

# Électromagnétisme

## S14 Courants électriques II

Iannis Aliferis

*Université Nice Sophia Antipolis*

<b>Vitesse des porteurs de charge</b>	<b>2</b>
Vitesse de Fermi . . . . .	3
Équation du mouvement des porteurs de charge . . . . .	4
Vitesse de dérive dans un conducteur . . . . .	5
<b>Courants dans les conducteurs : la loi d'Ohm</b>	<b>6</b>
Courants dans les conducteurs . . . . .	7
Conductivité: quelques valeurs typiques . . . . .	8
<b>Loi d'Ohm en Électronique</b>	<b>9</b>
Relation tension-courant . . . . .	10
<b>Puissance consommée en Électronique</b>	<b>11</b>
Conducteur sous tension . . . . .	12

## Vitesse des porteurs de charge

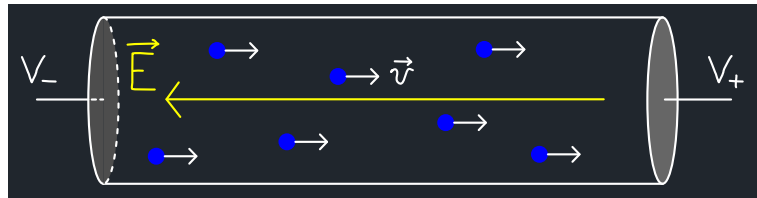
2

### Vitesse de Fermi

- ▼ Électrons libres dans un conducteur métallique, en absence de champ électrique : mouvement thermique *aléatoire*
- ▼ Données cuivre, température  $T = 300 \text{ K}$ 
  - Vitesse de Fermi :  $v_F \approx 10^6 \text{ m s}^{-1}$
  - Temps entre les collisions  $\tau \approx 10^{-14} \text{ s}$
  - Distance entre les collisions :  $d = v_F \tau \approx 10^{-8} \text{ m}$
  - Densité des électrons libres :  $n \approx 10^{29} \text{ m}^{-3}$
- ▼ Densité de courant :
 
$$J = nqv_F \approx 10^{29} 1.6 \times 10^{-19} 10^6 \text{ A m}^{-2} (?)$$
- ▼ Vitesse *moyenne* nulle,  $\vec{J} = \vec{0}$  !

3

### Équation du mouvement des porteurs de charge



- ▼ Conducteur de longueur  $L$ , de section  $A$
- ▼ Appliquer une *différence de potentiel*  $U = V_+ - V_-$
- ▼ Dans le conducteur  $\vec{E} \neq \vec{0}$  !

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V = -\frac{U}{L} \hat{e}_{- \rightarrow +} = \frac{U}{L} \hat{e}_{+ \rightarrow -}$$

- ▼ Force  $\vec{F}_e = q_e \vec{E}$  sur les électrons libres ( $q_e = -|q_e|$ )
- ▼ Collisions : force de « friction »  $\vec{F}_f = -f \vec{v}$
- ▼ Équation du mouvement :

$$m_e \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_e + \vec{F}_f = q_e \vec{E} - f \vec{v}$$

4



### Vitesse de dérive dans un conducteur

- ▼ Forces et vitesse sur le même axe : pas de vecteurs

$$\frac{m_e}{f} \frac{dv}{dt} + v = \frac{q_e}{f} E \quad (1)$$

- ▼ Solution :

$$v(t) = C \exp\left(-\frac{f}{m_e} t\right) + \frac{q_e}{f} E$$

- ▼ Conditions initiales :  $v(t=0) = 0 \rightarrow C = -q_e E / f$

- ▼ Unités de  $f/m_e$  :  $s^{-1}$ , on peut l'appeler  $1/\tau$  ( $f = m_e/\tau$ )

$$v(t) = \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \frac{q_e \tau}{m_e} E \quad (2)$$

- ▼ Vitesse de dérive des électrons libres :

$$v_d = \frac{q_e \tau}{m_e} E \quad t \gg \tau \approx 10^{-14} \text{ s} \quad (3)$$

- ▼ Mobilité électrique :  $\mu_e = |q_e| \tau / m_e \rightarrow |v_d| = \mu_e E$

5

### Courants dans les conducteurs : la loi d'Ohm

6

#### Courants dans les conducteurs

- ▼ Porteurs de charges libres dans un conducteur
- ▼ Appliquer différence de potentiel  $\rightarrow$  champ électrique
- ▼ Vitesse de dérive  $\rightarrow$  densité de courant :

$$\vec{J} = n q_e \vec{v}_d = n q_e \frac{q_e \tau}{m_e} \vec{E} \quad [\text{vitesse porteurs}]$$

- ▼ Loi d'Ohm (1827), formulation Kirchhoff

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (4)$$

- ▼ Conductivité ( $\Omega^{-1} \text{ m}^{-1} = \text{U/m} = \text{S m}^{-1}$ )

$$\sigma \triangleq \frac{n q_e^2 \tau}{m_e} = n |q_e| \mu_e \quad (5)$$

- ▼ Résistivité  $\rho = \frac{1}{\sigma}$  ( $\Omega \text{ m}$ )

7



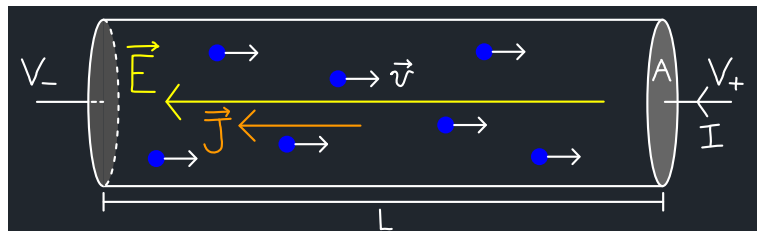
**Conductivité : quelques valeurs typiques**

Matériau	$\sigma$ (S m <sup>-1</sup> )	Matériau	$\sigma$ (S m <sup>-1</sup> )
Quartz	$\approx 10^{-17}$	Eau salée	$\approx 4$
Polystyrène	$\approx 10^{-16}$	Silicone	$10^3$
Caoutchouc	$\approx 10^{-15}$	Graphite	$\approx 10^5$
Porcelaine	$\approx 10^{-14}$	Acier	$2 \times 10^6$
Verre	$\approx 10^{-12}$	Plomb	$5 \times 10^6$
Eau distillée	$\approx 10^{-4}$	Tungsten	$1.8 \times 10^7$
Sol sec	$\approx 10^{-3}$	Aluminium	$3.5 \times 10^7$
Eau	$\approx 10^{-2}$	Or	$4.1 \times 10^7$
Graisse animale	$\approx 4 \times 10^{-2}$	Cuivre	$5.7 \times 10^7$
Corps humain	$\approx 0.2$	Argent	$6.1 \times 10^7$

8

**Loi d'Ohm en Électronique**

9

**Relation tension-courant**

- ▼  $\vec{J} = \sigma \vec{E}$  ou  $\vec{E} = \frac{1}{\sigma} \vec{J}$
- ▼ Densité de courant :  $J = I/A$
- ▼ Champ électrique :  $E = U/L$

$$\vec{E} = \frac{1}{\sigma} \vec{J} \longrightarrow \boxed{U = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{A} I \triangleq RI} \quad \text{loi d'Ohm}$$

- ▼ Attention aux « conventions » :

1.  $U = V_+ - V_-$  (ddp ou « tension »)
2. Sens de  $I$  : de (+) vers (-) (comme  $\vec{E}$  et  $\vec{J}$ )

- ▼ Attention,  $R$  n'est pas toujours constante !

- ▶  $\sigma \propto \tau$  (temps entre collisions)
- ▶  $I \uparrow \Rightarrow T \uparrow \Rightarrow \tau \downarrow \Rightarrow \sigma \downarrow \Rightarrow \rho \uparrow \Rightarrow R \uparrow$

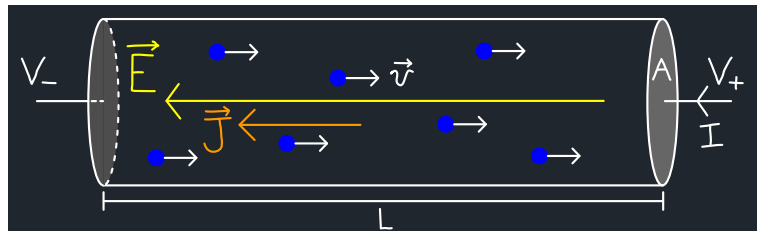
10



## Puissance consommée en Électronique

11

### Conducteur sous tension



- ▼ Des charges négatives se déplacent spontanément :  $- \rightarrow +$
- ▼  $W_{-\rightarrow+} = q_e (V_+ - V_-) = -|q_e|U$
- ▼  $W_{-\rightarrow+} < 0$  : travail restitué par la charge...
- ▼ ... donc **fourni** par le champ ; consommation
- ▼ Le champ dépense  $dW = U dq$  pour chaque charge  $dq$
- ▼ Débit de charges déplacées :  $dq/dt = I$
- ▼ Puissance consommée :

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{U dq}{dt} = UI \quad (6)$$

- ▼  $U$  et  $I$  selon les « conventions » [loi d'Ohm électronique]

12

