

Conduction au niveau microscopique

- Courant et **densité** du courant

$$i = \frac{q}{t} \quad j = \frac{i}{S} \quad [j] = 1 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$$

- **Concentration** (densité volumique) des électrons libres

$$q = N_e V e = N_e S \ell e$$

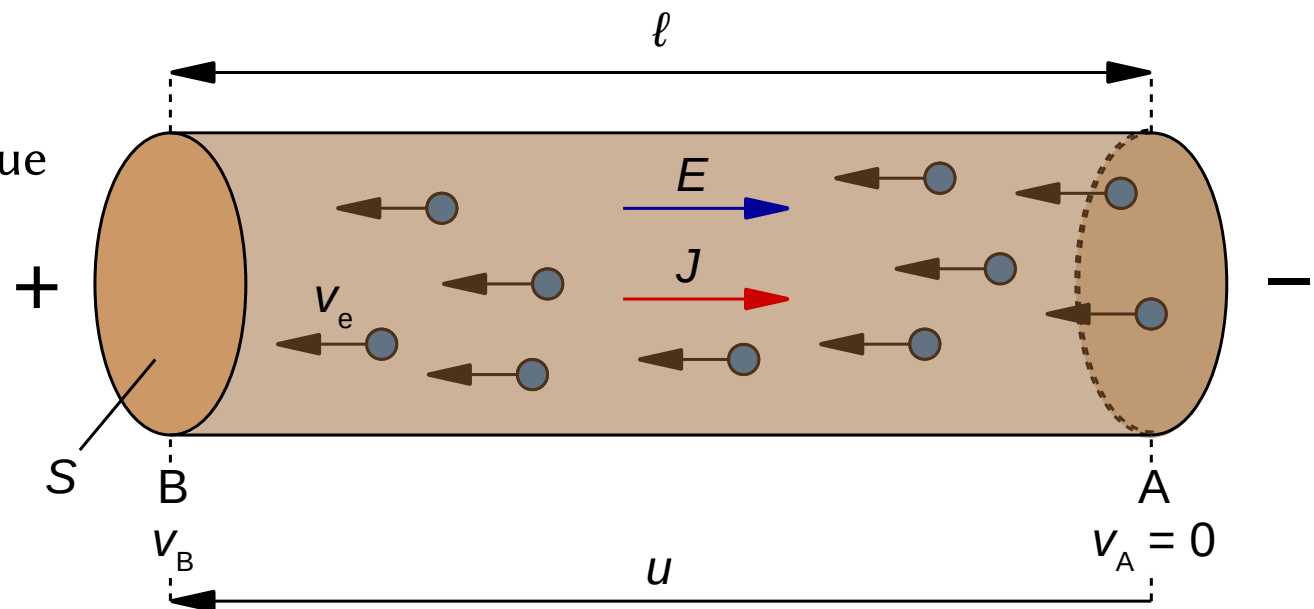
$$[N] = \frac{1}{\text{m}^3} = 1 \text{ m}^{-3}$$

- ♦ Constante pour les conducteurs : chaque atome fournit le même nombre d'électrons
- ♦ Cuivre (1 électron libre par atome) :
 $N_e = 8,49 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$
 $= 8,49 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$

- La vitesse moyenne des électrons est proportionnelle au champ électrique

- ♦ Le coefficient de proportionnalité est nommé **mobilité**

$$\bar{v}_e = \mu E \quad [\mu] = 1 \frac{\text{m}^2}{\text{Vs}}$$



Conduction au niveau microscopique

- Définition stricte du potentiel

- ♦ matériel et champ uniformes

$$v_B = \int_0^B E d\ell = \int_A^B E d\ell = E \ell$$

$$u = v_B - v_A = E \ell - 0 = E \ell$$

$$E = \frac{u}{\ell}$$

- **Loi d'Ohm microscopique**

$$j = \sigma E \quad E = \rho j$$

- **Conductivité et résistivité**

$$\sigma = e\mu N = \rho^{-1}$$

- Niveau macroscopique

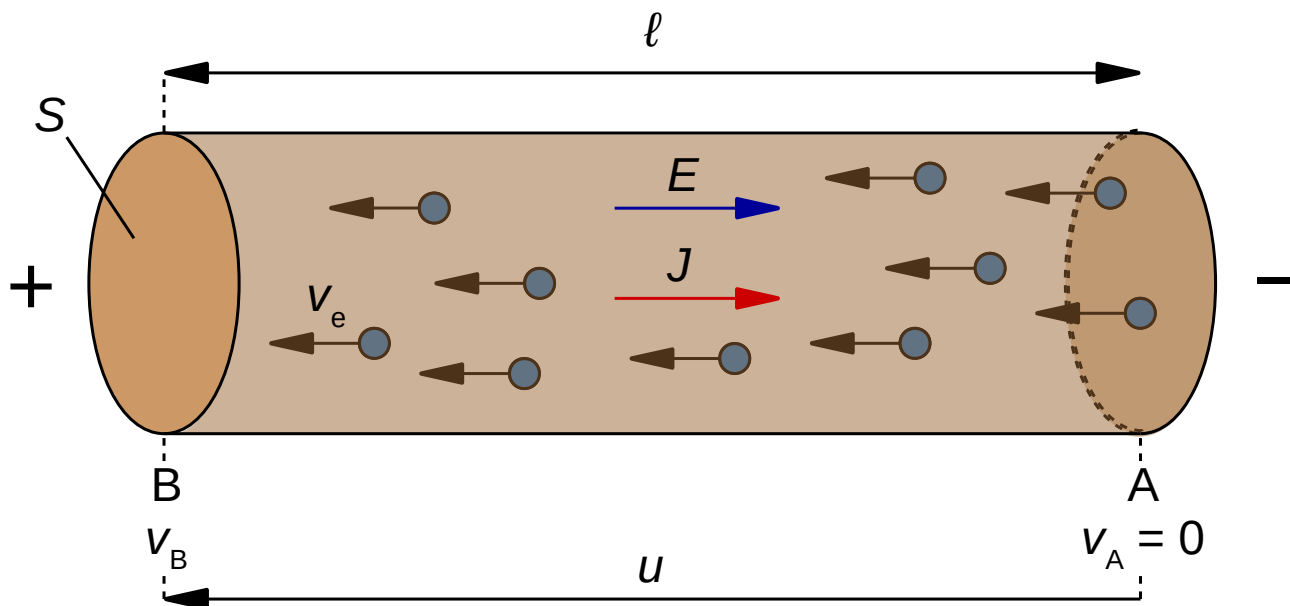
$$\frac{u}{\ell} = \rho \frac{i}{S}$$

$$u = i \frac{\rho \ell}{S} = i R$$

$$R = \frac{\rho \ell}{S} \quad G = \frac{\sigma S}{\ell}$$

$$[\rho] = 1 \Omega \cdot \text{m}$$

$$[\sigma] = 1 \frac{\text{S}}{\text{m}}$$



Conductivité et résistivité des métaux

- La plupart de bons conducteurs ($\sigma \sim 10^7$ S/m) sont des métaux
 - ♦ Le plus populaire est le **cuiivre** grâce à sa conductivité électrique σ et thermique κ , son coût bas, son élasticité E ; pourtant, il est facilement oxydé
 - ♦ **Aluminium** : κ et E pires ; utilisé en grandes quantités grâce aux coût et poids bas, et avec refroidissement efficace (câbles de transmission)
 - ♦ Argent : le meilleur conducteur (σ et κ) mais cher et sensible à la corrosion
 - ♦ **Or** : avantageux mais cher ; utilisé en petites quantités (couches minces sur des connecteurs, fils de connexion à l'intérieur des circuits intégrés)
 - ♦ Platine : très stable mais σ et κ basses ; couches en courants faibles

	$\sigma(20\text{ °C})$ [S/m]	$\rho(20\text{ °C})$ [$\Omega\cdot\text{m}$]	κ [W/(m·K)]	E [GPa]	sensibilité à corrosion	coût	D [g/cm ³]
Ag	$6,30\cdot 10^7$	$1,59\cdot 10^{-8}$	406	72	haute	haut	
Cu	$5,96\cdot 10^7$	$1,68\cdot 10^{-8}$	385	117	très haute	bas	8,96
Au	$4,10\cdot 10^7$	$2,44\cdot 10^{-8}$	314	74	très basse	très haut	
Al	$3,50\cdot 10^7$	$2,65\cdot 10^{-8}$	205	69	modérée	très bas	2,70
Pt	$0,94\cdot 10^7$	$10,6\cdot 10^{-8}$	73	148	très basse	très haut	



Effet de la température

- Mécanisme physique :
 - ♦ Les **atomes dans un solide vibrent**, l'amplitude croissant avec température
 - ♦ Ainsi, ils gênent plus fortement le mouvement des électrons
 - ♦ Cela se traduit par une vitesse moyenne des électrons moins élevée
 - ♦ Alors une mobilité plus basse
- Par conséquent :
 - ♦ La **conductivité diminue** avec la température
 - ♦ La **résistivité augmente** avec la température
- Pour les conducteurs, cette dépendance peut être considérée linéaire :

$$\rho(T) = \rho(T_0) \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)]$$

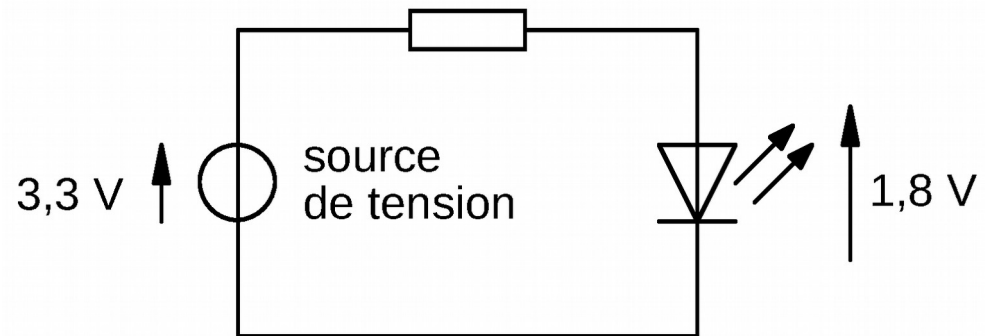
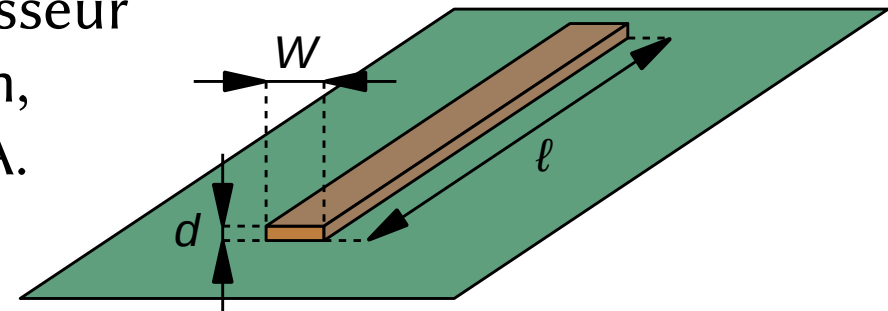
$$\sigma(T) = \frac{\sigma(T_0)}{1 + \alpha \cdot (T - T_0)}$$

	α [K ⁻¹]
Ag	0,0038
Cu	0,0039
Au	0,0034
Al	0,0043
Pt	0,0039



Exercices

- 2.3.1. Calculer la résistance d'un fil en cuivre d'une longueur de 3 m et d'une section de $1,6 \text{ mm}^2$, à la température de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ et $60 \text{ }^\circ\text{C}$.
- 2.3.2. Quelle tension se produira entre les extrémités de ce fil à $60 \text{ }^\circ\text{C}$, s'il est traversé d'un courant de $3,6 \text{ A}$? Que devient cette tension si on utilise un fil de $4,0 \text{ mm}^2$?
- 2.3.3. Une piste en cuivre d'une épaisseur $d = 35 \text{ }\mu\text{m}$ et d'une longueur $\ell = 8 \text{ cm}$, est traversée par un courant de $4,5 \text{ A}$. Quelle doit être sa largeur W pour que la chute de tension entre ses extrémités ne dépasse pas 50 mV à $60 \text{ }^\circ\text{C}$?
- 2.3.4. Quelle doit être la résistance du résistor pour obtenir le courant de la diode de 5 mA ?



Puissance électrique

- La **puissance** est **l'énergie mise en jeu** (générée, transmise, convertie, consommée) **pendant une durée de temps donnée**

$$p = \frac{dW}{dt}$$

- ♦ **Symbole** : p
- ♦ **Unité** : watt [W]
- En génie électrique, souvent on utilise le **watt-heure** [Wh] comme unité de l'énergie plutôt que le joule

$$W = \int p dt$$

- ♦ C'est pratique, car ça exprime l'énergie consommée par un récepteur de 1 W pendant une durée de 1 h
- ♦ Les tarifs sur l'énergie électrique sont exprimés en monnaie par kWh
- ♦ On peut alors facilement calculer le **coût d'exploitation** d'un appareil électrique



Loi de Joule

- Un **dipôle** est un objet électrique à deux bornes
- Un dipôle parcouru par un courant électrique dégage de la chaleur proportionnelle au carré de ce courant et à la résistance de ce dipôle

$$p = Ri^2$$

- Pour un **dipôle résistif** (conforme à la loi d'Ohm) :

$$p = u i = \frac{u^2}{R}$$

- C'est un résultat des collisions des électrons avec les atomes
 - ♦ Suite à la collision, la vitesse de l'électron diminue
 - ♦ Son énergie cinétique diminue mais elle ne peut pas disparaître
 - ♦ Cette énergie est passée à l'atome
 - ♦ L'augmentation de l'énergie de l'atome se manifeste par une augmentation de son amplitude de vibrations
 - ♦ L'amplitude des vibrations est liée à la température, alors elle représente l'énergie thermique du solide

Conséquences pratiques de la loi de Joule

- Sur la loi de Joule repose le fonctionnement de ces **appareils électriques** qui sont destinés à convertir l'énergie électrique en énergie thermique :
 - ♦ appareils de chauffage résistifs (radiateurs, chauffe-eau, fours...)
 - ♦ ampoules à incandescence (l'émission de la lumière y est une conséquence de l'échauffement extrême du filament)
- Pourtant dans **tout autre objet** qui possède une **résistance non nulle**, on va observer également cette conversion
 - ♦ Dans leur cas, c'est **indésirable**, alors on parle des **pertes d'énergie** (ou de **puissance**)
 - ♦ Une partie de l'énergie mise en jeu n'est **ni transmise ni convertie dans une autre forme utile**
 - ♦ Une telle résistance est appelée **résistance parasite**
 - ♦ Exemples : fil de connexion, diode, moteur électrique...
 - ♦ Cela diminue le **rendement**



Puissance électrique généralisée

- La **puissance électrique mise en jeu dans un dipôle quelconque** à un moment donné est égale au produit du courant traversant ce dipôle et de la tension à ses bornes

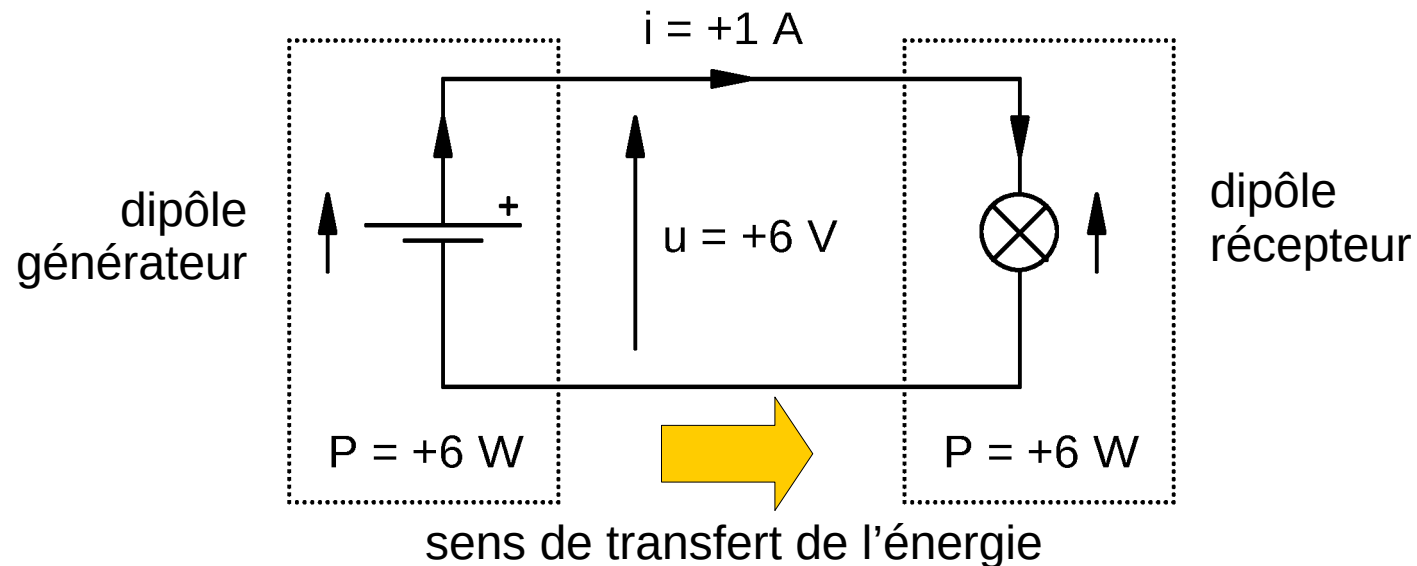
$$p = u i$$

- Dans les dipôles résistifs, elle est **entièrement convertie en chaleur**
- Dans d'autres dipôles elle peut être :
 - ♦ **convertie** dans une autre forme de l'énergie : lumière (lampe), mouvement (moteur)...
 - ♦ **stockée** : condensateur (champ électrostatique), bobine (champ magnétique), accumulateur (énergie chimique donc en fait conversion)...
 - ♦ **produite** : pile ou accumulateur (à partir de l'énergie chimique donc en fait conversion), générateur (à partir de l'énergie mécanique, lumière)...
- Tout dipôle réel **possède une composante résistive**
 - ♦ La conversion, le stockage ou la production de l'énergie électrique **entraîne nécessairement des pertes d'énergie**



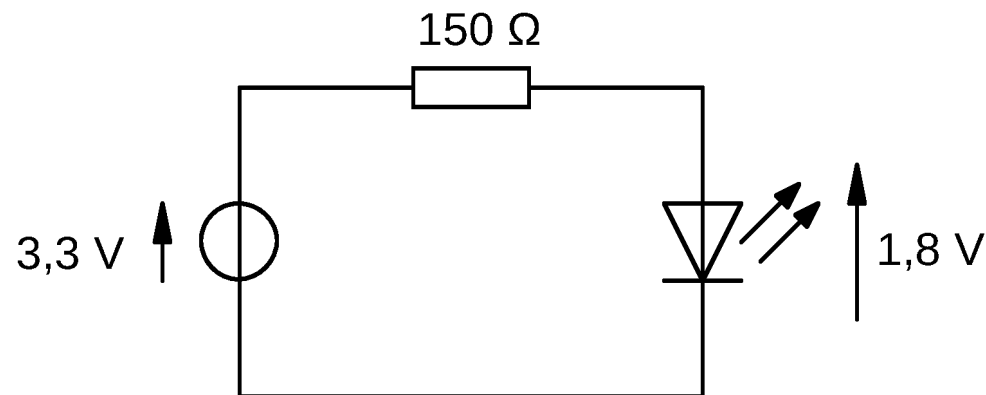
Dipôles générateurs et récepteurs

- Du point de vue de l'énergie, les dipôles sont classifiés en :
 - ♦ dipôles **générateurs (sources)** – ceux qui **fournissent de l'énergie**
 - ♦ dipôles **récepteurs** – ceux qui **consomment de l'énergie**
- Convention pour les sens des flèches du courant et de la tension
 - ♦ **Récepteurs** : comme résistances, car elles sont récepteurs (par la loi de Joule)
 - ♦ **Générateurs** : courant en accord avec la tension – comme pour une pile (selon analyse de phénomènes physiques ou observation empirique)
 - ♦ Ainsi, la puissance sera **positive si le dipôle remplit son rôle supposé** ; dans le cas contraire (rôle contraire à la supposition), elle sera négative



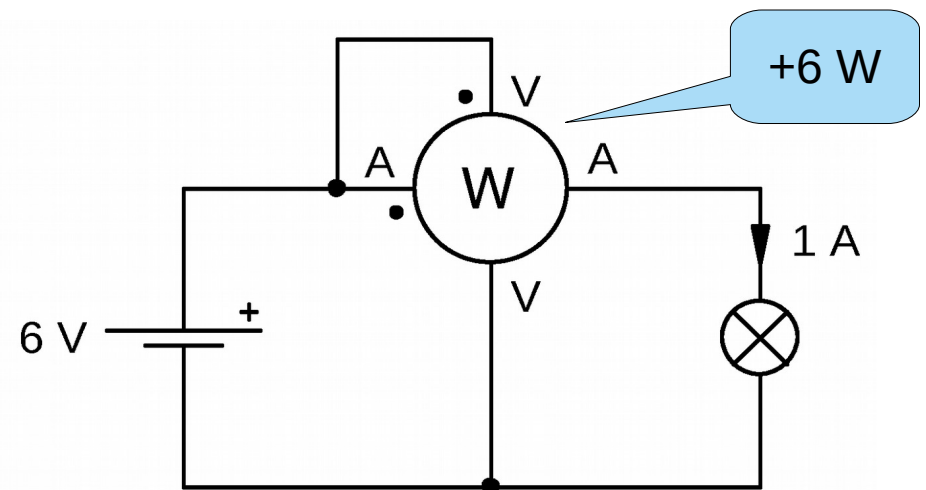
Exercices

- 2.4.1. Trouver la résistance d'une ampoule dont la tension nominale est de 24 V et la puissance nominale est de 70 W.
- 2.4.2. Quelle doit être la puissance admissible d'un résistor de $2,4 \Omega$ s'il est utilisé dans un circuit où il sera traversé par un courant de 5,1 A ?
- 2.4.3. La source de 3,3 V représente la sortie d'un microprocesseur.
 - a) Quel est le courant que cette sortie doit supporter ?
 - b) Calculer la puissance fournie par le microprocesseur, la puissance consommée par la diode et la puissance dissipée par le résistor.



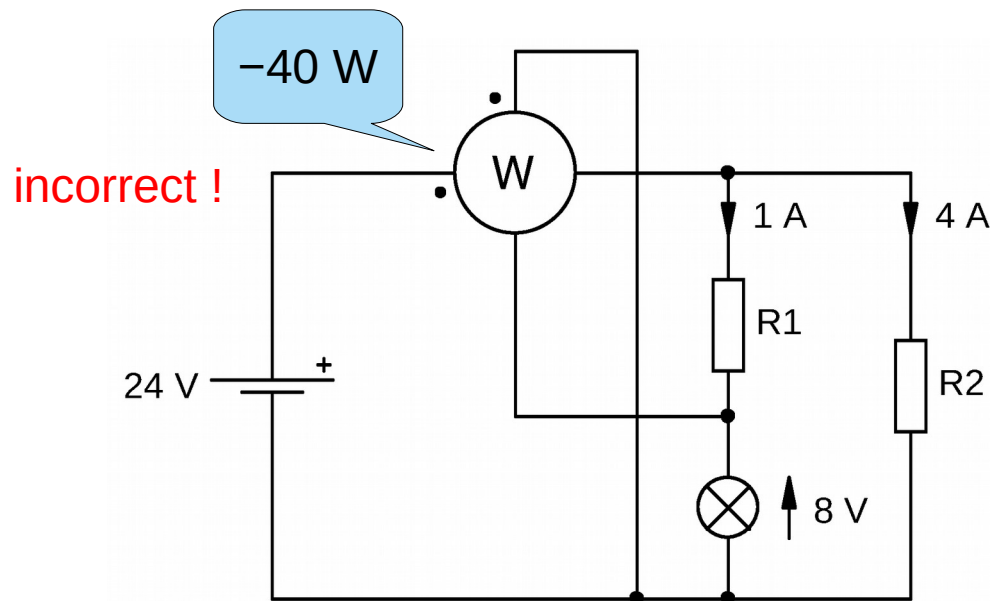
Mesure de la puissance

- Un **wattmètre multiplie une tension par un courant**
- Possède 4 ou 3 bornes
 - ◆ Avec 4 bornes, un pair (V) sert à mesurer la tension et un autre pair (A), à mesurer le courant
 - ◆ Avec 3 bornes, une est commune pour la tension et le courant
 - ◆ Par convention, sur les schémas les « A » sont les horizontales
- Les bornes + et – peuvent être marquées ou seulement les +
 - ◆ Les « A » selon la convention de l'ampèremètre (sens du + à –)
 - ◆ Pour un courant alternatif, ça permet de déterminer le sens du transfert de la puissance
- Valeurs type
 - ◆ 3 W smartphone
 - ◆ 10 W lampe DEL
 - ◆ 500 W ordinateur PC bureau
 - ◆ 2 kW radiateur électrique
 - ◆ 10 kW lampe projecteur cinéma
 - ◆ 50 kW moteur voiture
 - ◆ 10 MW une rame TGV
 - ◆ 1 GW centrale thermoélectrique



Branchement du wattmètre

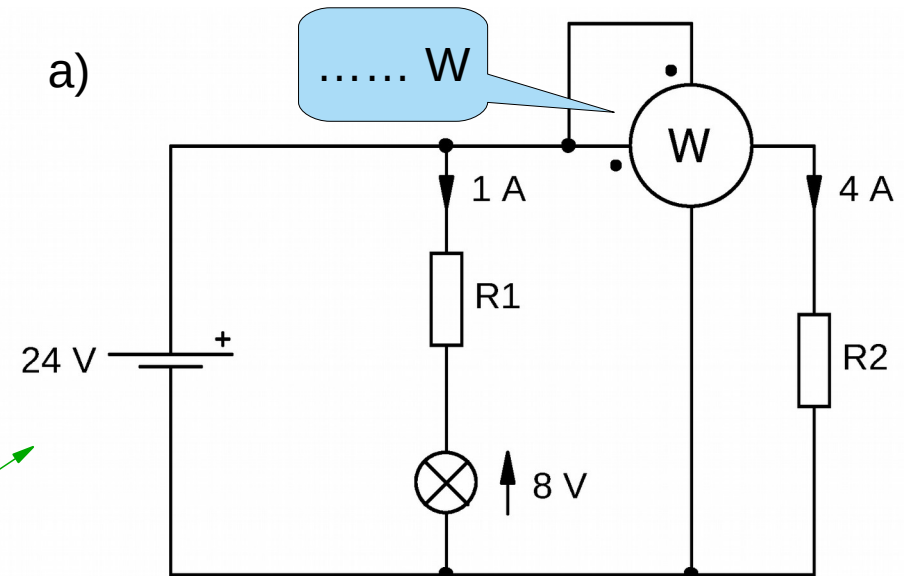
- Le wattmètre branché dans un circuit se comporte :
 - ♦ entre les bornes « A » comme un ampèremètre, alors court-circuit
 - ♦ entre les bornes « V » comme un voltmètre, alors circuit ouvert
- Le nombre indiqué par un wattmètre représente une puissance **seulement s'il est branché de façon que le résultat de la multiplication effectuée exprime vraiment une puissance**
 - ♦ On peut bien le brancher comme ci-dessous, pourtant on ne mesurera guère de puissance



Branchement correct du wattmètre

Exercice

- Alors, comment brancher ?
Ça dépend de ce qu'on veut mesurer.
- 2.5.1. Déterminer les indications du wattmètre ainsi que leurs significations physiques.



correct
pour mesurer

