



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

EE 106 – Sciences et  
technologies de  
l'électricité  
Automne 2024

R. Dufy, Musée d'art moderne, Paris

- 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



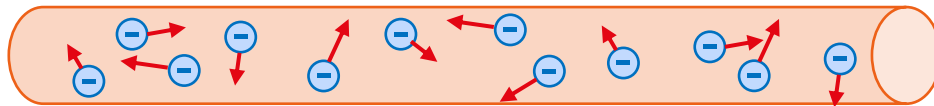


| Symbole                                                                           | Signification | Grandeur | Unité            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------|------------------|
|  | Résistance    | $R$      | Ohm ( $\Omega$ ) |

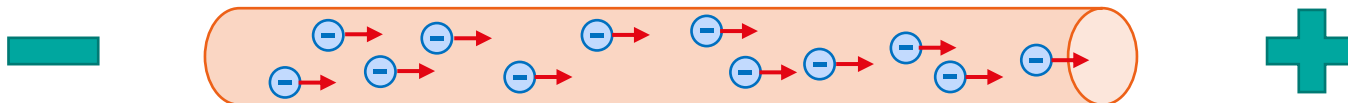
- Composant de base des circuits
- Objectif: déterminer la relation entre tension ( $U$ ) et courant ( $I$ )

- 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)

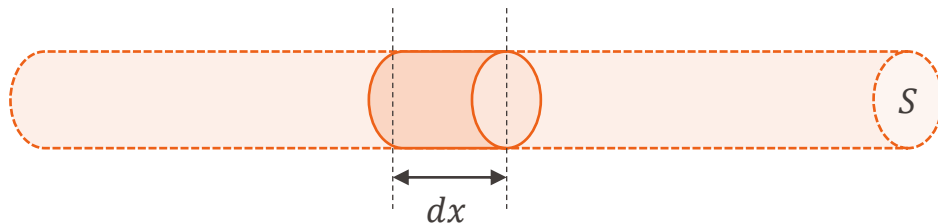


- On applique une tension aux bornes d'un composant conducteur
  - Les charges électriques se mettent en mouvement sous l'action de la force électrostatique
  - Les charges ne vont pas à une vitesse infinie! Des frottements (collisions) freinent le déplacement des électrons et imposent une vitesse limite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



# Résistance électrique

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



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

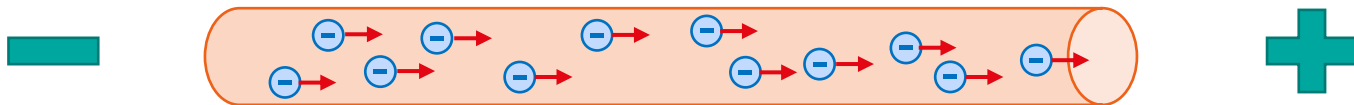
- Donc:  $I = neS \cdot \frac{dx}{dt} = neS \cdot v_d$

Concentration  
d'électrons libres  
( $\text{m}^{-3}$ )

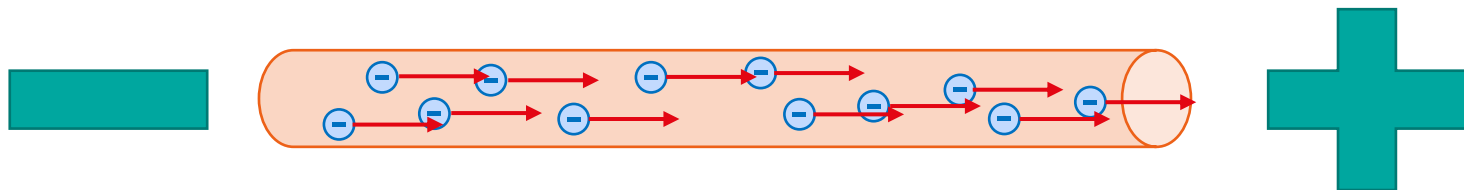


- Vitesse de dérive:  $v_d = \frac{I}{neS}$

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

- 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:  $U = RI$



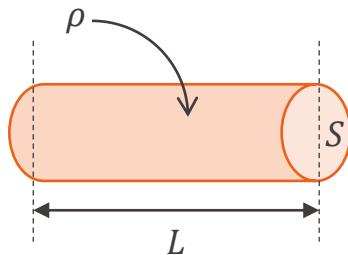
Canton Uri

- $R$  est la résistance (unité: ohm,  $\Omega$ )



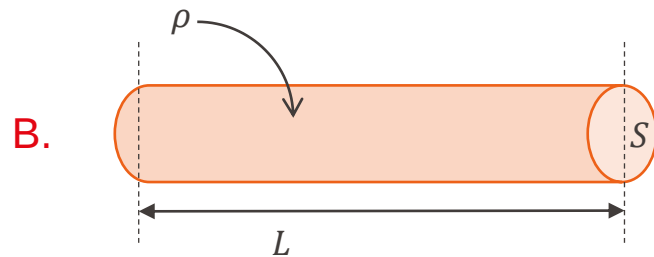
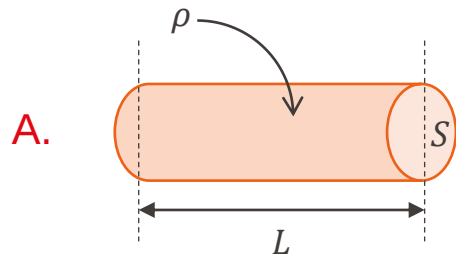
Georg Ohm  
1789-1854  
Physicien allemand

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



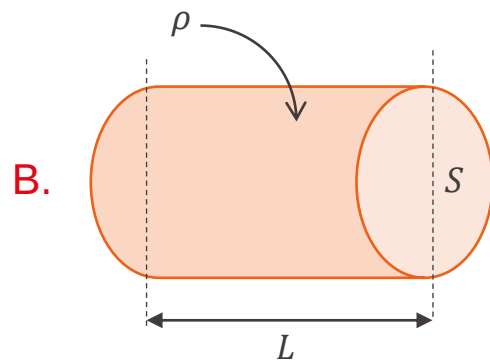
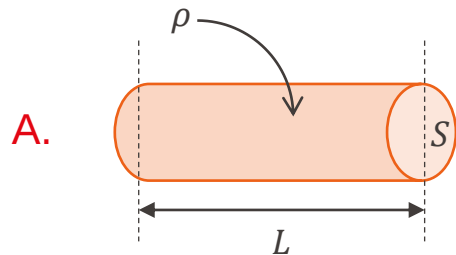


# Quelle structure a la plus grande résistance?





# Quelle structure a la plus grande résistance?



- Longueur plus élevée: plus d'exposition aux frottements, donc résistance plus grande
- Section plus élevée: plus de charges peuvent passer, donc résistance plus petite

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

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

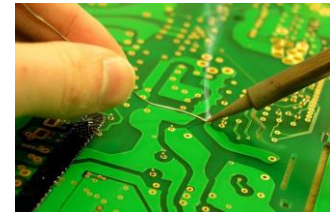
$$R = \frac{\rho L}{S}$$



shutterstock.com - 1968360943



| Métal  | Résistivité ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) |
|--------|-----------------------------------------|
| 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,  $R = +\infty \, \Omega$

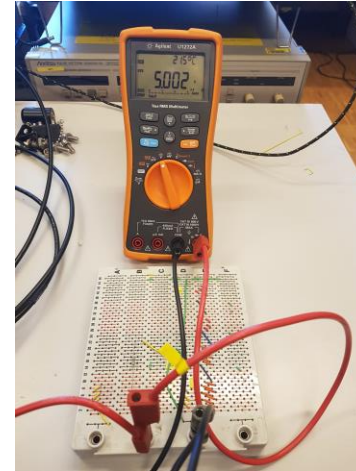
- On définit aussi la conductance
  - Il s'agit de l'inverse de la résistance

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

Unité: siemens (S ou  $\Omega^{-1}$ )

- Loi d'Ohm:  $I = GU$

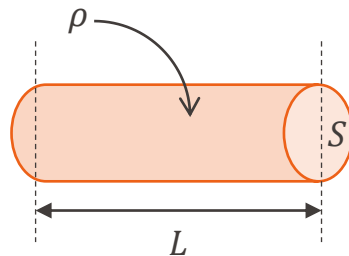
- On peut calculer une résistance en mesurant tension et courant à l'aide d'un voltmètre et d'un ampèremètre.
- On peut utiliser un ohmmètre.



- 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

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

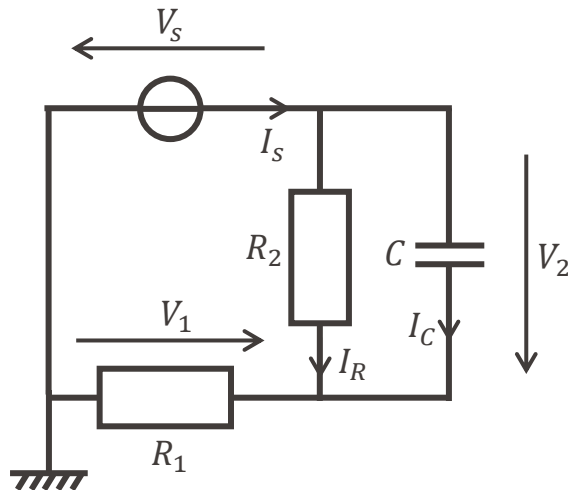
$$U = RI$$



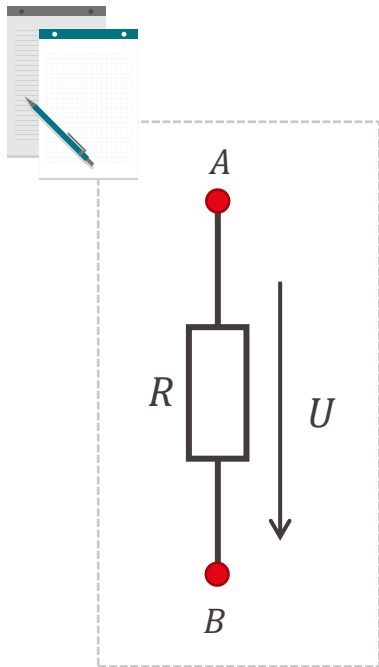
# Conventions graphiques



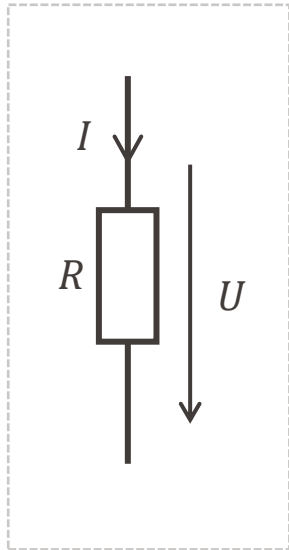
- On représente courants et tensions par des flèches



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

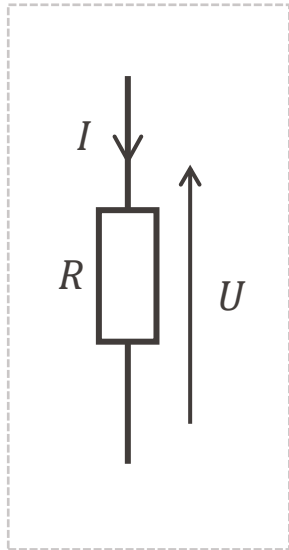


- $U = V(A) - V(B)$

 $\Rightarrow$ 

$$U = RI$$

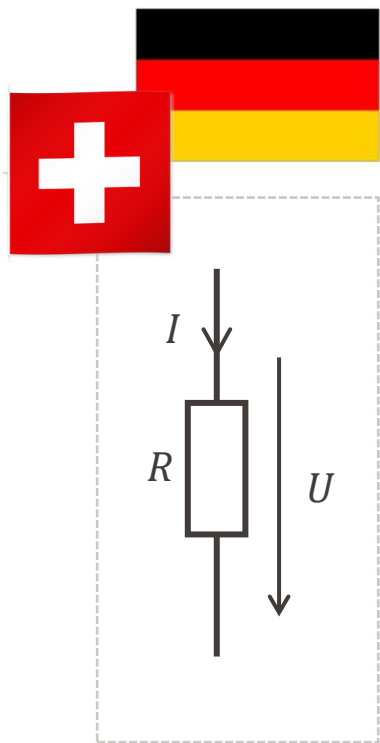
- Courant et tension fléchés dans le même sens: pas de changement dans la formule

 $\Rightarrow$ 

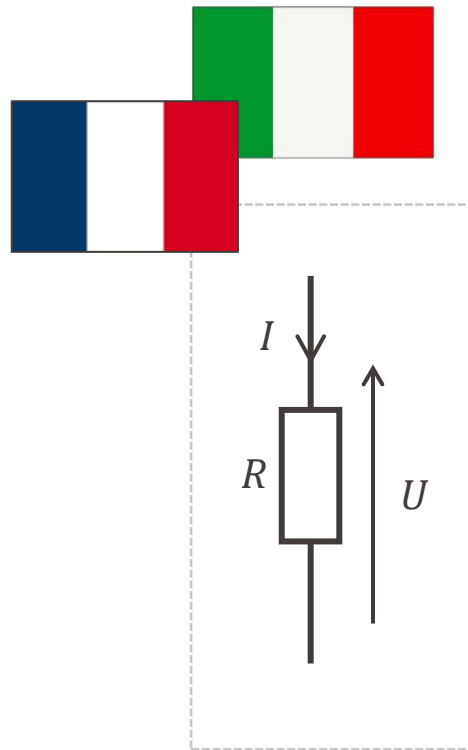
$$U = -RI$$

- 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

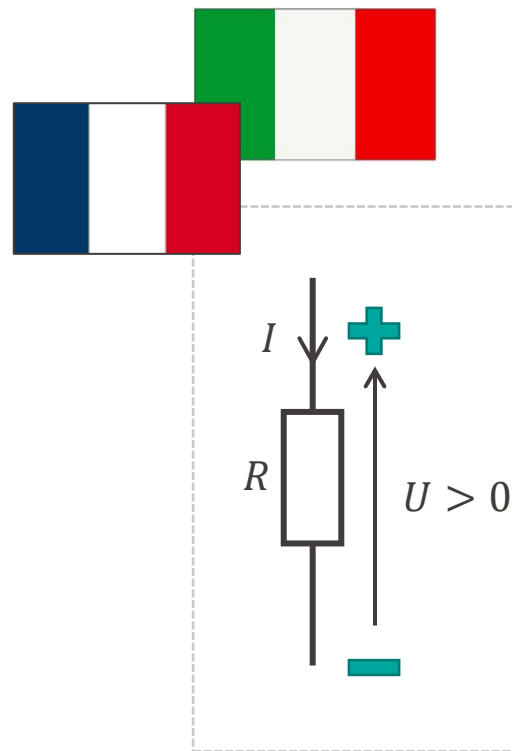
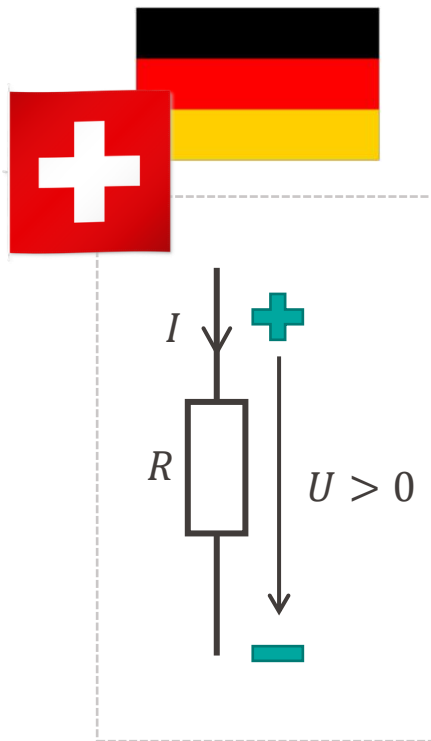


$$U = RI$$

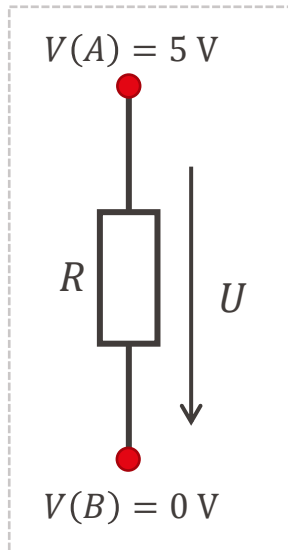


$$U = RI$$

# Conventions graphiques



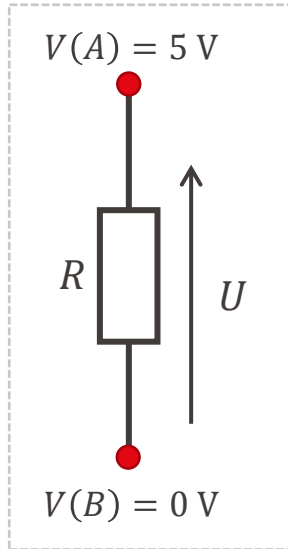
# Que vaut la tension $U$ ?



A.  $U = 5\text{ V}$

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

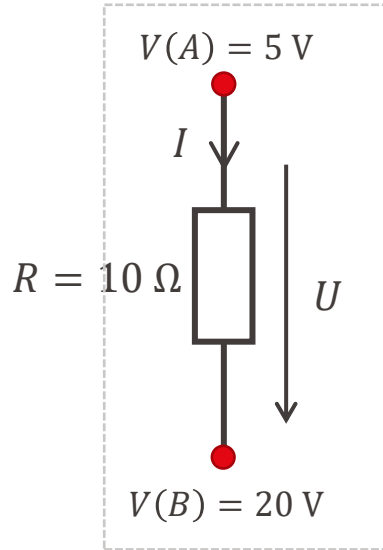
# Que vaut la tension $U$ ?



A.  $U = 5\text{ V}$

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

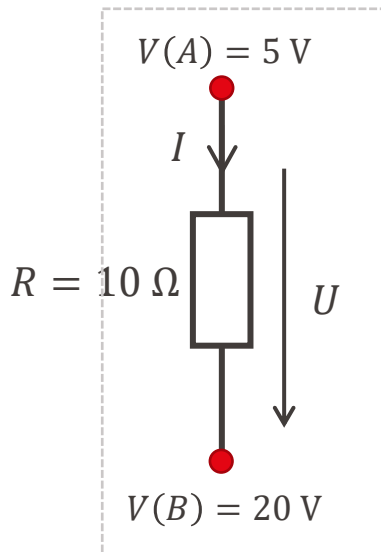
# Que vaut le courant $I$ ?

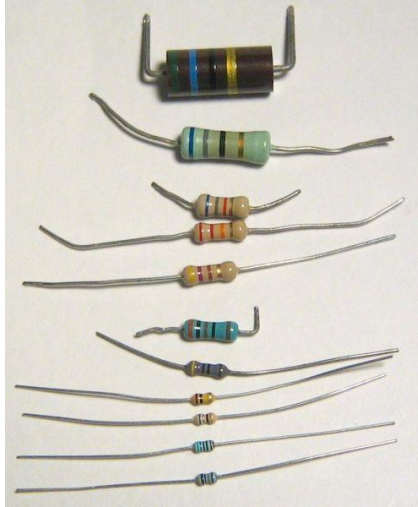


A.  $I = -1.5 \text{ A}$

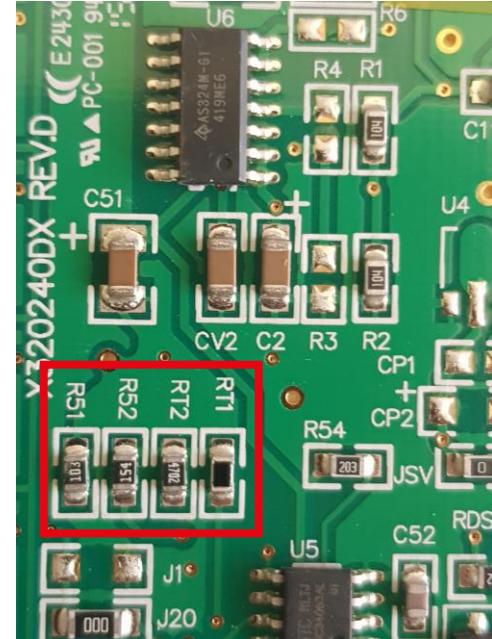
B.  $I = 1.5 \text{ A}$

# Que vaut le courant $I$ ?

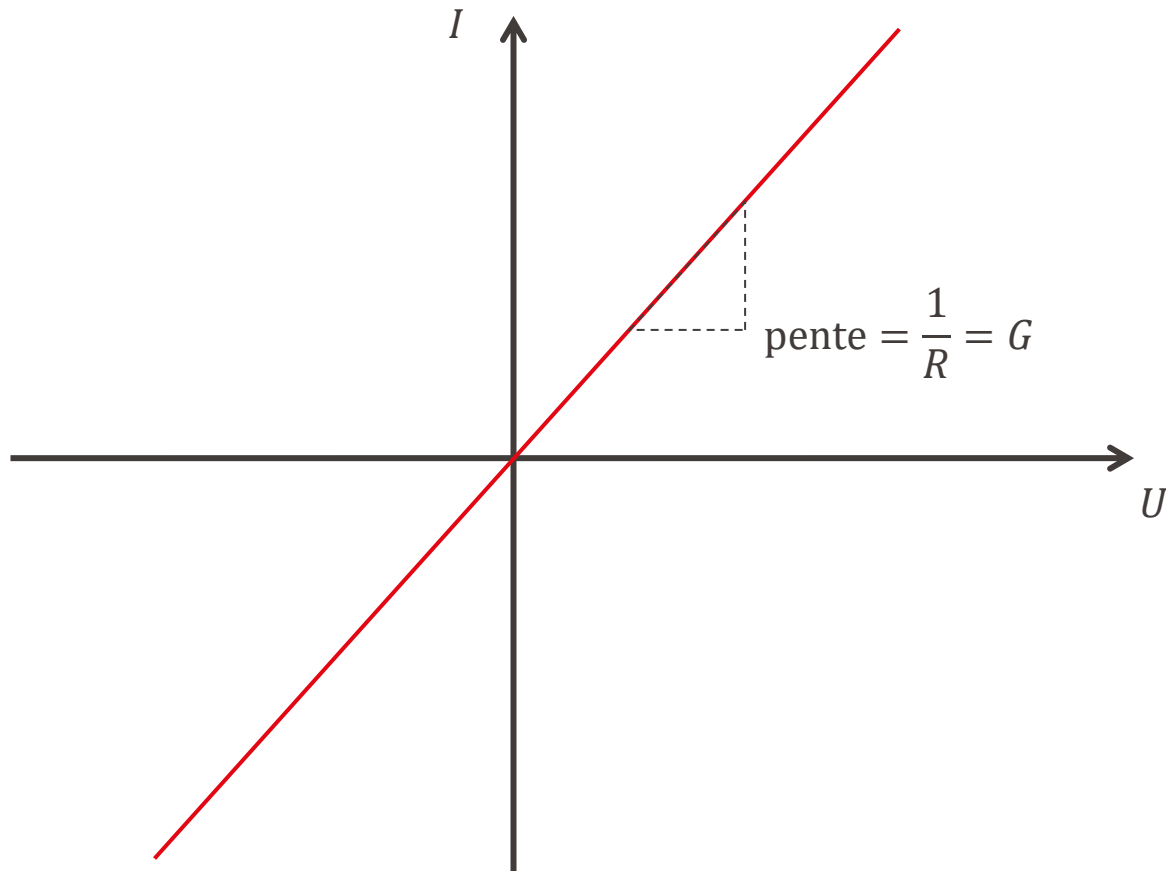




|        | 1er<br>chiffre | 2ème<br>chiffre | 3ème<br>chiffre | Multi | Tolérance |
|--------|----------------|-----------------|-----------------|-------|-----------|
| Noir   | 0              | 0               | 0               | x1    |           |
| Marron | 1              | 1               | 1 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

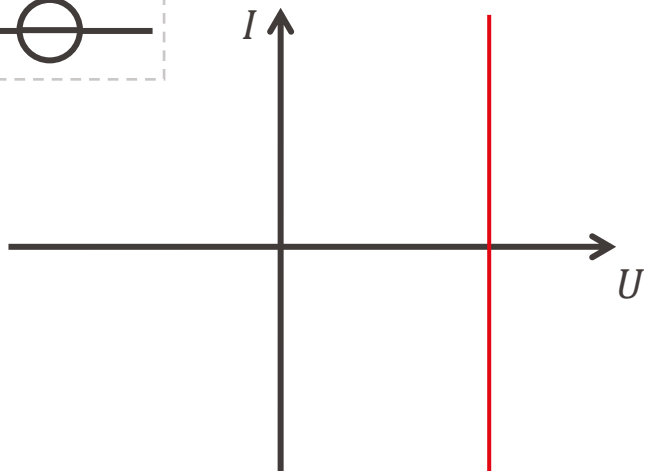


# Courbe caractéristique

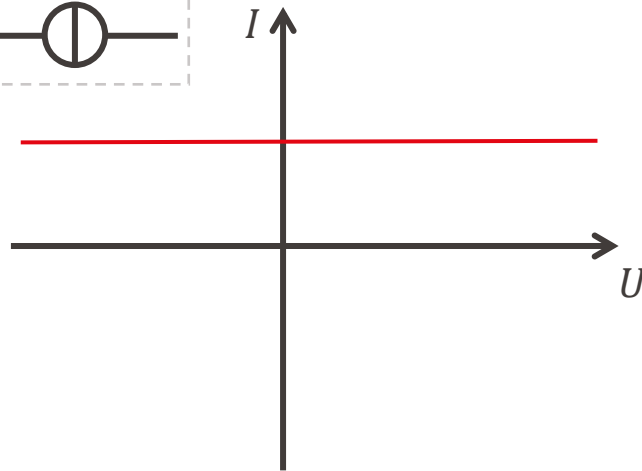


- Sources de tension idéales: fournissent une tension fixée par l'utilisateur
- Sources de courant idéales: fournissent un courant fixé par l'utilisateur

Source de tension



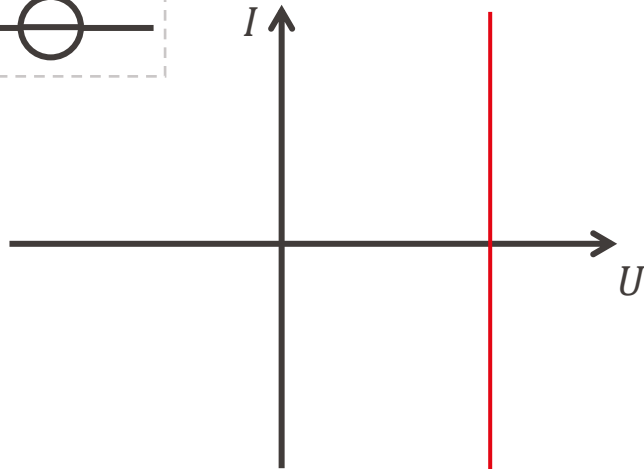
Source de courant



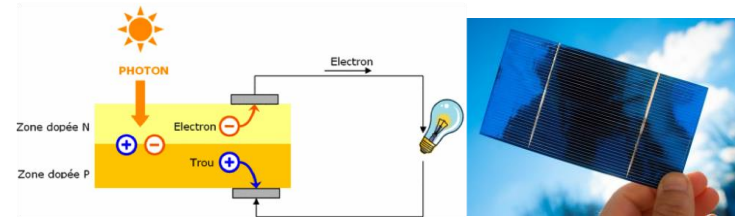
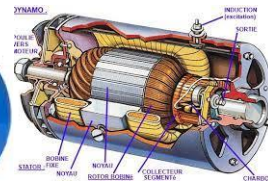
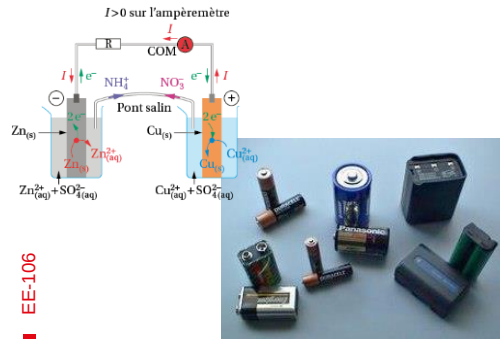


- Sources de tension idéales: fournissent une tension fixée par l'utilisateur
- Sources de courant idéales: fournissent un courant fixé par l'utilisateur

Source de tension

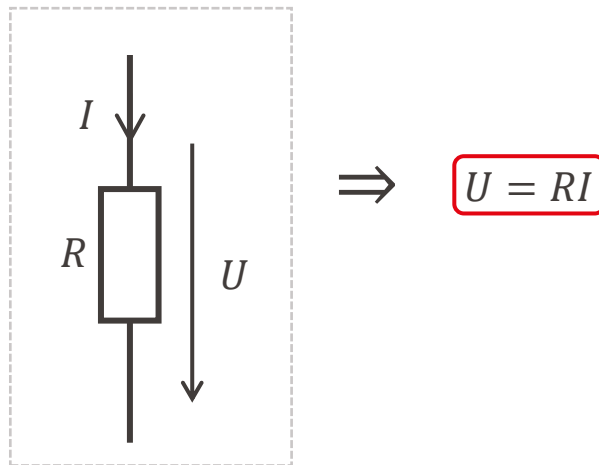


- Pile électrique (énergie chimique → énergie électrique)
- Alternateur (énergie mécanique → énergie électrique)
- Cellule photovoltaïque (énergie lumineuse → énergie électrique)



# 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

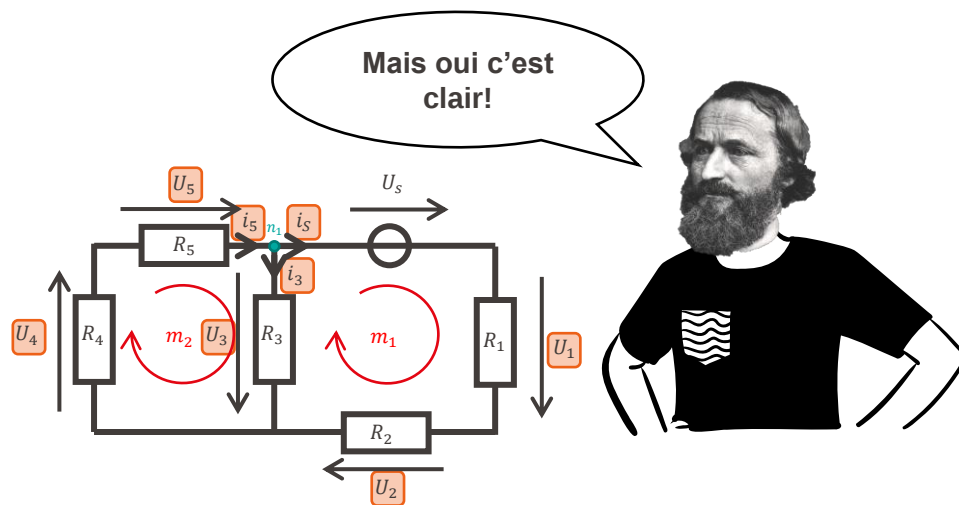




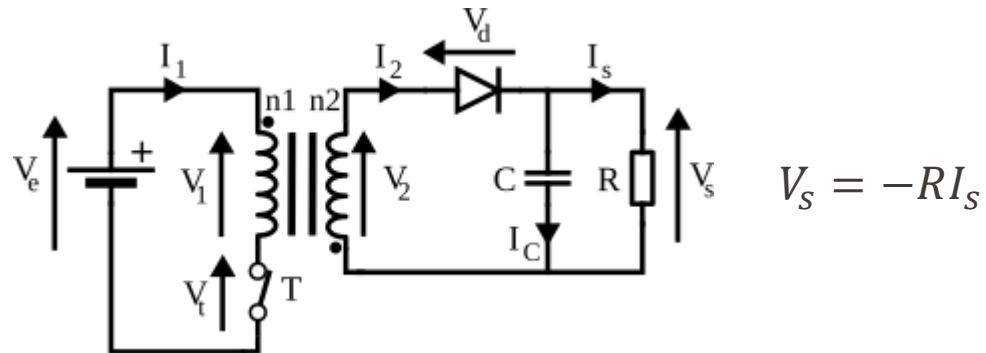
# Est-ce que ça va trop vite?

- A. Oui
- B. Non

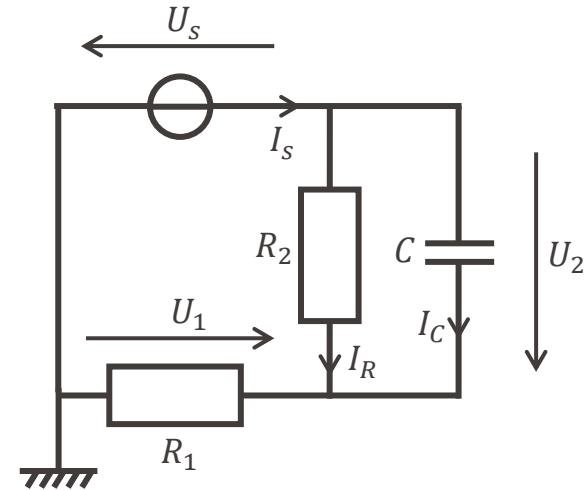
# Les lois de Kirchhoff



- 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

- Un dipôle électrique a deux bornes

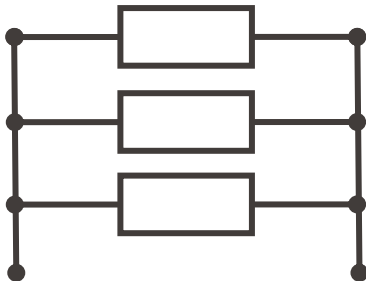


- Connexion en série: les éléments sont connectés les uns à la suite des autres

*Les éléments sont parcourus par le même courant*

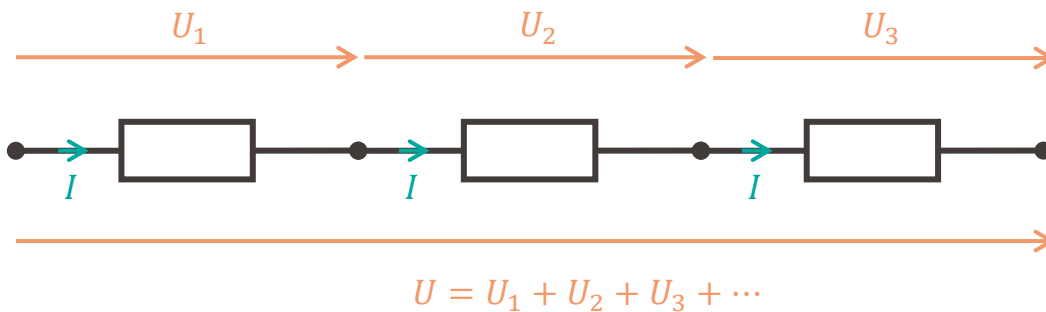


- Connexion en parallèle: les éléments sont connectés aux mêmes bornes

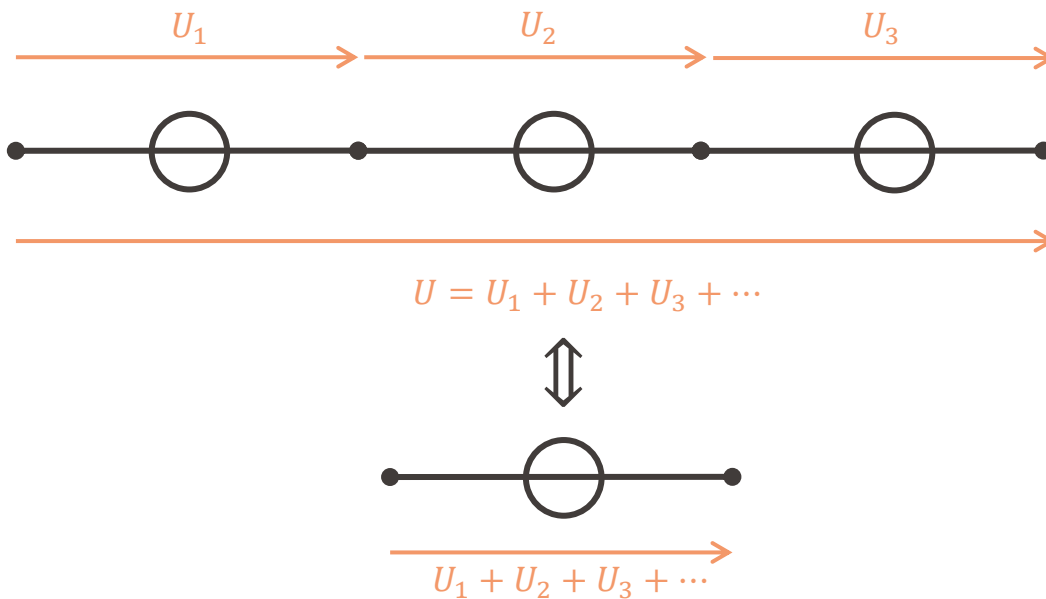


*Les éléments partagent la même tension à leurs bornes*

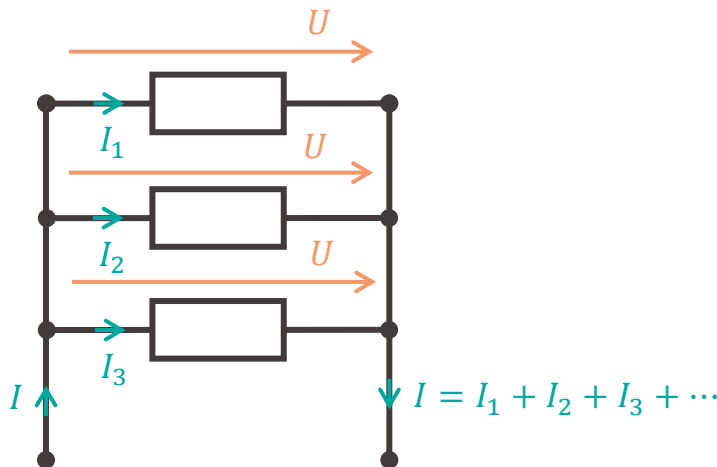
- Connexion en série: les éléments sont connectés les uns à la suite des autres
  - Le courant est le même dans chaque élément (pas de courant sortant)
  - La tension totale est la somme des tensions individuelles



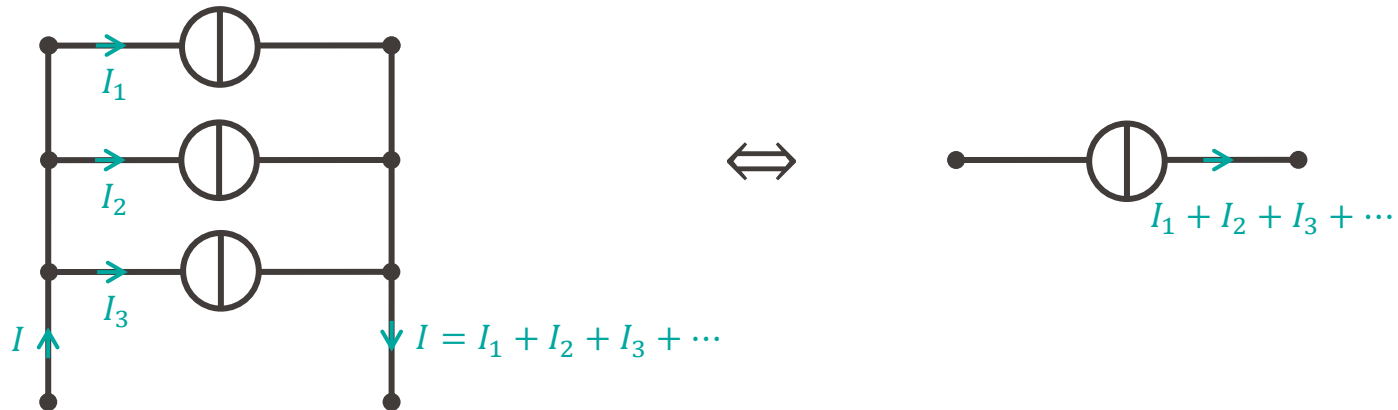
- Connexion en série: les éléments sont connectés les uns à la suite des autres
  - Le courant est le même dans chaque élément (pas de courant sortant)
  - La tension totale est la somme des tensions individuelles



- 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)



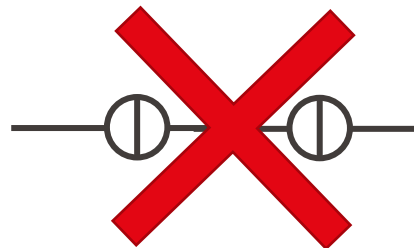


- Sources de tension idéales: fournissent une tension fixée par l'utilisateur
  - On ne branche jamais deux sources de tension en parallèle
- Sources de courant idéales: fournissent un courant fixé par l'utilisateur
  - On ne branche jamais deux sources de courant en série

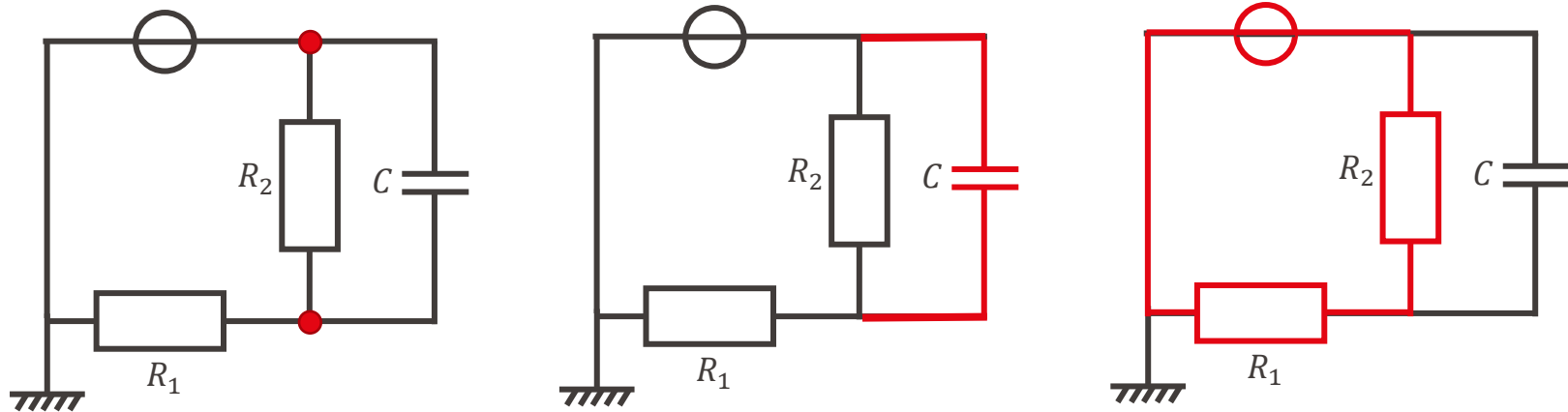




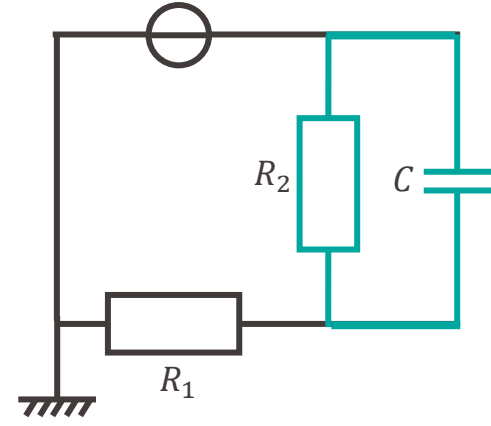
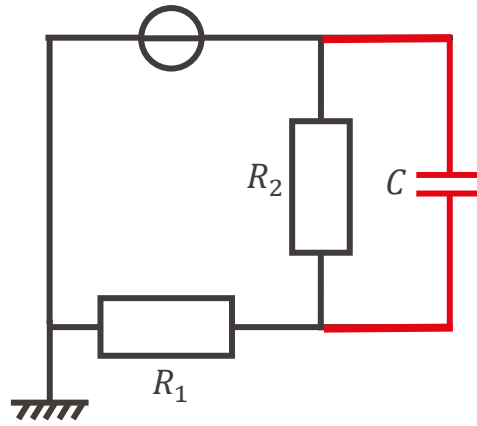
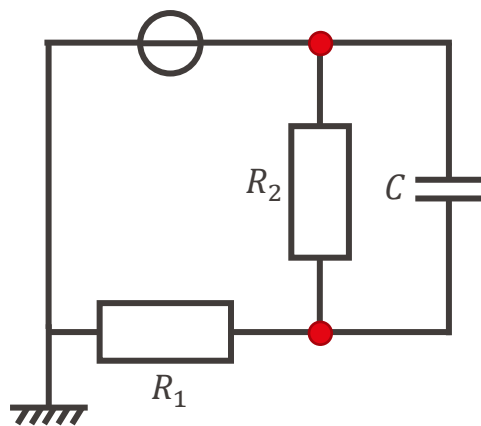
- Sources de tension idéales: fournissent une tension fixée par l'utilisateur
  - On ne branche jamais deux sources de tension en parallèle
- Sources de courant idéales: fournissent un courant fixé par l'utilisateur
  - On ne branche jamais deux sources de courant en série



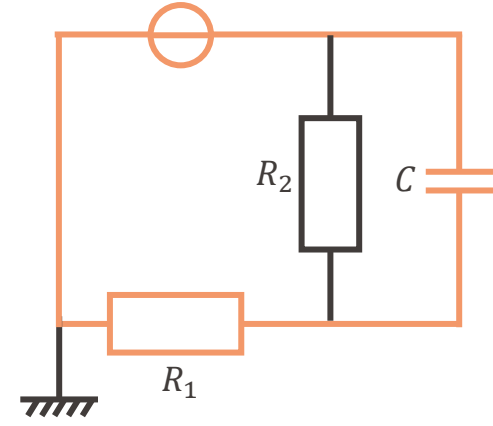
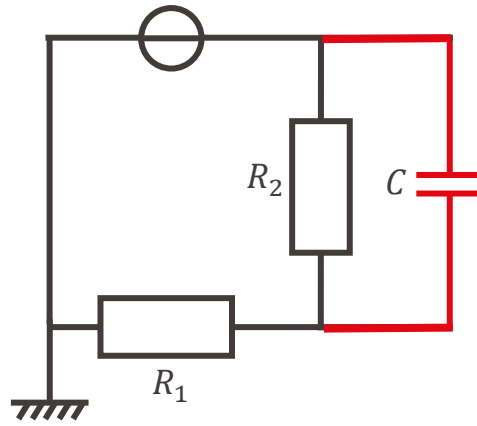
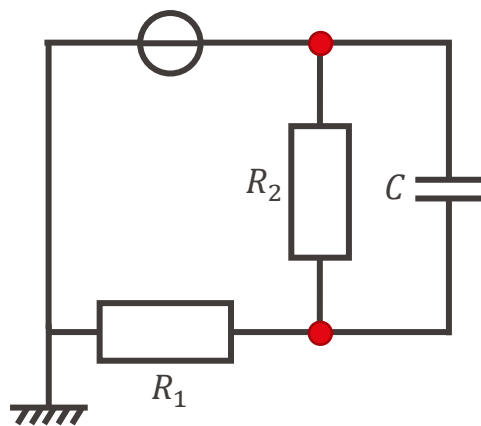
- **Nœud**: point de connexion de 3 conducteurs ou plus
- **Branche**: ensemble d'éléments situés entre deux nœuds
- **Maille**: boucle d'éléments partant d'un nœud pour y revenir



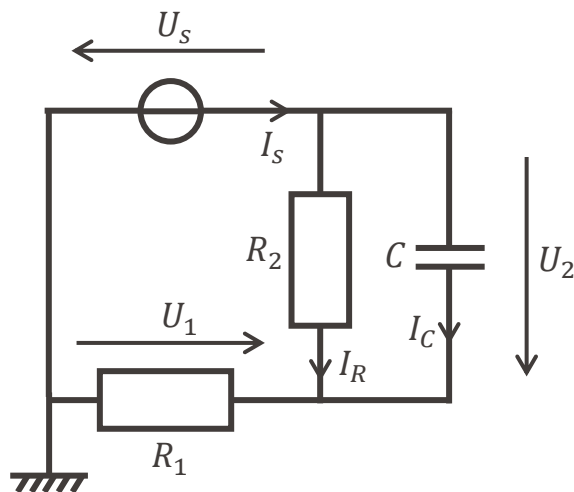
- **Nœud**: point de connexion de 3 conducteurs ou plus
- **Branche**: ensemble d'éléments situés entre deux nœuds
- **Maille**: boucle d'éléments partant d'un nœud pour y revenir



- **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

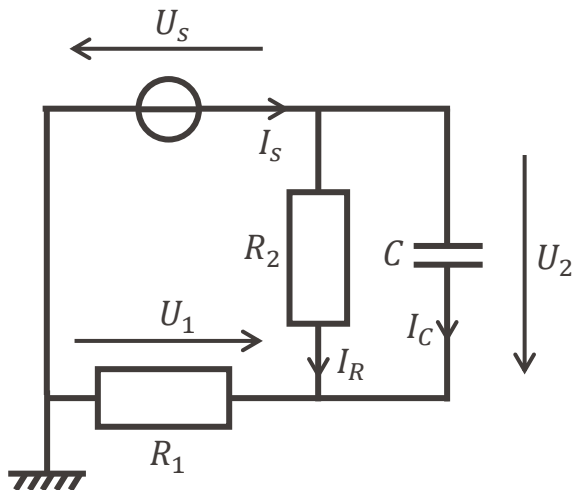


- Une fois le schéma dessiné, on place les grandeurs à étudier (courants, tensions)
  - Les courants sont fléchés sur les conducteurs
  - Les tensions sont fléchées à-côté des dipôles
- Les grandeurs n'étant pas forcément connues, le sens des flèches est au choix
  - Attention aux conventions de sens!



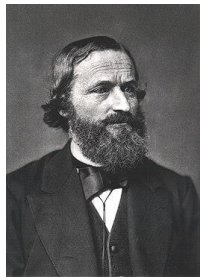


- Mise en équation: on a déjà vu la loi d'Ohm qui lie courant et tension pour une résistance
  - Ce n'est pas suffisant!



- 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  $k$

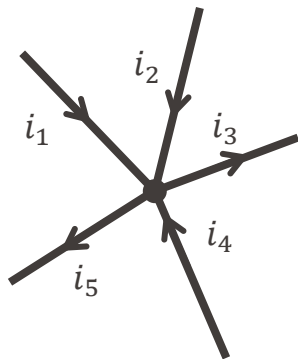
La somme des courants passants par un nœud est nulle.

$N$  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 (-)



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

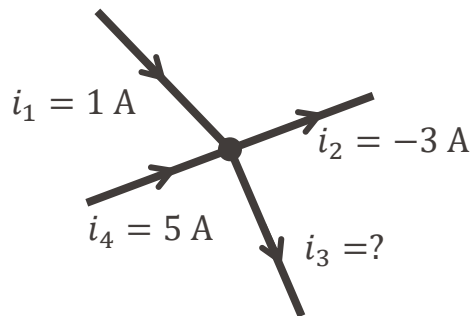
« Vers » le nœud « Hors » du nœud

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

Courant entrant Courant sortant

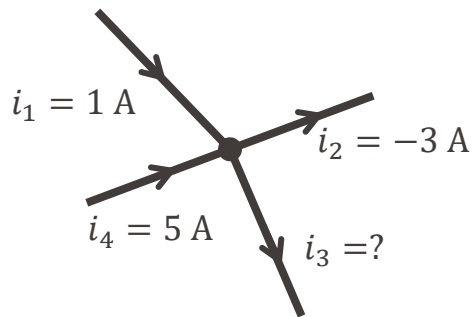


# Que vaut le courant $i_3$ ?

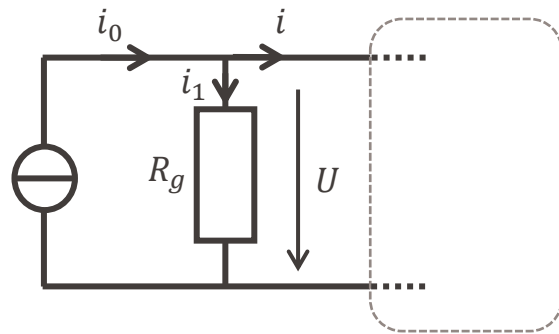


- A.  $i_3 = -9 \text{ A}$
- B.  $i_3 = 3 \text{ A}$
- C.  $i_3 = -3 \text{ A}$
- D.  $i_3 = 9 \text{ A}$

# Que vaut le courant $i_3$ ?



- 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

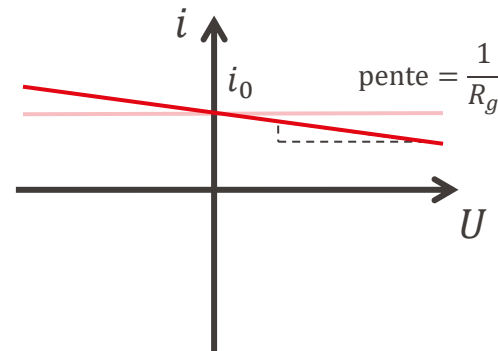


Loi des nœuds:  $i_0 = i_1 + i$

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  $k$

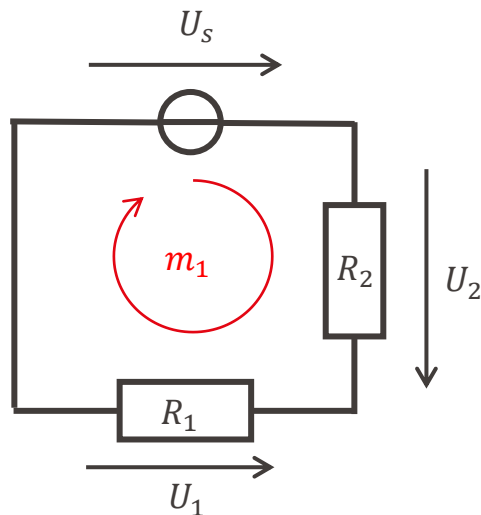
La somme des tensions le long d'une maille est nulle.

$N$  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  $m_1$ :

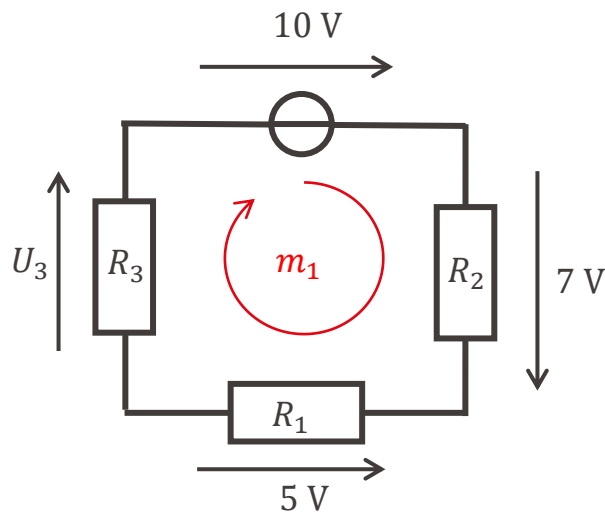
$$U_s + U_2 - U_1 = 0$$

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:

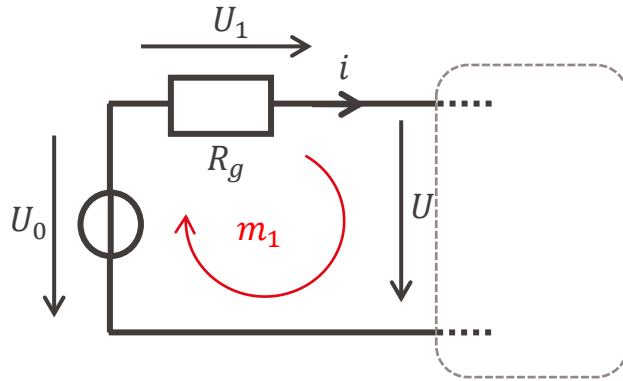


Loi des mailles dans  $m_1$ :

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

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

- 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



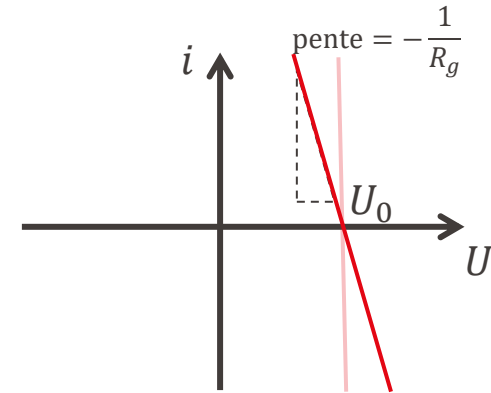
$$\text{Loi des mailles: } U_0 = U_1 + U$$

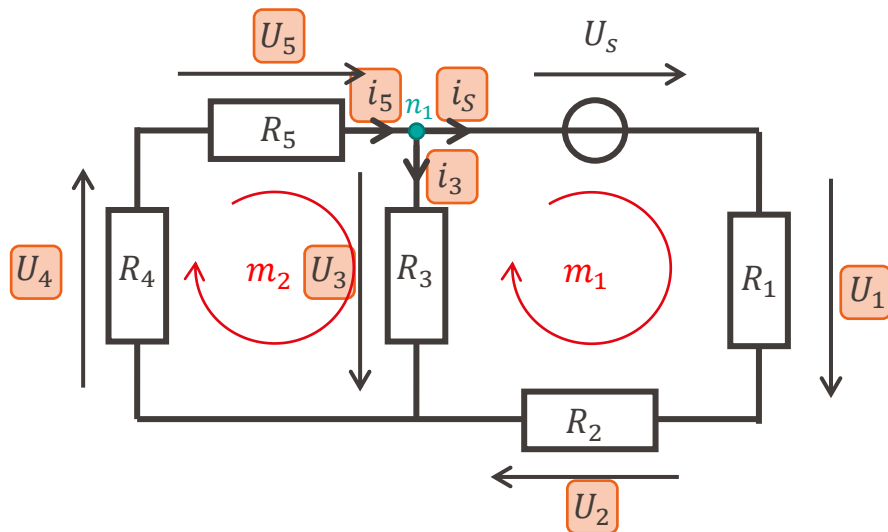
$$\text{Loi d'Ohm: } U_1 = R_g \cdot i$$

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

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

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





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:

$$U_1 = R_1 i_s$$

$$U_2 = R_2 i_s$$

$$U_3 = R_3 i_3$$

$$U_4 = R_4 i_5$$

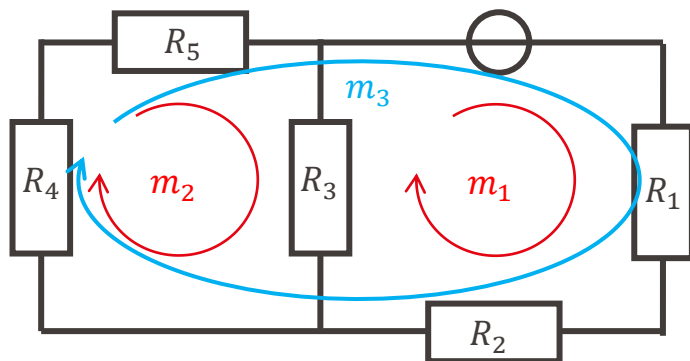
$$U_5 = R_5 i_5$$

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.

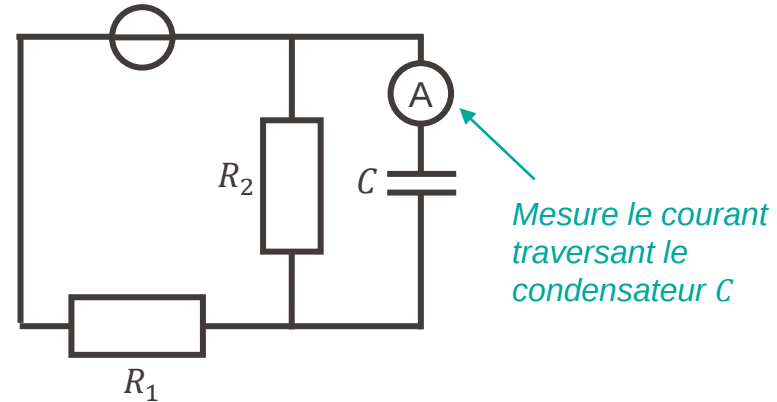
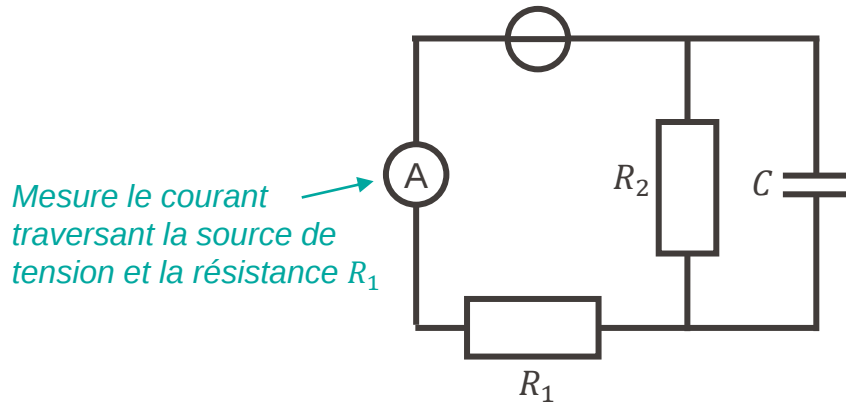
Possible systèmes d'équations:

$m_1, m_2$

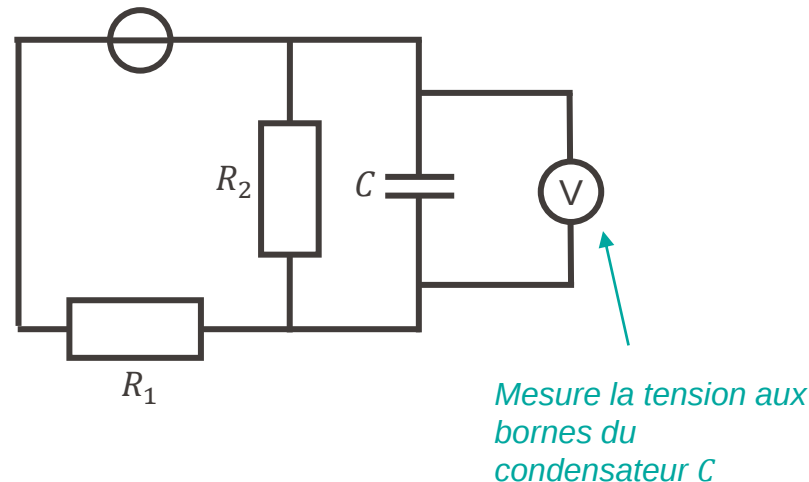
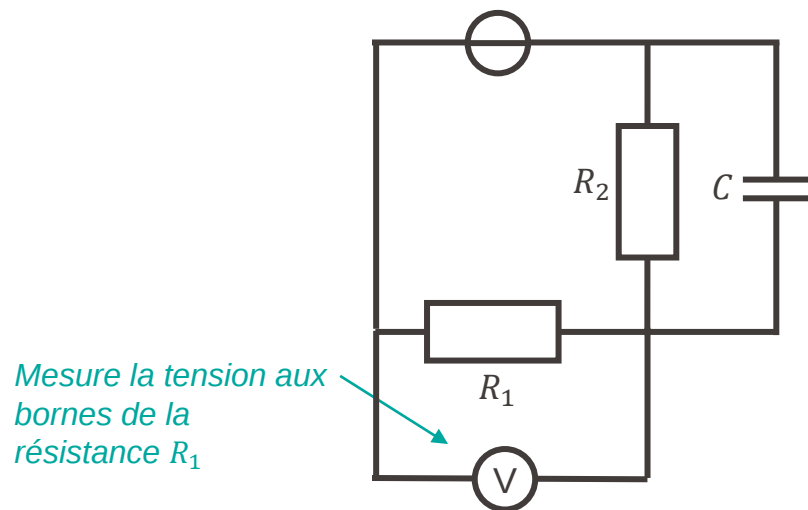
$m_1, m_3$

$m_2, m_3$

- 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  $k$



- 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

R. Dufy, « La fée électricité »  
Musée d'art moderne, Paris

