



R. Dufy, Musée d'art moderne, Paris

# Cours 2: Conventions, lois d'Ohm et de Kirchhoff

EE 106 – Sciences et  
technologies de  
l'électricité  
Automne 2025

# Rappels



# - Rappels – Grandeurs électriques

- L'électricité est liée au déplacement de charges électriques
- Ces déplacements sont liés aux interactions électromagnétiques
- Ces déplacements peuvent être caractérisés par des grandeurs globales
  - Tension électrique: différence de potentiel entre deux points
  - Courant électrique: flux de charge
- Les grandeurs sont représentées par une valeur et une unité



# - Rappels - Quelles sont les expressions valables?

$U = 210 \text{ V}$

$I = 12.5 \text{ A}$

$V_2 = 9$

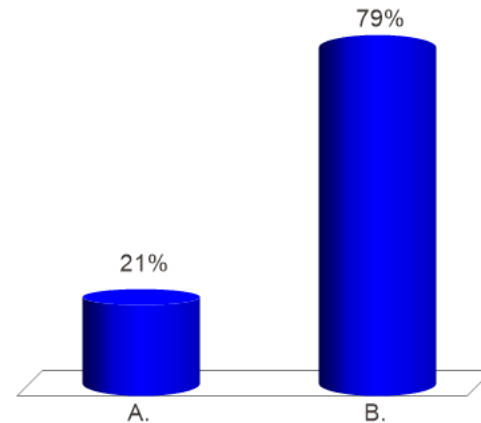
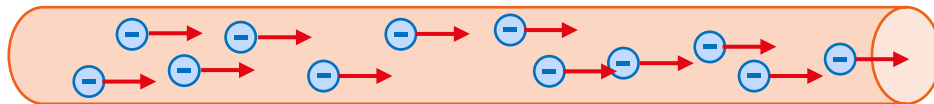
$I = 0.0125 \text{ C} \cdot \text{s}^{-1}$



# - Rappels - Quel est le signe du courant?

- A.  $i < 0$
- ✓ B.  $i > 0$

Sens conventionnel (arbitraire)

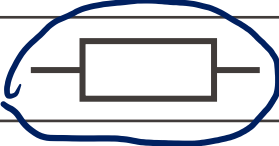


- Enoncer les lois de bases d'un circuit électrique
  - Loi d'Ohm
  - Lois de Kirchhoff
  - Branchement des sources et des appareils de mesure
- Définir les conventions d'écriture

# La loi d'Ohm





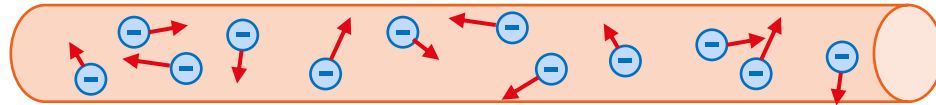
Symbole	Signification	Grandeur	Unité
	Résistance	$R$	ohm ( $\Omega$ )



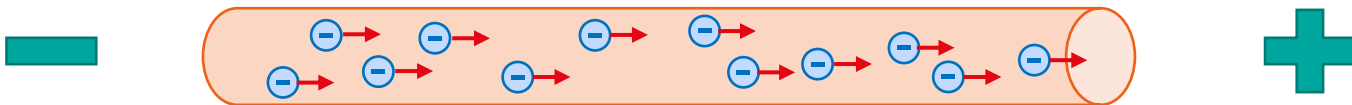
- Composant de base des circuits
- Objectif: déterminer la relation entre tension ( $U$ ) et courant ( $I$ )

- On applique une tension aux bornes d'un composant conducteur
  - Les charges électriques se mettent en mouvement sous l'action de la force électrostatique
  - Les charges ne vont pas à une vitesse infinie! Des frottements (collisions) freinent le déplacement des électrons et imposent une vitesse limite (vitesse de dérive)

- On applique une tension aux bornes d'un composant conducteur
  - Les charges électriques se mettent en mouvement sous l'action de la force électrostatique
  - Les charges ne vont pas à une vitesse infinie! Des frottements (collisions) freinent le déplacement des électrons et imposent une vitesse limite (vitesse de dérive)

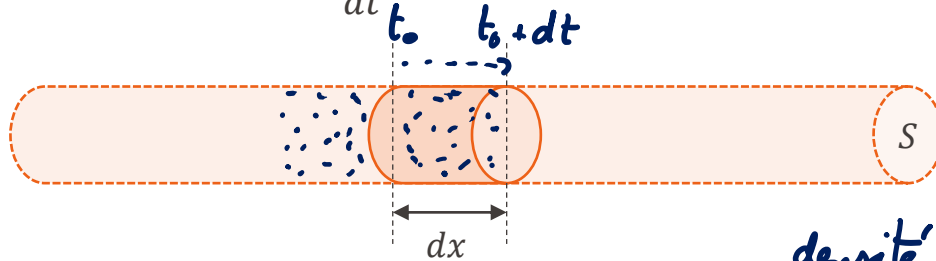


- On applique une tension aux bornes d'un composant conducteur
  - Les charges électriques se mettent en mouvement sous l'action de la force électrostatique
  - Les charges ne vont pas à une vitesse infinie! Des frottements (collisions) freinent le déplacement des électrons et imposent une vitesse limite (vitesse de dérive)



# Résistance électrique

- Courant électrique:  $I = \frac{dq}{dt}$



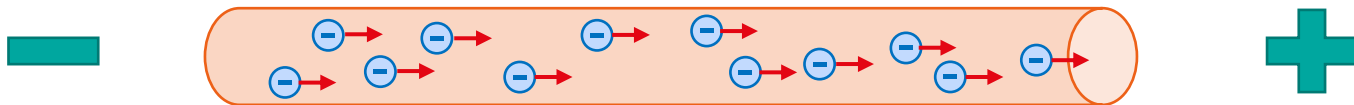
- Quantité de charges dans le volume:  $dq = neS \cdot dx$

$dq = neS \cdot dx$   
*densité* (pointing to  $n$ )  
*charge* (pointing to  $e$ )  
*volume* (pointing to  $S \cdot dx$ )  
 Concentration d'électrons libres ( $m^{-3}$ ) (pointing to  $n$ )

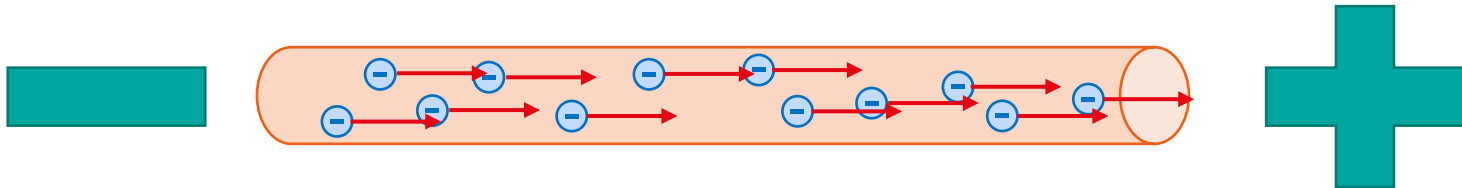
- Donc:  $I = neS \cdot \frac{dx}{dt} = neS \cdot v_d$

- Vitesse de dérive:  $v_d = \frac{I}{neS}$

- On applique une tension aux bornes d'un composant conducteur
  - Les charges électriques se mettent en mouvement sous l'action de la force électrostatique
  - Les charges ne vont pas à une vitesse infinie! Des frottements (collisions) freinent le déplacement des électrons et imposent une vitesse limite (vitesse de dérive)



- On applique une tension aux bornes d'un composant conducteur
  - Les charges électriques se mettent en mouvement sous l'action de la force électrostatique
  - Les charges ne vont pas à une vitesse infinie! Des frottements (collisions) freinent le déplacement des électrons et imposent une vitesse limite (vitesse de dérive)



# Résistance électrique

- Rappel de mécanique (principe fondamental de la dynamique):

- $ma = F_{es} - fv$  ← frottements

- En régime statique ( $a = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ):  $v_d = \frac{F_{es}}{f}$

- La force électrostatique  $F_{es}$  est proportionnelle à la tension

$$F_a = Q \cdot E_{\infty} = Q \cdot \frac{U}{d} \quad \Rightarrow \quad v_d \propto U$$

- La vitesse de dérive  $v_d$  est proportionnelle au courant

$$v_d = \frac{I}{neS} \quad \Rightarrow \quad v_d \propto I$$



- Rappel de mécanique (principe fondamental de la dynamique):
  - $ma = F_{es} - fv$
  - En régime statique ( $a = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ):  $v_d = \frac{F_{es}}{f}$
- La force électrostatique  $F_{es}$  est proportionnelle à la tension
- La vitesse de dérive  $v_d$  est proportionnelle au courant

Moyen mnémotechnique:

▪ Loi d'Ohm:  $U = RI$



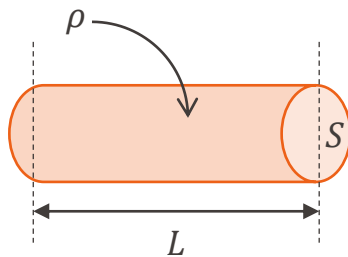
Canton Uri

$V \propto v_d$   
 $I \propto v_d$   
 ▪  $R$  est la résistance (unité: ohm,  $\Omega$ )



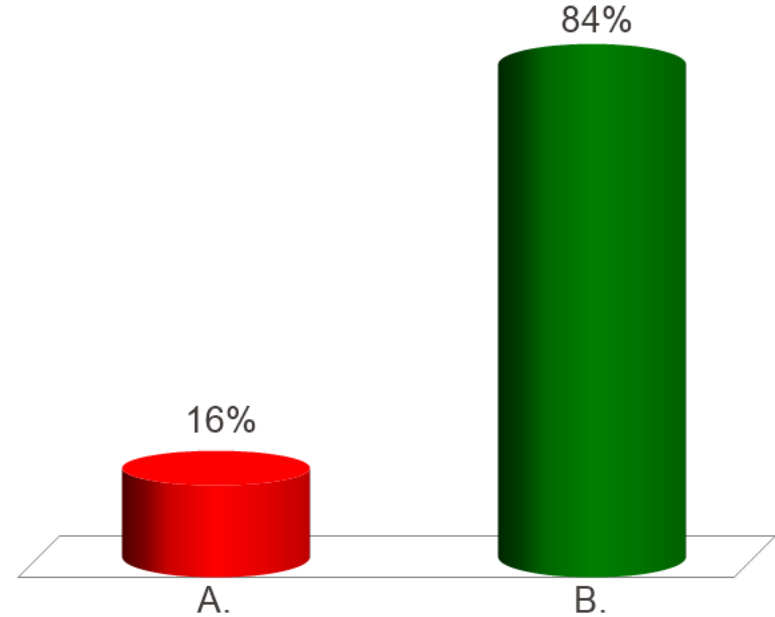
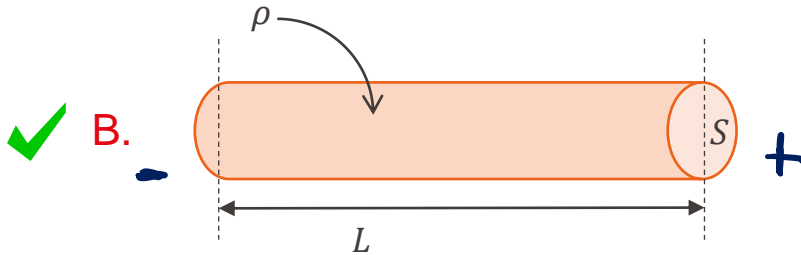
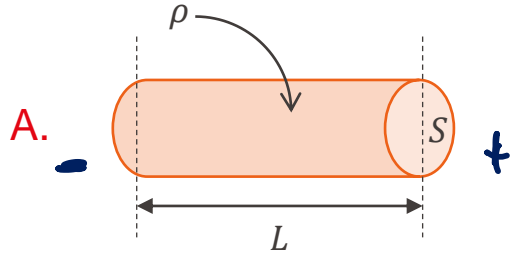
Georg Ohm  
 1789-1854  
 Physicien allemand

- La résistance dépend:
  - Du matériau → **résistivité**  $\rho$  (unité:  $\Omega \cdot \text{m}$ )
  - De la distance parcourue → **longueur**  $L$  (unité: m)
  - De la section transversale → **surface**  $S$  (unité:  $\text{m}^2$ )





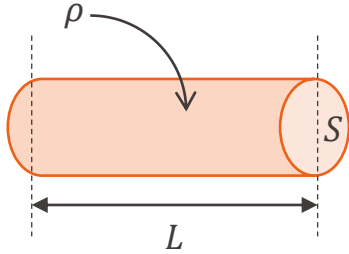
# Quelle structure a la plus grande résistance?



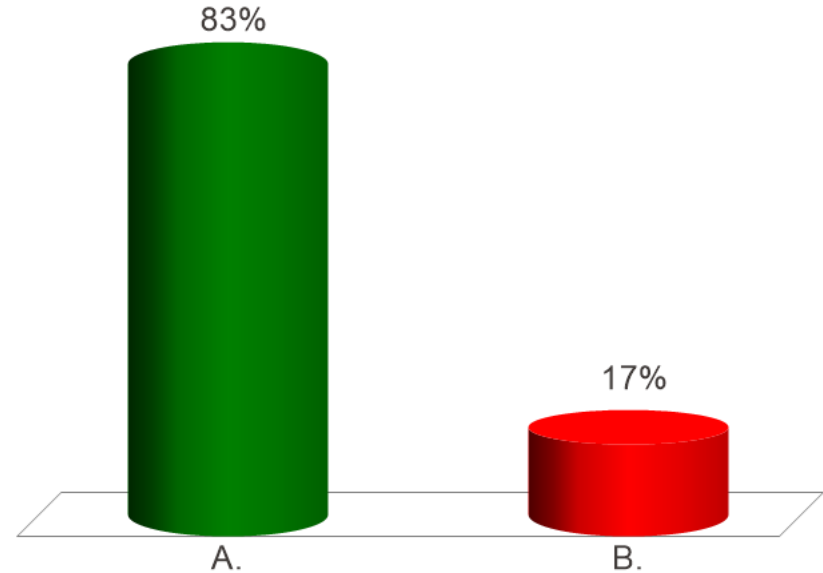
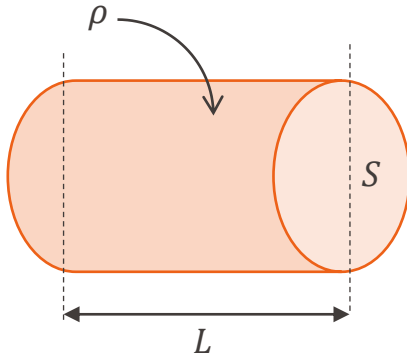
# Quelle structure a la plus grande résistance?



A.



B.



- Longueur plus élevée: moins de force d'attraction, donc résistance plus grande
- Section plus élevée: plus de charges peuvent passer, donc résistance plus petite

The diagram shows the formula  $R = \frac{\rho L}{S}$  enclosed in a red rounded rectangle. Four teal arrows point from unit labels to the variables in the formula:  $\Omega \cdot m$  points to  $\rho$ ,  $m$  points to  $L$ ,  $\Omega$  points to  $R$ , and  $m^2$  points to  $S$ .

$$R = \frac{\rho L}{S}$$

# Résistance électrique

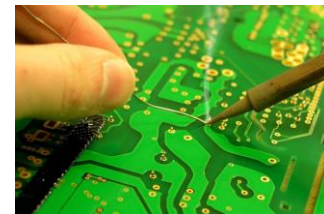
$$R = \frac{\rho L}{S}$$



shutterstock.com - 1968360943



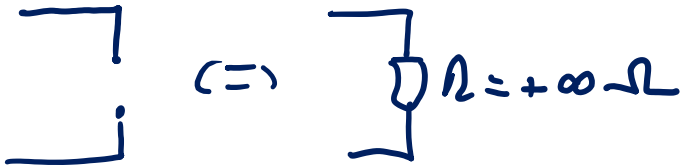
Métal	Résistivité ( $\Omega \cdot m$ )
Argent	$16 \cdot 10^{-9}$
Cuivre	$17 \cdot 10^{-9}$
Or	$22 \cdot 10^{-9}$
Etain	$120 \cdot 10^{-9}$



- Pour un conducteur parfait,  $R = 0 \Omega$
- En général, on considère les métaux comme des conducteurs parfaits.



- Pour un isolant,  $R = +\infty \Omega$



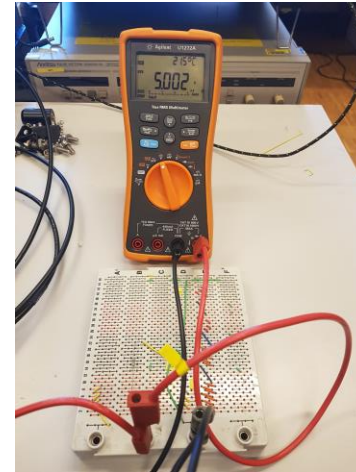
- On définit aussi la conductance
  - Il s'agit de l'inverse de la résistance

$$G = \frac{1}{R}$$

Unité: siemens (S ou  $\Omega^{-1}$ )

- Loi d'Ohm:  $I = GU$

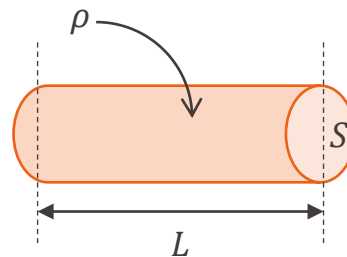
- On peut calculer une résistance en mesurant tension et courant à l'aide d'un voltmètre et d'un ampèremètre.
- On peut utiliser un ohmmètre.



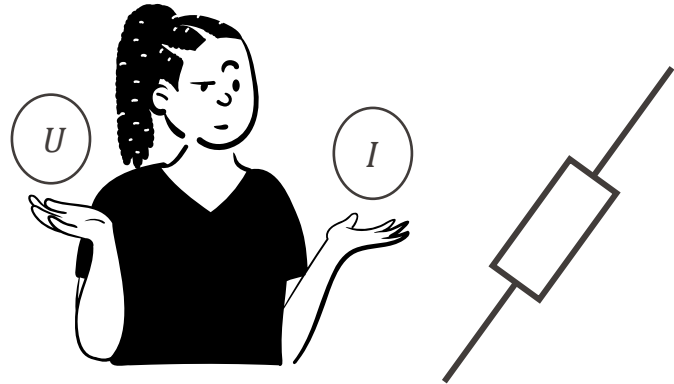
- La résistance quantifie à quel point un composant s'oppose au passage du courant
- Elle dépend:
  - De la résistivité, une propriété du matériau
  - De la longueur et de la section, propriétés géométriques
- Les conducteurs parfaits ont une résistance nulle
- Les isolants ont une résistance infinie
- Les résistances obéissent à la loi d'Ohm

$$R = \frac{\rho L}{S}$$

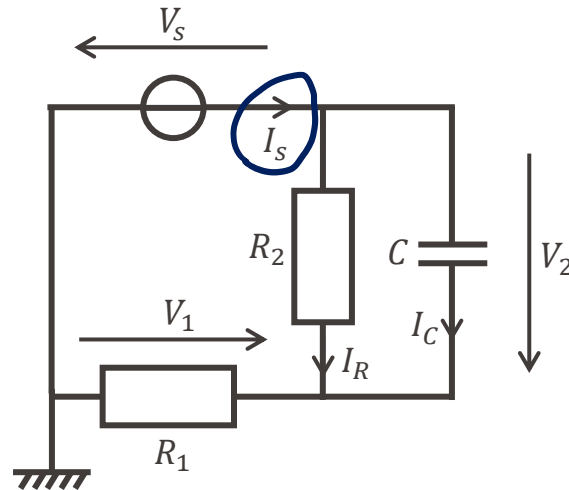
$$U = RI$$



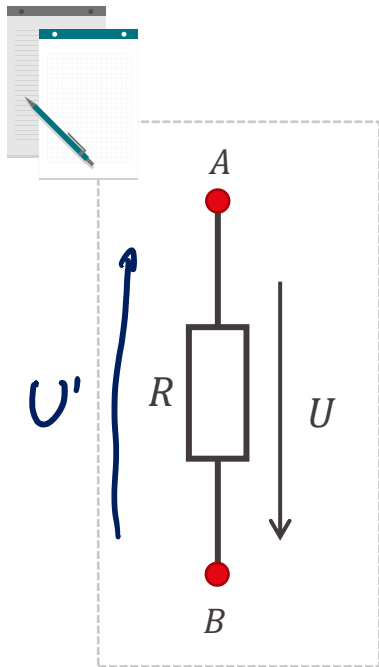
# Conventions graphiques



- On représente courants et tensions par des flèches

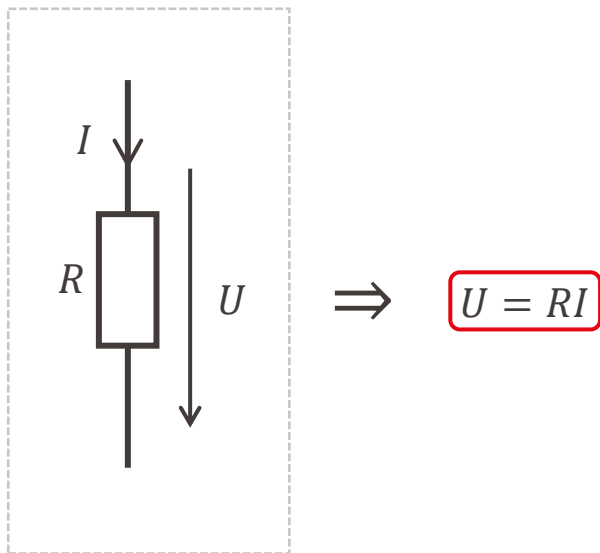


- Le choix des sens dans le schéma est arbitraire, mais il faut adapter l'écriture des lois à la convention choisie

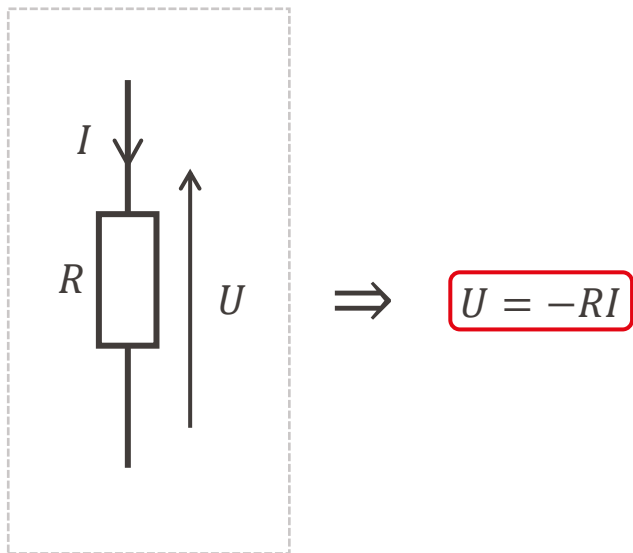


- $U = V(A) - V(B)$

$$U' = V(B) - V(A) = -U$$

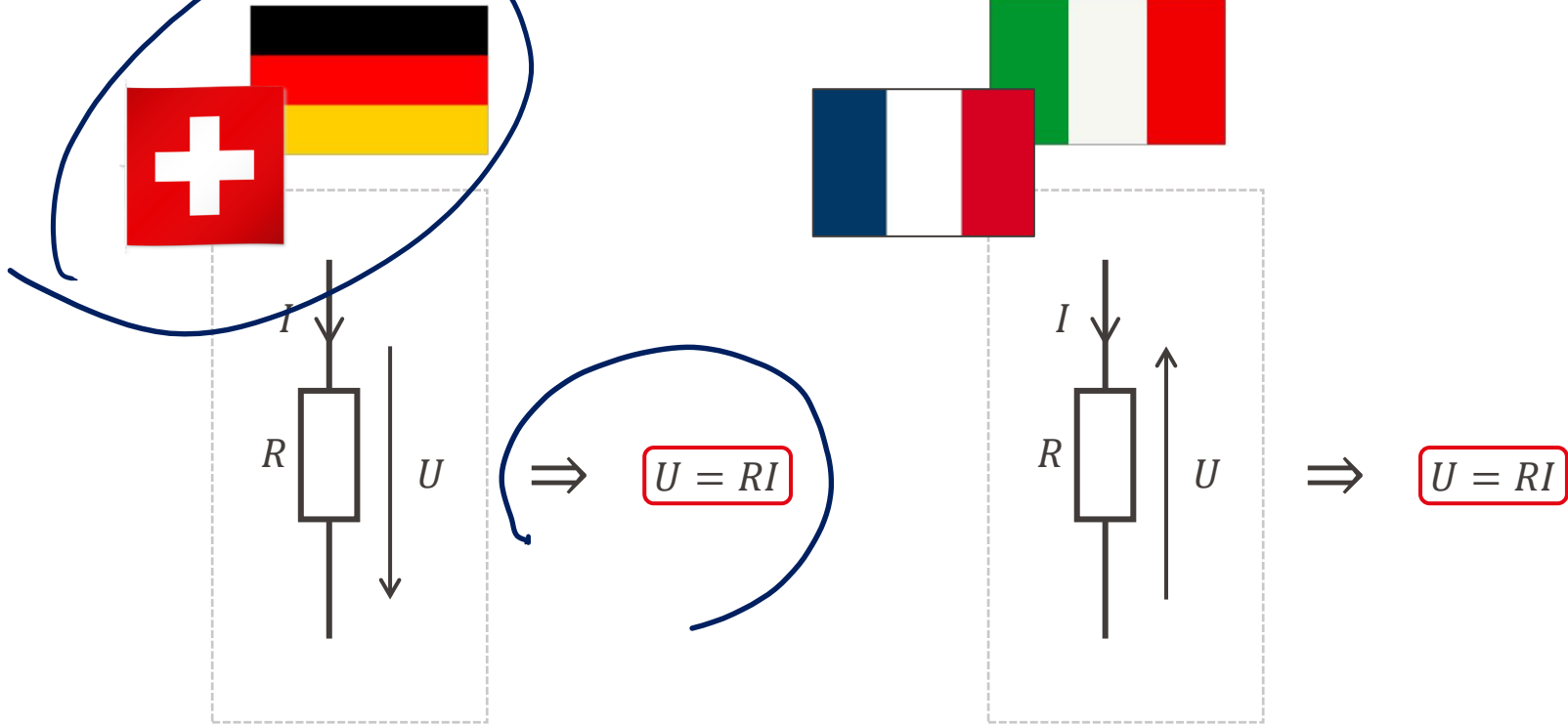


- Courant et tension fléchés dans le même sens: pas de changement dans la formule

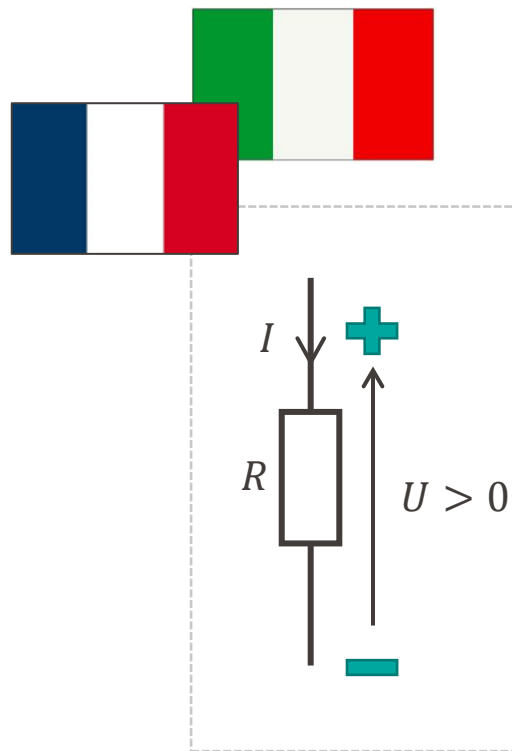
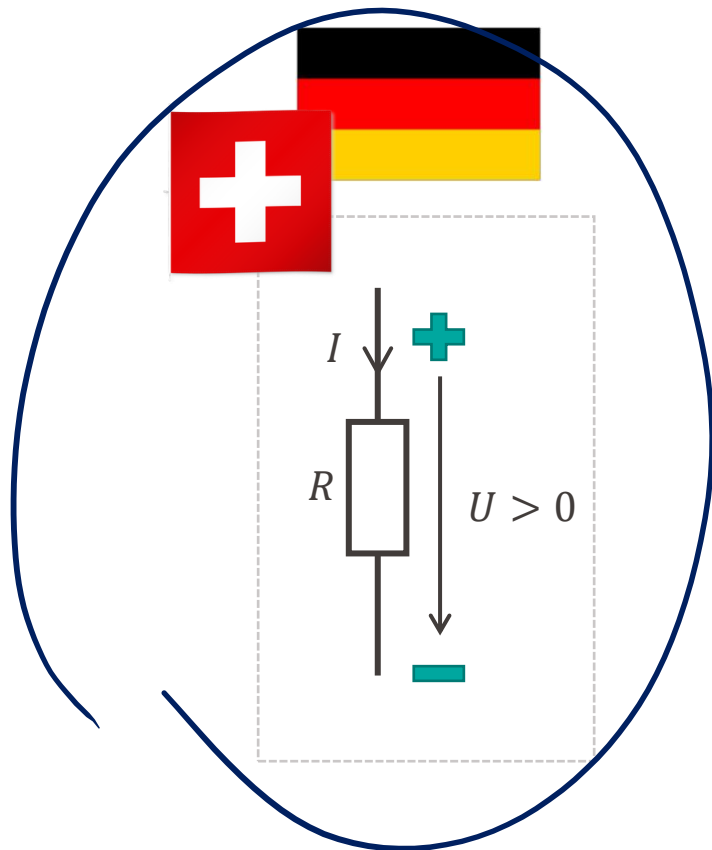


- Courant et tension fléchés dans le même sens: pas de changement dans la formule
- **Courant et tension fléchés en sens opposé: il faut changer le signe dans la formule**

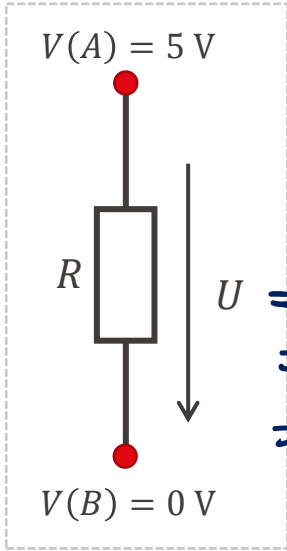
# Conventions graphiques



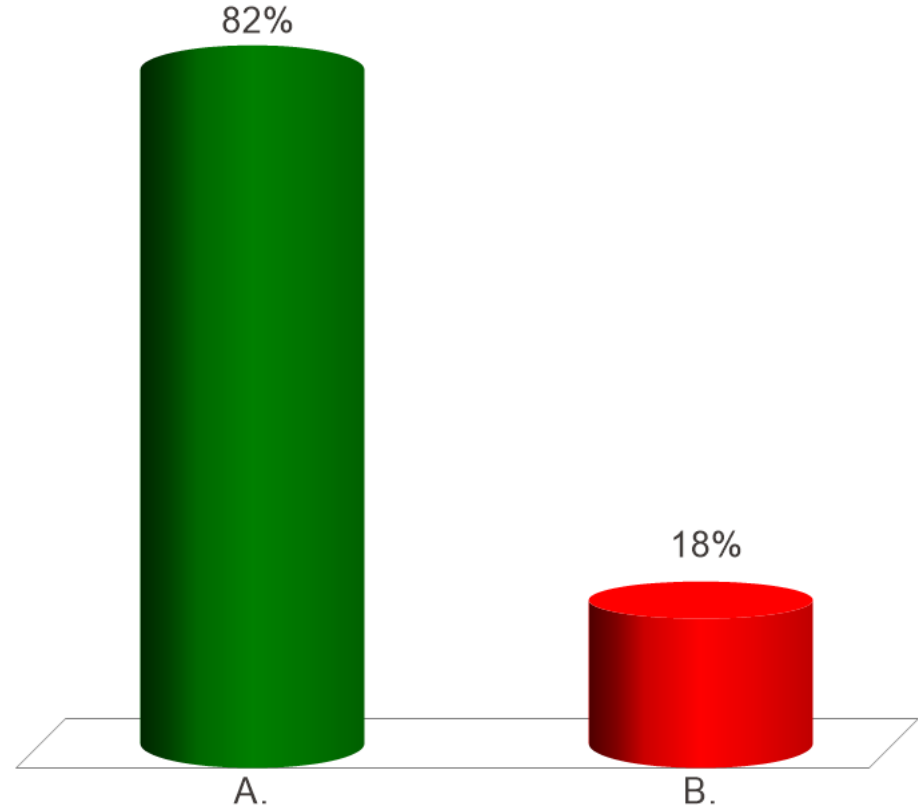
# Conventions graphiques



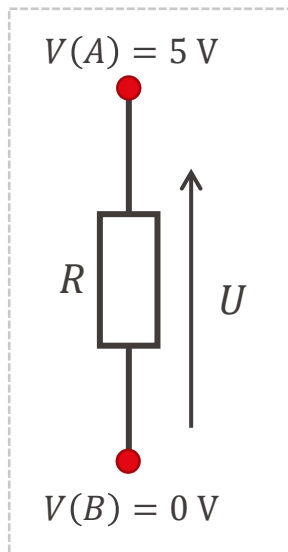
# Que vaut la tension $U$ ?



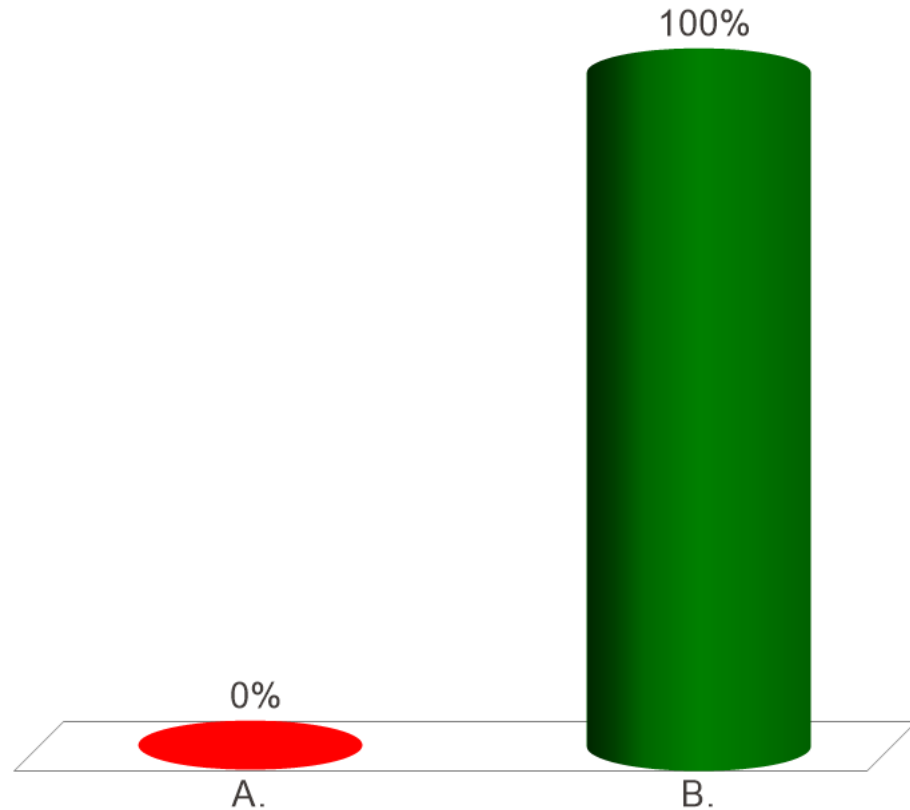
- ✓ A.  $U = 5 \text{ V}$   
 B.  $U = -5 \text{ V}$



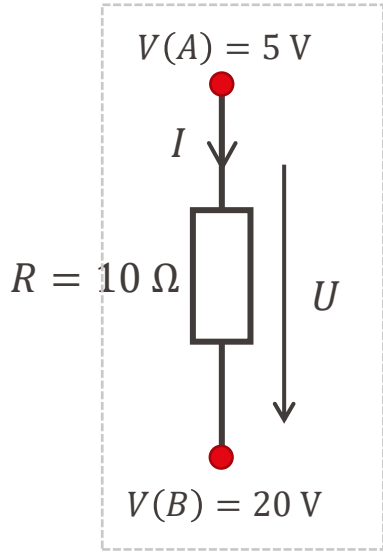
# Que vaut la tension $U$ ?



- ✓ A.  $U = 5 \text{ V}$
- B.  $U = -5 \text{ V}$



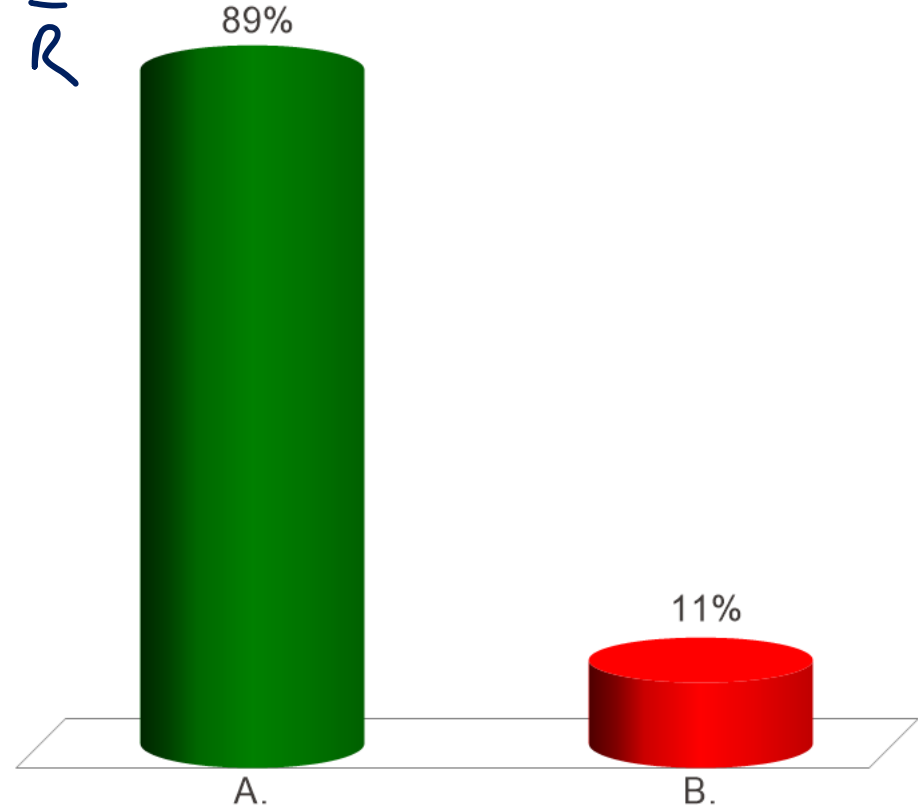
# Que vaut le courant $I$ ?



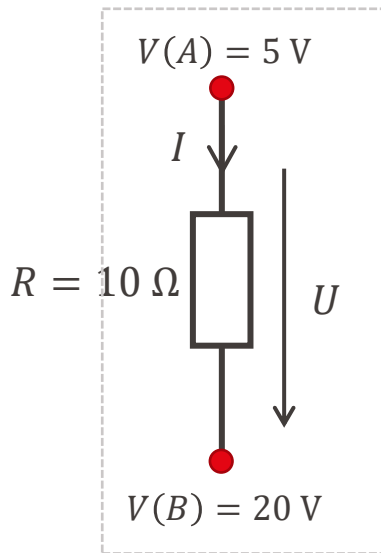
$$U = RI \Rightarrow I = \frac{U}{R}$$

$$U = 5 - 20 = -15 \text{ V}$$

- A.  $I = -1.5 \text{ A}$   
 B.  $I = 1.5 \text{ A}$

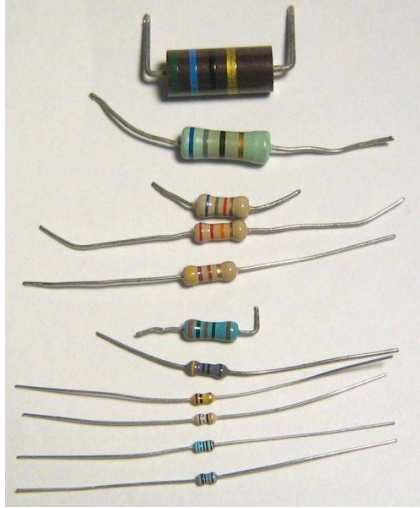


# Que vaut le courant $I$ ?



- Tension:  $U = V(A) - V(B) = -15 \text{ V}$
- Loi d'Ohm:  $U = RI \Rightarrow I = \frac{U}{R} = -\frac{15}{10} = -1.5 \text{ A}$

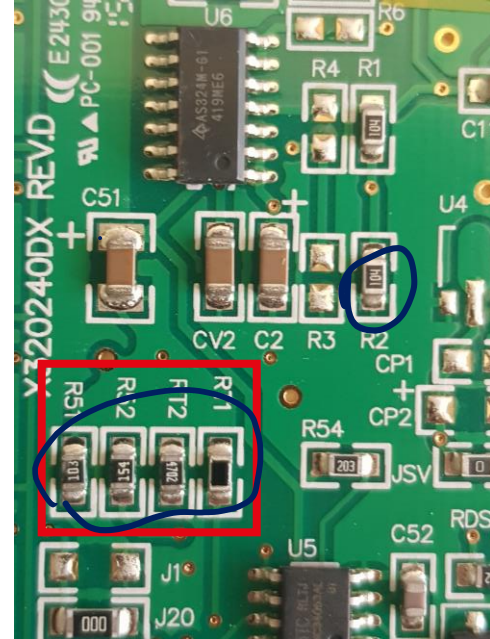
# Résistance électrique



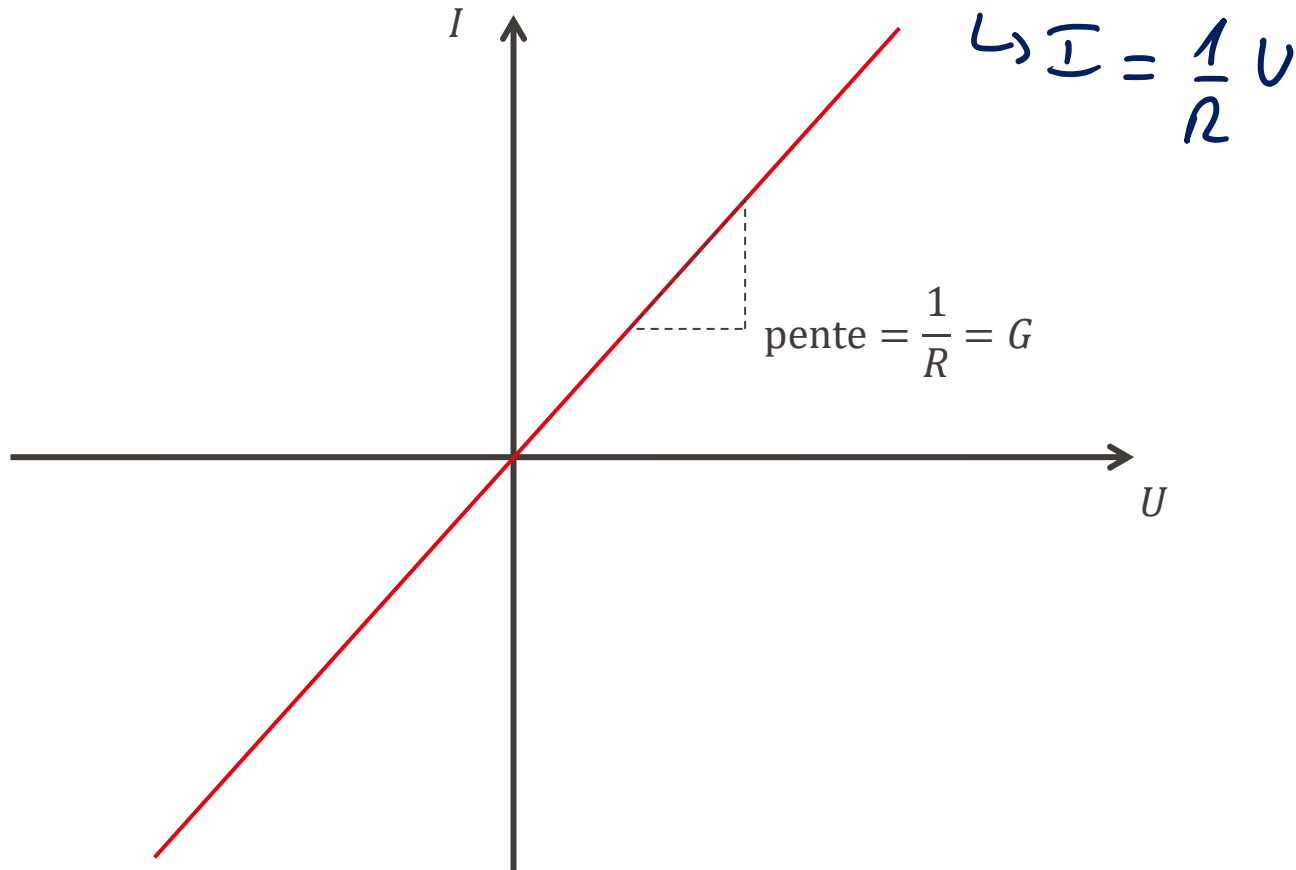
56 kΩ  
5 6 0 × 10<sup>2</sup>

1er chiffre 2ème chiffre 3ème chiffre Multi Tolérance

Noir	0	0	x1	
Marron	1	1	x10	± 1%
Rouge	2	2	x100	± 2%
Orange	3	3	x1K	± 3%
Jaune	4	4	x10K	± 4%
Vert	5	5	x100K	± 0.5%
Bleu	6	6	x1M	± 0.25%
Violet	7	7	x10M	± 0.10%
Gris	8	8	x100M	± 0.05%
Blanc	9	9	x1G	
Or			- 10	± 5%
Argent			+ 100	± 10%

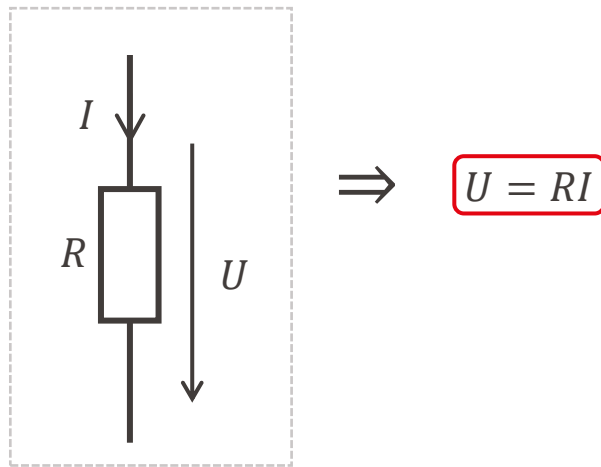


# Courbe caractéristique

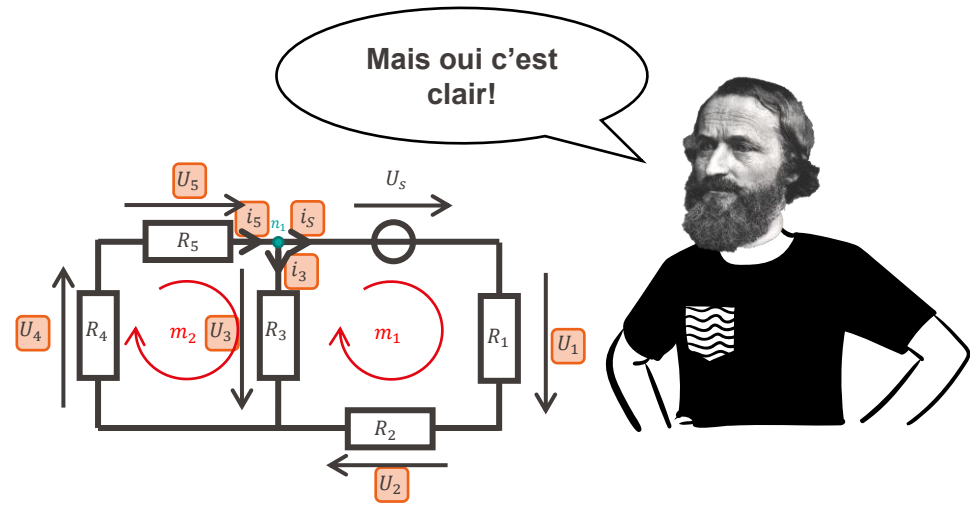


# Points clés

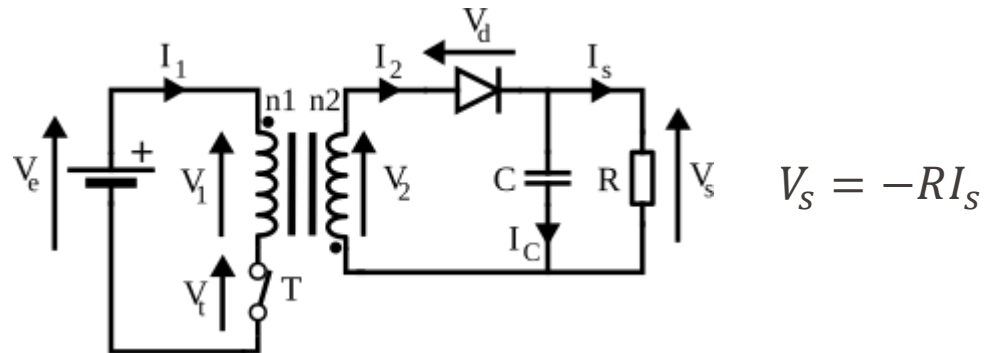
- Les conventions graphiques dictent la façon d'utiliser les formules
- Elles permettent de définir un schéma électrique sans ambiguïté
- Elles peuvent (malheureusement) varier d'un pays à l'autre
  - Ici, on flèche tension et courant dans le même sens pour pouvoir écrire la loi d'Ohm!
- On représente aussi le comportement d'un élément par sa courbe courant-tension



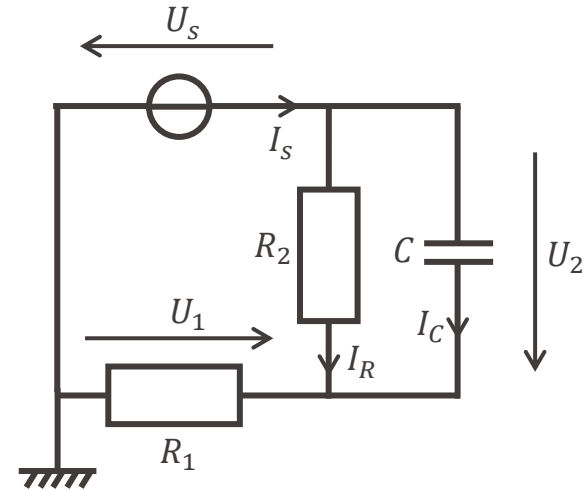
# Les lois de Kirchhoff



- Un circuit électrique est un ensemble de composants électriques connectés entre eux
- On utilise des **modèles** pour représenter un système
  - Schéma électrique: on définit les grandeurs, on visualise les chemins, les connections...
  - Modèle mathématique: on met en équation



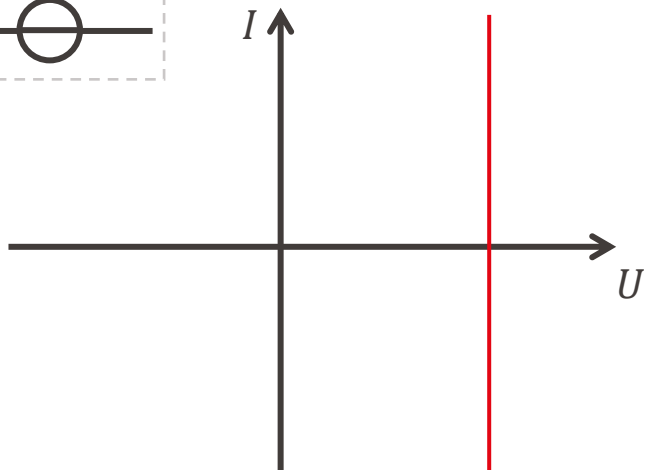
- Les circuits contiennent:
  - Des sources
  - Des composants passifs (R, L, C...)



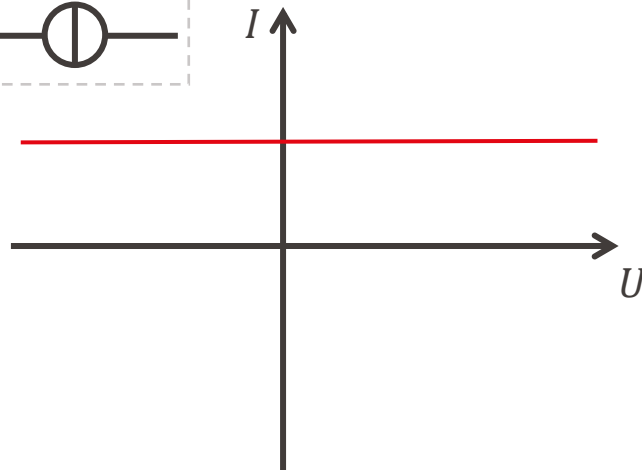
- On relie les composants par des conducteurs parfaits (fils)
- On représente les grandeurs physiques d'intérêt

- Sources de tension idéales: fournissent une tension fixée par l'utilisateur
- Sources de courant idéales: fournissent un courant fixé par l'utilisateur

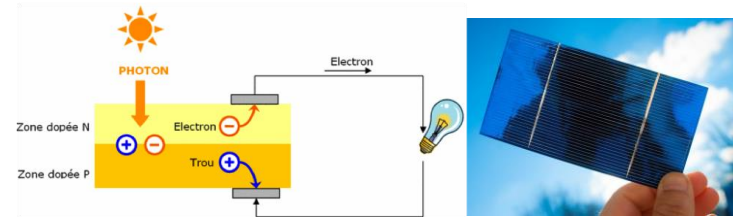
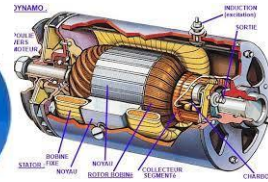
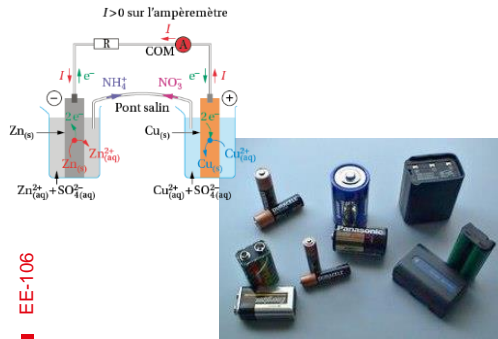
Source de tension



Source de courant



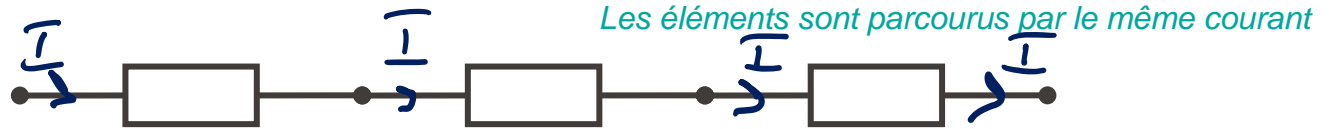
- Pile électrique (énergie chimique → énergie électrique)
- Alternateur (énergie mécanique → énergie électrique)
- Cellule photovoltaïque (énergie lumineuse → énergie électrique)



- Un dipôle électrique a deux bornes



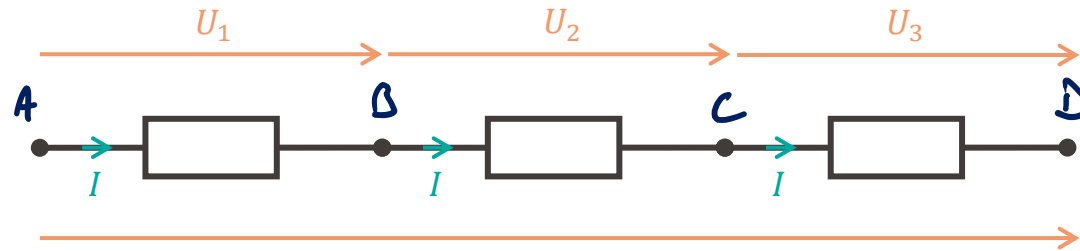
- Connexion en série: les éléments sont connectés les uns à la suite des autres



- Connexion en parallèle: les éléments sont connectés aux mêmes bornes



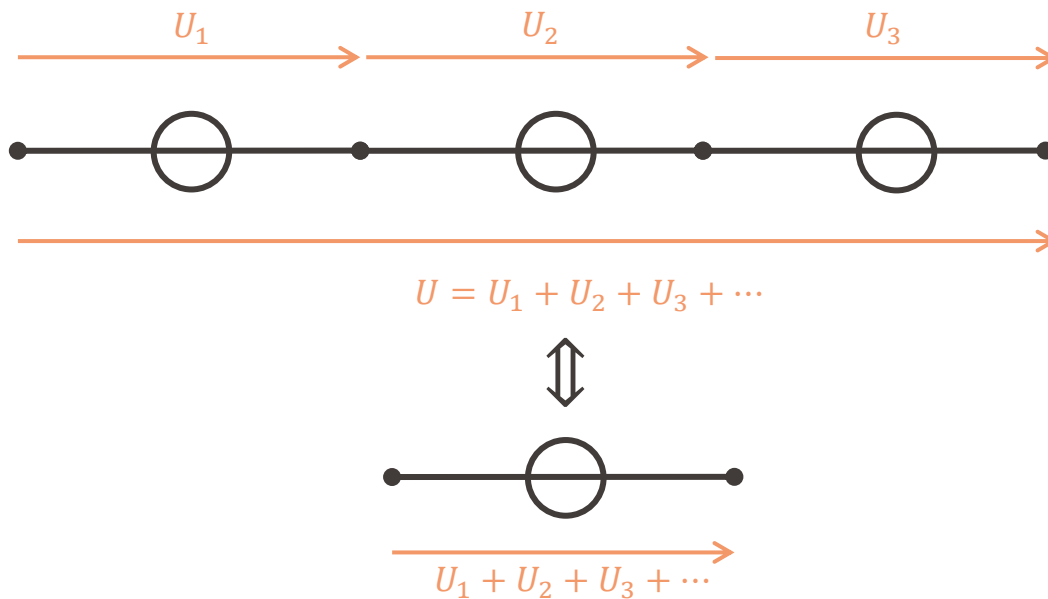
- Connexion en série: les éléments sont connectés les uns à la suite des autres
  - Le courant est le même dans chaque élément (pas de courant sortant)
  - La tension totale est la somme des tensions individuelles



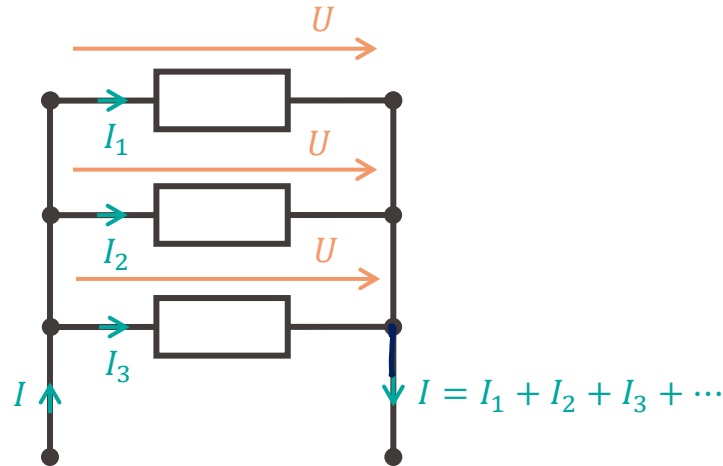
$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1 = U_A - U_B \\ U_2 = U_B - U_C \\ U_3 = U_C - U_D \end{array} \right. \Rightarrow U = U_A - U_D$$

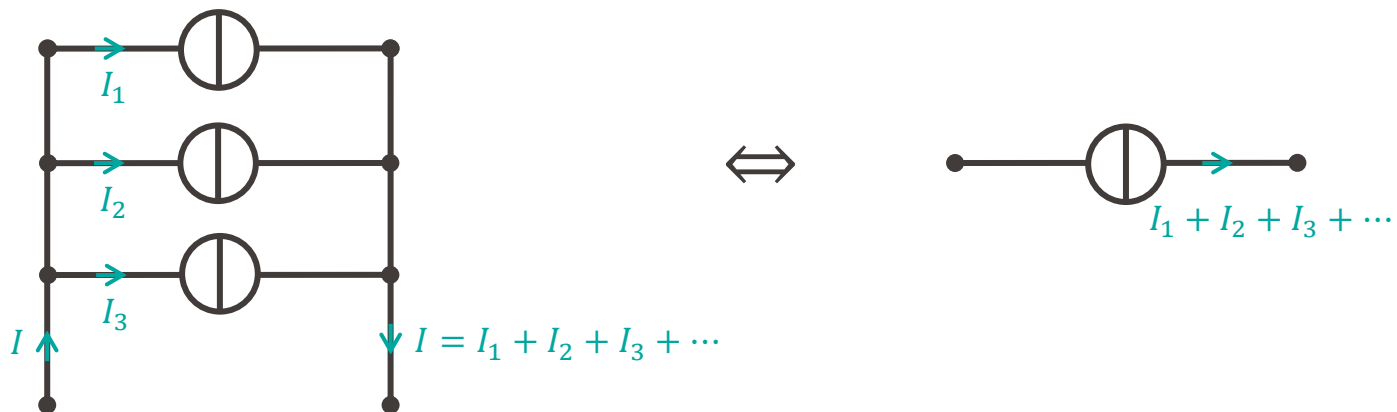
- Connexion en série: les éléments sont connectés les uns à la suite des autres
  - Le courant est le même dans chaque élément (pas de courant sortant)
  - La tension totale est la somme des tensions individuelles



- Connexion en parallèle: les éléments sont connectés aux mêmes bornes
  - Le courant total est la somme des courants individuels
  - La tension est la même aux bornes de chaque élément individuel (même différence de potentiel)



- Connexion en parallèle: les éléments sont connectés aux mêmes bornes
  - Le courant total est la somme des courants individuels
  - La tension est la même aux bornes de chaque élément individuel (même différence de potentiel)



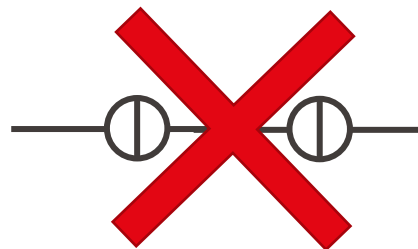
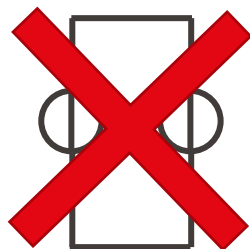


- Sources de tension idéales: fournissent une tension fixée par l'utilisateur
  - On ne branche jamais deux sources de tension en parallèle
- Sources de courant idéales: fournissent un courant fixé par l'utilisateur
  - On ne branche jamais deux sources de courant en série

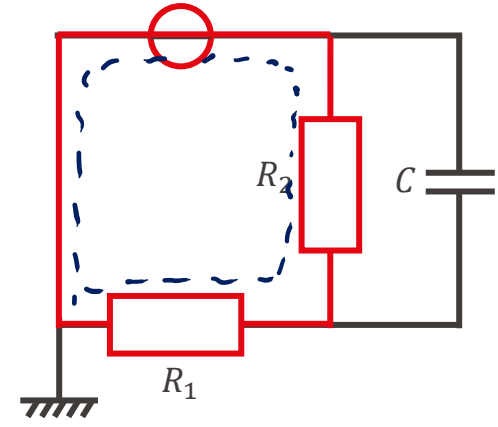
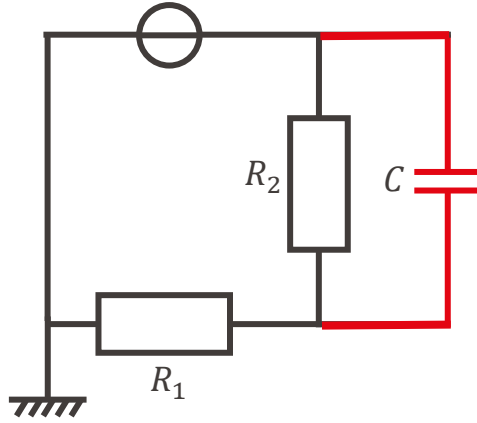
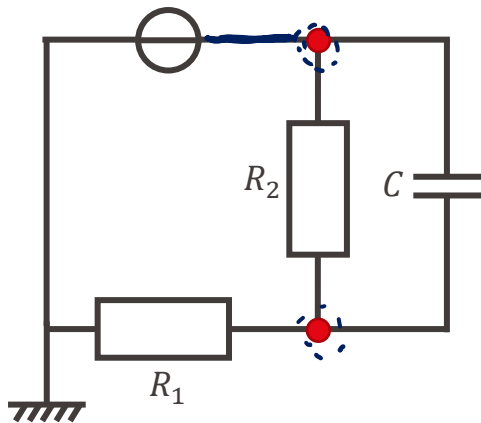




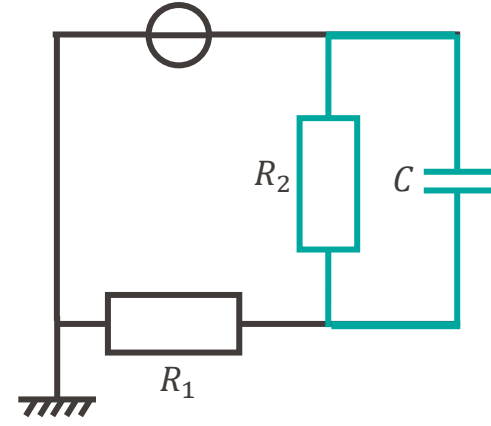
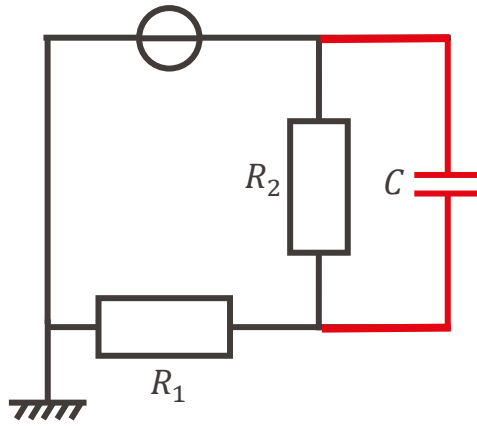
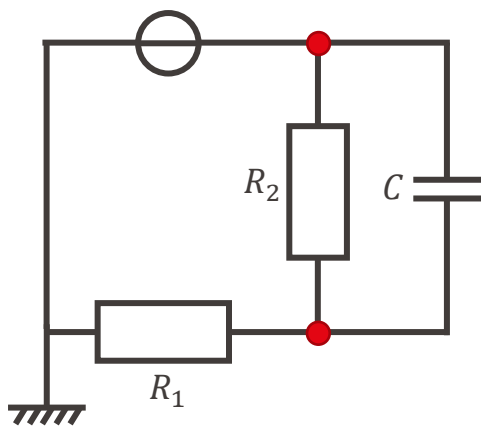
- Sources de tension idéales: fournissent une tension fixée par l'utilisateur
  - On ne branche jamais deux sources de tension en parallèle
- Sources de courant idéales: fournissent un courant fixé par l'utilisateur
  - On ne branche jamais deux sources de courant en série



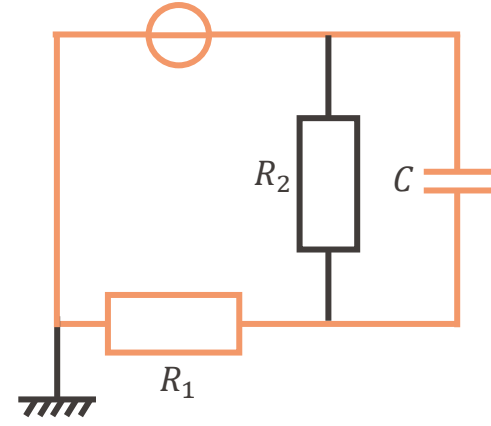
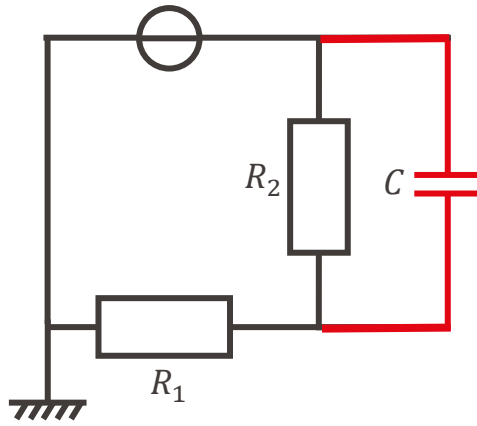
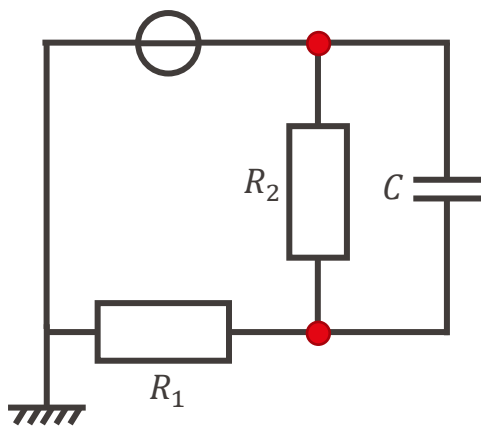
- **Nœud**: point de connexion de 3 conducteurs ou plus
- **Branche**: ensemble d'éléments situés entre deux nœuds
- **Maille**: boucle d'éléments partant d'un nœud pour y revenir



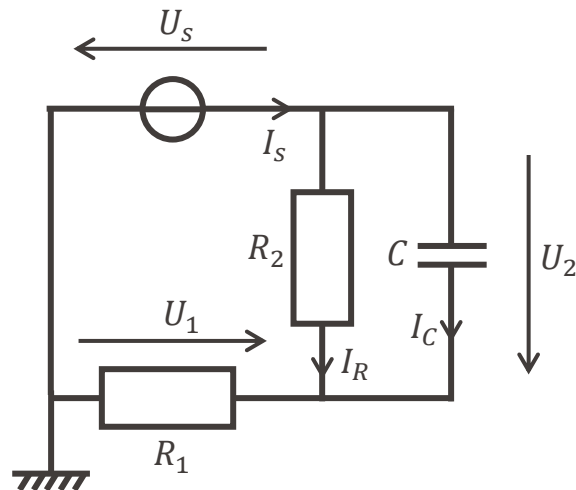
- **Nœud**: point de connexion de 3 conducteurs ou plus
- **Branche**: ensemble d'éléments situés entre deux nœuds
- **Maille**: boucle d'éléments partant d'un nœud pour y revenir



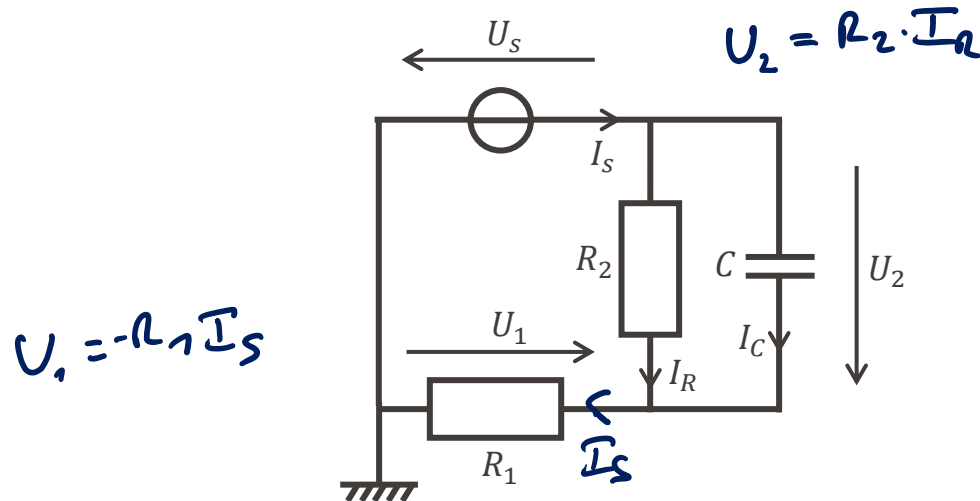
- **Nœud**: point de connexion de 3 conducteurs ou plus
- **Branche**: ensemble d'éléments situés entre deux nœuds
- **Maille**: boucle d'éléments partant d'un nœud pour y revenir



- Une fois le schéma dessiné, on place les grandeurs à étudier (courants, tensions)
  - Les courants sont fléchés sur les conducteurs
  - Les tensions sont fléchées à-côté des dipôles
- Les grandeurs n'étant pas forcément connues, le sens des flèches est au choix
  - Attention aux conventions de sens!

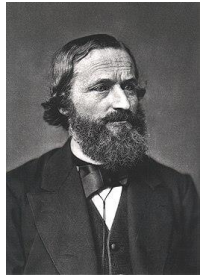


- Mise en équation: on a déjà vu la loi d'Ohm qui lie courant et tension pour une résistance
  - Ce n'est pas suffisant!



- Mise en équation: on a déjà vu la loi d'Ohm qui lie courant et tension pour une résistance
  - Ce n'est pas suffisant!
- Lois de Kirchhoff: se basent sur la conservation de l'énergie et la conservation de la matière
  - Loi des nœuds: équations sur les courants au niveau des nœuds
  - Loi des mailles: équations sur les tensions dans les mailles

*Gustav Kirchhoff*  
1824-1887  
Physicien prussien



- La loi des nœuds exprime mathématiquement la conservation de la matière
  - Ici, conservation de la matière  $\Leftrightarrow$  conservation du courant

La somme des courants passants par un nœud est nulle.

$N$  branches

$$\sum_{k=1}^N i_k = 0$$

Courant dans la  
branche  $k$

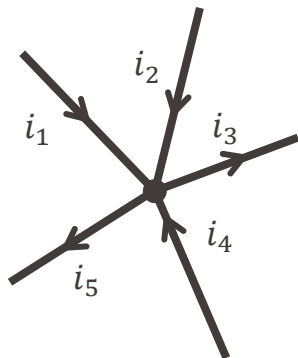
La somme des courants passants par un nœud est nulle.

$N$  branches

$$\sum_{k=1}^N i_k = 0$$

Courant dans la  
branche  $k$

- Attention au signe des courants
  - Courant qui va « vers » le nœud s'ajoute (+)
  - Courant qui va « hors » du nœud se soustrait (-)



$$i_1 + i_2 + i_4 - i_3 - i_5 = 0$$

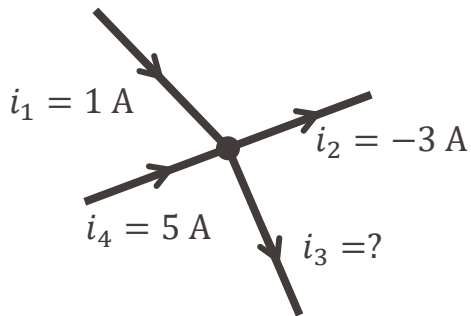
« Vers » le nœud « Hors » du nœud

$$i_1 + i_2 + i_4 = i_3 + i_5$$

Courant entrant Courant sortant



# Que vaut le courant $i_3$ ?



$$i_1 + i_4 = i_2 + i_3$$

$$\Leftrightarrow i_3 = i_1 + i_4 - i_2$$

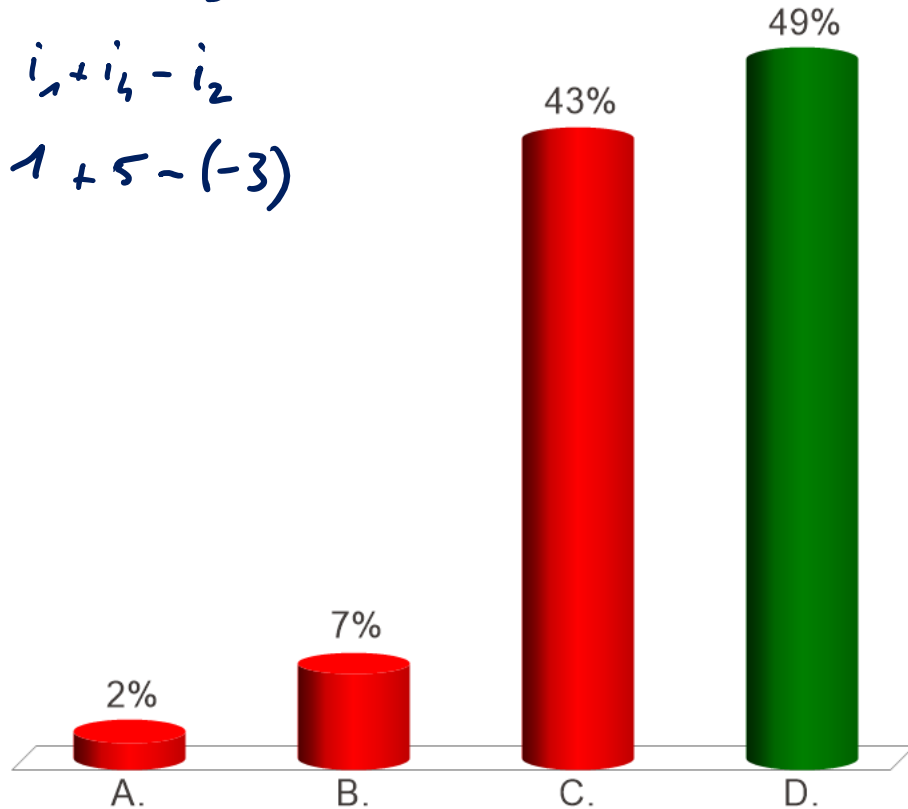
$$\Leftrightarrow i_3 = 1 + 5 - (-3)$$

A.  $i_3 = -9 \text{ A}$

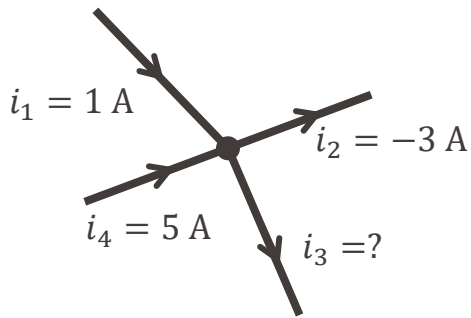
B.  $i_3 = 3 \text{ A}$

C.  $i_3 = -3 \text{ A}$

✓ D.  $i_3 = 9 \text{ A}$

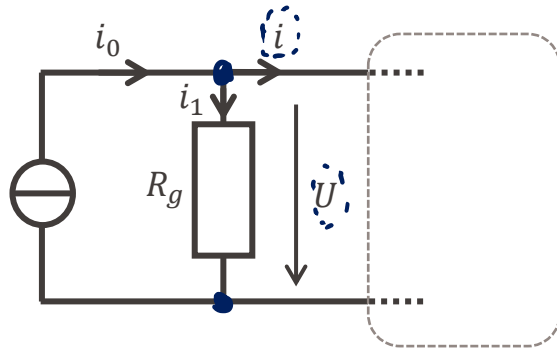


# Que vaut le courant $i_3$ ?



- $i_1 + i_4 = i_2 + i_3$
- $\Rightarrow i_3 = i_1 + i_4 - i_2$
- $\Rightarrow i_3 = 1 + 5 - (-3)$
- $\Rightarrow i_3 = 9 \text{ A}$

- Exemple: source de courant réelle
  - Une source idéale délivre un courant indépendant de la tension et du reste du circuit
  - Une source réelle délivre un courant dépendant de la tension à cause d'une résistance interne: trouvons sa courbe caractéristique

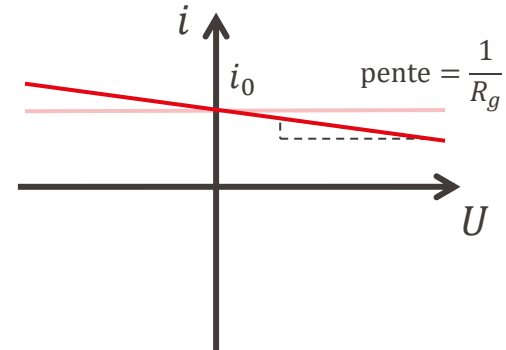


$$\text{Loi des nœuds: } i_0 = i_1 + i$$

$$\text{Loi d'Ohm: } U = R_g \cdot i_1$$

$$\Rightarrow i_0 = \frac{U}{R_g} + i$$

$$\Rightarrow i = i_0 - \frac{U}{R_g}$$



- La loi des mailles exprime mathématiquement la conservation de l'énergie
  - Ici, conservation de l'énergie  $\Leftrightarrow$  Pas de différence de potentiel en un point unique

**La somme des tensions le long d'une maille est nulle.**

$N$  dipôles dans la maille

$$\sum_{k=1}^N U_k = 0$$

Tension aux bornes du dipôle  $k$

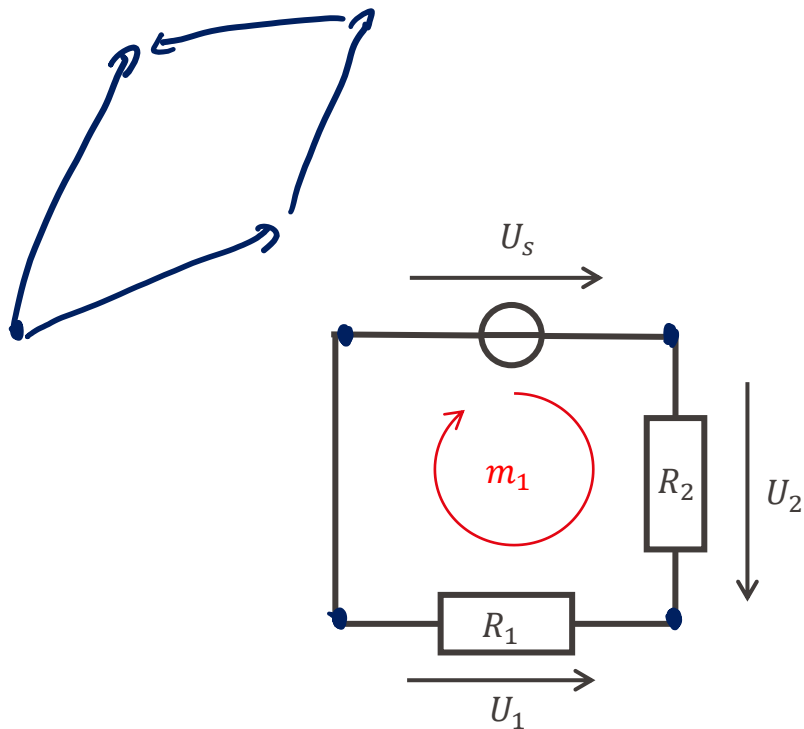
La somme des tensions le long d'une maille est nulle.

$N$  dipôles dans la maille

$$\sum_{k=1}^N U_k = 0$$

Tension aux bornes du dipôle  $k$

- Attention au signe des tensions
  - Il faut définir un sens de lecture de la maille
  - Tension dans le sens de lecture s'ajoute (+)
  - Tension dans le sens opposé de la lecture se soustrait (-)



Loi des mailles dans  $m_1$ :

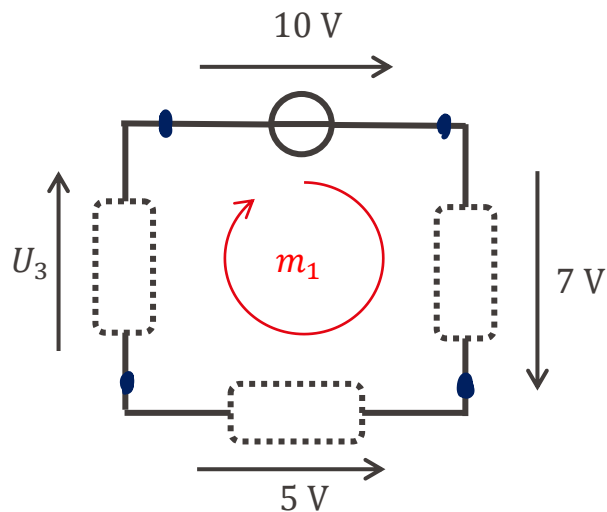
$$U_s + U_2 - U_1 = 0$$

Dans le  
sens de  $m_1$

Dans le sens  
opposé à  $m_1$

Astuce: fonctionnement similaire à la relation de Chasles. On part d'un point et on suit les « vecteurs » de tensions jusqu'à revenir au point de départ

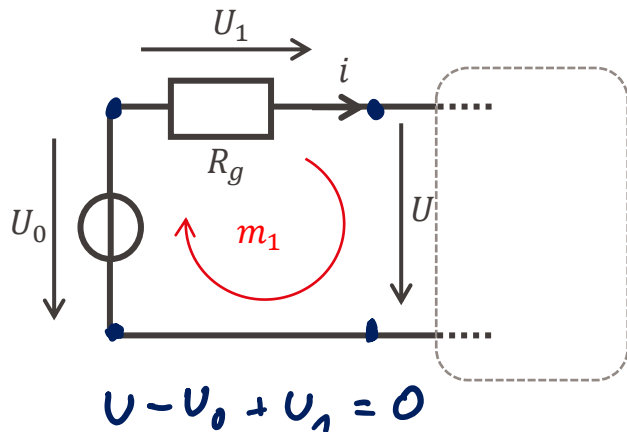
Exemple:

Loi des mailles dans  $m_1$ :

$$+U_3 + 10 + 7 - 5 = 0$$

$$\Rightarrow U_3 = -12 \text{ V}$$

- Exemple: source de tension réelle
  - Une source idéale délivre une tension indépendante du courant et du reste du circuit
  - Une source réelle délivre une tension dépendante du courant à cause d'une résistance interne: trouvons sa courbe caractéristique



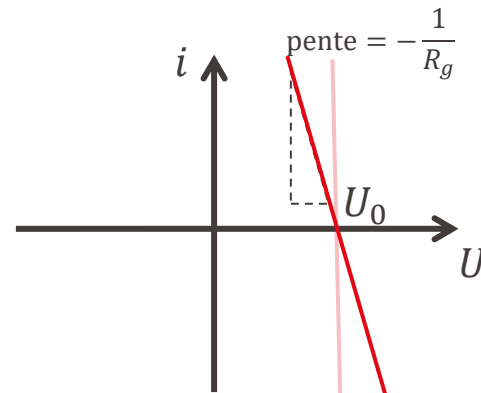
Loi des mailles:  $U_0 = U_1 + U$

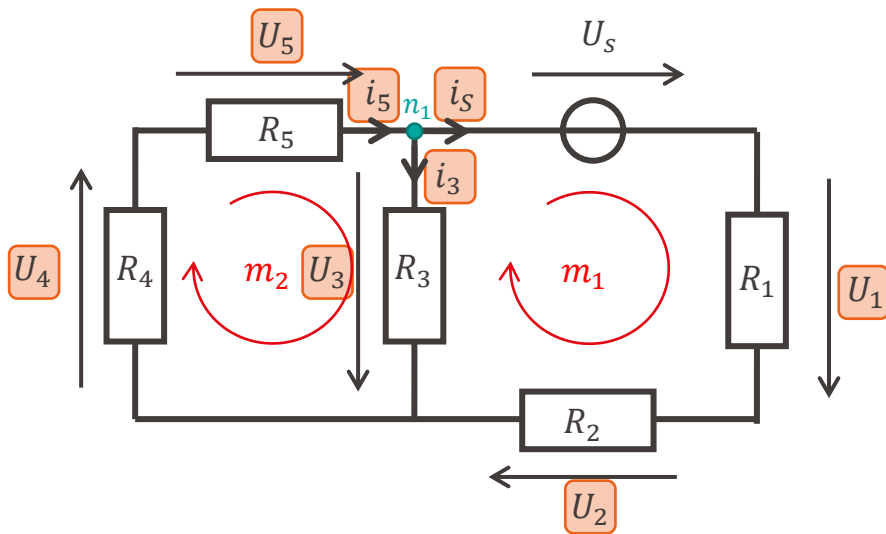
Loi d'Ohm:  $U_1 = R_g \cdot i$

$$\Rightarrow U_0 = R_g \cdot i + U$$

$$\Rightarrow U = U_0 - R_g \cdot i$$

$$\Rightarrow i = \frac{U_0 - U}{R_g}$$





Loi des mailles en  $m_1$ :  

$$U_s + U_1 + U_2 - U_3 = 0$$

Loi des mailles en  $m_2$ :  

$$U_5 + U_3 + U_4 = 0$$

Loi des nœuds en  $n_1$ :  

$$i_5 = i_s + i_3$$

Loi d'Ohm:

$$U_1 = R_1 i_s$$

$$U_2 = R_2 i_s$$

$$U_3 = R_3 i_3$$

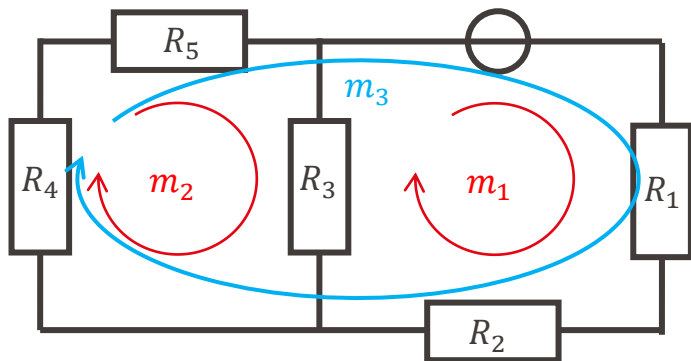
$$U_4 = R_4 i_5$$

$$U_5 = R_5 i_5$$

Le problème est-il bien défini?

**8 inconnues**  
**8 équations**





Notion de mailles indépendantes:

Une maille peut en contenir d'autres. On parle de mailles indépendantes lorsque l'on définit des mailles qui ne contiennent pas les autres déjà mises en équations.

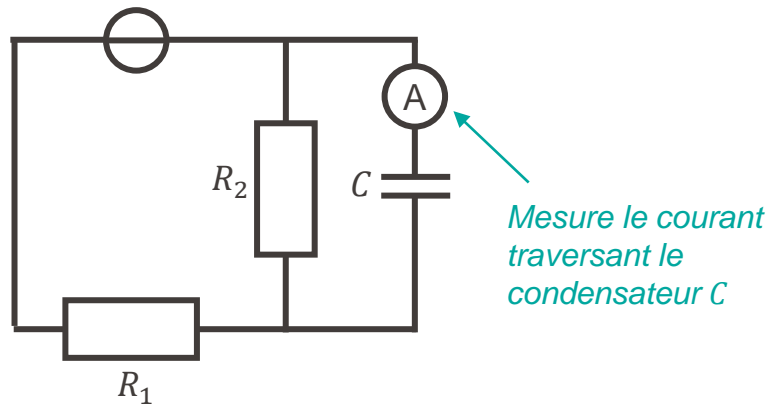
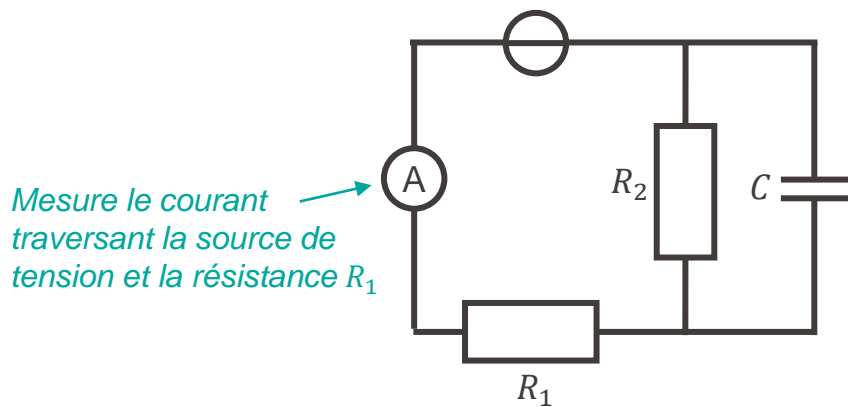
Possible systèmes d'équations:

$$m_1, m_2$$

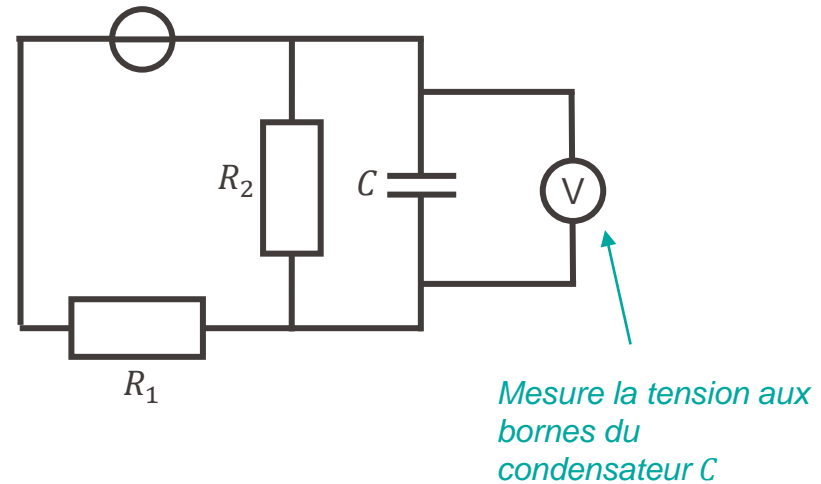
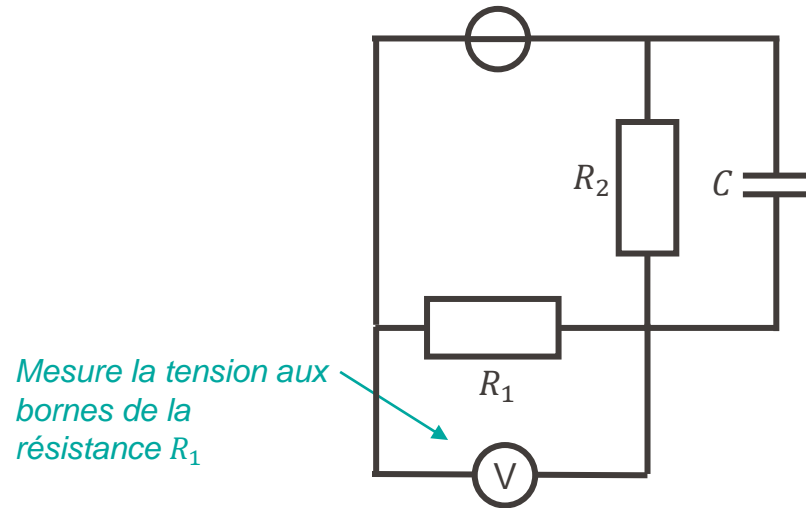
$$m_1, m_3$$

$$m_2, m_3$$

- L'ampèremètre mesure le courant: il se branche en série avec l'élément étudié



- Le voltmètre mesure la tension: il se branche en parallèle avec l'élément étudié



- Les lois de Kirchhoff complètent la définition mathématique du problème
- Deux lois sont formulées:
  - Loi des nœuds
  - Loi des mailles
- Il est important de faire un schéma clair pour ne pas s'emmêler les pinceaux!

$N$  branches

$$\sum_{k=1}^N i_k = 0$$

Courant dans la  
branche  $k$

$N$  dipôles dans la  
maille

$$\sum_{k=1}^N U_k = 0$$

Tension aux bornes  
du dipôle  $k$

# Pour aller plus loin



- La résistance dépend de divers paramètres
  
- La température joue un rôle important
  - À fort courant, le matériau chauffe par effet Joule et la résistance peut alors varier
  
- La fréquence des signaux est déterminante
  - En courant alternatif, la fréquence des oscillations modifie la façon dont les charges se répartissent: effet de peau. La résistance apparente est alors différente

