

Chapitre 4

Lois générales de l'électrocinétique

I. Description d'un circuit électrique

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

II. Intensité d'un courant électrique

1. Définitions
2. Intensité dans une branche en régime stationnaire
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. Dipôle linéaire

V. Exemples de dipôles linéaires

1. Dipôle linéaire passif : le résistor

1.1 Loi d'Ohm

1.2 Caractéristique courant -tension

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

VI. Etude d'un circuit électrique



AC ⚡ DC

I. Description d'un circuit électrique

Circuit électrique : ensemble de composants électriques, reliés entre eux par des fils de connexion permettant le passage d'un courant électrique.

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. Vocabulaire

Dipôle électrique : composant électrique comportant 2 bornes (entrée et sortie d'un courant).

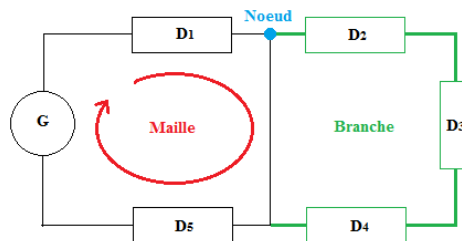


Exemple : pile, résistance...

Nœud : borne commune à au moins 3 fils de connexion.

Branche : portion du circuit entre deux nœuds consécutifs.

Maille est un ensemble de branches successives définissant un circuit fermé (part d'un nœud et y revient) et ne passant qu'une seule fois par chaque nœud intermédiaire.



Dipôle en dérivation : deux dipôles en dérivation ou parallèle sont branchés entre les mêmes nœuds.

Dipôle en série : deux dipôles en série sont dans la même branche.

2. 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 ($i(t), u(t), q(t), \dots$).

3. 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 qui se propage : $i_N(t) = i_M(t - \tau)$ 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).

L'ARQS est-elle vérifiée en TP ?

Considérons pour cela des régimes périodiques. Les fréquences maximales sont de l'ordre de $f_{\max} \approx 1 \text{ MHz}$ et la période minimale est donc $T_{\min} = 1 \mu\text{s}$.

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

Sauf mention contraire, l'ARQS sera toujours vérifiée dans tout le cours de CPGE, en particulier dans la suite de ce cours. Les résultats établis en régime permanent restent valables en régime (lentement) variable.

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. Ainsi, pour un système isolé, c'est-à-dire qui n'échange ni matière ni énergie, la charge reste constante au cours du temps.

La charge électrique est **quantifiée** : toute charge électrique rencontrée dans la nature est un multiple entier relatif de la charge élémentaire $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

À 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.

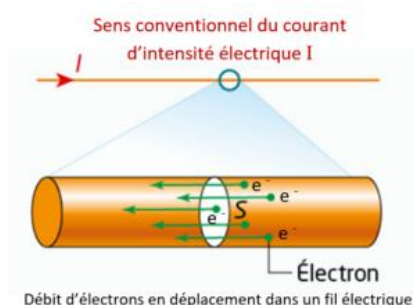
Le courant électrique est un déplacement d'ensemble de particules libres chargées.

Exemples de charges libres :

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

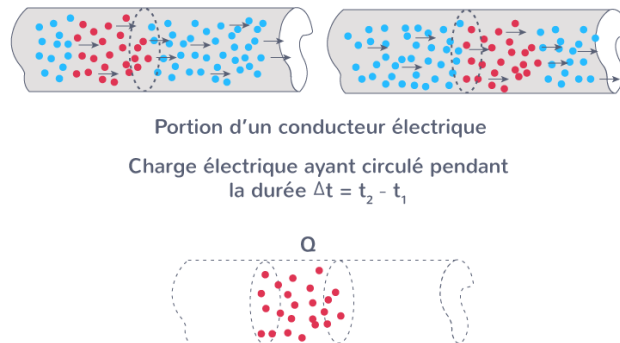
Par convention, le sens positif du courant est celui des charges libres positives.

Remarque : Le déplacement de charges négatives est équivalent à celui de charges positives identiques mais qui iraient en sens contraire.



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



L'intensité moyenne pendant Δt 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 est $i(t) = \frac{\delta q}{dt}$.

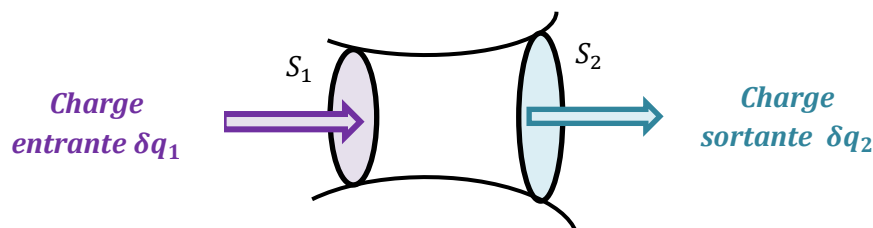
Ordres de grandeur :

- 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 en régime stationnaire

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

On note δq_1 la charge traversant S_1 pendant dt et I_1 l'intensité associée ainsi que δq_2 la charge traversant S_2 pendant la même durée dt et I_2 l'intensité associée.



En régime stationnaire, la charge Q contenue dans la portion de conducteur se conserve :

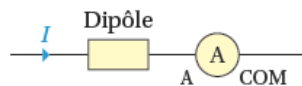
$$\delta q_{\text{entrant}} = \delta q_{\text{sortant}}$$

$$\delta q_1 = \delta q_2 \Rightarrow \frac{\delta q_1}{dt} = \frac{\delta q_2}{dt} \Leftrightarrow I_1 = I_2$$

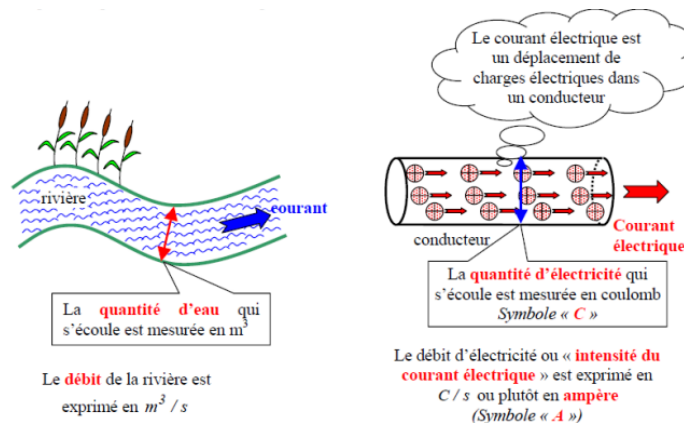
En régime stationnaire, l'intensité du courant électrique est la même en tout point d'une branche sans dérivation.

Deux dipôles en série sont traversés par le même courant.

Pour mesurer l'intensité du courant traversant un dipôle, on branche un **ampèremètre en série** avec le composant étudié.

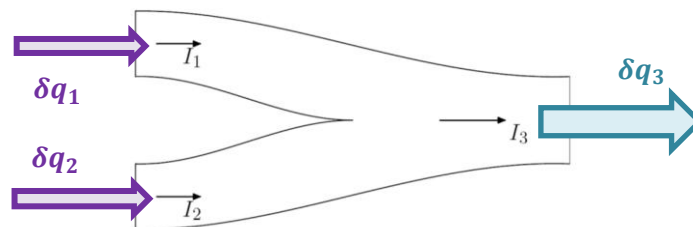


Remarque : On peut comparer le courant électrique à un écoulement d'eau dans une rivière.



3. Loi des nœuds

Considérons une portion de conducteur autour d'un nœud en régime stationnaire.

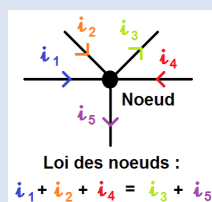


On a encore : $\delta q_{entrant} = \delta q_{sortant}$ soit $\delta q_1 + \delta q_2 = \delta q_3 \Rightarrow I_1 + I_2 = I_3$

Dans l'ARQS, toutes les charges libres se mettent en mouvement instantanément. Il n'y a donc pas d'accumulation de charge dans une portion de conducteur, la charge qu'elle contient est constante. **Les résultats précédents restent ainsi valables dans l'ARQS.**

Loi des nœuds

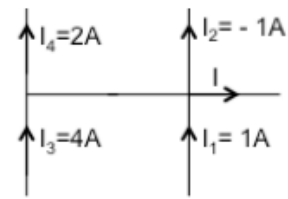
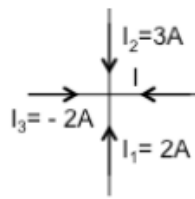
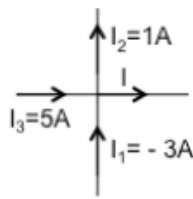
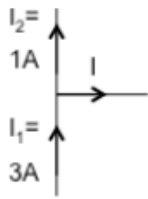
La somme des intensités des courants arrivant en un nœud est égale à la somme des courants qui en repartent.



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.

Application 1 : Lois des nœuds

Déterminer l'intensité I dans les circuits suivants.



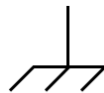
III. Tension électrique aux bornes d'un dipôle

1. Définitions

Les particules libres en mouvement dans le circuit électrique voient leurs énergies changer selon les composants qu'elles traversent, et cela d'autant plus que leur charge est grande.

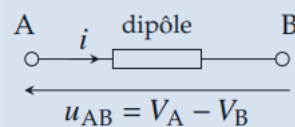
On admet qu'un point du circuit est caractérisé par son potentiel électrique V , exprimé en volt, tel que l'énergie potentielle que possède une charge électrique q située en ce point est : $E_p = qV$.

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 :



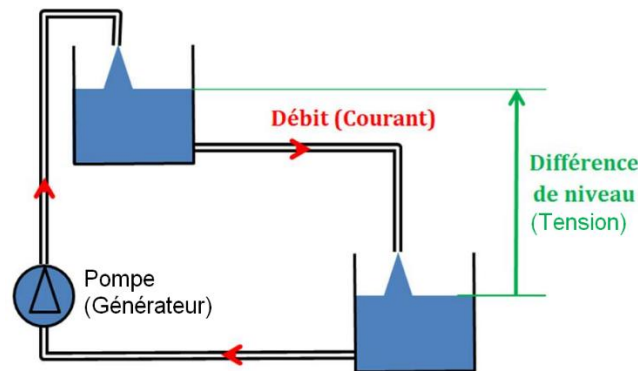
Elle s'exprime en Volt (V).

Ordres de grandeur :

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

Remarque : 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 des hautes altitudes vers les basses altitudes. Les charges positives elles aussi ont un mouvement naturel des hauts potentiels électriques vers les bas potentiels électriques.

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.

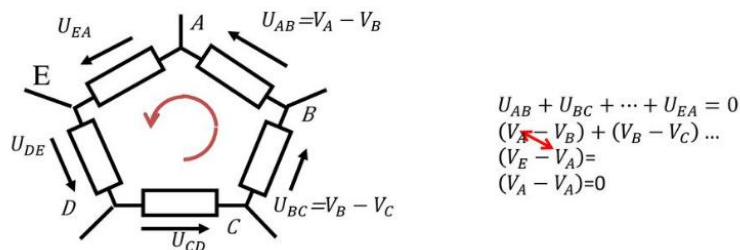


2. Loi des mailles

Considérons 3 points quelconques A, B, C d'un circuit électrique. On peut exprimer la tension U_{AC} en fonction de U_{AB} et U_{BC} en exploitant **l'additivité des tensions** et en utilisant une relation similaire à la relation de Chasles :

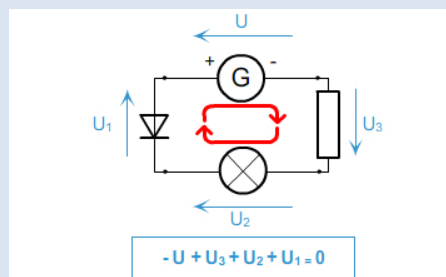
$$U_{AC} = V_A - V_C = V_A - V_B + V_B - V_C = U_{AB} + U_{BC}$$

Si maintenant, on considère une maille d'un circuit électrique et que l'on somme les tensions en faisant « le tour de la maille », on obtient zéro : c'est la loi des mailles.



Loi des mailles

Dans une maille orientée, la somme des tensions orientées dans le sens de la maille est nulle.

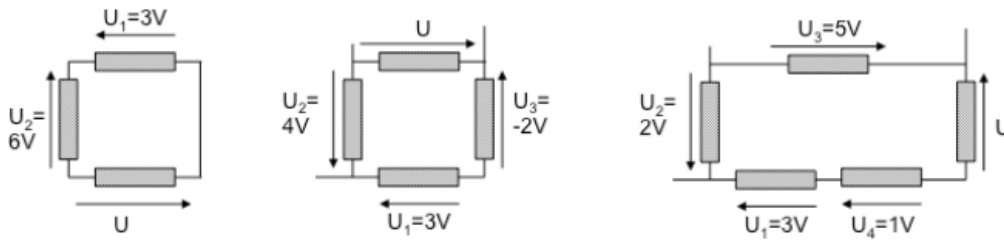


$$\sum_{\text{maille}} \varepsilon_k \cdot u_k = 0$$

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

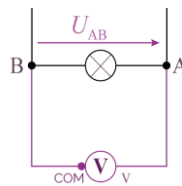
Application 2 : Lois des mailles

Déterminer la taille U dans les circuits suivants.



Deux dipôles en dérivation sont soumis à la même tension.

Pour mesurer une tension aux bornes d'un dipôle, on branche **un voltmètre en parallèle** avec le dipôle.



IV. Description d'un dipôle électrique

1. Conventions d'orientation

<u>Convention récepteur</u>	<u>Convention générateur</u>
Les flèches de tension et de courant sont en sens opposés	Les flèches de tension et de courant sont de même sens
A dipôle is shown between points A and B. The current i flows from A to B. The voltage $u = V_A - V_B$ is indicated with an arrow pointing from A to B.	A dipôle is shown between points A and B. The current i flows from A to B. The voltage $u = V_B - V_A$ is indicated with an arrow pointing from B to A.

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 : $P(t) = u(t) i(t)$ 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

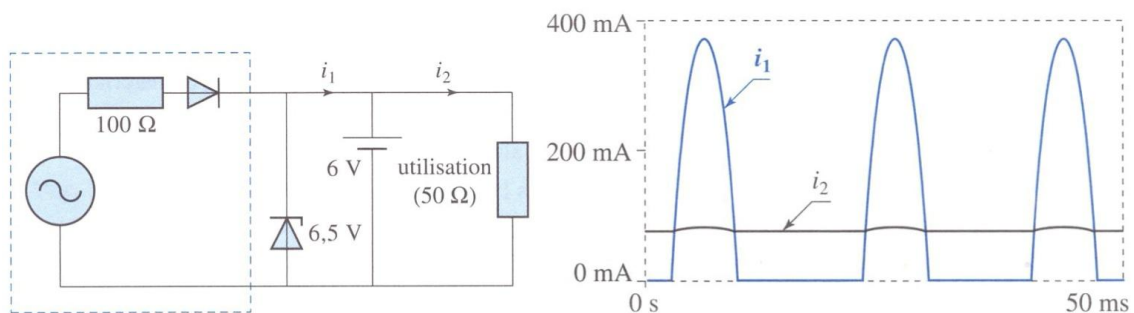
Moteur TGV : 1MW

La variation d'énergie mise en jeu dans un dipôle entre deux instants t_1 et t_2 est $\Delta E = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt$.

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.

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.



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.

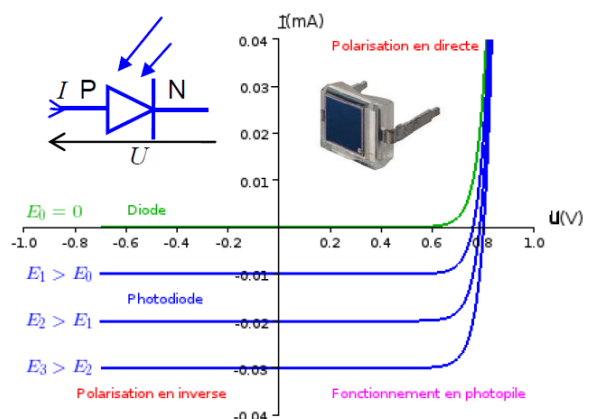
Lors du fonctionnement du dipôle, le point M donnant u et i est appelé le point de fonctionnement.

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 et peut dépendre de paramètres tels que température, éclairement.

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. 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.

Exemples : Résistance, condensateur, bobine

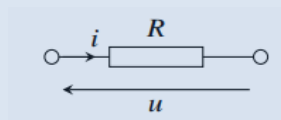
Contre exemples : Une diode, une photodiode sont des dipôles non linéaires.

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.

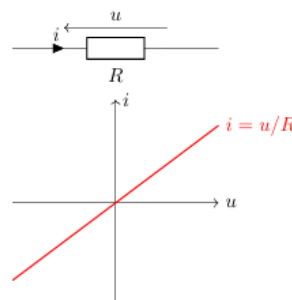


En convention récepteur, $u = Ri$, R est la résistance, elle s'exprime en ohm (Ω).

Remarques :

- Une résistance est un dipôle linéaire.
- 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 a priori non nulle.

1.2 Caractéristique courant -tension



1.3 Aspect énergétique : effet Joule

En convention récepteur, la puissance électrique reçue à l'instant t par le résistor est :

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

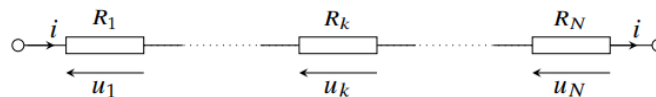
Cette puissance reçue est toujours positive, elle provoque une augmentation de l'énergie dans le dipôle qui ne peut la stocker. Cette énergie est évacuée, ce qui provoque un échauffement de la résistance. **Un résistor est un récepteur qui convertit l'énergie électrique reçue en chaleur, c'est l'effet Joule.**

Applications : chauffage électrique, lampe à incandescence.

1.4 Associations de résistors

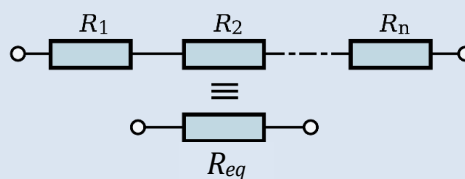
✓ Association en série

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.



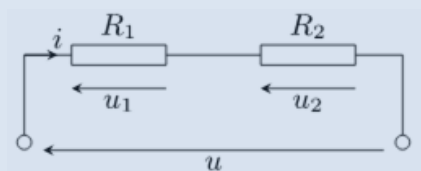
$$R_{eq} = \sum_{k=1}^n R_k$$

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.

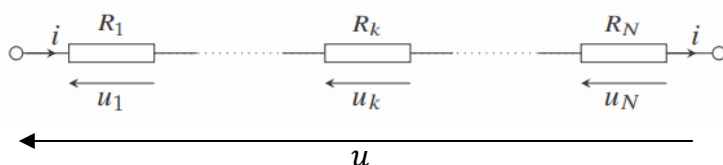
Pont diviseur de tension : applicable pour un ensemble de résistances en série

Cas de 2 résistances :



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

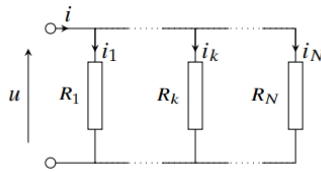
Remarque : cas de n résistances en série



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

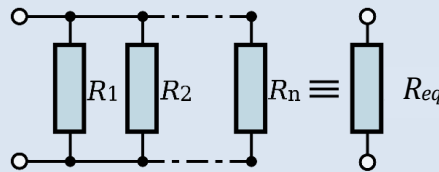
✓ **Association en parallèle**

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 : $R_{eq} = \frac{R}{n}$

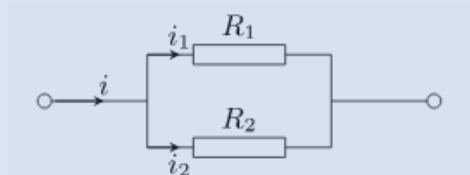
Pont diviseur de courant :

Le pont diviseur de courant consiste à exprimer l'intensité dans une branche en fonction de la résistance de la branche, de la résistance équivalente à l'ensemble 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.

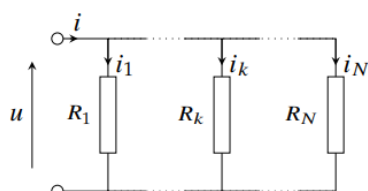
Pont diviseur de courant : applicable pour un ensemble de résistances en parallèle.

Cas de 2 résistances :



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

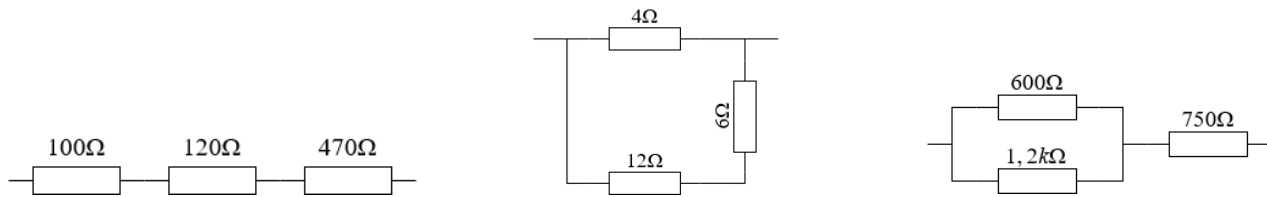
Remarque : cas de n résistances en parallèles



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

Application 4 : Résistance équivalente

Calculer la résistance équivalente dans chaque cas.

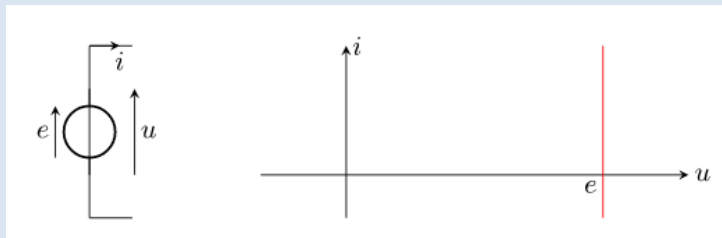


2. Dipôle linéaire actif

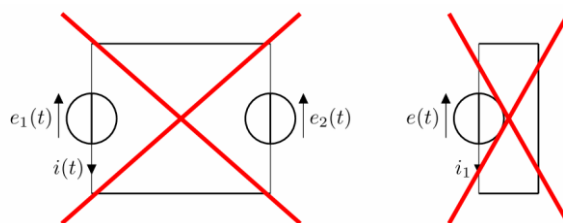
2.1 Sources idéales

✓ Source idéale de tension

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

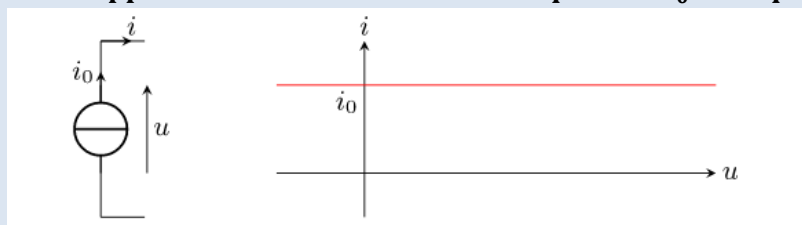
Remarques :

- La tension d'un tel générateur est parfaitement connue mais pas l'intensité du courant délivré qui dépend du circuit auquel il est branché.
- Il ne faut pas court-circuiter une source idéale de tension ou brancher en parallèle deux sources de tensions idéales de forces électromotrices différentes.



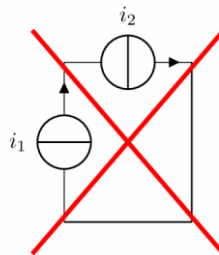
✓ Source idéale de courant

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



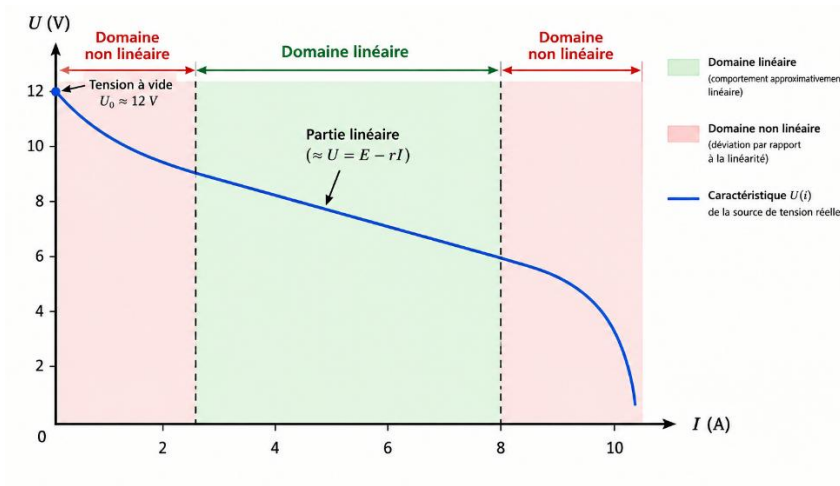
Remarques :

- Le courant débité par un tel générateur est parfaitement connu mais la tension à ses bornes dépend du circuit auquel il est branché.
- Il ne faut pas brancher en série deux sources de courant idéales délivrant deux courants électromoteurs différents.



2.2 Modélisation linéaire d'une source réelle

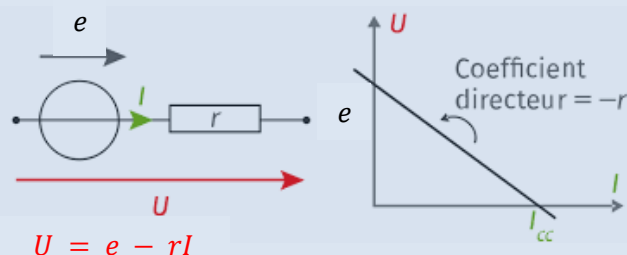
Lorsqu'une source de tension réelle débite, on observe une chute de tension à ses bornes.



Elle possède souvent un domaine linéaire que l'on peut modéliser.

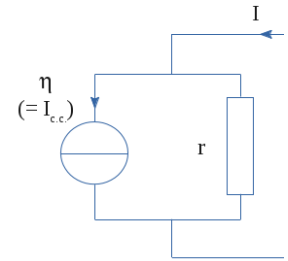
Toute source linéaire peut être modélisée par un modèle équivalent de Thévenin. La caractéristique d'un tel dipôle est une droite ne passant pas par l'origine.

On modélise une source réelle linéaire par une source idéale de tension e 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).
- $I_{cc} = \frac{e}{r}$ est l'intensité de court-circuit (intensité sous tension nulle)

Remarque : On peut aussi modéliser une source linéaire à l'aide d'une source réelle de courant délivrant une intensité η et branchée en parallèle d'une résistance r . Ce modèle est appelé modèle équivalent de Norton. (Hors programme)



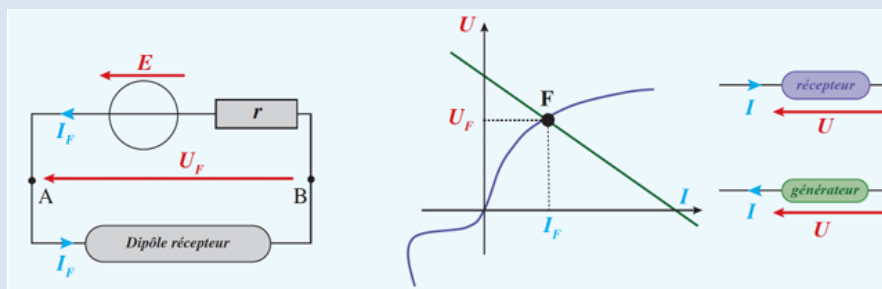
$$I = \eta - \frac{U}{r} \quad U = e - rI = \eta r - rI$$

Passage d'un modèle à l'autre : même r et $e = \eta r$.

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.



VI. Etude d'un circuit électrique

Voir Fiche méthode 6

Application 5 : Etude d'un circuit

Soit le groupement ci-dessous, dans lequel les résistances valent $R_1 = 4\Omega$, $R_2 = R_3 = R_4 = 3\Omega$. 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.

