
Détecteurs à semi-conducteurs

Mohsine MENOUNI

Aix Marseille Univ, CNRS/IN2P3, CPPM, Marseille, France

Action Nationale de Formation "Techniques de base des détecteurs"

10–15 mars 2024

Centre CAES de Fréjus - La villa Clythia

Plan du cours

- Introduction
- Interaction particules-matière
- Concepts de base et physique des semi-conducteurs
- Détecteurs silicium en physique des particules
- Conclusion

Domaines d'utilisation

- Les détecteurs à semi-conducteurs sont largement utilisés dans différents domaines :
- **Physique nucléaire**
 - détection et mesure des particules subatomiques et des rayonnements émis lors de collisions à haute énergie
 - Mesure de l'énergie des particules chargées (gamme MeV)
 - détermination précise de l'énergie des photons -> Spectroscopie gamma
- **Physique des particules**
 - Identification et suivi des particules produites lors d'expériences dans les accélérateurs
 - Détermination précise des trajectoires des particules et des sommets de désintégration (decay vertices)
- **Médecine nucléaire**
 - Utilisation dans les équipements de diagnostic tels que les scanners TEP (tomographie par émission de positrons) pour détecter et localiser les tumeurs (détection de positons émises par des radionucléides dans le corps humain)
- **Astronomie**
 - Utilisation dans les télescopes et les satellites pour détecter les rayonnements électromagnétiques provenant de sources astronomiques telles que les étoiles, les galaxies et autres objets cosmiques.
- **Détection de rayonnement** dans diverses applications
 - Surveillance de l'environnement pour la radioactivité
 - Sécurité dans les aéroports et autres installations sensibles
 - Dosimètres pour surveiller l'exposition aux radiations.
- Nombreux domaines de la **recherche scientifique**, de la **médecine** et de **l'industrie**

Points forts des détecteurs à SC

- **Sensibilité élevée**
 - Approprié pour les applications nécessitant une détection précise et fiable
- **Résolution spatiale**
 - Excellente résolution spatiale qui permet de localiser avec précision le point d'interaction particule-détecteur
 - Élément crucial pour la reconstruction des trajectoires des particules et l'identification des événements dans les expériences de physique des particules
- **Résolution en énergie**
 - Caractérisation précise des processus nucléaires et des interactions de particules
- **Temps de réponse rapide**
 - Applications nécessitant une détection rapide des événements, tels que la spectroscopie de rayons X en temps réel ou la détection de particules dans les accélérateurs de particules
- **Faible bruit de fond**
 - la sensibilité et la résolution des mesures, en particulier dans les applications nécessitant la détection de signaux faibles à côté d'un bruit de fond élevé

- L'énergie nécessaire pour créer une paire électron-trou dans le silicium ~ 3.0 eV
- L'énergie nécessaire pour ioniser les molécules de gaz ~ 30 eV
- L'énergie nécessaire pour produire un photoélectron dans le scintillateur + photomultiplicateur ~ 300 eV

Points faibles des détecteurs à SC

- **Coût** relativement élevé par unité de surface
 - Pas seulement le silicium lui-même
 - Nombre élevé de canaux de lecture
 - Forte consommation et besoin de refroidissement
- Complexité de la fabrication
 - Matériaux tels que GaAs, CdTe, Diamant
- Effet de la **température**
 - La performance des détecteurs à semi-conducteurs peut être sensible aux variations de température
 - Nécessite parfois des dispositifs de refroidissement pour maintenir des performances optimales
- Vulnérabilité aux dommages
 - **Radiations** à températures élevées -> peut limiter leur durée de vie pour certaines applications
 - Détecteur de trace de ATLAS fonctionne à basse température → limite les effets de radiation
- Complexité de l'électronique associée
 - Nécessite souvent une électronique de lecture complexe
 - Amplifier, traiter et analyser les signaux détectés de **centaines de millions de canaux** de lecture

Matériaux SC principaux

- Silicium (Si)

- Le SC le plus utilisé dans l'industrie électronique -> synergie avec l'industrie de micro-électronique
- Applications pour les **détecteurs de vertex** et les **détecteurs de traces** dans les expériences de physique des hautes énergies
- Dispositifs d'imagerie comme les capteurs CCD et CMOS
- Opération à température ambiante

- Germanium (Ge)

- Utilisé en physique nucléaire -> **Spectroscopie haute résolution**
- Besoin de refroidissement à cause du petit band gap de 0.66 eV (Utilisation d'azote liquide à 77 K)

- Arséniure d Gallium (GaAs)

- Applications de détection **infra-rouges**

- Tellure de Mercure-Cadmium (HgCdTe)

- Détecteurs **infra-rouges** pour la vision nocturne, télédétection ou surveillance thermique

- Silicium amorphe

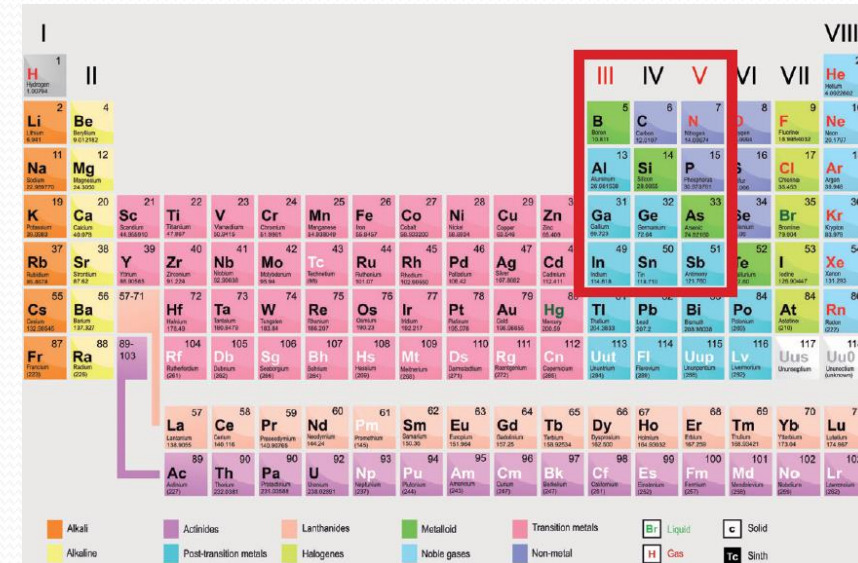
- Détecteurs à **rayons X** dans les applications médicales

- Silicium sur isolant (SOI)

- Détecteurs à **rayons X** dans les applications de surveillance de radiation

- Diamant

- Haute **résolution spatiale**, temps de réponse **rapide** et très **tolérant aux radiations**
- Allotrope du carbone- Large bande interdite (ne nécessite pas de zone de déplétion) - Inconvénients **signal faible** et **coût élevé**



Interaction particules-matière

- Détection de particules au LHC
- Interaction particule matière
- Perte d'énergie de particules chargées
- Fluctuation de la perte d'énergie
- Cas du Silicium

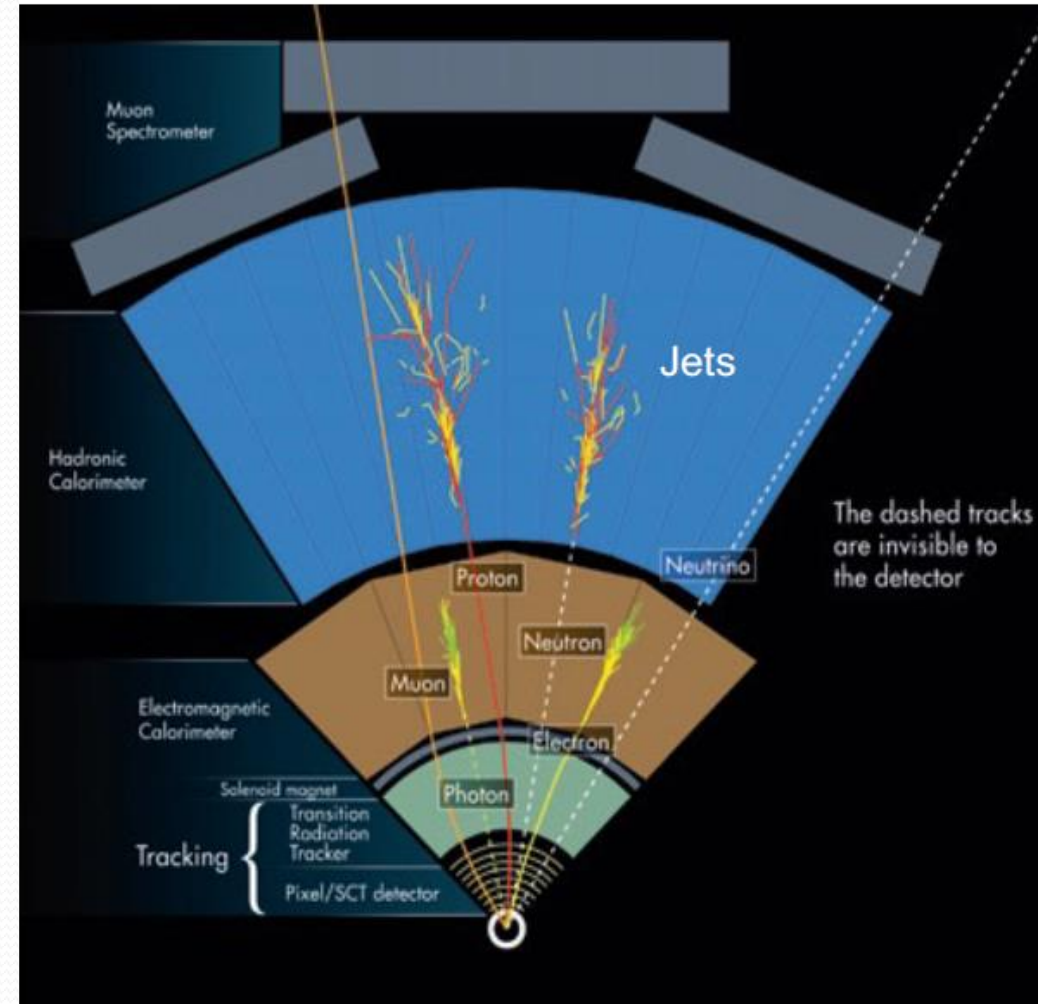
Voir cours de Elizabeth et Laurent

<https://indico.in2p3.fr/event/31002/contributions/130304/attachments/83221/123769/InteractionsParticulesMati%C3%A8re.pdf>

https://indico.in2p3.fr/event/31002/contributions/130315/attachments/83237/123811/DetecteursCollisionneurs_Frejus2024.pdf

Détection de particules au LHC

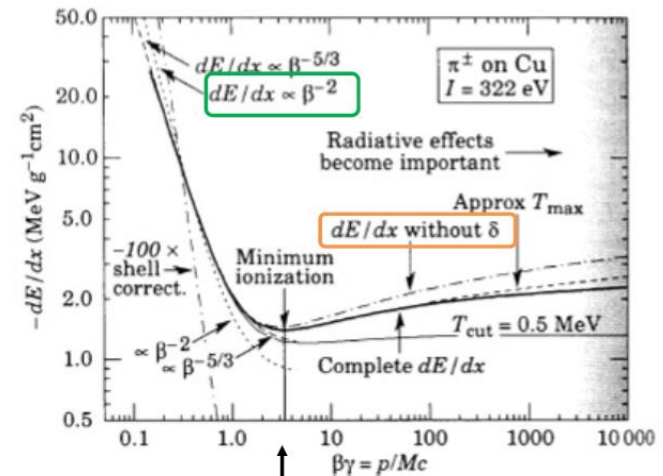
- Le détecteur ne traite que les particules "stables "
- Particules les plus fréquemment produites
 - $e^\pm, \mu^\pm, \gamma, \pi^\pm, K^\pm, K^0, p^\pm$
- Pour être détectée, une particule doit interagir/déposer de l'énergie
 - Une **partie de l'énergie** -> détecteurs de trace (trackers)
 - La **totalité de l'énergie** -> calorimètres
- Les signaux proviennent des interactions particules chargées
- La mesure de l'énergie des particules neutres (photons, neutrons) :
 - Transfert de leur énergie à des particules chargées (calorimètres)



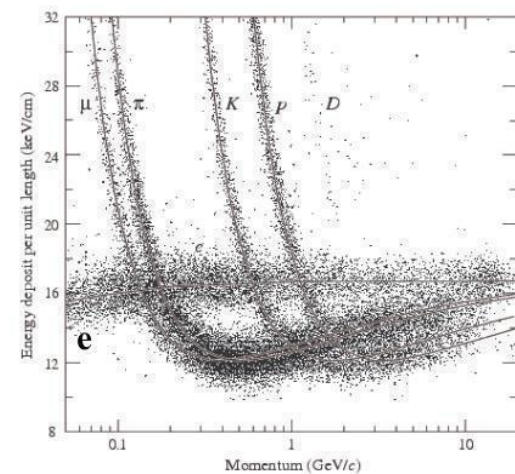
Perte d'énergie de particules chargées

- La majorité de l'énergie perdue par une particule chargée traversant la matière se fait par ionisation et excitation des atomes du matériau traversé
- La particule incidente peut heurter les électrons des atomes, les éjectant de leur orbite (ionisation) ou les excitant à des niveaux d'énergie plus élevés
- La quantité d'énergie perdue dépend de plusieurs facteurs :
 - la charge et la vitesse de la particule incidente
 - La densité du matériau traversé
- dE/dx désigne la perte d'énergie de la particule incidente
- La formule de Bethe-Bloch donne une approximation de la perte **moyenne** en énergie par unité de longueur pour une particule chargée rapide traversant un matériau
- La formule de Bethe-Bloch donne **une moyenne**
- Deux régions importantes :
 - Décroissance rapide de dE/dx en $1/\beta^2 \rightarrow \beta\gamma = 3-4$
 - Particule d'ionisation Minimale (MIP)
 - Faible croissance de dE/dx en $\ln(\beta^2\gamma^2)$ pour les particules hautement relativistes
- $\langle dE/dx \rangle_{\min} \sim 1.66 \text{ MeV}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{cm}^2$
- Densité du Silicium : $2.33 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3} \rightarrow \langle dE/dx \rangle_{\min} (\text{Si}) = 3.87 \text{ MeV/cm}$

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$



$\beta\gamma \approx 3-4$

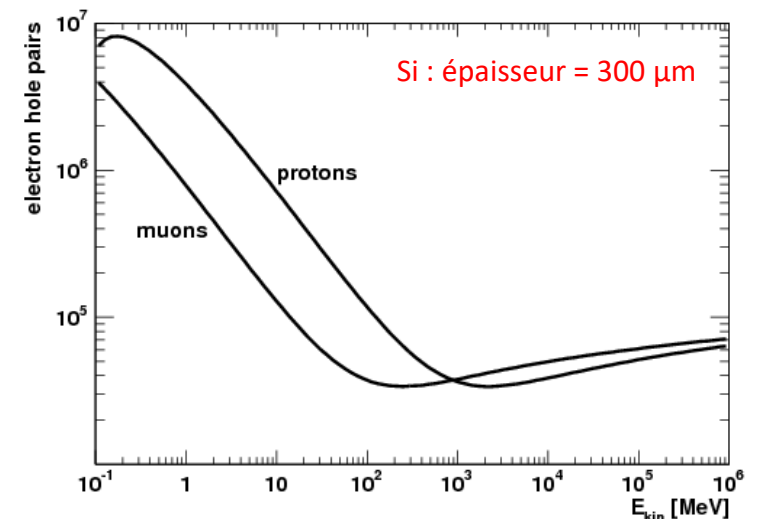
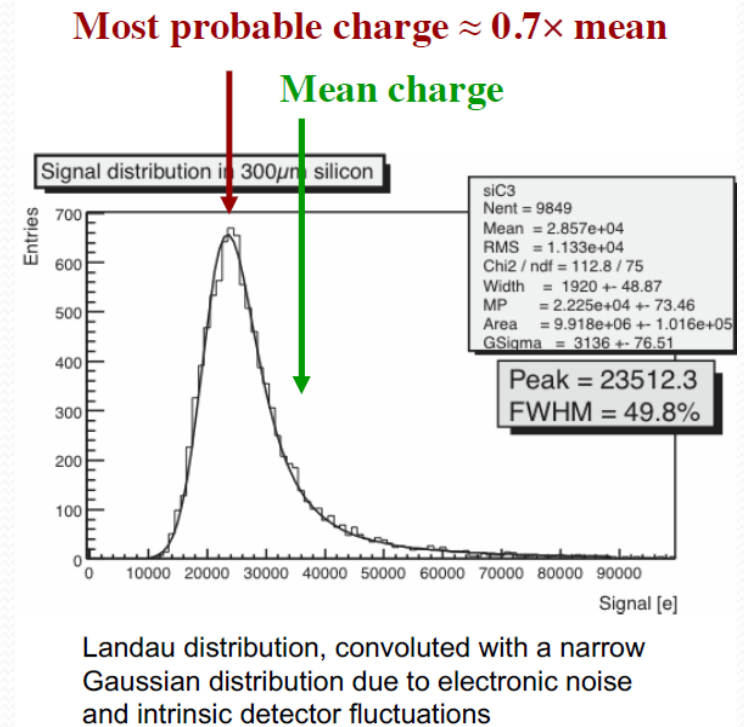


Voir cours de Laurent

<https://indico.in2p3.fr/event/31002/contributions/130304/attachments/83221/123769/InteractionsParticulesMati%C3%A8re.pdf>

Fluctuation de la perte d'énergie

- La perte d'énergie simple est un processus **statistique**, **fluctuant événement par événement**
- Pour les **absorbeurs minces**, la distribution de Landau (Queue asymétrique) donne une bonne description
- Valeur moyenne \neq Valeur la plus probable (MPV)
- Détecteur à Silicium :
 - L'énergie d'ionisation moyenne $I_0 = 3.62$ eV
 - La perte d'énergie **moyenne** est $\langle dE/dx \rangle_{\min}(\text{Si}) = 3.87$ MeV/cm
 - **MIP = 107 e-h/ μm**
- La perte d'énergie **la plus probable** (MPV)
 - $0.7 \times$ moyenne = 2.71 MeV/cm
 - **MIP = 75 e-h/ μm**
- Pour un détecteur Si d'une épaisseur $d = 300 \mu\text{m}$
 - Charge moyenne = 32000 e- ou 5.1 fC
 - Charge la plus probable = 22500 e- ou 3.6 fC

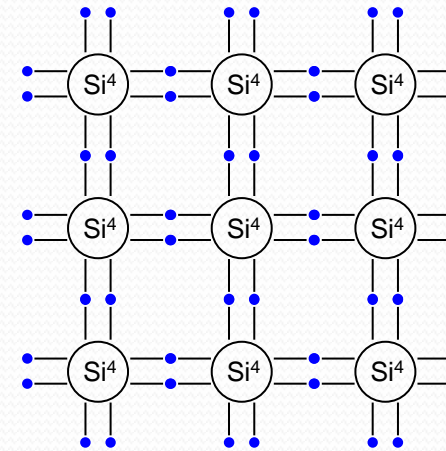


Concepts de base

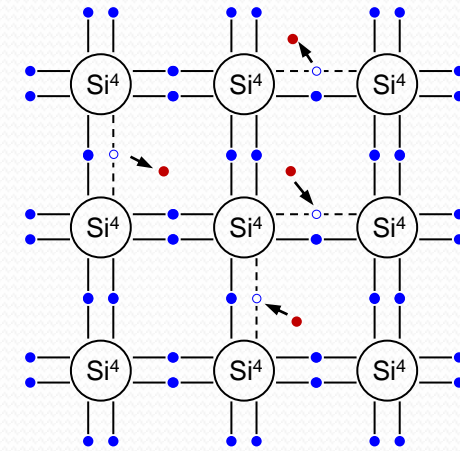
- Structure cristalline des semi-conducteurs
- Liaisons dans les semi-conducteurs
- Modèle des bandes d'énergie
- Propriétés
- Dopage du silicium
- Jonction PN polarisée en inverse
- Capacité de la jonction, profondeur de déplétion, courant de fuite
- Exemple

Modèle de liaison des semi-conducteurs

- Projection du réseau cristallin du SC en 2D
- Modèle de liaison covalente
 - Deux atomes de silicium partagent une paire d'électrons
 - Dans un cristal covalent, les atomes partagent des électrons pour former des liaisons covalentes fortes
- Chaque atome a 4 voisins les plus proches
 - les 4 électrons de la couche externe sont partagés et forment des liaisons covalentes
- A basse température, tous les électrons sont liés
- A plus haute température, les vibrations thermiques rompent certaines des liaisons
 - Les e- libres provoquent la conductivité (électrons de conduction)
 - Les liaisons ouvertes restantes attirent d'autres électrons
 - Les "trous" changent de position (conduction par les trous)



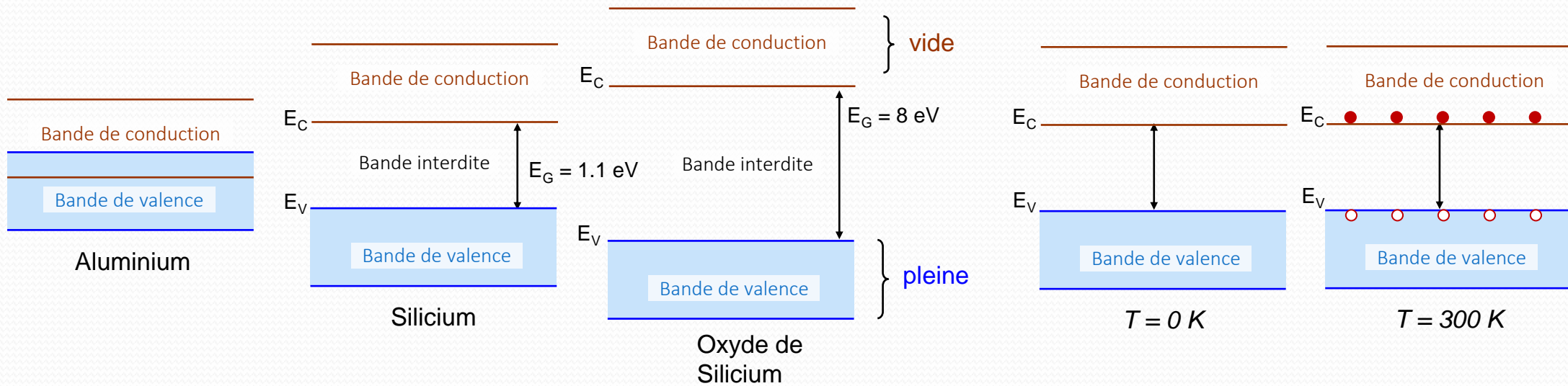
T = 0 K



T > 0 K

- Electron de valence
- Electron de conduction

Modèle des bandes d'énergie



- A l'équilibre : à $T = 0 \text{ K}$
 - La bande de valence est pleine
 - La bande de conduction est vide
- Dans un métal les deux bandes se chevauchent
 - La bande de conduction est partiellement remplie d'électrons
- Pour un SC, des électrons peuvent accéder dans la bande de conduction à T ambiante
 - Pour une transition de la BV à la BC, un niveau d'énergie non occupé (trou) apparaît dans la BV
 - Quand un champ électrique externe est appliqué
 - Le flux des électrons et le flux des trous participent au courant dans le SC
- Pour un isolant

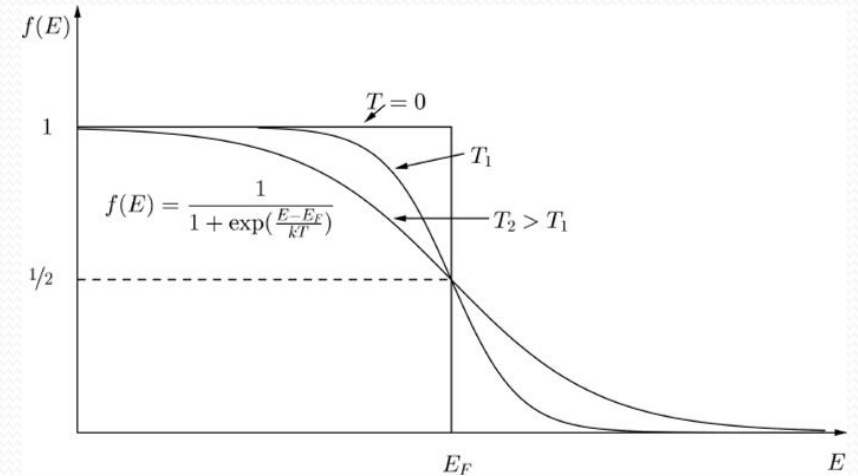
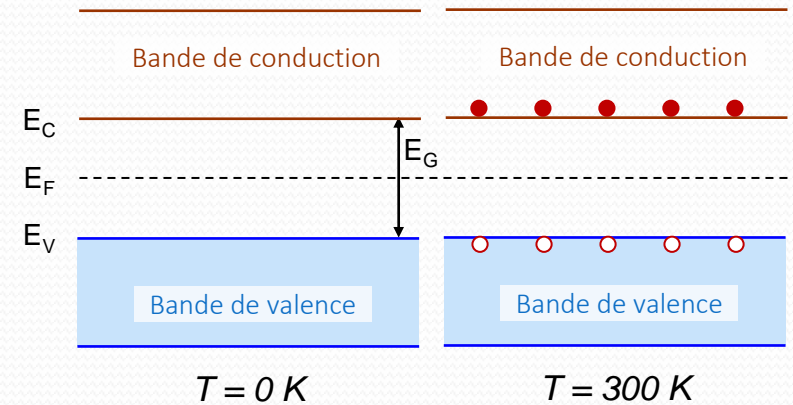
Distribution de Fermi

- La distribution de Fermi $f(E)$ décrit la probabilité qu'un état électronique d'énergie E soit occupé par un électron

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$

- Le niveau de Fermi E_F est l'énergie à laquelle la probabilité d'occupation est de 50 %
- Pour les métaux, E_F se situe dans la bande de conduction
- Pour les semi-conducteurs et les isolants, E_F se situe dans la bande interdite
- Fonction de distribution de Fermi pour différentes températures

- $T_2 > T_1 > T_0 = 0 \text{ K}$



E_F : Le niveau de Fermi

k : constante de Boltzmann

$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ou $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

T : Température absolue (K)

Densité des porteurs dans un SC intrinsèque

- A cause de la faible bande interdite dans le Silicium
 - Les électrons occupent la bande de conduction à la température ambiante
 - Les électrons de la bande de conduction peuvent se recombiner avec des trous
 - Un équilibre thermique est atteint entre excitation et la recombinaison

- A l'équilibre, la concentration des porteurs :

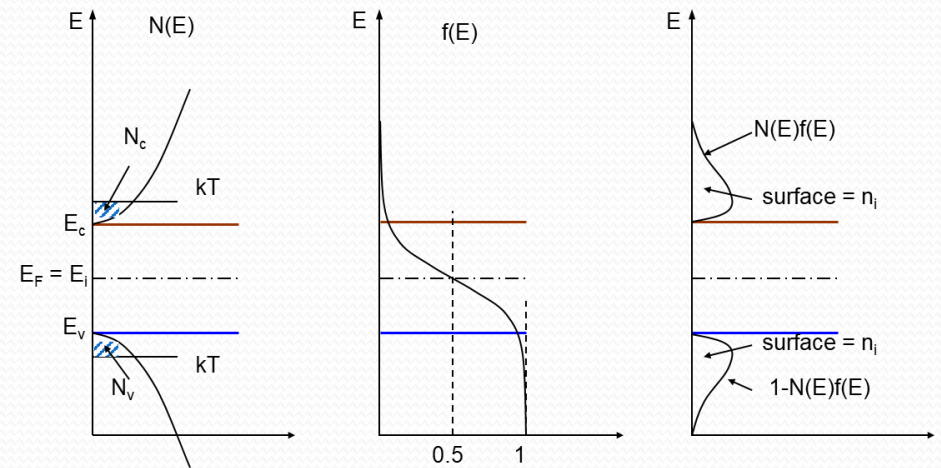
$$n = p = n_i$$

$$n_i = \alpha \times T^{\frac{3}{2}} \exp \frac{-(E_G)}{2kT}$$

- Dans le silicium, la concentration intrinsèque de porteurs à $T = 300$ K est :

$$n_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \text{ (Calcul } n_i)$$

- Le silicium contient environ 10^{22} atomes/cm³
- Environ **1 atome de silicium sur 10^{12}** est ionisé



- Pour un détecteur Si d'une épaisseur $d = 300 \mu\text{m}$
 - $n_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \rightarrow 4.35 \times 10^8$ paires e-h
 - Particule chargée génère un MIP de charge moyenne de 3.2×10^4 e-h
- Le nombre de paires e-h créées thermiquement (bruit) est supérieur de quatre ordres de grandeur au signal
- Il faut réduire les porteurs de charge
 - Opération à très faible température
 - **Création d'une zone de déplétion suffisante dans les jonctions pn**

Comparaison

Matériau	Si	Ge	GaAs	Diamant
Numéro atomique Z	14	32	31+33	6
Nombre de masse A	28.09	72.61	69.72+74.92	12.01
Paramètre de maille	5.43	5.65	5.65	3.57
Densité (g/cm ³)	2.33	5.33	5.32	3.52
E _G (300 K)	1.11	0.66	1.42	5.6
Permittivité relative	11.9	16.0	12.8	5.7
Mobilité des électrons (cm ² /V.s)	1450	3900	8500	2000
Mobilité des trous (cm ² /V.s)	450	1900	400	1200
Charge intrinsèque à 300 K (cm ⁻³)	1.45 x 10 ¹⁰	2.4 x 10 ¹³	2.0 x 10 ⁶	<1 x 10 ³
Résistivité intrinsèque (Ω.cm)	2.3 x 10 ⁵	47	10 ⁸	>1 x 10 ¹¹
Champ de claquage (V/cm)	3 x 10 ⁵	10 ⁵	4.0 x 10 ⁵	3 x 10 ⁷
E moyen pour créer une paire à 300 K	3.62	2.9	4.2	13.25

- Un bon détecteur doit avoir un rapport signal/bruit élevé
- → conduit à deux exigences contradictoires :
 - Grand signal → Les particules doivent produire beaucoup d'e-h → faible énergie d'ionisation → petite bande interdite
 - Faible bruit → peu de porteurs de charge intrinsèques → grande bande interdite
- Un matériau optimal devrait avoir un E_G ≈ 6 eV
 - La bande de conduction est presque vide à température ambiante
 - Bande interdite (E_G) est juste pour créer un grand nombre suffisant de paires e-h+
- Malgré ces obstacles initiaux, les détecteurs en diamant sont maintenant de plus en plus utilisés dans divers domaines, y compris la physique des particules

Mobilité et conductivité

- Sous influence de **champ électrique** :
 - Pour un champ relativement faible -> vitesse moyenne = vitesse de dérive
- **La mobilité** μ_n ou μ_p caractérise le matériau et la capacité de ses porteurs à se déplacer sous l'effet d'un champ électrique

$$v_n = \mu_n E$$

$$v_p = \mu_p E$$

- Quand le champ augmente, collisions avec les atomes du réseau qui décélèrent l'électron

$$\mu_n = \frac{q\tau_n}{m_n}$$

$$\mu_p = \frac{q\tau_p}{m_p}$$

- τ_n et τ_p étant la **durée moyenne d'accélération de la particule** entre deux collisions dans un champ E , m_n et m_p désignent les **masses effective**

- La valeur de la mobilité dépend du type du matériau

- Silicium :

- $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ pour les électrons

- $\mu_p = 480 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ pour les trous

- Résistivité

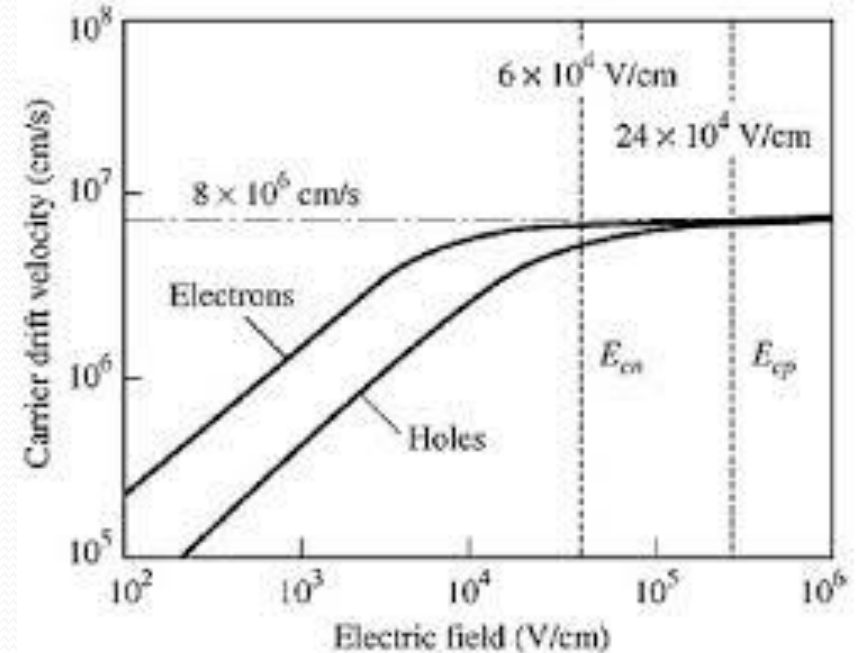
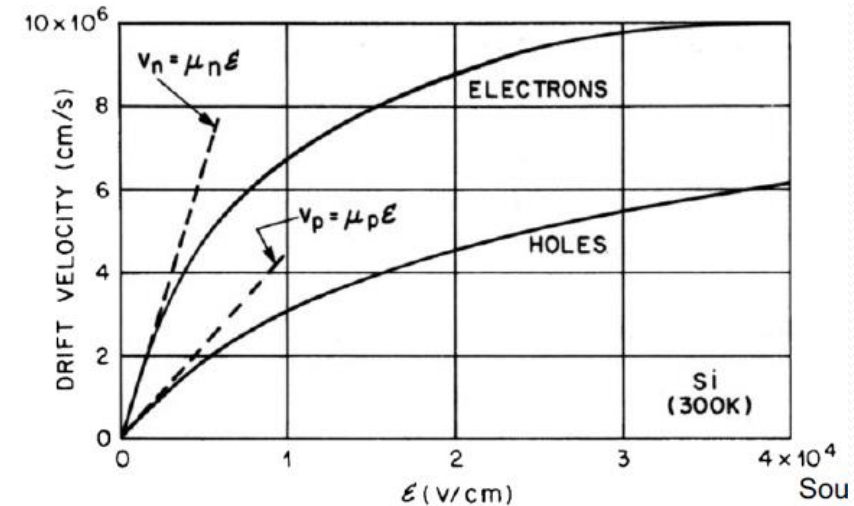
$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q\mu_n n + q\mu_p p}$$

- n : la concentration d'électrons

- p : la concentration des trous

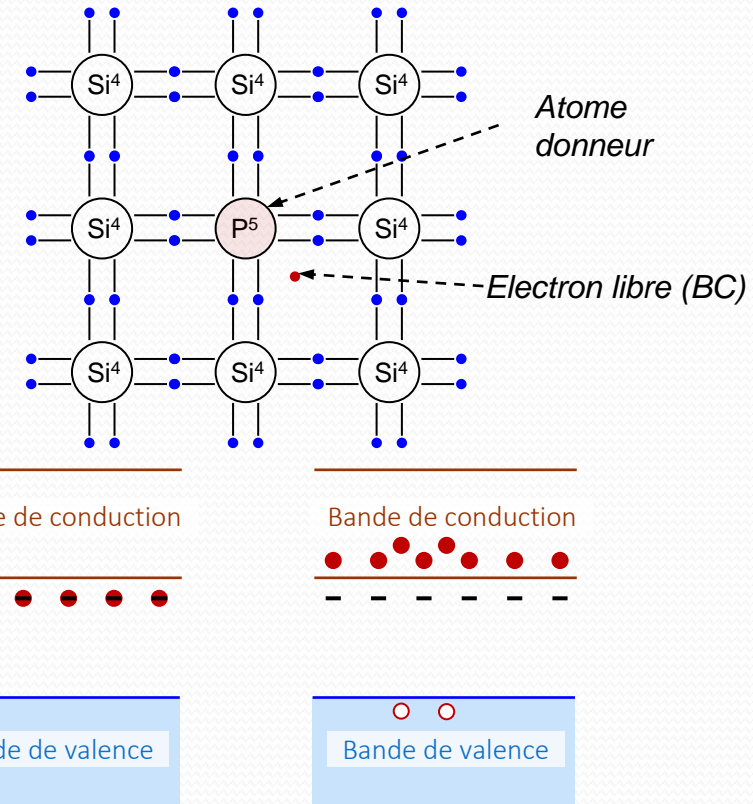
- Silicium intrinsèque : $n=p=n_i = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

- $\rho = 234 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ ($\rho = 2.8 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ pour l'Aluminium)



Dopage – SC extrinsèque

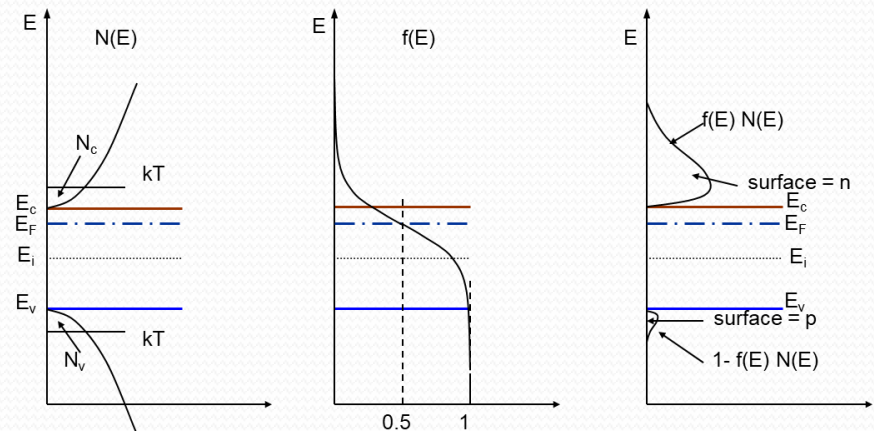
- Le dopage est le remplacement d'un petit nombre d'atomes du réseau par des atomes des colonnes voisines du tableau périodique
- Ces atomes dopants créent des niveaux d'énergie dans la bande interdite et modifient donc la conductivité
- Un semi-conducteur dopé est appelé semi-conducteur extrinsèque
- Les semi-conducteurs extrinsèques ont une **abondance d'électrons ou de trous**
- **Dopage type n (N_d):**
 - Dopants : Éléments avec 5 électrons de valence
 - Phosphore par exemple
 - Donneurs -> Abondance d'électrons



- Niveau de Fermi s'approche de la bande de conduction
- Dans la majorité des cas $N_d \gg n_i$, les concentrations d'e- et de trous dans le SC dopé n Calcul nn

$$n_n \approx N_d \qquad p_n \approx \frac{n_i^2}{N_d}$$

- Pour $N_d = 10^{15} \text{ at/cm}^3$
 $n_n = 10^{15} \text{ e-/cm}^3$ et $p_n = 2.1 \times 10^5 \text{ h/cm}^3$

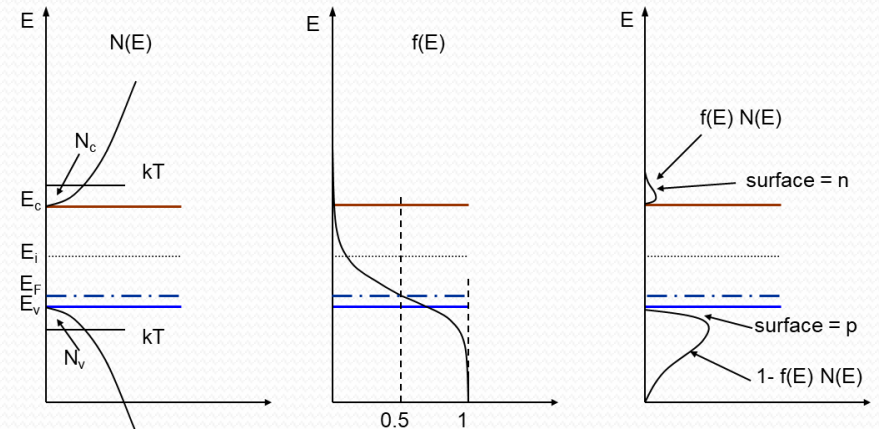
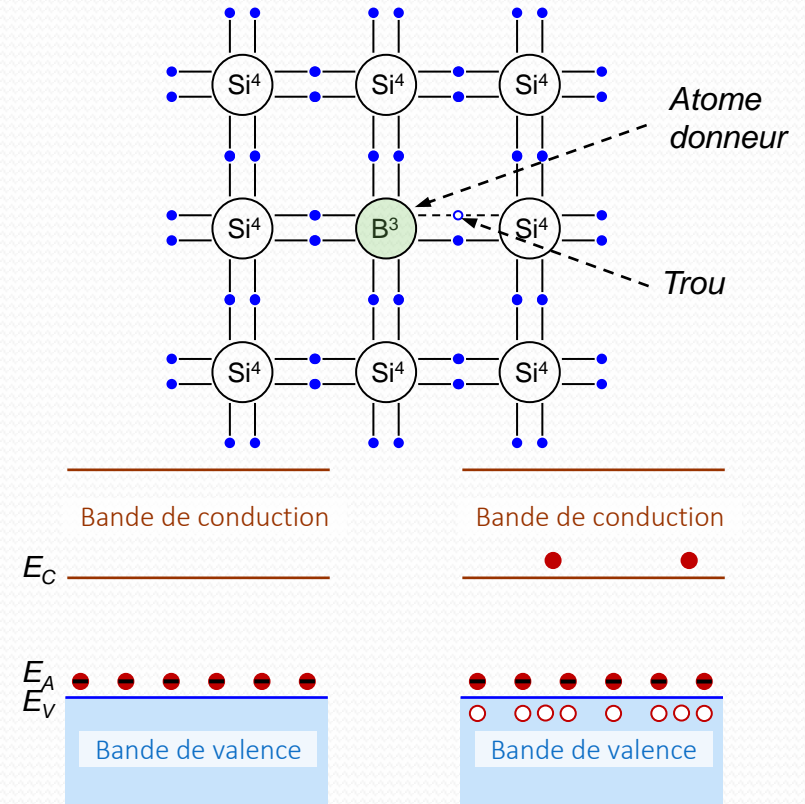


Dopage – SC extrinsèque

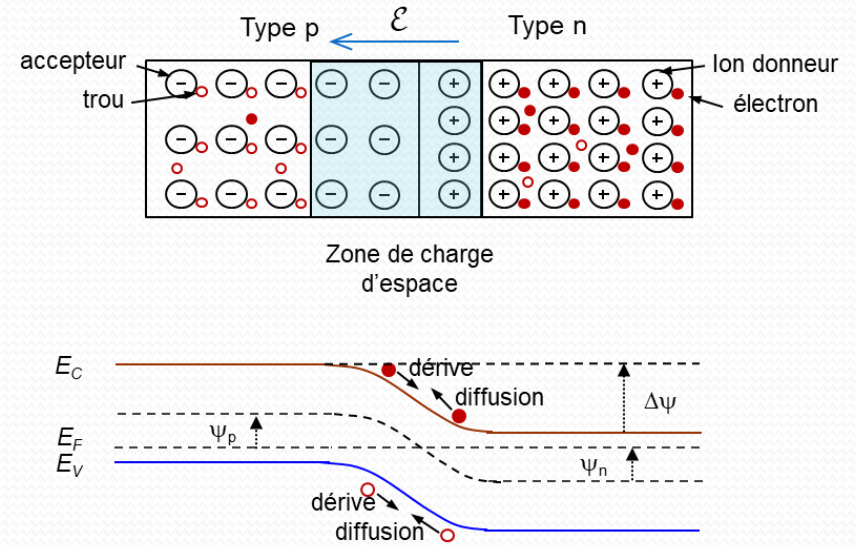
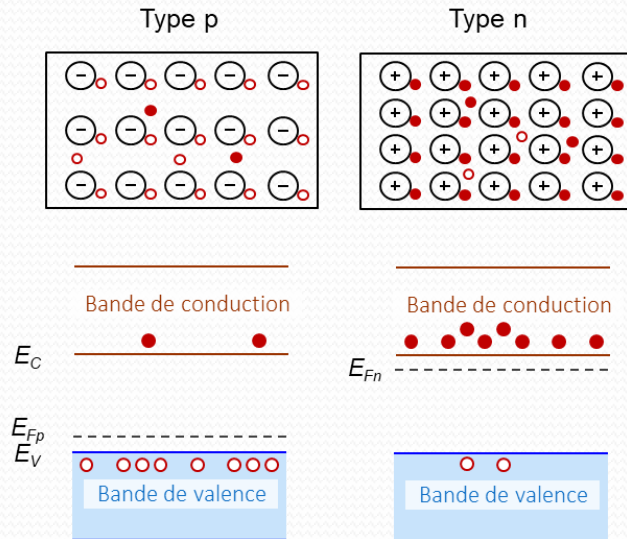
- Dopage de type p
 - Dopants : Éléments avec 3 électrons de valence
 - Bore par exemple
 - Accepteur- Abondance de trous
- Niveau de Fermi s'approche de la bande de valence

$$p_p \approx N_a$$

$$n_p \approx \frac{n_i^2}{N_a}$$



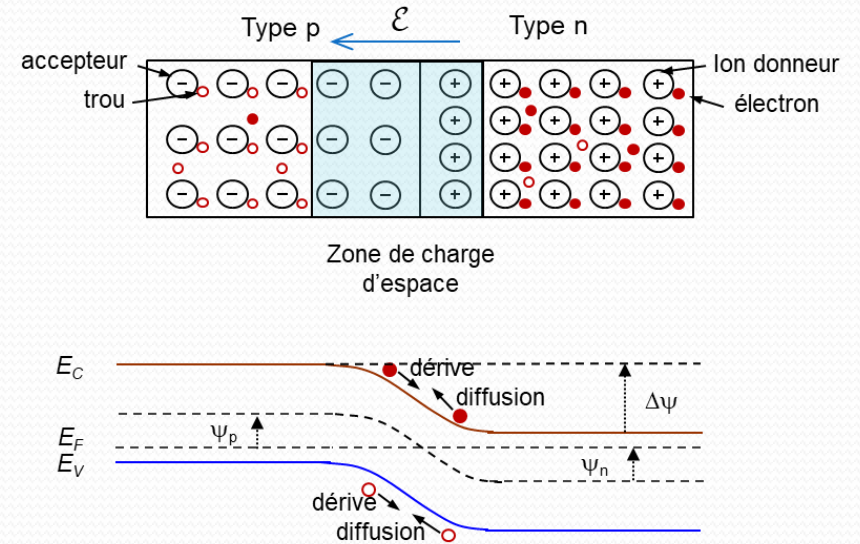
Jonction pn



- Chaque donneur produit un e- libre et chaque atome accepteur un trou
- Les électrons diffusent vers la région p et les trous vers la région n
 - Il y a donc création d'une zone de charge d'espace (ZCE) ou zone de déplétion
 - Un champ électrique apparaît dans cette zone
 - Le sens du champ est de façon à s'opposer à la migration des électrons et des trous
- La barrière de potentiel s'oppose au transfert de charges de part et d'autre de la jonction
- A l'équilibre, le niveau de Fermi est identique de partout dans le dispositif

Barrière de potentiel de la jonction pn

- Répartition des charges
- Région neutre n
 - n_n : e- majoritaires provenant des impuretés
 - p_n : trous mineurs de la bande de valence
- Région neutre p
 - p_p : trous majoritaires des impuretés
 - n_p : électrons mineurs de la bande de conduction
- En plus, dans la région neutre N, et dans la région neutre P



$$n_n \approx N_d$$

$$p_p \approx N_a$$

$$N_d = n_i \exp\left(\frac{q\psi_n}{kT}\right)$$

$$N_a = n_i \exp\left(\frac{q\psi_p}{kT}\right)$$

$$\psi_n = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right)$$

$$\psi_p = -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right)$$

$$\psi_0 = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right)$$

On considère une jonction p+n

$$N_d = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_a = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

A température ambiante :

$$n_i = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3} \text{ et } kT/q = 26 \text{ mV}$$

Barrière de potentiel ?

$$\rightarrow \psi_0 = 0.7 \text{ V}$$

Jonction pn non polarisée

- Bilan des charges dans la ZCE :

$$\rho_n = qN_d \quad \rho_p = -qN_a$$

- La relation entre la distribution de charge et le champ électrique est donnée par la loi de Poisson :

$$\frac{d\mathcal{E}}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

- On montre que la zone de déplétion s'étend sur la région la moins dopée ([Calcul W](#))

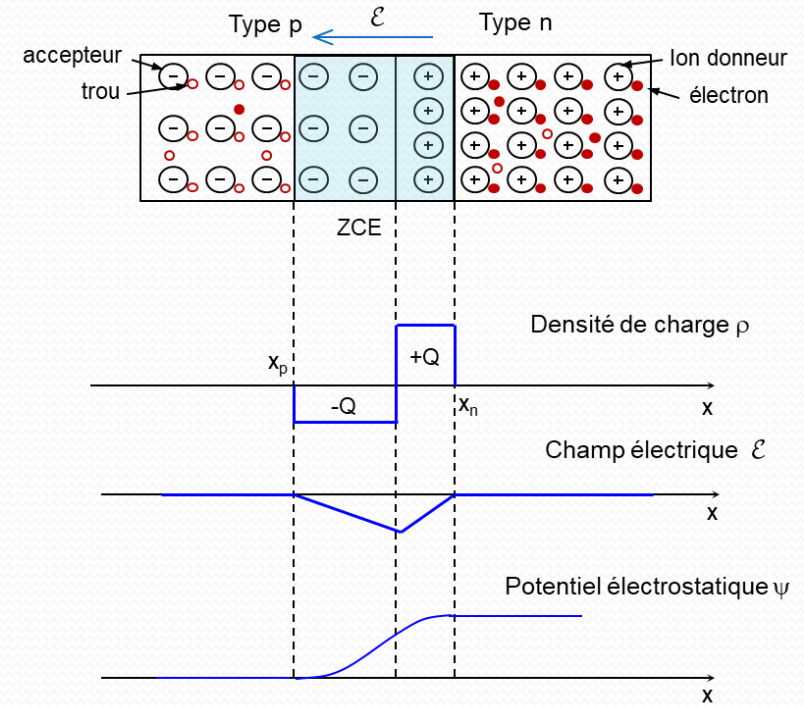
$$N_d x_n = N_a x_p$$

- Profondeur de la zone de déplétion (ZCE)

$$w \approx x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon N_d + N_a}{q N_d N_a} \psi_0}$$

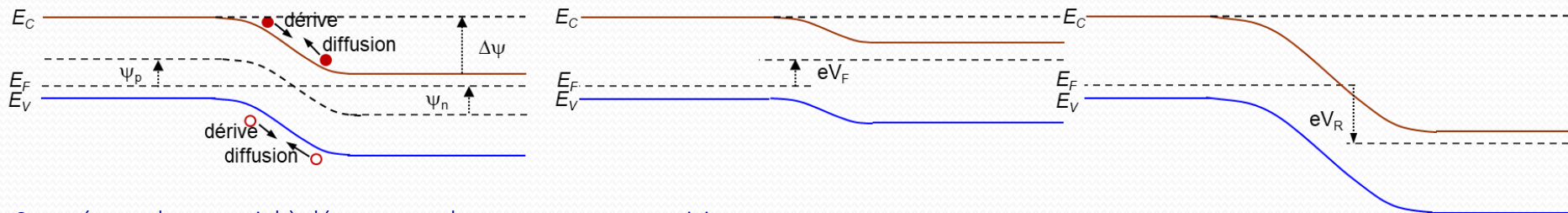
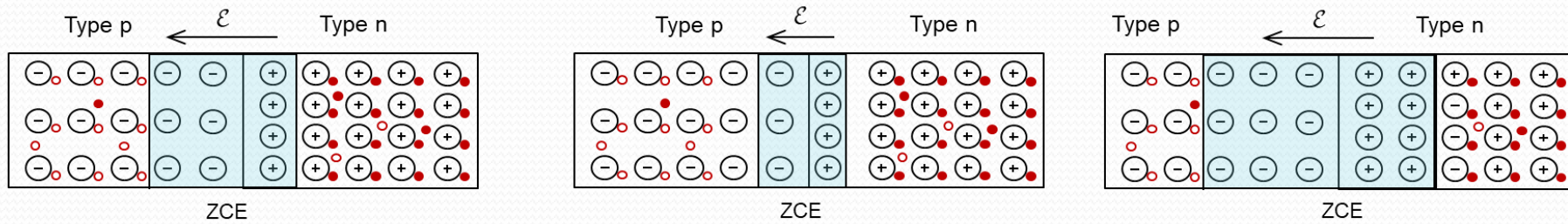
- Pour le cas général d'une jonction P+N où $N_a \gg N_d$, la ZCE s'étend du côté le moins dopé p:

$$w = x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \times \frac{1}{N_d} \psi_0}$$



On considère une jonction p+n
 $N_d = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ et $N_a = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
 A température ambiante :
 $n_i = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ et $kT/q = 26 \text{ mV}$
 Barrière de potentiel ?
 $\rightarrow \psi_0 = 0.7 \text{ V}$
 $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r = 11.9 \times 8.854 \cdot 10^{-14} \text{ F.cm}^{-1}$
 Profondeur de déplétion ?
 $\rightarrow W = 3 \mu\text{m}$

Polarisation de la jonction pn



- ψ_0 représente le potentiel à dépasser par les porteurs pour participer au courant
- Quand une source externe est appliquée, la résistance de la ZCE reste \gg à la résistance de la région neutre
 - La chute de potentiel dans la région neutre est très faible.
- Application d'un potentiel positif V_F sur la zone p :
 - La barrière de potentiel est réduite de ψ_0 à $\psi_0 - V_F$
 - La ZCE devient plus étroite
 - Les porteurs majoritaires (électrons de n et trous de p) diffusent plus facilement
 - Le courant à travers la jonction augmente de manière significative
- Application d'un potentiel négatif V_R sur la zone p
 - La barrière de potentiel augmente de ψ_0 à $\psi_0 + V_R$
 - La ZCE devient plus étendue
 - Le courant à travers la jonction est très faible.
- Pour une polarisation élevée en inverse, le champ électrique devient plus fort et la jonction peut atteindre la zone de claquage.

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \times \frac{1}{N_d} (\psi_0 + V_R)}$$

Profondeur de déplétion et capacité de la jonction

- Jonction p+n dissymétrique $N_d \ll N_a$: $w = x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \times \frac{1}{N_d} (\psi_0 + V_R)}$

- $V_R \gg \psi_0 \rightarrow w = x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \times \frac{1}{N_d} \times V_R}$

- Sachant que la résistivité $\rho = \frac{1}{q\mu_n N_d}$

- La profondeur de déplétion $w = x_p = \sqrt{2\varepsilon\rho\mu_n V_R}$

- La capacité est similaire à celle d'un condensateur à plaques parallèles

$$C = \frac{\varepsilon}{w} A \qquad C = A \sqrt{\frac{\varepsilon}{2\rho\mu_n V_R}}$$

- Détecteur entièrement déplétée pour $V_R = V_{DEP}$

- Mesure de la capacité en fonction de la tension de polarisation inverse

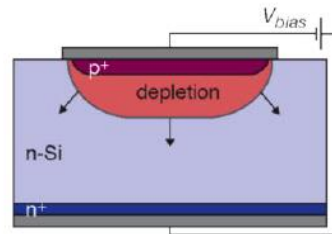
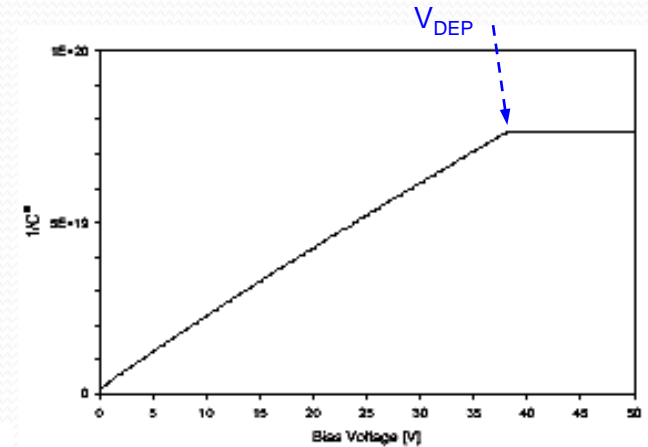
- Comportement de déplétion

- Détermination de la tension de déplétion V_{DEP}

$$C = A \sqrt{\frac{q\varepsilon N_d}{2(V_R + \psi_0)}}$$

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{q\varepsilon N_d A^2} (V_R + \psi_0)$$

Tension de déplétion



On considère une jonction p+n

$N_d = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ et $N_a = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

A température ambiante :

$n_i = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ et $kT/q = 26 \text{ mV}$

Barrière de potentiel ? $\rightarrow \psi_0 = 0.7 \text{ V}$

$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r = 11.9 \times 8.854 \cdot 10^{-14} \text{ F.cm}^{-1}$

Profondeur de déplétion ? $\rightarrow W = 3 \mu\text{m}$

Profondeur de déplétion pour $V_R = 200$?

$\rightarrow W = 51 \mu\text{m}$

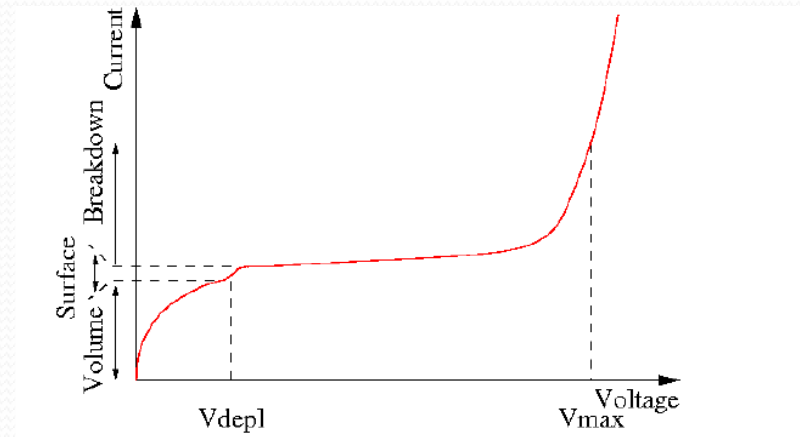
$\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V.s}$

Résistivité ? $\rightarrow \rho = 46.3 \Omega.\text{cm}$

Capacité ? $\rightarrow C = 205 \text{ pF/cm}^2$

Courant de fuite inverse

- Courant de génération thermique dans la région de déplétion
 - Réduit par l'utilisation d'un matériau pur et sans défaut
 - Durée de vie élevée des porteurs
 - Maintenir une température basse et contrôlée
 - Courant double tous les 8 °C

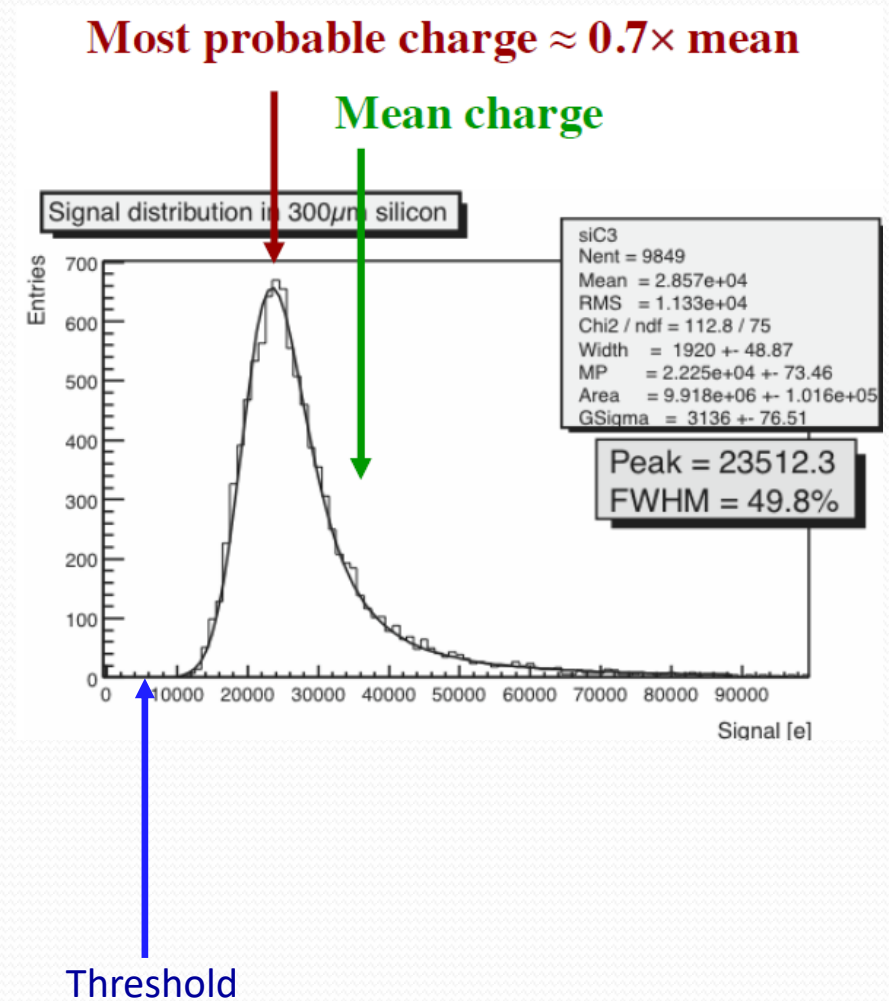


$$J_{gen} \propto T^{3/2} \times \exp\left(\frac{1}{2kT}\right)$$

- Courant de diffusion
 - Interfaces en surface
 - Négligeable pour un détecteur entièrement déplété

Rapport signal à bruit

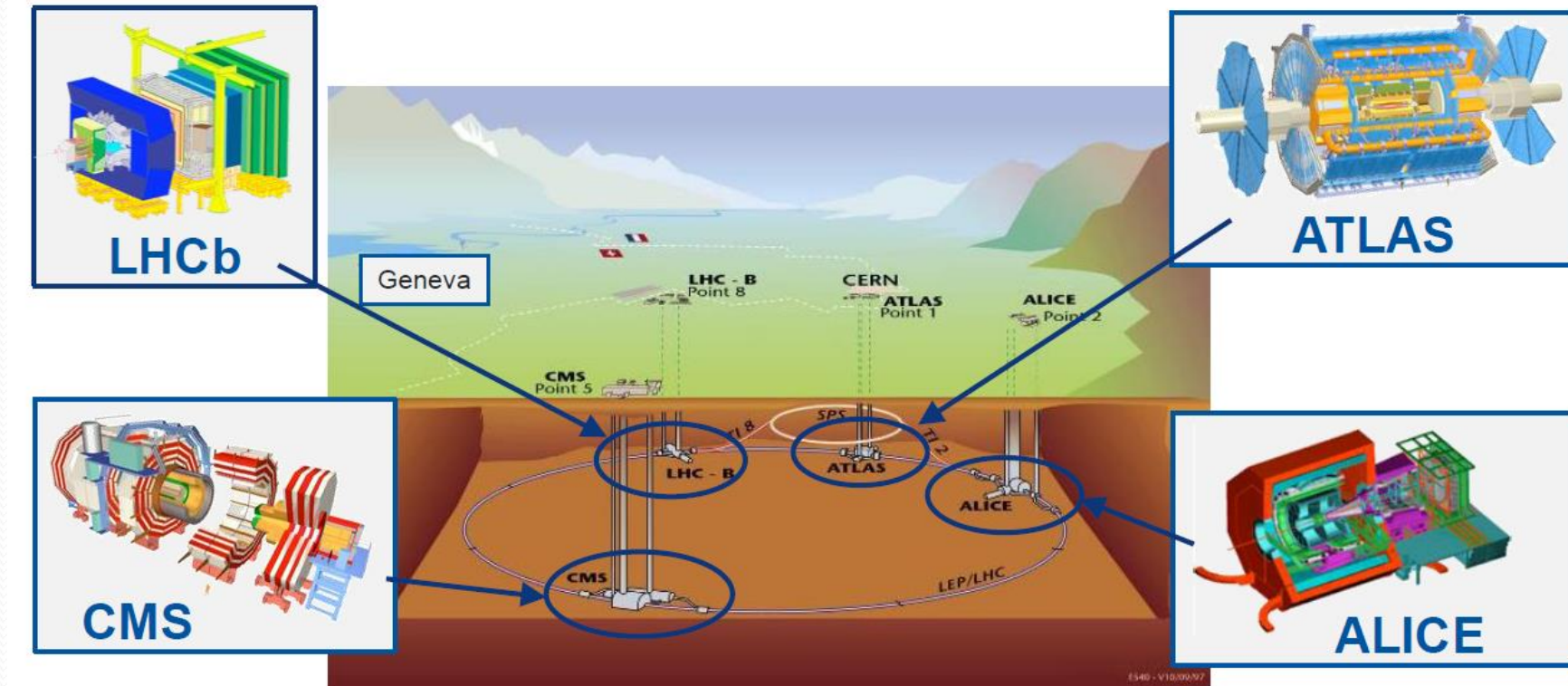
- La distribution de Landau a une queue à faible énergie devient encore plus faible en raison de l'élargissement du bruit
- Sources de bruit
 - Capacité $ENC \propto C_d$
 - Courant de fuite $ENC \propto \sqrt{I_l}$
 - Résistance de polarisation $ENC \propto \sqrt{\frac{kT}{R}}$
- Les hit corrects sont sélectionnés en introduisant la notion de seuil
 - Valeur est trop élevée, perte d'efficacité
 - Valeur trop faible, l'occupation du bruit plus forte



Détecteurs silicium en physique des particules

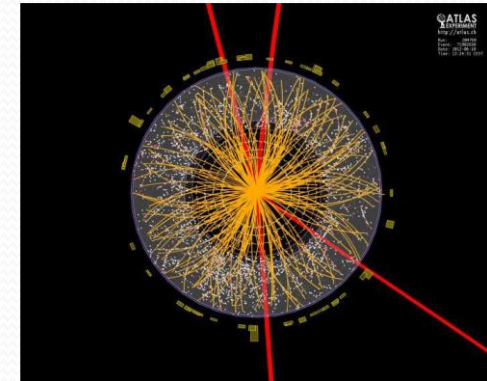
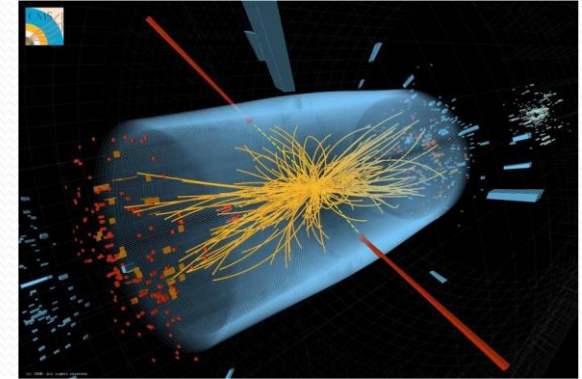
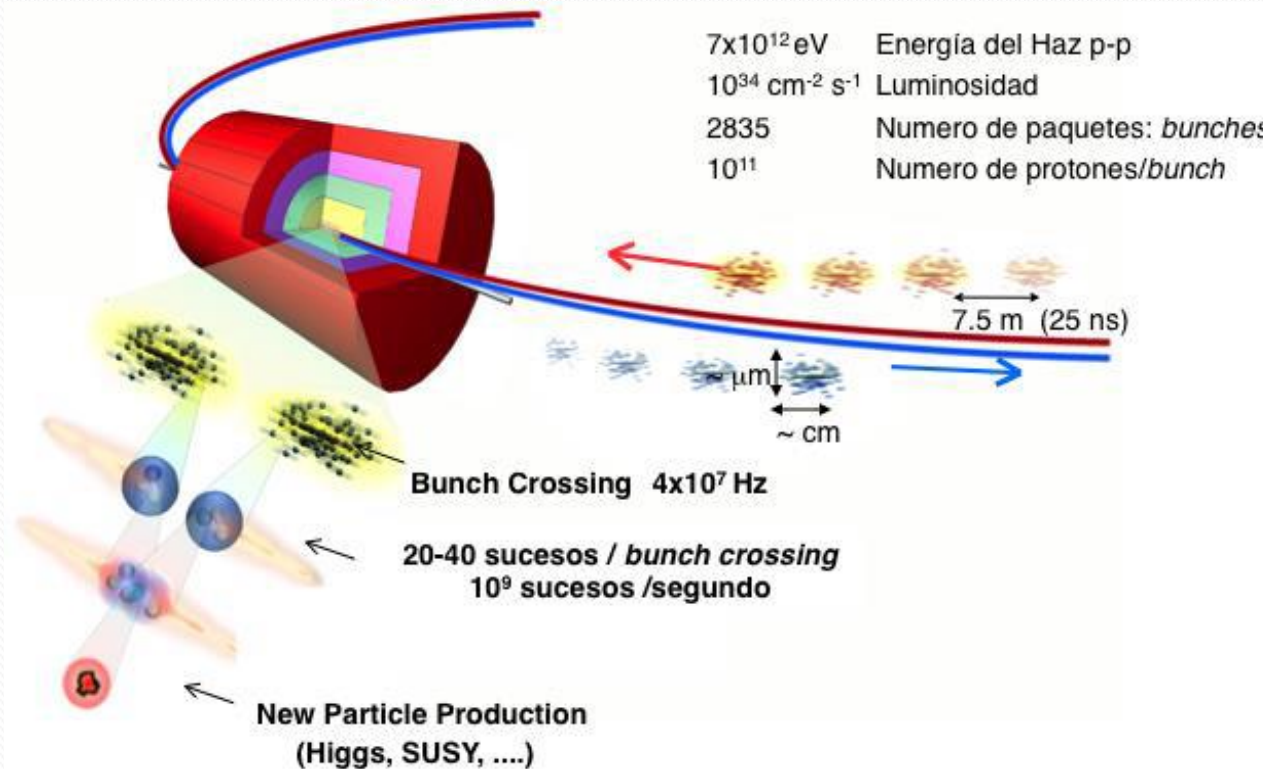
- Expériences de physique des particules au LHC
- Trajectographe de ATLAS
- Détecteur de trace
 - Détecteurs à micro-pistes
 - Détecteurs à pixels
- Pixels monolithiques CMOS HV/HR
- Autres structures
- Effets de radiation

Les expériences du LHC



- ATLAS et CMS : Expériences généralistes
 - Recherche du boson de Higgs (découvert en 2012)
- LHCb : violation de la symétrie CP
- ALICE : Collision d'ions lourds -> physique nucléaire

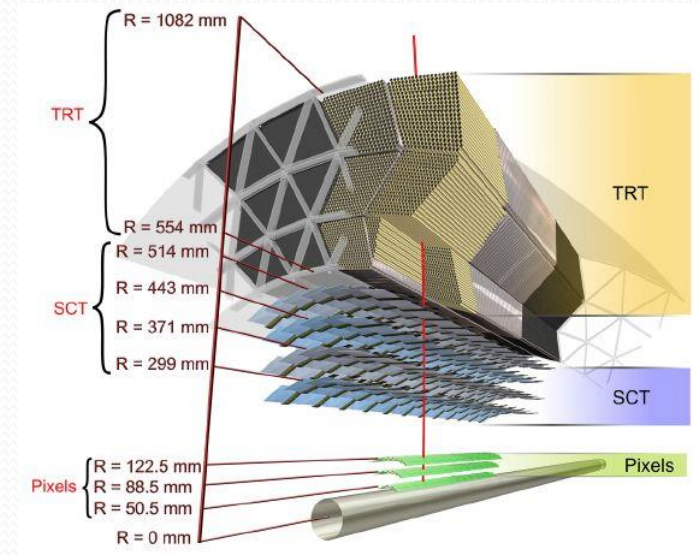
Collisions au LHC



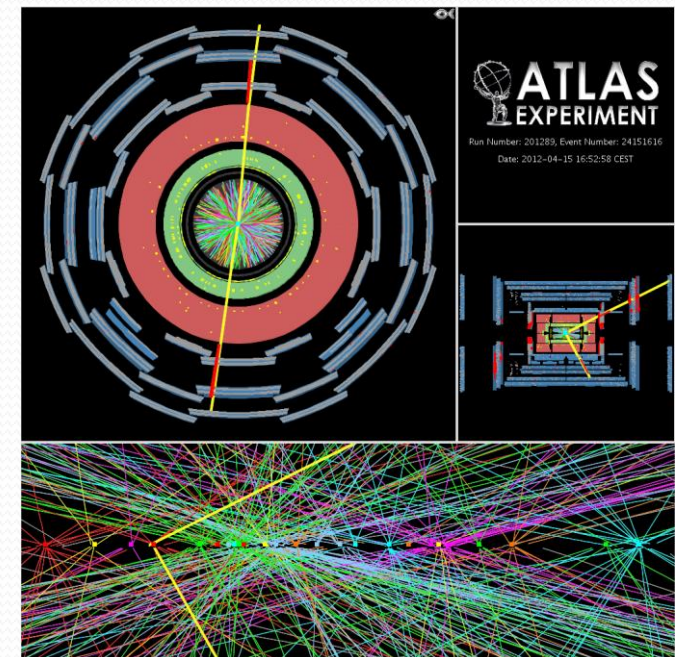
- Les protons sont accélérés à des vitesses extrêmement proches de celle de la lumière
 - 7 TeV -> 7500 fois leur énergie de masse de 938 MeV
 - Un paquet de protons contient 10^{11} protons
 - Collision toutes les 25 ns
- Seul une infime partie rentre en collision (20 à 40)

Détecteur de trace

- Détecteurs à haute granularité proches de la région d'interaction
- Situés dans la zone de plus forte densité de traces
 - Mesures précises de la position des particules chargées
 - Mesurer la trajectoire à l'aide de hits
 - Déterminer l'impulsion des particules chargées à partir de leur courbure dans un champ magnétique
 - Détecter les vertex primaires et secondaires
 - Identification des jets de quark b
- Comprend :
 - Le détecteur à pixels
 - Le trajectographe à semi-conducteurs (SCT)
 - Le trajectographe à rayonnement de transition (TRT)



Détecteurs
Silicium

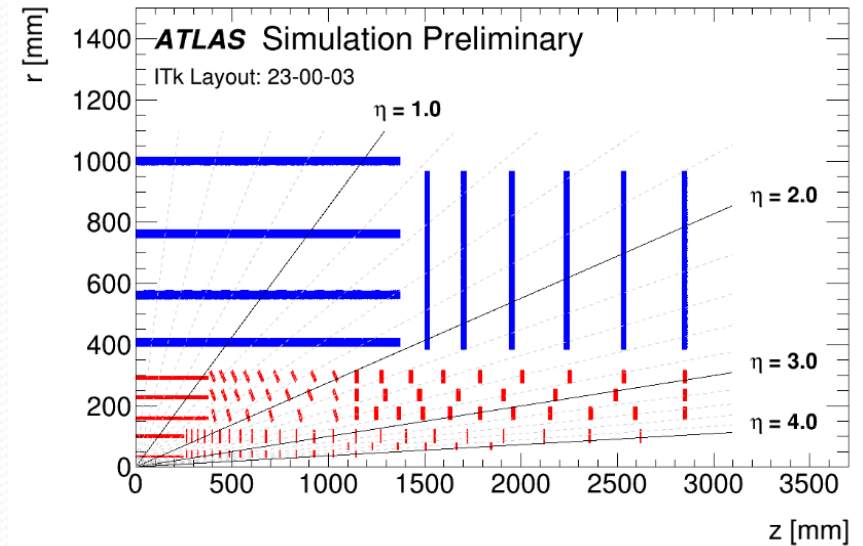


Inner Tracker de ATLAS (ITk)

- Pour répondre aux exigences du HL-LHC
 - ATLAS a planifié la mise à niveau de la phase II pendant le LS3 (Long Shutdown 3) de 2026 à 2029
- Remplacement de l'ensemble du détecteur est nécessaire :
 - Augmentation du taux de hits
 - Augmentation des niveaux de radiation extrêmes
- Le tracker mis à jour est appelé Inner Tracker (ITk)
 - Changement des détecteurs et de l'électronique de lecture frontale
 - Ce changement est nécessaire en raison du vieillissement causé par les dommages causés par les radiations

Détecteur à micro-pistes

	LHC	HL-LHC
Taille de la piste Si		90 μm
Nombre de canaux	6.3 M	60 M
Nombre de modules	4088	20000
Surface de Si	61 m^2	165 m^2

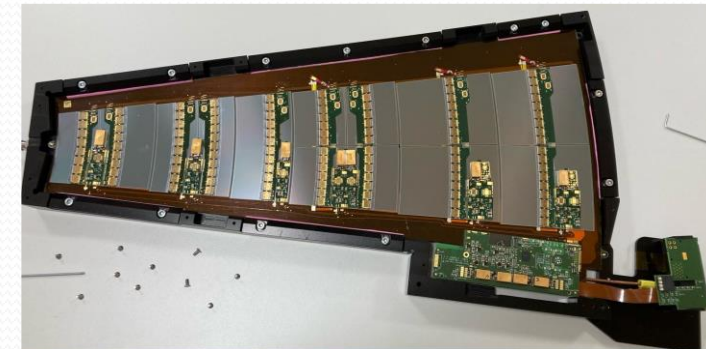
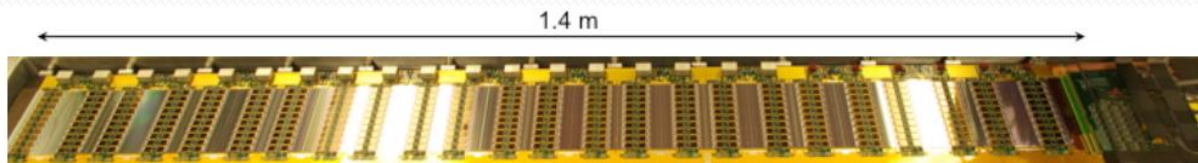
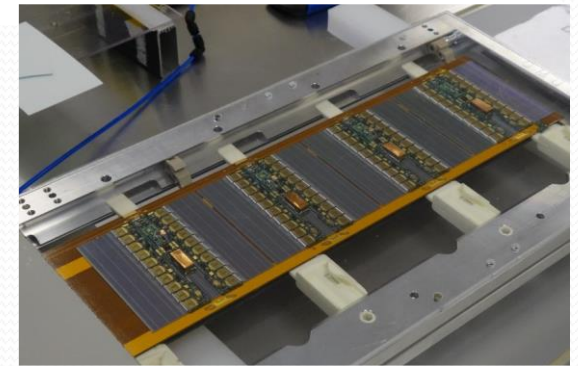
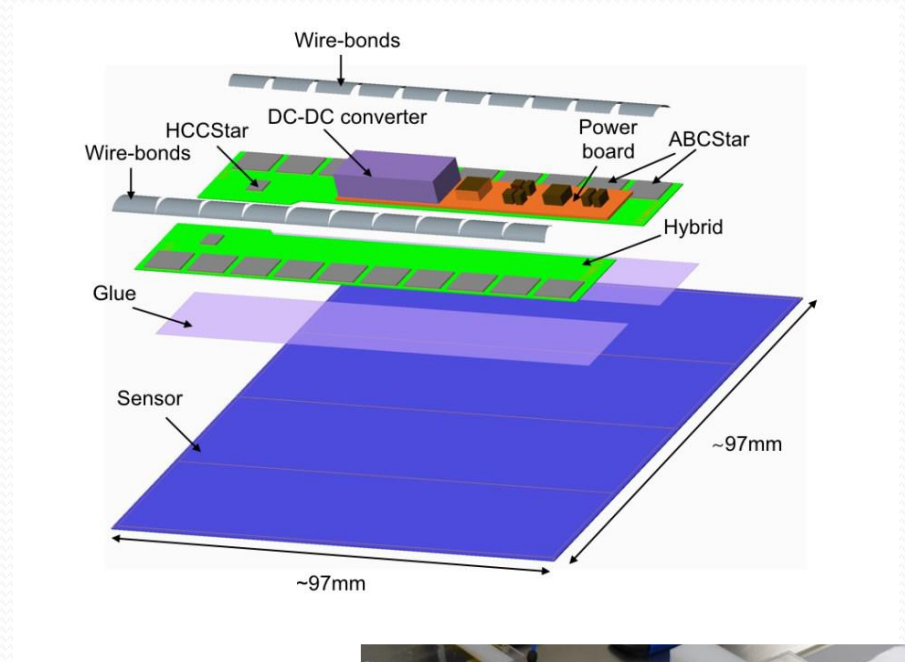


Détecteur à pixels

	LHC	HL-LHC
Taille du pixel	400 \times 50 μm^2 200 \times 50 μm^2	50 \times 50 μm^2 100 \times 25 μm^2
Nombre de pixels	92 M	1.6 G
Nombre de modules	2000	9400
Surface de Si	1.9 m^2	13 m^2
Nature du détecteur	Planaire + 3D	Planaire + 3D
Epaisseur	250 μm	150 μm

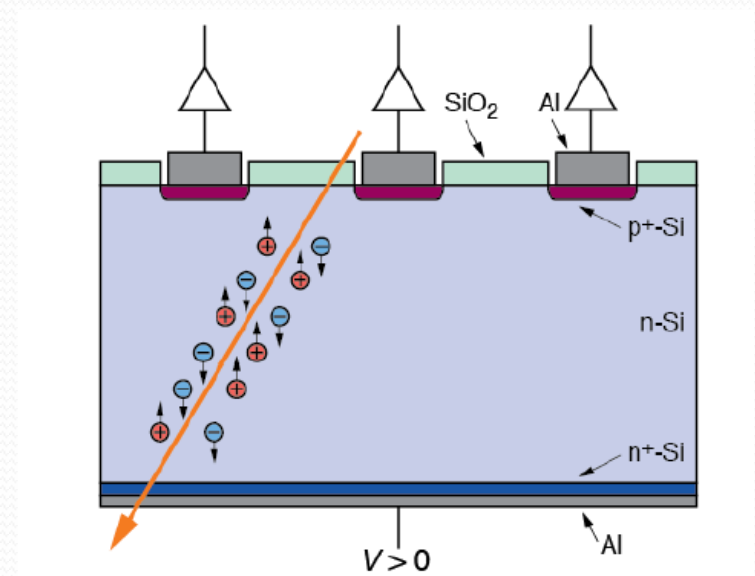
Le détecteur à micro-pistes

- **Senseur**
 - épaisseur de 320 μm
 - Tension de déplétion V_{DEP} jusqu'à 500 V
- **Hybride**
 - Circuit capton contenant :
 - Chips ABC de lecture qui convertissent la charge en information hit/no-hit
 - Chip HCC de contrôle qui collecte les infos des différents chips ABC
- **Colle Senseur/Hybride**
- **Wire bonds**
 - Connecter les micro-pistes aux circuits ASICs de lecture (ABC)
 - 256 canaux par chip
- **Cartes de puissance**
 - LV pour les chips ABC et HCC
 - HV pour le senseur



Détecteurs à micro-pistes

- Les particules chargées qui traversent le détecteur créent des paires e-h⁺ dans la zone de déplétion
- environ 30 000 paires dans l'épaisseur du détecteur
- Ces charges dérivent vers les électrodes
- Le courant de dérive crée le signal qui est amplifié par un amplificateur connecté à chaque piste
- A partir des signaux sur les pistes individuelles, on détermine la position de la particule traversante
- couche n⁺ sur le substrat pour améliorer le contact ohmique
- Métallisation en aluminium



Un détecteur de type-n à micro-pistes :
Jonction p+n

$N_a \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ et $N_d \approx 2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

→ Substrat de type n : $\rho \approx 2.3 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$

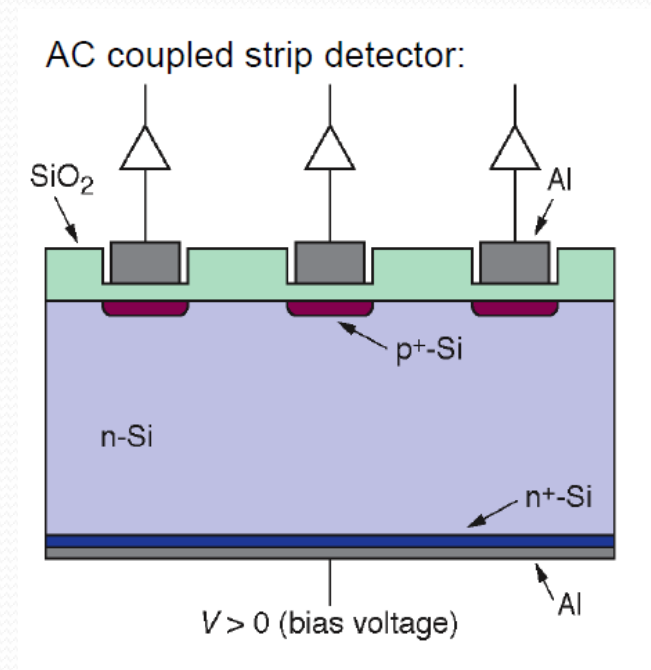
Détecteur aminci à $300 \mu\text{m}$

→ Tension de déplétion $V_{DEP} \approx 140 \text{ V}$

→ Capacité $\approx 35 \text{ pF/cm}$

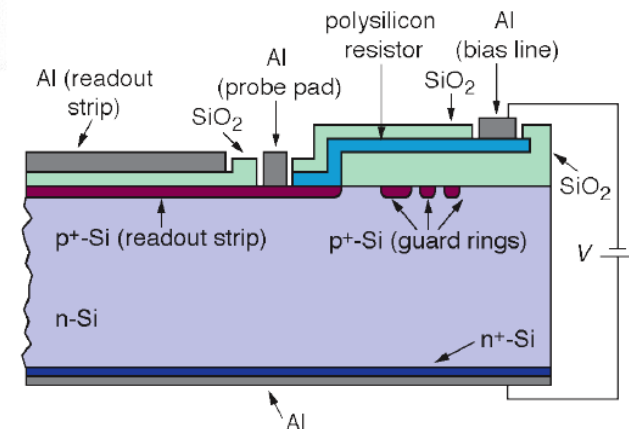
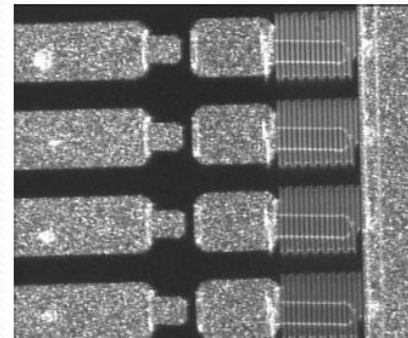
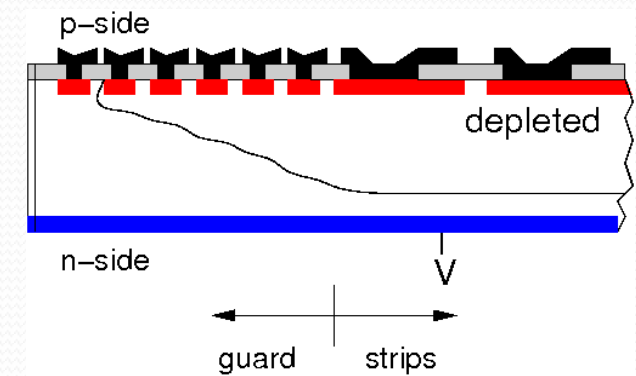
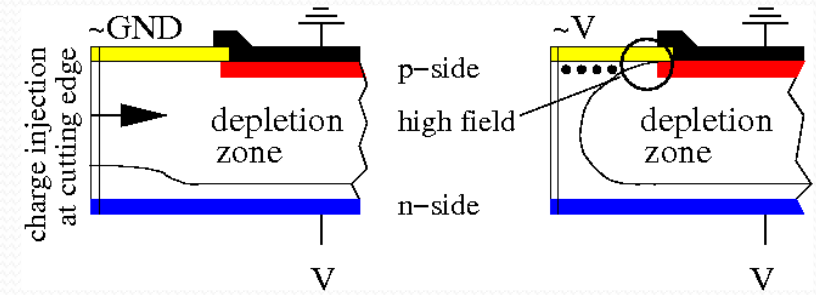
Détecteurs à micro-pistes

- Détecteur micro-pistes à couplage AC
 - Le couplage AC bloque le courant de fuite de l'amplificateur
 - Intégration des capacités de couplage dans un processus planaire standard
- Dépôt de SiO₂ d'une épaisseur de 100-200 nm entre p+ et la piste d'aluminium
- Les capacités de couplage sont de l'ordre de 8-32 pF/cm
 - En fonction de l'épaisseur de l'oxyde et de la largeur de la piste
- Problèmes de courts-circuits à travers le diélectrique
 - Généralement évités par une seconde couche de Si₃N₄
- Différents méthodes pour connecter la tension de polarisation
- résistance en poly-silicium
- polarisation par perforation
- polarisation par FOXFET



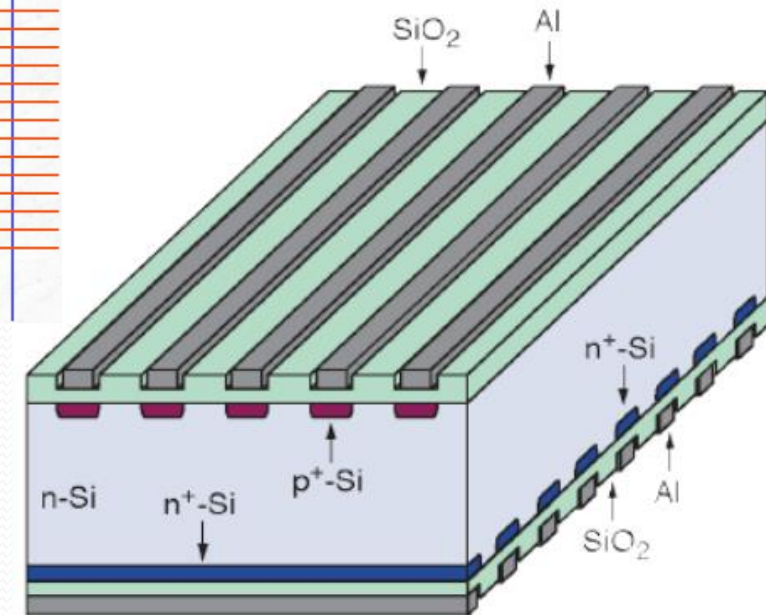
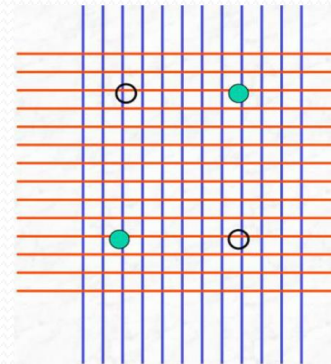
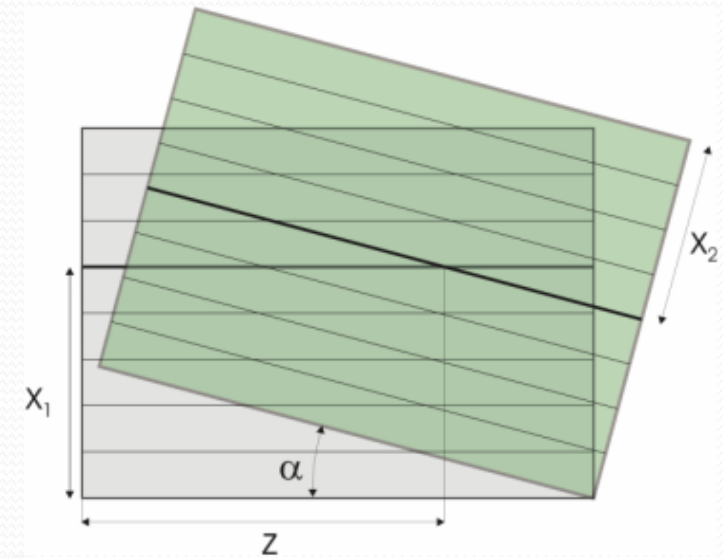
Détecteurs à micro-pistes

- Anneaux de garde (Guard rings) sont nécessaires pour empêcher les problèmes de claquage au niveau des bords (Forts courants de fuite)
- Réduire progressivement le potentiel entre les pistes et le bord
- Injection en empêchant la région de charge d'espace d'atteindre la ligne de traçage ligne
- Dépôt de silicium polycristallin entre des implants p+ et la ligne de polarisation
 - Résistance $R_s \approx 250 \text{ k}\Omega/\square$
 - Des structures poly enroulées Pour obtenir des valeurs de résistance élevées
 - $R \approx 20 \text{ M}\Omega$ peut être atteinte



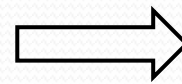
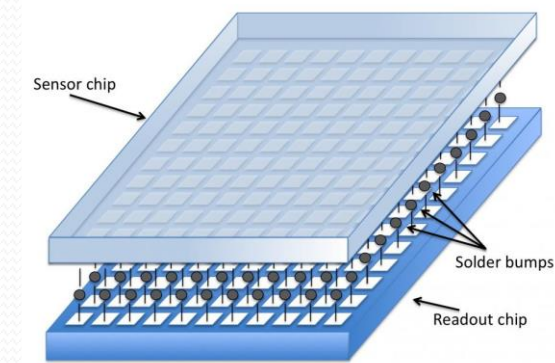
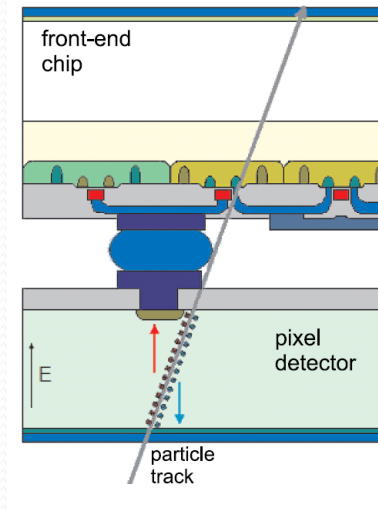
Détecteurs double face à micro-pistes

- CMS utilise un détecteur de silicium double avec des bandes d'un angle 100 mrad
- Double face : Méthode plus élégante pour mesurer 2 coordonnées que d'utiliser des modules stéréo
 - Économie de la matière
- Le détecteur à micro-pistes mesure une seule coordonnée
- Deux détecteurs à micro-pistes disposés d'une manière orthogonales peuvent donner une position bidimensionnelle de la trajectoire d'une particule
- Quand plusieurs particules interagissant en même temps avec le détecteur
 - la position mesurée n'est plus univoque
 - Des hits "fantômes" apparaissent
- Les détecteurs de pixels produisent des résultats non ambigus



Détecteurs à pixels hybrides

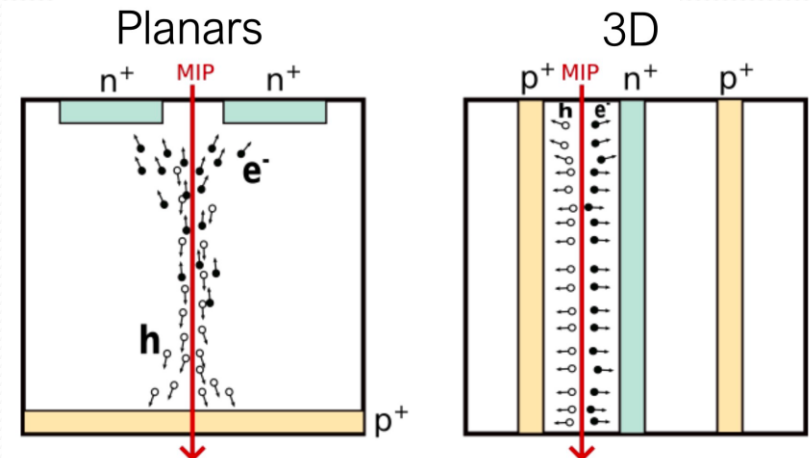
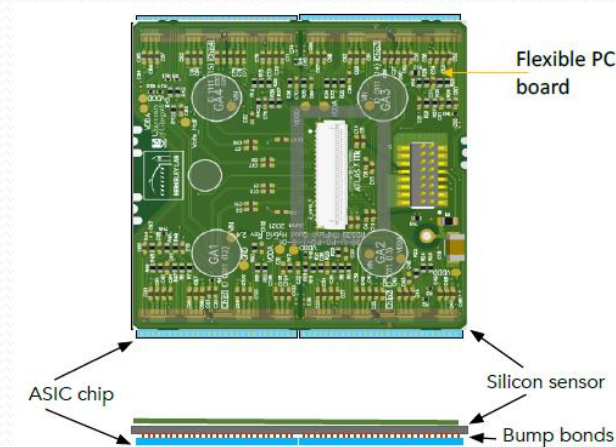
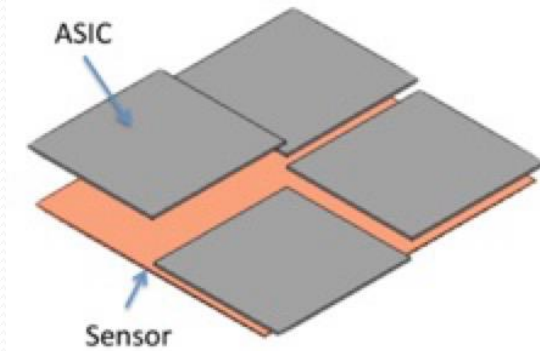
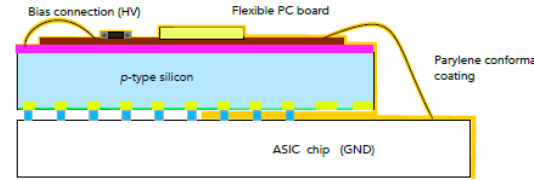
- Concept :
 - Le capteur et l'électronique de lecture sont des entités séparées
 - Optimisation séparée
- Collection de charge par dérive (champ électrique)
 - Collection rapide de charge
 - Fort signal
 - Tolérant aux radiations
- Résolution temporelle $\sim ns$
- Résolution spatiale: $\sim 10 \mu m$
- Consommation élevée $\sim 1 W/cm^2$
- Budget de matière élevé
- Coût élevé



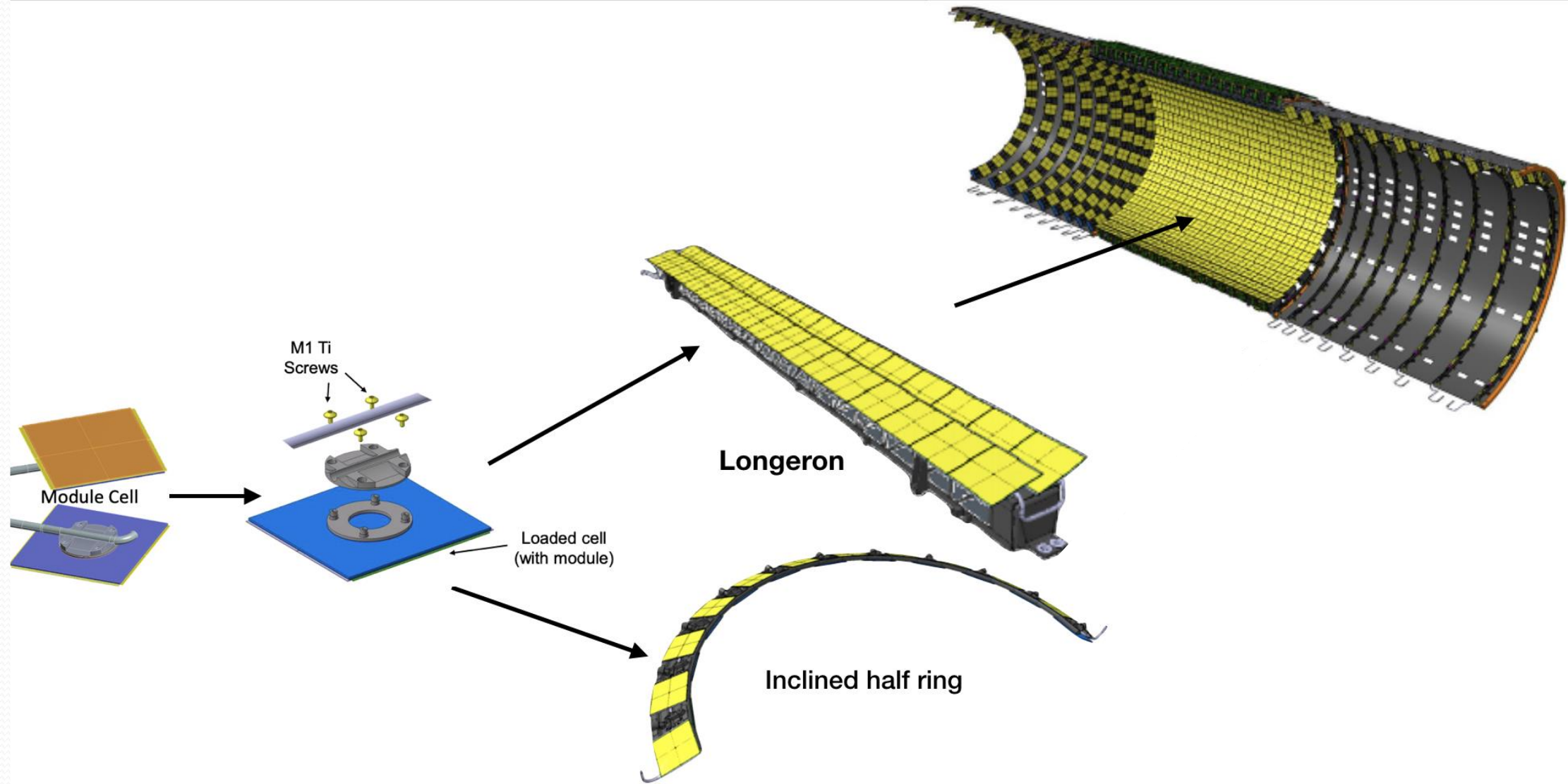
- Bon candidat pour les Machines hadroniques (LHC, HL-LHC, FCC-hh au CERN)
- Possibilité d'utiliser un détecteur LGAD pour améliorer la résolution temporelle

Détecteurs à pixels hybrides

- Les éléments constitutifs de base sont les modules
 - Assemblage d'un capteur au silicium avec un ASIC électronique de lecture
 - Circuit imprimé flexible collé sur le capteur et wire-bondé à l'ASIC
 - Module "Quad" avec 4 ASIC sur un capteur
 - Module "Triplet" avec 3 assemblages capteur-ASIC.
 - Forme annulaire (pour les disques) et linéaire (pour les barils)
- Toutes les puces sont amincies à 150 μm
- Tous les capteurs ont une épaisseur de 150 μm , à l'exception de L1 qui a une épaisseur de 100 μm
- Deux types de capteurs :
 - 3D pour la partie interne du système interne
 - Planaire, pour tout le reste

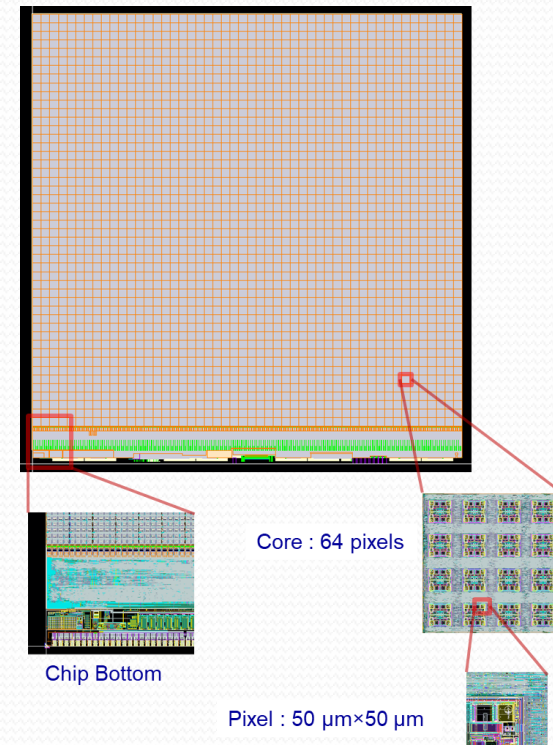


Détecteurs à pixels hybrides

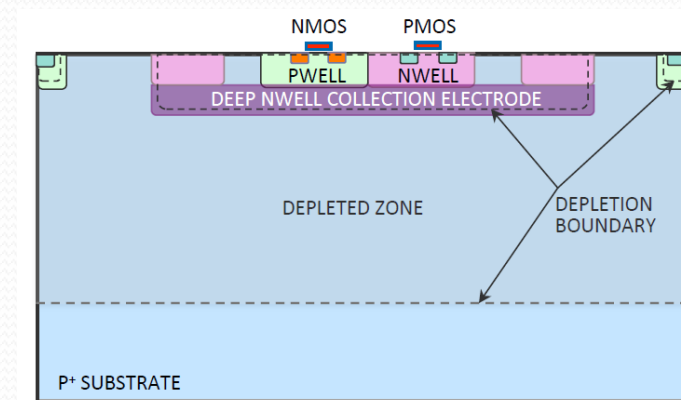
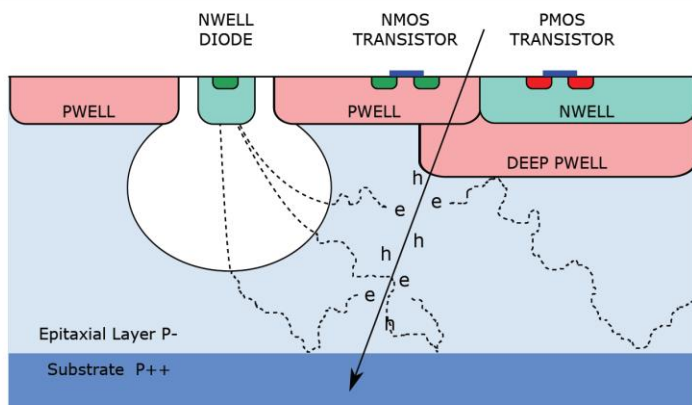


Circuit de lecture du détecteur

- ITkPixV2 : puce de lecture de production pour les pixels de ATLAS ITk
 - Process CMOS 65nm
 - Taille : 20.054 mm × 21.022 mm
 - Zone sensible : 384 x 400 pixels de 50 x 50 μm^2
 - 153 600 pixels organisés en 2400 noyaux
- Tolérance au rayonnement jusqu'à une dose ionisante totale de 1Grad
- Préamplificateurs de charge
 - Faible bruit (<100 e)
 - Faible consommation (<5 uW) par pixel
- Traitement d'un taux de hits de 3 GHz/cm²
- Mise en mémoire tampon des données pendant une durée maximale de 12.5 μs
- Lecture des données déclenchée à 1MHz
- Nécessite des liaisons de données jusqu'à 5 Gbit/s



Pixels monolithiques historique



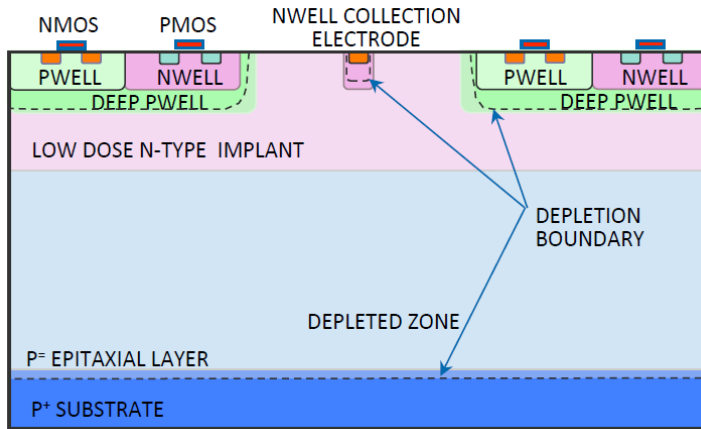
- MAPS (Monolithic Active Pixels Sensors)

- Le capteur et l'électronique sont intégrés
- Collection de charge par diffusion
 - Collection lente
 - Faible signal
 - Tolérance aux radiations modérée
- Capacité de collection faible
- Technologie CIS (CMOS Image Sensor)

- DepMAP (Depleted MAPS)

- Le capteur et l'électronique sont intégrés sur le même substrat
- Collection de charge par dérive
 - Collection rapide
 - Faible signal
 - Tolérance aux radiations modérée
- Capacité de collection élevée
- Technologie HV CMOS (High Voltage)

Pixels monolithiques futurs

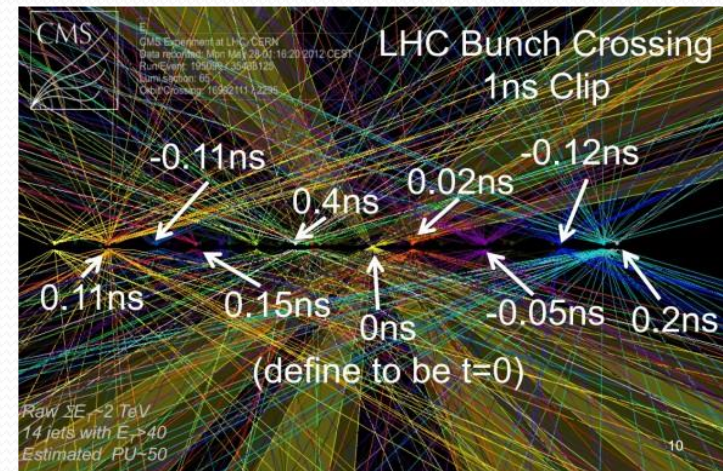
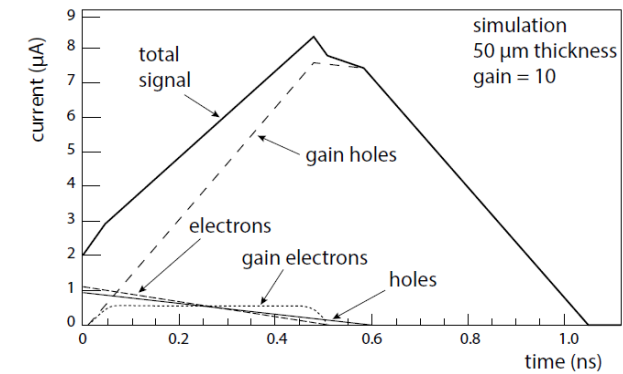
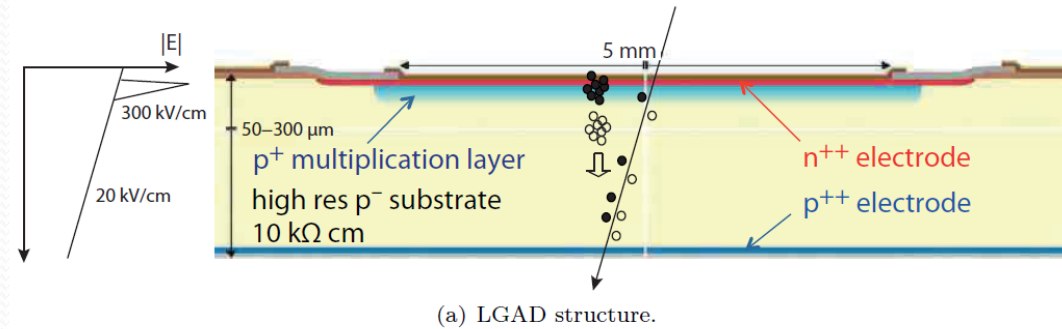


- Candidat pour les Machines hadroniques ou leptoniques
- Effets de NIEL et de TID
- Process CMOS 65 nm (CMOS Image Sensors)

- Convergence des 2 familles de MAPS
 - Collection de charges par dérive et faible capacité de collection
 - Résolution temporelle \sim ns
 - Résolution spatiale \sim 1-10 μ m
 - Faible consommation $<$ 50 mW/cm²
 - Faible budget de matière $<$ 0,5% X0
 - Faible Coût
 - Modification de process pour obtenir la déplétion totale

Détecteur LGAD

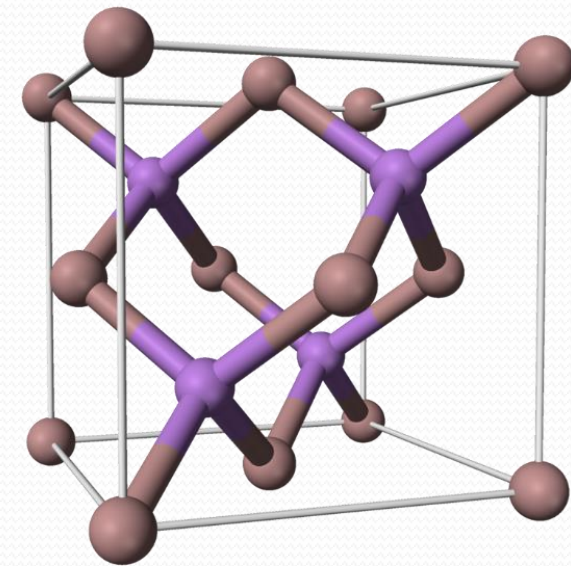
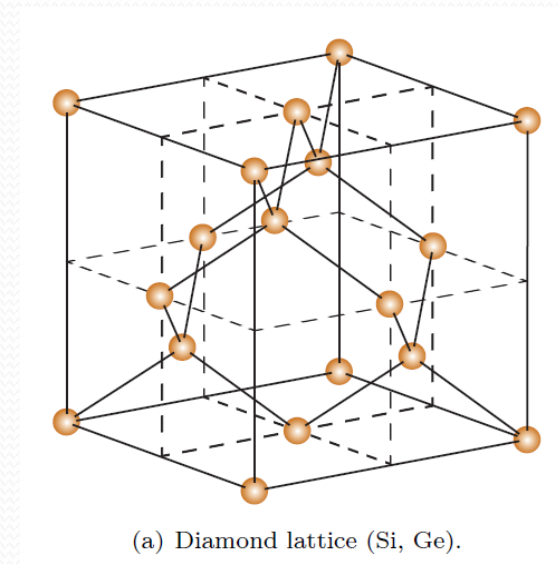
- Low-Gain Avalanche Diodes
- Utilisés dans les couches de timing dans l'upgrade MTD de CMS et HGTD de ATLAS (HL-LHC)
 - Couches de détecteurs de mesure de temps sur silicium
 - Précision de 30 ps
- La puce de lecture HGTD est un réseau de 15x15 canaux de 1,1 mm x 1,1 mm
 - Conçue avec le procédé CMOS TSMC 130 nm
- Les futurs collisionneurs
 - Les informations temporelles seront encore plus importantes à haute énergie et à haute luminosité
 - Niveaux d'empilement beaucoup plus élevés
 - Mesure de temps à chaque couche le long détecteurs de trace
 - Détecteur de trace 4D



Annexes

Structure cristalline des SC

- Le silicium (Si), germanium (Ge) et le diamant carbone (C) :
 - Maille cristalline de type diamant
 - Cubique à faces centrées (CFC)
 - 8 sommets du cube
 - centre de chacune des faces de ce cube
 - Quatre des huit sites tétraédriques du cube
 - chaque atome de silicium est situé au centre d'un tétraèdre formé par quatre autres atomes équidistants
 - Un coin du cube et les trois atomes au centre des trois faces adjacentes
 - Paramètre du réseau $a = 5.43 \text{ \AA}$ (Si)
- Semi-conducteurs composés III-V : Arséniure de Gallium (GaAs)
 - Réseau de type zincblende
 - Similaire au réseau du diamant mais chaque sous-réseau est constitué d'un seul élément



Densité des porteurs dans un SC intrinsèque

- A l'équilibre thermique, l'énergie de Fermi pour Si intrinsèque est:

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp \frac{-(E_c - E_i)}{kT} = \alpha \times T^{\frac{3}{2}} \exp \frac{-(E_G)}{2kT}$$

- N_c et N_v sont les densités effectives d'états dans les bandes de conduction et de valence

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

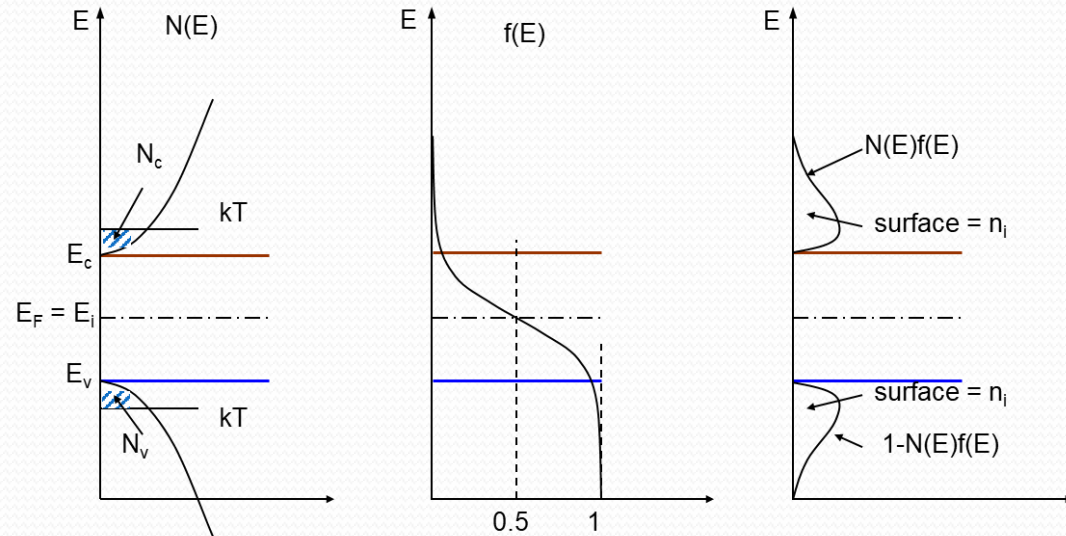
- La concentrations de porteurs de charge

$$n = p = n_i$$

$$E_i = \frac{1}{2}(E_c + E_v) + \frac{3}{4}kT \ln \frac{m_h}{m_e} \approx \frac{1}{2}(E_c + E_v)$$

- E_i est le niveau de Fermi intrinsèque
- kT est l'énergie thermique, produit de la constante de Boltzmann et de la température, qui vaut 26 meV à température ambiante

■ [Retour1](#)



Densité des porteurs dans un SC intrinsèque

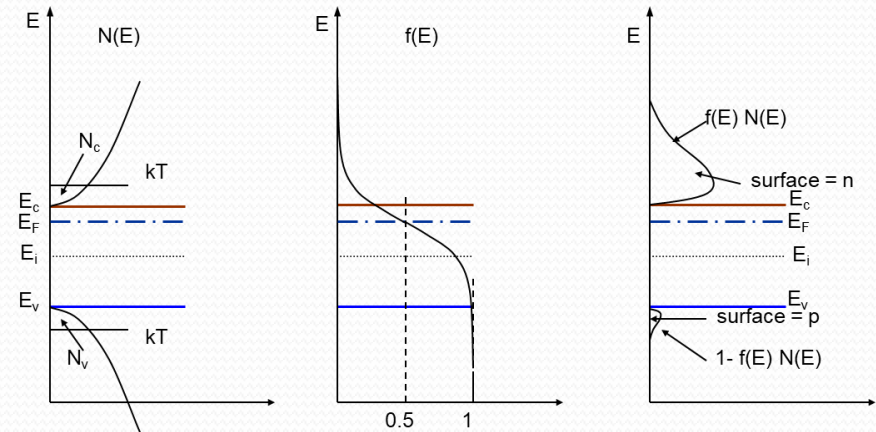
- La densité totale d'électrons est obtenue en intégrant cette équation depuis E_c à l'infini :

$$n = \int_{E_c}^{\infty} dn(E, dE) = \int_{E_c}^{\infty} N(E)F(E)dE$$

$$n_n = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right) \quad p_n = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{kT}\right)$$

$$n_n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) \quad p_n = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right)$$

$$n_i = N_c \exp\left(\frac{-(E_c - E_i)}{kT}\right) = N_v \exp\left(\frac{-(E_i - E_v)}{kT}\right)$$



- En dopant le SC avec des donneurs de densité N_d , la concentration des électrons dans la bande de conduction augmente

- Augmentation de la probabilité d'occupation dans la bande de conduction.
- Le nombre de trous dans la bande de valence diminue puisque $E_i - E_f < 0$ augmente.

- n augmente et p diminue mais le produit $n.p$ reste constant → Loi de masse action :

$$n_n p_n = n_i^2$$

$$n_n = p_n + N_d$$

$$E_f = E_c - kT \ln \frac{N_c}{N_d}$$

$$n_n = N_d \quad p_n = \frac{n_i^2}{N_d}$$

- La résolution de ces équations donne :

$$n_n = \frac{\sqrt{N_d^2 + 4n_i^2} + N_d}{2} \quad p_n = \frac{\sqrt{N_d^2 + 4n_i^2} - N_d}{2}$$

- Dans la majorité des cas $N_d \gg n_i$:

Retour 2

Jonction pn non polarisée

- Bilan des charges dans la ZCE :

$$\rho_n = qN_d \quad \rho_p = -qN_a$$

- La relation entre la distribution de charge et le champ électrique est donnée par la loi de Poisson :

$$\frac{d\mathcal{E}}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

- Le champ électrique :

$$\mathcal{E}_n(x) = \frac{-qN_d}{\epsilon} (x_n - x) \quad \mathcal{E}_p(x) = \frac{-qN_a}{\epsilon} (x_p + x)$$

- On en déduit que la zone de déplétion s'étend sur la région la moins dopée

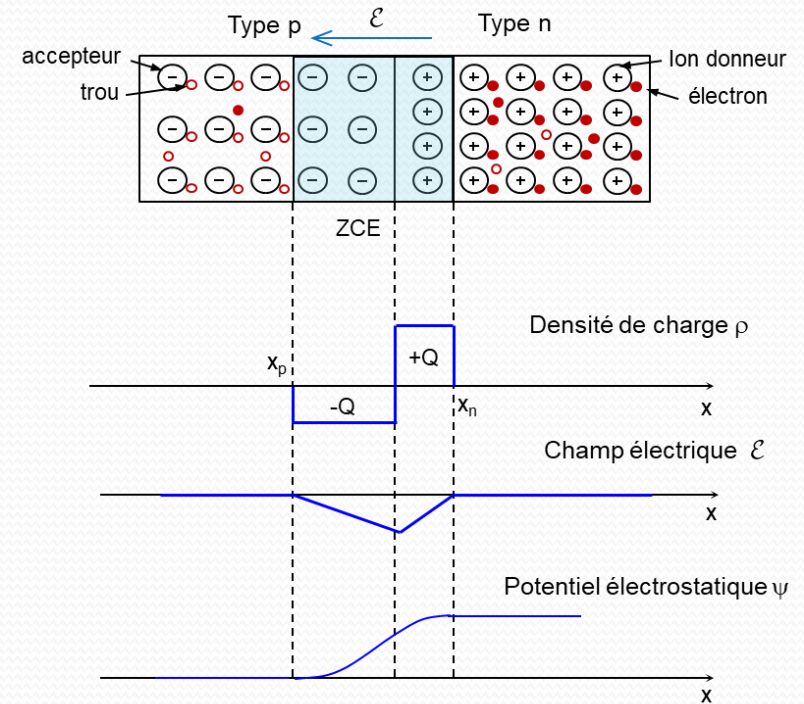
$$\mathcal{E}_{max} = \mathcal{E}_n(0) = \mathcal{E}_p(0) = \frac{-N_d}{\epsilon} x_n = \frac{-N_a}{\epsilon} x_p$$

$$N_d x_n = N_a x_p$$

- Potentiel électrostatique :

$$\psi(x) = \frac{qN_a}{2\epsilon} (x_n + x)^2 + \psi_p \quad \psi(x) = \frac{qN_d}{2\epsilon} (x_p + x)^2 + \psi_p$$

■ [Retour 3](#)



- On peut en déduire les épaisseurs des deux ZCE : x_n et x_p et donc l'épaisseur totale en utilisant la continuité de \mathcal{E} en x=0

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \frac{N_d + N_a}{N_d N_a} \psi_0}$$

- Pour le cas particulier d'une jonction P+N où $N_d \gg N_a$, la ZCE s'étend du côté le moins dopé (N):

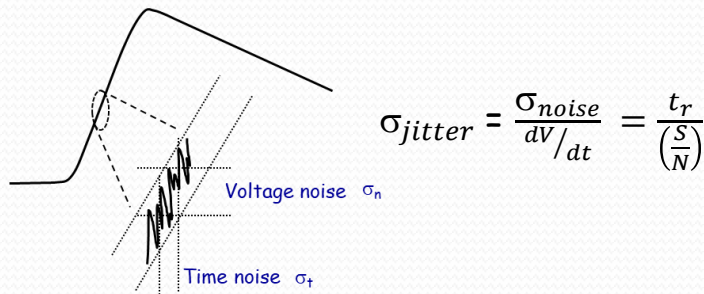
$$w \approx x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \times \frac{1}{N_d} \psi_0}$$

Time resolution

The time resolution of a detector can be expressed as follows: $\sigma_{total}^2 = \sigma_{jitter}^2 + \sigma_{timewalk}^2 + \sigma_{Landau}^2 + \sigma_{TDC}^2$

σ_{jitter}

- Due to the noise of the electronic front-end including the sensor
- The jitter is proportional to the rise time and inversely proportional to the S/N ratio.
- The rise time depends on the FE bandwidth and is proportional to the drift time of charge in the sensor



σ_{Landau}

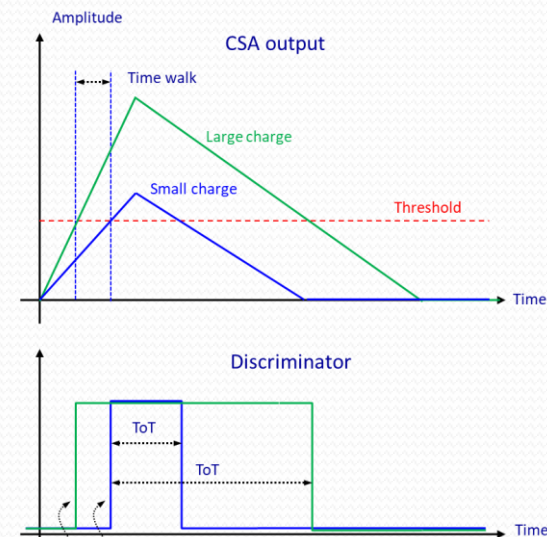
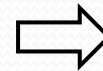
- Due to the Landau distribution of the deposited charge
- Represents the spatial variation of the deposited charge along the path
 - Charges from different depths are collected at different times.
- The effect is small for thinner devices or sensors with short drift times
 - Absent in 3D detectors
 - Not negligible in LGAD sensors

σ_{TDC}

- Due to the Time to Digital Converter (TDC) binning
- Bin size divided by $\sqrt{12}$ which is in general small

$\sigma_{timewalk}$

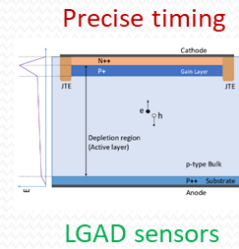
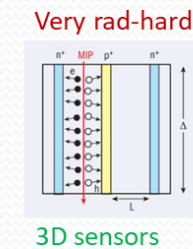
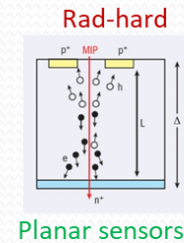
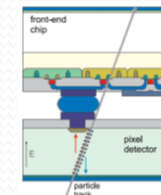
- Related to the variation of the deposited charge event-by-event
- Variation of the time of arrival (TOA)
- Time walk is corrected by :
 - variable threshold \rightarrow Constant fraction discriminator (CFD)
 - constant threshold correction
 - Correct the time of arrival (TOA) with a calibration based on the time over the threshold (TOT)



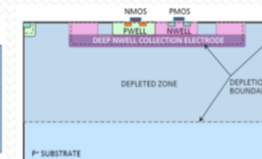
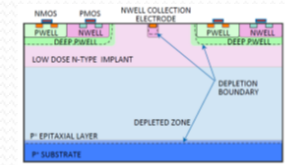
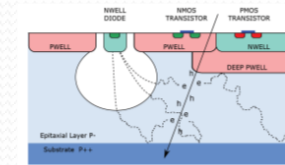
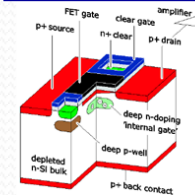
Semi-conductor pixel detectors

- Hybrid devices with a dedicated ASIC bonded to the sensor
 - R&D driven by LHC
 - Still solution for the HL-LHC pixel detector upgrade (Planar and 3D sensor, LGAD ??)
- Monolithic Active Pixel Sensors (MAPS)
 - Integrating the sensor and the readout electronics
 - Compromise between charge collection and signal read-out speed
- Depleted Monolithic Active Pixel Sensors (DeMAPS)
 - High radiation hardness and read-out speed

Hybrid Pixels



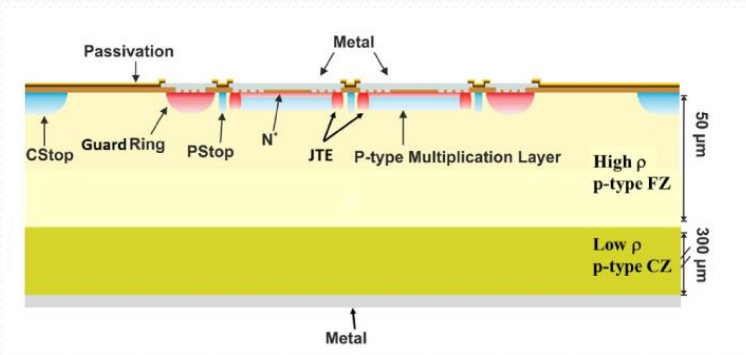
Monolithic Pixels



BiCMOS HBT

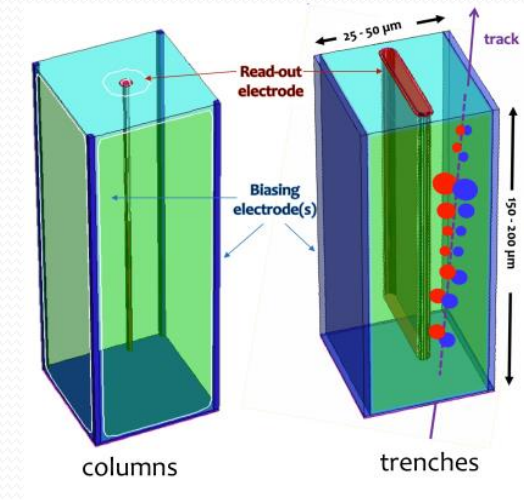
Timing sensors for high radiation levels

LGAD sensors



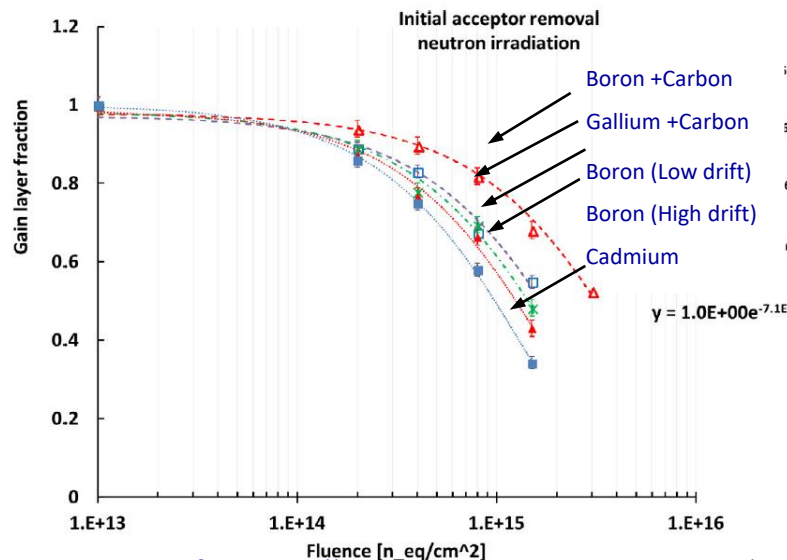
- LGAD sensors under irradiation → Modification of the gain implant profile
- Not adapted for fluence $> 2-3 \times 10^{15}$ neq/cm²

3D sensors



Doug Berry:FERMILAB-CONF-22-284-PPD1

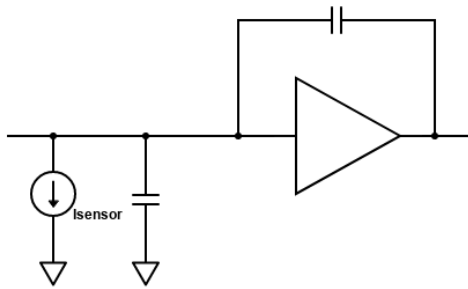
- Developed and tested within the TimeSPOT project
- Pixels of 55 μm pitch
- No performance loss up to fluences of 2.5×10^{16} neq/cm²



Fraction of gain still active versus neutron irradiation

M. Ferrero et al : Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 919 (2019) 16–26

Front-end electronics and ASIC R&D

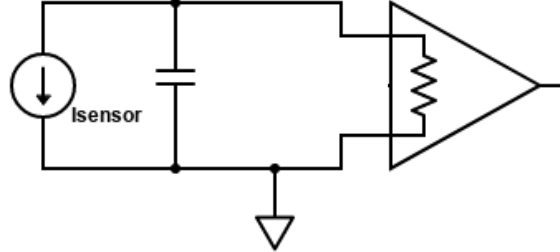


Charge amplifier (CSA)

$$V_{out} = C_f \times Q_{sensor}$$

Slow slew rate

Less noise



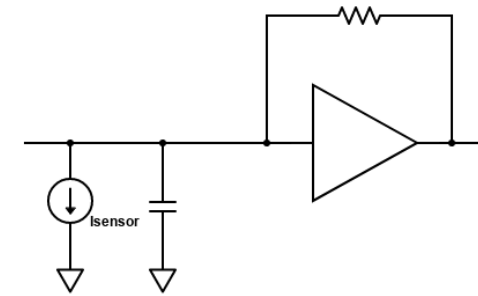
Current amplifier

$$I_{out} = A \times I_{sensor}$$

Fast

slew rate

High noise



Transimpedance amplifier

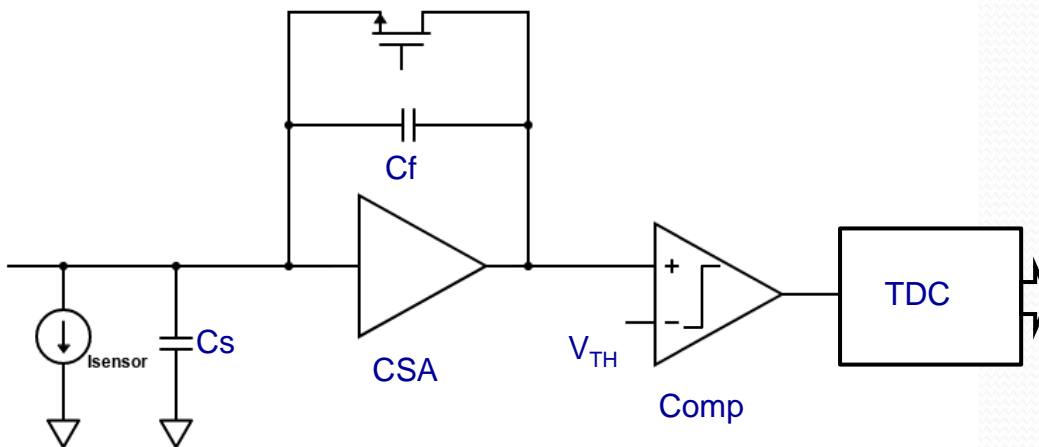
Low R_{in}

$$V_{out} = R_f \times I_{sensor}$$

High bandwidth

High noise

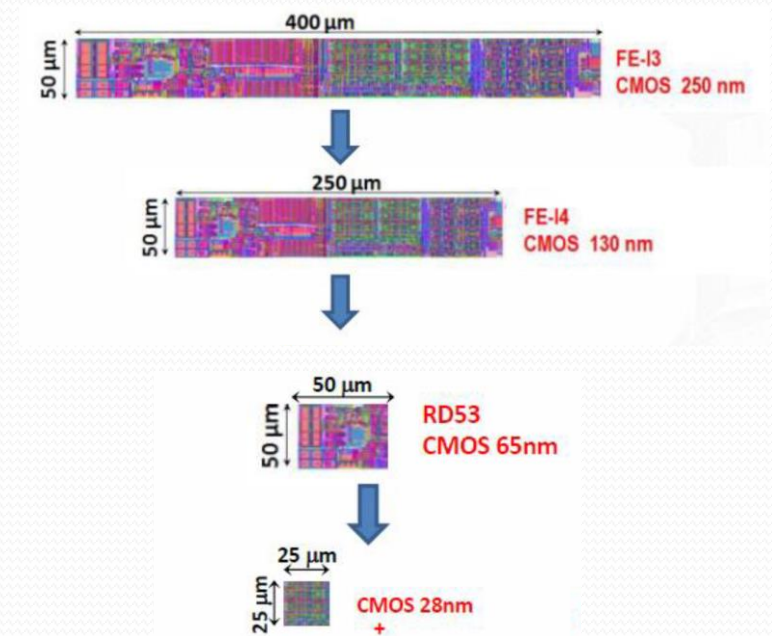
- The choice of the fast amplifier depends on the timing specifications and the sensor bandwidth



- Front end based on charge amplifier (CSA)
- High-resolution TDC
 - 1 TDC can be shared by several FEs
- TOA and TOT measurements

Electronique de lecture

- Haute luminosité :
 - Taux de hit élevé ($> 10 \text{ GHz/cm}^2$)
 - Réduction de la taille du pixel ($< 25 \times 25 \mu\text{m}^2$)
 - Haute densité d'intégration / pixel
- 4D tracking
 - Information temporelle le long de la trace
 - Nouveaux algorithmes de détection
 - Besoin de fonctionnalités numériques plus sophistiquées
- Grande quantité de données à sortir (par chip)
 - Entrées-sorties du chip $> 10 \text{ Gbit/s}$
- Process plus avancé que ce qui est utilisé actuellement (65 nm RD53)
 - Facteur 2 \rightarrow gain en rapidité et surface 4 fois plus petite
 - Nœud de process : 28 nm



Interaction Particules- Matière

- For heavy charged particles like proton, k, π , μ , .. where $m_{\text{incident}} \gg m_e$
 - dE/dx can be described by Coulomb interaction and simple kinematics
Classic Bohr's stopping power \rightarrow Quantum mechanic "Bethe-Bloch"

What's the average energy lost $-\langle dE \rangle$ [MeV] in a material thickness dx [cm]?

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I^2} W_{\max}\right) - 2\beta^2 - \delta(\beta\gamma) - \frac{C}{Z} \right]$$

=0.1535 MeV cm²/g

Fundamental constants
 r_e = classical radius of electron
 m_e = mass of electron
 N_a = Avogadro's number
 c = speed of light

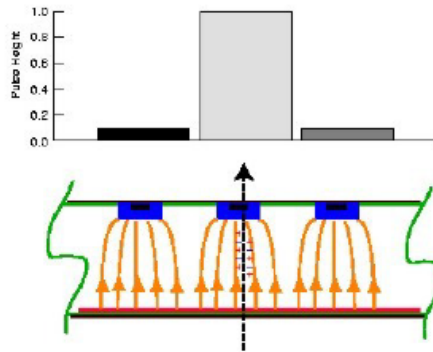
Absorber medium
 I = mean ionization potential
 Z = atomic number of absorber
 A = atomic weight of absorber
 ρ = density of absorber
 δ = density correction
 C = shell correction

Incident particle
 z = charge of incident particle
 β = v/c of incident particle
 γ = $(1-\beta^2)^{-1/2}$
 W_{\max} = max. energy transfer in one collision

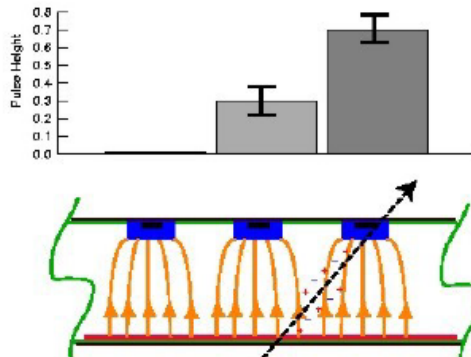
Résolution spatiale

Resolution is the spread of the reconstructed position minus the true position
 For one strip clusters

One Strip Clusters

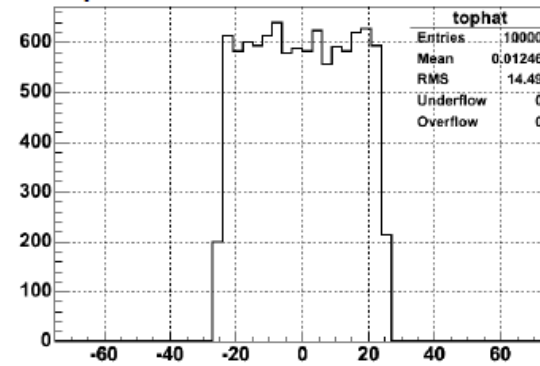


$$\sigma = \frac{\text{pitch}}{\sqrt{12}}$$

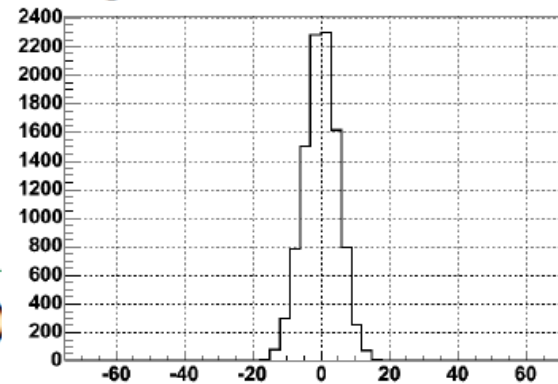


$$\sigma \approx \frac{\text{pitch}}{1.5 * (S/N)}$$

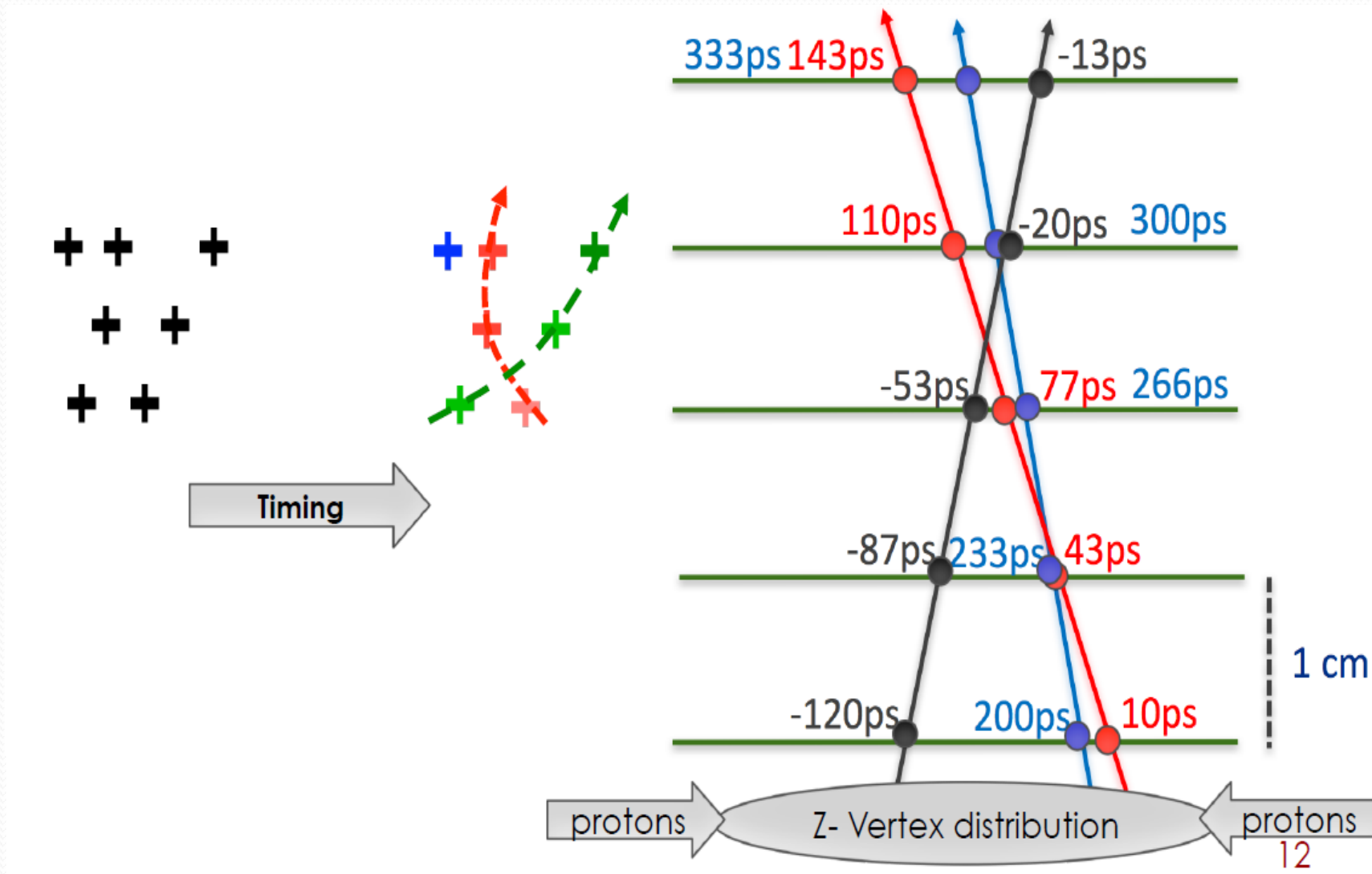
“top hat” residuals



“gaussian” residuals



LGAD - Mesure du temps



detecteur 8" (200 mm)

