

Lois de l'électrocinétique

Plan du cours

I	Introduction microscopique	2
I.A	Charge électrique	2
I.B	Courant électrique.	3
I.C	Approximation des régimes quasi-stationnaires	3
II	Intensité et tension	4
II.A	Vocabulaire des circuits	4
II.B	Courant électrique, intensité	5
II.C	Loi des nœuds	6
II.D	Potentiel et tension	7
II.E	Additivité des tensions, loi des mailles	8
III	Décrire les dipôles électriques	9
III.A	Convention générateur, convention récepteur	9
III.B	Puissance et énergie	9
IV	Fils et interrupteurs	11
V	Résistances	11
V.A	Loi d'Ohm, effet Joule	11
V.B	Résistances équivalentes	12
V.C	Ponts diviseurs.	13
V.D	Résistance d'entrée d'un appareil de mesure	14
VI	Générateurs	15
VI.A	Sources idéales de tension et de courant	15
VI.B	Résistance de sortie d'un générateur, modèle de Thévenin	16

(R) Résultat à connaître par cœur.

(M) Méthode à retenir, mais pas le résultat.

(D) Démonstration à savoir refaire.

(Q) Aspect qualitatif uniquement.

Les paragraphes sans mention en marge sont là pour faciliter votre compréhension ou pour votre culture mais n'ont pas forcément besoin d'être appris en tant que tel.



On appelle **électricité** les effets de la présence et du déplacement des particules chargées.

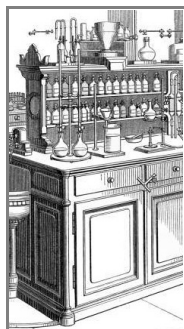
C'est donc un monde de la physique extrêmement vaste, qui recouvre des phénomènes aussi différents que la transmission des messages nerveux, la retouche d'une photo numérique ou l'alimentation d'un four industriel. On distingue traditionnellement les domaines suivants :

- ▷ l'**électrostatique** qui fait le lien entre le déplacement des particules chargées et les forces qu'elles subissent, c'est dans ce cadre qu'on explique la foudre ou le fait que les cheveux collent à un ballon de baudruche ;
- ▷ l'**électrotechnique** ou **génie électrique** qui s'intéresse au transport de l'énergie électrique ;
- ▷ l'**électronique** qui concerne le traitement de l'information encodée dans les signaux électriques.

***Remarque :** L'électronique et l'électrotechnique sont deux limites opposées : en électronique, les signaux portent peu d'énergie mais beaucoup d'information, alors qu'en électrotechnique les « signaux » contiennent beaucoup d'énergie mais aucune information.*

L'**électrocinétique** se situe au carrefour de ces domaines et vise à donner une description effective du mouvement des charges dans les circuits formés de conducteurs électriques. Par « description effective », on entend que les lois sont cohérentes avec une modélisation microscopique plus précise mais n'y font pas directement appel.

→ ce chapitre a pour but de définir les grandeurs de l'électrocinétique, de donner les lois qui les relient, et de les appliquer pour étudier des premiers circuits électriques.



***Un peu d'histoire :** Les premières observations de phénomènes électrostatiques remontent à l'Antiquité, notamment l'attraction exercée par l'ambre frotté. Au XVIII^e siècle, les expériences de Benjamin Franklin et de Charles-Augustin de Coulomb permettent de mieux comprendre la notion de charge électrique. C'est au XIX^e siècle qu'Alessandro Volta invente la pile tandis qu'André-Marie Ampère, Michael Faraday et James Clerk Maxwell établissent progressivement les lois fondamentales de l'électricité et du magnétisme. La maîtrise de la production et du transport de l'électricité à la fin du XIX^e siècle transforme la société : moteurs, éclairage et réseaux électriques en font une source essentielle de puissance. L'invention du transistor et le développement des circuits intégrés ouvrent dans les années 1950 l'ère de l'électronique, suivie du numérique et d'internet.*

I - Introduction microscopique

I.A - Charge électrique

- ▷ Il existe deux types de charges électriques, appelées *positive* et *négative*. Deux particules chargées s'attirent si elles sont de signe opposé et se repoussent si elles sont de même signe.
- ▷ **Quantification de la charge** : toute charge isolable est un multiple de la charge élémentaire, égale à la charge d'un proton (opposée à la charge d'un électron),

$$e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ C}.$$

***Remarques culturelles :** La valeur de e ne se mesure pas, mais est fixée conventionnellement par définition du Coulomb, depuis le 20 mai 2019.*

Les quarks, particules élémentaires constituant les protons et les neutrons, portent des charges fractionnaires $2e/3$ et $-e/3$, mais ils vont toujours par trois et ne peuvent pas être isolés séparément.

- ▷ **Conservation de la charge** : la charge électrique ne peut être ni créée, ni détruite, mais seulement transportée d'un point à un autre. Il s'agit d'un des postulats les plus fondamentaux de la physique moderne.
- ▷ À l'échelle macroscopique, la matière est toujours globalement neutre. Un conducteur électrique l'est également localement (c'est-à-dire en tout point), en revanche il peut y avoir accumulation de charge dans les isolants ... mais dans ce cas d'autres charges opposées sont accumulées ailleurs.

I.B - Courant électrique

Un **conducteur** est un matériau dans lequel il existe des particules chargées pouvant se déplacer sur des distances très supérieures à la distance entre atomes, appelées **porteurs de charge libres**. Un matériau dans lequel il n'en existe pas est un **isolant**.

Exemples de porteurs de charge :

- ▷ dans un métal : électrons
- ▷ dans une solution électrolytique : ions



Le **courant électrique** est un déplacement d'ensemble ordonné des porteurs de charge libres. Par convention, le sens du courant est le sens de déplacement des porteurs de charge positifs, et opposé au sens de déplacement des porteurs de charge négatifs.

Le terme « ordonné » distingue le courant électrique du déplacement aléatoire dû à l'agitation thermique, auquel il s'ajoute.

Illustration : pour un fil de section S

Schéma de principe microscopique :

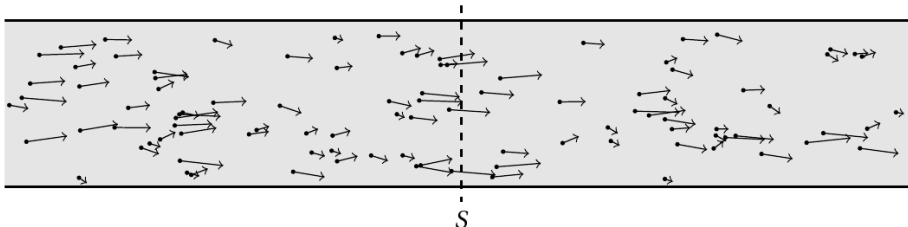


Schéma électrique :

fil avec courant de la droite vers la gauche

Espace 1

I.C - Approximation des régimes quasi-stationnaires

La vitesse moyenne des électrons le long d'un fil est de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de micromètres par seconde.

~ ce n'est pas parce qu'un électron part de l'interrupteur et arrive à la lampe que celle-ci s'allume !



Dans un circuit électrique, l'information est transmise par des ondes électromagnétiques, se propageant à la vitesse de la lumière $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

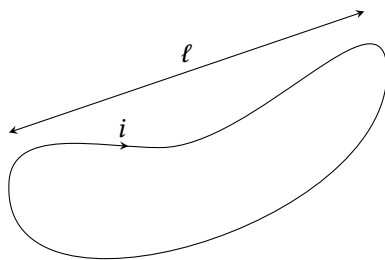
L'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS)

revient à considérer que l'information est transmise instantanément à tout point du circuit, c'est-à-dire à négliger la durée de propagation des ondes électromagnétiques.

Qualitativement, tous les électrons du circuit réagissent alors « d'un seul bloc » aux variations des signaux électriques. Leur comportement s'apparente donc à celui d'un train qui démarre, où tous les wagons se mettent en mouvement en même temps, par opposition à une file de voiture au feu qui passe au vert, où la dernière voiture de la file se met en mouvement longtemps après la première en raison du temps de réaction des conducteurs. Notons que dans les deux cas ce temps de mise en mouvement n'a rien à voir avec la vitesse à laquelle se déplacent le train ou les voitures une fois leur vitesse de croisière atteinte, et n'a pas plus à voir avec la durée de la phase d'accélération nécessaire pour atteindre cette vitesse.

Critère de validité de l'ARQS : considérons un circuit de taille ℓ .

D



Durée de propagation de l'OEM : $\Delta t \sim \ell/c$

Temps caractéristique de variation des signaux : période $T = 1/f$

Conclusion : ARQS valable si $\Delta t \ll T = 1/f$ soit $\ell \ll c/f = \lambda$

R

Espace 2



L'ARQS est valable pour des circuits « de petite taille » et des signaux « de basse fréquence ».

$$\ell \ll \frac{c}{f} \iff f \ll \frac{c}{\ell}$$

$\leadsto$ « très petit » signifie, par exemple, un facteur 100 ou 1000 entre les deux grandeurs.

M

Application 1 : Validité de l'ARQS

corrigé p. 17

- 1 - L'électronique interne d'un téléphone de taille $\ell \sim 10$ cm met en jeu des fréquences de l'ordre de 100 kHz. Peut-elle être analysée dans l'ARQS ?
- 2 - Jusqu'à quelle distance d'une centrale le réseau électrique peut-il être traité dans l'ARQS ?

II - Intensité et tension

II.A - Vocabulaire des circuits

R



- ▷ On appelle **dipôle** un composant électrique connecté au reste du circuit par deux bornes.
- ▷ On appelle **branche** un ensemble de dipôles montés bout à bout sans « bifurcation » vers une autre partie du circuit. On appelle **maille** un ensemble de branches formant une boucle fermée.
- ▷ Deux dipôles appartenant à une même branche sont dits **montés en série**.
- ▷ On appelle **nœud** un point de jonction entre plusieurs dipôles. En pratique, tous les points reliés entre eux par un fil constituent un seul et même nœud.
- ▷ Deux dipôles dont les bornes sont connectées aux deux mêmes nœuds sont dits **montés en parallèle** ou **en dérivation**.

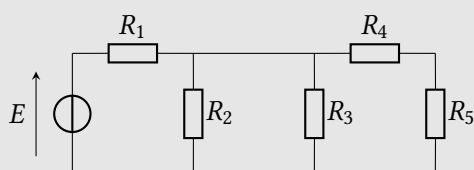
Exemples de dipôles : pile, ampoule, résistance, LED, condensateur, etc.

Remarque culturelle : Tous les composants ne sont pas des dipôles, certains possèdent plus que deux bornes, par exemple un transistor (trois bornes), un transformateur (quatre bornes), etc.

M

Application 2 : Un exemple de circuit

corrigé p. 17



- 1 - Repasser en bleu une branche du circuit contenant deux dipôles.
- 2 - Repasser en rouge et en noir deux mailles différentes auxquelles la branche précédente appartient.
- 3 - Indiquer sur le schéma le nœud A commun aux résistances R_1 et R_2 . Lister les dipôles connectés au nœud A.

4 - Les résistances R_4 et R_5 sont-elles montées en série ? Même question pour les résistances R_1 et R_2 .

5 - Les résistances R_2 et R_3 sont-elles montées en parallèle ? Même question pour les résistances R_3 et R_5 .

II.B - Courant électrique, intensité

II.B.1 - Définition microscopique

L'intensité est la grandeur physique qui quantifie le courant électrique circulant dans un conducteur, ou en d'autres termes le débit de charge électrique dans le conducteur. Elle compte la charge nette q qui traverse une section S du fil pendant une durée Δt dans un sens donné :

▷ intensité moyenne pendant Δt :

$$i_{\text{moy}} = \frac{q}{\Delta t}$$

▷ intensité instantanée = « moyenne sur une durée infiniment courte »

$$i(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{q}{\Delta t} \quad \text{que l'on note plutôt} \quad \boxed{i(t) = \frac{\delta q}{dt}}$$

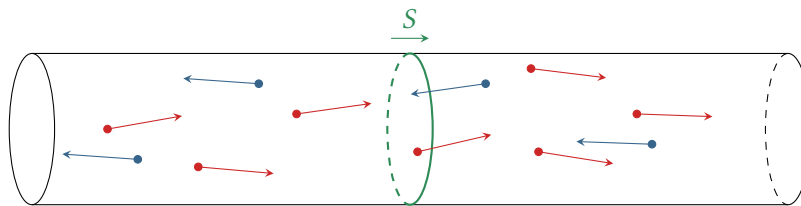


Figure 1 – Définition microscopique de l'intensité. Les électrons se propageant dans un sens ou l'autre comptent différemment dans l'intensité. Le passage au travers de S d'un électron allant vers la droite est compensé par celui d'un électron allant vers la gauche.

► **Pour approfondir :** Les notations δ et d font référence à des quantités infinitésimales, c'est-à-dire infiniment petites, et sous-entendent le passage à la limite. La notation d est utilisée pour une variation, c'est-à-dire une différence entre une valeur finale et une valeur initiale. La notation δ est utilisée pour une quantité infinitésimale qui n'est pas une variation : ici, parler « charge qui traverse la surface à l'instant initial » (ou final) n'a pas de sens, on peut simplement mesurer la charge ayant traversé ladite surface *pendant une certaine durée*, entre ces deux instants. Vous apprendrez à travailler avec ces notations tout au long de l'année et l'année prochaine, les maîtriser n'est pas un objectif en début d'année. ■



L'intensité électrique s'exprime en ampères, de symbole A : on note $[i] = A$.

$$1 A = 1 C \cdot s^{-1}$$



***Un peu d'histoire :** André-Marie Ampère (1775-1836) est un physicien et mathématicien français, considéré comme l'un des fondateurs de l'électromagnétisme. Né à Lyon, il manifeste très jeune un intérêt remarquable pour les mathématiques et les sciences. En 1820, la découverte par Hans Christian Ørsted du lien entre électricité et magnétisme l'amène à entreprendre des recherches fondamentales sur les courants électriques. Il établit des lois expérimentales décrivant les forces exercées entre des conducteurs parcourus par des courants, puis les formalise mathématiquement, ce qui l'amène à définir l'intensité en lien avec cette force mais sans référence au débit de charge. Il établit également qu'un courant peut produire des effets magnétiques analogues à ceux d'un aimant. Son nom est donné à l'unité d'intensité en 1893.*

Application 3 : Nombre d'électrons

corrigé p. 17

Estimer l'ordre de grandeur du nombre N d'électrons traversant en $\Delta t = 1$ ms un fil parcouru par un courant d'intensité $i = 3$ mA.

⇒ **Généralisation :** les nombres d'électrons mis en jeu sont tellement élevés que les grandeurs électriques semblent prendre des valeurs continues même si la charge est quantifiée.

Dans l'ARQS, tous les électrons d'un circuit se déplacent d'un bloc : quelle que soit la section considérée au sein d'une même branche, elle sera traversée par la même charge pendant la même durée.



L'intensité est la même tout au long d'une branche.
Ainsi, deux dipôles montés en série sont parcourus par un courant de même intensité.

II.B.2 - Algébrisation

(R)



L'intensité est une grandeur algébrique : elle peut être positive ou négative.

Son signe dépend de l'orientation conventionnelle du fil par rapport au sens réel du courant.

Sur un schéma, la flèche d'intensité représente ce sens conventionnel.

$$\xrightarrow{i \geq 0}$$

Lien entre sens réel du courant et signe de l'intensité :

Si $i > 0$ alors $\delta q > 0$ donc il y a eu un déplacement global de charges positives dans le sens dans lequel le fil est orienté. On en déduit que si $i > 0$ alors le sens réel du courant est le sens d'orientation du fil ; et réciproquement si $i < 0$ alors le sens réel du courant est le sens opposé à celui d'orientation du fil.

Espace 3

II.B.3 - Mesure

(R)

Une intensité se mesure à l'aide d'un **ampèremètre**, qui se place directement dans la branche où on souhaite mesurer l'intensité : on dit souvent que « un ampèremètre se monte en série ». Le sens du courant affiché par l'ampèremètre est relié au sens de branchement.

Dessiner le symbole A entouré, les deux bornes A et COM, et le sens du courant mesuré.

Espace 4

On peut retenir les ordres de grandeur suivants :

- ▶ circuits électroniques : 5 à 50 mA ;
- ▶ ampoule électrique : 1 A ;
- ▶ moteur de TGV : 1 kA ;
- ▶ éclairs d'orages : 10^5 A ;
- ▶ seuil de perception par le corps : 1 mA ;
- ▶ seuil létal : 40 mA pendant 3 s, 300 mA pendant 0,1 s.

II.C - Loi des nœuds

Démonstration sur un exemple : considérons un nœud joignant trois fils, représenté figure 2.

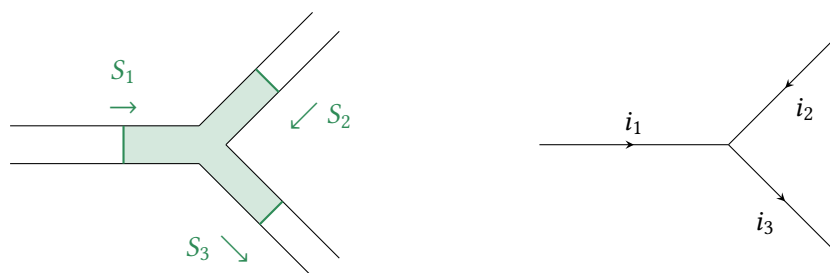


Figure 2 – Jonction de trois fils.

Procédons à un bilan de charge électrique stockée dans le volume délimité par les trois sections de fil S_1 , S_2 et S_3 pendant une durée dt . La charge électrique ne pouvant être ni créée ni détruite,

$$\begin{array}{ccccccc} \text{charge stockée} & = & \text{charge stockée} & + & \text{charge entrée} & - & \text{charge sortie} \\ \text{à l'instant } t + dt & & \text{à l'instant } t & & \text{entre } t \text{ et } t + dt & & \text{entre } t \text{ et } t + dt \end{array}$$

Traduit en équation :

$$\underbrace{q_{\text{st}}(t + dt)}_{=0} = \underbrace{q_{\text{st}}(t)}_{=0} + \delta q_1 + \delta q_2 - \delta q_3$$

car un conducteur dans l'ARQS est localement neutre à tout instant, si bien que

$$\begin{aligned}\delta q_1 + \delta q_2 &= \delta q_3 \\ i_1(t) + i_2(t) &= i_3(t)\end{aligned}$$

Espace 5

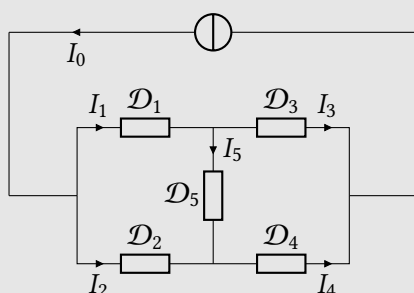
⇒ Généralisation :

Loi des nœuds ou première loi de Kirchhoff :

La somme algébrique des courants arrivant sur un nœud est nulle.
La somme des courants entrant sur un nœud est égale à la somme des courants en sortant.

Application 4 : Loi des nœuds

corrigé p. 17



Dans le circuit ci-contre, des ampèremètres non représentés mesurent $I_0 = 4\text{ A}$, $I_1 = 1\text{ A}$ et $I_4 = 2\text{ A}$. Les dipôles $\mathcal{D}$ sont inconnus.
Déterminer les intensités I_2 , I_3 et I_5 .

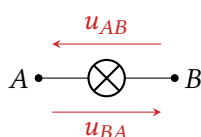
II.D - Potentiel et tension

II.D.1 - Définition microscopique

Le courant électrique décrit le mouvement des charges, mais n'explique pas pourquoi les charges se mettent à se déplacer. Cela n'est en fait pas si simple à expliquer !

On peut s'en faire une image par analogie avec l'écoulement d'un fleuve. Le sens spontané d'écoulement de l'eau se fait des zones de haute altitude (haute énergie potentielle de pesanteur) vers les zones de basse altitude. L'argument est semblable pour les charges électriques : il existe des zones de haute énergie potentielle électrique, et d'autres zones d'énergie potentielle électrique plus faible. On admet (on le justifiera dans le cours sur la mécanique des particules chargées) qu'il existe un potentiel électrique V tel que qV_M soit l'énergie potentielle électrique d'une particule de charge q placée en un point (au nœud) M .

On appelle **tension** u_{AB} la différence de potentiel entre les points A et B :

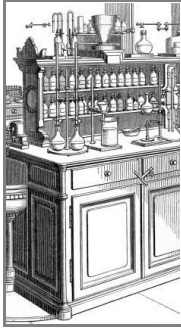


$$u_{AB} = V_A - V_B$$

Ainsi, deux dipôles montés en parallèle ont la même tension à leurs bornes.
Une tension est une grandeur algébrique, elle peut être positive ou négative.

Le potentiel et la tension électrique s'expriment en volts, de symbole V : on note $[u] = V$.

⚡⚡⚡ **Attention !** Contrairement à un vecteur, la flèche de tension pointe vers le *premier* point nommé.



Un peu d'histoire : Alessandro Volta (1745-1827) est un physicien italien, pionnier de l'étude de l'électricité. Né à Côme, il s'intéresse dès sa jeunesse aux phénomènes électriques et invente plusieurs instruments permettant de produire ou de détecter des charges électriques. Il étudie notamment l'électricité produite par contact entre différents métaux et perfectionne l'électrophore, dispositif permettant d'accumuler des charges. En 1800, Volta réalise la première pile électrique, constituée de disques alternés de zinc et de cuivre séparés par un électrolyte. Cette invention fournit un courant électrique continu et durable, permettant pour la première fois de réaliser de nombreuses expériences électrochimiques et électromagnétiques. L'unité de tension électrique a été nommée en sa mémoire en 1881.

II.D.2 - Mesure

(R)

Une tension se mesure à l'aide d'un **voltmètre**, qui se branche entre les points A et B où on veut mesurer la tension, donc en parallèle du ou des dipôles qui s'y trouvent déjà. Pour mesurer la tension u_{AB} il faut placer la borne V au point A et la borne COM au point B .

Dessiner le symbole V entouré, les deux bornes V et COM , et le sens de la tension mesurée.

Espace 6

On peut retenir les ordres de grandeur suivants :

- secteur : 230 V efficace, soit 325 V en amplitude ;
- piles : quelques volts ;
- circuits électroniques : centaines de millivolts ;
- bruit de fond électrique : 5 mV ;
- signaux nerveux : 75 mV ;
- alimentation TGV : 25 kV efficace ;
- ligne haute tension : 150 à 1200 kV ;
- juste avant un éclair d'orage : 10^8 V.

II.D.3 - Masse

Il est impossible de mesurer directement le potentiel électrique, seules les tensions sont accessibles. C'est une conséquence de la définition en termes d'énergie potentielle, sur laquelle nous reviendrons en mécanique.

↪ si on définit « un autre » potentiel $V' = V + V_0$ en y ajoutant une constante V_0 alors toutes les tensions gardent la même valeur : $U_{AB} = V_A - V_B = (V'_A - V_0) - (V'_B - V_0) = V'_A - V'_B$.

Espace 7

↪ on peut donc choisir librement la valeur du potentiel en un point d'un circuit.

(R)



On appelle **masse** d'un circuit le point où le potentiel électrique est choisi nul.
Sa position est un choix arbitraire.

Remarque culturelle : Les appareils directement branchés sur le réseau EDF sont généralement reliés à la Terre. Toutes les prises de terre sont alors au même potentiel. Il est donc très souvent pratique de faire coïncider la masse et la terre, à tel point qu'on confond parfois les deux. L'existence d'un même potentiel de terre sur les appareils branchés peut aussi être source de difficultés appelées conflits de masse. Nous en parlerons en TP.

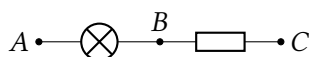
II.E - Additivité des tensions, loi des mailles

(R)



Loi d'additivité des tensions :

La tension entre deux nœuds peut s'écrire comme la somme des tensions entre des nœuds intermédiaires.



$$u_{AC} = V_A - V_C = V_A - V_B + V_B - V_C = u_{AB} + u_{BC} \text{ les dessiner}$$

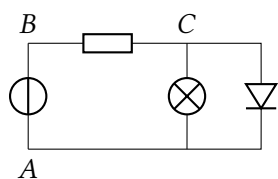
Espace 8

↪ la loi d'additivité s'utilise de façon analogue à la relation de Chasles.

**Loi des mailles ou seconde loi de Kirchhoff :**

Dans une maille, la somme algébrique des tensions est nulle.

(R)



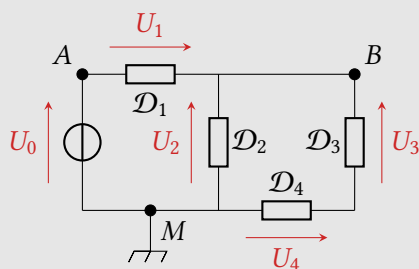
Flécher les tensions aux bornes des dipôles, les nommer et écrire la loi des mailles : $u_{AB} + u_{BC} + u_{CA} = 0$.

Espace 9

(M)

Application 5 : Loi des mailles

corrigé p. 17



Dans le circuit ci-contre, des voltmètres non représentés mesurent $U_0 = 5\text{ V}$, $U_2 = 1\text{ V}$ et $U_3 = 3\text{ V}$. Les dipôles $\mathcal{D}$ sont inconnus.

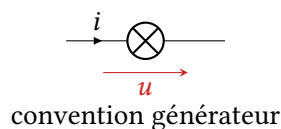
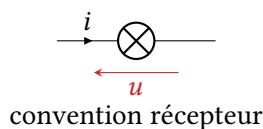
- 1 - Déterminer les tensions U_1 et U_4 .
- 2 - Déterminer le potentiel des nœuds A et B.

III - Décrire les dipôles électriques**III.A - Convention générateur, convention récepteur**

On appelle **loi de comportement** d'un dipôle la relation entre la tension u à ses bornes et l'intensité i qui le traverse. La représentation graphique de cette relation est appelée **caractéristique** du dipôle.

↪ difficulté : le sens d'orientation de u et de i est libre a priori, il faut donc le préciser.

Un dipôle est dit orienté **en convention récepteur** lorsque les flèches de tension et d'intensité sont de sens opposé, et **en convention générateur** lorsqu'elles sont dans le même sens.



(R)

*** **Attention !** Le choix de la convention est libre, et ne dit rien sur la nature réelle du dipôle.

Remarque : les potentiels prenant la même valeur quelle que soit la convention,

$$u_{\text{conv. gén.}} = -u_{\text{conv. récep.}}$$

III.B - Puissance et énergie**III.B.1 - Travail et puissance électriques**

L'énergie échangée par un dipôle dans un circuit est appelée **travail électrique**, noté W . La **puissance électrique** $\mathcal{P}$ quantifie la vitesse à laquelle le travail électrique est échangé.

En termes d'unités :

$$\begin{cases} [W] = \text{J} \\ [\mathcal{P}] = \text{W} \end{cases} \quad \text{avec} \quad 1 \text{ W} = 1 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}.$$

(R)



- Puissance moyenne échangée pendant une durée Δt :

$$\mathcal{P}_{\text{moy}} = \frac{W}{\Delta t}$$

Espace 10

- Puissance instantanée = « moyenne sur une durée infiniment courte »

$$\mathcal{P}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{W}{\Delta t} = \frac{\delta W}{dt}$$

Espace 11

- Expression du travail à partir de la puissance : on décompose la durée Δt en une suite de durées infinitésimales dt , puis on somme toutes les énergies échangées pendant ces petites durées.

$$W = \sum \delta W = \sum \mathcal{P}(t) dt$$

Espace 12

R



Le travail électrique échangé pendant une durée $\Delta t = t_2 - t_1$ est relié à la puissance échangée par

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

III.B.2 - Puissance reçue ou fournie, lien aux conventions

Parler de puissance « échangée » est en général trop vague : il faut préciser si le dipôle la reçoit ou la cède. L'échange énergétique ne pouvant avoir réellement lieu que dans un seul sens, on a

$$\mathcal{P}_{\text{reçue}} = -\mathcal{P}_{\text{fournie}}.$$

R



En convention récepteur, la puissance électrique reçue par le dipôle s'écrit

$$\mathcal{P}_{\text{reçue}}(t) = u(t) i(t) \quad (\text{convention récepteur}).$$

En convention générateur, c'est la puissance électrique fournie qui s'écrit

$$\mathcal{P}_{\text{fournie}}(t) = u(t) i(t) \quad (\text{convention générateur}).$$

Démonstration : dans le cours sur la mécanique des particules chargées.

III.B.3 - Fonctionnement générateur ou récepteur d'un dipôle

R



Un dipôle se comporte en **générateur** s'il fournit réellement de la puissance au reste du circuit :
pour un générateur, $\mathcal{P}_{\text{fournie}} > 0$ et donc $\mathcal{P}_{\text{reçue}} < 0$,
et dans ce cas u et i sont de même signe en convention générateur.

Réciproquement, un dipôle se comporte en **récepteur** s'il reçoit réellement de la puissance de la part du reste du circuit : pour un récepteur, $\mathcal{P}_{\text{reçue}} > 0$ et donc $\mathcal{P}_{\text{fournie}} < 0$,
et dans ce cas u et i sont de même signe en convention récepteur.

Q

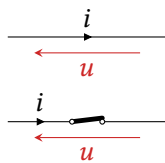
Le fonctionnement en générateur ou en récepteur d'un dipôle est intrinsèque, c'est-à-dire qu'il ne dépend pas de la convention choisie. En revanche, certains dipôles peuvent parfois fonctionner en générateur et parfois en récepteur, comme par exemple une batterie en phase de décharge ou recharge.

IV - Fils et interrupteurs

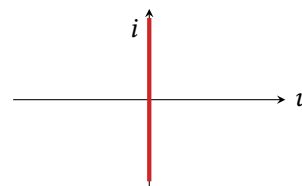
Fil

La tension aux bornes d'un fil est toujours nulle, quel que soit le courant qui le traverse.
Autrement dit, tous les points d'un fil sont au même potentiel.

Un interrupteur fermé est équivalent à un fil.



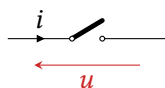
$$\forall i, u = 0$$



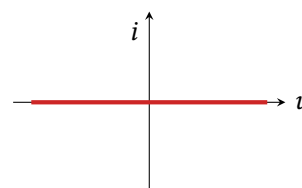
Espace 13

Interrupteur ouvert

Un interrupteur ouvert ne laisse passer aucun courant, quelle que soit la tension à ses bornes.



$$\forall u, i = 0$$



Espace 14

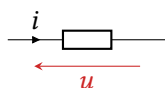
Attention ! La tension aux bornes d'un interrupteur ouvert n'est pas nulle ! Elle est en général inconnue, et il faut faire un calcul (loi des mailles) pour la déterminer.

V - Résistances

V.A - Loi d'Ohm, effet Joule

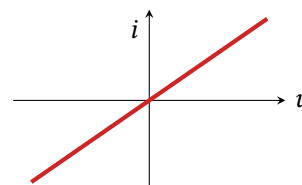
V.A.1 - Loi d'Ohm

Le courant qui traverse une résistance et la tension à ses bornes sont proportionnels.



$$u = Ri \iff i = Gu$$

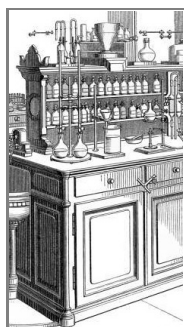
R résistance ; $G = 1/R$ conductance
 $[R] = \Omega$; $[G] = \Omega^{-1} = S$



Remarque 1 : on distingue parfois un résistor (= le composant) de sa résistance (= la valeur en Ω).

Remarque 2 : un fil ou un interrupteur fermé se comporte comme une résistance nulle ($\forall i, u = 0$), un interrupteur ouvert comme une résistance infinie ($\forall u, i = 0$).

Dimensionnellement : $[R] = [U]/[I]$ donc $1 \Omega = 1 V \cdot A^{-1}$



Un peu d'histoire : Georg Ohm (1789-1854) est un physicien et mathématicien allemand, principalement connu pour ses travaux sur l'électricité. Il étudie la conduction électrique dans différents conducteurs et cherche à relier quantitativement la tension appliquée au courant qui les traverse. Il établit expérimentalement en 1827 que l'intensité du courant dans un conducteur donnée est proportionnelle à la tension à ses bornes, et introduit dans le même temps la notion théorique de résistance électrique. La combinaison de ces deux approches est remarquable pour l'époque, où beaucoup se seraient limités à constater la proportionnalité. Ses travaux sont d'abord très mal accueillis en raison de cette double démarche, mais s'imposent une vingtaine d'années plus tard. Son nom est donné à l'unité de résistance électrique en 1881.

V.A.2 - Mesure

Une résistance se mesure à l'aide d'un **ohmmètre**. La mesure doit toujours être réalisée lorsque la résistance n'est parcourue par aucun courant, c'est-à-dire hors du circuit.

En ordre de grandeur, les résistances utilisées classiquement vont de quelques dizaines d'ohms à quelques centaines de kilohms. Des valeurs plus élevées ou plus faibles existent, mais se rencontrent moins souvent.

V.A.3 - Effet Joule

(D) R en convention récepteur, $\mathcal{P}_{\text{reçue}} = Ri^2 = \frac{u^2}{R} > 0$

Espace 16

(R)



Une résistance fonctionne toujours en récepteur :

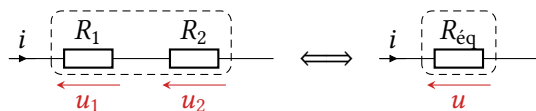
$$\mathcal{P}_{\text{reçue}} = Ri^2 = \frac{u^2}{R} > 0.$$

Le travail électrique qu'elle reçoit est restitué à l'environnement sous forme de transfert thermique : c'est l'**effet Joule**.

V.B - Résistances équivalentes

V.B.1 - Résistance équivalente à une association série

(D)



On a ici deux dipôles en série, il est donc naturel de partir sur la loi d'additivité des tensions :
 $u = u_1 + u_2 = R_1 i + R_2 i = (R_1 + R_2) i$.

Espace 17

(R)



Deux résistances en série sont équivalentes à une unique résistance

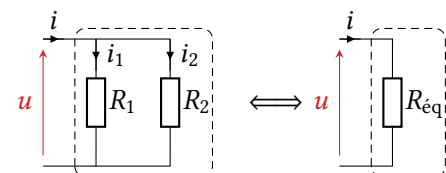
$$R_{\text{eq}} = R_1 + R_2.$$

La formule se généralise à une association série de N résistances,

$$R_{\text{eq}} = \sum_{n=1}^N R_n.$$

V.B.2 - Résistance équivalente à une association parallèle

(D)



On a ici deux dipôles en parallèle, la grandeur qui se somme naturellement est donc l'intensité :

$$i = i_1 + i_2 = \frac{u}{R_1} + \frac{u}{R_2} = \frac{u}{R_{\text{eq}}}$$

Espace 18

Deux résistances en parallèle sont équivalentes à une unique résistance

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

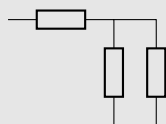
La formule se généralise à une association parallèle de N résistances,

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \sum_{n=1}^N \frac{1}{R_n}.$$

V.B.3 - Mise en pratique

Application 6 : Résistances équivalentes

corrigé p. 17



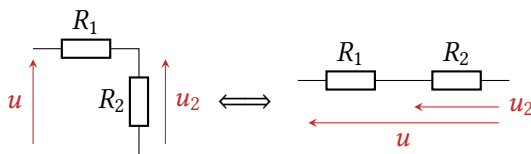
On dispose d'un ensemble de résistances $R = 1 \text{ k}\Omega$ toutes identiques.

- 1 - Calculer la résistance équivalente à l'association ci-contre.
- 2 - Comment faire pour créer une résistance de 750Ω ?

V.C - Ponts diviseurs

Ce paragraphe a pour but de développer un autre point de vue sur les associations de résistances, en se concentrant non pas sur l'aspect « composant » mais sur l'impact sur les signaux.

V.C.1 - Pont diviseur de tension



Montage série donc même courant : $u_2 = R_2 i$ et $u = (R_1 + R_2) i$.

$$\text{d'où } \frac{u_2}{u} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Espace 19

Espace 20

Le même raisonnement s'applique bien sûr pour exprimer la tension u_1 aux bornes de R_1 .

Deux résistances montées en série forment un **pont diviseur de tension**,

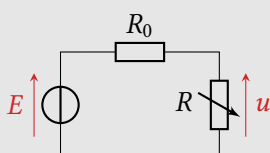
$$\frac{u_1}{u} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad \text{et} \quad \frac{u_2}{u} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

⚡⚡⚡ **Attention !** La relation du pont diviseur ne s'applique que si les résistances sont montées *en série*, et devient fausse dès lors qu'une branche supplémentaire est reliée au nœud entre R_1 et R_2 .

Remarque : Un pont diviseur permet certes de diminuer « à volonté » la valeur d'une tension, mais une puissance conséquente peut être dissipée par effet Joule dans la deuxième résistance. Ainsi, cette solution n'est pas forcément optimale, en particulier en électrotechnique. Pour diminuer la valeur d'une tension sans perte de puissance, on utilise alors un autre montage, appelé hacheur (cf. cours de PSI).

Application 7 : Mesure de résistance par la méthode de la tension moitié

corrigé p. 18

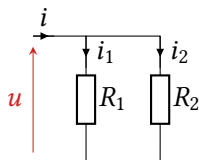


Pour déterminer la valeur d'une résistance inconnue R_0 peu accessible à un ohmmètre, on peut la monter en série avec un générateur imposant une tension E connue et une résistance variable R , que l'on règle jusqu'à atteindre la valeur R^* telle que $u = E/2$.

Déterminer la résistance R_0 en fonction de R^* .

V.C.2 - Pont diviseur de courant

D



Montage parallèle donc même tension : $i_1 = u/R_1$ et $i_2 = u/R_2$

Espace 21

Par la loi des nœuds, $i = i_1 + i_2 = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) u$

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

Espace 22

On montre de même que

$$\frac{i_2}{i} = \frac{\frac{1}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

R



Deux résistances montées en parallèle forment un **pont diviseur de courant**,

$$\frac{i_1}{i} = \frac{\frac{1}{R_1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{et} \quad \frac{i_2}{i} = \frac{\frac{1}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

⚠⚠⚠ **Attention !** Les formules se ressemblent, mais le résultat n'est pas le même que le pont diviseur de tension : ce n'est pas la même résistance au numérateur.

V.D - Résistance d'entrée d'un appareil de mesure

Lorsqu'un appareil de mesure (voltmètre, oscilloscope, etc.) ou de traitement du signal (filtre, amplificateur, etc.) est branché au sein d'un montage, il peut en principe avoir un effet sur ce montage (... et ainsi modifier les signaux qu'il est sensé recevoir). La notion de résistance d'entrée permet de décrire cet effet.

R



On appelle **résistance d'entrée** R_e (ou plus largement **impédance d'entrée**) d'un appareil la résistance (ou l'association de dipôles) équivalente à cet appareil vu du circuit.

Pour le circuit, tout se passe comme si on avait branché la résistance R_e au lieu de brancher l'appareil.

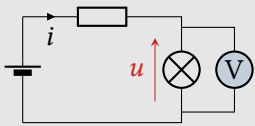
La résistance d'entrée est parfois appelée **résistance interne** de l'appareil.

Exemples : un voltmètre et un ampèremètre sont bien décrits par une simple résistance d'entrée, en revanche l'impédance d'entrée d'un oscilloscope en mode DC est plus complexe, décrite par l'association d'une résistance et d'un condensateur montés en parallèle.

Application 8 : Résistance d'entrée d'un voltmètre idéal

corrigé p. 18

M



Un voltmètre est utilisé pour mesurer la tension aux bornes d'une ampoule.

1 - Représenter le schéma équivalent du montage, en remplaçant le voltmètre par sa résistance d'entrée.

2 - Exprimer le courant i_v traversant le voltmètre en fonction de la tension u aux bornes de l'ampoule.

3 - Que doit valoir i_v pour que la présence du voltmètre ne perturbe pas le montage ? En déduire la résistance d'entrée d'un voltmètre idéal.

En pratique, la résistance d'entrée d'un voltmètre est de l'ordre de $10\text{ M}\Omega$, ce qui est suffisamment élevé pour pouvoir négliger son impact dans les situations classiques.

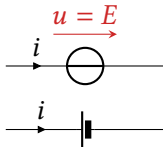
VI - Générateurs

VI.A - Sources idéales de tension et de courant

Les générateurs sont usuellement orientés en convention générateur ... même si rien n'interdirait de les orienter en convention récepteur si on en avait envie.

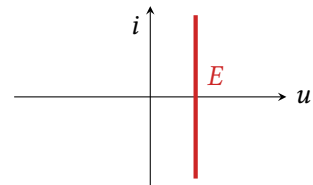
Une source idéale de tension impose une tension à ses bornes indépendante du courant qui la traverse. Cette tension est appelée **force électromotrice** (abrégée fém) ou **tension à vide** du générateur.

R



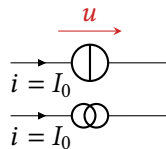
$$\forall i, u = E$$

Espace 23



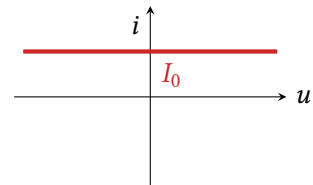
Une source idéale de courant impose dans sa branche un courant indépendant de la tension à ses bornes. Ce courant est appelé **courant de court-circuit** du générateur.

R



$$\forall u, i = I_0$$

Espace 24



Le courant de court-circuit est parfois noté de la lettre grecque η (« eta »).

⚠ ⚠ ⚠ **Attention !** La puissance fournie $\mathcal{P}_{\text{fournie}} = u i$ par une source idéale de tension ou de courant peut être positive ou négative, la source peut donc fonctionner en générateur ... mais aussi en récepteur !

Q

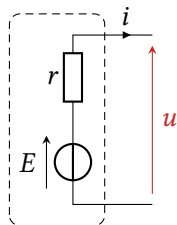
► **Pour approfondir** : Les choses sont un peu plus compliquées en pratique. En effet, la plupart des générateurs réels contiennent des composants polarisés (diode, transistor, etc), c'est-à-dire qui n'acceptent qu'un seul sens de circulation du courant ou de polarisation de la tension. Leur imposer un courant ou une tension en sens inverse risque d'endommager irrémédiablement l'appareil. C'est le cas des alimentations stabilisées que nous utiliserons en TP, ou encore des piles non-rechargeables. En effet, le courant et la tension aux bornes d'une pile non-rechargeable orientée en convention générateur doivent toujours être de même signe pour que la transformation chimique de fonctionnement de la pile ait lieu correctement. Un courant en sens inverse aurait pour effet de renverser une réaction qui ne peut pas l'être, ce qui conduit en pratique à une surchauffe puis à une destruction de la pile. ■

VI.B - Résistance de sortie d'un générateur, modèle de Thévenin

En pratique, le modèle de source idéale n'est qu'une approximation pour de nombreux générateurs réels, pour lesquels la tension u et le courant i ne sont pas indépendants l'un de l'autre. Lorsqu'il y a une relation affine entre u et i , le générateur est qualifié de **générateur linéaire**.

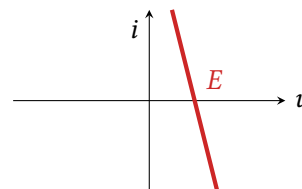
(R)

Un générateur linéaire peut être modélisé par une source idéale de tension montée en série avec une résistance appelée **résistance de sortie** ou **résistance interne** du générateur. Cette modélisation est appelée **modèle de Thévenin** du générateur.



$$u = E - ri$$

$E = \text{fém}, r = \text{résistance interne}$



(D)

Démonstration : en orientant la résistance en convention récepteur :

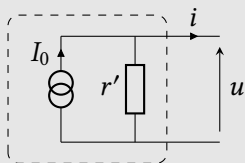
$$E = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{LM}}}{u} + u_r \quad \text{soit} \quad u = E - ri.$$

Espace 25

(M)

Application 9 : Modèle de Norton d'un générateur

corrigé p. 18



Le modèle de Norton est une autre modélisation possible d'un générateur linéaire. Il consiste à le décrire par une source idéale de courant montée en parallèle d'une résistance interne r' .

- 1 - Établir la loi de comportement du générateur de Norton.
- 2 - Exprimer en fonction de I_0 et r' les paramètres E et r du modèle de Thévenin modélisant le même générateur.

Éléments de correction des applications de cours

*Ces corrections sont parfois incomplètes, et presque toujours moins détaillées que ce qui est présenté en classe.
Vos notes de cours sont donc l'outil à privilégier pour les travailler, davantage que le présent document.*

Application 1 : Validité de l'ARQS énoncé p. 4

1 Temps de propagation de l'onde : $\tau = \frac{\ell}{c} = \frac{10 \cdot 10^{-2}}{3 \cdot 10^8} \sim 3 \cdot 10^{-10} \text{ s}.$

Temps caractéristique de variation des signaux : $T = \frac{1}{f} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ s}$

Conclusion : un téléphone fonctionne bien dans l'ARQS.

2 L'ARQS est valable tant que $\ell \ll \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{50} = 6000 \text{ km}.$

Conclusion : l'ARQS convient à l'échelle d'une région mais pas à l'échelle d'un pays ou d'un continent.

Application 2 : Un exemple de circuit énoncé p. 4

3 Dipôles connectés au nœud A : $R_1, R_2, R_3, R_4.$

4 R_4 et R_5 sont montées en série, mais pas R_1 et R_2 à cause de la bifurcation au nœud A.

5 R_2 et R_3 sont montées en parallèle, mais pas R_3 et R_5 à cause de $R_4.$

Application 3 : Nombre d'électrons énoncé p. 5

$$q = i \Delta t = Ne \text{ d'où on déduit } N = \frac{i \Delta t}{e} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \times 1 \cdot 10^{-3}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \simeq 2 \cdot 10^{13} \gg 1$$

Application 4 : Loi des nœuds énoncé p. 7

On cherche les nœuds où apparaissent deux courants connus et un inconnu.

$$I_0 = I_1 + I_2 \quad \text{donc} \quad I_2 = I_0 - I_1 = 3 \text{ A}$$

$$I_3 + I_4 = I_0 \quad \text{donc} \quad I_3 = I_0 - I_4 = 2 \text{ A}$$

$$I_2 + I_5 = I_4 \quad \text{donc} \quad I_5 = I_4 - I_2 = -1 \text{ A}$$

Application 5 : Loi des mailles énoncé p. 9

1 On cherche les mailles où n'apparaît qu'une seule tension inconnue.

► $U_0 + U_1 = U_2$ donc $U_1 = U_2 - U_0 = -4 \text{ V};$

► $U_3 + U_4 = U_2$ donc $U_4 = U_2 - U_3 = -2 \text{ V}.$

2 Potentiel en A : $V_A - V_M = U_0$ donc $V_A = U_0 = 5 \text{ V}.$

Potentiel en B : $V_B - V_M = U_3 + U_4 = U_2 = 1 \text{ V}.$

Application 6 : Résistances équivalentes énoncé p. 13

1 Résistances parallèles : $R_{\text{eq,p}} = R/2$ d'où

$$R_{\text{eq}} = R + \frac{R}{2} = \frac{3}{2}R = 1,5 \text{ k}\Omega$$

2 Association parallèle de deux résistances, en série avec une autre association parallèle de quatre résistances,

$$R_{\text{eq}} = \frac{R}{2} + \frac{R}{4} = \frac{3}{4}R = 750 \Omega.$$

D'autres possibilités existent, mais sont un peu plus compliquées.

Application 7 : Mesure de résistance par la méthode de la tension moitié énoncé p. 13

Pont diviseur de tension : $\frac{u}{E} = \frac{1}{2} = \frac{R^*}{R_0 + R^*}$ donc $R_0 = R^*$.

Application 8 : Résistance d'entrée d'un voltmètre idéal énoncé p. 15

- 1** Résistance en parallèle de l'ampoule.
- 2** D'après la loi d'Ohm, $i_v = u/R_v$.
- 3** Le même courant doit traverser l'ampoule avec et sans voltmètre, donc idéalement $i_v = 0$ et R_v infinie.

Application 9 : Modèle de Norton d'un générateur énoncé p. 16

Loi de comportement du générateur de Norton : notons i' le courant qui traverse r' en convention récepteur.

$$I_0 = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{LN}}}{i} + i' = i + \frac{u}{r'} \quad \text{soit} \quad u = r'I_0 - r'i$$

Par identification avec le modèle de Thévenin : $E = r'I_0$ et $r' = r$.