

Thème 1 : ondes et signaux

S2. Circuits électriques dans l'ARQS signal



Charge électrique, intensité du courant. Potentiel, référence de potentiel, tension. Puissance.	Utiliser les ordres de grandeur des charges des électrons et des ions en vue de légitimer l'utilisation de grandeurs électriques continues. Exprimer l'intensité du courant électrique en termes de débit de charge. Exprimer la condition d'application de l'ARQS en fonction de la taille du circuit et de la fréquence. Relier la loi des nœuds au postulat de la conservation de la charge. Utiliser la loi des nœuds et celle des mailles. Algébriser les grandeurs électriques et utiliser les conventions récepteur et générateur. Citer les ordres de grandeur des intensités et des tensions dans différents domaines d'application.
Dipôles : résistances, condensateurs, bobines, sources décrites par un modèle linéaire.	Utiliser les relations entre l'intensité et la tension. Citer des ordres de grandeurs de valeurs de résistances, de capacités et d'inductances. Exprimer la puissance dissipée par effet Joule dans une résistance. Exprimer l'énergie stockée dans un condensateur ou dans une bobine. Modéliser une source en utilisant la représentation de Thévenin.
Association de deux résistances.	Remplacer une association série ou parallèle de deux résistances par une résistance équivalente. Établir et exploiter les relations de diviseurs de tension ou de courant
Résistance de sortie, résistance d'entrée.	Extraire des grandeurs électriques de la notice d'un appareil afin d'appréhender les conséquences de son utilisation sur le fonctionnement d'un circuit. Étudier l'influence des résistances d'entrée ou de sortie sur le signal délivré par un GBF sur la mesure effectuée par un oscilloscope ou un multimètre.

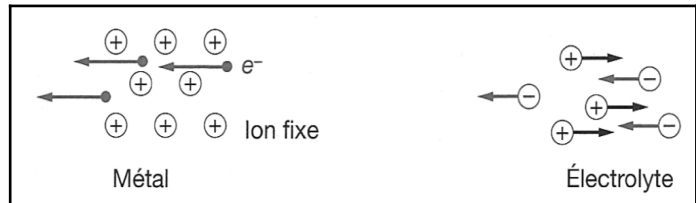
Dans ce chapitre, on va découvrir les principaux dipôles électriques, les lois de l'électrocinétique . On étudiera les lois d'associations et l'aspect énergétique des composants R, L et C. Cette étude se limite à celle des faibles puissances électrique, autrement dit nous n'étudions pas dans ce cadre les moteurs et machines tournantes.

I – L'INTENSITE DU COURANT ELECTRIQUE

I-1) Nature du courant électrique

La matière est composée de particules, dont certaines portent une charge électrique. Un courant électrique est lié à un **déplacement d'ensemble de particules chargées**.

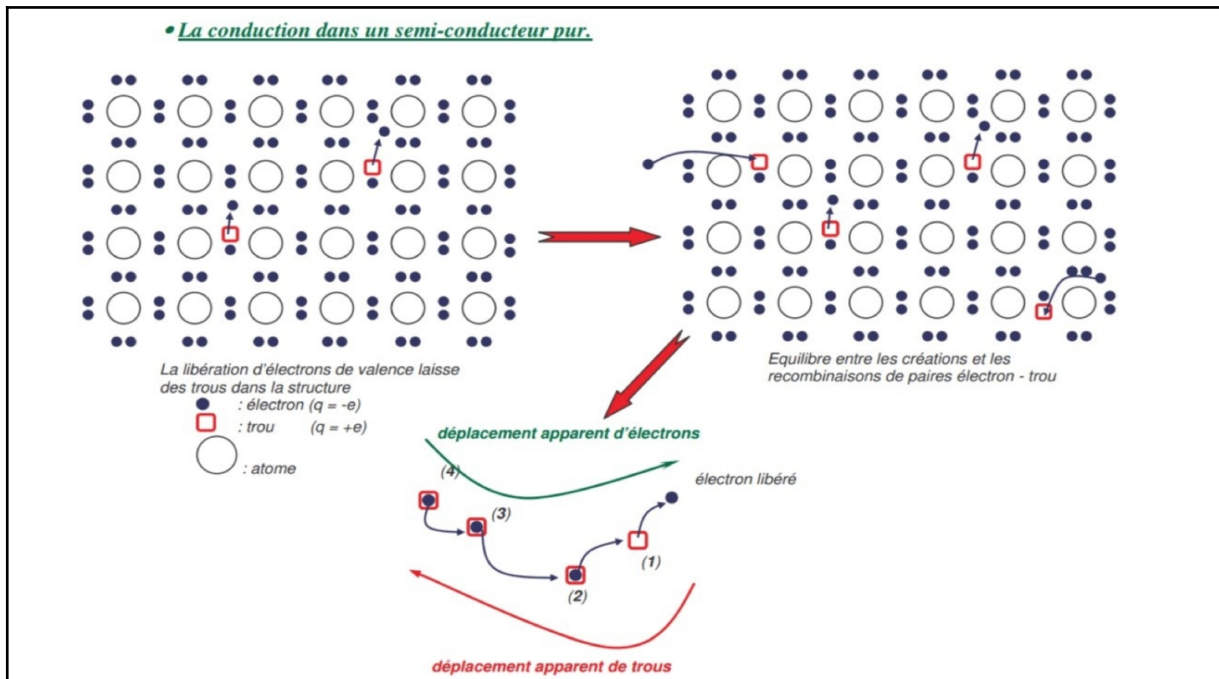
Dans un fil métallique, ce sont les électrons qui sont mobiles, car les ions restent fixes. Dans une solution électrolytique, c'est le mouvement simultané des anions et des cations qui est responsable de la conduction du courant.



Cette description s'applique même au cas des composants électroniques à semi-conducteurs, qui composent les circuits électroniques de notre quotidien (téléphones portables, ordinateurs...).

Toutefois, les matériaux semi-conducteurs doivent être étudiés par la physique quantique, qui amène à définir de nouvelles entités comme porteurs de charge :

- des électrons libres
- des « trous », qui traduisent en réalité des lacunes électroniques.



Le courant électrique dans un semi-conducteur résulte d'un déplacement d'ensemble d'électrons et de trous.

I-2) Distinction entre agitation et migration



Dans un conducteur sans courant, comme un fil de cuivre non branché, les électrons sont bien présents et se déplacent continuellement à cause de l'agitation thermique. Cependant, leurs mouvements sont totalement désordonnés et se compensent : il n'y a donc aucune direction privilégiée. Résultat : pas de mouvement d'ensemble, donc pas de courant électrique. On peut comparer cela à un hall de gare : si les gens se déplacent au hasard, il n'y a pas de flux global ; mais lorsqu'un train arrive et que les voyageurs se dirigent tous vers la sortie, on observe alors un mouvement collectif, comme un courant.

I-3) Débit de charge-intensité

Pour mesurer un courant électrique, on raisonne comme pour le débit d'une rivière. Dans une rivière, le débit $D(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ correspond au volume d'eau qui passe sous un pont par seconde :

→ si V est le volume écoulé pendant la durée Δt , alors $V = D \Delta t$.

De la même façon, dans un fil électrique, on s'intéresse au débit de charges : on regarde combien de charge Q traverse une section du fil pendant le temps Δt . On définit alors le courant électrique comme :

→ $I = Q / \Delta t$, c'est-à-dire la quantité de charge qui passe chaque seconde.

L'intensité du courant électrique correspond au débit de la charge électrique à travers une surface S .

$$I = \frac{Q}{\Delta t}$$

Q : Quantité de charge (en Coulombs) qui traverse la surface S , pendant le temps Δt .

En faisant tendre le temps t vers 0, on obtient la relation :

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

Remarques :

Calcul du nombre d'électrons traversant le circuit sous 1 A pendant 1 s.

$$I = Q/\Delta t \text{ d'où } Q = I \Delta t = 1 \text{ Coulomb.}$$

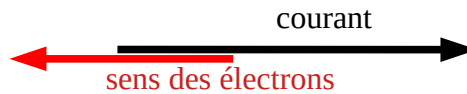
Ce qui correspond à $Q/e = 1 / (1,6 \cdot 10^{-19}) = 6,25 \cdot 10^{18}$ électrons.

Le nombre d'électrons en mouvement lors d'un courant électrique est tellement important que chaque électron individuel est très difficilement observable. Les grandeurs électrique macroscopiques peuvent donc être considérées comme continues malgré le fait qu'elles proviennent du mouvement de charges quantifiées.

L'intensité du courant est une valeur algébrique (il faut définir un sens positif avant de la calculer). On prendra un sens conventionnel du courant : ce sens est précisé par une flèche.

On définit le **sens conventionnel** du courant comme le sens pour lequel i est positif. Ce sens matérialise le sens de déplacement des charges positives. Dans ce cas, comme les électrons sont de charge négative ($-e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$), ils se déplacent dans le sens opposé au courant.

L'intensité du courant se mesure en Ampères: A, qui équivaut à C s^{-1} .



Ordres de grandeurs

Courant	Composants ou appareils
10 mA	DEL commune
100 mA	Risque d'électrocution
0.5 A	ampoule à incandescence sous 230 V
10A	Four/Chauffage/Chauffe-eau sous 230 V
100 A	Démarrreur automobile
10 kA–100 kA	Foudre

Seuil de perception par le corps : 1 mA;
 seuil léthal : 40 mA pendant 3s ou 300 mA pendant 0,1s.

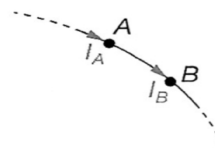
I-4) Conservation de la charge

La charge électrique est une grandeur conservée : elle ne peut ni se créer ni disparaître, tout comme la masse en mécanique classique. Ainsi, pour un ensemble de particules chargées, la charge totale reste toujours la même, quelles que soient leurs interactions ou leurs déplacements. Dans un fil conducteur sans dérivation entre deux points A et B, cette conservation implique que le courant y est le même en tout point, puisqu'aucune charge ne peut s'accumuler ou disparaître en chemin.

On se place en **régime stationnaire**, c'est-à-dire lorsque les phénomènes ne dépendent pas du temps.

La quantité de charge qui passe en A pendant une durée Δt est la même que celle en B sur la même durée Δt . Finalement : $Q_A = Q_B$ et $I_A = I_B$

L'intensité le long d'un conducteur sans bifurcation est identique en tout point, en régime stationnaire.



I-5) Loi des nœuds

La conservation de la charge s'applique aussi lorsqu'un conducteur est connecté à d'autres en ce qu'on appelle un nœud. **Un nœud est la jonction d'au moins 3 fils conducteurs.**

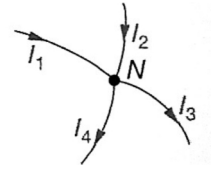
Soit un nœud N d'un circuit électrique. On définit des coefficients ϵ_k valant - 1 ou +1, avec la convention suivante :

- $\epsilon_k = 1$ si le fil conducteur est orienté vers le nœud ;
- $\epsilon_k = - 1$ si le fil conducteur est orienté en s'éloignant de N.

La conservation de la charge impose alors la loi des nœuds qui repose sur le fait qu'il ne peut y avoir d'accumulation de charges en N en régime stationnaire.

La loi des nœuds s'écrit :

$$\sum_{k=1}^n \varepsilon_k I_k = 0$$



$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 \text{ soit } I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$$

Mesure du courant : le courant se mesure avec un ampèremètre (branché en série). 

II – LA TENSION

II-1) Le Potentiel électrique

a) Définition

Dans la description qui précède, aucune cause n'a été donnée au phénomène de conduction électrique ; ceci sera précisé ultérieurement en détaillant les forces subies par les porteurs de charge . Afin de présenter les lois fondamentales de l'électrocinétique, il faut adjoindre à la notion d'intensité, et à la loi des nœuds correspondante, le concept de potentiel électrique, en vue d'aboutir à une autre loi fondamentale : la loi des mailles.

Pour cela, on peut s'appuyer sur une analogie avec l'écoulement de l'eau qui s'effectue toujours avec une diminution de l'altitude.

<https://www.tecnipass.com/img-cours/vases-communicants-ddp.gif>

<https://www.tecnipass.com/img-cours/tension-ddp-pile-accu-condensateur.gif?1633350219595>

Comme le démontrent les animations ci-dessus, aucun débit n'est possible sans différence de niveau (d'eau) , ou de potentiel (tension électrique).



Cascade au sud de l'Islande. (Curiosity escape).

Le débit d'eau correspond au courant électrique.

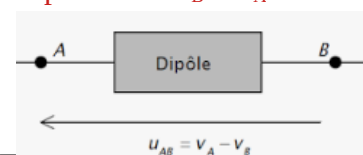
La tension (différence de potentiel) est indispensable à toute circulation de courant électrique.

Ainsi, de même que l'on peut définir une altitude en tout point du parcours d'une rivière, **on admet que l'on peut définir un potentiel électrique V en tout point d'un circuit.** On parle alors **de différence de potentiel, également appelée tension électrique**, comme on parle de différence d'altitude, ou de dénivelé, entre deux points situés le long d'un cours d'eau.

Plus précisément, dans l'étude d'un circuit électrique, la différence de potentiel $V_B - V_A$ entre des points A et B est appelée tension U_{BA} . Elle est notée par une flèche.

La tension est une grandeur algébrique : $U_{BA} = V_B - V_A = -U_{AB}$

La tension se mesure en Volts (V) (d'après Alessandro Volta (1745–1827) qui a inventé la première pile électrique).



b) La masse

Cette analogie avec la rivière s'appuie en réalité sur la notion d'énergie potentielle. Dans le cas de l'écoulement de l'eau, c'est l'énergie potentielle de pesanteur : mgh et dans le cas d'un circuit, c'est l'énergie potentielle électrique qV . V est le **potentiel électrique** au point considéré. Le potentiel électrique se mesure en Volts (V).

Dans un circuit électrique, les charges circulent en perdant de l'énergie potentielle.

De même que l'on fixe les altitudes à partir d'une référence (niveau de la mer, point de départ d'une randonnée), on peut fixer **librement** la valeur du potentiel électrique en un point d'un circuit.

L'origine de l'énergie potentielle est choisie arbitrairement, donc celle de V aussi. Le point du circuit où V est choisi nul, est la référence de potentiel.

Ajouter une valeur constante V_0 à tous les potentiels ne modifie pas les tensions entre deux points. On dira que le potentiel est défini à une constante additive près.

On choisira comme **origine des potentiels**, la masse du circuit.

Remarque : La Terre est un fil profondément enfoui. La masse est généralement reliée au fil de Terre. Si ce n'est pas le cas, elle est reliée à une armature métallique d'un des appareils. On verra l'importance des problèmes de masse lors des différents TP d'électronique.

Représentations électriques de la masse et de la Terre.

masse :



Terre :



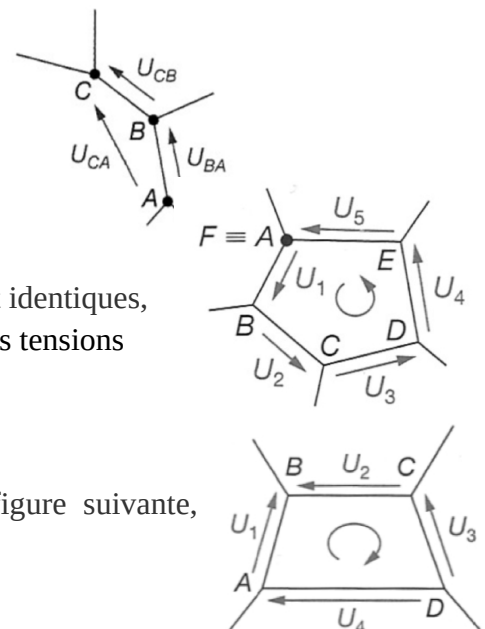
II-2) Additivité des tensions

La définition de la tension électrique comme une différence de potentiel impose une **loi d'additivité**.

Si A, B et C sont trois points d'un circuit électrique :

$$V_C - V_A = (V_C - V_B) + (V_B - V_A) \quad \text{soit} \quad U_{CA} = U_{CB} + U_{BA}.$$

Cette relation prend une forme particulière dans le cas où les points extrêmes sont confondus. Les points extrêmes A et F étant identiques, ils ont le même potentiel : $V_F - V_A = 0$. En notant U_1, U_2, \dots, U_5 , les tensions aux bornes des 5 branches, on écrit : $U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 = 0$.



Les sens d'orientation sont importants : dans le cas de la figure suivante, la relation devient : $U_1 - U_2 - U_3 + U_4 = 0$.

Plus généralement, considérons l'association de n branches successives d'un circuit, commençant et se terminant sur un même nœud, sans repasser deux fois par le même point. Une telle association est appelée **maille (boucle fermée)**.

Il est possible de donner une orientation arbitraire à une maille, matérialisée par une flèche.

On associe alors à chaque tension U_k le long de la maille, un coefficient ε_k égal à 1 si la tension est orientée comme la maille, - 1 sinon. La loi des mailles se met sous la

forme :

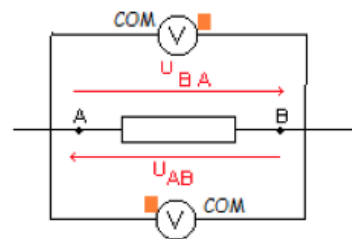
$$\sum_{k=1}^n \varepsilon_k U_k = 0$$

Mesure de tension

La tension se mesure avec un voltmètre (branché en parallèle ou dérivation). Celui-ci mesure la différence de potentiel entre ses deux bornes (la borne noire « COM » étant l'origine de la mesure).

Ordres de grandeurs

Tension	Provenance
230 V	EDF (délivrée)
plusieurs kV	Industrielle
225 kV à 400 kV	Lignes haute tension
quelques V	Piles



Lorsque la borne V (borne rouge du voltmètre) est branchée sur la borne A et la borne COM (borne noire du voltmètre) sur la borne B alors le voltmètre mesure la tension U_{AB} . Dans le cas contraire le voltmètre mesure la tension U_{BA} .

III APPROXIMATION DES REGIMES QUASI-STATIONNAIRES

III-1) Régime continu ou variable

On dit qu'on est en **régime continu** lorsque **toutes les grandeurs sont indépendantes du temps**; ce sera notamment le cas des intensités et des tensions. On note alors les grandeurs en lettres majuscules : I et V . A contrario, on parle de **régime variable** quand **les grandeurs dépendent du temps**. On note alors les grandeurs en lettres minuscules (fonctions du temps): i(t) et u(t).

Le caractère variable peut avoir plusieurs origines possibles pouvant se combiner :

- modification des conditions extérieures faisant passer d'un régime continu à un autre : on parlera alors de **régime transitoire**
- conditions extérieures variables par exemple de type sinusoïdales: on parlera alors de **régime forcé**,
- phénomène de **propagation** : comme les tensions et intensités qui se propagent dans les conducteurs. Cela signifie que **leur valeur dépend à la fois du temps et du point considéré**. La vitesse de propagation de l'intensité et de la tension est celle de la lumière dans le vide à savoir $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

La durée de propagation dans un fil conducteur de longueur L peut s'estimer par: $\tau = \frac{L}{c}$

La durée τ est le temps caractéristique du phénomène de propagation de l'intensité et de la tension dans le circuit considéré.

III-2) Approximation des régimes quasi-stationnaires ou ARQS

Dans un circuit en régime continu, il n'y a pas d'accumulation de charges : l'intensité est donc la même en tout point d'une branche.

La mesure de l'intensité dans une branche avec un ampèremètre ne dépend alors pas de la position de l'appareil le long de la branche.

Cette propriété reste valable en régime variable si on peut négliger les phénomènes de propagation.

L'électricité se propage sous forme d'onde électromagnétique, à une vitesse égale à celle de la lumière $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Attention à ne pas confondre : ce n'est pas la vitesse à laquelle les particules chargées se *déplacent*, mais celle à laquelle elles se *mettent en mouvement*. Les électrons dans un fil se déplacent à une vitesse de l'ordre de 10^5 à $10^6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, qui est donc 100 à 1000 fois plus faible que c .

Si le circuit a une taille L , le temps que met l'information pour aller d'une extrémité à l'autre du circuit est de l'ordre de $\tau = L/c$.

Pour savoir s'il est important de tenir compte de ce temps de propagation, il faut le comparer au temps caractéristique de variation des signaux, qui peut être par exemple, leur période T .

D'où la condition nécessaire pour pouvoir appliquer l'ARQS : **il faut que le temps de propagation du signal soit négligeable devant la grandeur temporelle T (période) caractérisant les variations des grandeurs électriques .**

C'est-à-dire que : $\tau = \frac{L}{c} \ll T \Leftrightarrow L \ll cT \Leftrightarrow L \ll \lambda$

Lorsque les dimensions L d'un circuit sont petites devant la longueur d'onde associée à la période des phénomènes, les lois de l'électrocinétique sont utilisables.

La propagation sera assimilable à un processus instantané et l'intensité dans une branche sera la même en tout point à un instant donné. On dit qu'on travaille alors dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires encore notée **A.R.Q.S.** On parle également de régimes quasi-permanents au lieu de régimes quasi-stationnaires.

III-3) Exemples d'application de l'ARQS

- Réseau électrique EDF

A titre d'illustration, pour fixer les ordres de grandeur, considérons le courant de fréquence égale à 50 Hz (période $T = 20 \text{ ms}$), qui est distribué sur le réseau d'énergie électrique.

$$cT = 3 \times 10^8 \times 20 \times 10^{-3} = 6 \cdot 10^6 \text{ m.}$$

Ainsi, tout circuit dont la dimension caractéristique est petite devant 6 000 kilomètres peut être étudié selon les lois de l'électrocinétique des régimes quasi-stationnaires (lentement variables). C'est dans ce cadre que se situe l'électrotechnique, science qui s'intéresse à la production, au transport et à l'utilisation de l'énergie électrique.

- En TP

Pour un circuit électrique dont les dimensions sont de l'ordre du mètre (c'est le cas en T.P.),

$$L/c \approx 10^{-8} \text{ s soit } T \ll 10^{-8} \text{ s ce qui correspond à } f = 1/T \ll 100 \text{ MHz.}$$

Cette fréquence est dans la gamme des fréquences délivrées par un GBF (générateur basses fréquences).

L'ARQS est donc applicable à des circuits assez petits pour des fréquences de fonctionnement suffisamment faibles.

- Réseau GSM (Global System for Mobile)

En revanche, la téléphonie portable mettant en jeu des fréquences de l'ordre du gigahertz ($T = 1/f = 10^{-9} \text{ s}$), $cT = 30 \text{ cm}$, ce qui change nettement l'ordre de grandeur.

L'ARQS n'est plus applicable.

IV – GENERALITES SUR LES DIPOLES

IV-1) Caractéristique d'un dipôle

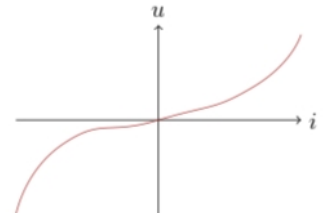
On appelle dipôle un composant électrique connecté au reste du circuit par deux bornes conductrices A et B.

On constate qu'il existe deux façons de définir la tension aux bornes du dipôle :



- $U_{AB} = V_A - V_B$ (les flèches de tension et de sens positif du courant sont opposées), on est alors en convention récepteur ;
- $U_{BA} = V_B - V_A$ (les flèches de tension et de sens positif du courant sont de même sens), on est alors en convention générateur.

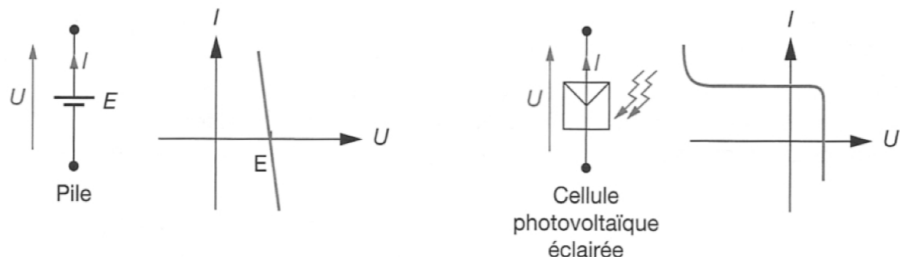
Chaque dipôle électrique est défini par sa caractéristique, c'est à dire la relation tension-intensité qui décrit son fonctionnement : $u = f(i)$. La courbe représentative de $u = f(i)$ est la caractéristique du dipôle. On peut également tracer $i = g(u)$.



IV-2) Classification des dipôles

a) Dipôle linéaire ou non linéaire

Un dipôle est linéaire lorsque la caractéristique $I = f(U)$ est affine, c'est-à-dire si elle se met sous la forme $I = a + g U$. C'est par exemple le cas d'une pile électrochimique, mais pas celui d'une cellule photovoltaïque.



Si la caractéristique est une droite, on dit que le dipôle est linéaire.

b) Dipôle passif ou actif

Un dipôle est passif si sa caractéristique passe par l'origine (intensité nulle à tension nulle), il est actif dans le cas contraire. Un résistor est donc un dipôle passif. D'autres composants électroniques passifs peuvent être rencontrés ; par exemple la diode à semi-conducteurs. Il s'agit d'un dipôle passif à caractéristique non linéaire.

Si la caractéristique passe par (0, 0), c'est un dipôle passif, sinon il est actif.

IV-3) Modélisation d'un dipôle

Un dipôle peut être modélisé de manière plus ou moins simplifiée : partant d'une caractéristique réelle qui peut être complexe, on peut se contenter d'une caractéristique approchée. Le choix de tel ou tel niveau de simplification dépend de la précision attendue. Dans l'exemple de la diode, un modèle simplifié sous la forme d'une loi affine par morceaux, peut donner une représentation suffisante.



IV-4) Dipôles récepteurs et générateurs

a) Définition de la puissance

Soit un dipôle parcouru par un courant d'intensité $i(t)$ et aux bornes duquel on a une tension $u(t) = V_A - V_B$. (convention choisie : récepteur).

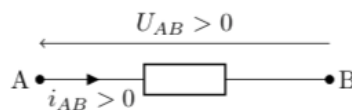
La puissance instantanée est par définition la quantité : $P(t) = u(t) i(t)$

Si on est en **régime continu**, intensité et tension ne dépendent pas du temps, on peut écrire: **$P = UI$** .

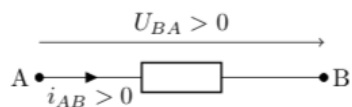
L'unité de la puissance est le Watt qui est équivalent à des $J.s^{-1}$

b) Caractère générateur et récepteur

Un récepteur convertit l'énergie électrique qu'il reçoit en une autre forme d'énergie (mécanique, thermique). On a $P_{re\grave{c}ue} > 0$ donc u et i ont des sens opposés (**convention récepteur**)



Un générateur fournit de l'énergie électrique donc $P_{re\grave{c}ue} < 0$, u et i sont dans le même sens (**convention générateur**)



c) Convention récepteur et générateur

En convention récepteur :

- Si $P > 0$, le dipôle a un caractère récepteur : il reçoit de l'énergie
- Si $P < 0$, le dipôle a un caractère générateur : il cède de l'énergie

Les conclusions sont inversés en convention générateur.

Remarque : des systèmes comme la batterie de voiture peut avoir les deux caractères suivant son utilisation

En charge (phase de fonctionnement rapide) : récepteur ; au démarrage : générateur

Ordres de grandeurs

Appareil	Puissance	Appareil	Puissance
Veille d'une télévision	1 W	Fer à repasser	800 W
Lampe basse consommation	30 W	Chauffage électrique	1 500 W
Lampe à incandescence	90 W	Lave linge	2 200 W
Téléviseur	150 W	Lave vaisselle	2 500 W
Réfrigérateur	200 W	Four électrique	3 000 W

V LE DIPOLE RESISTANCE- RESISTOR

V-1) Présentation

a) Loi d'ohm

Symbole :  (ou )

On utilise la convention récepteur. La caractéristique d'une résistance est $u = R i$.

C'est la **loi d'Ohm**. R est la valeur (résistance) du dipôle en Ohm (Ω).

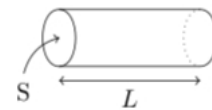
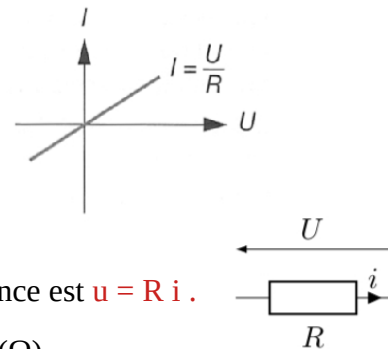
On définit aussi la conductance $G = 1 / R$ en Ω^{-1} ou **Siemens (S)**.

Le résistor est un dipôle passif et linéaire.

Fabrication :

On utilise un matériau (métal conducteur) de résistivité ρ de longueur L et de section S.

La résistance de ce conducteur est : $R = \frac{\rho L}{S}$.



b) Ordres de grandeurs

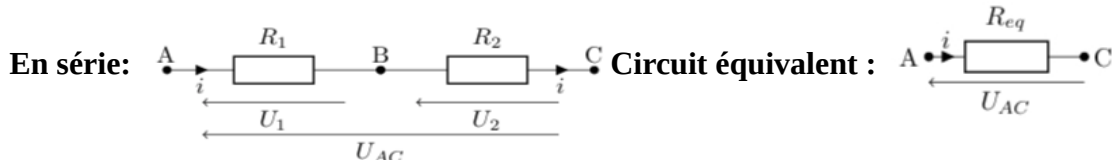
- de quelques résistivités ρ (en $\Omega.m$):

Métal	ρ	Conducteur non métallique	ρ	Isolant	
cuivre	17.10^{-9}	carbone	40.10^{-6}	eau pure	$1,8.10^5$
fer	100.10^{-9}			verre	10^{17}
platine	111.10^{-9}			polystyrène	10^{20}

- de quelques résistances:

R chauffage électrique	10 à 100 Ω	R sortie GBF	50 Ω
R fer à repasser	40 Ω	R interne voltmètre	100 k Ω à qqs M Ω
R interne ampèremètres	qqs Ω	R entrée oscilloscope	qqs M Ω

V-2) Association en série



Cette association consiste à placer les dipôles de telle sorte que la même intensité les traverse.

La loi des mailles donne: $U_1 + U_2 - U_{AC} = 0$ donc $U_{AC} = U_1 + U_2$.

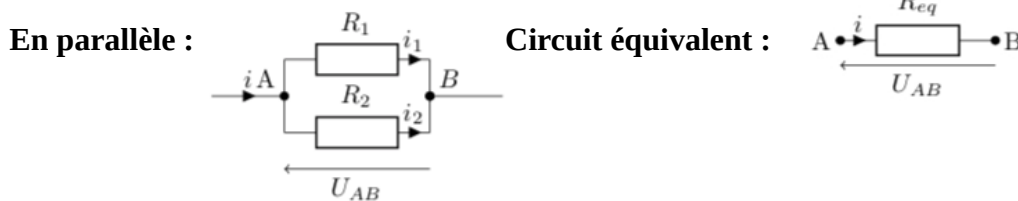
D'après la loi d'Ohm, on a $U_1 = R_1 i$ et $U_2 = R_2 i$. D'où finalement $U_{AC} = R_1 i + R_2 i = (R_1 + R_2) i$.

La résistance équivalente à deux résistance branchées en série est: $R_{eq} = R_1 + R_2$

On généralise ce résultat à n résistances R_1, R_2, \dots, R_n branchées en série:

$$R_{série} = \sum_{i=1}^N R_i$$

V-3) Association en parallèle



Cette association correspond au cas où les deux dipôles ont même tension à leurs bornes.

Loi des nœuds: $i = i_1 + i_2 = U_{AB}/R_1 + U_{AB}/R_2 = U_{AB} (1/R_1 + 1/R_2) = U_{AB}/R_{eq}$.

Deux résistances R_1 et R_2 branchées en parallèle sont équivalentes à une résistance R_{eq} de valeur : $1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2$.

La conductance équivalente est $G_{eq} = G_1 + G_2$.

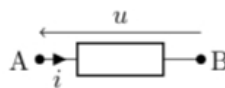
On généralise ce résultat à n résistances R_1, R_2, \dots, R_n branchées en parallèle

$$G_{parallèle} = \sum_{i=1}^N G_i \text{ ou } \frac{1}{R_{parallèle}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}$$

V-4) Puissance dissipée dans un résistor

Une résistance convertit l'intégralité de la puissance électrique reçue en chaleur (effet Joule).

$P_{reçue} = u \cdot i = Ri \cdot i$ donc $P_{reçue} = Ri^2$



Remarque : $dW = Ri^2 dt = (u^2/R) \cdot dt$ car $dW = P \cdot dt$ (énergie).

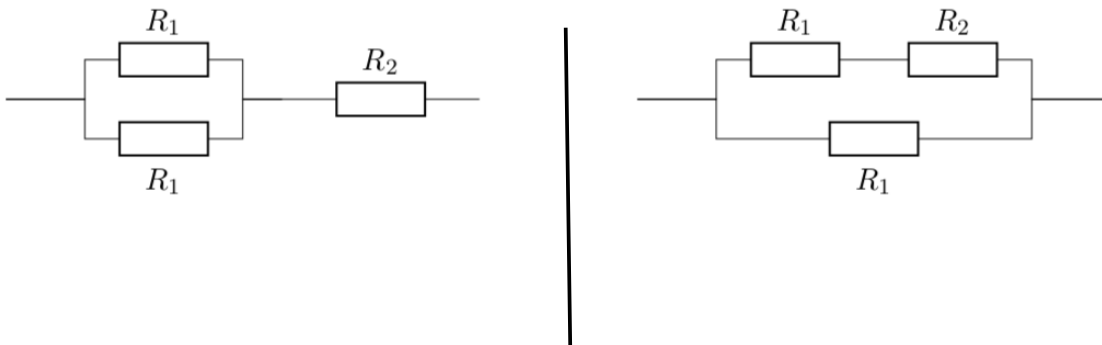
L'énergie reçue par la résistance entre les instants t_1 et t_2 est : $W = \int_{t_1}^{t_2} Ri^2 dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{u^2}{R} dt$

Dans les guirlandes des sapins de Noël, est-il préférable de mettre les différentes ampoules en série ou en parallèle?

Recherche de résistances équivalentes

Deux résistances de $10\text{ k}\Omega$ sont disponibles, comment les associer pour avoir une résistance équivalente de $20\text{ k}\Omega$ ou $5\text{ k}\Omega$?

Quelle est la résistance équivalente pour chacun des circuits ?



V-5) Le fil électrique

Un fil électrique est un cylindre très fin de conducteur ohmique. Ainsi, il a les mêmes propriétés qu'une résistance mais sa résistance est numériquement très faible (généralement inférieure à un ohm par mètre).

Un fil électrique est un dipôle ohmique modélisé par une résistance nulle.

En appliquant la loi d'ohm, il vient donc $u = Ri = 0$.

Quelle que soit l'intensité du courant traversant un fil, la tension aux bornes d'un fil est toujours nulle.

Toutefois, si les fils du circuits commencent à être très long, la résistance augmente et le modèle n'est plus valable. Il faut tenir compte de la résistance des fils.

Ainsi, mettre un fil aux bornes d'un dipôle quelconque impose une différence de potentiel nulle aux bornes du dipôle. On parle alors de dipôle en **court circuit**, le dipôle en court circuit n'aura aucune influence sur le montage électrique car le courant passera par le fil, et non pas à travers le dipôle.

En T.P., prenez l'habitude de tester les fils , il peut arriver que celui ci soit coupé.

Comment savoir si un fil est coupé avec un multimètre ?

Si votre multimètre affiche une valeur inférieure à 100 ohms, cela signifie que votre fil fonctionne correctement. Néanmoins, si votre multimètre indique « OL », cela veut dire que l'électricité ne circule pas (fil sectionné).

V-6) **L'interrupteur ouvert**

Un interrupteur ouvert modélise une portion de circuit présentant une discontinuité de milieu conducteur. Autrement dit, cette portion du circuit est ouverte, les charges ne peuvent plus passer. Pour passer, le courant doit alors traverser l'air ambiant, qui peut être modélisé par un conducteur ohmique de résistance très importante.

Un interrupteur ouvert est un dipôle modélisé par une résistance infinie.



En appliquant la loi d'Ohm, on a $i = u/R = 0$

Quelle que soit la tension aux bornes d'un interrupteur ouvert, le courant le traversant est nul.

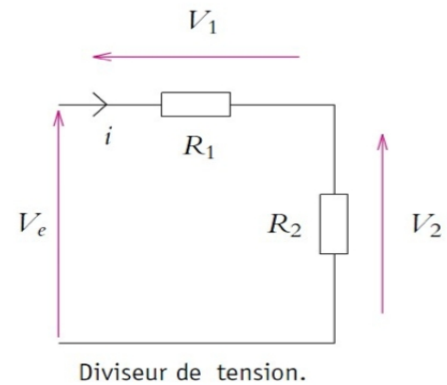
Si la tension aux bornes d'un interrupteur dépasse un certain seuil, l'air devient conducteur et un arc électrique apparaît. C'est le même type de phénomène que l'apparition des éclairs ou que pour la machine de Wimshurst. C'est un phénomène que l'on cherche généralement à éviter.

V-7) **Diviseur de tension**

La structure de base du diviseur de tension est donnée par le montage de la figure ci-dessous : on soumet l'association en série de deux résistors à une tension V_e et on cherche la tension aux bornes de l'un d'entre eux.

Les expressions des tensions en fonction du courant parcourant les résistors sont : $V_1 = R_1 i$, $V_2 = R_2 i$ et $V_e = R_1 i + R_2 i$

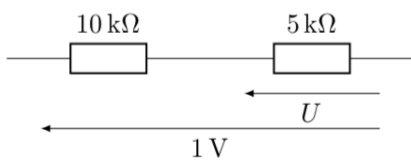
D'où : $V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_e$ $V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_e$



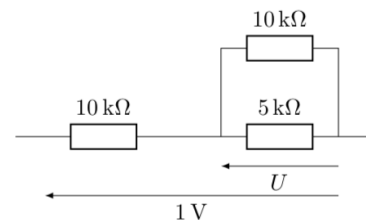
Une condition indispensable à l'application de cette formule est que l'intensité soit la même dans les deux résistors. (c'est-à-dire l'absence d'une branche venant se greffer entre les composants).

Il faut bien retenir cette configuration. En particulier, les résistances sont en série. Dans la formule, la résistance sur laquelle est la tension recherchée est au numérateur.

Combien vaut la tension U dans les circuits ci-dessous ?



(schéma 1)



(schéma 2)

V-8) Diviseur de courant

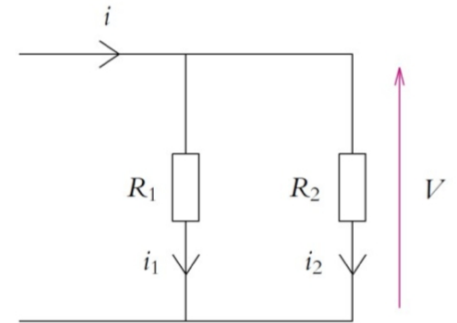
La structure de base du diviseur de courant est donnée par le montage de la figure : on soumet l'association en parallèle de deux résistors à un courant d'intensité totale i et on cherche l'intensité parcourant l'un d'entre eux.

Les expressions des tensions en fonction du courant parcourant les résistors sont : $i_1 = G_1 u$, $i_2 = G_2 u$ et $i = G_1 u + G_2 u$

D'où :

$$i_1 = \frac{1/R_1}{1/R_1 + 1/R_2} i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i$$

$$i_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i$$

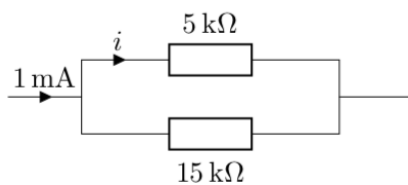


Diviseur de courant.

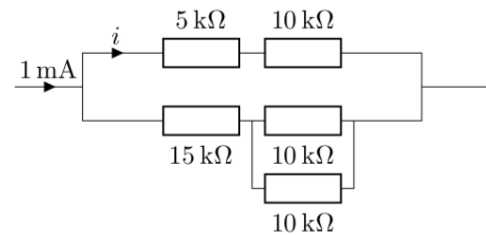
Une condition indispensable à l'application de cette formule est que la tension soit la même aux bornes des deux résistors.

Il faut bien retenir cette configuration. En particulier, les résistances sont en parallèles. Dans la formule, la résistance qui n'est pas traversée par le courant recherché est au numérateur.

Combien vaut le courant i dans les circuits ci-dessous ?



(schéma 1)



(schéma 2)

VI – BOBINE D'INDUCTANCE L

VI-1) Bobine et auto-induction

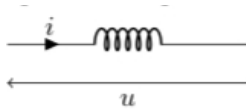
a) Inductance (bobine idéale)

C'est un dipôle formé par l'enroulement d'un fil conducteur. Le phénomène d'auto-induction crée aux bornes d'une bobine une tension u lorsque le courant d'intensité i qui la traverse varie au cours du temps.

La traduction mathématique de ce phénomène est la relation suivante entre u et i en convention

récepteur: $u = L \frac{di}{dt}$ L est appelée inductance et s'exprime en henry, de symbole H.

Symbole :



En régime continu, $u = 0$ (la bobine se comporte comme un court-circuit).

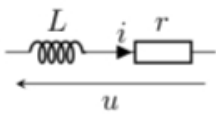
En régime variable : $u(t) = L \, di/dt$ (en convention récepteur)

Remarque: l'intensité $i(t)$ qui traverse la bobine est une fonction continue du temps.

$$i(t^-) = i(t^+)$$

b) Modélisation d'une bobine

La résistance de la bobine , bien que faible, n'est pas nulle. La bobine réelle est équivalente à une bobine idéale en série avec une résistance de petite valeur (de l'ordre de la dizaine d'ohms).



$$u_{\text{bob}} = u_L + u_r = L \, di/dt + r \, i$$

c) Ordres de grandeurs

Composants électroniques	Quelques mH
Bobine de cuivre de TP	Quelques H
Bobine d'alternateur	Quelques dizaines de Henry

Les inductances des bobines qu'on rencontre habituellement vont de 1 mH à 10 H.

VI-2) Association en série

On a vu que l'association en série de dipôles vérifiait : $u = u_1 + u_2 + \dots + u_N$, Les dipôles étant parcourus par la même intensité i . Pour le cas où les dipôles sont des bobines

$$\text{d'inductances } L_1, L_2, \dots, L_N : u = L_1 \frac{di}{dt} + \dots + L_N \frac{di}{dt} = (L_1 + \dots + L_N) \frac{di}{dt}$$

L'association en série de bobines d'inductances L_1, L_2, \dots, L_N est une bobine d'inductance:

$$L_{\text{série}} = \sum_{i=1}^N L_i$$

VI-3) Association en parallèle

De même que pour les résistances on démontre que :

$$\frac{1}{L_{\text{parallèle}}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{L_i}$$

VI-4) Énergie emmagasinée dans une bobine d'inductance L

En convention récepteur, la relation tension-courant s'écrit pour une bobine : $u = L \, di/dt$

La puissance reçue se met alors sous la forme : $P_{\text{reçue}} = u \cdot i = L \frac{di}{dt} \cdot i = 1/2 L \frac{di^2}{dt}$

$$P_{\text{reçue}} = \frac{d}{dt} (1/2 L i^2)$$

$$\frac{d(i^2)}{dt} = \frac{d(i^2)}{di} * \frac{di}{dt} = 2i * \frac{di}{dt}$$

Sachant que la puissance est la dérivée de l'énergie par rapport au temps, l'expression précédente fait apparaître l'énergie instantanée d'une bobine d'inductance L, c'est-à dire présente dans la bobine à un instant donné : $E = 1/2 Li^2$

L'énergie reçue entre deux instants t_1 et t_2 est donc :

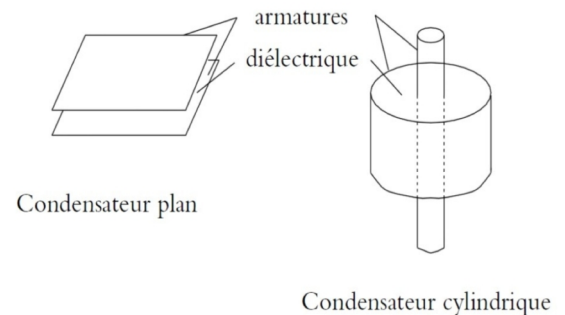
$$W = \int_{t_1}^{t_2} P dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2} L \frac{di^2}{dt} dt = \int_{t_1}^{t_2} d\left(\frac{1}{2} Li^2\right) = \frac{1}{2} Li(t_2)^2 - \frac{1}{2} Li(t_1)^2$$

L'énergie est une fonction continue du temps c'est-à-dire qu'elle ne peut pas apparaître subitement. On déduit de la relation précédente que l'intensité parcourant une bobine est une fonction continue du temps.

La puissance reçue par une bobine peut changer de signe au cours du temps.

- Si E diminue (donc si |i| diminue), P est négative : la bobine cède effectivement de l'énergie à l'extérieur et se comporte comme un générateur.

- En revanche, si E augmente, P est positive : la bobine reçoit effectivement de l'énergie de l'extérieur et se comporte comme un récepteur.



VII- LES CONDENSATEURS

VII-1 Condensateur et capacité

a) Présentation

Les condensateurs sont des composants constitués de :

- Deux conducteurs qui se font face et sont appelés armatures.
- Un matériau isolant, le diélectrique, situé entre les deux armatures. Ils peuvent être de plusieurs formes : plan, cylindrique, etc.

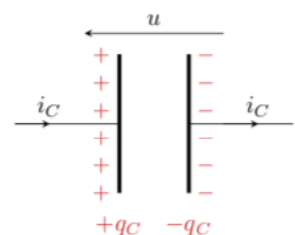
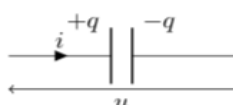
Un condensateur est un dipôle formé par 2 armatures métalliques séparées par un matériau isolant (diélectrique).

En électricité, on utilise la plupart du temps des condensateurs plans enroulés pour des raisons de gain de place. L'une des armatures porte une charge q tandis que l'autre porte une charge -q.

b) relation courant-tension

La modélisation la plus simple des condensateurs est celle d'une capacité C. Une capacité C est caractérisée par la relation entre la charge q et la tension appliquée aux bornes u : $q = Cu$

Symbole :



On notera l'importance du sens choisi pour l'intensité i par rapport à la position des charges q et $-q$: l'intensité i arrive sur l'armature de charge $+q$.

Les capacités sont exprimées en farads, de symbole F.

En convention récepteur, on a la relation :
$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}$$

$q = Cu$ et $i = \frac{dq}{dt}$ d'où $i = C \frac{du}{dt}$

En convention générateur on a (si on inverse la flèche de u par exemple):

$u = -q/C$ et $du/dt = -(dq/dt)/C$ d'où $i = -C du/dt$

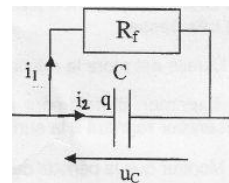
Les armatures stockent des charges électriques.

En régime continu, $i = 0$ (le condensateur se comporte comme un coupe-circuit).

En régime variable, $i = dq/dt$ et $q = Cu$; donc $i = C du/dt$ (en convention récepteur).

Remarque : la tension aux bornes d'un condensateur et sa charge sont des fonctions continues du temps.

$u_c(t^-) = u_c(t^+)$ et $q(t^-) = q(t^+)$



c) Modélisation

Condensateur réel :

L'isolant (diélectrique) d'un condensateur n'est jamais parfait. La conductance du diélectrique (situé entre les armatures du condensateur) , bien que très faible, n'est pas nulle. Le condensateur réel est équivalent à un condensateur idéal en parallèle avec une résistance de grande valeur (de l'ordre de $10^4 \text{ M}\Omega$).

d) Ordres de grandeurs

Composants électroniques	Quelques nF/F
Condensateurs d'alimentation	Quelques mF
Condensateur Haute capacité	1 à 10 Farad

L'ordre de grandeur des capacités courantes va de 1 pF (soit $1 \cdot 10^{-12} \text{ F}$) à 1 mF.

VII-2 Association en série

On a vu que l'association en série vérifiait :

$u = u_1 + u_2 + \dots + u_N$, les dipôles étant parcourus par le même courant. Pour le cas où les dipôles sont des condensateurs de capacités C_1, C_2, \dots, C_N :

$$i = C_1 \frac{du_1}{dt} = \dots = C_N \frac{du_N}{dt}$$

Or $u = u_1 + u_2 + \dots + u_N$, donc :

$$\frac{du}{dt} = \frac{du_1}{dt} + \dots + \frac{du_N}{dt}$$

$$\Leftrightarrow \frac{du}{dt} = \frac{i}{C_1} + \frac{i}{C_2} + \dots + \frac{i}{C_N} = i \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N} \right)$$

L'association en série de condensateurs de capacités C_1, C_2, \dots, C_N est un condensateur de capacité C telle que :

$$\frac{1}{C_{série}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i}$$

L'association en série de condensateurs de capacités C_1, C_2, \dots, C_N est différente des résistances et conductances en série mais analogue à celle en parallèle.

VII-3) Association en parallèle

L'association en parallèle de condensateurs de capacités C_1, C_2, \dots, C_N est un condensateur de capacité C telle que :

$$C_{parallèle} = \sum_{i=1}^N C_i$$

L'association en parallèle de condensateurs de capacités C_1, C_2, \dots, C_N est différente des résistances en parallèle mais analogue à celle en série.

VI-4) Energie stockée dans le condensateur

En convention récepteur, la relation tension - courant s'écrit pour un condensateur de capacité C :

$$q = Cu \text{ et } i = \frac{dq}{dt} \text{ d'où } i = C \frac{du}{dt}$$

La puissance reçue par le condensateur se met sous la forme :

$$P_{reçue} = u \cdot i = u \cdot C \frac{du}{dt} = 1/2 C \frac{du^2}{dt} = \frac{d}{dt} (1/2 Cu^2)$$

Comme dans le cas de la bobine, l'expression précédente fait apparaître l'énergie instantanée d'un condensateur de capacité C , c'est-à-dire présente dans le condensateur à un instant donné :

$$E = 1/2 Cu^2 = \frac{q^2}{2C}$$

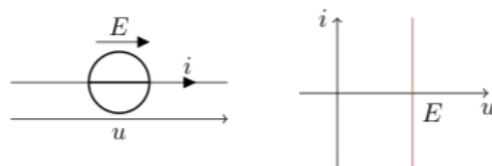
L'énergie est une grandeur continue dans le temps. De l'expression de l'énergie instantanée, on déduit que la tension aux bornes d'un condensateur de capacité C est une fonction continue du temps ainsi que la charge qui lui est proportionnelle.

VIII LES GENERATEURS

VIII-1) Source de tension idéale

Une source idéale de tension est un dipôle électrique dont la tension aux bornes ne dépend pas de l'intensité du courant qui le traverse.

Sa représentation en convention générateur et sa caractéristique sont les suivantes :



La tension est indépendante de l'intensité du courant parcourant le circuit c'est la **force électromotrice de la source, soit f.e.m.** en abrégé, ou encore la **tension à vide** (la tension étant la même pour tout courant, c'est notamment celle correspondant au cas $i = 0$ qui est la tension à vide par définition).

VIII-2) Source de courant idéale

Une source idéale de courant est un dipôle parcouru par un courant constant quelle que soit la tension à ses bornes.

Sa représentation en convention générateur et sa caractéristique sont les suivantes :



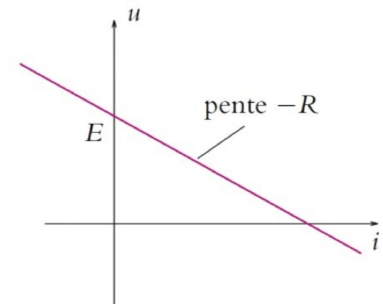
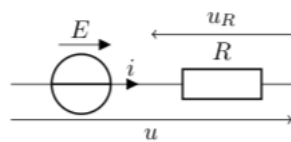
La grandeur I_0 ou η_0 est appelée courant de court-circuit. On utilise aussi l'expression **courant électromoteur ou c.e.m.**

VIII-3 Générateur de Thévenin

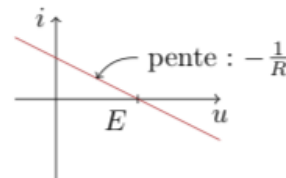
En général les générateurs de laboratoire ont une résistance interne et leur caractéristique est représentée ci-contre :

Il s'agit de la caractéristique d'un dipôle linéaire dont l'équation peut s'écrire: $u = E - Ri$. On peut alors modéliser ce dipôle par une source de tension idéale et une résistance en série :

Modèle de Thévenin :



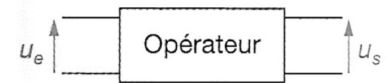
$u = E - Ri$ donne : $R i = E - u$ d'où $i = E/R - u/R$



On mesure une tension de 3,0 V aux bornes d'une pile qui débite un courant de 0,10 A. La tension de la même pile tombe à 2,2 V lorsque l'intensité délivrée est de 0,20 A. On modélise la pile par un générateur de Thévenin.

- 1- Que valent la résistance interne et la f.e.m. à vide?
- 2- Lorsque la tension est de 3,0 V, calculer la puissance fournie par la pile au reste du circuit, ainsi que la puissance perdue dans la pile par effet Joule.

IX – RESISTANCE D'ENTREE ET DE SORTIE



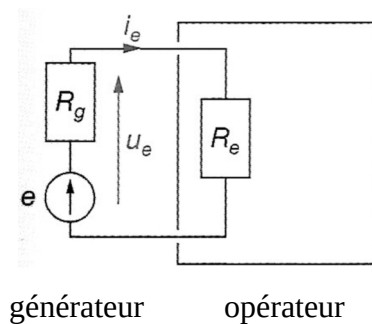
XI-1) Maille d'entrée

Le traitement des signaux électriques (amplification, filtrage) s'effectue à l'aide d'opérateurs dont le plus simple comprend une entrée et une sortie.

Vu de l'entrée, l'opérateur se présente comme un dipôle, aux bornes duquel s'applique la **tension d'entrée** u_e et à travers lequel circule un **courant électrique d'intensité** i_e . Lorsque la caractéristique (u_e, i_e) est linéaire, l'opérateur est équivalent à un résistor vis-à-vis de la maille d'entrée, on définit sa

résistance d'entrée : $R_e = \frac{u_e}{i_e}$.

Un générateur de tension à vide e et de résistance interne R_g étant branché sur l'entrée de l'opérateur, on peut définir un schéma équivalent électrique relatif à la maille d'entrée.

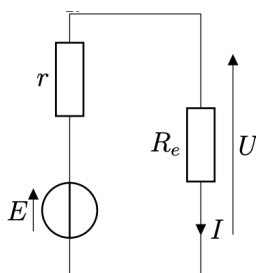


Un diviseur de tension apparaît, composé de la résistance de sortie du générateur et de la résistance d'entrée de l'opérateur : la relation entre les tensions est alors : $u_e = \frac{e * R_e}{R_e + R_g}$

Tant que la résistance d'entrée est très supérieure à la résistance interne du générateur, $R_e \gg R_g$, les deux tensions e et u_e sont quasiment identiques : $u_e \approx e$.

En revanche, la tension aux bornes du dipôle peut devenir très différente de la tension à vide du générateur : elle n'en est que la moitié en cas d'égalité ($R_e = R_g$).

En régime continu, l'étage électronique d'entrée d'un oscilloscope peut se modéliser par sa seule résistance d'entrée $R_e = 1 \text{ M}\Omega$. On connecte un générateur de résistance interne $r = 50 \text{ }\Omega$ sur l'entrée de l'oscilloscope. Quelle erreur relative commet-on en confondant la f.é.m. E du générateur et la tension U mesurée par l'oscilloscope? Conclure.

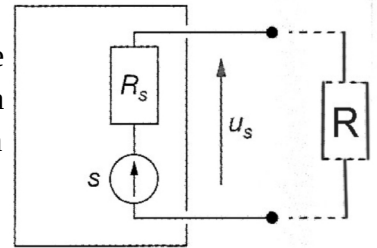


XI-2) Maille de sortie

L'opérateur se comporte couramment comme un générateur linéaire, pour ce qui concerne sa sortie. On peut alors le modéliser à l'aide d'une source de tension de valeur caractéristique s et d'une résistance interne R_s .

Lorsqu'un dipôle linéaire de résistance R est connecté entre les bornes de sortie de l'opérateur, un diviseur de tension apparaît, composé de la résistance de sortie R_s et de la résistance R . La relation entre s et la tension

$$u_s \text{ apparaissant en sortie est alors : } u_s = \frac{s * R}{R + R_s}$$



La tension u_s est donc inférieure à la tension à vide de l'opérateur. On ne peut les considérer voisines que si $R \gg R_s$: $u_s \approx s$.

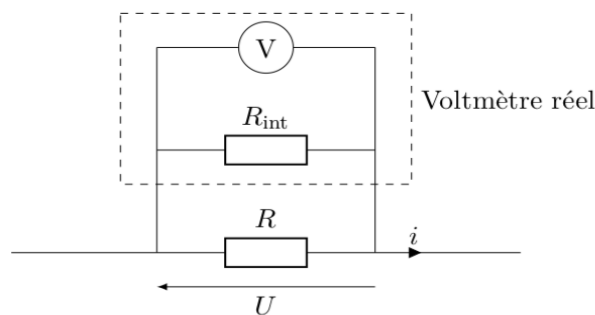
Connecter un dipôle résistif en sortie d'un opérateur met en jeu un diviseur de tension, la tension observée n'est voisine de la tension à vide que si la résistance connectée est très supérieure à la résistance de sortie de l'opérateur.

22

XI-3) Exemples

Tous les appareils de mesures de tensions, comme les voltmètres ou les oscilloscopes, doivent être placés en parallèles de la tension à mesurer. Idéalement, il faut que leur résistance soit infinie. En effet, dans ce cas, aucun courant ne passe dans l'appareil de mesure qui ne perturbe ainsi pas le montage électrique.

En réalité, tous les appareils de mesures ont une résistance interne R_{int} . La situation réelle est donc celle de la figure ci-dessous.



Dans ce cas, la tension U est imposée par le courant i imposé par le reste du circuit mais aussi par

la présence de la résistance interne R_{int} . La tension U vaut alors $U = \frac{R R_{interne} i}{R + R_{interne}}$ Pour que

l'appareil de mesure ne perturbe pas la tension et le circuit, il faut donc $R \ll R_{interne}$

C'est pour cette raison que les résistances d'entrée des multimètres sont très élevées, ici de l'ordre de $10 \text{ M}\Omega$.

En revanche, les ampèremètres, pour être de bonne qualité, doivent avoir une résistance interne la plus faible possible, pour ne pas bloquer le courant qu'ils mesurent et donc pour ne pas influencer le reste du circuit.

I – L'INTENSITE DU COURANT ELECTRIQUE

- I-1) Nature du courant électrique
- I-2) Distinction entre agitation et migration
- I-3) Débit de charge-intensité
- I-4) Conservation de la charge
- I-5) Loi des nœuds

II – LA TENSION

- II-1) Le Potentiel électrique
 - a) **Définition**
 - b) **La masse**
- II-2) Additivité des tensions – Loi des mailles

III APPROXIMATION DES REGIMES QUASI-STATIONNAIRES

- III-1) Régime continu ou variable
- III-2) Approximation des régimes quasi-stationnaires ou ARQS
- III-3) Exemples d'application de l'ARQS

IV – GENERALITES SUR LES DIPOLES

- IV-1) Caractéristique d'un dipôle
- IV-2) Classification des dipôles
 - a) **Dipôle linéaire ou non linéaire**
 - b) **Dipôle passif ou actif**
- IV-3) Modélisation d'un dipôle
- IV-4) Dipôles récepteurs et générateurs
 - a) **Définition de la puissance**
 - b) **Caractère générateur et récepteur**
 - c) **Convention récepteur et générateur**

V LE DIPOLE RESISTANCE- RESISTOR

- V-1) Présentation
 - a) **Loi d'ohm**
 - b) **Ordres de grandeurs**

- V-2) Association en série
- V-3) Association en parallèle
- V-4) Puissance dissipée dans un résistor
- V-5) Le fil électrique
- V-6) L'interrupteur ouvert
- V-7) Diviseur de tension
- V-8) Diviseur de courant

VI – BOBINE D'INDUCTANCE L

- VI-1) Bobine et auto-induction
 - a) Inductance (bobine idéale)**
 - b) Modélisation d'une bobine**
 - c) Ordres de grandeurs**
- VI-2) Association en série
- VI-3) Association en parallèle
- VI-4) Énergie emmagasinée dans une bobine d'inductance L

VII– LES CONDENSATEURS

- VII-1 Condensateur et capacité
 - a) Présentation**
 - b) relation courant-tension**
 - c) Modélisation**
 - d) Ordres de grandeurs**
- VII-2 Association en série
- VII-3) Association en parallèle
- VI-4) Energie stockée dans le condensateur

VIII LES GENERATEURS

- VIII-1) Source de tension idéale
- VIII-2) Source de courant idéale
- VIII-3 Générateur de Thévenin

IX – RESISTANCE D'ENTREE ET DE SORTIE

- IX-1) Maille d'entrée
- IX-2) Maille de sortie
- IX-3) Exemples

Expérience : Machine de Wimshurst

La friction entre deux corps métalliques induit un phénomène électrostatique, des électrons sont arrachés au métal. Dans la machine, ce phénomène se produit entre les balais et les traits métalliques sur les roues tournantes. Pour assurer la neutralité électrique, les électrons se déplacent et se retrouvent sur une boule métallique. Par conservation de la charge, l'autre boule est chargée positivement. Or les charges positives et négatives s'attirent, quand suffisamment de charges sont présentes, un éclair apparaît. Il s'agit d'un courant électrique qui rétablit la neutralité du dispositif. Cette expérience peut être visualisée dans <https://youtu.be/Zilvl9tS0Og>

L'éclair matérialise le déplacement des électrons vers le potentiel électrique le plus élevé, un courant électrique apparaît donc en sens inverse.

