

Les détecteurs à semi-conducteurs

Silicium et germanium
en physique nucléaire

Contenu

- Généralités sur le semi-conducteur
- Technologie des détecteurs Si et Ge
- Formation du signal et mesures
- Quelques ensembles de détection

En physique nucléaire !

Introduction

- Apport du semi-conducteur à la détection nucléaire
 - haut pouvoir d'arrêt des particules chargées
 - grande densité $\sim 10^{22}/\text{cm}^3$
 - chambre d'ionisation solide
 - faible énergie moyenne de création de charges, $\sim 3\text{eV}$ (Si, Ge) contre 30eV (gaz)
 - efficace pour la détection γ

Introduction

- **Choix du matériau**
 - Nature des particules à détecter
 - Énergie
 - Applications (environnement, température,...)

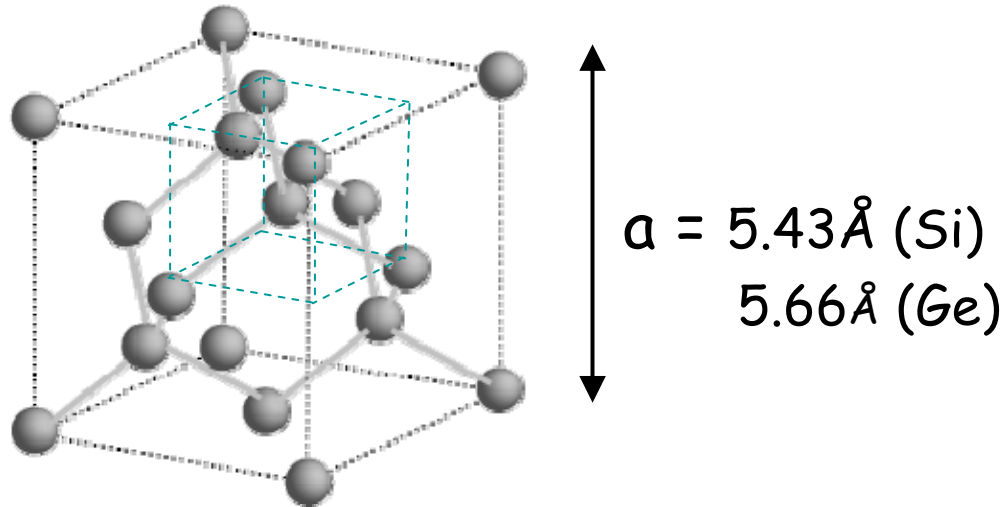
- **Intérêt des détecteurs à SC**
 - Identification des particules, des ions
 - Localisation
 - Tracking

Introduction

- Aujourd'hui
 - Spectroscopie nucléaire
 - Mesure de position (précision accrue, électronique de lecture rapide...)
 - Identification des particules par reconnaissance de forme
 - Intégration de l'électronique de sortie

La structure d'un semi-conducteur

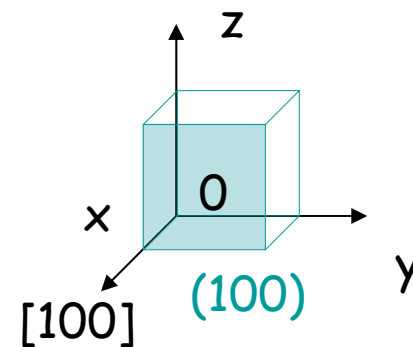
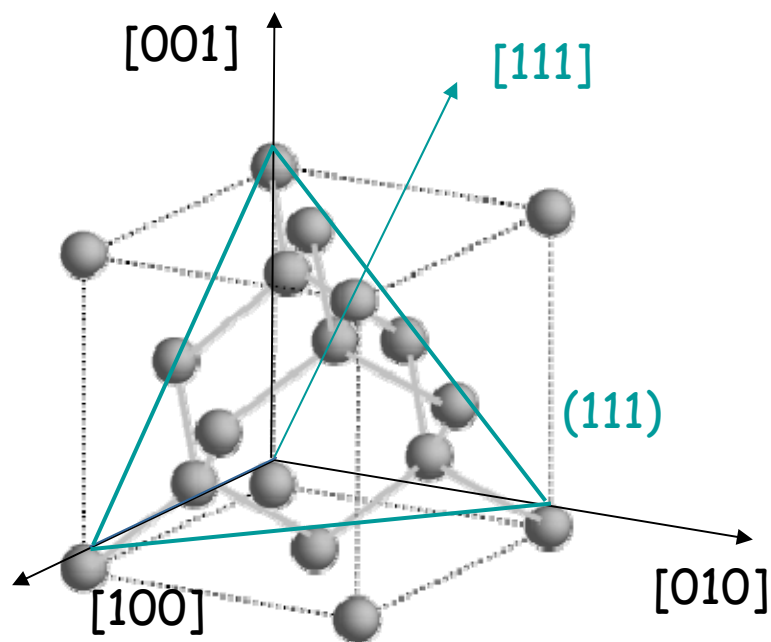
- Structure diamant - Si ou Ge



Structure cubique à faces centrées
2 CFC imbriqués, 8 atomes dans une maille

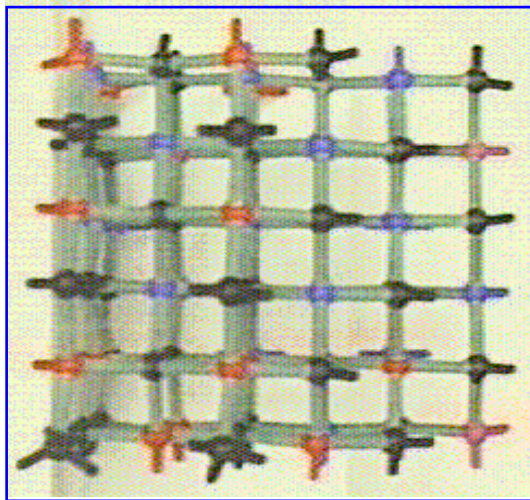
Les directions cristallographiques

- Différentes densités suivant les plans cristallographiques
- Impact sur les propriétés des détecteurs

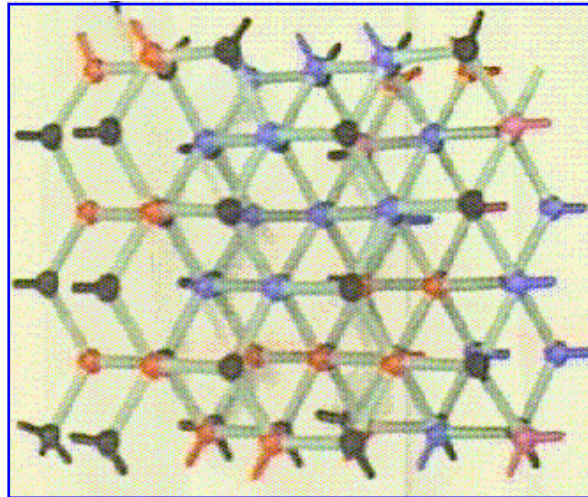


Organisation des plans

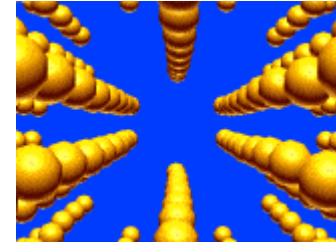
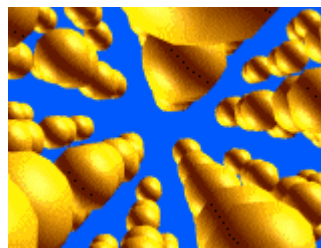
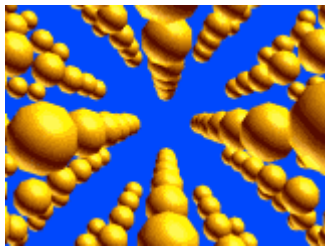
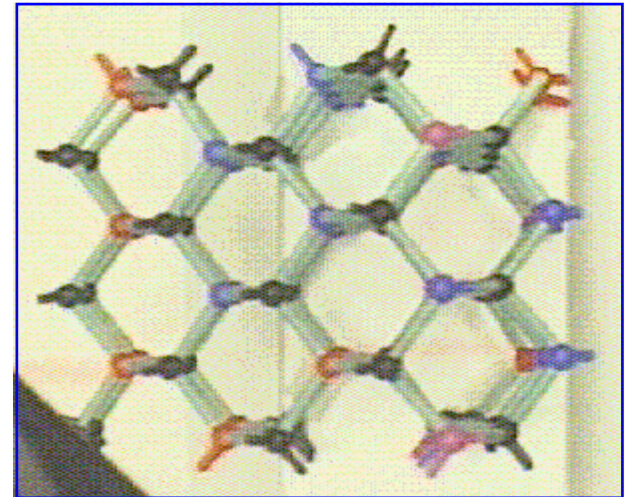
(100)



(111)



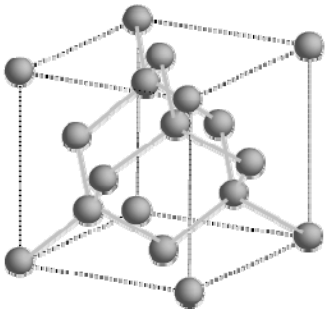
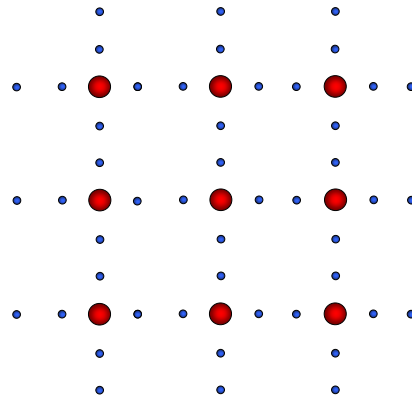
(110)



Propriétés des semi-conducteurs

Chaque atome est entouré de 4 voisins et partage ses 4 électrons périphériques avec ses voisins, formant des liaisons covalentes

Le silicium

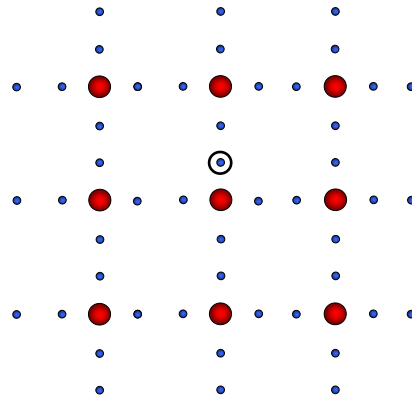


L'atome de silicium \rightarrow 4 électrons de valence

Propriétés des semi-conducteurs

À basse énergie tous les électrons de valence restent liés

À température plus élevée, les vibrations thermiques peuvent rompre les liaisons covalentes et un électron de valence devient un électron libre, laissant derrière lui une lacune ou trou (de charge positive)



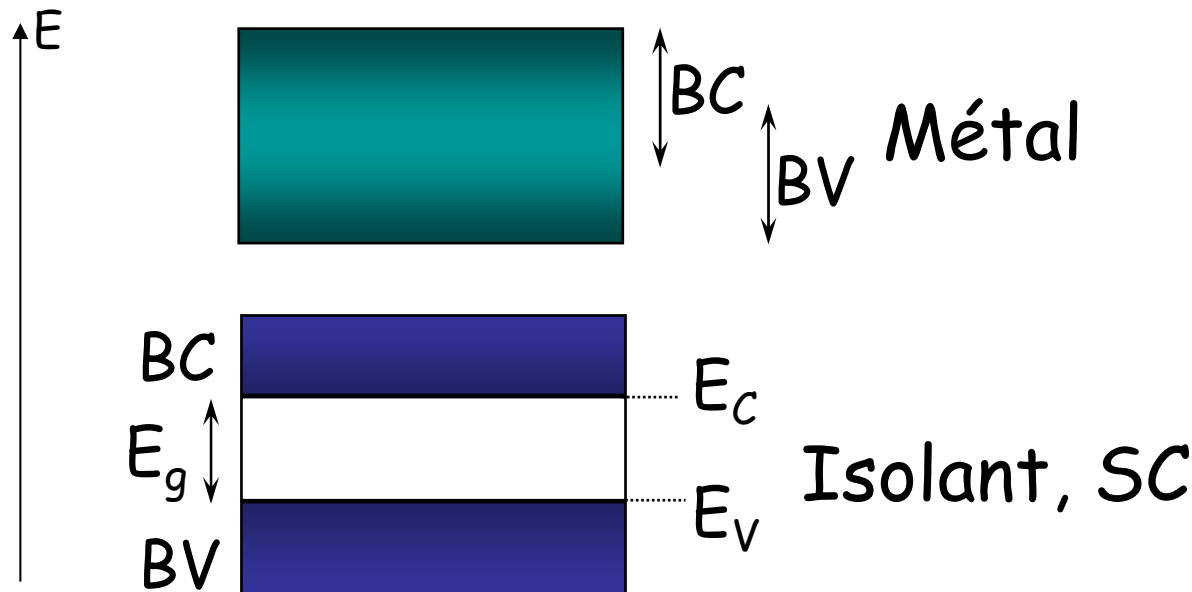
L'électron et le trou libres sont alors disponibles pour la conduction

Les bandes d'énergie dans un semi-conducteur

- **approche classique** : le cristal -> assemblage d'atomes individuels avec des niveaux d'énergie discrets, distances inter-atomiques grandes
- **approche quantique** : distances inter-atomiques faibles -> les électrons de valence se couplent -> les niveaux d'énergie se regroupent pour former des bandes permises ou interdites aux électrons du cristal
- On commence par remplir les états les plus profonds avec les électrons du cristal afin de minimiser l'énergie totale du système à l'équilibre

Les bandes d'énergie

- Bande de valence (BV) : dernière bande permise « pleine », d'énergie E_v
- Bande de conduction (BC) : première bande permise « vide », d'énergie E_c
- Gap : bande interdite, d'énergie $E_g = E_c - E_v$
- **La conduction** : les électrons ont accès à des états proches du dernier état occupé à l'équilibre



À 300K

Si : $E_g = 1,1 \text{ eV}$

Ge : $E_g = 0,66 \text{ eV}$

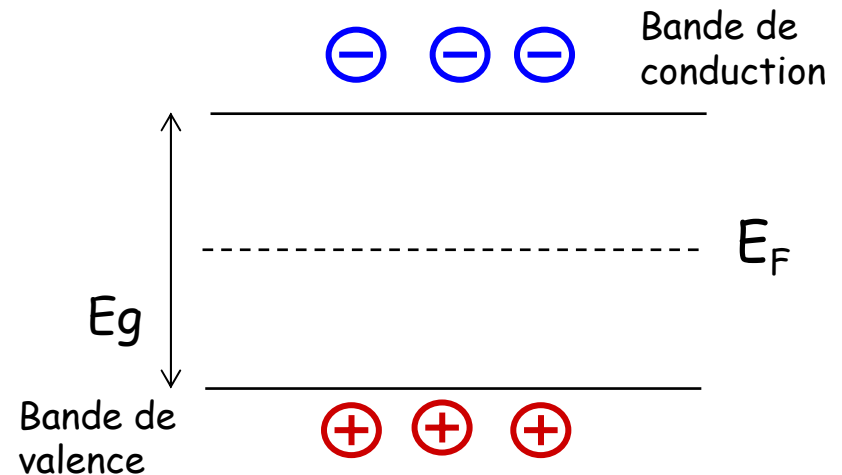
Le semi-conducteur intrinsèque

- À 0 K, le SC est isolant
- $T \uparrow$: un certain nombre de porteurs libres est créé
 - n électrons (provenant de BV par excitation thermique)
 - p trous (présents dans BV)
- Des relations donnant les concentrations de porteurs
 - $n=p=n_i$ autant de trous dans BV que d'électrons dans BC
 - $n_i^2=np$ (loi d'action de masse)
 - n_i proportionnel à $\exp(-E_g/kT)$

à 300K, $kT \sim 0.025$ eV

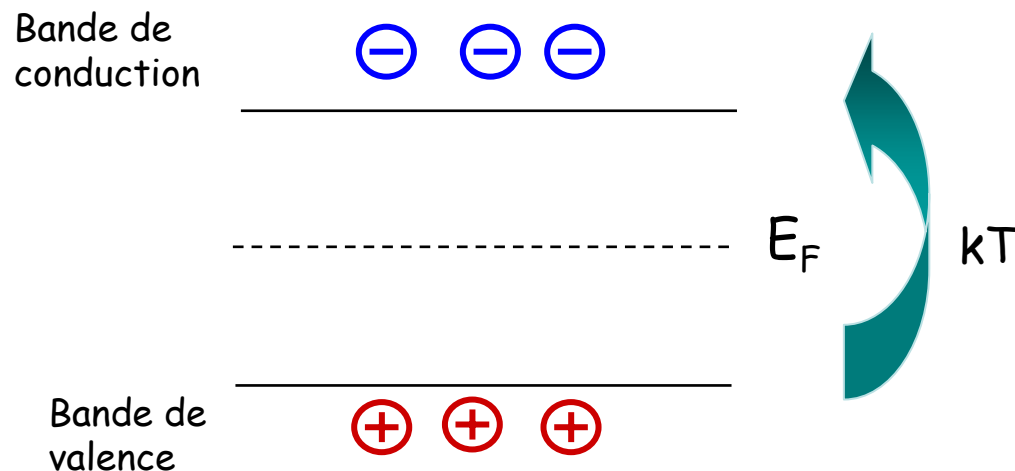
Si : $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

Ge : $n_i = 2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$



Le semi-conducteur intrinsèque

- La position du niveau de Fermi définit les propriétés électroniques du semi-conducteur.
- Pour un semi-conducteur intrinsèque, le niveau de Fermi se situe au milieu de la bande interdite



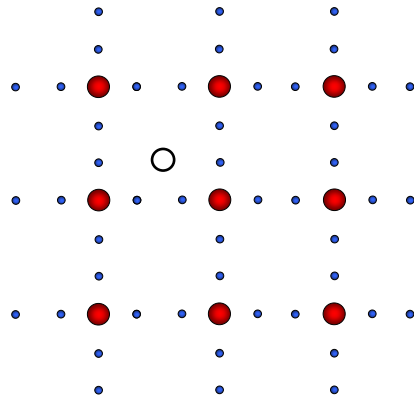
Le semi-conducteur dopé

- Introduction d'impuretés en substitution (en général par **diffusion**) dans le réseau provoquant un ajout de trous ou d'électrons libres
- Cas particulier : le dopage par transmutation neutronique (NTD : neutron transmutation doping)

 La conduction est modifiée

Le dopage du Si

Silicium dopé type P

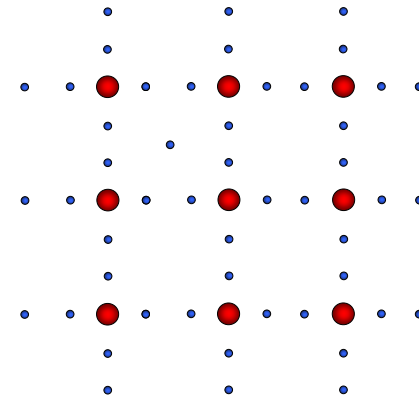


L'atome de bore
→ 3 électrons de
valence

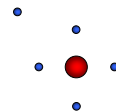


Les trous sont les porteurs
majoritaires.

Silicium dopé type N



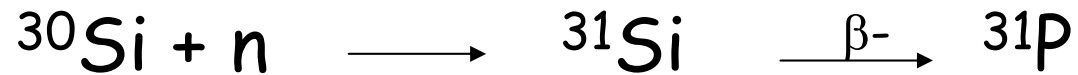
L'atome de phosphore
→ 5 électrons de
valence



Les électrons sont les porteurs
majoritaires.

Le semi-conducteur NTD

- Dopage par transmutation neutronique

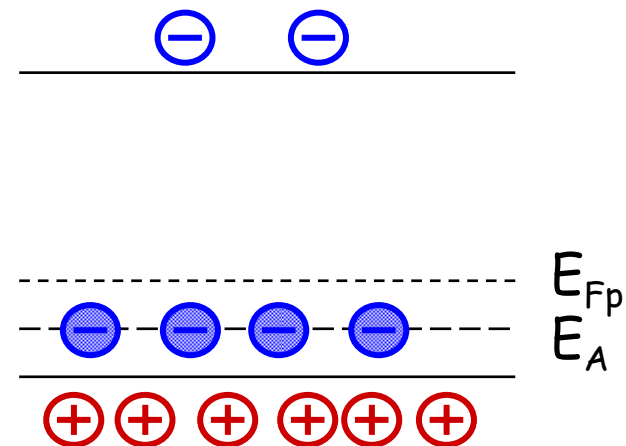
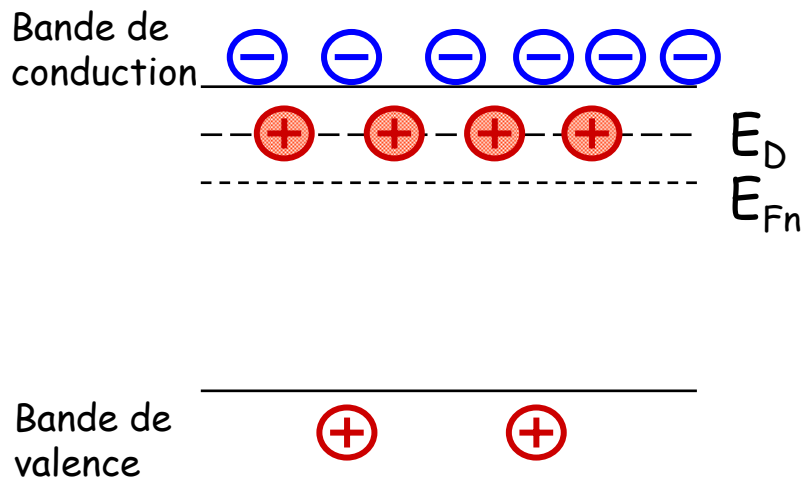


- On transforme l'isotope ^{30}Si (3% dans le silicium) en ^{31}P , dopant du Si de type N
- Process :
 - Cristal FZ non dopé
 - Irradiation neutrons
 - Décroissance de l'activité
 - Recuit et caractérisation (durée de vie des porteurs, nombre de dopants...)

Le diagramme des bandes

- Dopage N
- N_D atomes ($5 e^-$), $n \sim N_D$
- pentavalent (colonne V)
- P - As - Sb
- Donneurs
- $E_D = E_C - 0,045 eV$
- Dopants ionisés fixes (P^+)

- Dopage P
- N_A atomes ($3 e^-$), $p \sim N_A$
- trivalent (colonne III)
- B - Ga - Al - In
- Accepteurs
- $E_A = E_V + 0,045 eV$
- Dopants ionisés fixes (B^-)



La mobilité des porteurs : μ

- Aptitude des porteurs à se déplacer dans le réseau cristallin

- $v = \mu \cdot F$

- Valeurs de la mobilité :

- μ_- : mobilité des électrons

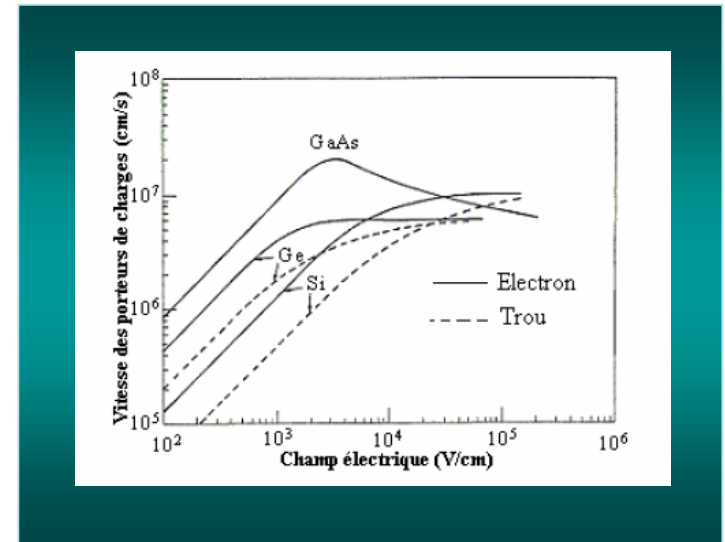
- μ_+ : mobilité des trous

Si : $\mu_- \sim 1350 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$

$\mu_+ \sim 480 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$

Ge : $\mu_- \sim 3600 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$

$\mu_+ \sim 1800 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$ (à 300K)



- La mobilité dépend aussi du champ électrique F (relation empirique):

$$\mu(x) = \frac{\mu_{\mp/+}}{\left[1 + \left(\frac{\mu_{\mp/+} F(x)}{v_s}\right)^m\right]^{\frac{1}{m}}}$$

$m=2$ pour les électrons

$m=1$ pour les trous

v_s : vitesse de saturation

Si : $\sim 10^7 \text{ cm/s}$

Ge: $\sim 6 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$

La résistivité du matériau

- Dépend du dopage : N_A et N_D
- Inverse de la conductivité : $q(n.\mu_- + p.\mu_+)$
- Pour du Si de type N : $\rho \approx \frac{1}{N_D \cdot q \cdot \mu_-}$
- Pour du Si de type P : $\rho \approx \frac{1}{N_A \cdot q \cdot \mu_+}$

à 300K



Si : $\rho_i \sim 200 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$

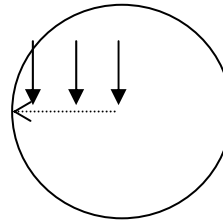
Ge : $\rho_i \sim 47 \text{ }\Omega \cdot \text{cm}$

La résistivité du matériau : ρ

- En général, les résistivités pour la détection sont fortes

Si N : $\rho \sim 5000 \Omega.cm$

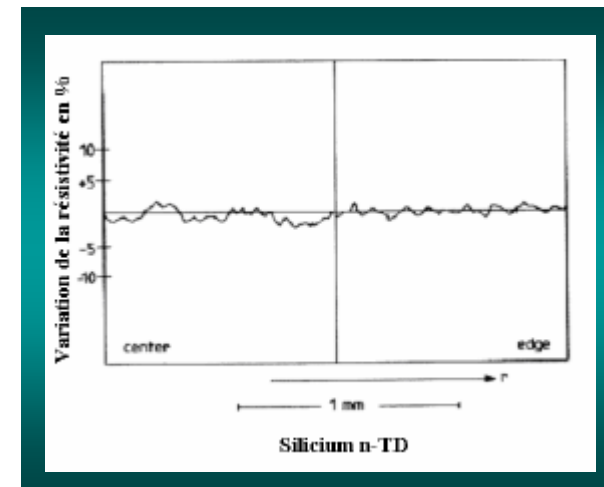
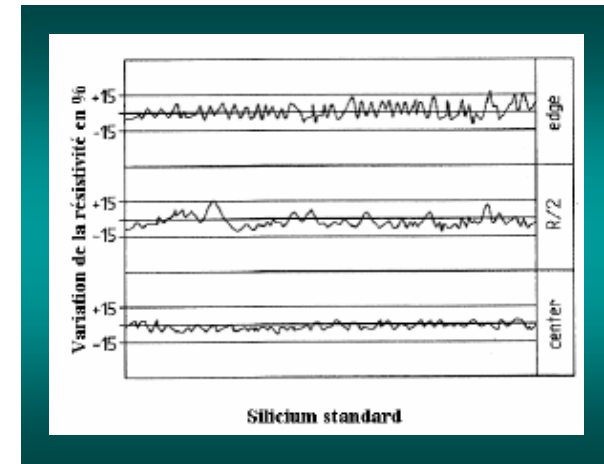
Si P : $\rho \sim 1000 \Omega.cm$



Rmq : pour le Ge on s'exprime en concentration de dopants $|N_A - N_D| \sim 10^{10} cm^{-3}$

- Pour du matériau NTD, la résistivité radiale est très homogène :

➔ $\pm 5\%$ (30% pour un cristal de type FZ),
mais plus faible ($\sim 2500 \Omega.cm$)

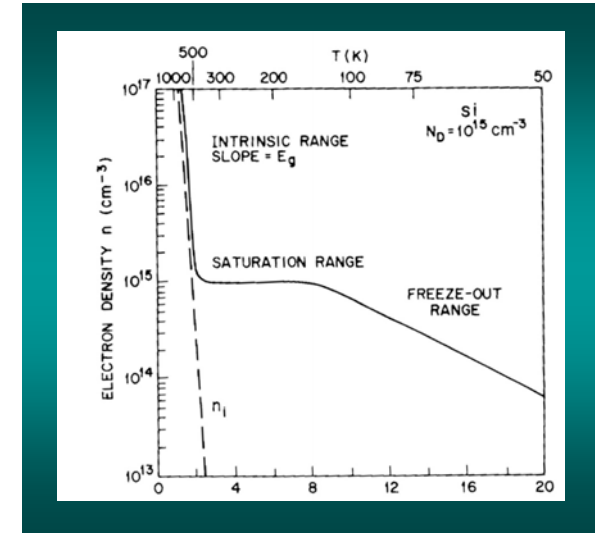


L'effet de la température

- Sur la concentration des porteurs n augmente quand T augmente



- Sur la mobilité μ



Pour $N_D \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

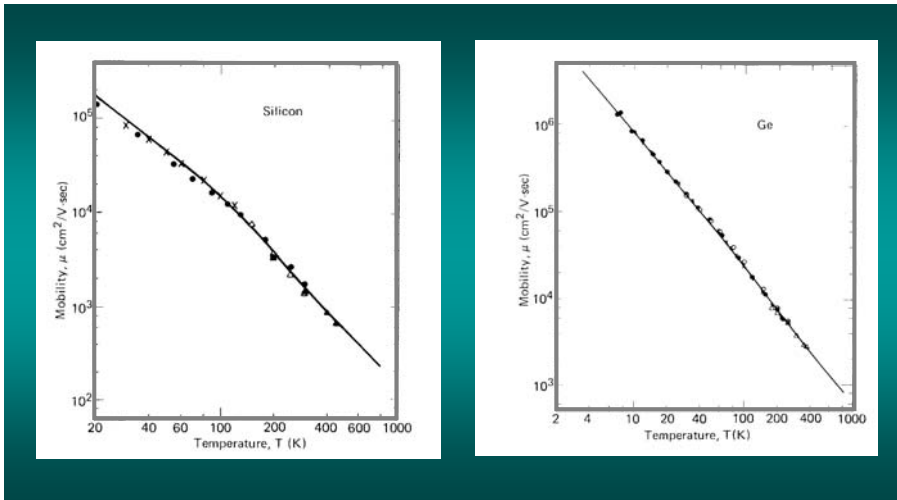


μ augmente quand T diminue

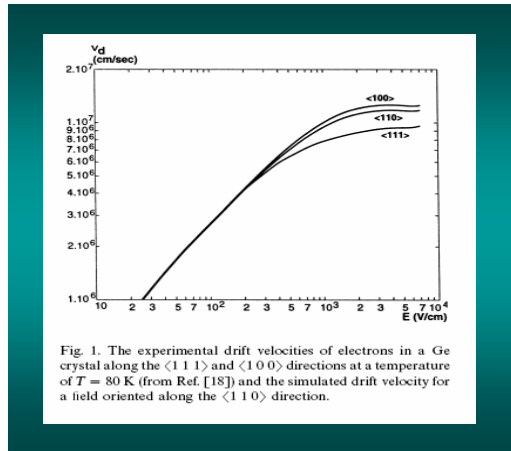
Ex du Ge :

$$\mu_- \sim 3.6 \cdot 10^4 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$$

$$\mu_+ \sim 4.2 \cdot 10^4 \text{ cm}^2 / \text{V.s} \text{ (à 77K)}$$



L'effet de l'orientation du cristal



(NIM A 447 (2000) 350-360)

- Important pour le détecteur germanium
- Mobilité anisotrope des porteurs de charges
- Intervient dans le calcul de la forme du signal
- Effet de canalisation surtout dans le Si

L'énergie d'ionisation


- Énergie nécessaire pour créer une paire électron -trou : ω
 - Si : $\omega = 3.62 \text{ eV}$ (300K) et 3.76 eV (77K)
 - Ge : $\omega = 2.96 \text{ eV}$ (77K)

➡ $\omega > E_g$ (gap, énergie de bande interdite), elle tient compte des propriétés optiques, thermiques et de diffusion du cristal

- Rappel :
à 300K Si : $E_g = 1,1 \text{ eV}$
Ge : $E_g = 0,66 \text{ eV}$

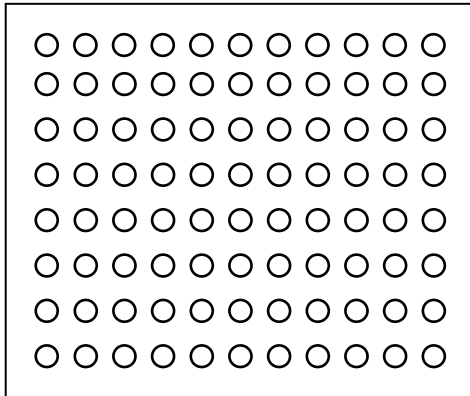
La jonction PN

- Simplification : mise en contact de deux matériaux P et N
- Que se passe-t-il à l'équilibre thermodynamique? :
 - Différence de gradients de concentration de porteurs
 - Diffusion des porteurs vers une zone moins peuplée
 - Apparition d'une charge d'espace due aux dopants ionisés fixes
 - Établissement d'un champ électrique qui empêche toute diffusion

 Une zone désertée de porteurs libres apparaît, c'est la **zone déplétée**.

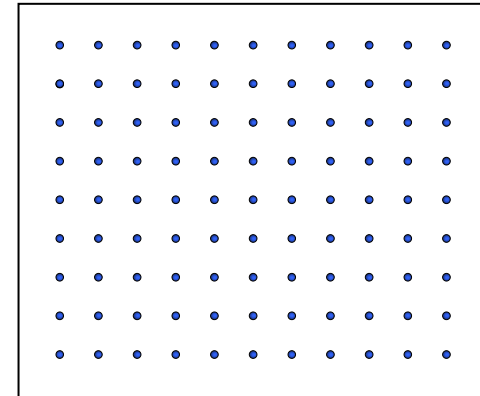
La jonction PN

Silicium dopé P



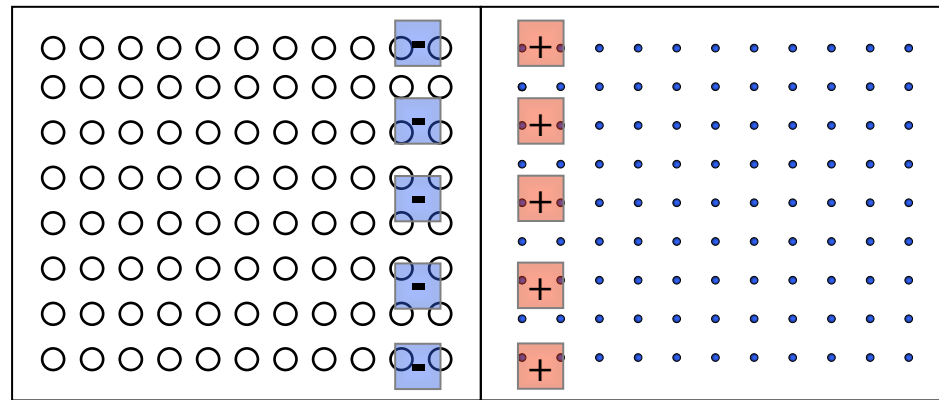
Les trous sont les porteurs majoritaires.

Silicium dopé N



Les électrons sont les porteurs majoritaires.

La jonction PN

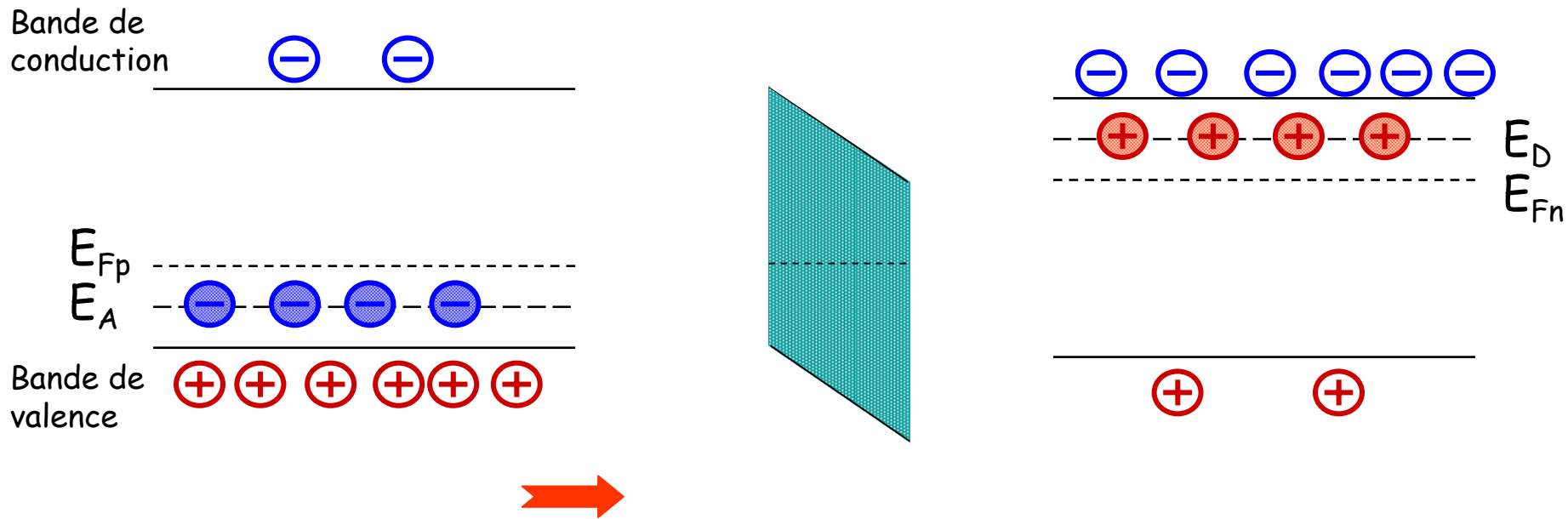


Ions négatifs de bore

Ions positifs de phosphore

Zone déplétée

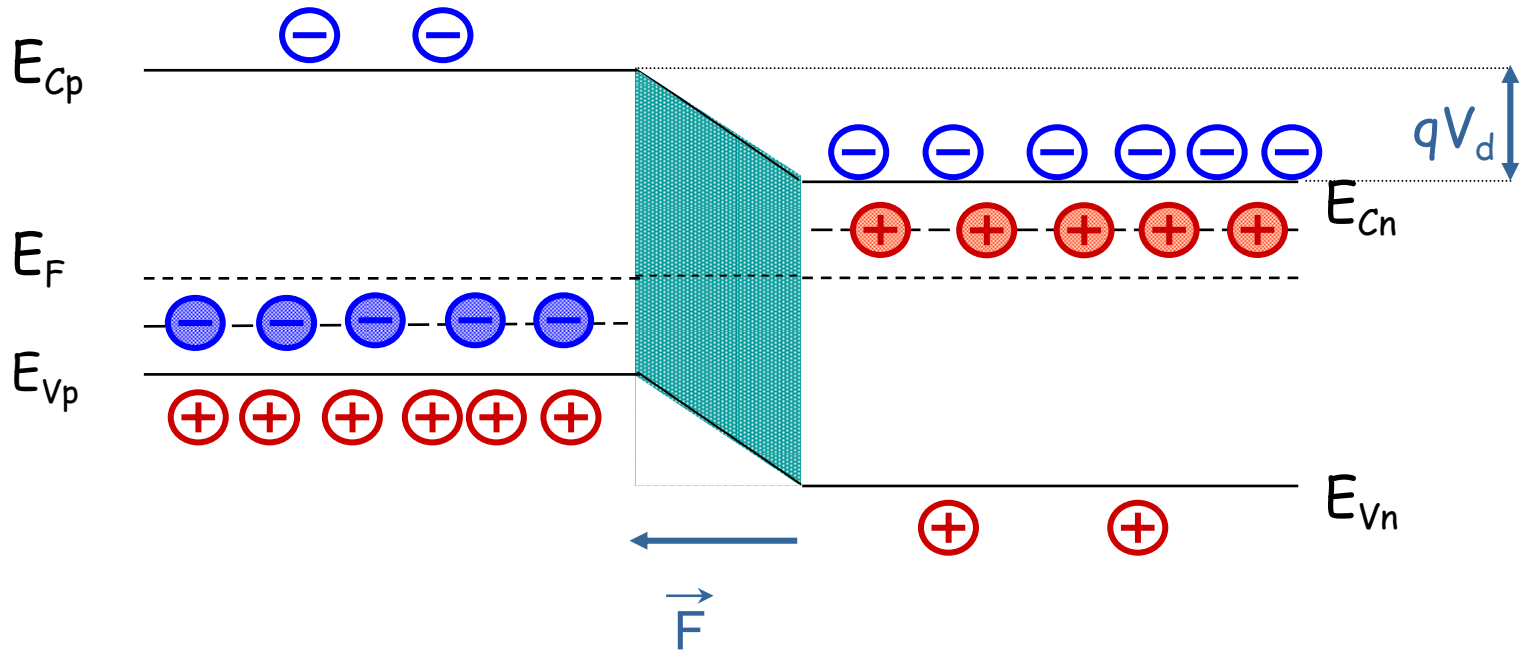
La jonction PN



La jonction PN

Bande de conduction

Bande de valence



La jonction PN

- Densité de charge d'espace : σ

$$x_p < x < 0 \quad \sigma(x) = -qN_A$$

$$0 < x < x_n \quad \sigma(x) = +qN_D$$

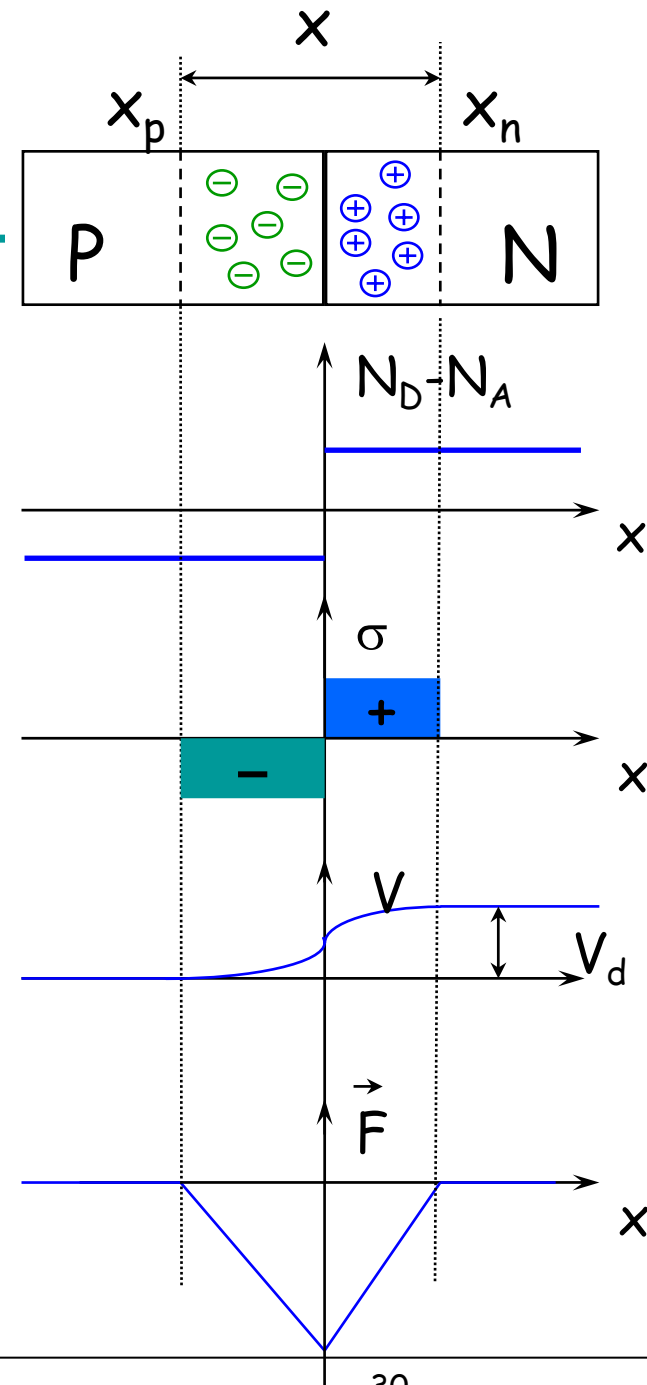
$$\text{ailleurs} \quad \sigma(x) = 0$$

- Potentiel de diffusion : V_d

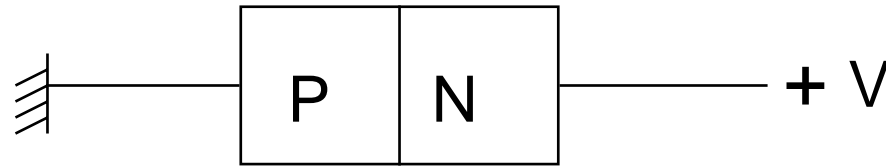
- Équation de Poisson :
$$\frac{d^2 V}{dx^2} + \frac{\sigma(x)}{\epsilon} = 0$$

- 1° intégration \rightarrow champ électrique : $F(x)$
- 2° intégration \rightarrow potentiel électrique : $V(x)$

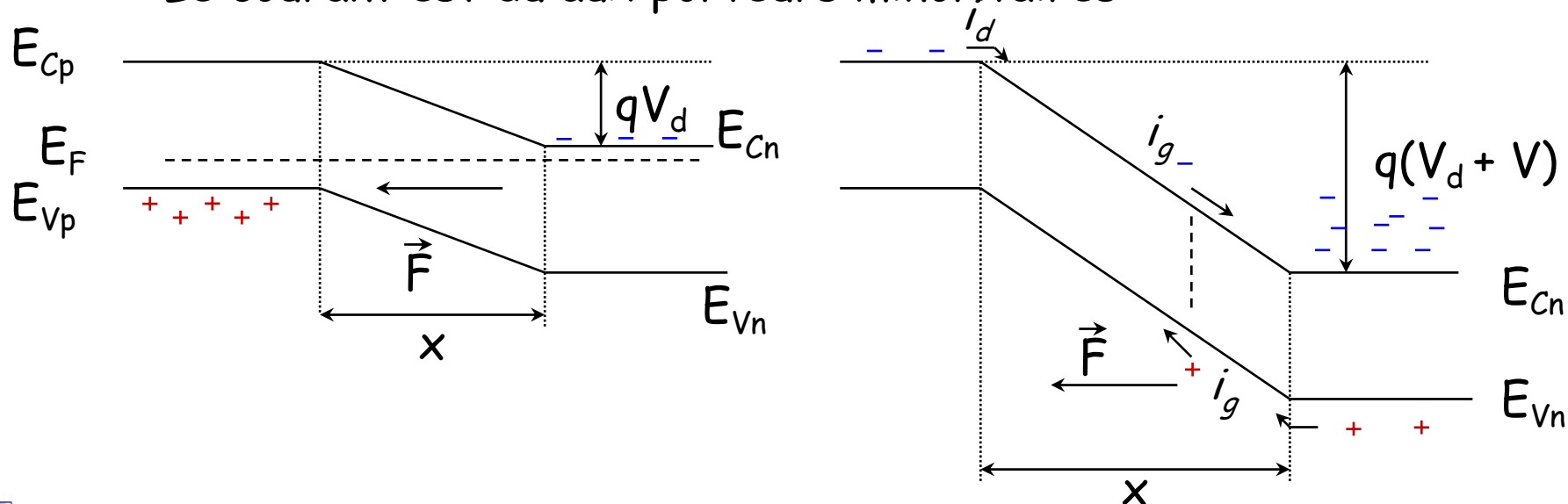
- Largeur de la zone déplétée : $x = x_p + x_n$
 - Continuité du potentiel à la jonction
 - Neutralité électrique : $N_A x_p = N_D x_n$



La jonction polarisée en inverse

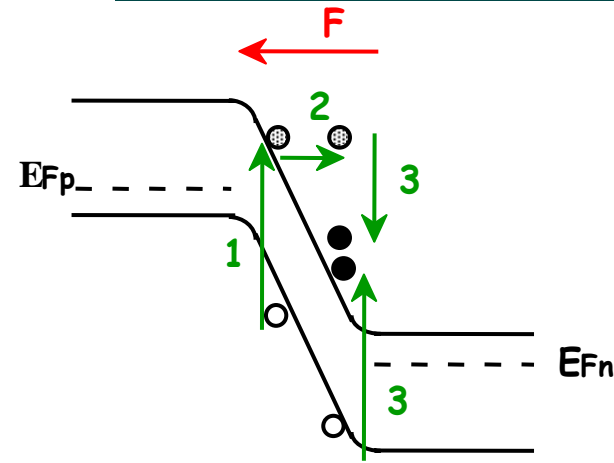
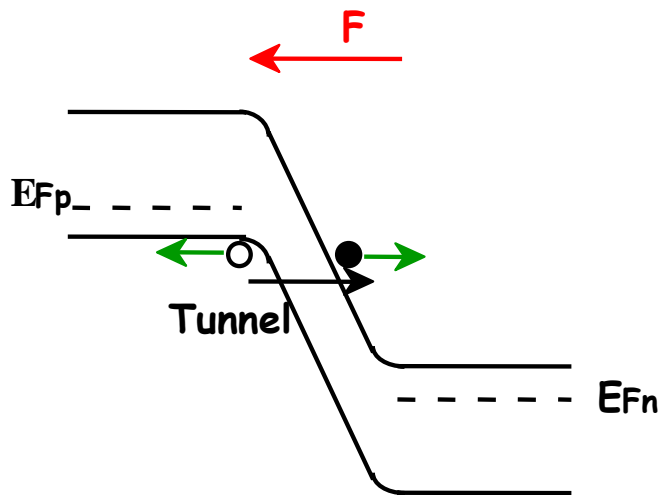
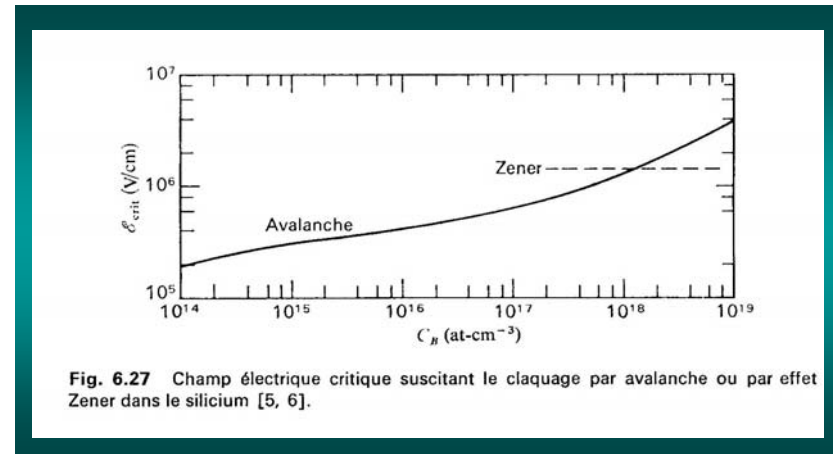


- La tension V se superpose au potentiel de diffusion V_d
- La barrière de potentiel augmente et devient infranchissable pour les porteurs majoritaires
- La zone de déplétion augmente
- Le courant est dû aux porteurs minoritaires



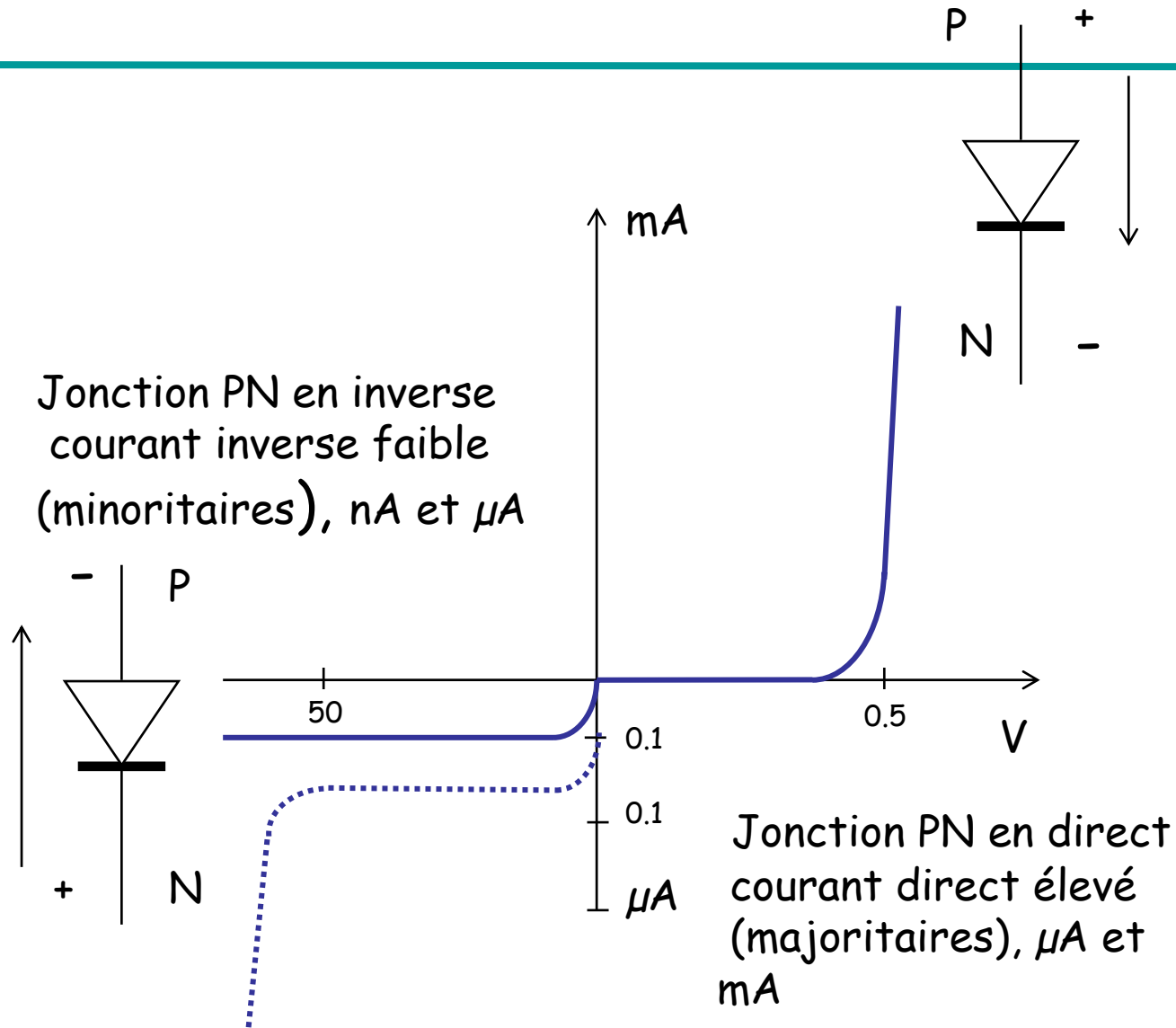
Le claquage de la jonction

- Si la tension augmente, le champ augmente
- Au-delà de 10^5 V/cm, claquage Zener ou Avalanche
- Dépend de la résistivité du matériau



Augmentation du courant inverse pouvant conduire à la dégradation de la jonction

La jonction est une diode



Quelques valeurs

Propriétés	Si	Ge
Z	14	32
A	28	73
densité (g/cm ³)	2.33	5.32
E _g (eV)	1.12	0.74
Const. diélectr.	12	16
ε (F/cm)	1.06 10 ⁻¹²	1.5 10 ⁻¹²
μ ₋ (cm ² /V.s)	1350	3.6 10 ⁴
μ ₊ (cm ² /V.s)	480	4.2 10 ⁴
n _i (cm ⁻³)	1.45 10 ¹⁰	2.4 10 ¹³
ρ _i (Ω.cm)	2.3 10 ⁵	47
ω(eV)	3.6	2.96

77 K

$kT \sim 0.0259 \text{ eV}$
 $\epsilon_0 = 8.86 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$
 $v_s \sim 10^7 \text{ cm/s}$

Résumé

Notions abordées :

- SC de type N ou P
- Quelques paramètres d'influence : ρ , μ , T
- L'orientation cristallographique
- La jonction PN polarisée en inverse
- La zone déplétée
- Le champ électrique