

Chapitre E1 – Électricité : Circuits et dipôles électriques

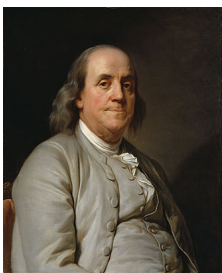
Introduction

Depuis l'antiquité et jusqu'au début du XVII^e siècle, l'électricité reste une curiosité cantonnée aux phénomènes naturels tels que les poissons électriques, observés par les égyptiens dans le Nil, ou encore l'électricité statique générée par le frottement de baguettes d'ambre, étudiée par THALÈS. C'est le scientifique anglais William GILBERT qui étudie le premier les phénomènes électriques et magnétiques, inventant au passage le mot latin *electricus*, issu du grec *ηλεκτρον* signifiant "ambre".

Par la suite, de nombreux scientifiques étudieront les phénomènes électriques entre le XVII^e et le début du XVIII^e siècle. Notamment l'américain Benjamin FRANKLIN, qui montra que la foudre est un phénomène électrique et qui étudia les bouteilles de LEYDE, dispositif de stockage de charges statiques. C'est à cette époque également que Charles-Augustin COULOMB déduisit de ses expériences l'existence de charges de signes opposés, conduisant à l'axiome : "les objets de même charge se repoussent tandis que les objets de charge opposée s'attirent".

À la fin du XVIII^e et au début du XIX^e siècle, la rivalité entre les italiens Luigi GALVANI et Alessandro VOLTA donna naissance à la première pile voltaïque, constituée de couches alternées de zinc et de cuivre.

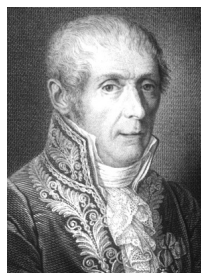
L'unité des phénomènes électriques et magnétiques, l'électromagnétisme, est due au danois Hans Christian ORSTED et à André-Marie AMPÈRE en 1819-1820, en étudiant l'interaction entre aimants et courants électriques. En 1821, le britannique Michael FARADAY invente le moteur électrique et introduit la notion de champ électrique tandis que son compatriote Georg OHM analyse mathématiquement les circuits électriques en 1827 tandis que son compatriote Gustav KIRCHHOFF propose en 1845 des lois reliant les tensions aux résistances et intensités du courant dans les circuits. L'édifice théorique est définitivement complété par l'écossais James Clerk MAXWELL en 1861-62.



FRANKLIN



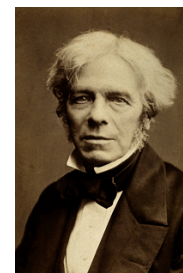
COULOMB



VOLTA



AMPÈRE



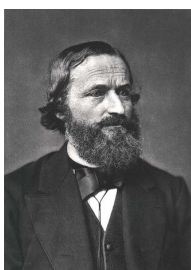
FARADAY



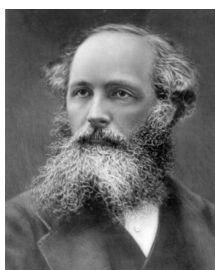
OHM

Par la suite, c'est à la fin du XIX^e et au début du XX^e qu'on observe les plus grands progrès dans l'électrotechnique, pierre angulaire de la seconde révolution industrielle :

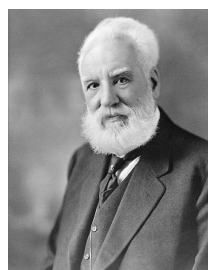
- Invention du téléphone par l'écossais Alexander Graham BELL.
- Développement du télégraphe, des centrales électriques, des lampes à incandescence par l'américain Thomas EDISON, entrepreneur de génie et fondateur de *General Electric*.
- Électrification de la ville de New York en courant alternatif par George WESTINGHOUSE, industriel allié à l'autrichien Nikola TESLA, éternels rivaux d'EDISON dans la "guerre des courants".



KIRCHHOFF



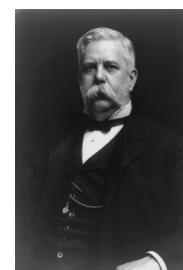
MAXWELL



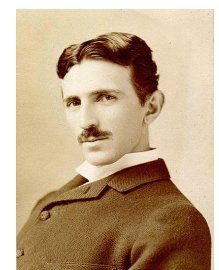
BELL



EDISON



WESTINGHOUSE



TESLA

Enfin, la troisième révolution industrielle est quand à elle menée par les révolution dans le domaine numérique et informatique. Les premiers dispositifs à semi-conducteur développés au début du XX^e siècle permettent la création des premiers transistors bipolaires dans les laboratoires BELL au milieu du même siècle, suivis des transistors à effet de champ dix ans plus tard.

La technologie électrique s’est depuis considérablement développée, au point que l’on distingue de nos jours deux spécialités principales :

- l’**électrotechnique**, dans laquelle on s’intéresse principalement à la puissance électrique, sa production, son transport et son utilisation dans des machines industrielles.
- l’**électronique**, ou science des systèmes entrée-sortie, qui traite des signaux électriques contenant une information.

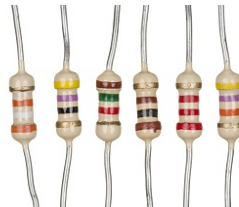
Objectifs du chapitre

- Définir et utiliser les notions de charge électrique, de courant électrique, d’intensité du courant, de potentiel électrique et de tension.
- Décrire et modéliser le comportement de dipôles (caractéristiques) et leurs associations sous la forme de circuits électriques.
- Effectuer des bilans d’énergie et de puissance électrique.

Capacités exigibles

Utiliser les ordres de grandeur des charges des électrons et des ions en vue de légitimer l’utilisation de grandeurs électriques continues.
 Distinguer la nature des différents porteurs de charges et les origines du courant électrique.
 Exprimer l’intensité du courant électrique en terme 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 la loi des mailles.
 Algébriser les grandeurs électriques et connaître les conventions récepteur et générateur.
 Connaître les ordres de grandeur des intensités et des tensions dans différents domaines d’application.
 Utiliser les relations entre l’intensité et la tension
 Citer les ordres de grandeur pour les composants R , L et C .
 Modéliser une source non idéale en utilisant la représentation de THÉVENIN.
 Exprimer la puissance dissipée par effet Joule dans une résistance.
 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.
 Étudier la caractéristique d’un dipôle pouvant être éventuellement non-linéaire.

Validé ?



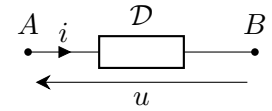
I Cadre de l'étude : circuits dans l'ARQS

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.

I.1 Dipôles

Définition – Dipôle

- Un **dipôle** est un composant électrique qui peut être relié à l'extérieur en deux points particuliers, appelés **bornes** (ou pôles). Chaque dipôle se schématise à l'aide d'un symbole caractéristique. Le dipôle générique \mathcal{D} est symbolisé par un rectangle, qui est également le symbole de la résistance.



- Un dipôle est défini par sa **caractéristique courant-tension** $i(u)$, qui relie l'intensité i qui le traverse et la tension u à ses bornes. Il peut s'agir d'une expression mathématique, éventuellement simple (ex. : $u = Ri$), ou d'une courbe caractéristique (ex. : diode).

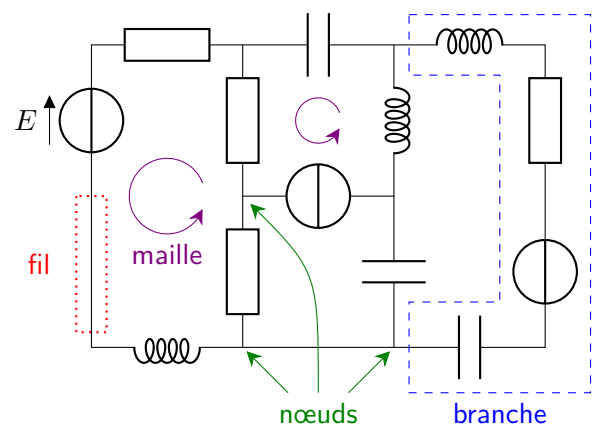
Compléments :

- Un dipôle est dit **linéaire** si sa caractéristique courant-tension $i(u)$ est une équation différentielle linéaire (ex : résistor, condensateur, bobine, générateur de tension). Si ce n'est pas le cas, il est dit **non-linéaire** (ex : diode, alimentation stabilisée)
- Un dipôle est dit **passif** si sa caractéristique passe par le point ($i = 0, u = 0$) et **actif** sinon.

I.2 Circuit électrique

Définition – Circuit électrique

- Un **circuit électrique** est un ensemble de conducteurs (**fil électrique**, solution électrolytique, ...), schématisés par des traits, reliant des composants électronique (dipôles, amplificateurs opérationnels, transistors, ...), schématisés par des symboles caractéristiques.
- Un **nœud** est un point où se rencontrent au moins trois fils.
- Une **branche** d'un circuit électrique est une succession **en série** de composants électroniques (au moins un) reliés entre eux par des fils. Chaque borne d'un dipôle n'est reliée qu'à un seul autre dipôle dans la branche.
- Lorsqu'une ou plusieurs branches se referment sur elles-mêmes, elles définissent une **maille** du circuit.
- Un circuit électrique **fermé** comporte au moins une maille.



I.3 Approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS)

Les variations du courant et de la tension électrique se propagent dans un circuit à une vitesse c proche de la vitesse de la lumière dans le vide : ses grandeurs sont en réalité des ondes. Cela pose un problème : comment s'assurer que les variations imposées par une source (de courant ou de tension) se répercuteront rapidement dans le reste du circuit ? ⚠ 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.

Définition – Approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS)

- Dès lors que l'on peut considérer que tous les points d'un circuit électrique sont "immédiatement" au courant des variations du courant électrique en un autre point du circuit (généralement la source), on parle d'**approximation des régimes quasi-stationnaires** (ARQS). Cela revient à considérer les variations suffisamment lentes pour supposer que la transmission est instantanée : on **néglige le phénomène de propagation**.
- L'ARQS consiste à considérer le temps τ de propagation de l'information dans le circuit comme négligeable devant le temps caractéristique T de variation du courant : $\tau \ll T$. Pour un circuit de taille caractéristique L , on a $\tau \simeq L/c$ et on obtient la condition : $L \ll cT \Leftrightarrow f \ll \frac{c}{L}$.

Exemple ou exercice d'application – Circuit domestique – antenne radio FM

Que dire de l'ARQS pour un circuit domestique est alimenté par le signal EDF à $f = 50$ Hz ?
 D'une antenne wifi de taille caractéristique $L = 10$ cm qui capte un signal wifi de fréquence $f = 2,4$ GHz ?

II Intensité du courant électrique

II.1 Courant électrique

Rappel : La matière est constituée d'atomes, formés d'un noyau chargé positivement et entouré d'électrons chargés négativement, le tout possédant globalement une charge nulle.

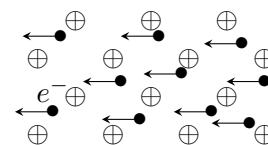
Définition – Charge électrique

- La **charge électrique** q est un paramètre caractéristique d'un corps physique (microscopique ou macroscopique), comme peut l'être sa masse. Son unité est le coulomb C ($1C = 1A.s$) et $[q] = \mathbf{I.T}$.
- La charge électrique est **quantifiée** et **additive** : elle n'apparaît que par multiples de la charge élémentaire $e = 1,6.10^{-19}$ C, opposée de la charge d'un électron : $q = p \times e, p \in \mathbb{Z}$.
- Dans un système isolé, la charge électrique est **conservée** : on ne peut pas la détruire ni la créer mais uniquement la déplacer.

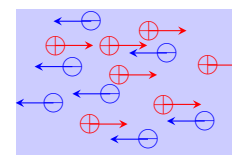
Définition – Le courant électrique

Le **courant électrique** est un mouvement ordonné de **porteurs de charges** électriques qui se déplacent.

- Dans un conducteur métallique, il s'agit des **électrons libres** ou **électrons de conduction** résultants des liaisons métalliques, responsables de la structure microscopique cristalline des métaux. Les ions positifs sont figés et ne participent pas au courant.
- Dans une solution électrolytique, il s'agit des **ions en solution** (dont la charge peut être positive ou négative).



Métal : ions \oplus fixes et électrons \bullet mobiles



Électrolyte : ions \oplus et \ominus mobiles

II.2 Intensité du courant électrique

Comme le courant électrique est un mouvement ordonné, on imagine que son intensité va dépendre de la vitesse des porteurs : plus ils vont vite, plus l'intensité est importante. Mais elle doit également dépendre du nombre de porteurs : plus ils sont nombreux, plus l'intensité est importante. Par analogie hydraulique, on peut comparer l'intensité du courant électrique au débit volumique d'un cours d'eau (exprimé en $m^3.s^{-1}$).

Définition – Intensité

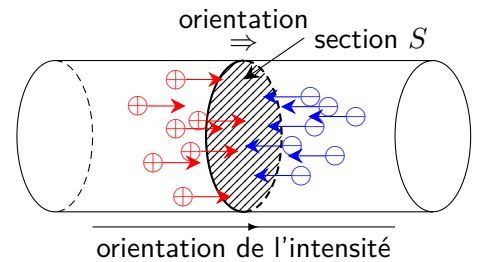
• On considère un conducteur de section S dans lequel est établi un courant électrique stationnaire (indépendant du temps). L'intensité du courant électrique correspond au **débit de charge électrique** à travers la section S : si on note $\Delta q = \sum q_i N_i$ la charge électrique qui traverse la surface S pendant une durée Δt , due au passage de N_i porteurs i de charge q_i , alors l'**intensité du courant** s'exprime $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$. Unité S.I. : ampère (1 A).

• Les porteurs de charge pouvant se déplacer dans un sens comme dans l'autre, il est nécessaire d'**orienter la surface** S pour compter le passage des charges. Cette orientation est symbolisée par une flèche sur les fils : \xrightarrow{i} .

Par **convention**, l'intensité sera considérée positive si les charges positives passent à travers S dans le sens choisi par l'orientation. Elle sera négative sinon. L'intensité du courant est donc une grandeur algébrique.

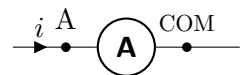
$\xrightarrow{i} \Leftrightarrow \xleftarrow{i' = -i}$

• Dans le cas où le courant varie dans le temps, on définit l'**intensité instantanée** $i(t)$ comme la limite à chaque instant du courant électrique lorsque $\Delta t \rightarrow 0$: $i(t) = \frac{dq}{dt}$. Mathématiquement, il s'agit d'une dérivée.



Compléments :

- On note avec une majuscule I les courants stationnaires et avec une minuscule $i(t)$ les courants variables.
- On mesure l'intensité d'un courant à l'aide d'un **ampèremètre** que l'on branche **en série** le long du fil à travers lequel passe le courant dont on veut mesurer l'intensité. L'ampèremètre "compte" le **débit de charges** à travers le fil, entrant par la borne A/mA et sortant par la borne COM.



- **O.d.g :** Électronique : de 1 à 10 mA
Électroménager : de 1 à 10 A
Industrie/électrotechnique : de 10^2 à 10^3 A
Éclair : 10^4 A (brièvement).

Effet sur l'organisme	i alternatif	I continu
Seuil de perception, picotements	0,5 mA	2 mA
Seuil contraction musculaire	10 mA	–
Seuil de paralysie respiratoire	30 mA	–
Seuil de fibrillation cardiaque	50 mA	130 mA

- Dans un fil électrique, le courant est uniquement dû au mouvement des électrons, de charge négative : les électrons se déplacent dans le sens opposé de l'intensité.

Exemple ou exercice d'application – Courant et mouvement des électrons

1. Combien d'électrons passent par seconde dans un fil parcouru par un courant d'intensité $I = 1$ A ?

On montre que le courant qui traverse un fil de section S est relié à la densité volumique de porteurs de charges n (en m^{-3}), à leur charge q est à leur vitesse moyenne v : $I = nqvS$.

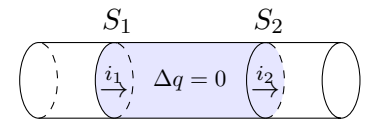
2. Quelle est la vitesse des électrons dans un fil de cuivre ($\rho_{Cu} = 8,96 \cdot 10^3$ kg.m⁻³ et $M_{Cu} = 63,5$ g.mol⁻¹) de section $S = 1$ mm² parcouru par un courant $I = 1$ A. Pour déterminer n , on supposera qu'un atome de cuivre fournit un électron de conduction.

Remarque : L'intensité du courant électrique mesure le **mouvement d'ensemble** des porteurs de charges. Nous verrons en thermodynamique que toute particule est constamment animée d'un mouvement d'agitation thermique dont les directions sont distribuées de façon isotrope (aucune direction privilégiée). Il n'en résulte donc aucun mouvement d'ensemble. Autrement dit, même si un grand nombre de porteurs de charges peuvent traverser un section donnée d'un fil électrique sous l'effet de leur agitation thermique, il y en a en moyenne autant qui passent de gauche à droite que de droite à gauche et l'intensité du courant résultant est nulle. Ainsi, il faut une action extérieure pour mettre en mouvement des charges dans un matériau à l'équilibre et créer un mouvement d'ensemble.

II.3 Loi des nœuds – première loi de Kirchhoff

- On considère un fil parcouru par un courant électrique. Si on isole par la pensée une petit volume contenu entre les surfaces S_1 et S_2 . En régime stationnaire, la charge contenue dans ce volume ne varie pas et doit donc être constante.

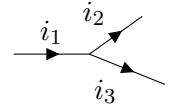
Or, il entre un courant I_1 dans S_1 et il sort un courant I_2 par S_2 . La conservation de la charge intérieure $\Delta q = 0$ impose l'égalité des charges entrante et sortant $q_1 = q_2$ et donc l'égalité des courants $i_1 = i_2$.



Propriété – Courant dans un fil

Dans l'ARQS, le courant est le même en chaque point d'une branche, à fortiori dans un fil.

- On considère un nœud où sont reliés trois fils. Il ne peut pas y avoir d'accumulation de charges au niveau du nœud, ainsi les charges qui arrivent par un fil doivent forcément repartir dans les deux autres : $q_1 = q_2 + q_3$. On peut donc écrire $i_1 = i_2 + i_3 \Leftrightarrow i_1 - i_2 - i_3 = 0$.



Principe ou loi physique – Loi des nœuds

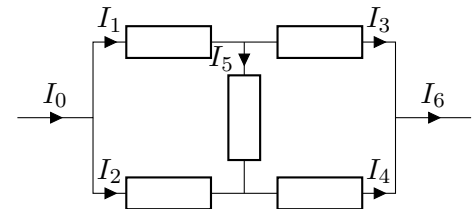
On considère un nœud quelconque où sont connectés N fils, chacun parcouru par un courant $\{i_k\}$, $k \in \llbracket 1, N \rrbracket$.

La conservation de la charge permet d'écrire la **loi des nœuds** : $\sum_{k=1}^N \varepsilon_k i_k = 0$ où $\varepsilon_k = +1$ si le courant i_k est orienté vers le nœud et $\varepsilon_k = -1$ si il part du nœud. On peut ré-écrire

$$\sum_{k, \text{entrant}} i_k = \sum_{k, \text{sortant}} i_k$$

Exemple ou exercice d'application – Application de la loi des nœuds

Dans le circuit ci-contre, on mesure $I_0 = 4$ A, $I_1 = 1$ A et $I_4 = 2$ A. Déterminer les intensités I_2, I_3, I_5 et I_6 .



III Tension électrique

Dans un circuit électrique, la force qui met en mouvement les porteurs de charges est la **force de Lorentz électrique** $\vec{F} = q\vec{E}$ où \vec{E} est le champ électrique. Dans le cas d'un conducteur électrique, le champ électrique est orienté dans la direction du courant et il suit le cheminement des fils électriques.

La force électrique dérive d'une énergie potentielle $E_p(M) = qV(M)$ qui fait intervenir la grandeur "potentiel électrique" $V(M)$. Le champ électrique est orienté des potentiels les plus élevés vers les potentiels les plus faibles : les charges positives se déplacent dans le sens du potentiel décroissant. Inversement, les électrons se déplacent des potentiels les plus faibles vers les plus élevés.

Dans l'analogie hydraulique, la force responsable d'un écoulement naturel est la pesanteur. La différence d'énergie potentielle $\Delta E_p = mgh$ entre deux points A et B pourra être convertie en énergie cinétique de mouvement du fluide.

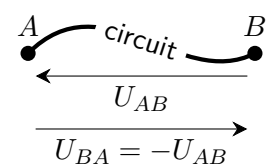
III.1 Définition

Définition – Potentiel et tension électrique

- La **tension** U_{AB} entre deux points A et B est la différence de potentiel entre les points A et B : $U_{AB} = V(A) - V(B) = V_A - V_B$. Son unité S.I. est le volt ($1V = 1\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{A}^{-1}$). On la représente par une flèche allant de B vers A .

⚠ : Le sens de la flèche est important. En effet, $U_{BA} = V_B - V_A = -U_{AB}$.

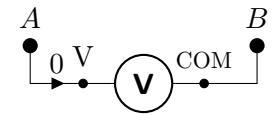
- Si le potentiel est plus élevé en A qu'en B , la tension U_{AB} est positive, sinon elle est négative : la tension est une grandeur algébrique.



Compléments :

— Comme pour le courant, l'usage veut que l'on note les tensions continues (constantes) par une majuscule U et les tensions variables par une minuscule $u(t)$.

- En utilisant les différences de potentiels, $U_{AC} = V_C - V_A = (V_C - V_B) + (V_B - V_A) = U_{AB} + U_{BC}$: les tensions sont **additives**. ⚠ Ce ne sont pas des vecteurs mais les tensions sont additives comme les vecteurs.
- On mesure une tension à l'aide d'un **voltmètre**. Pour mesurer la différence de potentiels entre A et B , il faut relier la borne V du voltmètre à A et la borne COM à B . On dit que le voltmètre est branché en **dérivation** ou en **parallèle**. Le courant qui parcourt le voltmètre doit être nul pour qu'il n'influence pas le reste du circuit.
- **O.d.g** : Circuit électronique : de 10 à 10^2 mV. Tension EDF : 230 V.
Alimentation ordinateur/téléphone portable : ≈ 10 V. Ligne haute tension : de 150 à 1200 kV.
Tension aux bornes d'un éclair : ≈ 500 MV.



Propriété – ARQS et potentiel le long d'un fil

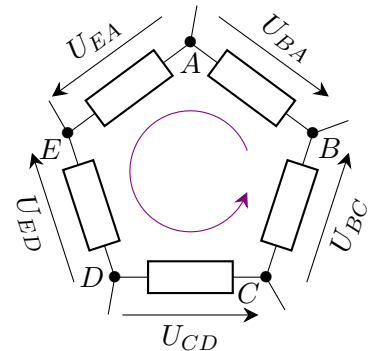
Dans l'ARQS, tous les points d'un fil (non séparés par des dipôles) sont au **même potentiel** \Leftrightarrow la tension aux bornes d'un fil est nulle.

III.2 Loi des mailles – seconde loi de Kirchhoff

On considère une maille dans un circuit électrique. On choisit tout d'abord une **orientation arbitraire**, symbolisée par la flèche courbée. À partir des potentiels V_i de chacun des nœuds, on peut écrire la relation de CHASLES sur les différences de potentiels :

$$0 = (V_A - V_B) + (V_B - V_C) + (V_C - V_D) + (V_D - V_E) + (V_E - V_A)$$

$$= U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} + U_{DE} + U_{EA}$$

$$= -U_{BA} + U_{BC} + U_{CD} - U_{ED} + U_{EA}$$


Principe ou loi physique – Loi des mailles

On considère une maille quelconque, réelle ou virtuelle, constituée de N dipôles caractérisés par des tensions $\{u_k\}_{k \in [1, N]}$ à leurs bornes. Une fois choisie une **orientation** \curvearrowright de la maille, on obtient la **loi des mailles** :

$$\sum_k \varepsilon_k u_k = 0 \text{ où } \varepsilon_k = +1 \text{ si la tension } u_k \text{ est orientée dans le sens choisi } \curvearrowright \uparrow \text{ et } \varepsilon_k = -1 \text{ sinon } \curvearrowright \downarrow.$$

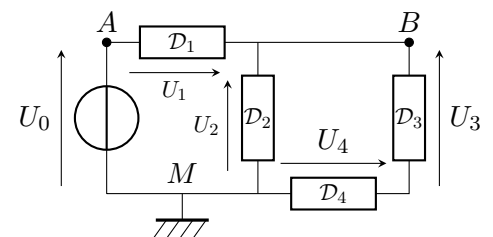
Remarques :

- Il est tout à fait possible d'appliquer la loi des mailles à une **maille virtuelle** comportant des points non reliés par un fil ou un dipôle. Par ex., dans la maille ABC : $U_{AC} = V_A - V_C = (V_A - V_B) + (V_B - V_C) = U_{AB} + U_{BC}$, alors que A et C ne sont pas directement reliés.
- La position relative des dipôles dans une branche n'a pas d'importance car les tensions sont additives.

Exemple ou exercice d'application – Application de la loi des mailles

Dans le circuit ci-contre, on mesure $U_0 = 5$ V, $U_2 = 1$ V et $U_3 = 3$ V.

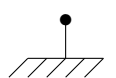
1. Déterminer les tensions U_1 et U_4 .
2. Déterminer les potentiels V_A et V_B .



III.3 Masse et terre

Définition – Masse d'un circuit électrique

- Le potentiel électrique est défini à une constante près : seules les différences de potentiels, les tensions, peuvent être mesurées. Pour fixer cette constante, on peut choisir arbitrairement une référence de potentiel, c'est-à-dire un point du circuit électrique dont on considérera le potentiel comme nul. Ce point particulier, tel que $V_{\text{masse}} = 0$, est appelé **masse du circuit**.
- Les appareils de mesure et les générateurs sont tous constitués de circuits électriques pour lesquels on peut définir individuellement une masse différente. Par convention, on choisit comme masse les bornes noires (-) de ces appareils. Il n'y a aucune raison pour que les différentes masses de ces circuits soient effectivement au même potentiel : lorsqu'on en connecte plusieurs entre eux, il est impératif de **relier toutes les masses entre elles** pour s'assurer que tous utilisent la même référence.



Définition – Prise de terre

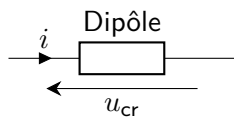
• La surface de la Terre est un objet très vaste dont le potentiel électrique ne varie presque pas : elle peut aisément absorber des variations de charges électriques d'origine expérimentale. Pour des raisons de sécurité, la carcasse métallique de la plupart des appareils électriques est reliée à la terre par une **prise de terre** (*ground* ou GND) qui est reliée à un plot métallique planté dans le sol au niveau des fondations des bâtiments.



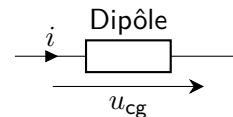
IV Puissance électrique et conventions d'orientation de la tension

Une fois choisie une orientation du courant, il y a deux possibilités pour orienter la tension aux bornes d'un dipôle pour écrire sa caractéristique $i(u)$.

Définition – Convention générateur et convention récepteur



Lorsque la tension u aux bornes d'un dipôle est dans le **sens opposé** à celui choisi pour le courant i , on dit que la tension est en **convention récepteur** (c.r.).



Lorsque la tension u aux bornes d'un dipôle est dans le **même sens** que celui choisi pour le courant i , on dit que la tension est en **convention générateur** (c.g.).

Remarques :

- Bien sûr, on a $u_{cr} = -u_{cg}$.
- Les caractéristiques $i(u)$ des **dipôles passifs** sont généralement données en **convention récepteur**.
- Les caractéristiques $i(u)$ des **dipôles actifs** sont généralement données en **convention générateur**.
- Certains dipôles vont avoir tendance à faire diminuer le potentiel le long d'une branche tandis que d'autres auront tendance à le faire augmenter. C'est pour distinguer ces deux cas que les conventions existent.

Définition – Puissance et énergie électrique

- Le produit $\mathcal{P} = u \times i$ correspond à une **puissance**, qui s'exprime en watt (1 W). Ainsi, $1V.A = 1J.s^{-1}$
- Lorsque le courant et la tension aux bornes d'un dipôle sont en **convention récepteur**, leur produit correspond à la **puissance reçue** par le dipôle : $\mathcal{P}_{reçue} = u_{cr}i$. Elle est > 0 pour un récepteur.
- Lorsque le courant et la tension aux bornes d'un dipôle sont en **convention générateur** (c.g.), leur produit correspond à la **puissance fournie** (ou cédée) par le dipôle : $\mathcal{P}_{fournie} = u_{cg}i$. Elle est > 0 pour un générateur.
- Comme $u_{cr} = -u_{cg}$, on obtient simplement la relation $\mathcal{P}_{reçue} = -\mathcal{P}_{fournie}$.

O.d.g. : Radiateur électrique : $\simeq 1$ kW.

Lampe à incandescence : $\simeq 10^2$ W.

Lampe à LED : $\simeq 10$ W

Réacteur nucléaire : 900 MW en moyenne.

Panneau solaire : $\simeq 100W/m^2$.

Circuit électronique : $\simeq 1$ W.

Définition – Énergie électrique

- L'énergie $\mathcal{E}_{1 \rightarrow 2}$ échangée entre les instants t_1 et t_2 est l'intégrale : $\mathcal{E}_{1 \rightarrow 2} = \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{P}(t)dt$.
- Si la puissance \mathcal{P} est constante, on obtient le résultat $\mathcal{E}_{1 \rightarrow 2} = \mathcal{P}\Delta t$.

Exemple ou exercice d'application – Puissance d'un smartphone

Une batterie de téléphone portable présente les caractéristiques suivantes : capacité 3300 mAh, tension 4 V. Déterminer l'énergie stockée dans la batterie puis la puissance moyenne consommée pour un téléphone nécessitant une charge toutes les 9h.

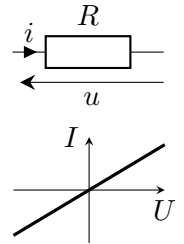
V Dipôles passifs et actifs usuels

V.1 Résistance – résistor

Le dipôle linéaire dont la caractéristique est la plus simple est un dipôle qui relie i et u de façon proportionnelle.

Définition – Résistor et résistance

- Le **résistor** est un dipôle dont la caractéristique s'écrit, en convention récepteur, $u = Ri \Leftrightarrow i = u/R$ où R est la **résistance** électrique du résistor. Elle s'exprime en ohm ($1\Omega = 1V.A^{-1}$).
- On définit la **conductance** G comme l'inverse de la résistance $G = 1/R$ de sorte que $i = Gu$. Elle s'exprime en siemens ($1S = 1\Omega^{-1}$).

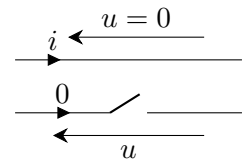


Remarques :

- **O.d.g.** : Résistance d'un fil électrique long de 1 mètre : $R = 0,02 \Omega$, résistance de sortie d'un GBF : $R = 50 \Omega$, résistance d'entrée d'un oscilloscope : $R = 10 M\Omega$, résistance usuelle en TP : $R = 10^2 - 10^3 \Omega$.
- On peut écrire : $V_{\text{après}} = V_{\text{avant}} - Ri$. Un résistor fait "chuter" le potentiel.

Propriété – Fil électrique et interrupteur

- Un **fil électrique** idéal (ou court-circuit) est tout simplement un résistor de résistance nulle : si $R = 0$, $u = 0, \forall i$.
- Un **interrupteur ouvert** (ou coupe-circuit) est équivalent à un résistor de résistance infinie : si $R \rightarrow +\infty$, $G \rightarrow 0$ et $i = 0, \forall u$.



Remarque : C'est un modèle idéal puisque un fil électrique réel est constitué d'un métal conducteur (généralement le cuivre) et possède alors une résistance, généralement négligeable devant les autres résistances présentes dans le circuit.

Propriété – Puissance reçue – effet JOULE

- La puissance reçue par un résistor s'écrit $\mathcal{P}_R^{\text{reçue}} = Ri^2 = u^2/R$. Elle est toujours positive : une résistance ne peut pas fournir une puissance positive.
- Cette puissance électrique reçue est transformée en puissance thermique $\mathcal{P}_J = \mathcal{P}_R^{\text{reçue}}$ puis dissipée dans l'atmosphère : il s'agit de l'**effet Joule**. Son origine résulte de chocs entre porteurs de charge et ions du réseau métallique.

Exemple ou exercice d'application – Alimentation d'une lampe

On souhaite alimenter une lampe de puissance $\mathcal{P} = 100 \text{ W}$, assimilable à une résistance R , en la branchant au réseau électrique, imposant une tension $E = 170 \text{ V}$ à ses bornes.

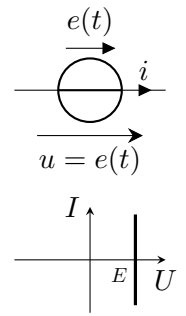
1. Déterminer la valeur de la résistance R et l'intensité I du courant qui traverse la lampe.

V.2 Générateur de tension idéal et générateur réel de Thévenin

2.a Générateur de tension idéal

Définition – Générateur de tension idéal

- Un **générateur idéal de tension** est un dipôle actif non-linéaire dont la caractéristique s'écrit, en convention générateur, $u = e(t), \forall i$ où $e(t)$ est une fonction du temps (constante E , sinusoïdale, triangle, créneau ...).
- La tension e aux bornes d'un tel générateur, appelée **force électromotrice** ou f.e.m, est imposée (même s'il n'est pas relié à un circuit). Il peut *a priori* délivrer un courant de n'importe quelle intensité.



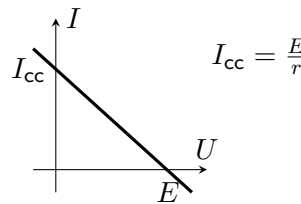
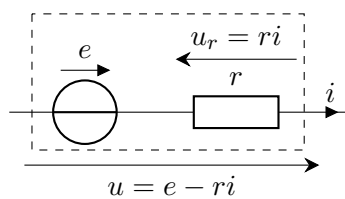
Exemples : Pile, accumulateur, alternateur, dynamo.

2.b Générateur de tension réel – modèle de Thévenin

En pratique, aucun générateur réel ne présente une telle caractéristique idéale. En général, la tension u aux bornes d'un générateur de tension décroît avec le courant i qu'il débite : plus il fournit de courant, plus la tension à ses bornes va diminuer.

Définition – Générateur de tension réel – modèle de THÉVENIN

On représente un générateur réel par le **modèle de Thévenin** qui associe un générateur de tension idéal de f.e.m. e avec, en série, une résistance r appelée **résistance interne** du générateur : $u = e - ri$.



O.d.g. : pile AA : ($E = 1,5 \text{ V}, r \simeq 5 \Omega$). GBF : ($E \simeq 10 \text{ V}, r = 50 \Omega$). Batterie voiture : ($E = 10 \text{ V}, r \simeq 10^{-2} \Omega$).

V.3 Point de fonctionnement

Définition – Point de fonctionnement

Dans un circuit, on appelle **point de fonctionnement** d'un dipôle le couple de valeurs (I, U) du courant qui le traverse et de la tension à ces bornes. Ces valeurs dépendent du reste du circuit.

Méthode – Circuit à deux dipôles

Dans un circuit modélisé par la connexion de deux dipôles, le point de fonctionnement est l'**intersection des caractéristiques** de ces deux dipôles, l'un orienté en c.r., l'autre en c.g.

Exemple ou exercice d'application – Bilan d'alimentation d'un résistor par un générateur réel

Un générateur réel, de f.e.m. E et de résistance interne r , alimente un résistor de résistance R .

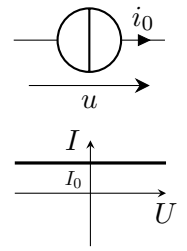
1. Faire un schéma du circuit électrique puis déterminer le point de fonctionnement du circuit (intensité I délivrée).
2. En déduire la puissance $\mathcal{P}_{\text{gén.}}$ fournie par la f.e.m du générateur, la puissance \mathcal{P}_r dissipée par la résistance interne et la puissance \mathcal{P}_R reçue par le résistor. Quelle relation peut-on écrire entre ces trois puissances ?
3. A.N. pour une pile AA : $E = 1,5 \text{ V}, r = 3 \Omega$ et $R = 12 \Omega$.
4. Bonus : le générateur étant donné, pour quelle valeur de R la puissance reçue par le résistor est-elle maximale ? Que valent alors la puissance reçue et la tension aux bornes du résistor ? Quelle proportion de la puissance fournie est alors reçue par le résistor ?

V.4 Générateur de courant idéal et générateur réel de Norton

4.a Générateur de courant idéal

Définition – Générateur de courant idéal

- Un **générateur idéal de courant** est un dipôle actif dont la caractéristique s'écrit, en convention générateur, $i = i_0(t), \forall u$ où $i_0(t)$ est une fonction du temps (constante I_0 , sinusoïdale, triangle, créneau ...).
- Le courant $i_0(t)$ délivré par un tel générateur, appelé **courant de court-circuit** c.c.c., est imposé. La tension à ses bornes peut prendre n'importe quelle valeur.



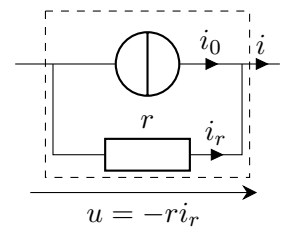
Exemples : photoélectricité, inductance, alimentation stabilisée.

4.b Générateur de courant réel – modèle de Norton

Comme pour les générateurs de tension, aucun générateur réel de courant ne présente une telle caractéristique idéale : le courant i délivré décroît avec la tension aux bornes du générateur.

Définition – Générateur de courant réel – modèle de NORTON

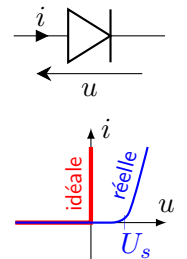
- On représente un générateur réel par le **modèle de Norton** qui associe un générateur de courant idéal de c.c.c. i_0 avec, en parallèle, une résistance r appelée **résistance interne** (ou résistance de sortie) du générateur. On obtient $i = i_r + i_0$ et $u = -ri_r$ donc $i = i_0 - u/r \Leftrightarrow u = r(i_0 - i)$
- La caractéristique d'un générateur de courant réel continu $I = I_0 - U/r$ est similaire à celle du générateur de THÉVENIN, la tension à vide valant $U_v = RI_0$



V.5 Quelques dipôles non-linéaires

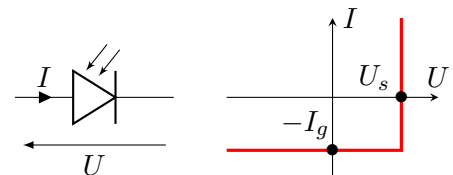
Définition – Diode à jonction semi-conductrice et diode idéale

- Une **diode idéale** est un dipôle non-linéaire et non-symétrique qui ne laisse passer le courant que dans un seul sens, sans lui opposer de résistance. Lorsqu'elle est traversée par un courant, la diode est dite "passante" et oppose une résistance nulle. Lorsqu'elle est branché dans l'autre sens, elle est dite "bloquante" et elle oppose une résistance infinie.
- Les diodes réelles à jonction de semi-conducteurs présente des écarts par rapport au modèle idéal : elles ne laissent passer le courant qu'au delà d'une tension seuil $U_s \simeq 0,5 \text{ V}$ et elle opposent alors une résistance apparente $R_a = dU/dI$.



Définition – Photodiode – cellule photovoltaïque

Une **photodiode** (cellule photovoltaïque) est un récepteur de lumière qui se comporte, lorsqu'il est éclairé, comme une diode montée en parallèle d'une source de courant. Le courant délivré I_g dépend de l'éclairement lumineux ϕ reçu par la photodiode : $I_g = k\phi$.



VI Circuits électriques : méthodes

VI.1 Association en série et en parallèle de dipôles

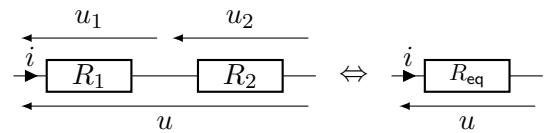
Méthode – Reconnaître deux dipôles en série et en parallèle

- Deux dipôles sont **en série** si la borne de sortie du premier est uniquement reliée à la borne d'entrée du second. **Le courant qui parcourt des dipôles en série est identique.**
- Deux dipôle sont **en parallèle** si les bornes d'entrée des deux dipôles sont reliées par un fil et les bornes de sortie sont également reliées par un fil. **La tension aux bornes de dipôles en parallèle est identique.**

1.a Résistances

- Deux résistance R_1 et R_2 en série sont équivalentes à une unique résistance $R_{eq} = R_1 + R_2$.

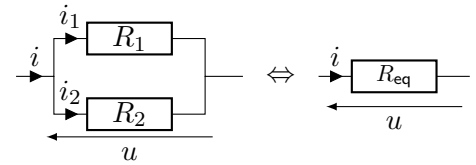
En effet, $u = u_1 + u_2 = R_1i + R_2i = (R_1 + R_2)i$



- Deux résistance R_1 et R_2 en dérivation sont équivalentes à une résistance

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \Leftrightarrow \frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

En effet, $u = R_1 i_1 = R_2 i_2$ et $i = i_1 + i_2 \Rightarrow i = u \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$.



Propriété – Association série et parallèle de résistances

- La mise en série de N résistances R_k est équivalente à une unique résistance :

$$R_{eq}^{série} = \sum_{k=1}^N R_k$$

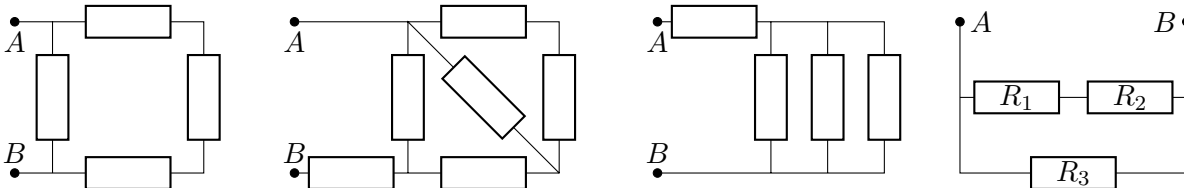
- La mise en parallèle de N résistances R_k est équivalente à une unique résistance vérifiant :

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

Remarque : $R_{eq}^{série} \geq \max(R_k)$ tandis que $R_{eq}^{para} \leq \min(R_k)$.

Exemple ou exercice d'application – Résistances équivalentes

Déterminer la résistance équivalente des dipôles suivants (compris entre A et B).



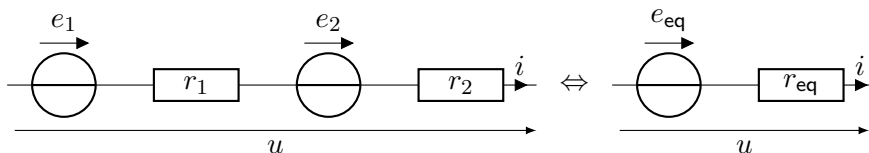
1.b Générateurs de tension et de courant

Propriété – Association de générateurs idéaux

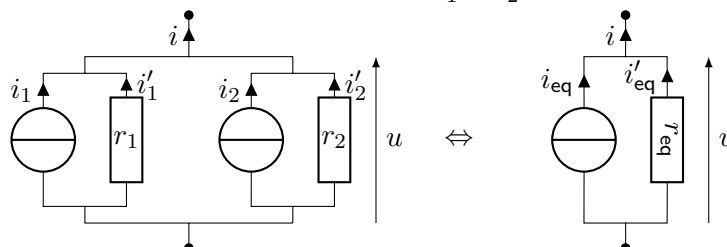
- Les générateurs idéaux de **tension** s'additionnent en **série**.
- Les générateurs idéaux de **courant** s'additionnent en **parallèle**.

Remarque : \triangle on ne peut pas associer deux générateurs idéaux de tension en dérivation ni deux générateurs idéaux de courant en série.

- L'association en série de deux générateurs de THÉVENIN (e_1, r_1) et (e_2, r_2) est également un générateur de THÉVENIN de f.e.m. $e_{eq} = e_1 + e_2$ et de résistance interne $r_{eq} = r_1 + r_2$.



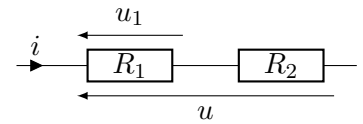
- L'association en dérivation de deux générateurs de NORTON (i_1, r_1) et (i_2, r_2) est également un générateur de NORTON de c.c.c. $i_{eq} = i_1 + i_2$ et de résistance interne $r_{eq} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$.



VI.2 Ponts diviseurs de tension ou de courant

a. Dans la branche suivante, $u = (R_1 + R_2)i$ et $u_1 = R_1i$.

On en déduit $u_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}u$: la tension aux bornes de R_1 est une fraction de la tension totale, pondérée par le poids relatif de sa résistance.



Méthode – Diviseur de tension

- Lorsque N résistors sont **reliés en série**, la tension u_k au bornes de l'un d'entre eux est simplement reliées à la tension u aux bornes de l'ensemble : $u_k = \frac{R_k}{\sum_j R_j}u$.

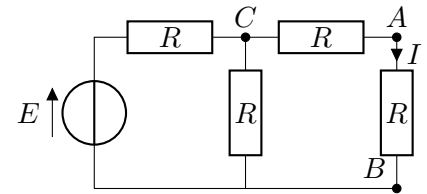
Remarques :

- Le diviseur de tension permet, au prix d'une perte de puissance, de diminuer la valeur d'une tension.
- ⚠ Attention, il faut que les résistors soient en série, parcourus par le même courant.
- Lorsque l'on introduit un ampèremètre dans le circuit, on est dans le cas où $R_1 \ll R_2$. On a alors $u \simeq u_2$ car $u_1 \ll u$: la très faible résistance interne de l'ampèremètre ne modifie pratiquement pas la tension aux bornes du dipôle avec lequel on le met en série.

Exemple ou exercice d'application – Pont diviseur de tension et de courant

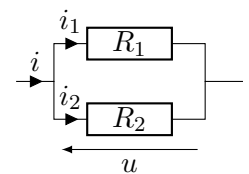
On donne $E = 12 \text{ V}$ et $R = 50 \Omega$.

1. À l'aide de deux diviseurs de tension successifs, exprimer U_{AB} en fonction de U_{CB} puis déterminer U_{CB} en fonction de E après avoir déterminé une résistance équivalente.
2. Déterminer l'intensité I_0 délivrée par la f.e.m puis établir l'expression de l'intensité I à l'aide d'un diviseur de courant.



b. Dans la maille suivante, $i_1 = u/R_1$, $i_2 = u/R_2$ et $i = u/R_{eq} = u(1/R_1 + 1/R_2)$.

On en déduit $i_1 = \frac{1/R_1}{1/R_1 + 1/R_2}i \Leftrightarrow i_1 = \frac{G_1}{G_1 + G_2}i$: l'intensité du courant qui parcourt R_1 est une fraction du courant total, pondérée par le poids relatif de sa conductance.



Méthode – Diviseur de courant

- Lorsque N résistors sont **reliés en parallèle**, le courant i_k parcourant l'un d'entre eux est simplement reliées au courant i total : $i_k = \frac{1/R_k}{\sum_j 1/R_j}i = \frac{G_k}{\sum_j G_j}i$.

Remarque : Lorsque l'on introduit un voltmètre dans le circuit, on est dans le cas où $R_1 \gg R_2 \Leftrightarrow G_1 \ll G_2$. On a alors $i \simeq i_2$ car $i_1 \ll i$: la très faible conductance (très grande résistance) interne du voltmètre ne modifie pratiquement pas l'intensité du courant qui parcourt le dipôle avec lequel on le met en parallèle.

VI.3 Équivalence Thévenin/Norton

Propriété – Équivalence entre source de courant et source de tension

- Les caractéristiques $u = e - ri$ et $i = i_0 - \frac{u}{r}$ sont équivalentes si $i_0 = \frac{e}{r}$.
- On peut passer comme on le souhaite d'une représentation à l'autre en effectuant cette transformation. C'est très pratique pour simplifier des circuits ayant des résistances en parallèle.

