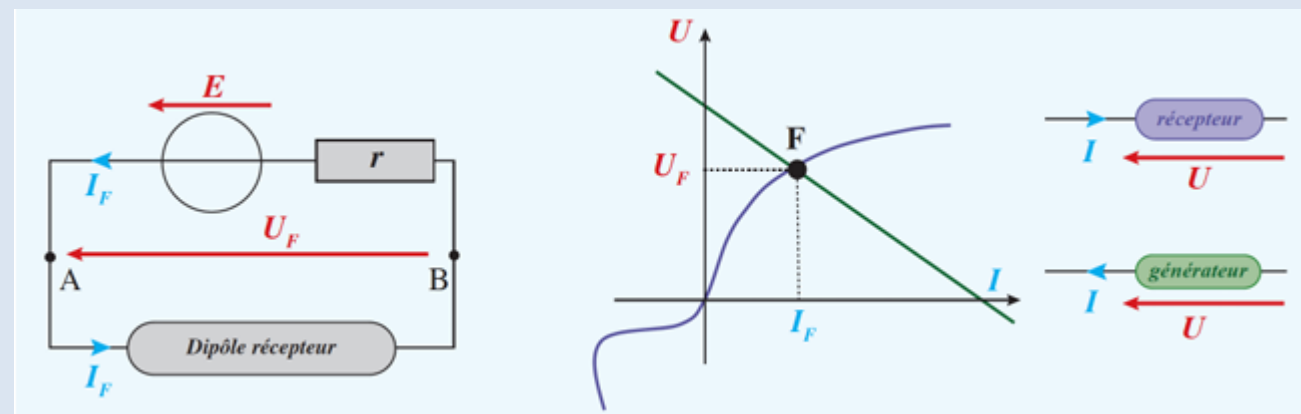


- e est la tension à vide de la source réelle (tension lorsque le courant est nul).
- i_{cc} est l'intensité de court-circuit (intensité sous tension nulle)

3. Association d'un dipôle actif et d'un dipôle passif

On réalise un circuit constitué d'un générateur et d'un dipôle récepteur. Le schéma de circuit montre qu'ils sont parcourus par la même intensité et que la même tension s'applique à leurs bornes, le générateur étant en convention générateur et le récepteur en convention récepteur.

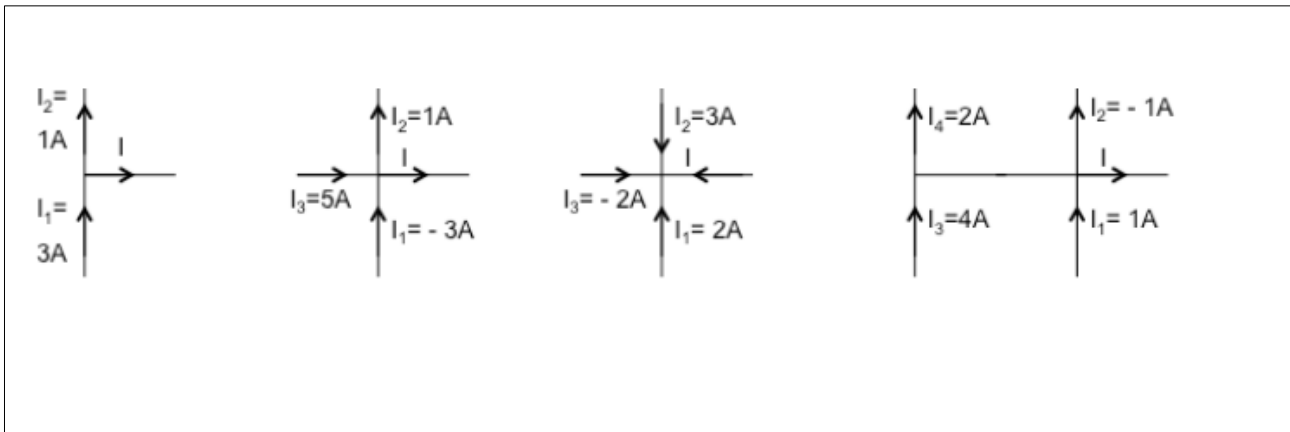
Les valeurs prises par les grandeurs électriques dans le circuit correspondent donc au point d'intersection des deux caractéristiques de ces dipôles dans les conventions appropriées ; ce point d'intersection est appelé point de fonctionnement du circuit.



Applications

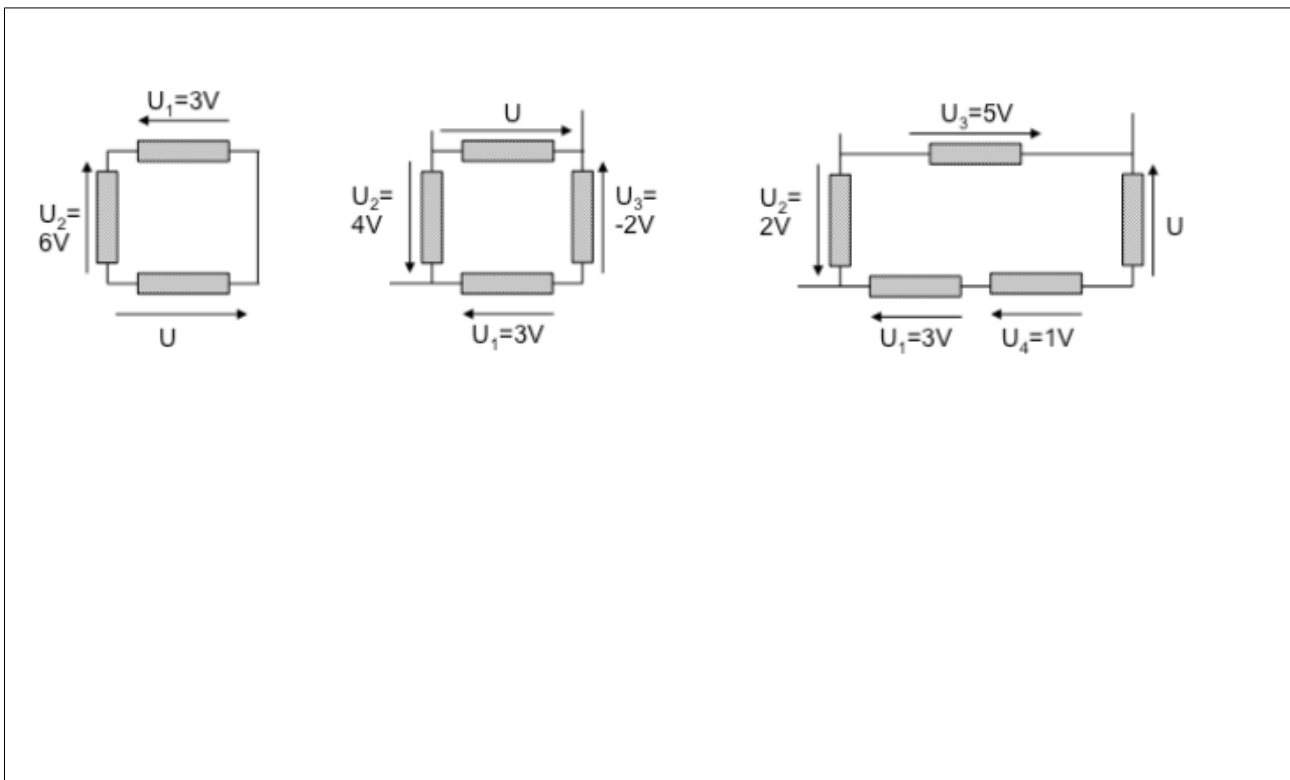
Application 1 : Lois des nœuds

Déterminer l'intensité I dans les circuits suivants.



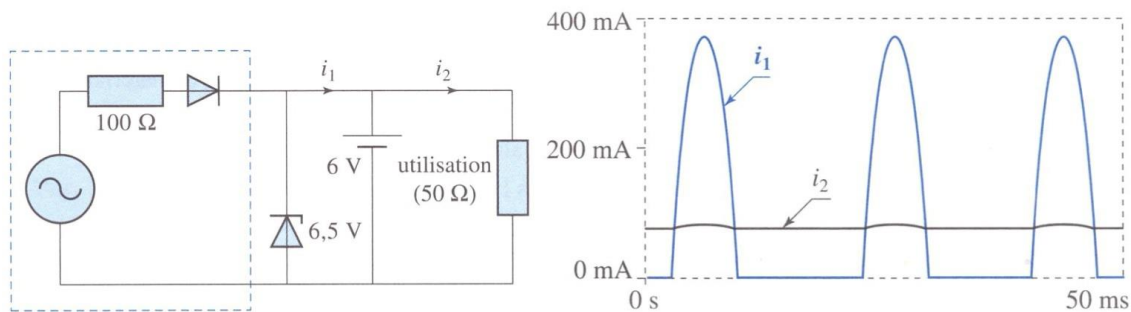
Application 2 : Lois des mailles

Déterminer la taille U dans les circuits suivants.



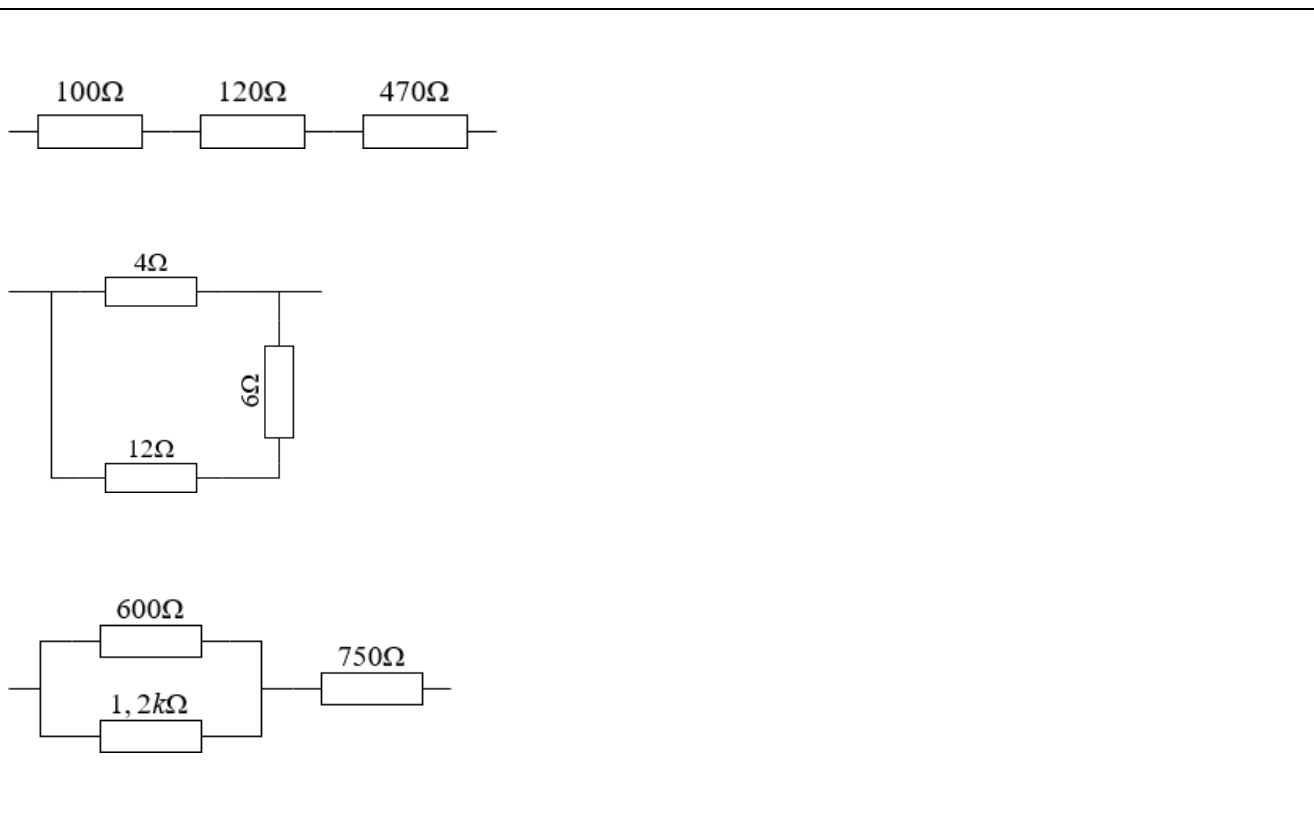
Application 3 : Générateur ou récepteur

Indiquer quand est-ce que la batterie de 6 V dans le circuit ci-dessous fonctionne en récepteur ou en générateur.



Application 4 : Résistance équivalente

Calculer la résistance équivalente dans chaque cas.



Application 5 : Etude d'un circuit

Soit le groupement ci-dessous, dans lequel les résistances valent $R_1 = 4\Omega$, $R_2 = 4\Omega$, $R_3 = 3\Omega$, $R_4 = 3\Omega$. On relie A et C aux pôles respectivement positif et négatif d'un générateur de tension $E = 9V$.

A l'aide des ponts diviseurs et simplification de circuit, calculez la tension u_{BC} et l'intensité des courants passant dans chaque résistance.

