

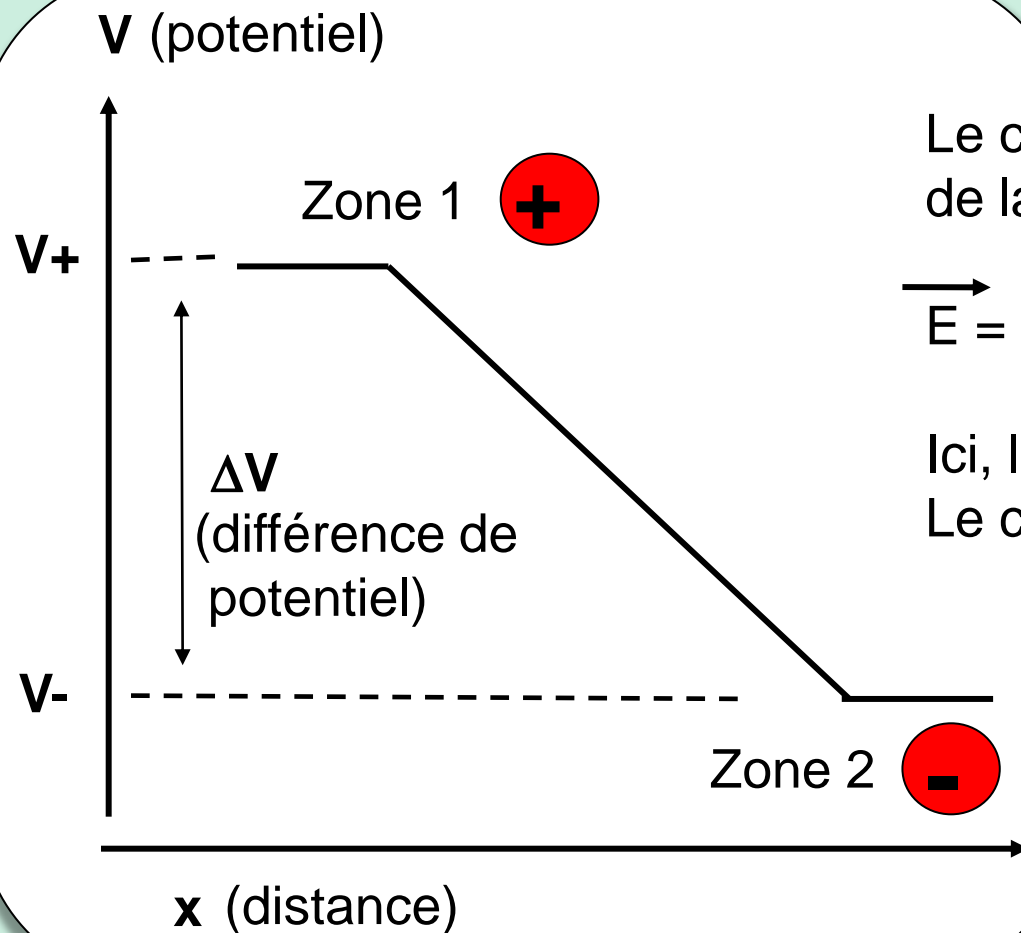
II. Porteurs de charge et dopage

A. Généralités

1. Champ électrique ; Différence de potentiel ; Energie potentielle

\vec{E} (champ électrique)

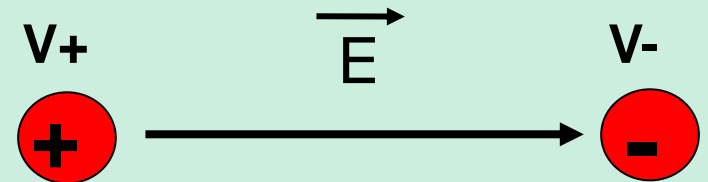
Un champ électrique s'établit entre 2 zones de potentiel électrique différent (séparées par un isolant électrique)



Le champ E est l'opposé de la pente de la variation de V par rapport à x

$$\vec{E} = - \text{grad } V = - dV/dx \quad \vec{x}$$

Ici, la pente est négative selon x
Le champ est donc dirigé selon x croissant



Le champ électrique est tjrs dirigé de + vers -

Energie potentielle

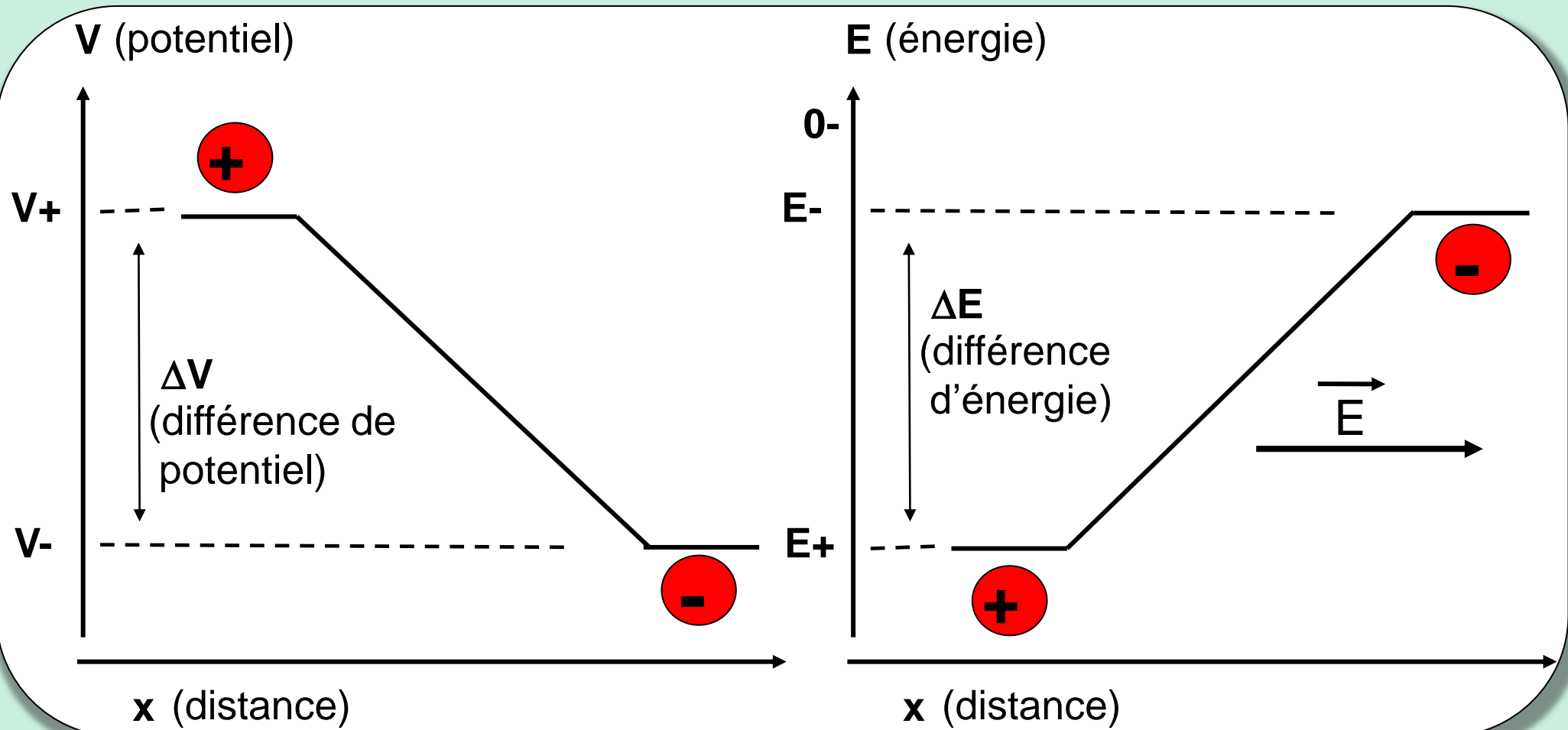
L'énergie potentielle (électrique) dans un matériau dépend du potentiel.

Si q est une charge dans le matériau, son énergie est :

$$E = q \times V$$

Pour des électrons, $q = -e$ (négatif)

Les échelles de V et de E sont donc opposées



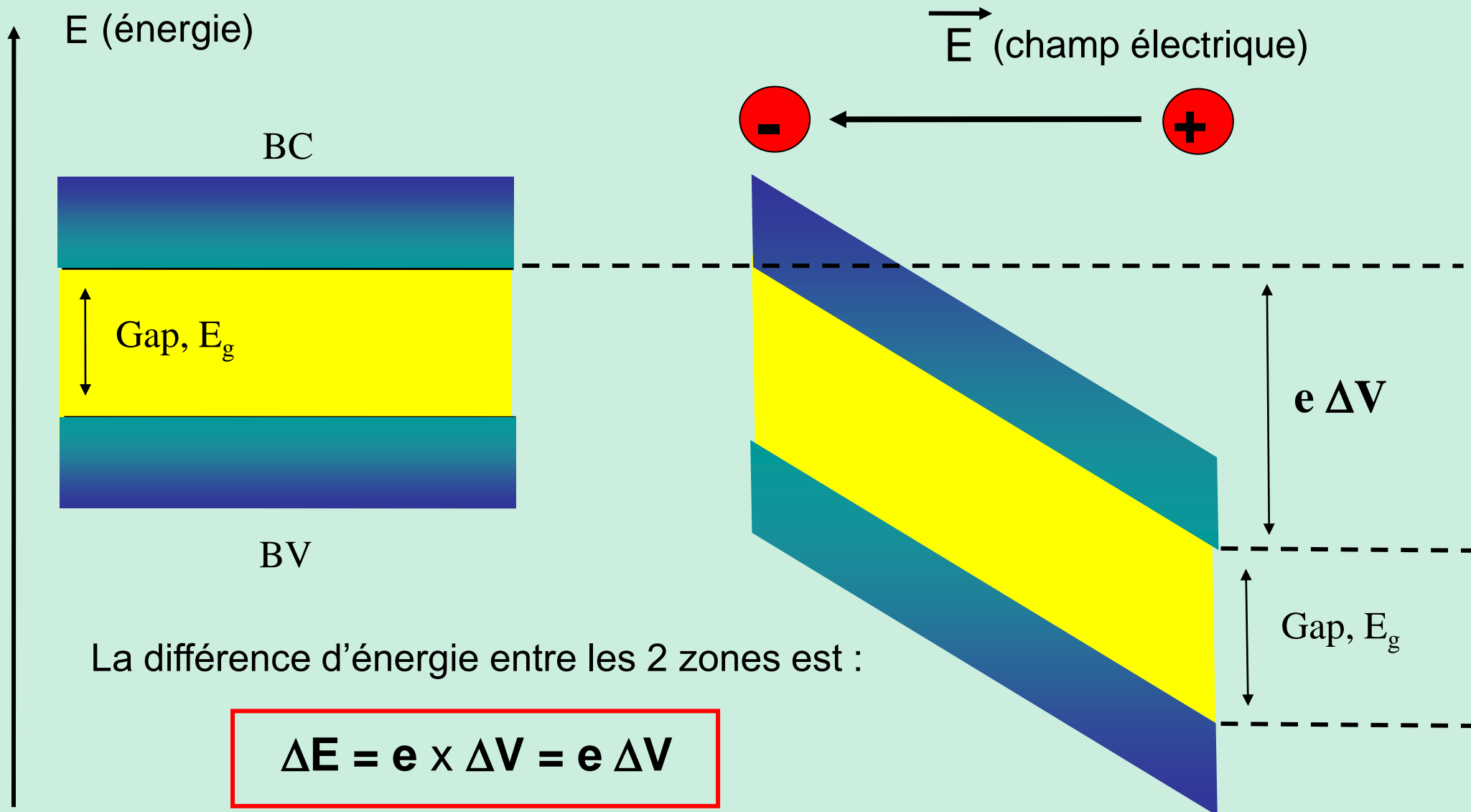
La différence d'énergie est :

$$\Delta E = -e \Delta V$$

2. La polarisation d'un semi-conducteur (déformation des bandes)

Cela revient à appliquer une différence de potentiel (**ddp**) V au semicon.

Les bandes suivent l'énergie potentielle (cf. slide précédent)



3. Le déplacement de charge dans un semi-conducteur

Un courant électrique est un **déplacement de charges**, sous l'effet d'un champ électrique E .

Les charges $+$ se déplacent toutes dans un sens

Les charges $-$ se déplacent toutes dans l'autre sens

Il faut donc des charges libres de se déplacer.

Ces charges ne sont libres que sur des bandes d'énergies incomplètes :

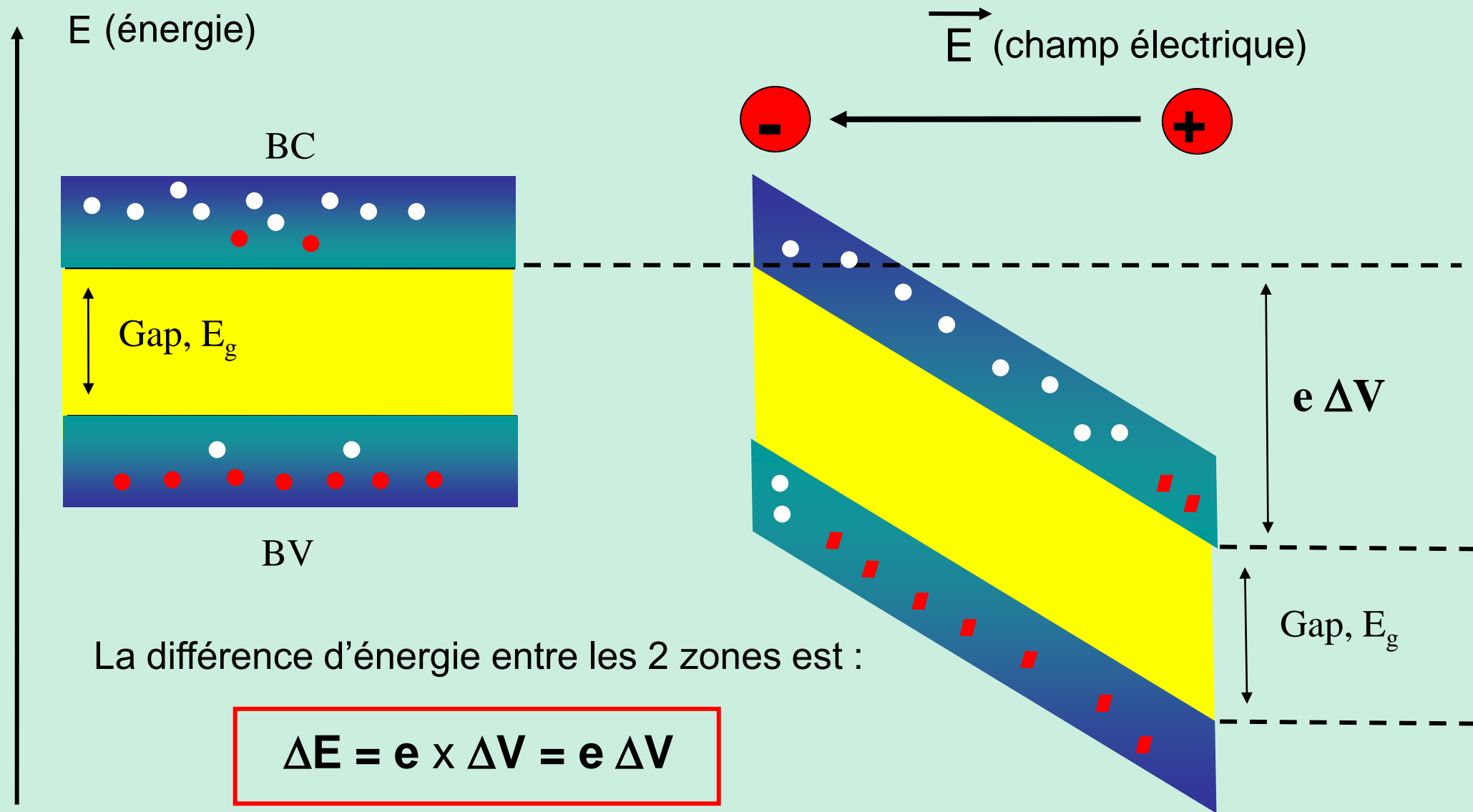
- **Les électrons e^- sont libres sur la bande de conduction**
- **Les trous (h^+) sont libres sur la bande de valence**

Qu'est-ce qu'un trou ?

Un trou est un “défaut d'électron”, ou un “manque d'électron”).

Il y a bcp. de trous là où il y a peu d'électrons (la BC)

Il y a peu de trous là où il y a bcp. d'électrons (la BV)



A retenir:

- les électrons se déplacent dans le sens opposé au champ E
- les trous se déplacent dans le sens du champ E

C'est la force de Coulomb : $\vec{F} = q \vec{E}$

Seuls les électrons et les trous "libres" se déplacent. Pas les autres

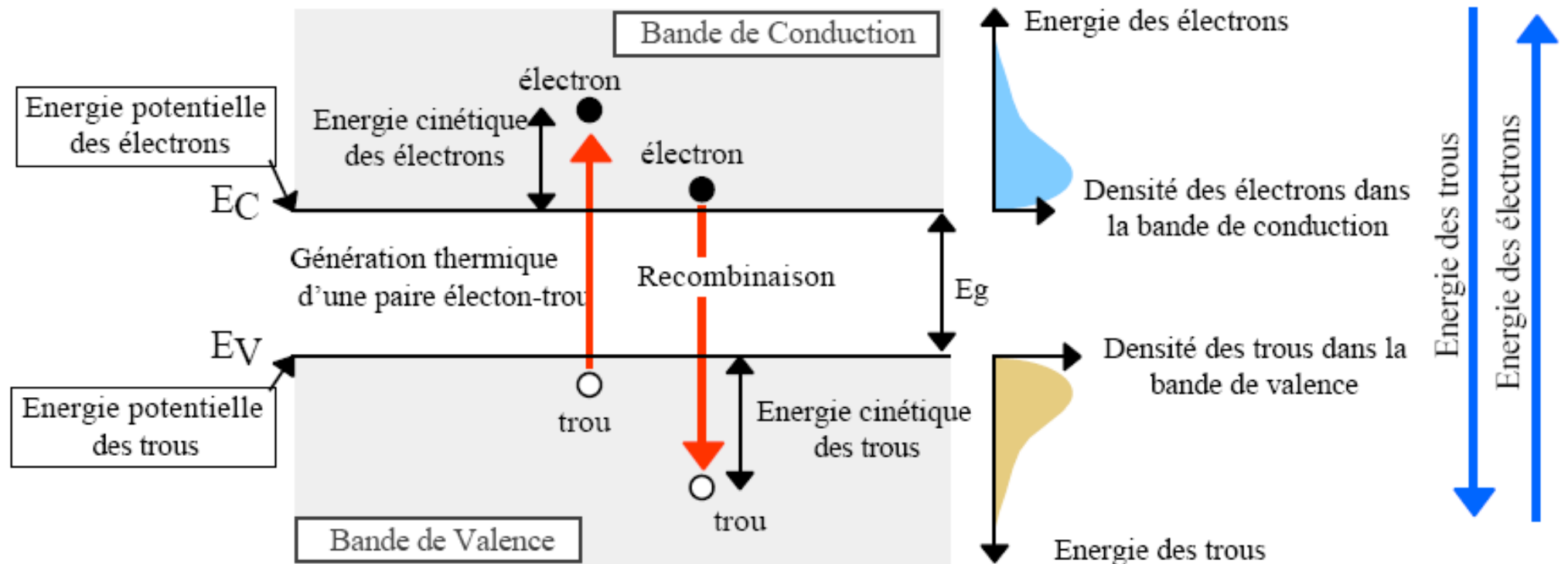
B. Semi-conducteurs intrinsèques

1. Pourquoi y a-t-il des e^- dans la BC et des h^+ dans la BV ?

En plus de l'énergie potentielle, les porteurs de charges peuvent aussi acquérir une **énergie thermique**.

$$E_T = \frac{1}{2} kT$$

Des e^- “sautent” dans la BC, et des h^+ “sautent” dans la BV.

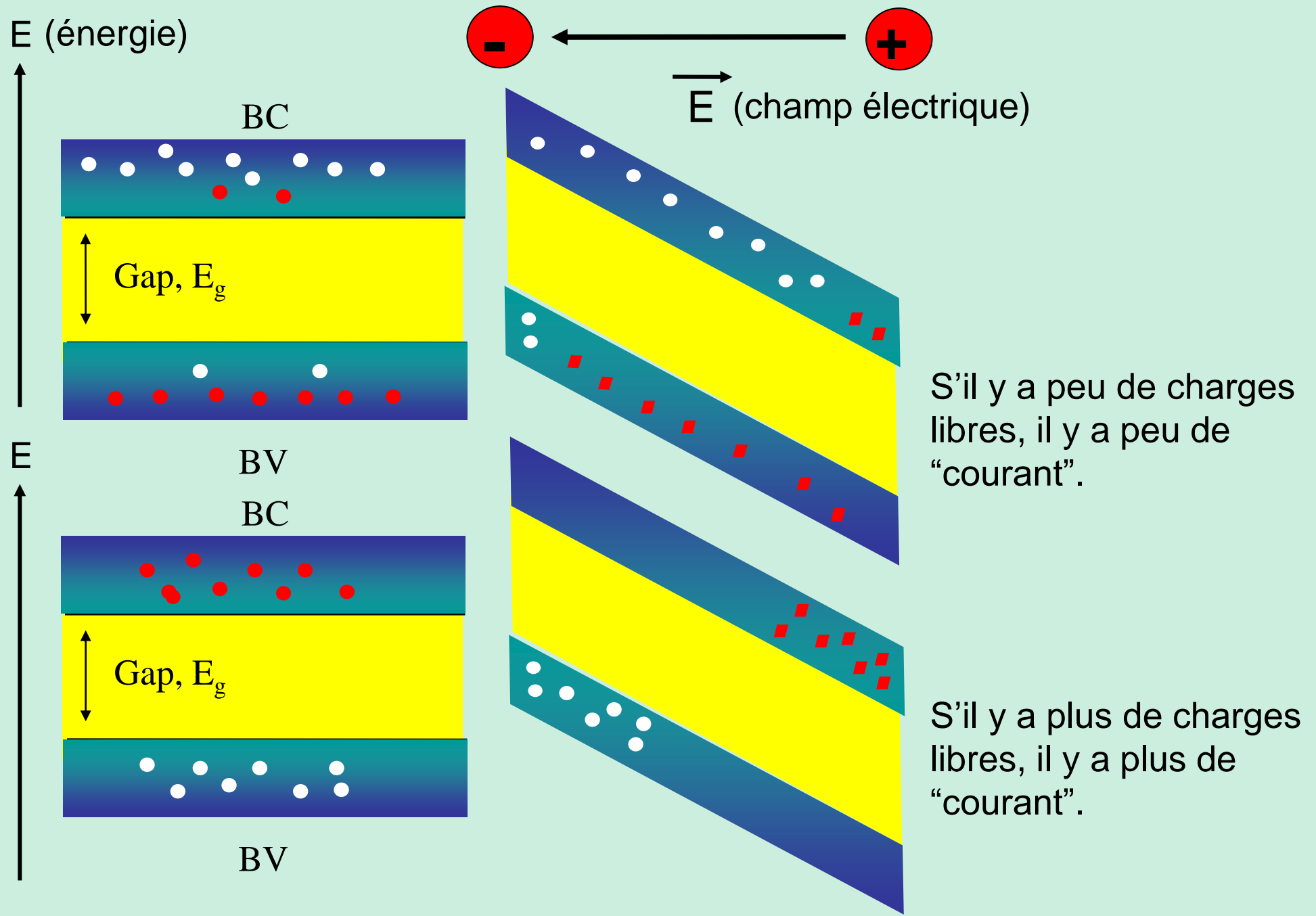


Quand un e^- saute dans la BC, il laisse un trou dans la BV

Si un e^- rencontre un h^+ , ils disparaissent tous les deux : **recombinaison**

Seuls les e^- de la BC sont mobiles et peuvent se déplacer sous un champ E

Seuls les h^+ de la BV sont mobiles et peuvent se déplacer sous un champ E



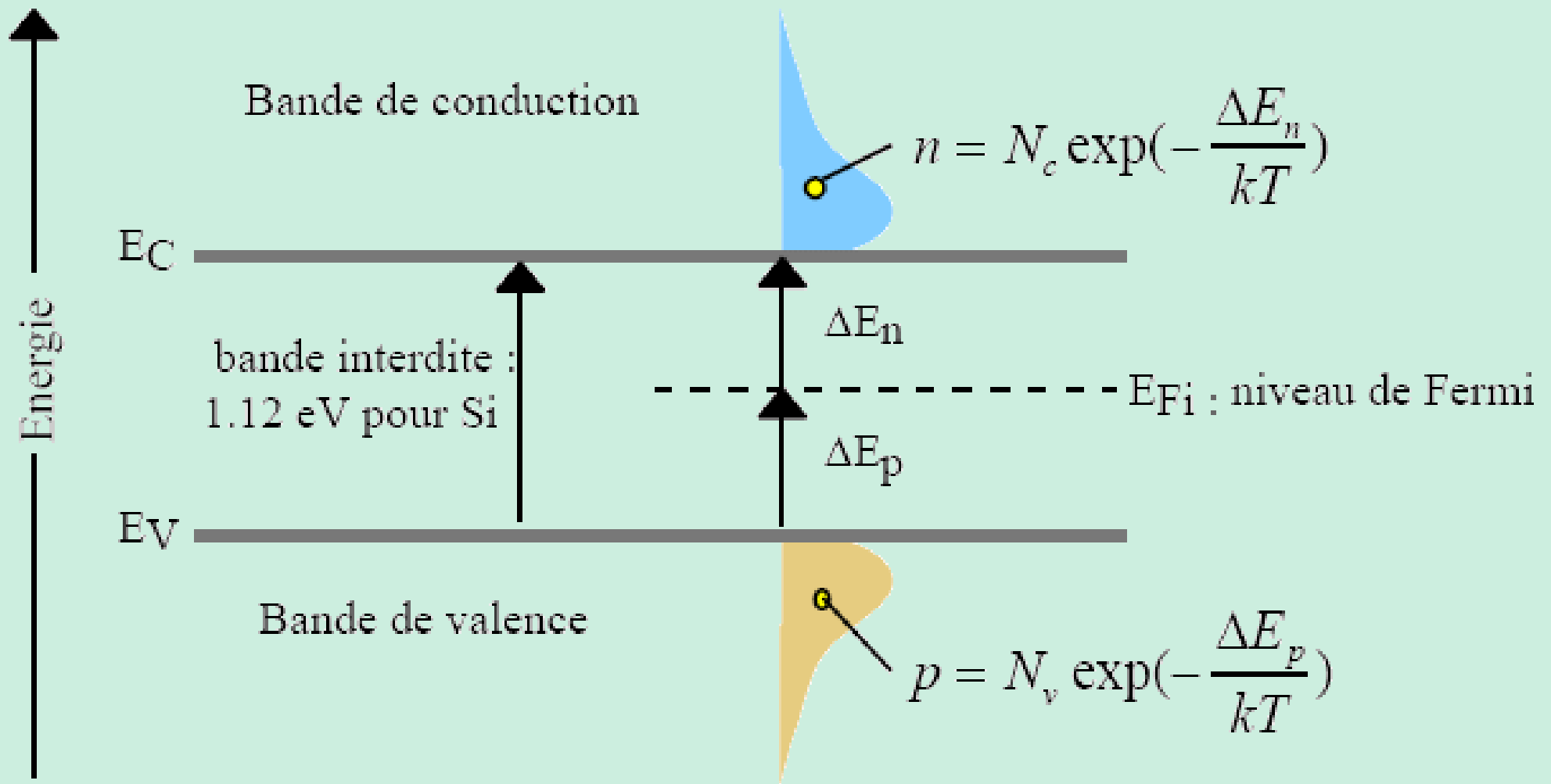
2. Concentration de porteurs dans le Silicium

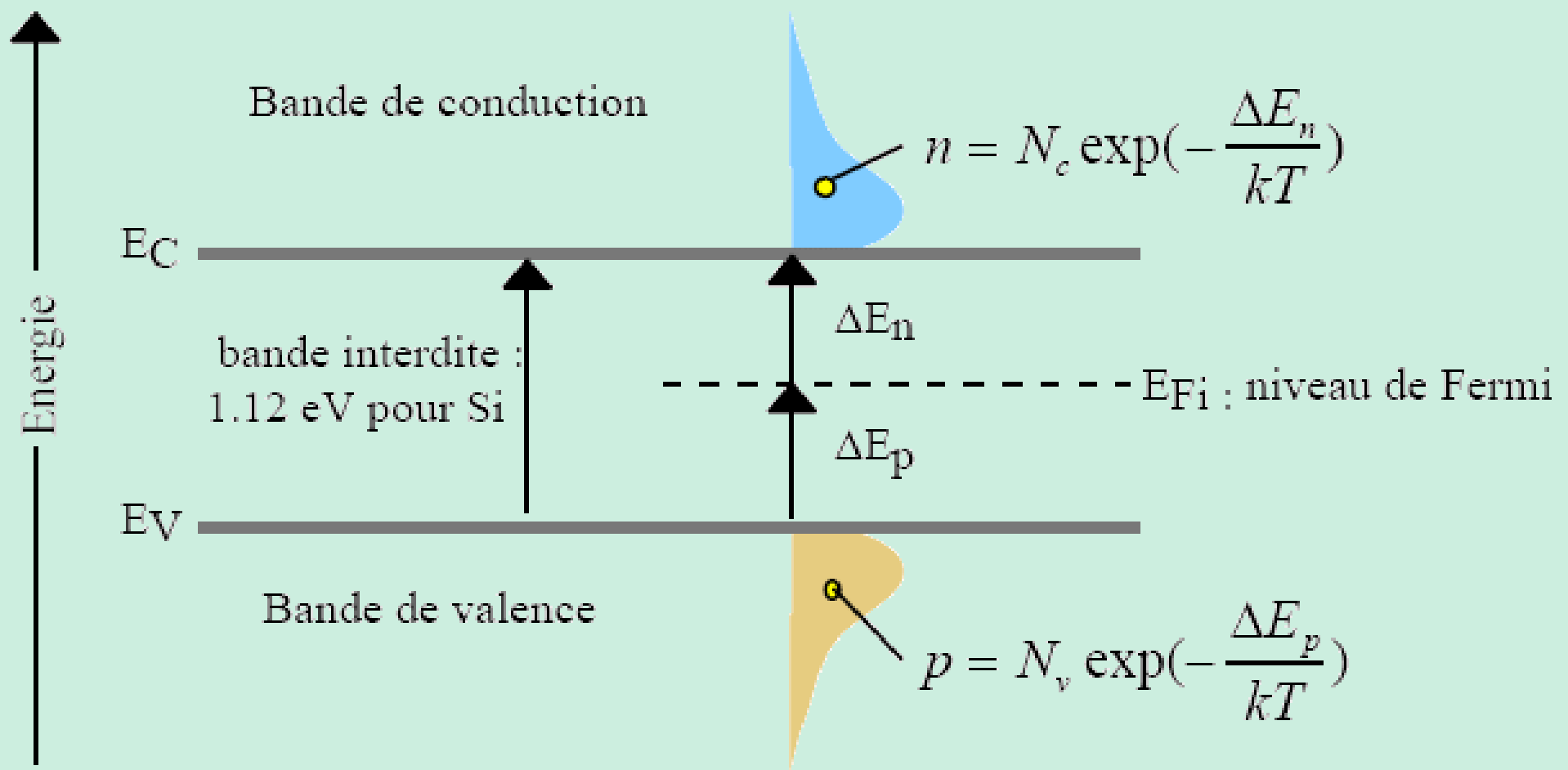
On a déjà vu le **niveau de Fermi** E_F .

Sous E_F , il y a peu de trous. Au-dessus de E_F , il y a peu d'électrons

On peut quantifier les **concentrations en électrons dans la BC (n)**

On peut quantifier les **concentrations en trous dans la BV (p)**





Les populations d'électrons dans la BC (n) et de trous dans la BV (p) peuvent s'écrire :

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right)$$

$$p = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right)$$

Ou encore :

$$n = N_c \exp\left(-\frac{\Delta E_n}{kT}\right)$$

$$p = N_v \exp\left(-\frac{\Delta E_p}{kT}\right)$$

Un TD sera consacré à cela.

C. Semi-conducteurs extrinsèques

1. Semi-conducteurs n. Dopage n.

a. Principe. Choix de l'atome de dopant

+ il y a de porteurs de charges, + le matériau sera conducteur
on peut **ajouter des électrons** au cristal semiconducteur.

Si on ajoute des e^- : dopage **n** (comme **n**égatif)

Bien, sur, on n'ajoute pas directement des électrons.

On **ajoute des atomes portant + d'électrons de valence que le Si**

La colonne 15 (à droite de celle du silicium),
contient les atomes ayant 1 e^- de plus que Si
dans leur couche de valence.

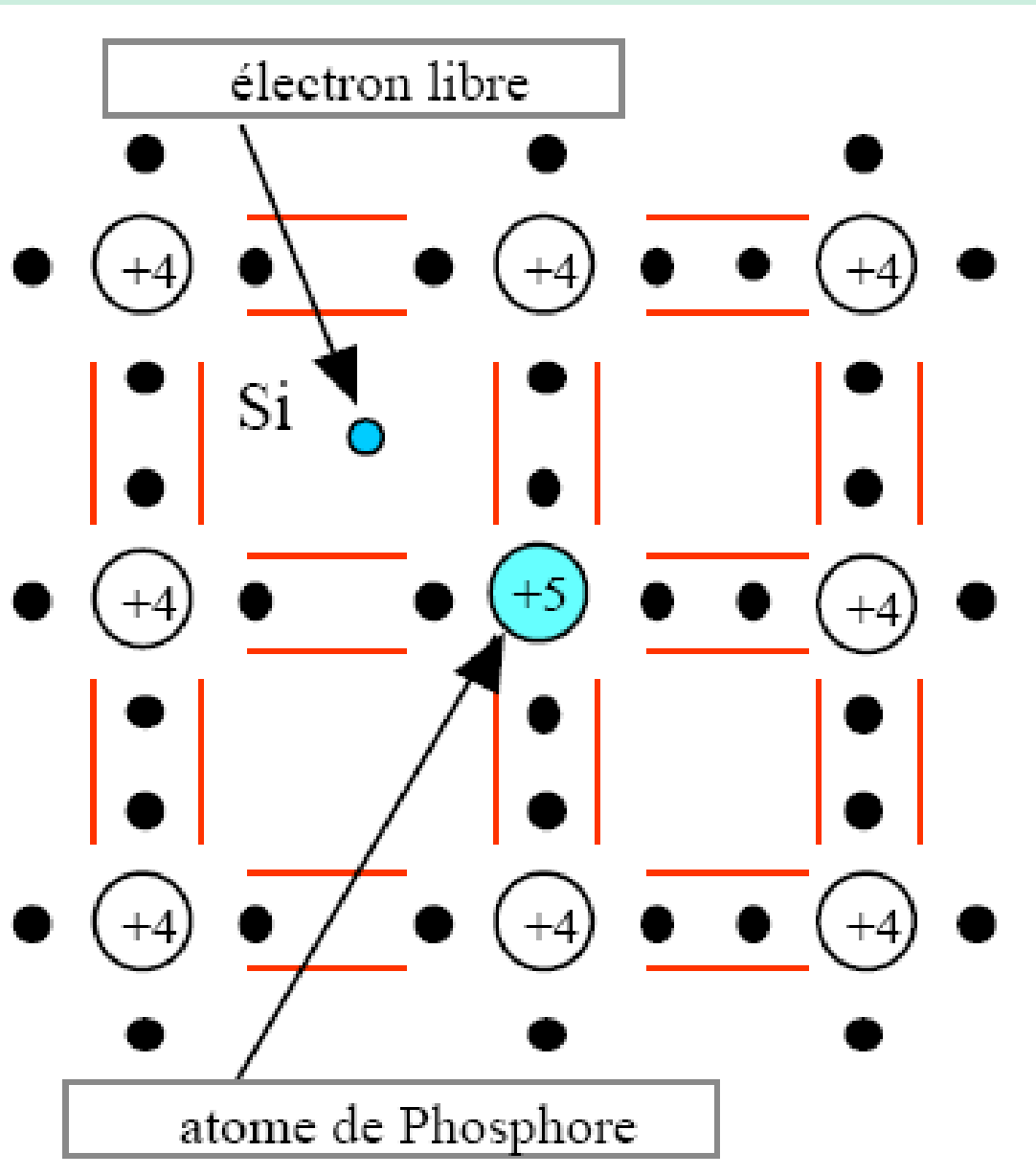
Ils peuvent être utilisés comme dopant « n »

N (azote) ; P (Phosphore) ; As (arsenic)

Bloc <i>p</i>					
13	14	15	16	17	18
					2 He
5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn

b. Electrons liants et électrons libres

Exemple de **dopage n** avec le **phosphore P**



Le P a **5 électrons de valence**.

- 4 é- sont pris dans les liaisons
- **1 é- reste seul**



Il ne peut pas occuper la BV



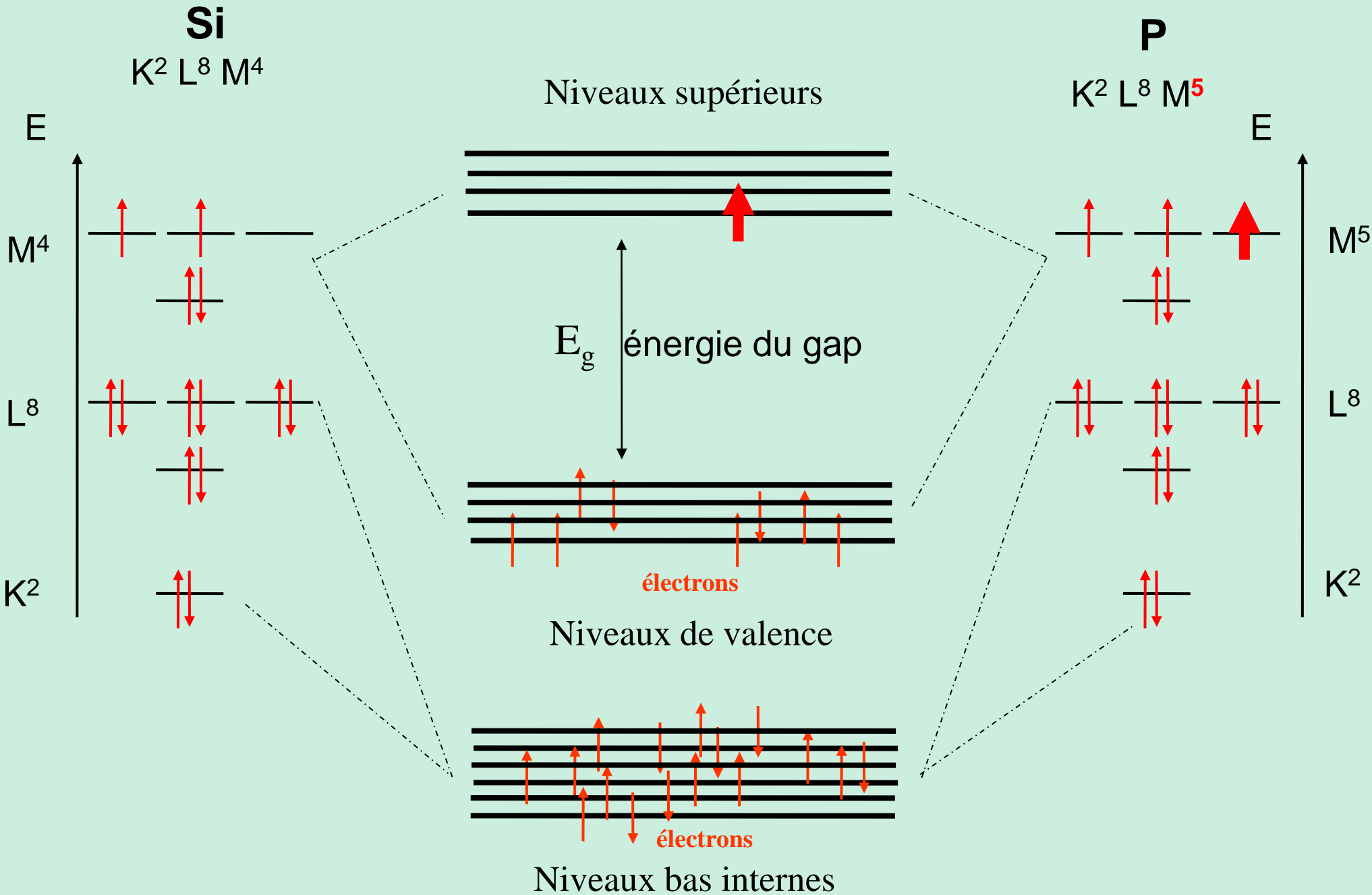
Il monte vers la BC

Cet électron devient **libre de circuler dans la BC**.

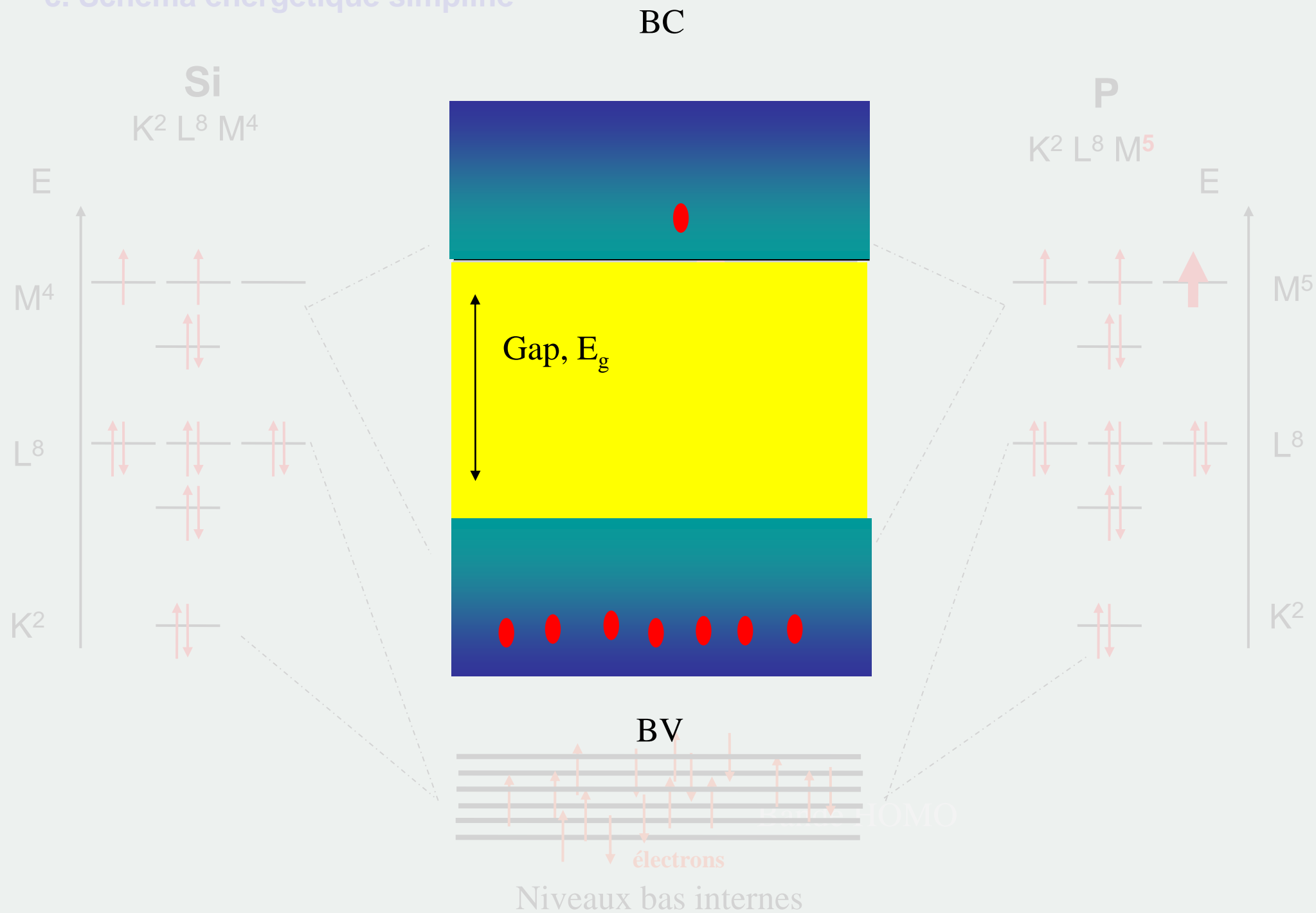
Il est (trans)**porteur de charge**

Un é- est un “**porteur n**”

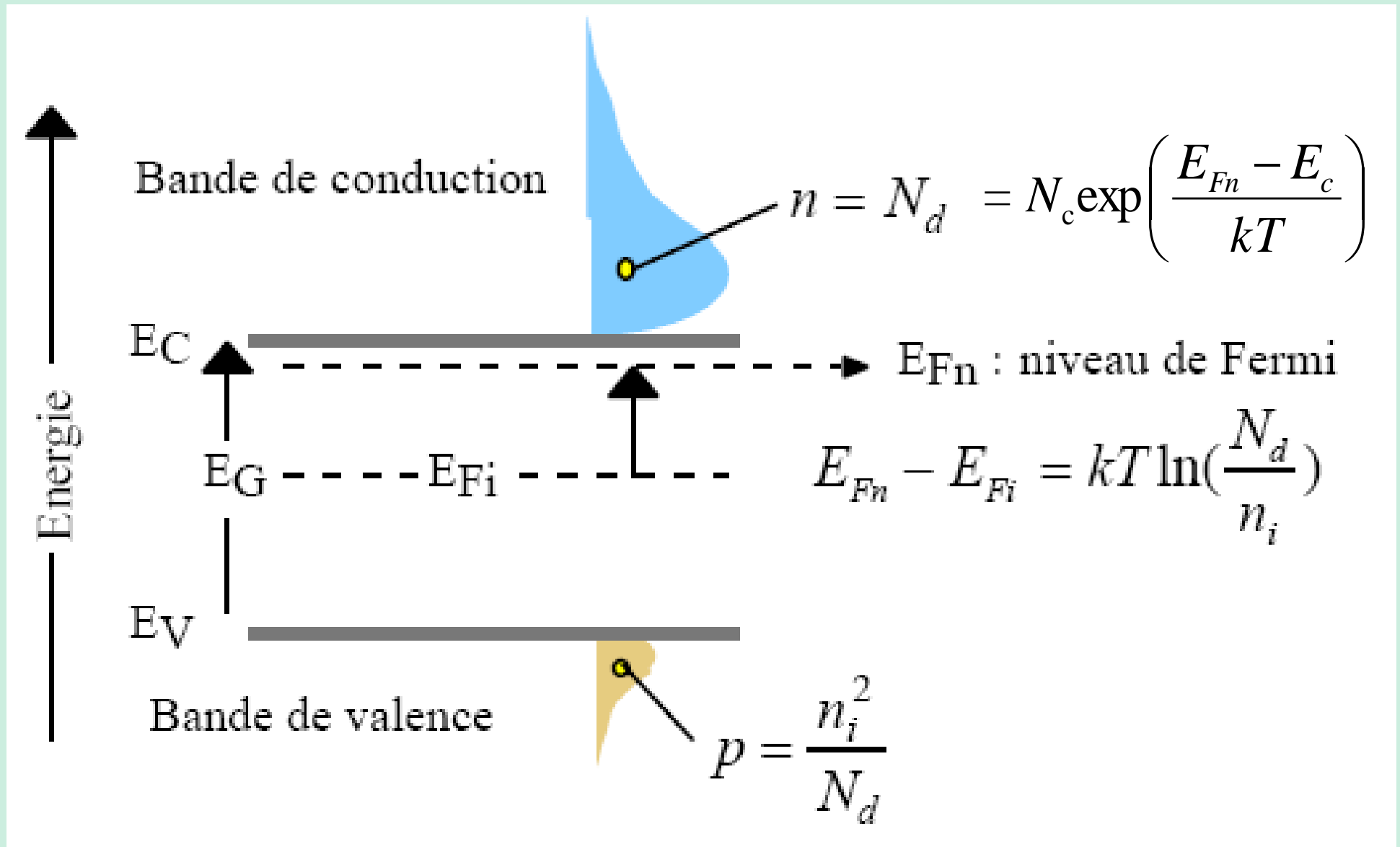
c. Schéma énergétique simplifié



c. Schéma énergétique simplifié




d. Schéma énergétique complet



Relations et calculs seront vus en TD

2. Semi-conducteurs p. Dopage p.

a. Principe. Choix de l'atome de dopant

 on peut **ajouter des trous** au cristal semiconducteur.

Si on ajoute des h^+ : dopage **p** (comme **p**ositif)

Bien, sur, on n'ajoute pas directement des trous.

On **ajoute des atomes portant - d'électrons de valence que le Si**
(c'est le défaut d'électron qu'on appelle « trou »)

La colonne 13 (à gauche de celle du silicium), contient les atomes ayant 1 e^- de moins que le Si dans leur couche de valence.

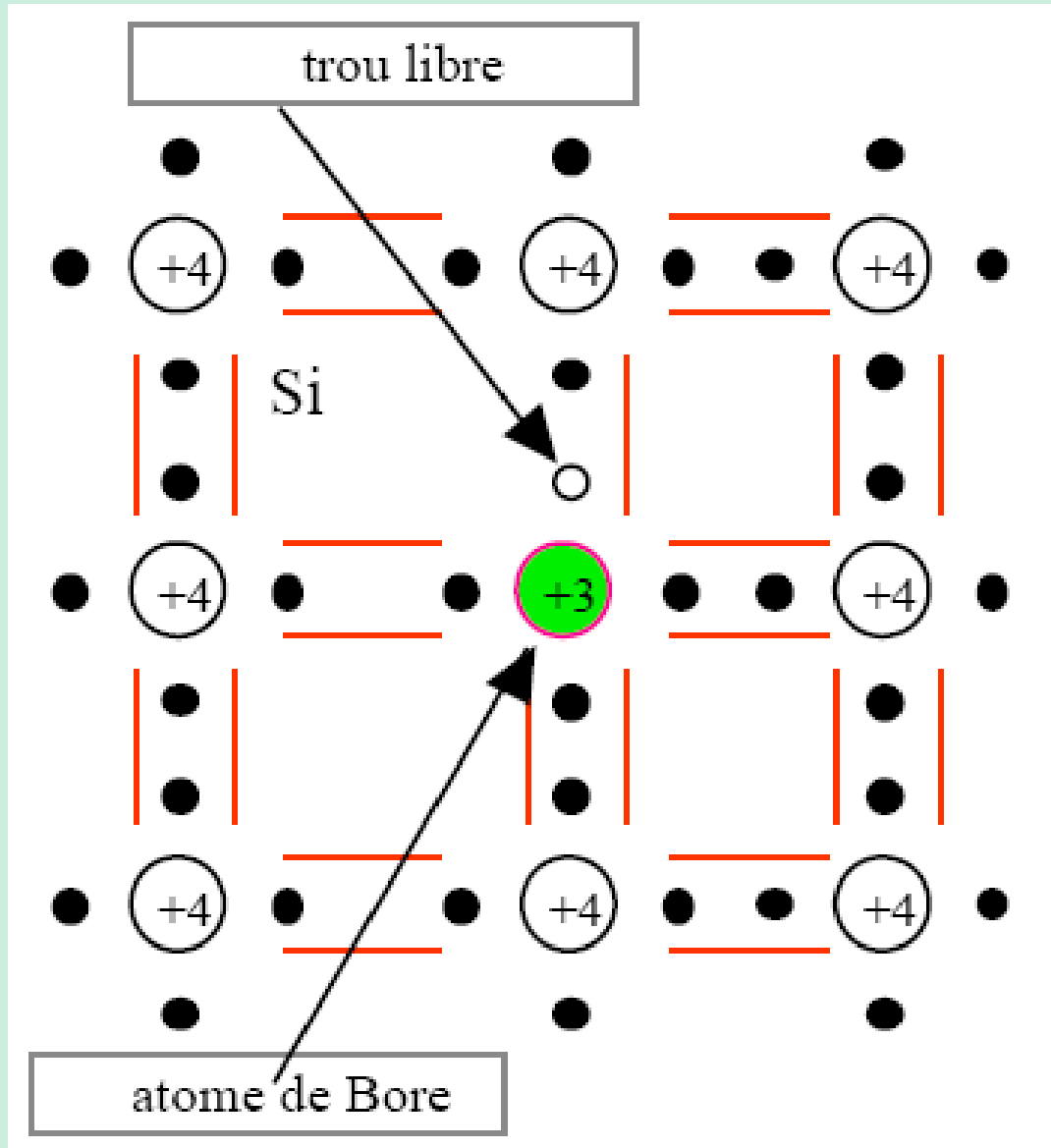
Ils peuvent être utilisés comme dopant « p »

B (bore) ; Al (aluminium) ;
Ga (gallium) ; In (Indium)

Bloc <i>p</i>					
13	14	15	16	17	18
					2 He
5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn

b. Electrons liants et électrons libres

(exemple de **dopage p** avec le **bore B**)



Le B a **3 électrons de valence**.

- 3 é- sont pris dans les liaisons
- **1 é- manque !**



Il fait défaut dans la BV



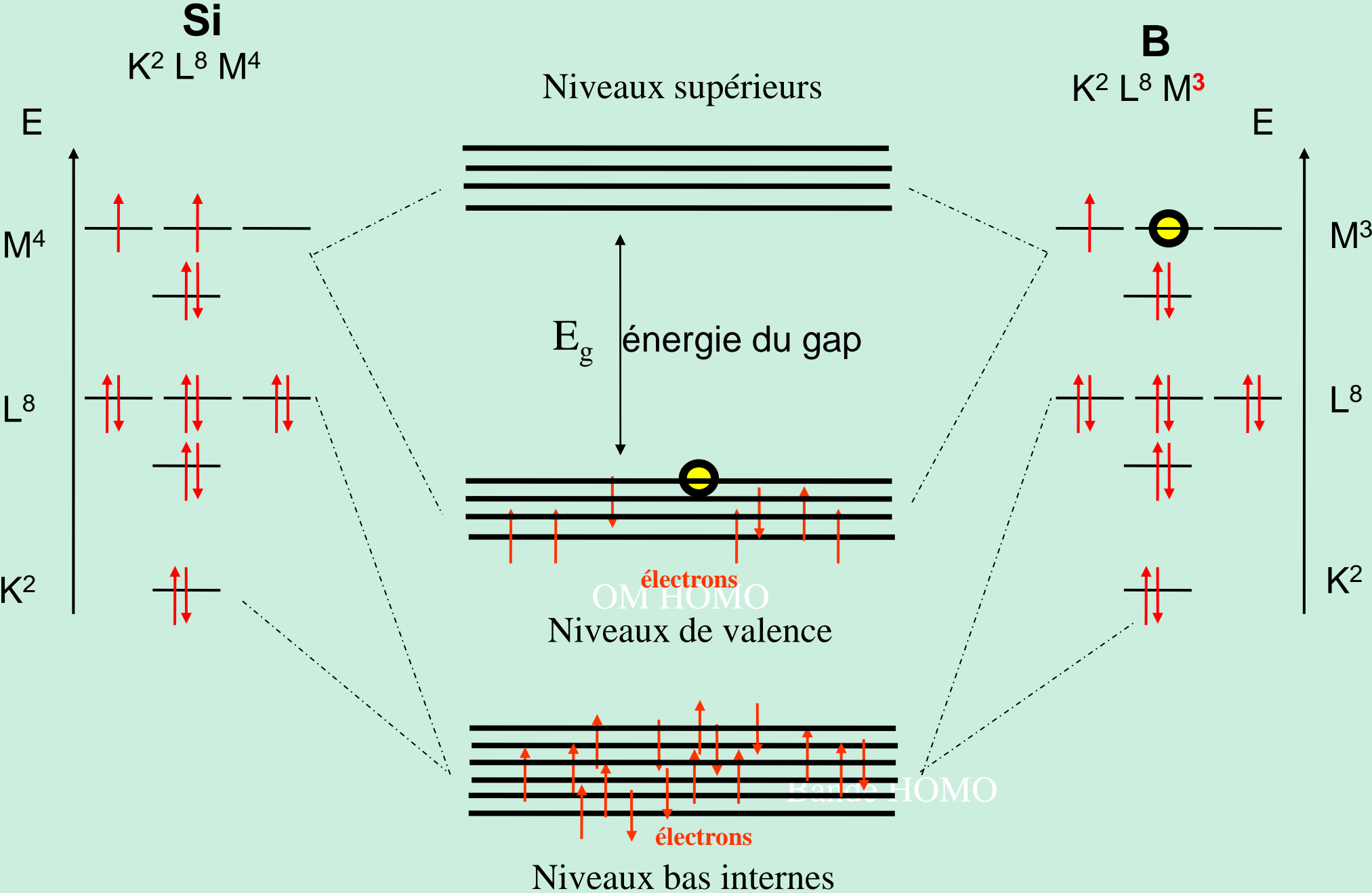
“trou” dans la BV

Ce trou devient **libre de circuler** dans la BV.

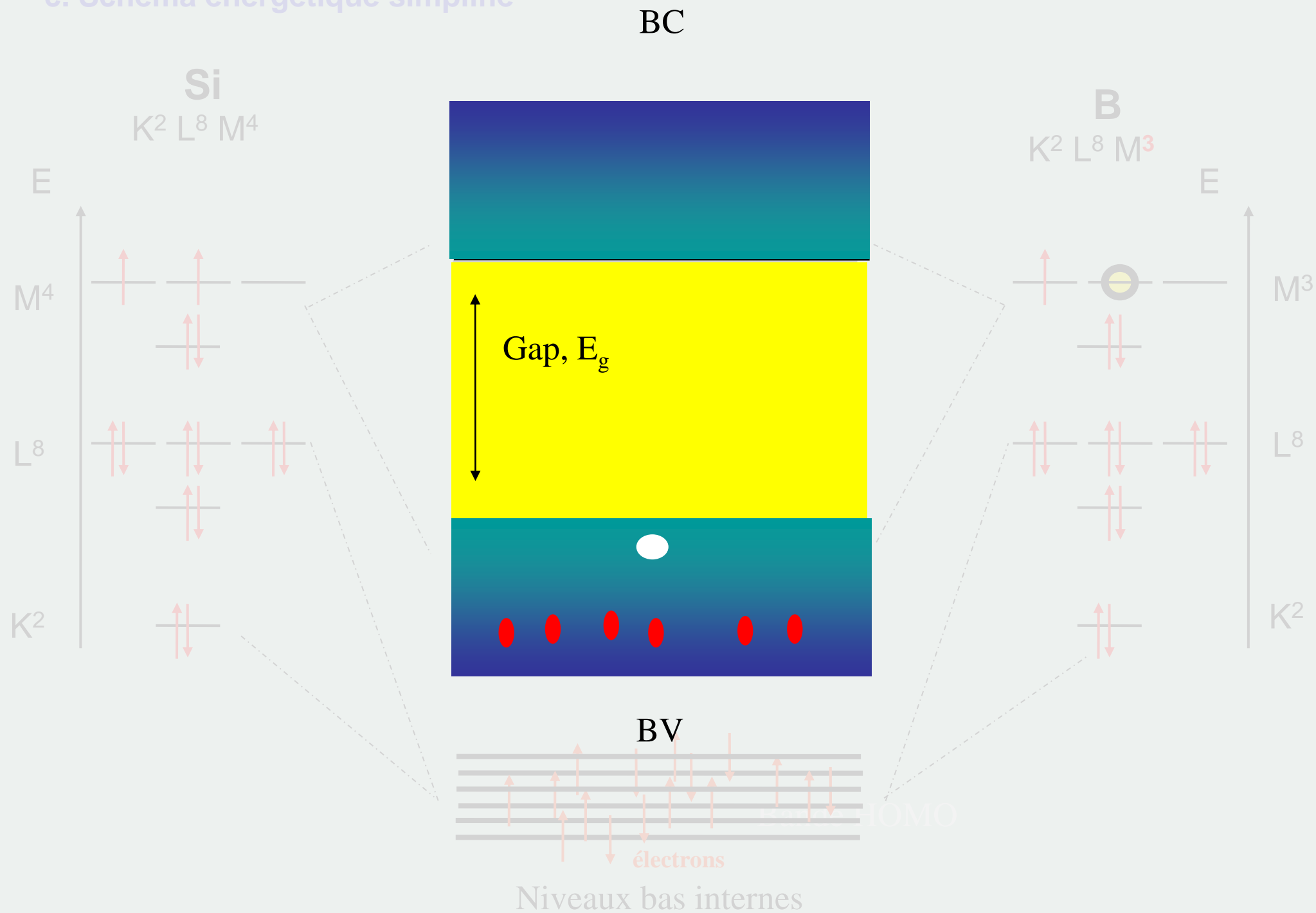
Il est (trans)**porteur de charge**

Un h^+ est un **“porteur p”**

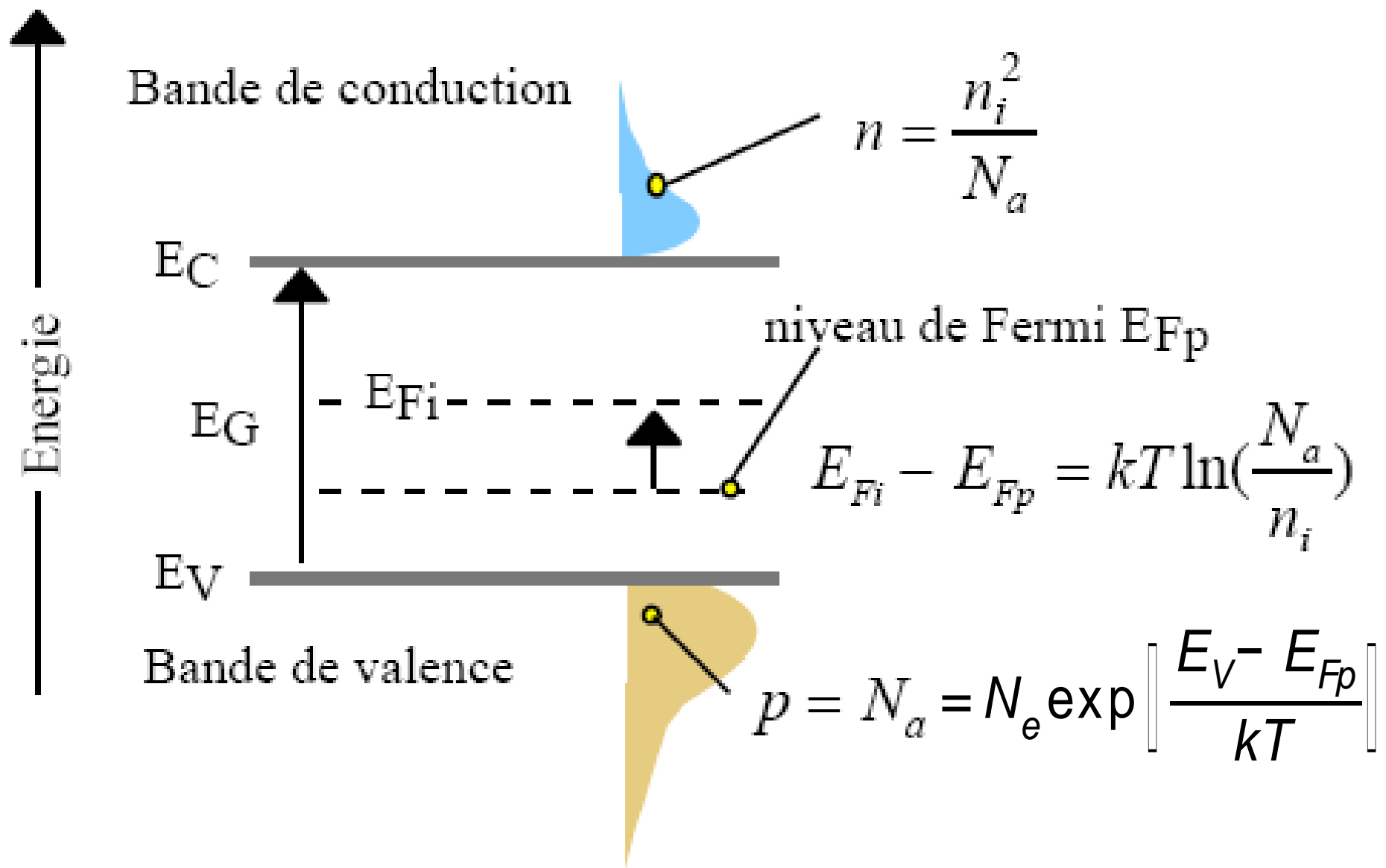
c. Schéma énergétique simplifié



c. Schéma énergétique simplifié



d. Schéma énergétique complet



Relations et calculs seront vus en TD

3. Intermède technologique. Dopage par implantation ionique

Il s'agit de **doper le semiconducteur** durant la fabrication des dispositifs (création de zones de source ou de drain d'un transistor MOS, d'une base et d'un émetteur dans un transistor bipolaire, etc...).

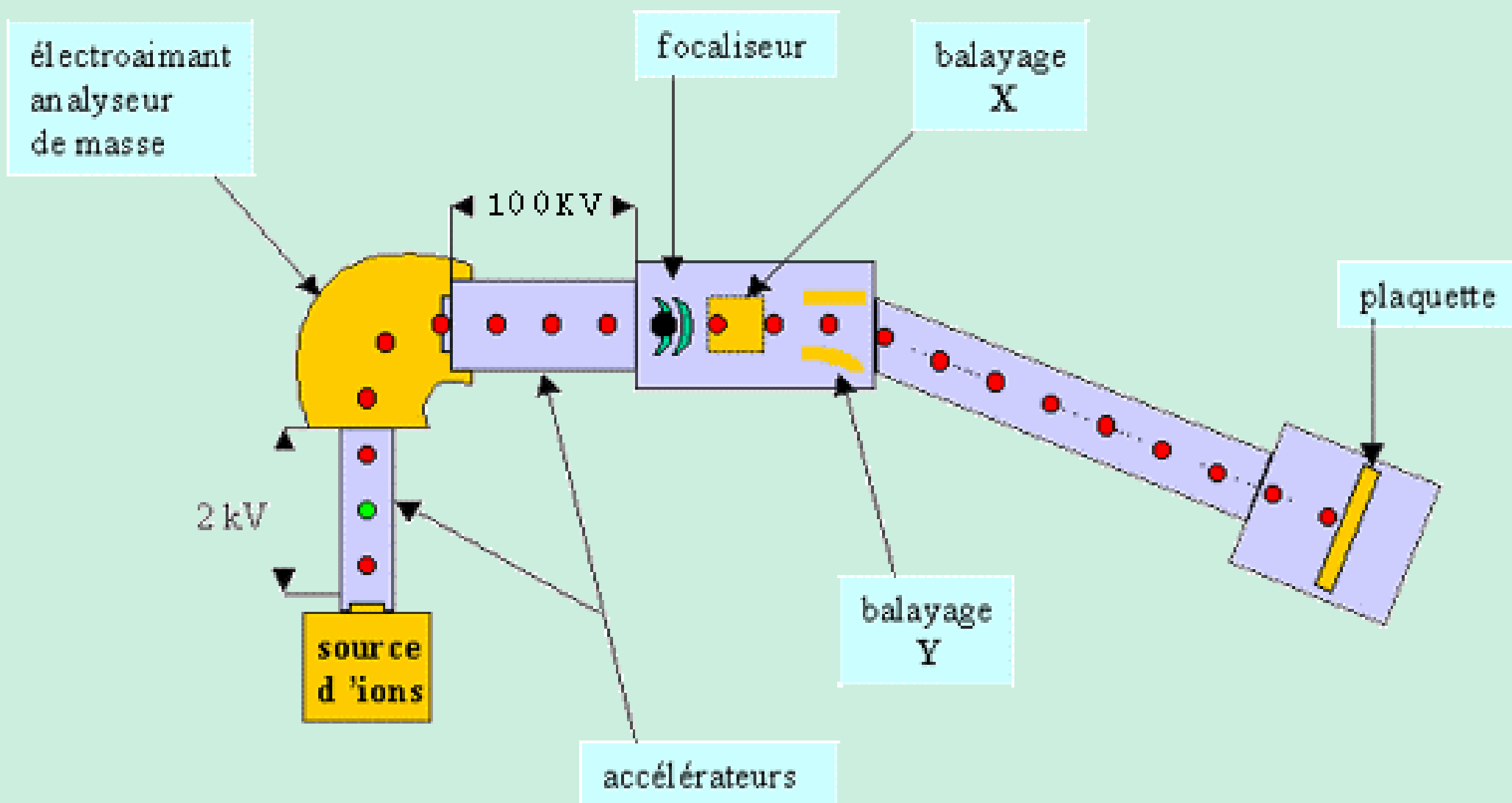
Les atomes dopants sont en général : B, P, As, In, etc...

Elle consiste à **introduire des atomes projectiles** avec suffisamment d'énergie pour pénétrer dans l'échantillon cible (en général une plaquette de Si, le wafer).

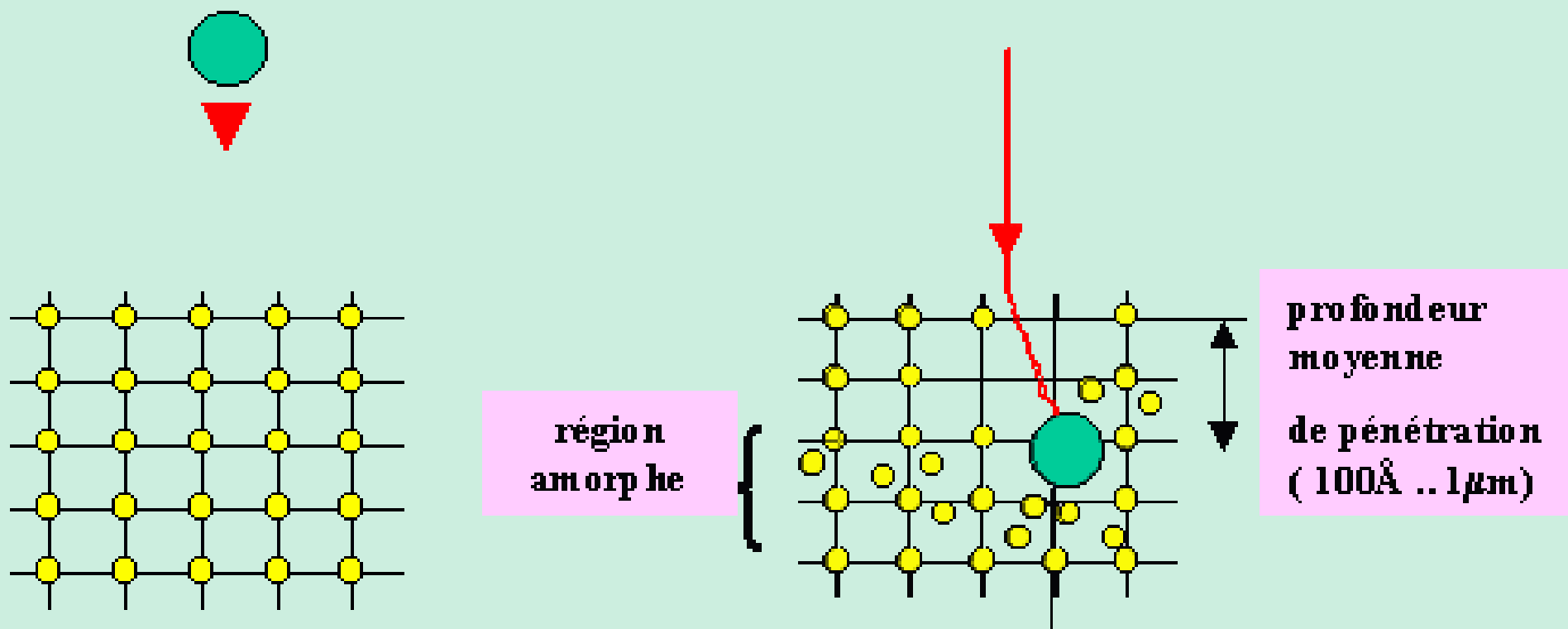
Les énergies sont dans la gamme 3 keV à 500 keV.

En fonction de la nature du matériau implanté, de la nature de l'atome accéléré et de l'énergie d'accélération, la profondeur de pénétration peut aller de **100 Å à 1 mm**.

Principe d'un implantateur ionique :



Que se passe-t-il dans le cristal ?



L'insertion de l'atome « détruit » localement le cristal



On va faire un « recuit » du Si dopé, pour que les atomes reprennent leur place.

Ca peut se faire en chauffant, ou en irradiant

