

**Licence « Sciences pour l'ingénieur »**

**DS 2.3 - Énergétique et circuits électriques**

**Franco FERRUCCI**  
franco.ferrucci@upf.pf

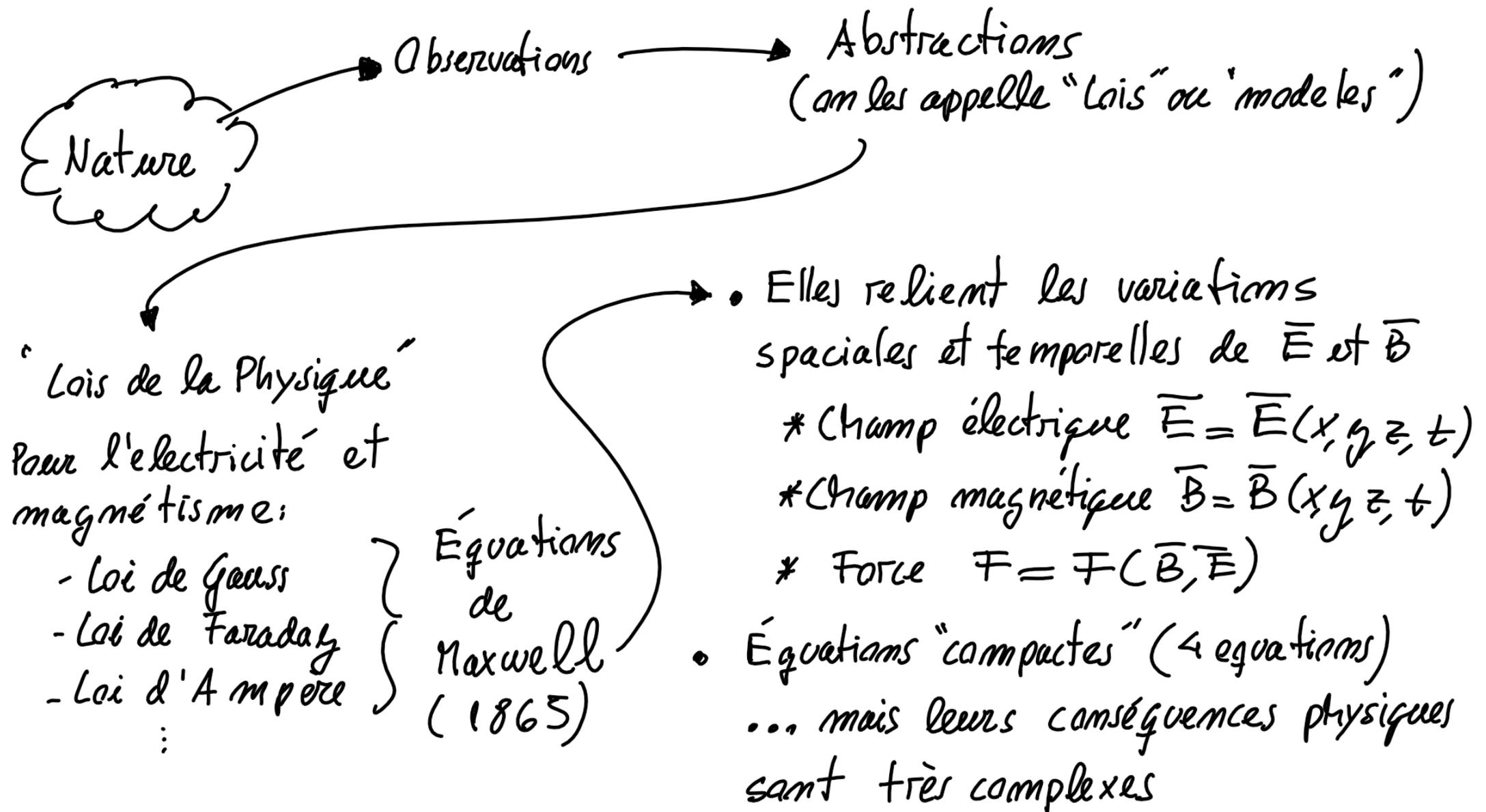
# Contenu

- Abstractions dans le domaine de l'électricité
- Charge, courant et différence de potentiel
- De Maxwell à Kirchhoff
  - Loi de Kirchhoff des Courants – LKC (Loi des nœuds)
  - Loi de Kirchhoff des Tensions – LKT (Loi des mailles)
- Conventions
  - Sens du courant
  - Sens de référence de la tension
- Puissance et énergie électrique
- Rappel des Unités



# *Abstractions*

# Abstractions



Forme différentielle	Forme intégrale	Nom courant
$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$	Loi de Gauss pour l'électricité
$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	Loi de Gauss pour le magnétisme
$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$	Loi de Faraday de l'induction
$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \mathbf{J}$	$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \Phi_E}{\partial t} + \mu_0 i$	Loi d'Ampère (étendue)
$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$	$\oint \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{\partial q}{\partial t}$	Équation de continuité

MS  
de "Lois" ou "modèles")

## Les équations de Maxwell en formes différentielles et intégrales

Pour l'électricité et magnétisme:

- Loi de Gauss
- Loi de Faraday
- Loi d'Ampère
- ⋮

Équations  
de  
Maxwell  
(1865)

Symbole	Nom	Unité SI
$\mathbf{E}$	Champ électrique	Volt par mètre (V/m)
$\mathbf{B}$	Champ magnétique (induction)	Tesla (T) = Wb/m <sup>2</sup>
$\mathbf{J}$	Densité de courant électrique	Ampère par mètre carré (A/m <sup>2</sup> )
$\rho$	Densité volumique de charge électrique	Coulomb par mètre cube (C/m <sup>3</sup> )
$q$	Charge électrique	Coulomb (C)
$i$	Courant électrique	Ampère (A)
$\Phi_B$	Flux magnétique	Weber (Wb) = V·s
$\Phi_E$	Flux électrique	Volt-mètre (V·m)
$\epsilon_0$	Permittivité du vide	Farad par mètre (F/m)
$\mu_0$	Perméabilité magnétique du vide	Henry par mètre (H/m)
$\nabla$	Opérateur nabla (différentiel)	Dépend du contexte (1/m)
$d\mathbf{S}$	Élément de surface orienté	Mètre carré (m <sup>2</sup> )
$d\mathbf{l}$	Élément de ligne	Mètre (m)
$t$	Temps	Seconde (s)

# Abstractions

## Abstractions:

Éq. de Maxwell  
 $\vec{E}, \vec{B}, \vec{F}(\vec{E}, \vec{B})$   
↓  
mouvement!

DS 2.5b  
Électrostatique

DS 3.3  
Électromagnétisme

Circuits à  
paramètres  
concentrés

—  $R$  —

—  $L$  —

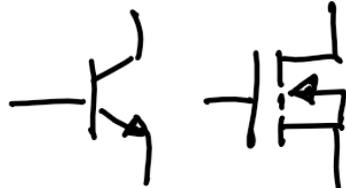
—  $C$  —

—  $\beta$  —

Lois de Kirchhoff  
Loi d'Ohm

DS 2.3  
Électricité

Amplificateurs



(transistors)

DS 3.2  
Électronique

Abstraction  
numérique  
("digital")

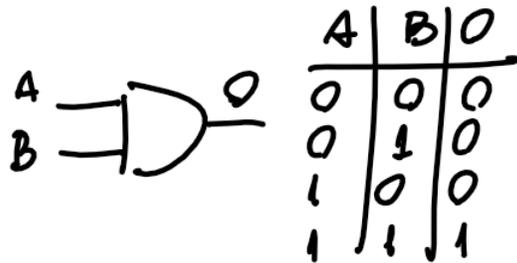
Abstraction  
analogique

→  
Nous construisons des choses avec un comportement interne de plus en plus complexe, mais qui sont très simples à décrire

# Abstraction numérique

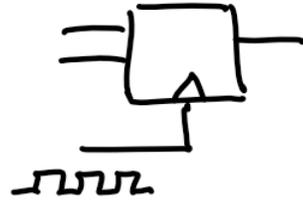
## Abstraction "numérique"

Portes logiques

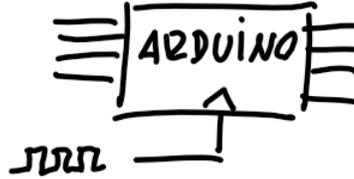


On ne pense plus en termes de tensions (Volt), mais en niveaux logiques 0 ou 1.

Temps ("clock")



Contrôleurs (instructions)



- Intel
- ARM
- Apple A18
- ⋮

Langages de programmation

- C, C++
- Java
- Python
- Julia
- ⋮

Systèmes opératifs

- Linux
- Mac OS
- Windows
- ⋮

DS 4.5  
Électronique numérique

TS 1.7  
Programmation impérative

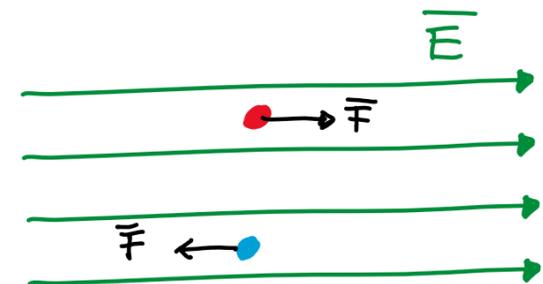
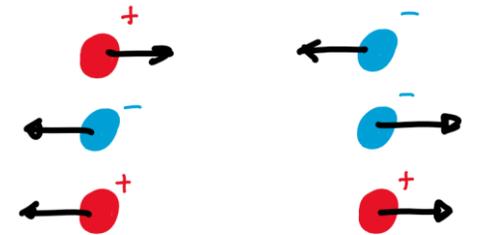


*Charge, courant et  
différence de potentiel*

# Charge, courant et potentiel électrique

## Charge électrique :

- La charge électrique est une **propriété fondamentale de la matière**, découverte à travers des expériences comme le frottement.
- Deux types : **Positive** et **Négative**.
  - Niveau subatomique : **protons** (positifs), **électrons** (négatifs).
  - Niveau moléculaire : **cations** (ions positifs) et **anions** (ions négatifs) (ex. :  $\text{Li}^+$  dans une batterie Li-ion)
- Règle : Charges opposées s'attirent, même signe se repoussent.
- Unité SI: **Coulomb (C)**. Il existe aussi l'**Ampère-heure (Ah)**
- La charge n'est pas continue, elle est **quantifiée**.
  - Charge élémentaire  $q_e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$  (c'est une **définition!**)
- Modèle d'interaction à distance : **le champ électrique**
  - Une charge produit un champ électrique qui interagit avec une autre charge et génère une force.



# Charge, courant et potentiel électrique

## Charge électrique :

- La charge é...
- Deux types :
  - Niveau s...
  - Niveau n... (ex. : Li+)
- Règle : Char...
- Unité SI: Co...
- La charge n...
  - Charge é...
- Modèle d'int...
  - Une char... avec une autre charge et génère une force.

## Expérience de la goutte d'huile de Millikan

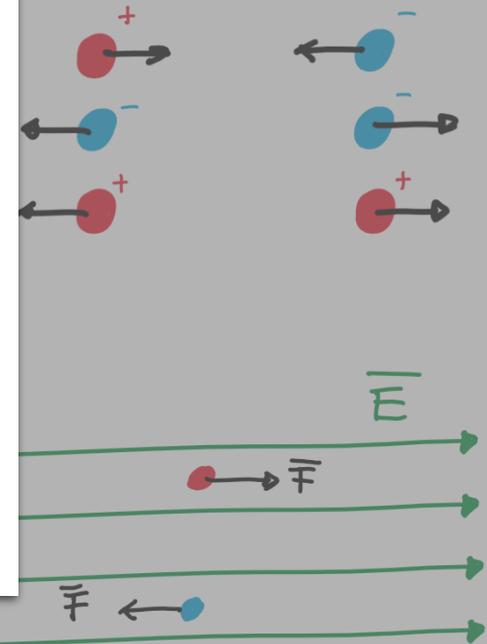
Millikan (1909) a mesuré la charge élémentaire  $q_e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$  en faisant léviter des gouttelettes d'huile chargées dans un champ électrique.

Il a montré que la charge était quantifiée.



Robert A. Millikan  
(1868 - 1950)

couverte à

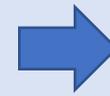


# Charge, courant et potentiel électrique

## La Charge en Mouvement : Le Courant Électrique

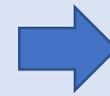
- Le courant électrique  $I$  est le **mouvement des charges** dans un conducteur.
- Ces charges peuvent être des **électrons** (dans un fil métallique) ou des **ions** (dans une solution comme l'eau salée ou une batterie).
- Définition :  $I = \Delta Q / \Delta t$ , où  $\Delta Q$  est la quantité de charge qui passe à travers une section en un temps  $\Delta t$ .
- Unité : **Ampère (A)**  $\Rightarrow 1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$ .

Le courant **instantané** («  $i$  » au minuscule) est défini comme la dérivée de la charge par rapport au temps



$$i(t) = \frac{dq}{dt}$$

La charge est donc la base du courant, mais comment ces charges se déplacent-elles ?



Sous l'effet du **champ électrique**

# Charge, courant et potentiel électrique

La

Exemple : Imaginons un courant continu de  $I = 1 \text{ A}$  dans un fil métallique (ex. : pour alimenter une ampoule).

- $I = 1 \text{ A}$  signifie que 1 Coulomb de charge passent chaque seconde.
- La charge d'un électron est  $q_e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ .

une

Nombre d'électrons par seconde ( $N$ ) :

$$N = I/q_e = 1/(1.602 \times 10^{-19}) \approx 6.242 \times 10^{18} \text{ électrons/s}$$

6 242 milliards de milliards d'électrons qui passent chaque seconde !

Fun fact : À quelle vitesse se déplace chaque électron ?

$$\text{Pour } 1\text{A}, v \approx 26 \text{ cm/h } (\approx 0.07\text{mm/s})$$

# Charge, courant et potentiel électrique

## La différence de potentiel électrique

- Une charge électrique placée dans un champ électrique subit une force :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

- En intégrant le champ électrique entre deux points, on obtient une **circulation du champ électrique** :

$$\text{circulation}(A, B) = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{1}{q} \underbrace{\int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l}}_{\text{travail}}$$

On peut imaginer cette intégrale comme la somme des **petites poussées** du champ  $E$  le long du trajet, ce qui donne le travail fait par le champ électrique, pour déplacer une charge unitaire de  $A$  à  $B$ .

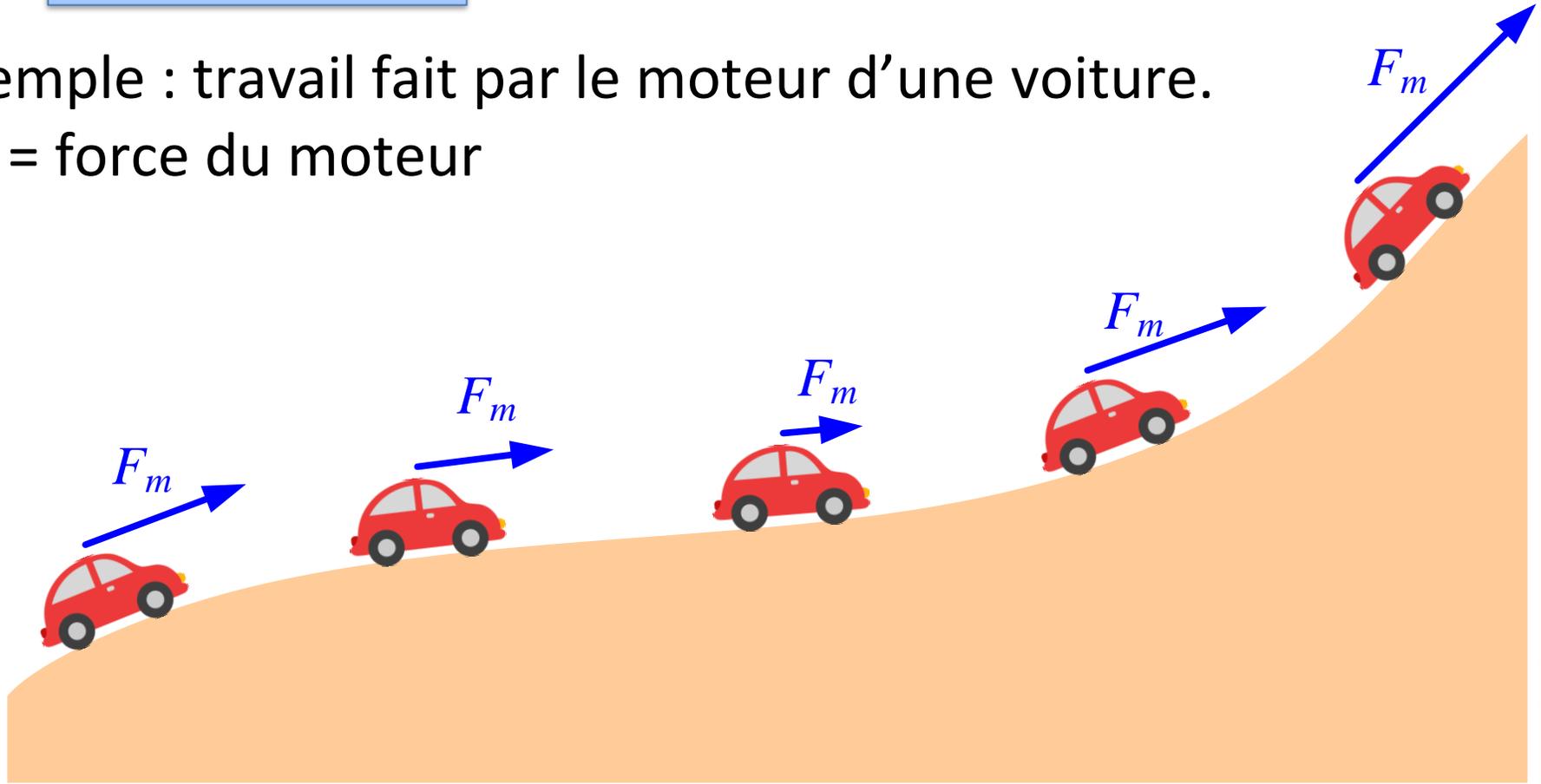
## Travail

**Travail = Force × Distance** (Unités : J = N × m)

$$W = F \cdot \Delta L$$

Exemple : travail fait par le moteur d'une voiture.

$F_m$  = force du moteur



La diffé

• Une cha

• En inté  
électriq

du champ

On  
cha  
pou

ique,

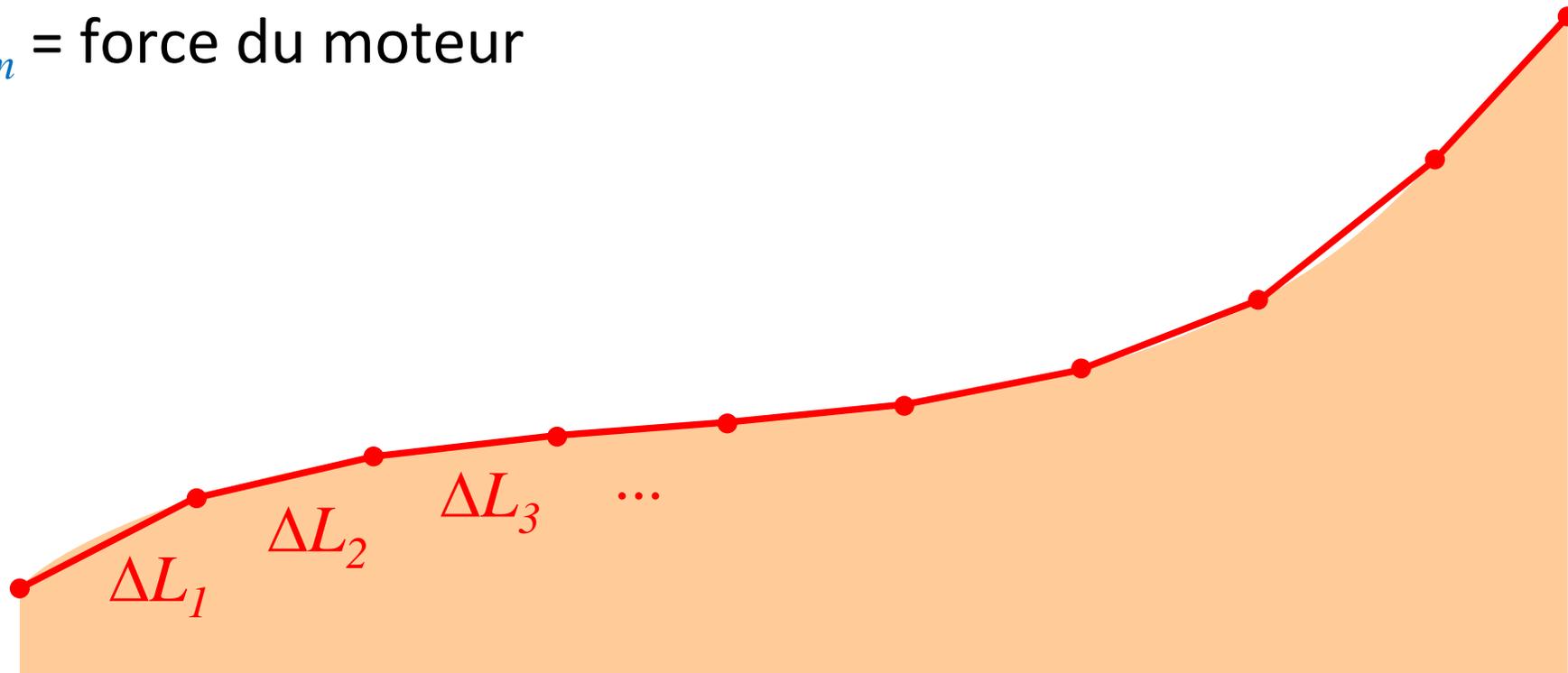
## Travail

**Travail = Force × Distance** (Unités : J = N × m)

$$W = F \cdot \Delta L$$

Exemple : travail fait par le moteur d'une voiture.

$F_m$  = force du moteur



La diffé

• Une cha

• En inté  
électriq

du champ

On  
cha  
pou

ique,

## Travail

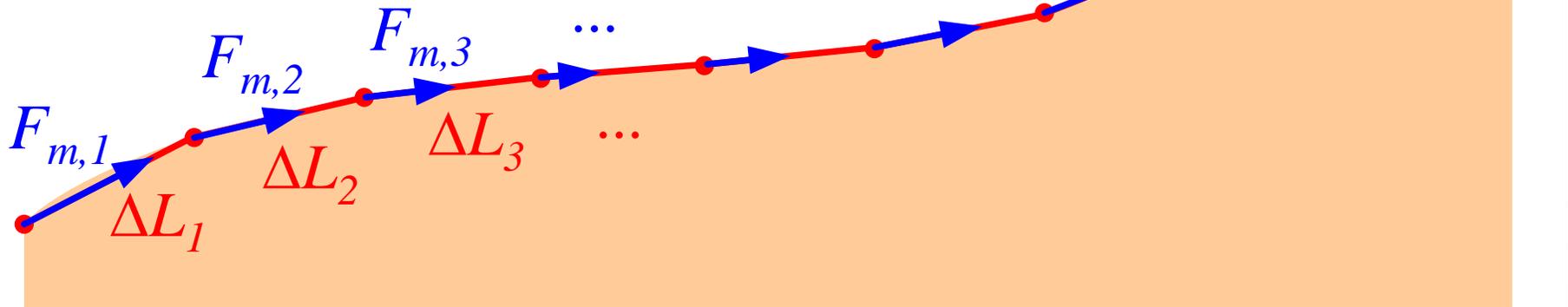
**Travail = Force × Distance** (Unités : J = N × m)

$$W = F \cdot \Delta L$$

Exemple : travail fait par le moteur d'une voiture.

$F_m$  = force du moteur

$$W = \sum_i F_i \cdot \Delta L_i$$



du champ

ique,

## Travail

**Travail = Force × Distance** (Unités : J = N × m)

$$W = F \cdot \Delta L$$

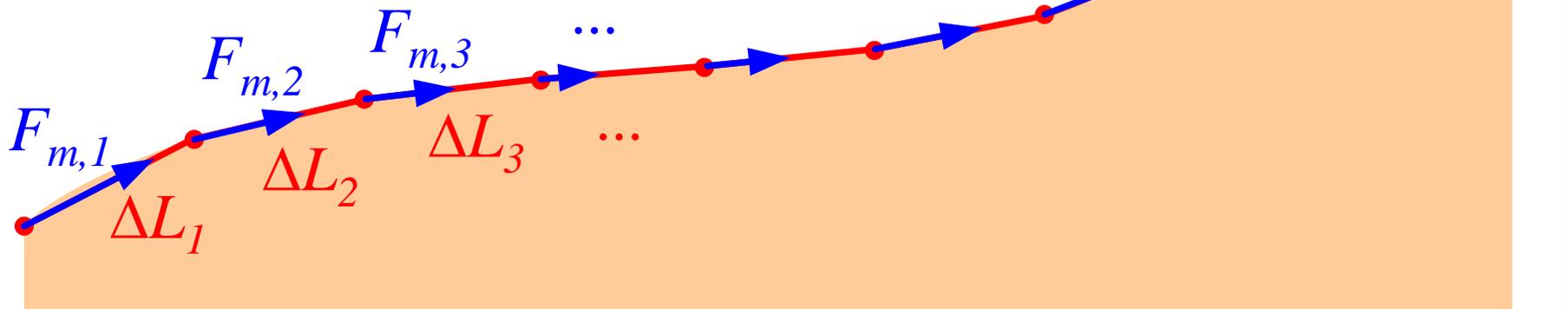
Exemple : travail fait par le moteur d'une voiture.

$F_m$  = force du moteur

$$W = \sum_i F_i \cdot \Delta L_i$$

$$= \int_L \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

Définition plus précise



du champ

ique,

# Charge, courant et potentiel électrique

## La différence de potentiel électrique

- Une charge électrique placée dans un champ électrique subit une force :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

- En intégrant le champ électrique entre deux points, on obtient une **circulation du champ électrique** :

$$\text{circulation}(A, B) = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{1}{q} \underbrace{\int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l}}_{\text{travail}}$$

On peut imaginer cette intégrale comme la somme des **petites poussées** du champ  $E$  le long du trajet, ce qui donne le travail fait par le champ électrique, pour déplacer une charge unitaire de  $A$  à  $B$ .

# Charge, courant et potentiel électrique

## La différence de potentiel électrique

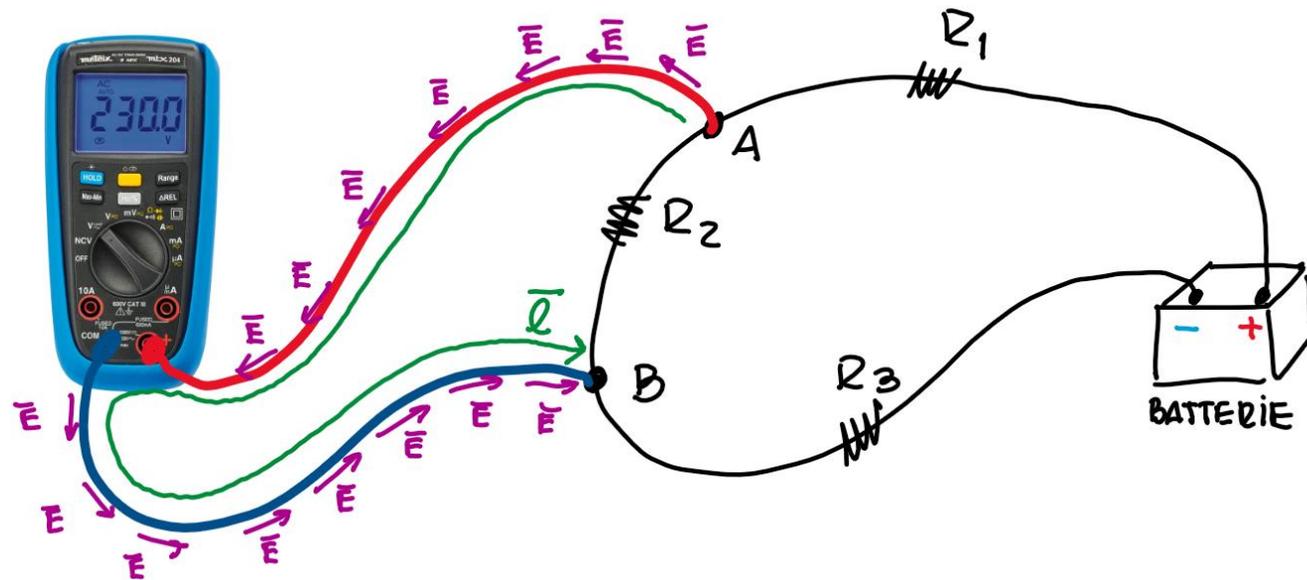
- Si aucun champ magnétique variable n'est présent dans la région, la valeur de l'intégrale ne dépend pas du chemin emprunté, mais seulement des points A et B.

$$V_{AB} = V_A - V_B = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

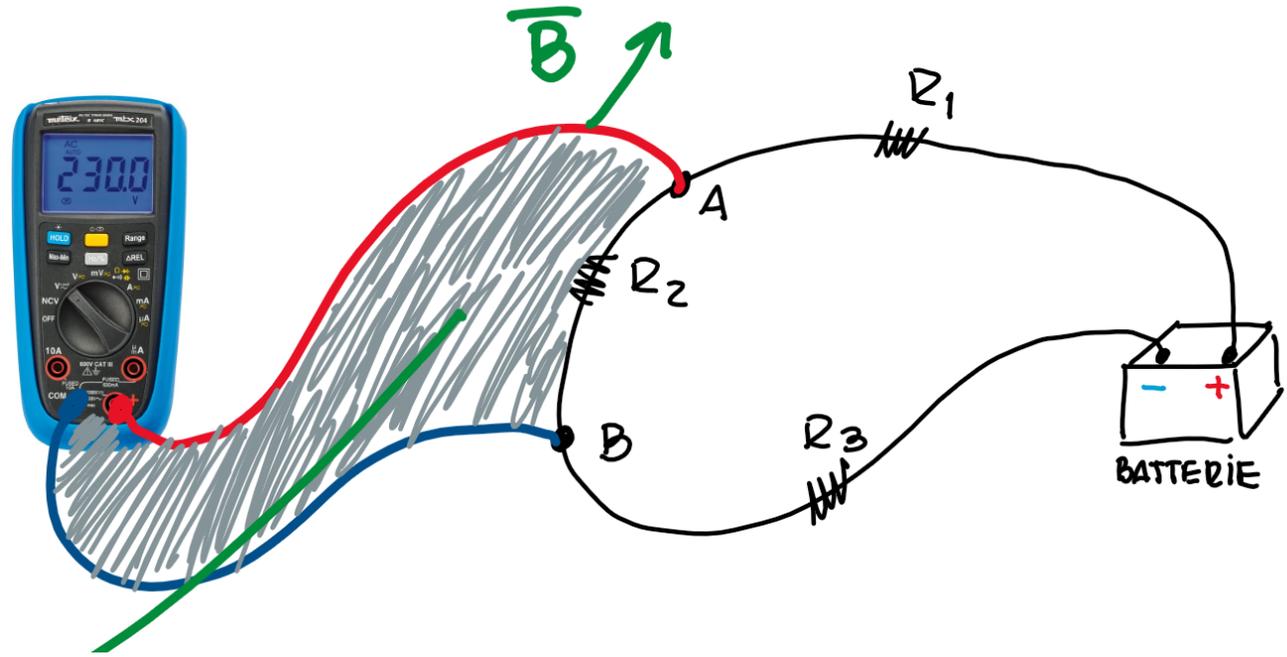
- On peut alors ignorer les détails du champ électrique et se concentrer uniquement sur cette intégrale, que l'on appelle différence de potentiel électrique ou simplement tension électrique.
- $V_{AB}$  : on la mesure facilement avec un simple voltmètre.

# Champs courant et potentiel électrique

- Un **voltmètre** est un petit appareil que calcule l'intégral  $\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{\ell}$
- On peut dire que la valeur affichée correspond à la différence de potentiel s'il n'y pas des champs magnétiques variables autour.
  - Comment savoir cela ? Facile : on bouge les câbles rouge et bleu de notre voltmètre. Si la valeur affichée ne change pas, donc on mesure  $V_{AB}$  !
  - Et si cette valeur change ? On peut réduire la surface enlacée par les câbles et le circuit (ex. torsader les câbles), ou blinder la zone (ex. cage Faraday).



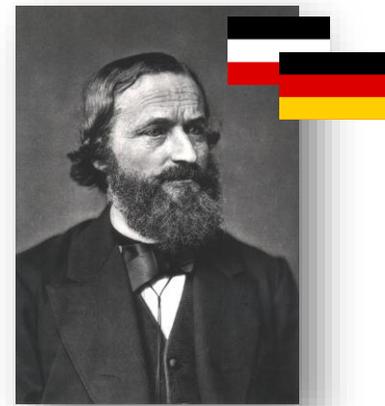
- Un **voltmètre** est un petit appareil que calcule l'intégral  $\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{e}$
- On peut dire que la valeur affichée correspond à la différence de potentiel s'il n'y pas des champs magnétiques variables autour.
  - Comment savoir cela ? Facile : on bouge les câbles rouge et bleu de notre voltmètre. Si la valeur affichée ne change pas, donc on mesure  $V_{AB}$  !
  - Et si cette valeur change ? On peut réduire la surface enlacée par les câbles et le circuit (ex. torsader les câbles), ou blinder la zone (ex. cage Faraday).



# De Maxwell à Kirchhoff



James Clerk Maxwell (1831 – 1879)



Gustav Robert Kirchhoff (1824 – 1887)

# De Maxwell à Kirchhoff

I d é é g é n é r a l e :

Équations  
de  
Maxwell



Deux simplifications

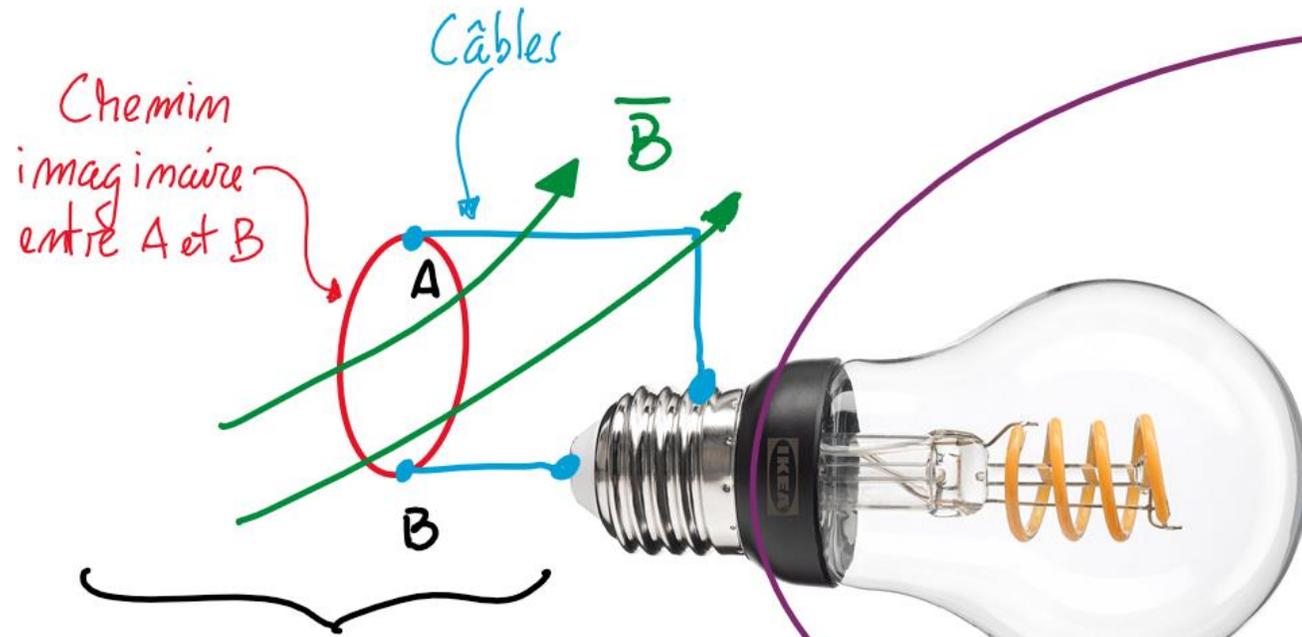
→ Plutôt, règles ou contraintes de construction des composants et appareils électriques

Équations  
algébriques simples

→ écale primaire!

DS 2.3  
Électricité

# De Maxwell à Kirchhoff : contrainte #1



Ici les  
éq. de Maxwell  
marchent  
à fond !!!

Des champs  
électromagnétiques  
variables... la totale!

Si le champ magnétique  $\vec{B}$   
enlacé par un chemin fermé  
entre A et B ne varie pas  
avec le temps  $\Rightarrow$  il existe une différence de  
potentiel électrique  
entre A et B'

$$V_{\text{LAMPE}} = V_A - V_B$$

# De Maxwell à Kirchhoff : contrainte #2

$I_A$  : courant électrique qui rentre au point A.

$I_B$  : courant électrique qui sort du point B

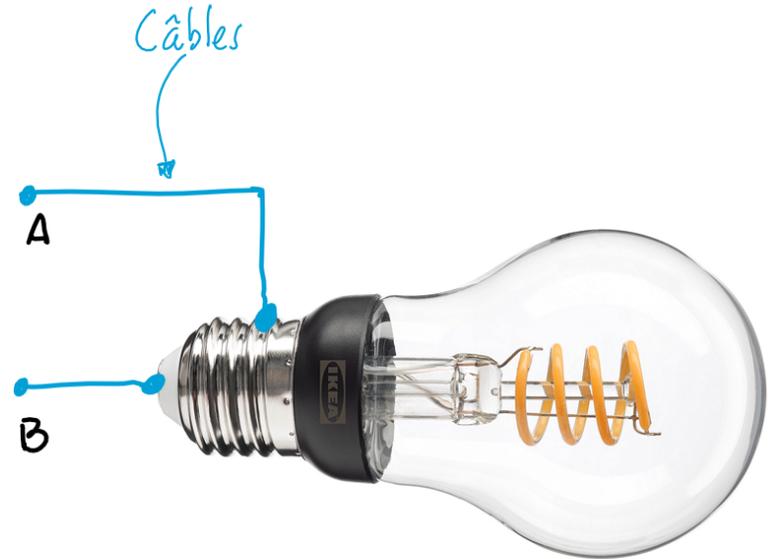
$$I_A = \frac{dq_A}{dt}$$

$$I_B = \frac{dq_B}{dt}$$

$q$  : charge électrique

$I_A$   
→

$I_B$   
←



$$I_A - I_B = \frac{dq}{dt}\bigg|_A - \frac{dq}{dt}\bigg|_B = \frac{dq_{\text{ACCUMULÉE}}}{dt}$$

Taux de charge accumulée à l'intérieur de la lampe

On construit des appareils qui n'accumulent pas de charge à l'intérieur

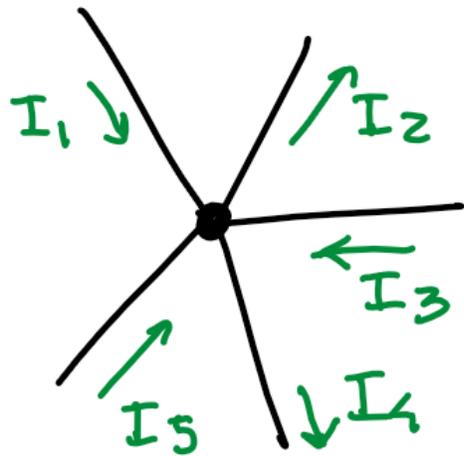
$$\Rightarrow \frac{dq_{\text{acc.}}}{dt} = 0 \Rightarrow q_{\text{acc.}} = 0 \left( \begin{array}{l} \text{pas de charge nette} \\ \text{à l'intérieur} \end{array} \right) \Rightarrow I_A = I_B$$

# De Maxwell à Kirchhoff

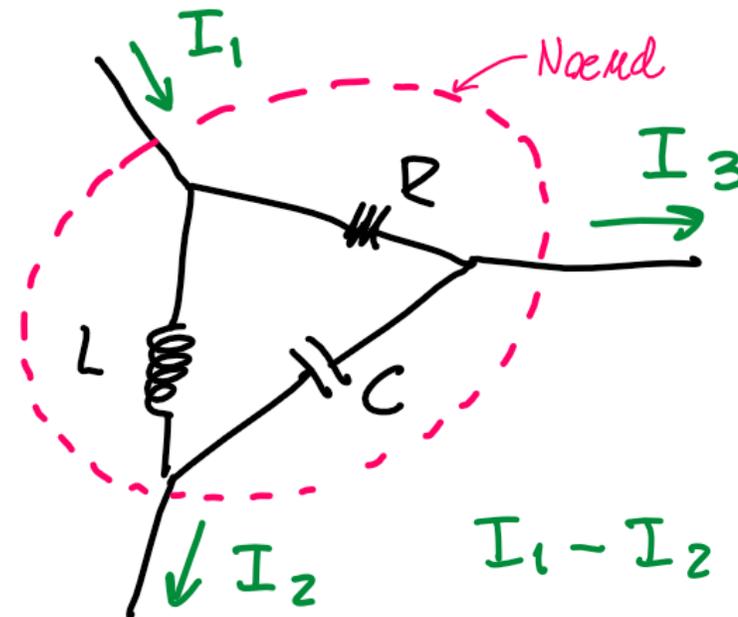
## Loi de Kirchhoff des Courants – LKC (Loi des nœuds)

La somme algébrique des courants entrant et sortant d'un nœud est toujours égale à zéro.

$$\sum I_{\text{in}} + \sum I_{\text{out}} = 0$$



$$+I_1 - I_2 + I_3 - I_4 + I_5 = 0$$



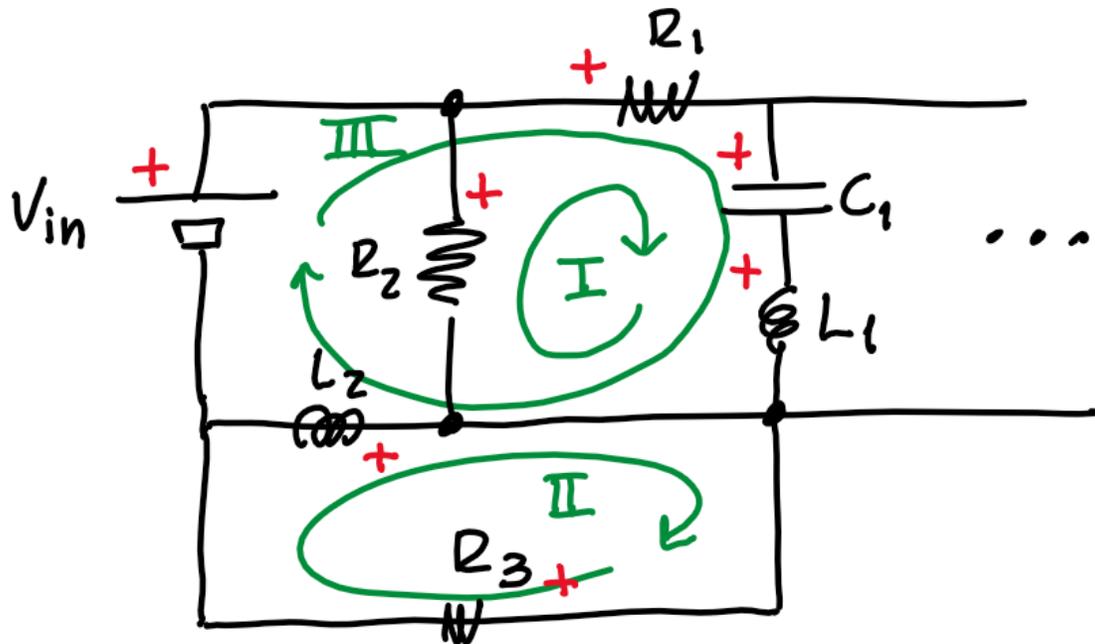
$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

# De Maxwell à Kirchhoff

## Loi de Kirchhoff des Tensions – LKT (Loi des mailles)

La somme algébrique des tensions le long d'une maille fermée est toujours égale à zéro.

$$\sum_i V_i = 0$$



$$\text{Maille I : } -V_{R_2} + V_{R_1} + V_{C_1} + V_{L_1} = 0$$

$$\text{Maille II : } +V_{R_3} - V_{L_2} = 0$$

$$\text{Maille III : } +V_{R_1} + V_{C_1} + V_{L_2} - V_{in} = 0$$

On verra tout à l'heure comment établir le sens de référence des tensions dans un circuit ...

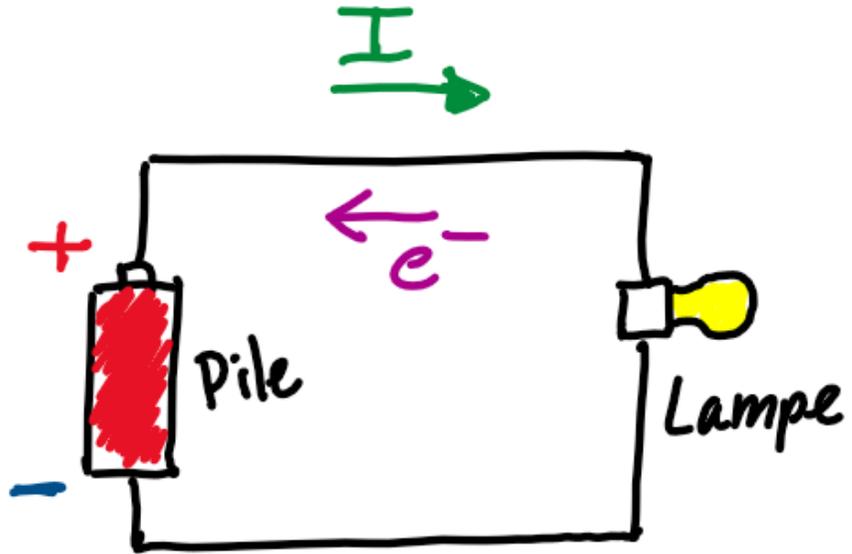


# *Conventions*

# Conventions

## Sens du courant

- Le sens du courant électrique est une convention : on le définit comme le sens de déplacement des charges positives (sens conventionnel).
- En réalité, dans les conducteurs métalliques, ce sont les électrons (charges négatives) qui se déplacent, donc en sens inverse du courant conventionnel.

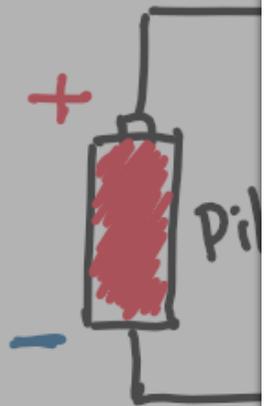


- Cette convention date de l'époque où les charges positives étaient considérées comme les porteurs principaux (avant la découverte de l'électron par Thomson en 1897).
- Aujourd'hui, on la conserve pour des raisons historiques et pratiques dans les circuits.

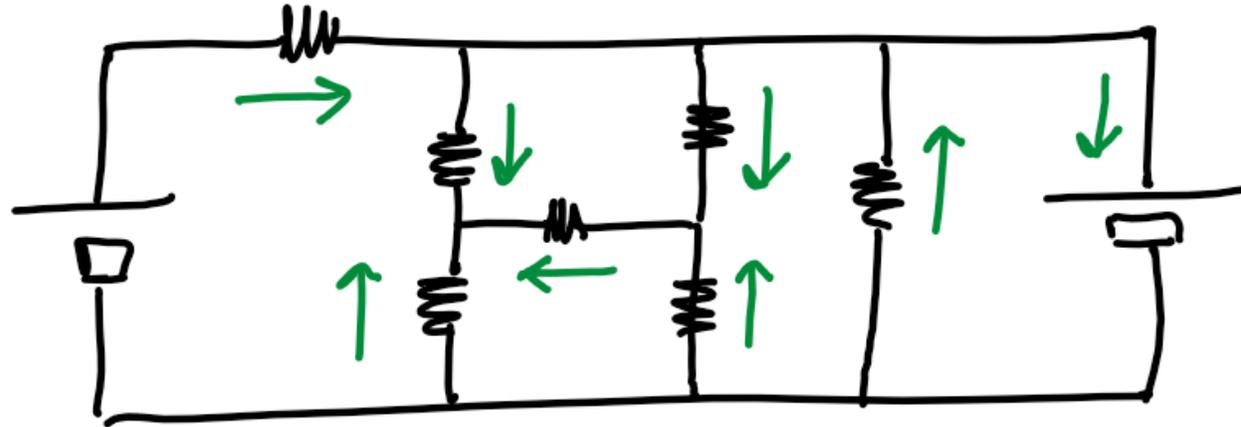
# Conventions

## Sens du courant

- Le sens du courant est conventionnellement le sens de déplacement des charges positives.
- En réalité, dans les métaux, ce sont les électrons (charges négatives) qui se déplacent.



Sur un schéma électrique, on choisit arbitrairement le sens du courant, mais il est essentiel de rester cohérent dans tout le circuit.



- Avant de résoudre le circuit, on ne connaît pas forcément le sens réel des courants : on les choisit donc arbitrairement.
- Si, après résolution, on obtient une valeur négative, cela signifie simplement que le courant circule en réalité dans le sens opposé à celui choisi initialement.

comme le

charges  
conventionnel.

de l'époque  
étaient  
porteurs  
ouverte de  
(en 1897).

serve pour  
pratiques

# Conventions

## Sens de Référence de la Tension

Idée générale : pour chaque dipôle (résistance, condensateur, diode, source, ...), la convention de référence utilisée pour la tension est directement liée à celle choisie pour le courant. En d'autres termes, la polarité (+/-) indiquée pour la tension dépend du sens choisi pour le courant.

### Convention « dipôle passif » (récepteur)

- S'applique aux dipôles qui **consomment de l'énergie** (résistance, condensateur, diode...).
- Le courant entre par la borne (+) et ressort par la borne (-).

### Convention « dipôle actif » (générateur)

- S'applique aux dipôles qui **fournissent de l'énergie** (pile, générateur).
- Le courant sort par la borne (+) et entre par la borne (-).

# Conventions

## Sens de Référence de la Tension

Idée générale  
convention  
pour le cou  
dépend du

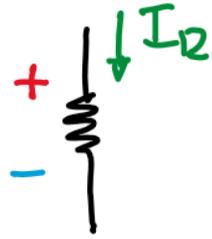
Convention

- S'app
- Le cou

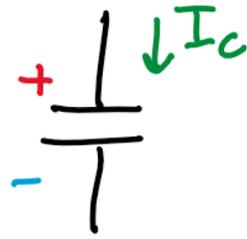
Convention

- S'applique aux dipôles qui fournissent de l'énergie (pile, générateur).
- Le courant sort par la borne (+) et entre par la borne (-).

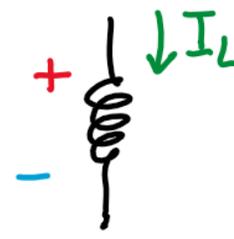
ce, ...), la  
lle choisie  
nsion



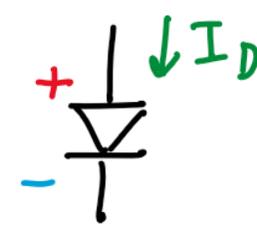
Résistance



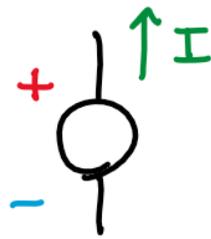
Condensateur



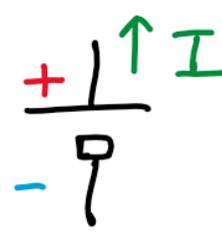
Bobine



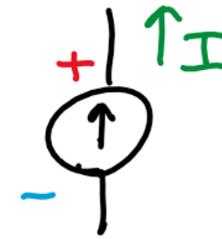
Diode



Source de tension



Source de tension CC



Source de courant

# Conventions

## Sens de Référence de la Tension

Idée générale  
convention  
pour le cou  
dépend du

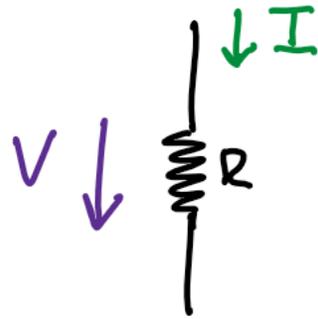
Convention

- S'appl
- conde
- Le cou

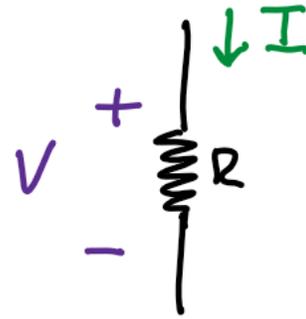
Convention « dipôle actif » (générateur)

- S'applique aux dipôles qui **fournissent de l'énergie** (pile, générateur).
- Le courant sort par la borne (+) et entre par la borne (-).

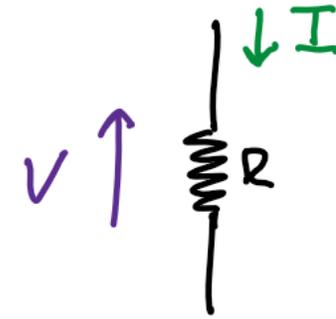
## Symboles du sens de la tension



International  
(C.E.I.)



USA



France

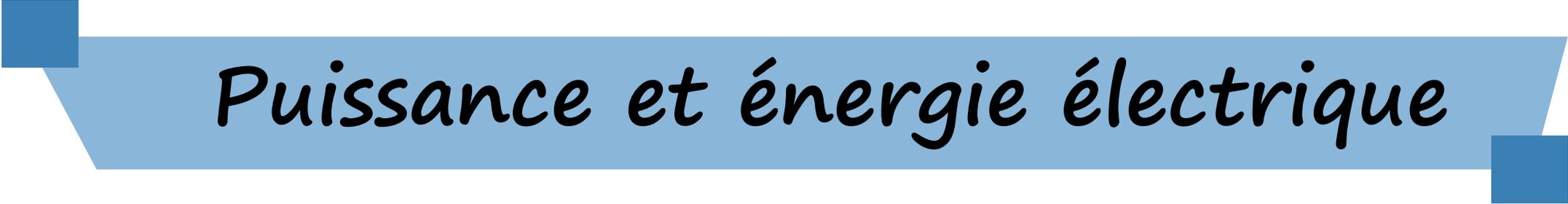
C.E.I. : Commission Électrotechnique Internationale

ce, ...), la  
lle choisie  
nsion

# Conventions

## Notations utilisées pour les courants et les tensions électriques :

- $i(t)$ ,  $v(t)$  : valeurs instantanées du courant/tension à chaque instant.
- $I$ ,  $U$  : selon le cas, désignent :
  - la valeur moyenne temporelle du courant/tension
  - la valeur instantanée dans les circuits à courant continu (CC, en anglais DC : Direct Current)
  - la valeur efficace (ou RMS : Root Mean Square), souvent notée  $I_{ef}$  ou  $V_{ef}$ .
- $\bar{I}$ ,  $\bar{U}$  : grandeurs complexes (ex.  $\bar{I} = a + j b$ ), utilisées pour simplifier l'analyse des circuits à courant alternatif (CA, en anglais AC : Alternating Current)



# *Puissance et énergie électrique*

# Puissance et énergie électrique

## Puissance électrique

La puissance électrique dissipée ou fournie dans un dipôle est donnée par :

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad [p] = V \times A = W$$

## Énergie électrique

L'énergie électrique est la puissance multipliée par le temps (ou intégrée sur une période de temps)

$$E(t) = \int_0^t p(\tau) d\tau \quad [E] = W \times s = J$$

L'énergie est souvent exprimée en Wattheures (Wh), où **1 Wh = 3600 J**.

# Puissance et énergie électrique

## Puissance électrique

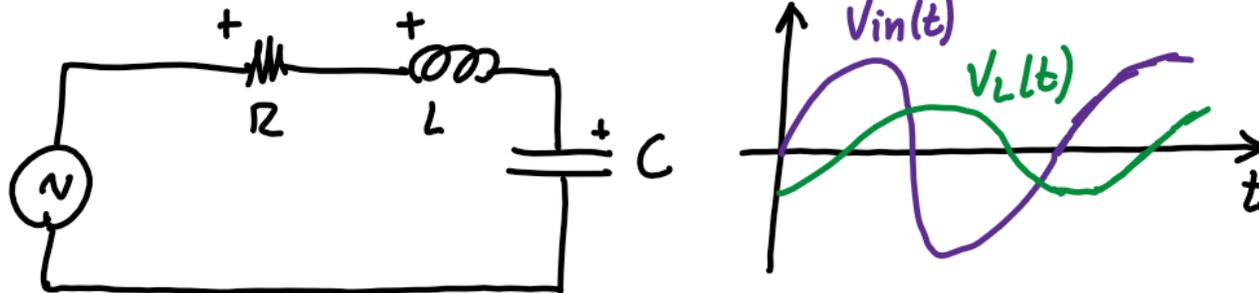
La puis

**Remarque :** dans les circuits en courant alternatif (CA), la notion de puissance est plus riche. On distingue alors plusieurs formes de puissances :

- Puissance active (ou puissance moyenne) ( $P$ )
- Puissance réactive ( $Q$ )
- Puissance apparente ( $S$ )
- Puissance déformante (liée aux signaux non-sinusoidaux) ( $D$ )

## Énergie

L'énerg  
période



sur une

L'énergie est souvent exprimée en Wattheures (Wh), où  $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$ .

# Épilogue : Rappel des unités

Grandeur	Unité	Symbole	Équivalence
Charge	Coulomb	C	
Courant électrique	Ampère	A	$A = C/s$
Tension électrique	Volt	V	
Puissance	Watt	W	$W = V \times A$
⇒ Puissance active	Watt	W	
⇒ Puissance réactive	Voltampère réactif	VAR	
⇒ Puissance apparente	Voltampère	VA	
Énergie	Joule	J	$J = W \times s$
	Watt-heure	Wh	$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$
Résistance électrique	Ohm	$\Omega$	$\Omega = V / A$
Impédance (complexe)	Ohm	$\Omega (a+jb)$	
Résistivité	Ohm-mètre	$\Omega\text{m}$	
Inductance	Henry	H	$V / (A \times s)$
Capacité électrique	Farad	F	$F = C / V$
Champ magnétique	Tesla	T	
Flux magnétique	Weber	Wb	$V \times s, T \times \text{m}^2$



*Māuruuru roa !*