

LP 47 : Mécanismes de conduction électrique dans les solides

Niveau L3

Prérequis : Mécanique quantique (orbitales moléculaires, niveaux d'énergie, principe de Pauli), force de Lorentz, vecteur densité de courants

Joseph John Thomson : 1897



Paul Karl Ludwig Drüde : 1900



1)1) Hypothèses, cadre d'étude

- Atomes ionisés, les électrons de valence (gaz) se déplacent (participent à la conduction)

l)1) Hypothèses, cadre d'étude

- Atomes ionisés, les électrons de valence (gaz) se déplacent (participent à la conduction)

 Z_a

Electrons par atome

 Z

Electrons de valence (conduction)

$$n \sim \frac{\rho N_A}{M}$$

Densité atomique

l)1) Hypothèses, cadre d'étude : électrons

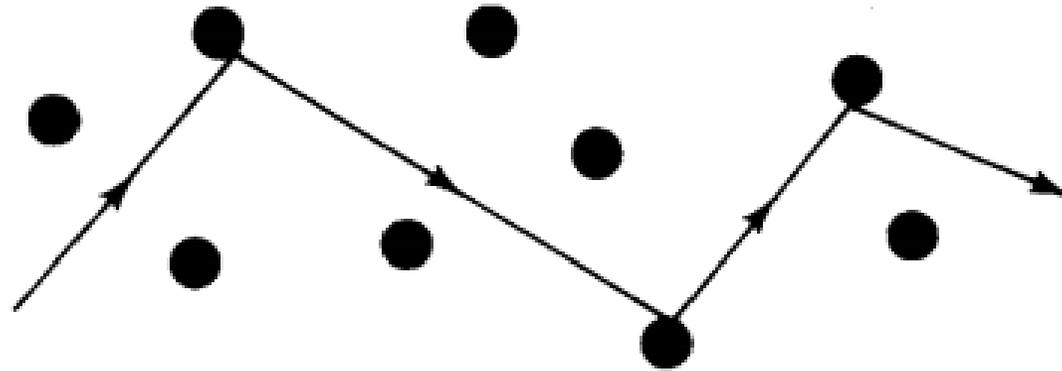


FIG. 1.2 – Trajectoire d'un électron de conduction diffusé par les ions, selon l'image naïve de Drude.

l)1) Hypothèses, cadre d'étude

TAB. 1.1 – Densités d'électrons libres de quelques éléments métalliques^a.

Élément	Z	n (10^{22} cm^{-3})
Li (78 K)	1	4,70
Na (5 K)	1	2,65
K (5 K)	1	1,40
Rb (5 K)	1	1,15
Cs (5 K)	1	0,91
Cu	1	8,47
Ag	1	5,86
Au	1	5,90

1)1) Hypothèses, cadre d'étude

- Electrons indépendants : pas d'interaction électron-électron, et entre deux chocs, pas d'interaction électron-ion
 - Entre deux chocs, électron en mouvement rectiligne uniforme en l'absence de champ extérieur appliqué
 - Seules interactions : collisions avec les ions

l)1) Hypothèses, cadre d'étude : collisions

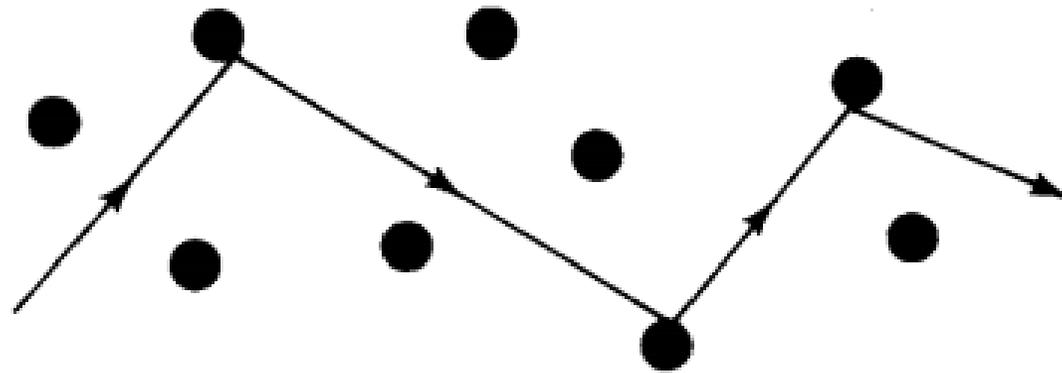


FIG. 1.2 – Trajectoire d'un électron de conduction diffusé par les ions, selon l'image naïve de Drude.

1)1) Hypothèses, cadre d'étude

- Electrons indépendants : pas d'interaction électron-électron, et entre deux chocs, pas d'interaction électron-ion
 - Entre deux chocs, électron en mouvement rectiligne uniforme en l'absence de champ extérieur appliqué
 - Seules interactions : collisions avec les ions
- Collisions instantanées, abruptes, aléatoires

l)1) Hypothèses, cadre d'étude : collisions

- Entre deux chocs :

$$\vec{v} = \sqrt{\frac{3k_b T}{m}}$$

- Probabilité de collision entre t et $t+dt$

$$P(t) = \frac{1}{\tau}$$

l)1) Hypothèses, cadre d'étude : collisions

TAB. 1.3 – Temps de relaxation de Drude en unités de 10^{-14} s^a.

Élément	77 K	273 K	373 K
Li	7,3	0,88	0,61
Na	17	3,2	
K	18	4,1	
Rb	14	2,8	
Cs	8,6	2,1	
Cu	21	2,7	1,9
Ag	20	4,0	2,8
Au	12	3,0	2,1

1)1) Hypothèses, cadre d'étude

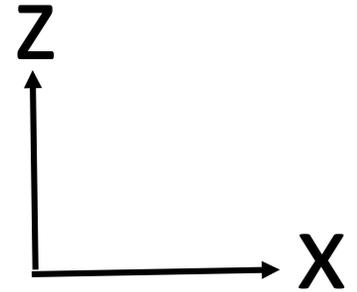
- Electrons indépendants : pas d'interaction électron-électron, et entre de chocs, pas d'interaction électron ion
 - Entre deux chocs, électron en mouvement rectiligne uniforme en l'absence de champ extérieur appliqué
 - Seules interactions : collisions avec les ions
- Collisions instantanées, abruptes, aléatoires

1)1) Hypothèses, cadre d'étude

- Electrons indépendants : pas d'interaction électron-électron, et entre de chocs, pas d'interaction électron ion
 - Entre deux chocs, électron en mouvement rectiligne uniforme en l'absence de champ extérieur appliqué
 - Seules interactions : collisions avec les ions
- Collisions instantanées, abruptes, aléatoires
- Electrons en équilibre thermique avec l'environnement (via les collisions)

1)2) Grandeurs intéressantes

Métal, densité
électronique n



1)2) Grandeurs intéressantes



Champ
appliqué
EXTERIEUR


$$\vec{E}(M) = E_0 \vec{e}_X$$

1)2) Grandeurs intéressantes



Champ
appliqué
EXTERIEUR

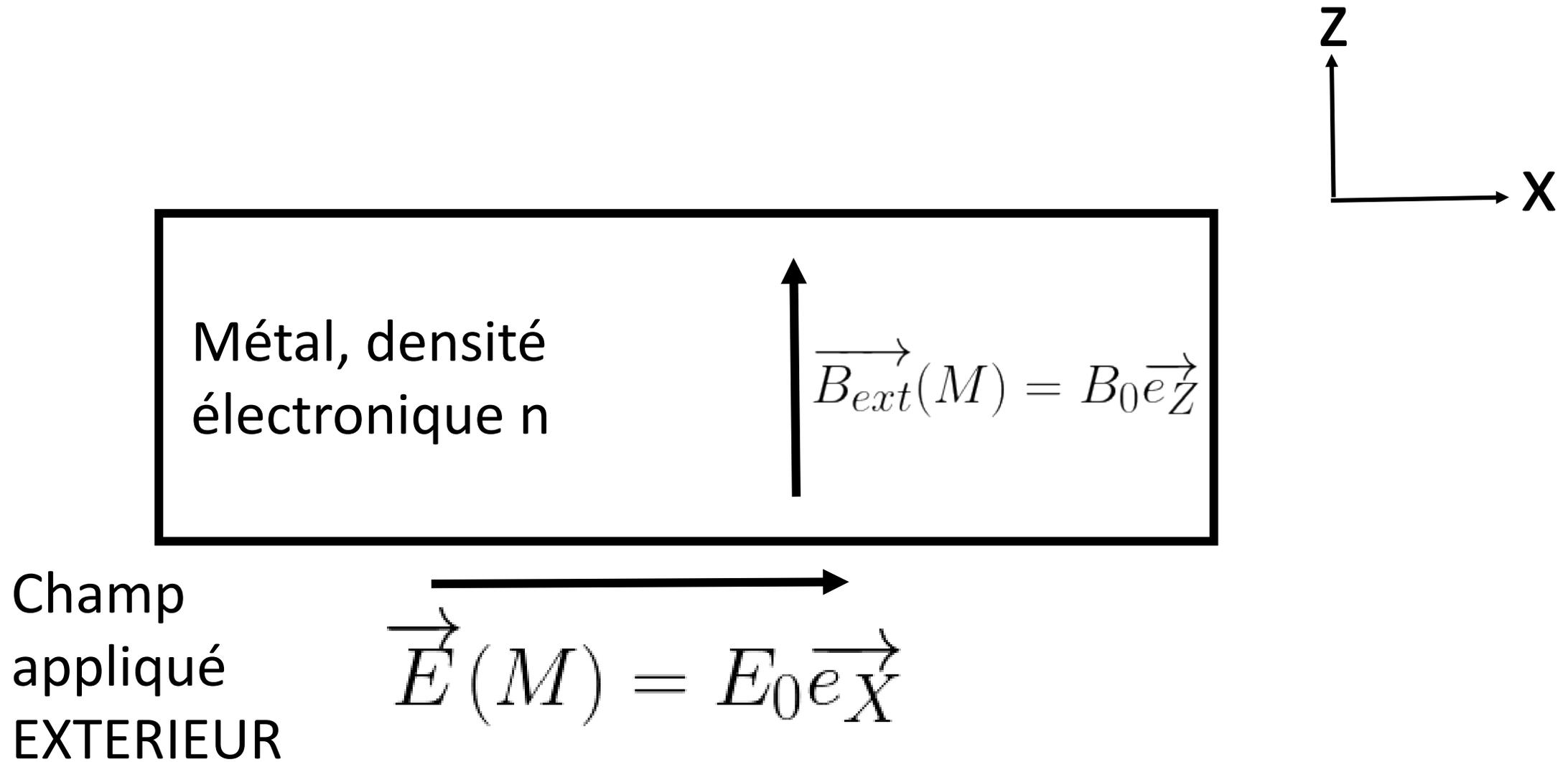
$$\vec{E}(M) = E_0 \vec{e}_X$$

Quelques résistivités en $\mu\Omega/\text{cm}$

TAB. 1.2 – Résistivités électriques de quelques éléments^a.

Élément	77 K	273 K	373 K	$\frac{(\rho/T)_{373\text{ K}}}{(\rho/T)_{273\text{ K}}}$
Li	1,04	8,55	12,4	1,06
Na	0,8	4,2	Fondu	
K	1,38	6,1	Fondu	
Rb	2,2	11,0	Fondu	
Cs	4,5	18,8	Fondu	
Cu	0,2	1,56	2,24	1,05
Ag	0,3	1,51	2,13	1,03
Au	0,5	2,04	2,84	1,02

1)3) Effet Hall



l)4) Limites : constante Hall

Métal	Valence	$-1/R_H n e c$
Li	1	0,8
Na	1	1,2
K	1	1,1
Rb	1	1,0
Cs	1	0,9
Cu	1	1,5
Ag	1	1,3
Au	1	1,5

II)1) Cadre d'étude

- Solide à $T=0K$
- [Animation : de l'atome au solide](#)

Conduction : déplacement de la sphère de Fermi

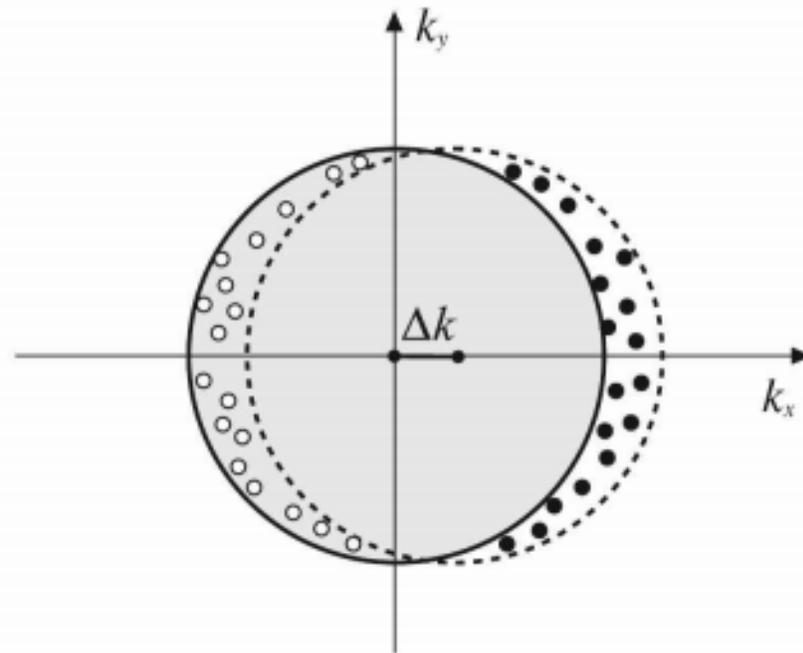
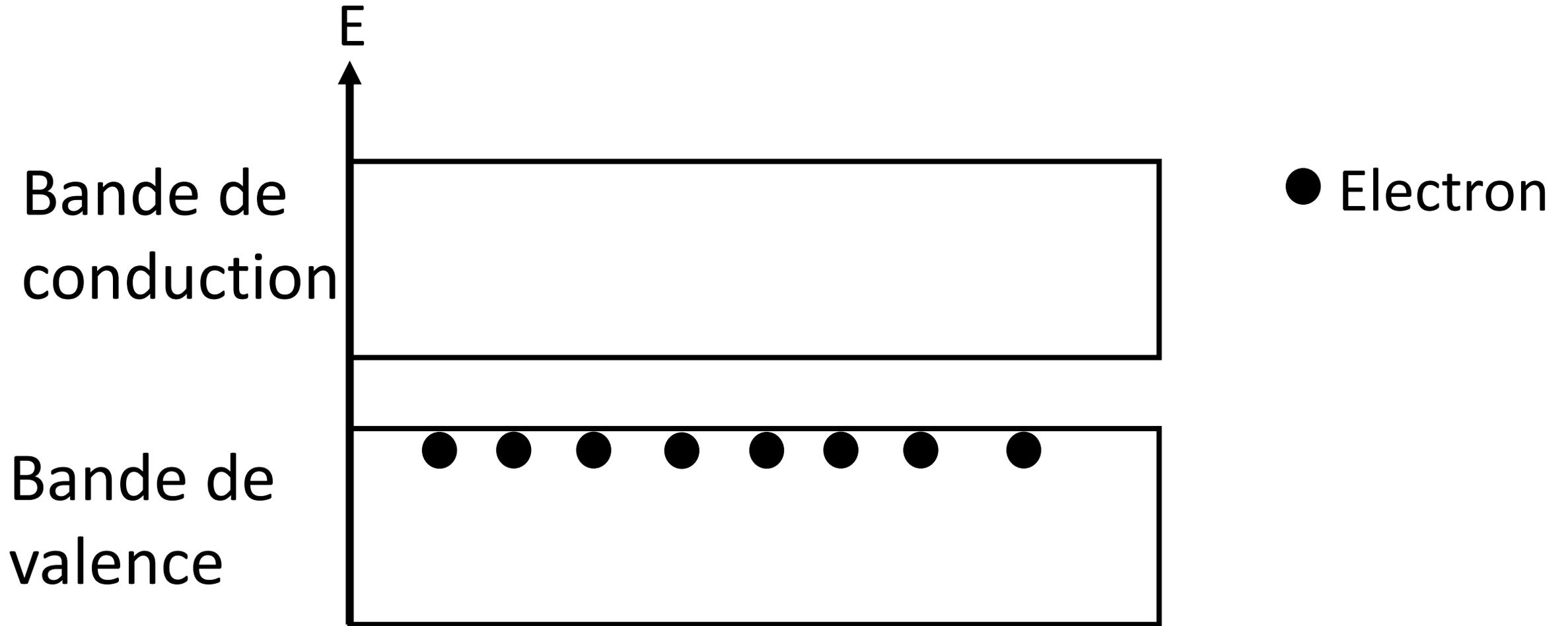
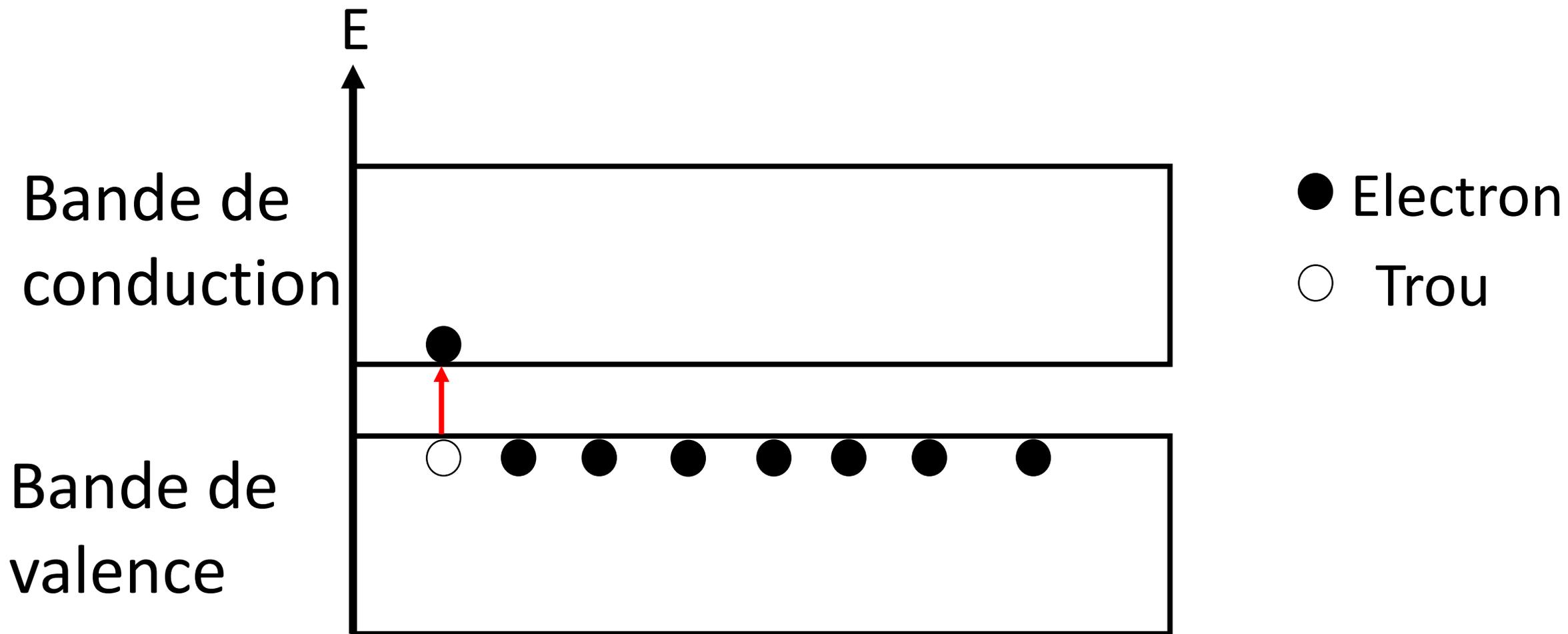


Figure 7.1 Déplacement de la sphère de Fermi dans l'espace des \mathbf{k} sous l'effet du champ électrique. Ce déplacement a été exagéré car il est réalité beaucoup plus faible. La sphère de Fermi initiale est grisée et sa surface est tracée en traits pleins alors que celle de la la sphère de Fermi déplacée est tracée en pointillés. Les électrons excités, i.e. sortant de la sphère de Fermi initiale, sont symbolisés par des cercles pleins et les trous formés dans la sphère de Fermi initiale par des cercles vides.

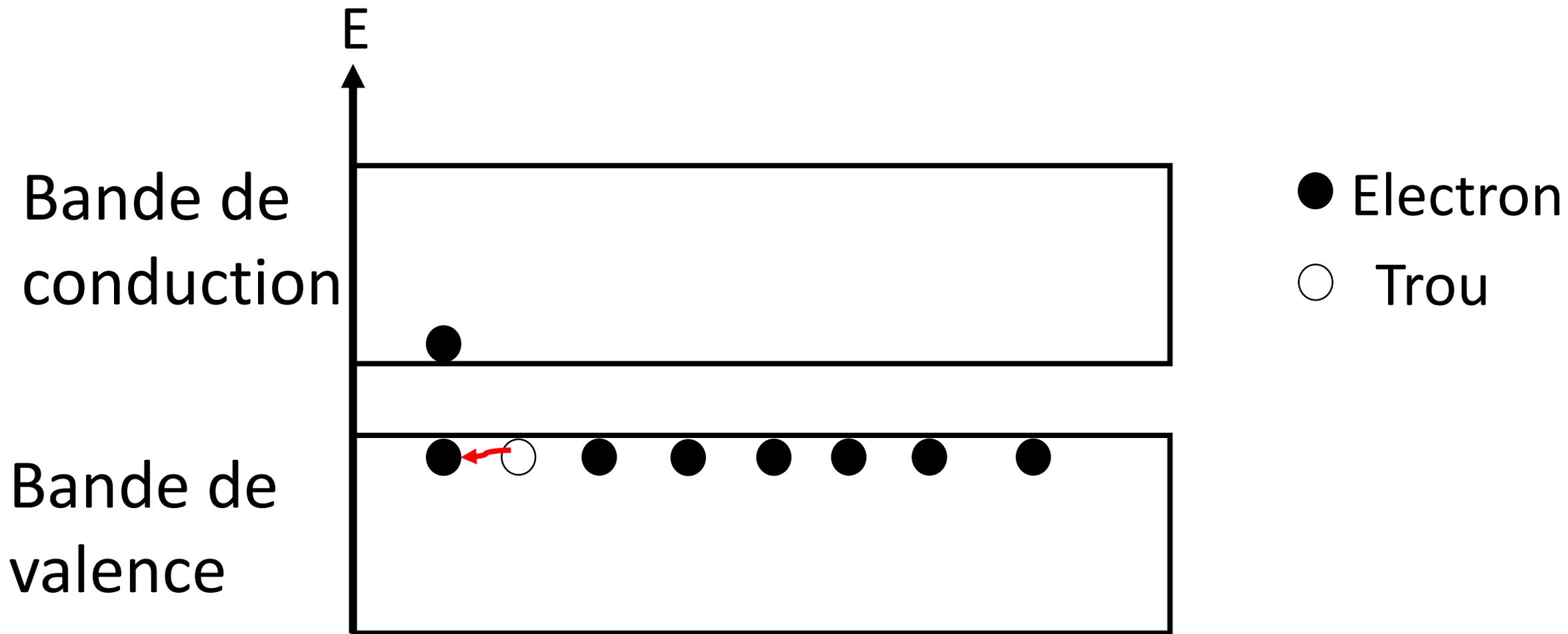
II) 4) Notion de trou



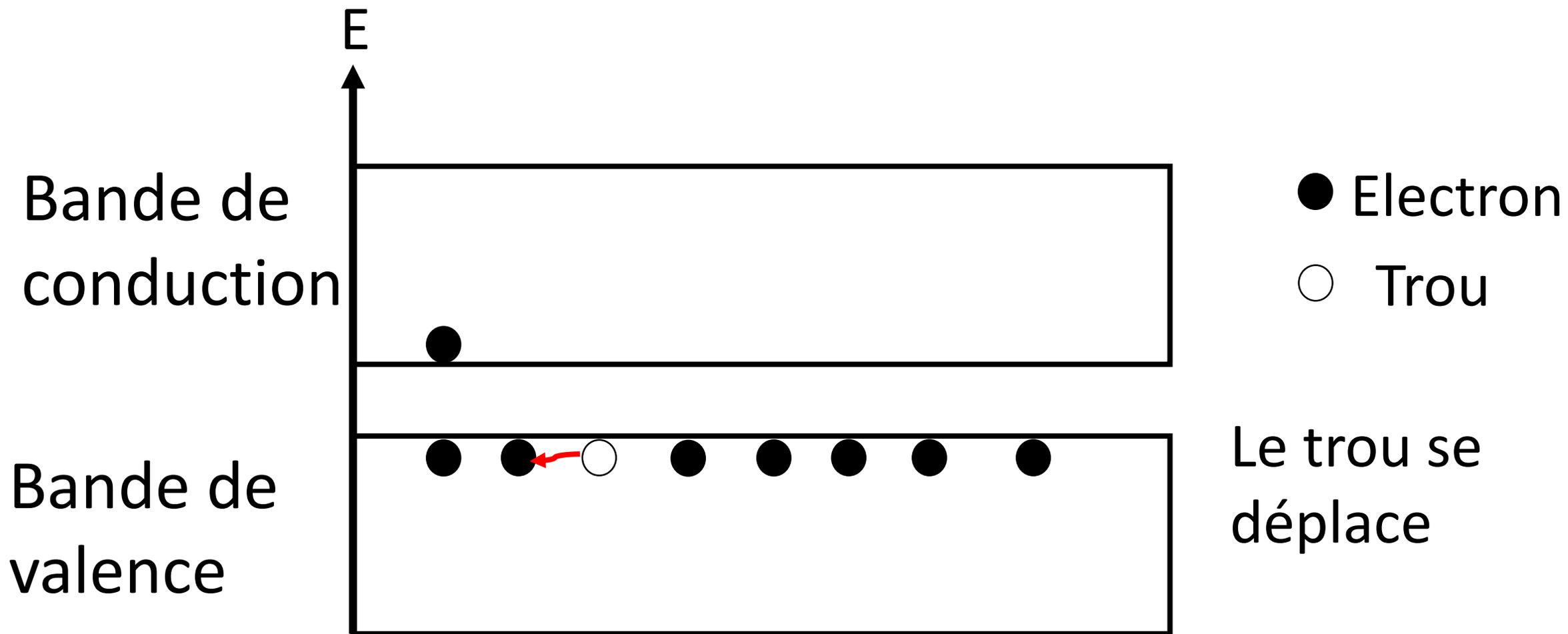
II) 4) Notion de trou (T non nulle)



II) 4) Notion de trou (T non nulle)



II) 4) Notion de trou (T non nulle)



Caractéristiques de quelques semi-conducteurs

Tableau 7.1 Le gap (en eV), la mobilité des électrons, μ_e (en $\text{cm}^2/\text{V}/\text{s}$), et celle des trous, μ_h , sont indiqués pour quelques semi-conducteurs courants. La notation de type (III–V), située après le nom du semi-conducteur, indique que l'un des éléments appartient à la colonne III de la classification périodique et l'autre à la colonne V. Ces données sont tirées de l'ouvrage de J.Singh cité en référence.

Semi-conducteur	Gap (eV à 300 K)	μ_e ($\text{cm}^2/\text{V}/\text{s}$)	μ_h ($\text{cm}^2/\text{V}/\text{s}$)
<i>Si</i>	1,12	1 500	450
<i>Ge</i>	0,66	3 900	1 900
<i>SiC</i> (IV–IV)	3	400	50
<i>AsGa</i>	1,42	8 500	400
<i>GaP</i> (II–V)	2,26	110	75
<i>AsIn</i> (III–V)	0,36	33 000	460
<i>CdTe</i> (II–VI)	1,56	1 050	100
<i>PbTe</i> (IV–VI)	0,31	6 000	4 000