

II. Les Propriétés électriques

Propriétés les plus importantes sont la conductivité et la résistivité électriques qui dépendent directement de la nature du matériau

Un conducteur électrique est un matériau qui possède des électrons mobiles qui pourront se déplacer facilement dans sa structure

- Applications :*
- Transport de l'énergie électrique sur grandes distances (lignes haute tension) ;*
 - Augmentation des fréquences des microprocesseurs dans les micro-ordinateurs.*

2°) Les différentes catégories de conducteurs électriques

Il existe 4 catégories de conducteurs électriques :

- Isolants : $\sigma \leq 10^{-3} \Omega^{-1}.\text{m}^{-1}$
- Semi-conducteurs : $10^{-3} \leq \sigma \leq 10^5 \Omega^{-1}.\text{m}^{-1}$
- Conducteurs : $10^5 \leq \sigma \leq 10^{11} \Omega^{-1}.\text{m}^{-1}$
- Supraconducteurs : $\sigma > 10^{11} \Omega^{-1}.\text{m}^{-1}$

2°) La conductivité décrite par le modèle de Drude

Dans un conducteur, on va distinguer :

- les électrons de conduction, supposés libres, capables de se déplacer
- les électrons de valence, qui restent localisés autour du noyau.

Densité électronique de conduction n

$$n = \rho \frac{\mathcal{N}_A N_{\text{val}}}{M}$$

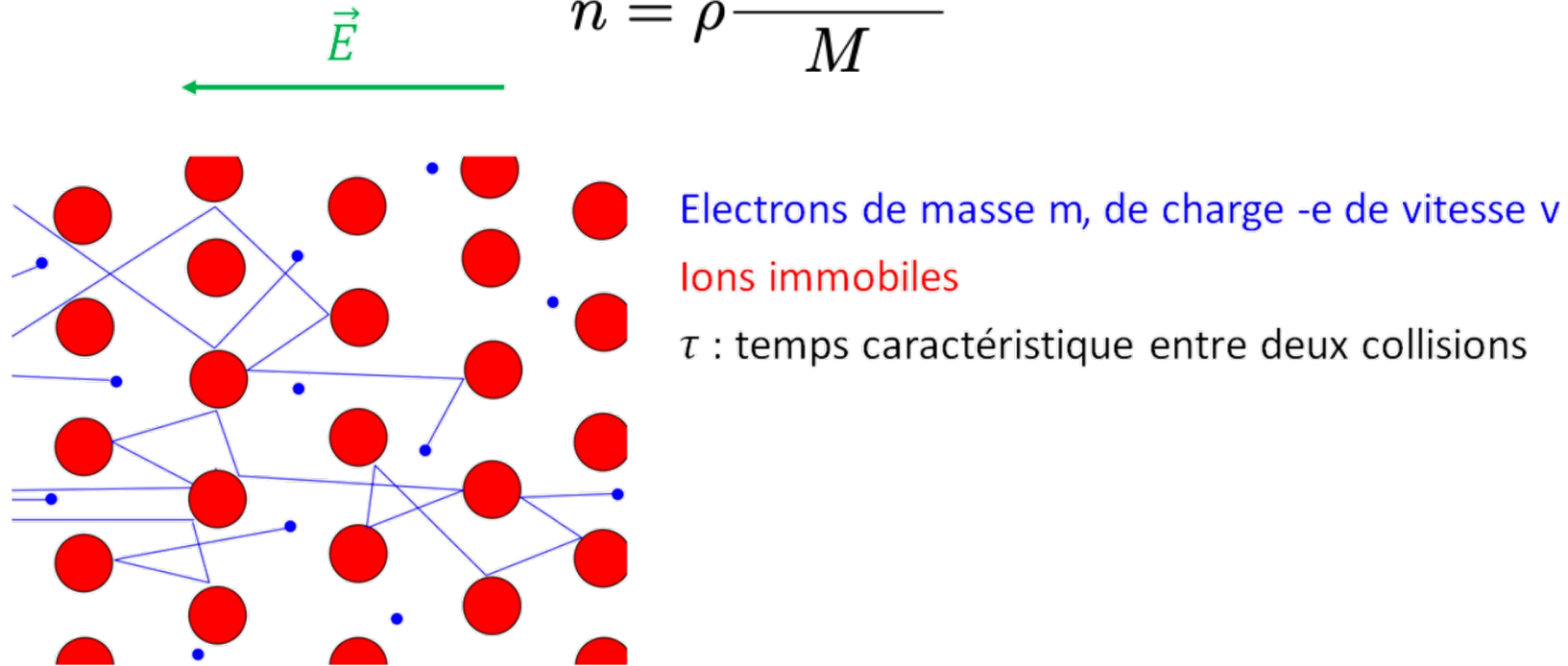


FIGURE 1 – Schématisation de la physique qui sous-tend le modèle de Drude

a) Influence des niveaux d'énergie → approche quantique

Ce qui distingue ces 4 catégories de conducteurs électriques c'est la répartition des orbitales atomiques et donc la répartition des niveaux d'énergie

Rappel :

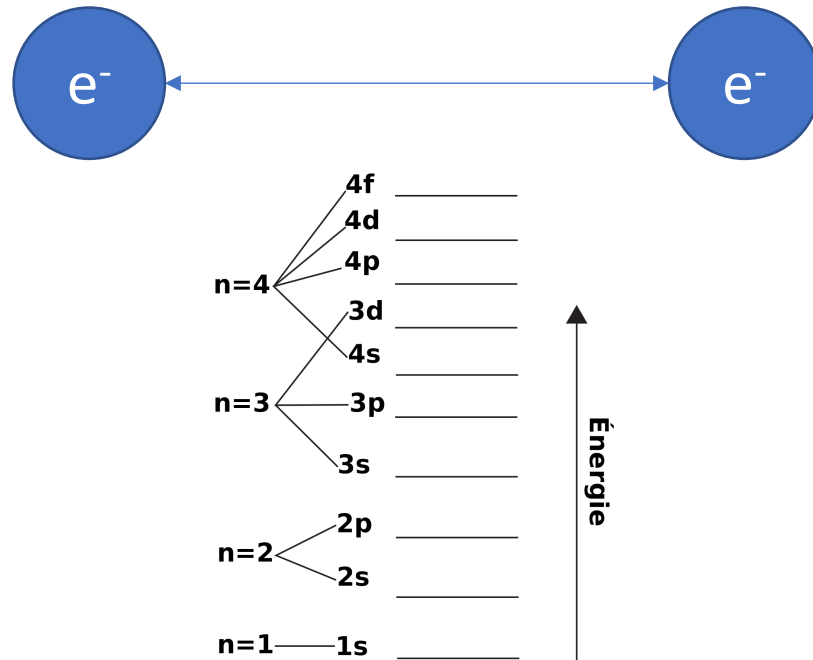
Chaque atome possède des niveaux d'énergie discrets que peuvent occuper des électrons disposés en couches et en sous-couche

Pour chaque sous-couche s, p, d et f, il existe respectivement un, trois, cinq et sept états possibles.

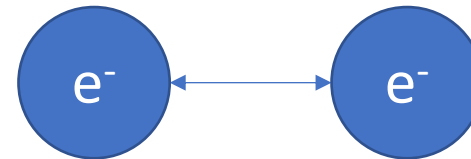
Principe de Pauli : Dans la plupart des atomes, les électrons n'occupent que les états ayant la plus faible énergie, avec deux électrons de spin opposé par état

Rappel :

Lorsque la distance séparant les atomes est relativement grande, chacun d'eux est indépendant de tous les autres et adopte les niveaux d'énergie atomique et la configuration électronique propres à un atome isolé.



Le rapprochement mutuel des atomes a pour effet que les électrons commencent à subir l'action qu'exercent les électrons et le noyau de chacun des atomes adjacents. Il s'ensuit que tous les états atomiques distincts peuvent se diviser en un ensemble d'états électroniques très rapprochés dans le solide et former une bande d'énergie des électrons.



Rappel :

Le nombre d'états de chaque bande est égal au nombre total de tous les états auxquels les N atomes contribuent. Les propriétés électriques d'un matériau solide découlent de sa structure de bandes électroniques, c'est-à-dire de l'arrangement de ses bandes électroniques extérieures et de la façon dont elles sont occupées par des électrons

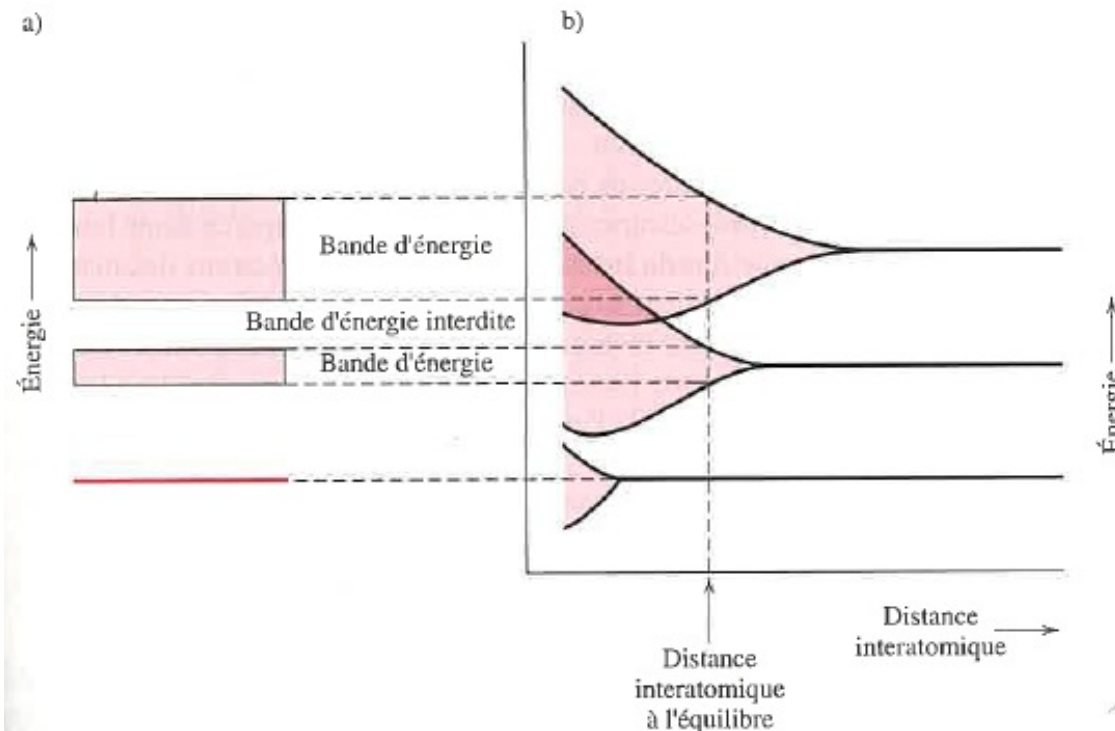


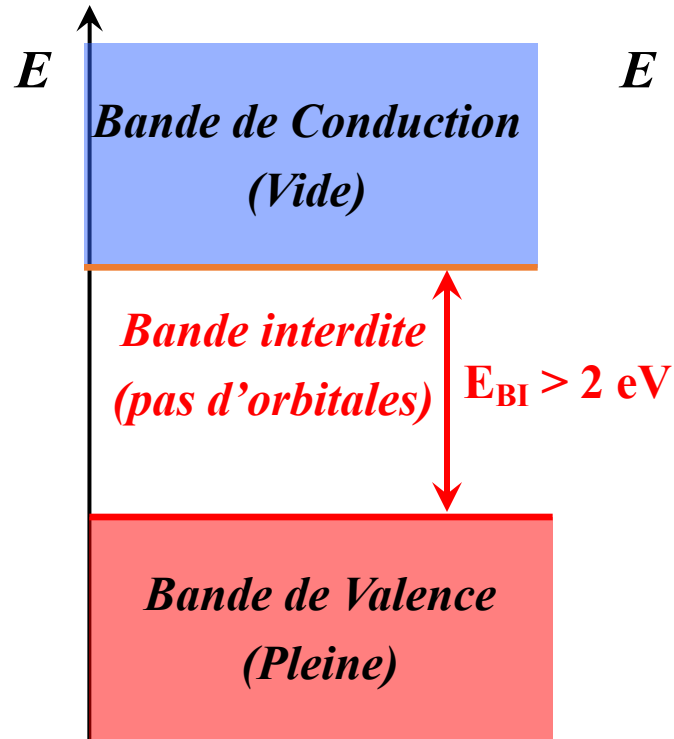
FIGURE 19.3 a) Représentation traditionnelle de la structure des bandes d'énergie électronique d'un matériau solide lorsque la distance interatomique est à l'équilibre. b) Représentation de l'énergie des électrons en fonction de la distance interatomique dans un agrégat d'atomes qui illustre la façon d'obtenir la structure des bandes d'énergie à la distance d'équilibre en a).

Tiré de Z.D. JASTRZEBSKI, *The Nature and Properties of Engineering Materials*, 3^e éd. © 1987, John Wiley & Sons, New York. Reproduction autorisée par John Wiley & Sons, Inc.

à $T = 0\text{ K}$:

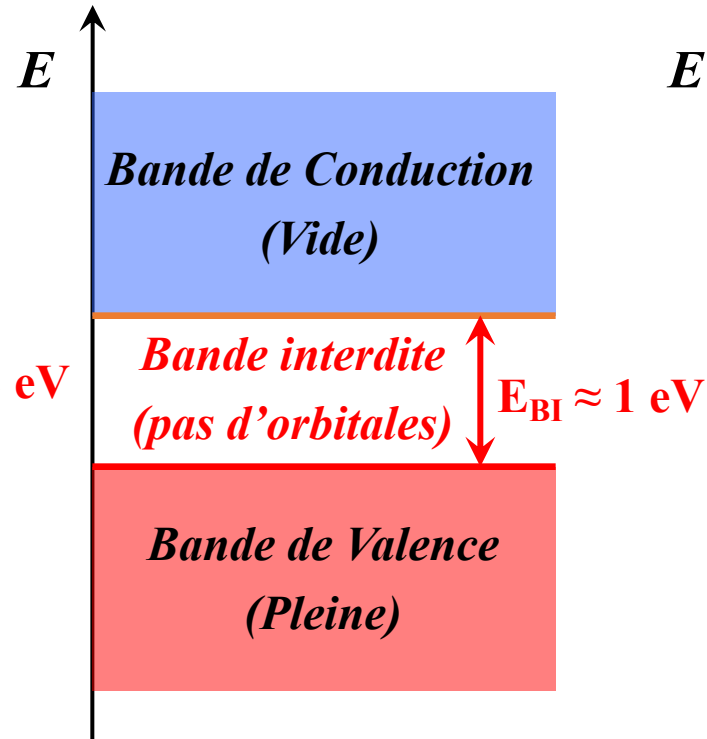
II. Propriétés électriques

Isolant



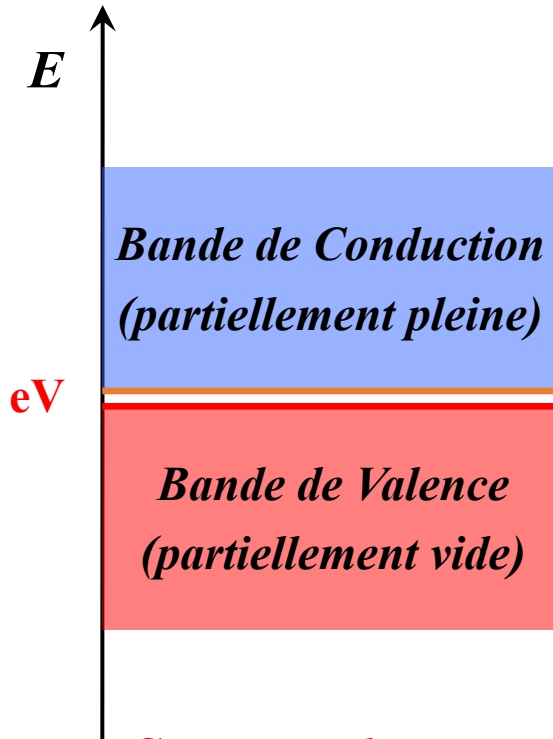
Diamant $E_{BI} = 5,4\text{ eV}$

Semi-conducteur



*Silicium $E_{BI} = 1,1\text{ eV}$
Germanium $E_{BI} = 0,7\text{ eV}$*

Conducteur



*Supraconducteurs
recouvrement $BdC-BdV$
en dessous température
critique T_c*

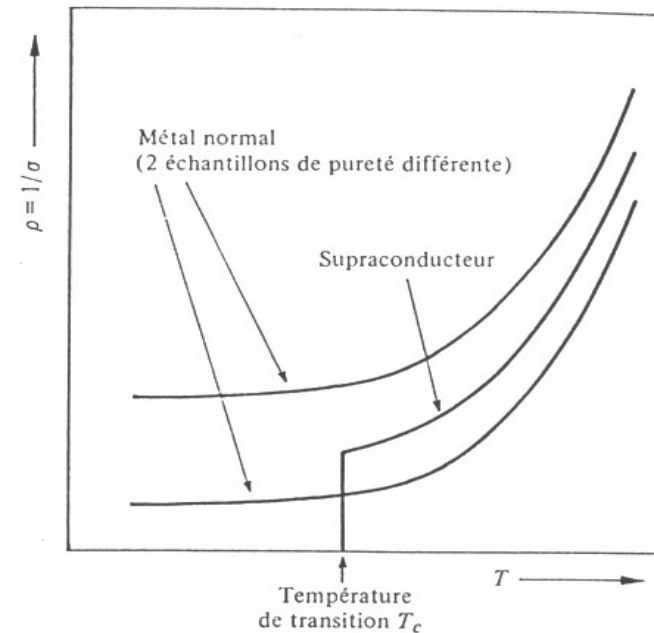
b) Facteurs influençant la conductivité électrique

2 facteurs principaux : Température et Taux d'impuretés

- Si T augmente : - Pour les Conducteurs et Supraconducteurs :

La conductivité diminue car les électrons qui s'agitent de plus en plus dans la bande de Valence se gênent dans leurs déplacements mutuels

$$\ln(\sigma) = \ln(\sigma_0) - \frac{E_g}{2kT}$$



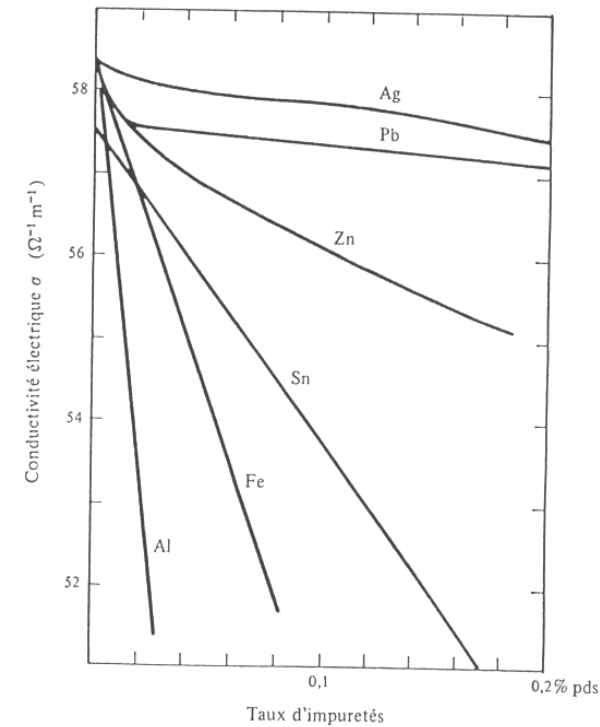
Variation de la résistivité d'un métal normal et d'un métal supraconducteur avec la température. La température T_c marque la transition entre l'état conducteur et supraconducteur.

II. Propriétés électriques

- Si impuretés augmentent : - Pour les Conducteurs et Supraconducteurs :

La conductivité diminue car les impuretés de petites dimensions gênent le déplacement des électrons en occupant des sites interstitiels et les impuretés de grandes dimensions déforment la structure (modification trajet des électrons)

De plus, certaines impuretés comme les non-métaux (ex: Oxygène) captent les électrons !!!



- Si impuretés augmentent :

- Pour semi-conducteurs et isolants :

La conductivité augmente car les impuretés (qui ont leurs propres niveaux d'énergie) créent des niveaux d'énergie dans la bande interdite

Ce phénomène est très important car le dopage permet lors de modifier/augmenter comme on le souhaite la conductivité des semi-conducteurs

c) Dopage des semi-conducteurs

Dopage consiste à additionner des impuretés de natures déterminées en très faibles quantités dans le semi-conducteur

Pour ne pas perturber la structure des semi-conducteurs (colonne 14 : Si, Ge,...), le dopage s'effectue avec des éléments des colonnes voisines qui ont des dimensions similaires aux éléments de la colonne 14.

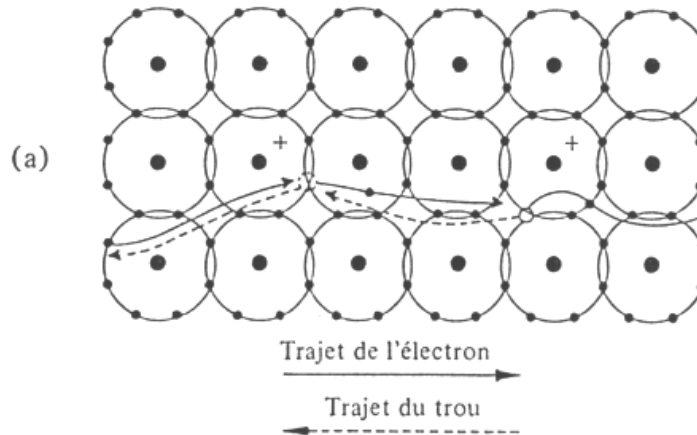
- Dopage p (positif) :
 - *addition d'éléments qui possèdent moins d'électrons que le semi-conducteur (création de trous)*
 - *dopage avec éléments de la colonne 13 (B, Al, Ga,...)*
- Dopage n (négatif) :
 - *addition d'éléments qui possèdent plus d'électrons que le semi-conducteur (électrons supplémentaires)*
 - *dopage avec éléments de la colonne 15 (P, As, Sb,...)*

Semi-conducteur non-dopé : semi-conducteur intrinsèque

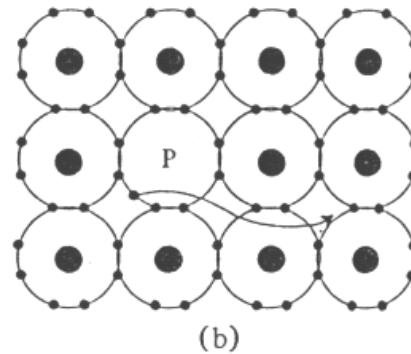
Semi-conducteur dopé : semi-conducteur extrinsèque

*S-C non dopé
Déplacement des
électrons par sauts
entre les sites vacants
(trous)*

*Pour électroniciens
le déplacement des
électrons engendre
un déplacement des
trous*



*Dopage n
(excès électrons)*



*Dopage p
(création trous)*

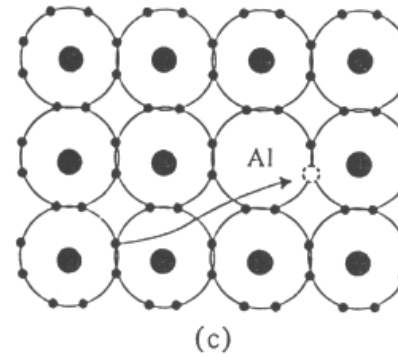
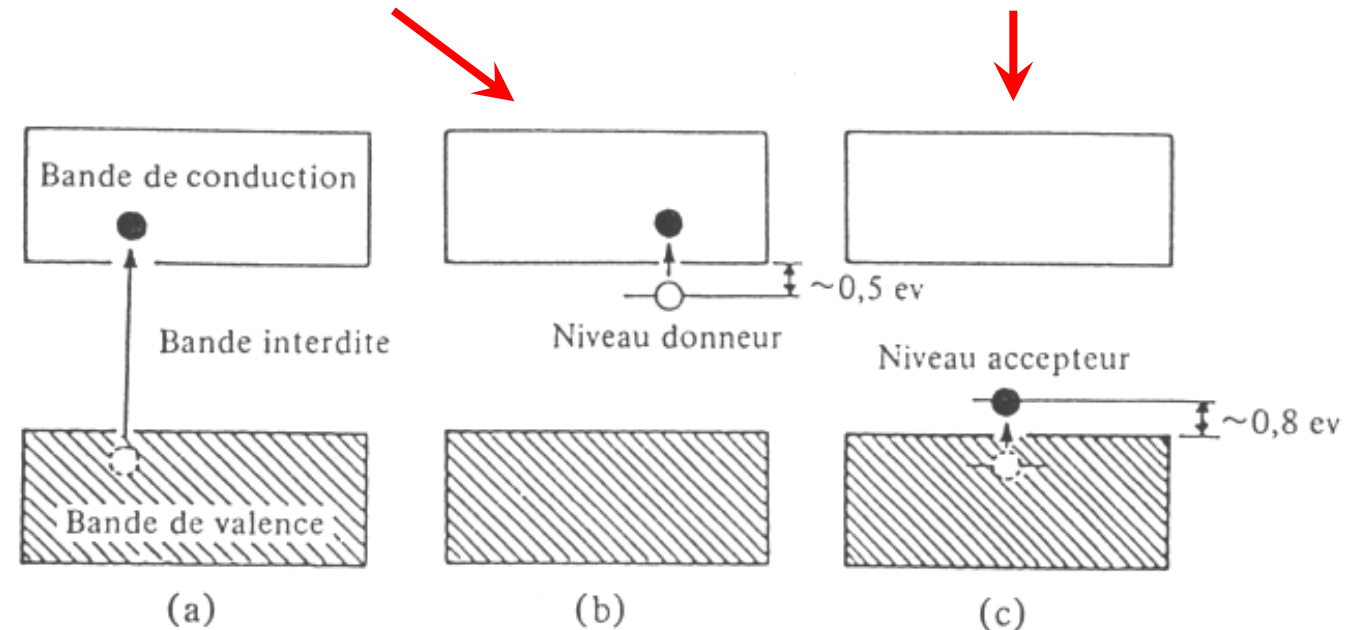


Schéma corpusculaire élémentaire : (a) d'un semi-conducteur intrinsèque; (b) d'un semi-conducteur extrinsèque dopé au phosphore (type n); (c) à l'aluminium (type p).

L'addition d'éléments dopants crée des niveaux d'énergie dans la bande interdite qui vont faciliter le déplacement des électrons

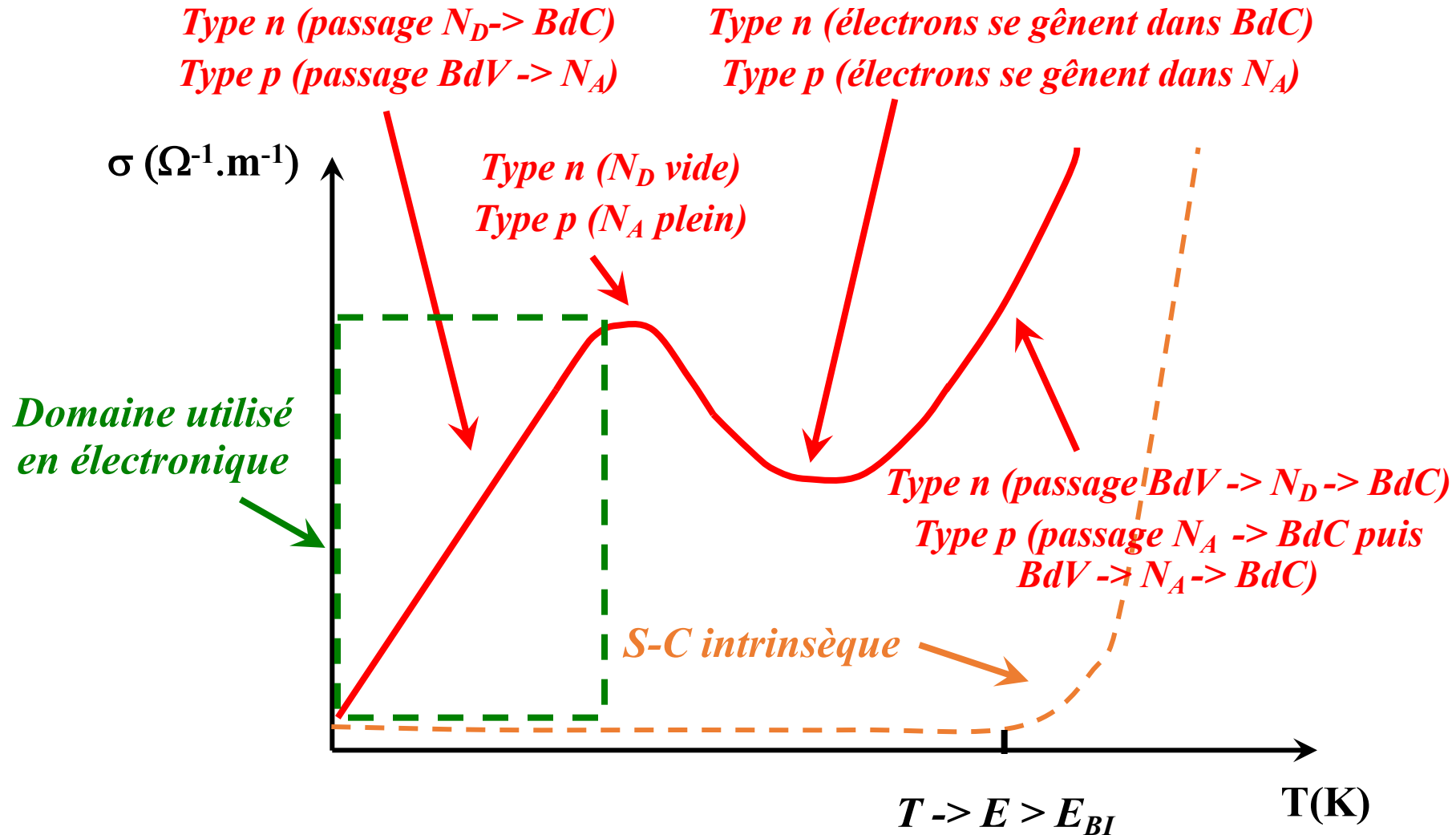
*Dopage n
(création de niveaux
donneurs d'électrons : N_D)*

*Dopage p
(création de niveaux
accepteurs d'électrons : N_A)*



Niveaux énergétiques: (a) d'un semi-conducteur intrinsèque; (b) extrinsèque de type n; (c) de type p.

L'addition d'éléments dopants crée des niveaux d'énergie dans la bande interdite qui vont faciliter le déplacement des électrons



Bilan : Calcul de la conductibilité électrique σ des semi-conducteurs (S/m)

Semi-conducteur intrinsèque :

$$\sigma = n_e |e| \mu_e + n_t |e| \mu_t$$

$$n_e = n_t$$

n_e : nombre d'électrons libres par unite de volume

n_t : nombre de trous par unite de volume

e : Charge élémentaire ($1,6 \times 10^{-19}$ C)

μ_e : Mobilité des électrons ($m^2.V^{-1}.s^{-1}$)

μ_t : Mobilité des trous ($m^2.V^{-1}.s^{-1}$)

Semi-conducteur de type n :

$$n_e \gg n_t$$

$$\sigma = n_e |e| \mu_e$$

Semi-conducteur de type p :

$$n_t \gg n_e$$

$$\sigma = n_t |e| \mu_t$$

Utilisation des semi-conducteurs

