



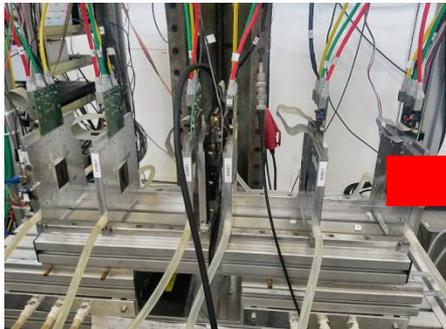
Détecteurs à semi-conducteurs

Une introduction

École Thématique IN2P3 « Du Détecteur à la Mesure » 2018

Parcours

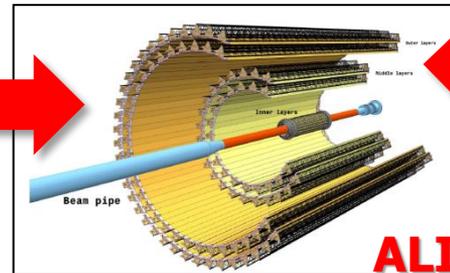
- 2002: Thèse dans expérience D0 (calorimétrie et supersymétrie)
- 2005: Maître de conférences à l'université de Strasbourg (IPHC)
 - Groupe PICSEL
 - Regroupe physiciens, micro-électroniciens et experts en acquisition de donnée (~ 15-20 personnes). <http://www.iphc.cnrs.fr/-CMOS-Sensors-.html>
 - R & D de capteurs pixelisés en technologie CMOS (depuis 1999)
 - Télescopes en faisceau (EUDET)
 - 1^e détecteur sur collisionneur (STAR-HFT 2014-2016)
 - ALICE ITS upgrade avec le CERN (~2021)
 - CBM-MVD (~2021)
 - ILC (>2030)
 - Nombreux spin-off (imagerie X, etc.)



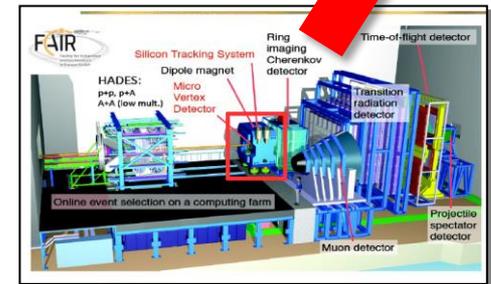
EUDET telescope



STAR HFT



ALICE ITS



CBM MVD



ILC VTX

Plan du cours



En cas de fatigue...

Pas un cours de:

- ✓ Physique des particules
- ✓ cristallographie
- ✓ Physique des semi-conducteurs
- ✓ Electronique/micro-électronique
- ✓ Trajectométrie
- ✓ Radiations
- ✓ Intégration système



Approche généraliste

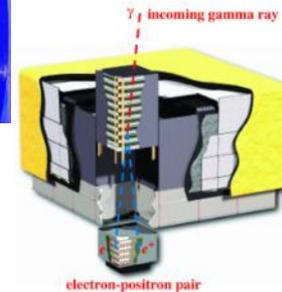
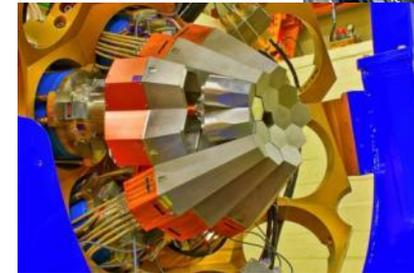
- Motivations
 - Principes généraux de détection des détecteurs semi-conducteurs
 - Spectroscopie versus trajectométrie
 - Points forts / points faibles des semi-conducteurs
- Rappels physique des semi-conducteurs
 - Propriétés des semi-conducteurs
 - Dopage
 - Jonction pn, diode
- Interaction particules / matière
 - neutrons, gamma, particules chargées, neutrinos, ions...
 - notion de déplétion, transport des charges, collection des charges, recombinaison, etc.
 - diffusion multiple
- Le signal mesuré
 - Rapport Signal / Bruit
 - Notions d'amas
- Trajectographie et Résolution
- Effets des radiations
- Exemples de détecteurs S.C.
 - Détecteurs à pistes (Strips)
 - Pixels hybrides
 - Détecteurs monolithiques (CCD, CMOS, DEPFET...)
 - Spectrométrie
 - (HPD, APD, imagerie)
- R & D
- + Bibliographie sommaire
- + Exercices
- + Back up
 - Fabrication, HPD, etc.

Motivations

- principes généraux de détection des détecteurs semi-conducteurs
- spectroscopie versus trajectométrie
- point forts/faibles des détecteurs semi-conducteurs

Où trouve-t-on des détecteurs à semi-conducteurs ?

- Dans votre caméra/portable/appareil photo
 - Détection de lumière visible
- En physique des particules
 - Détection de position des particules chargées
- En physique nucléaire
 - Mesure d'énergie de particules chargées (MeV)
 - Spectroscopie gamma, identification (dE/dx)
- En astrophysique & astroparticules
 - Trajectométrie, visible, X, γ , infrarouge, etc.
- En imagerie médicale, santé
- Autres:
 - Auprès des Machines Synchrotron,
 - Sécurité,
 - Biologie,
 - etc.



Nous sommes cernés par les S.C.

chaîne de détection

ce qu'on veut détecter



ce qu'on mesure



interaction

- ✓ électrons
- ✓ photons (X, visible, γ , etc.)
- ✓ neutrons
- ✓ protons, baryons (π^\pm , K, etc.)
- ✓ ν

- ✓ position
- ✓ énergie
- ✓ temps
- ✓ flux (comptage)

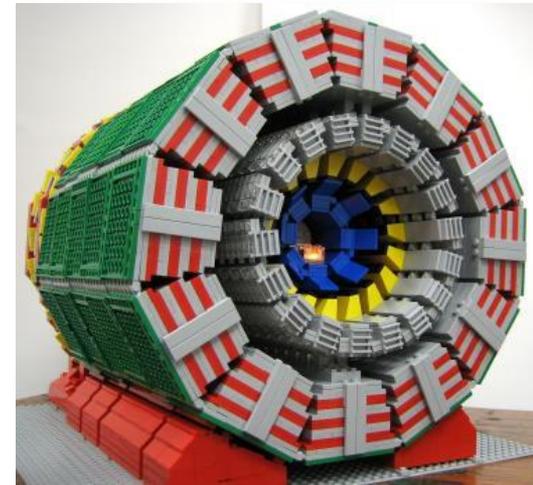
- ✓ scintillation
- ✓ ionisation
- ✓ température
- ✓ Cerenkov
- ✓ etc.

les contraintes

- ✓ Efficacité
- ✓ Résolution spatiale
- ✓ Coût
- ✓ Vitesse de lecture
- ✓ Résistance aux radiations
- ✓ Budget de matière

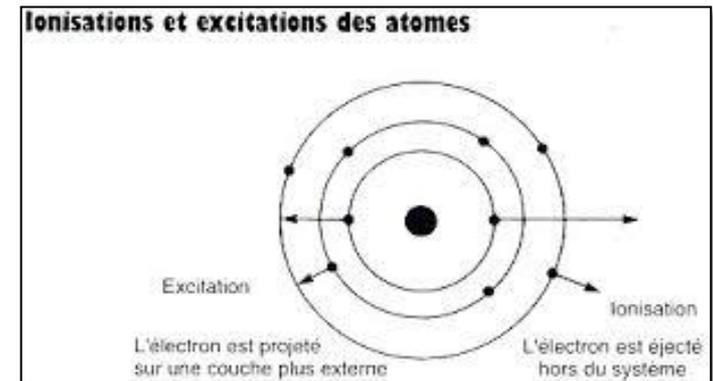
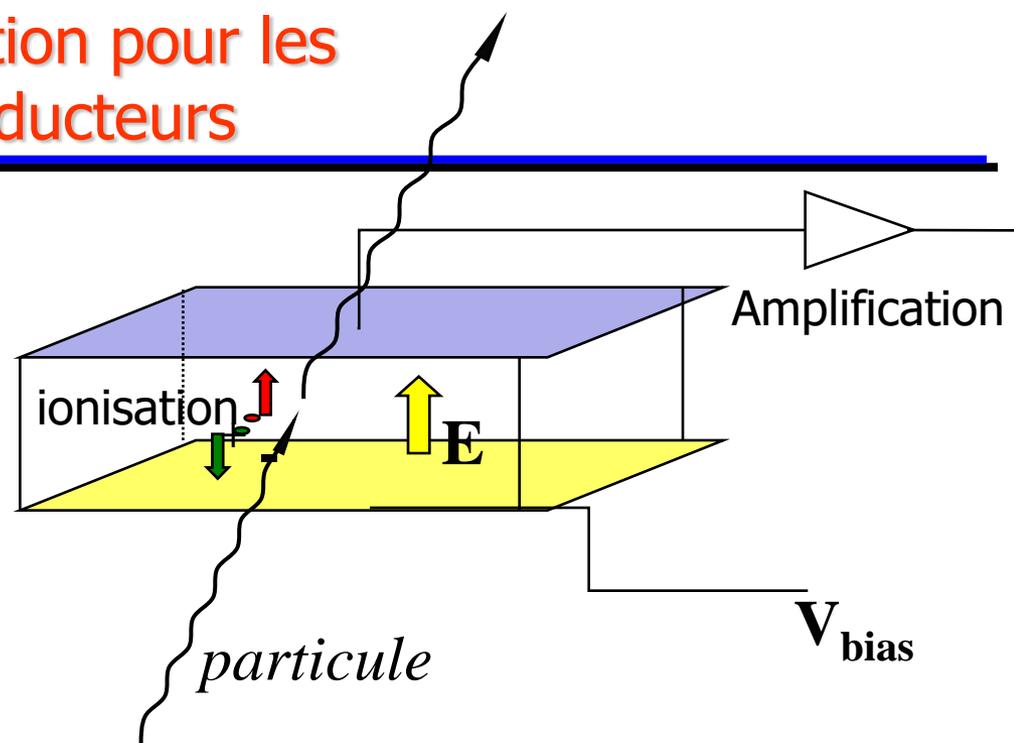
- ✓ Résolution en temps
- ✓ Puissance dissipée, consommation
- ✓ Intégration mécanique, connectique
- ✓ Flux des données
- ✓ Géométrie, surface active
- ✓ Refroidissement
- ✓ etc.

Des dizaines de paramètres à optimiser



Principe général de détection pour les détecteurs à semi-conducteurs

- Interaction des particules incidentes dans le matériau actif du détecteur
 - dépôt partiel d'énergie de la particule incidente
 - OU absorption totale de l'énergie dans le cas de la calorimétrie/spectroscopie
 - Dans les 2 cas:
 - ionisation = création de porteurs de charges (paires électrons/ions)
- Transport et collecte d'un signal relié à ces porteurs de charges
 - mesure d'un courant induit par le mouvement des porteurs de charge
- Amplification et traitement du signal par un circuit électronique
- Transfert de ces signaux vers un système d'acquisition et de stockage des données.



Un bon détecteur est celui qui optimise chacune de ces étapes, et ce de manière adaptée à l'application.

2 grandes familles: « calorimétrie » et mesure de position

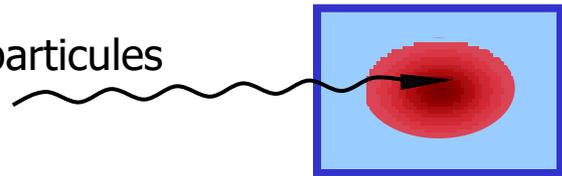
- Spectroscopie γ ou calorimétrie

- le but est de mesurer l'énergie de la particule.

- la mesure est destructive: toute l'énergie de la particule doit être récupérée
- le détecteur doit être "dense" pour "stopper" la particule incidente

- exemples:

- spectroscopie γ en physique nucléaire.
- calorimétrie en physique des particules, astroparticules
- imagerie
- comptage (dosimétrie)



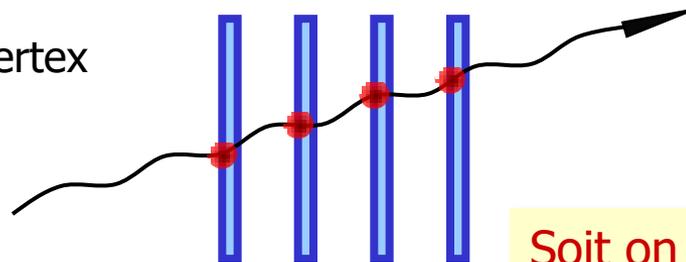
- Mesure de position

- le but est de mesurer la position du passage de la particule

- la mesure doit altérer le moins possible les propriétés de la particule
- celle-ci peut continuer son parcours et éventuellement passer par plusieurs détecteurs successifs (mesure de trajectoire)
- le détecteur doit être le moins "dense" possible

- exemples:

- détecteurs de vertex
- trajectographie



Soit on arrête soit on laisse passer

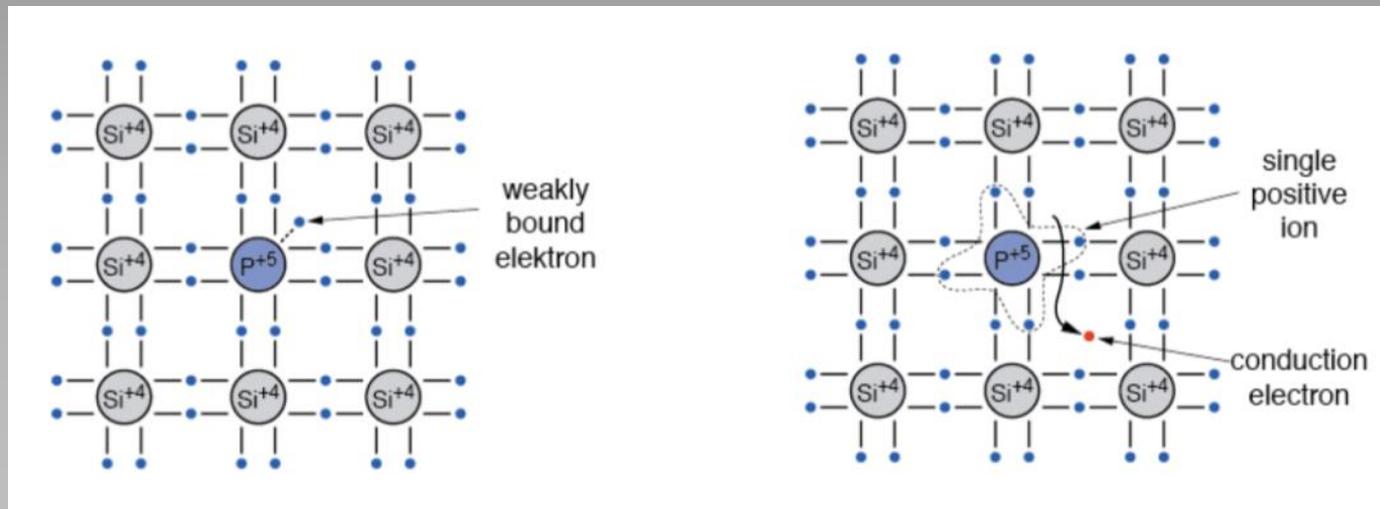
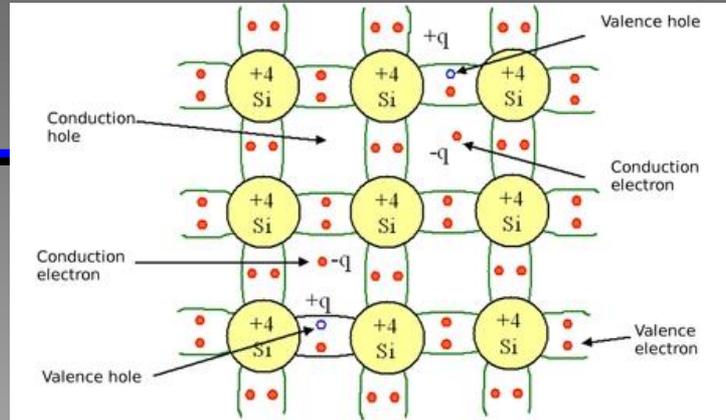
Avantages / inconvénients des semi-conducteurs



Un longue liste...

- Points forts
- Variété des applications et des technologies
 - une famille de détecteur adaptable à de nombreux types de mesures.
- Le silicium dans l'industrie
 - usage généralisé de la (micro)-électronique sur silicium (photo, portable, microprocesseurs, puces, etc.)
 - tirer partie de ces percées industrielles pour la miniaturisation, les couts et les performances
- Quantité de signal généré
 - $\sim 10x$ celle des détecteurs à gaz pour un même dépôt d'énergie ($\sim 3,6$ eV par création de paire)
 - rapport Signal/Bruit souvent excellent (fiabilité de la mesure)
- Mesure de position (granularité)
 - O(1-100 μm)
- Génération du signal rapide
 - O(1-10 ns)
- Collection de charge
 - possibilité d'appliquer un champs E
 - collection de charge rapide et efficace.
- Flux de données
 - vitesse de lecture + granularité = faible taux d'occupation
 - capable de gérer des hauts flux de données (HEP).
- Traitement du signal
 - intégration de la microélectronique dans le silicium
 - gain en vitesse, flux, etc.
- Mécanique
 - Rigidité: alignement, positionnement, intégration mécanique.
 - Compacité: fenêtre d'entrée, budget de matière
- points faibles
 - Coûts (fortes variations)
 - Fragilité relative
 - Longue R&D pour une application donnée
 - (dans certains cas)
 - Forte expertise nécessaire
 - Refroidissement nécessaire
 - (dans certains cas)
 - Limitations en taille
 - (à pondérer)
 - Tenue aux radiations
 - (dans certains cas)
 - Budget de matière
 - (dans certains cas)
 - Pas d'amplification interne
 - (sauf APD)

Rappels de physique des semiconducteurs



Les S.C. dans la table périodique

Periodic Table of Elements

1	2																	10
3	4																	10
11	12																	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110									

En pratique
(dans nos disciplines)



Silicium
Germanium
Diamant (C)
+ quelques autres

* Lanthanide Series

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

+ Actinide Series

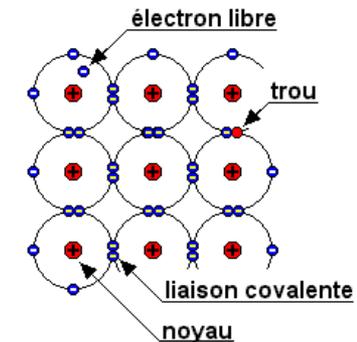
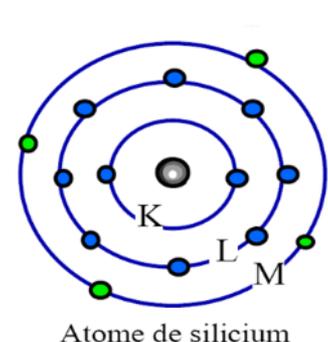
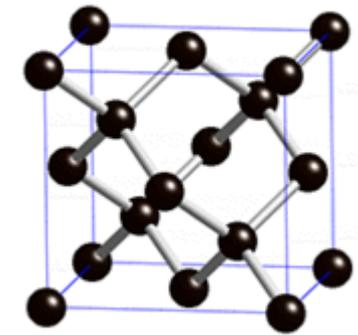
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Legend - click to find out more...

- H - gas
- Li - solid
- Br - liquid
- Tc - synthetic
- Non-Metals
- Transition Metals
- Rare Earth Metals
- Halogens
- Alkali Metals
- Alkali Earth Metals
- Other Metals
- Inert Elements

S.C. = structure cristalline

Maille diamant



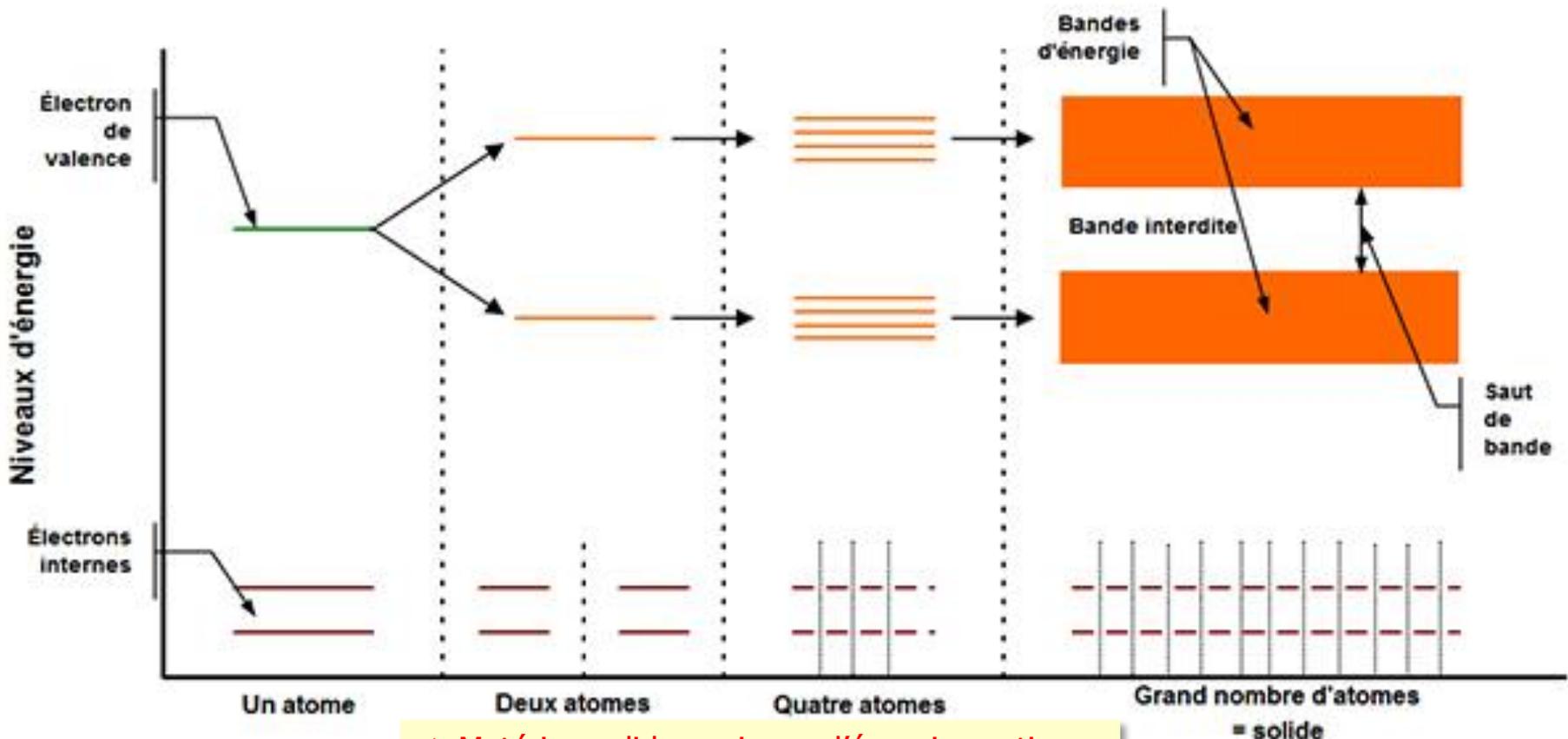
Niveaux d'énergie: de l'atome au solide

Mécanique quantique:

Niveau d'énergie = énergie nécessaire pour libérer l'électron (ionisation)

⇒ 1 Atome: Niveaux d'énergie discrets pour les électrons

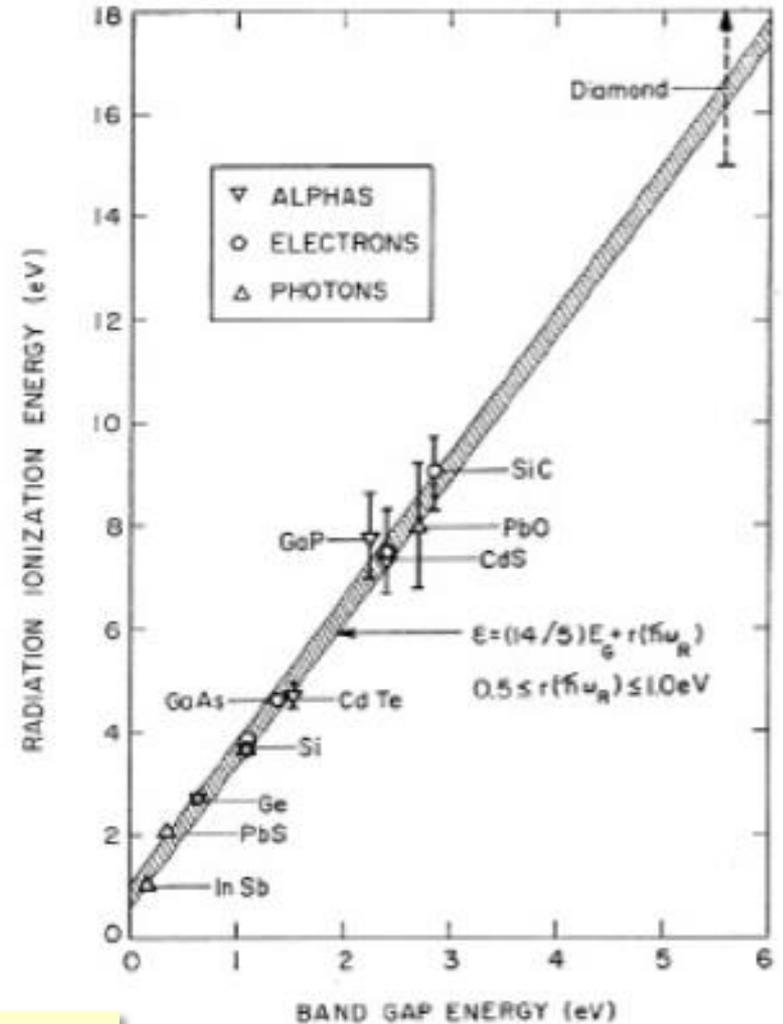
⇒ Grand nombre d'atomes = Solide: niveaux d'énergie « continus »



⇒ Matériau solide = niveau d'énergie continu

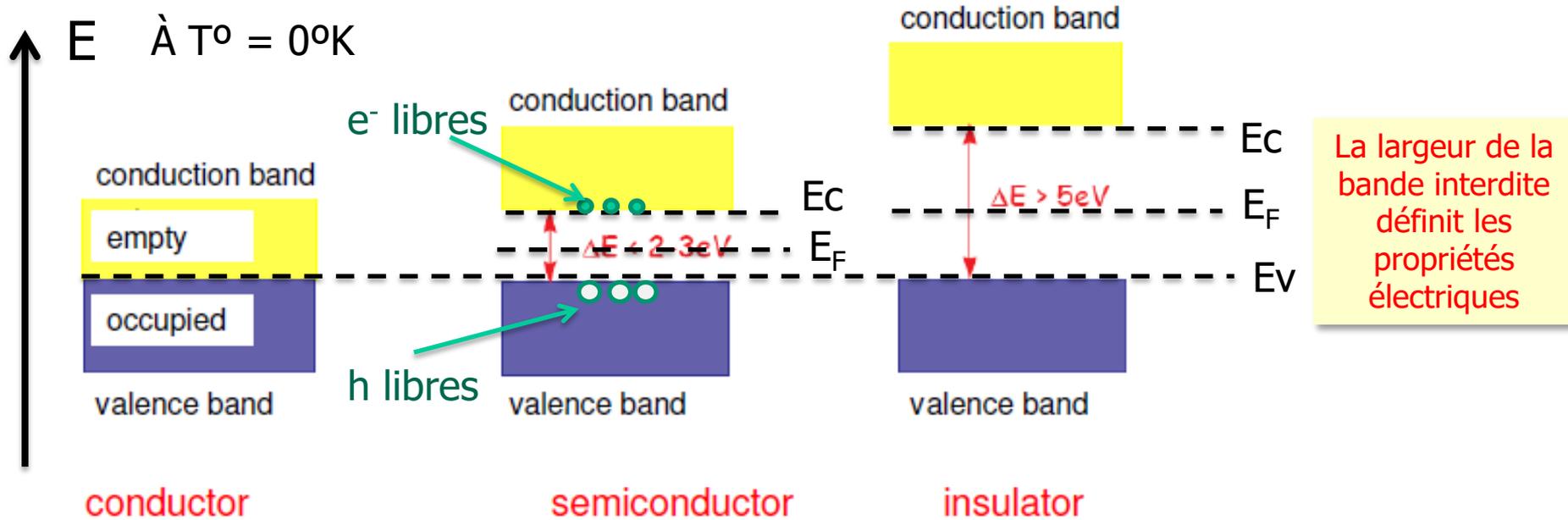
Energie gap \neq Energie d'ionisation

- A priori
 - pour arracher un électron de valence, il faut apporter E_{gap}
- Observation
 - ce n'est pas ce que l'on constate
 - $E_{\text{ionisation}} \sim 3 \times E_{\text{gap}}$
 - (indépendant du S.C. et de la particule incidente)
- Contrainte
 - conservation de l'impulsion et de l'énergie
 - transfert de quantité de mouvement au cristal sous forme de phonons
 - cette quantité de mouvement se traduit par un transfert d'énergie au cristal qui n'est pas utilisé pour la ionisation



⇒ $E_{\text{ionisation}} \neq E_{\text{gap}}$ à cause de la conservation de Energie/impulsion

Le semi-conducteur



Distribution de Fermi-Dirac pour les e^- :

$$f_e(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1} \quad \text{Pour les trous (h=holes): } f_h(E) = 1 - f_e(E) = \frac{1}{e^{(E_F-E)/kT} + 1} = \text{probabilité d'occupation d'un niveau d'énergie E}$$

Pour les semiconducteurs intrinsèques (mêmes concentrations d' e^-/h):
 Énergie de Fermi = $E_F = \text{milieu de } E_{\text{gap}}$

- **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 $\Delta E = E_g = E_c - E_v$

Quelques propriétés de S.C. courants

Material	Z	Bandgap [eV]	Mobility [cm ² /Vs]		Density g/cm ³
			electrons	holes	
Si	14	1.1	1350	480	2.3
Ge	32	0.7	3800	1800	5.3
Diamond	6	5.5	1800	1200	3.5
GaAs	31-33	1.5	8600	400	5.4
AlSb	13-51	1.6	200	700	4.3
GaSe	31-34	2.0	60	250	4.6
CdSe	48-34	1.7	50	50	
CdS	48-16	2.4	300	15	4.8
InP	49-15	1.4	4800	150	
ZnTe	30-52	2.3	350	110	
WSe ₂	74-34	1.4	100	80	
BiI ₃	83-53	1.7	680	20	
Bi ₂ S ₃	83-16	1.3	1100	200	6.7
Cs ₃ Sb	55-51	1.6	500	10	
PbI ₂	82-53	2.6	8	2	6.2
Hgl ₂	89-53	2.1	100	4	6.3
CdTe	48-52	1.5	1100	100	6.1
CdZnTe	48-30-52	1.5-2.4			

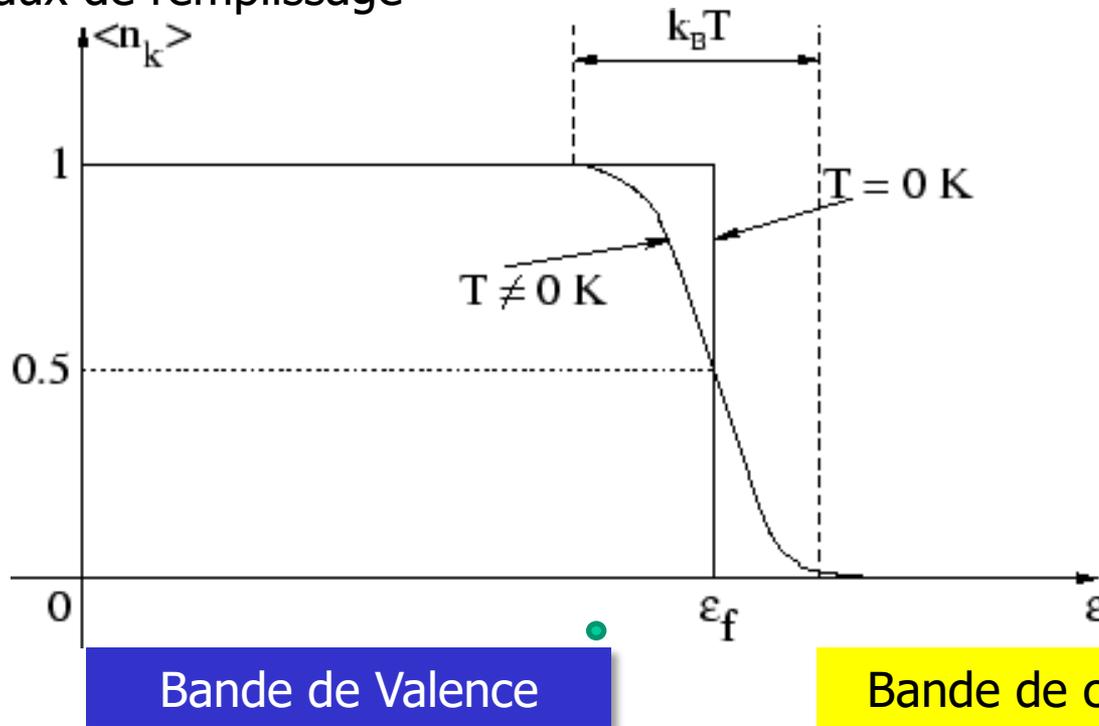
$E_{\text{gap}} \sim$ quelques eV

Distribution de Fermi-Dirac

Fermi-Dirac-Distribution:

$$f_e(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1}$$

Taux de remplissage



- $f(E_F) = 1/2$
- Quand $T \rightarrow 0$
 - Tous les niveaux les plus bas sont occupés
 - isolant
- Quand T augmente
 - La probabilité que des niveaux d'énergie supérieurs à E_F soit occupés augmente
- La conductivité dépend de la température
 - Solution: le dopage.

⇒ Effet indésirable: les propriétés électriques dépendent de la température

Signal et concentration des porteurs de charge

- Nombre d'atomes

➤ $\sim 10^{22}$ atomes/cm³

N_C et N_V = densités d'états effectives respective des électrons dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence.

- Silicium pur (intrinsèque) à T ambiante

- Electrons sur la bande de conduction et trous sur la bande de valence
- Equilibre \Rightarrow excitation = recombinaison
- Concentration intrinsèque des porteurs de charge

➤ $n_i = n_{e^-} = n_h =$

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \propto T^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

➤ Silicium à 300K: $n_i \sim 1.45 \times 10^{10}$ /cm³ \Rightarrow 1/10¹² atomes ionisés

- Exemple: signal créé par le passage d'une particule au minimum d'ionisation (MIP)

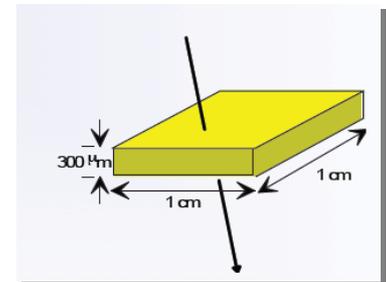
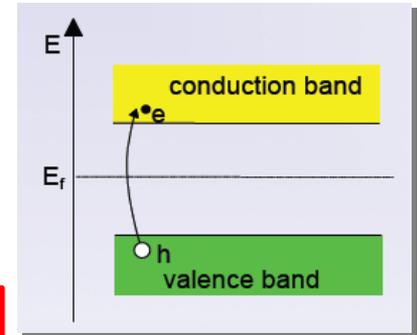
➤ Détecteur d'épaisseur 300 μ m, surface 1cm², énergie d'ionisation=3.6 eV,

➤ Nombre d'ionisations ~ 100 e-h / μ m

➤ Signal ~ 3000 e⁻ ; porteurs libres $\sim 4.5 \cdot 10^8$

➤ Signal minuscule devant le nombre d'e⁻ « naturellement » libres

➤ \Rightarrow Comment changer ce rapport ? (déplétion, dopage)



Le dopage



Dopage

Principe:

– Remplacement d'une petite fraction des atomes par d'autres atomes ayant un e⁻ de plus (N) ou de moins (P) sur leur couche de valence

➤ Dopage P: Bore, N: Phosphore, Arsenic, etc.

➤ Intrinsèque = non dopé ; extrinsèque = dopé

– Ces atomes prennent la place du matériau de départ (Si, Ge, etc.)

– Concentrations typiques: $10^{12} - 10^{18} / \text{cm}^3 \gg n_i$

– Ces dopants « ajoutent » des niveau d'Énergie supplémentaires

➤ e⁻ supp. ⇒ niveau supp.

➤ h supp. ⇒ niveau supp.

N près de la bande de conduction

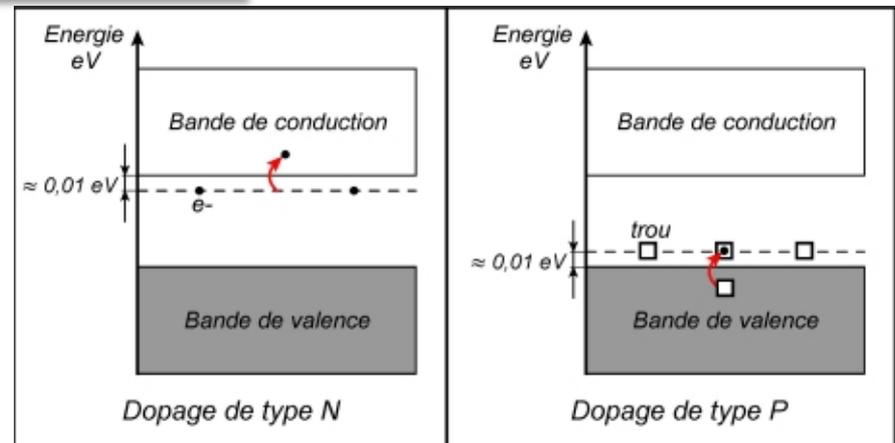
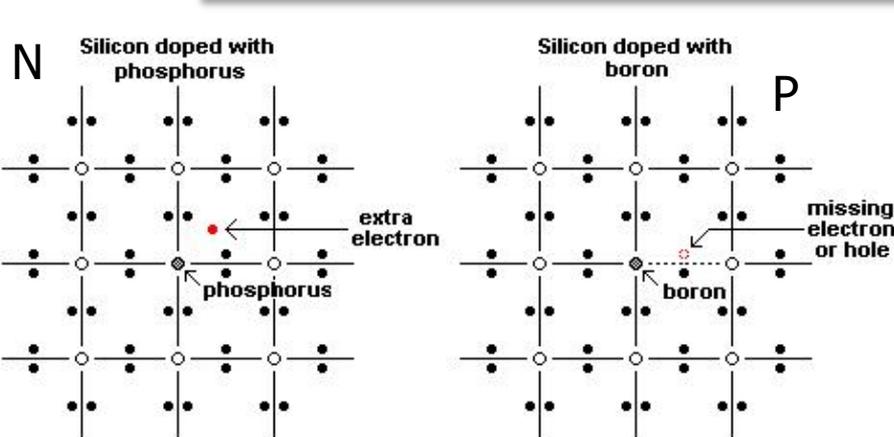
P près de la bande de valence

➤ A T ambiante ⇒ e⁻ libre sur la bande de conduction

➤ e⁻ manquant sur la bande de valence

➤ Trou libre supplémentaire

⇒ Dopage = porteurs de charge libres supplémentaires
Modification de la conductivité du matériau



Dopage

- Dopage P: (Bore)

- 1 e- de moins sur la couche de valence
- Emplacement libre pour un e-

- Charge libre: h+

- Ion fixe: -

- **ACCEPTEUR** d'e-

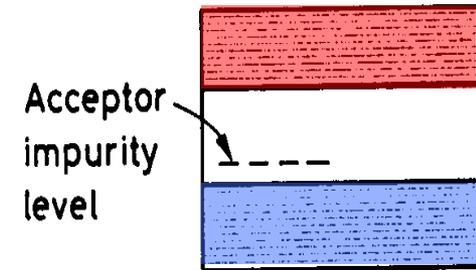
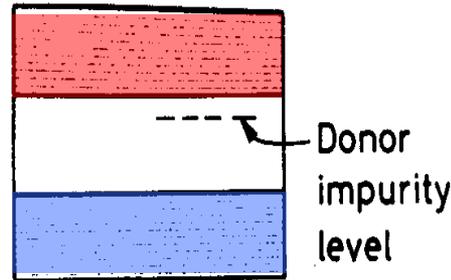
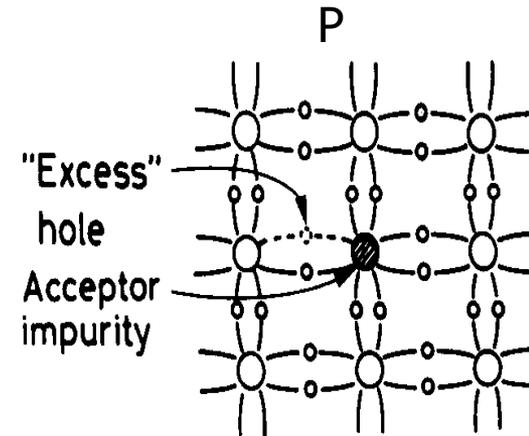
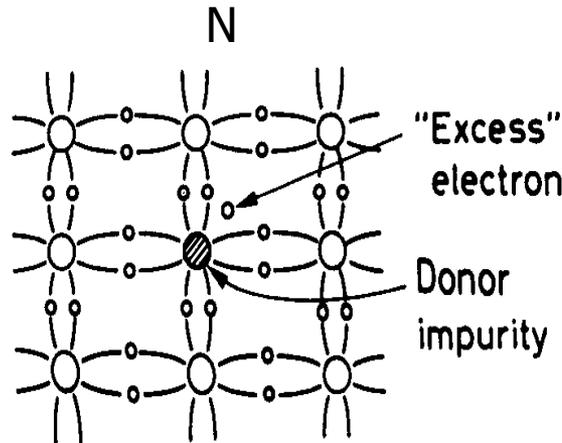
- Dopage N (Phosphore)

- 1 e- de plus sur la couche de valence
- Electron supplémentaire

- Charge libre: e-

- Ion fixe: +

- **DONNEUR** d'e-



P = trous porteurs majoritaires
N = e- porteurs majoritaires

Les niveaux dépendent du dopant

	Li	Sb	P	As	Bi
Conduction band level (eV)	0.033	0.039	0.044	0.049	0.069
Valence band level (eV)	0.045	0.057	0.065	0.16	0.26

Silicon band gap 1.1eV

Grandeurs caractérisant les S.C.

- Concentration des dopants (cm^{-3}): joue sur la longueur de diffusion, la résistivité (et conductivité).
- Mobilité μ
 - Relie la vitesse de dérive moyenne et le champ E: $v = \mu E$
 - Dépend du S.C., du dopage, de la température
- Résistivité (1/conductivité) \Rightarrow change avec le dopage

Dépend du dopage : N_A et N_D

Inverse de la conductivité : $q(n\mu + p\mu_+)$

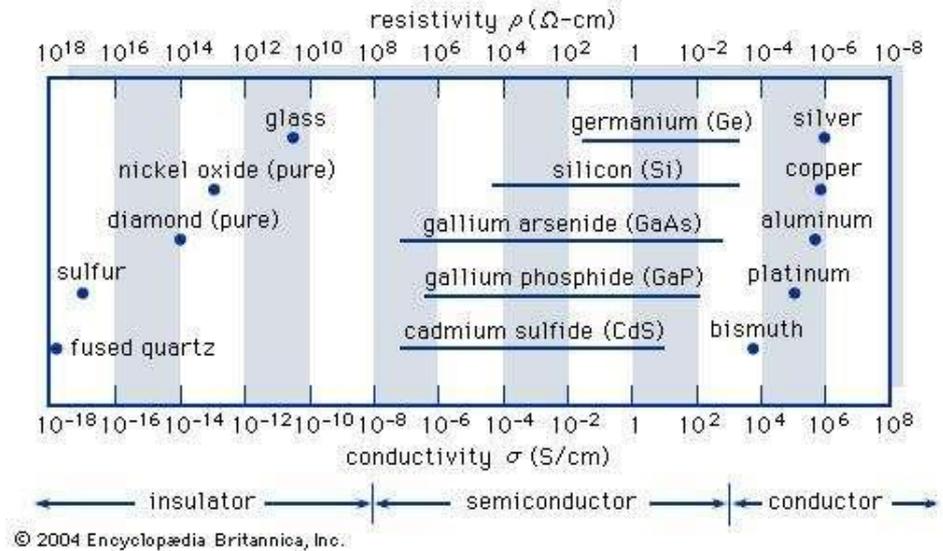
Pour du Si de type N : $\rho \approx \frac{1}{N_D \cdot q \cdot \mu_-}$

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



On peut fixer les propriétés électriques du S.C. grâce au dopage

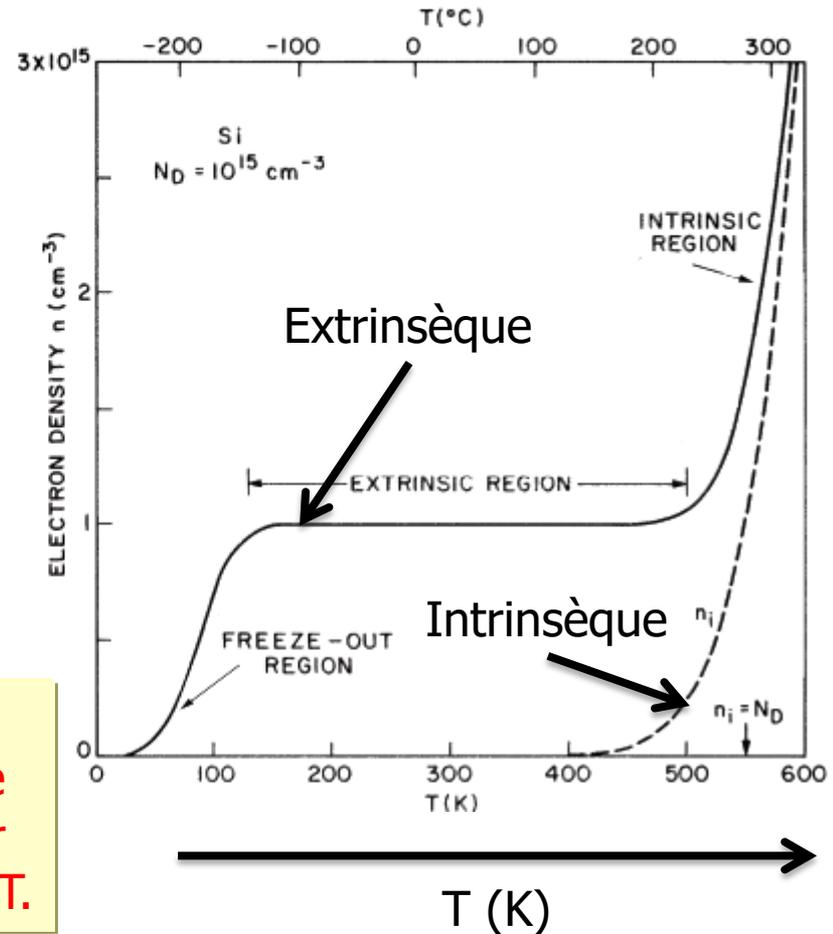
Dopage et conductivité

- Intrinsic :
 - La Température gouverne la densité de porteurs libres
- Extrinsic
 - Le dopage gouverne la densité de porteurs libres
 - (jusqu'à une certaine T)
 - On impose la conductivité

- ★ At low temperatures the thermal energy is not sufficient to ionize all donors. Some e^- are frozen at the donor level.
- ★ As the temperature increases all donors become ionized ("extrinsic region").
- ★ At even higher temperature ($kT \approx E_g$) the intrinsic carrier concentration becomes comparable to the donor concentration. Beyond this point the semiconductor becomes intrinsic.

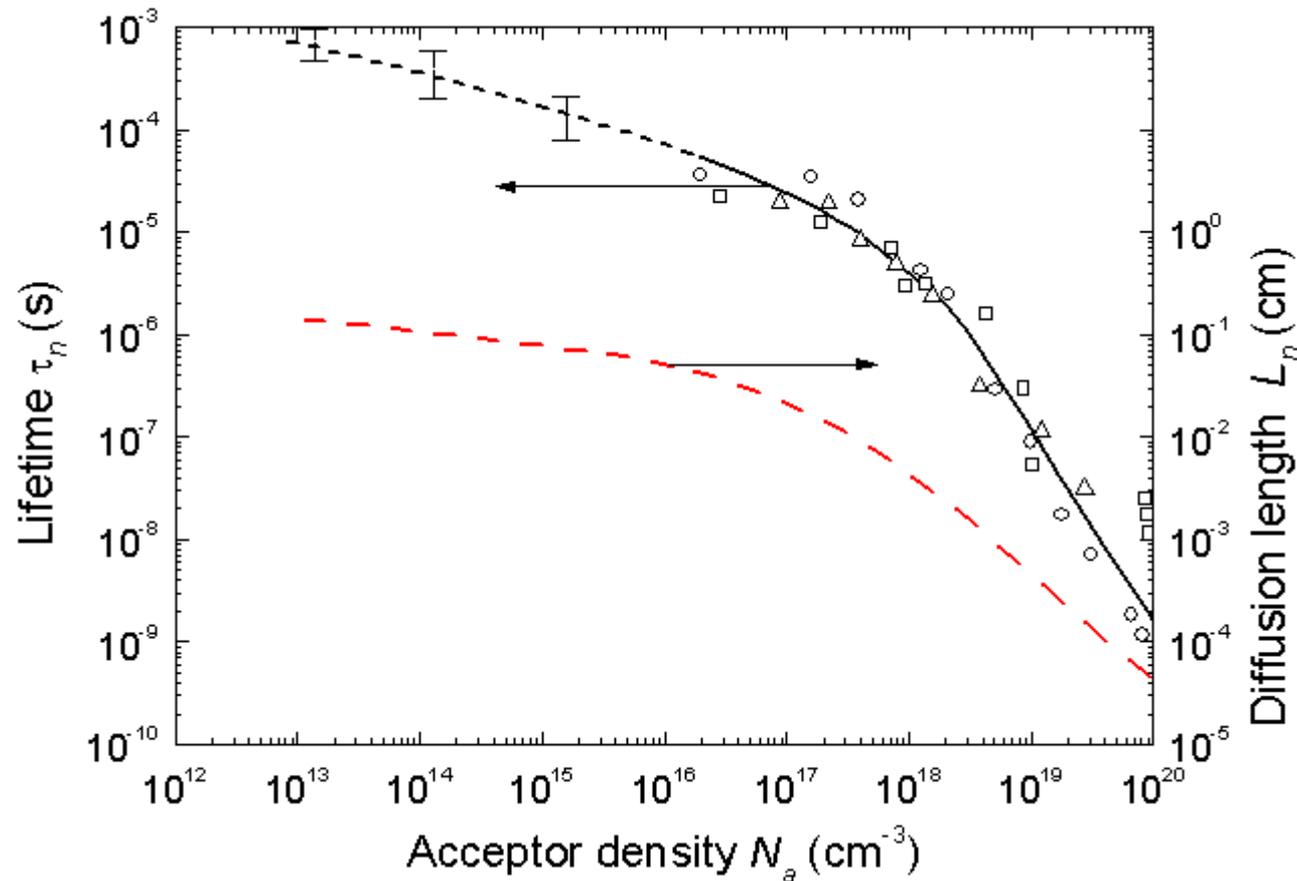
La conductivité ne dépend plus de la température sur une large plage de T.

Electron density as a function of temperature for a Si sample with a donor concentration of 10^{15} cm^{-3} :



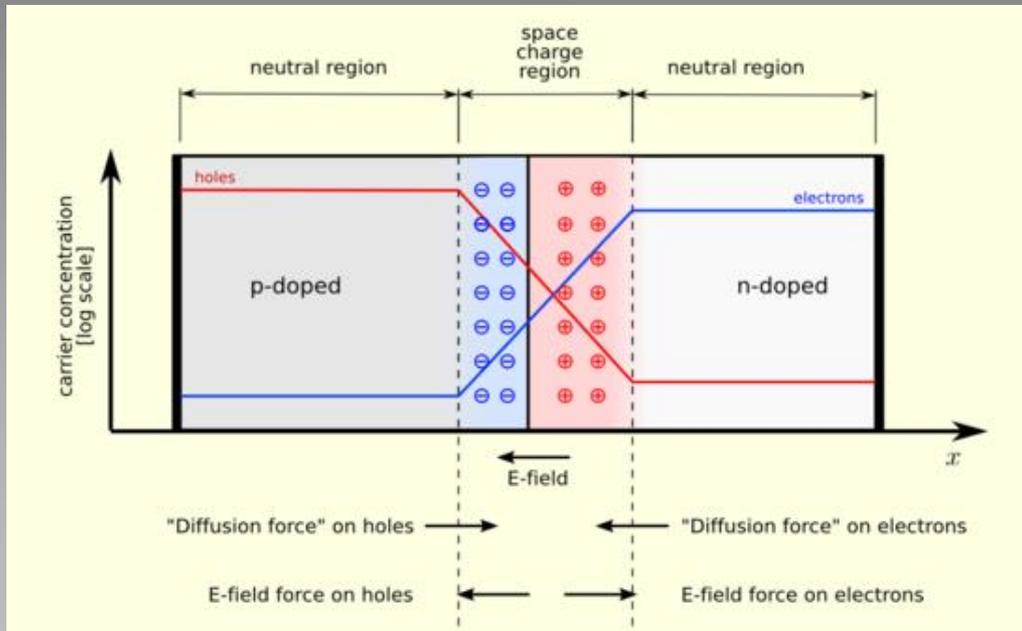
Source: S.M. Sze, Semiconductor Devices, J. Wiley & Sons, 1985

Relation entre le dopage et la longueur de diffusion



Augmenter le dopage \Rightarrow diminue la longueur de diffusion

Jonction P-N

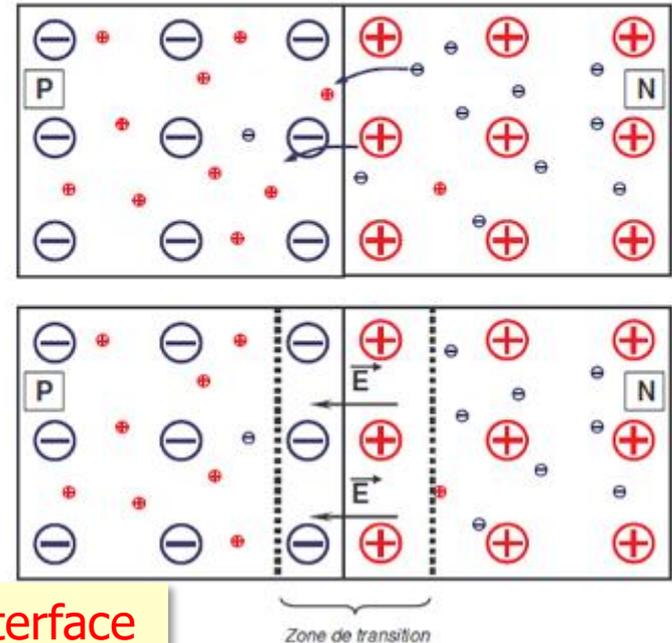
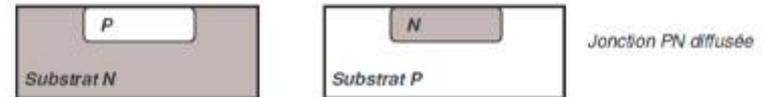
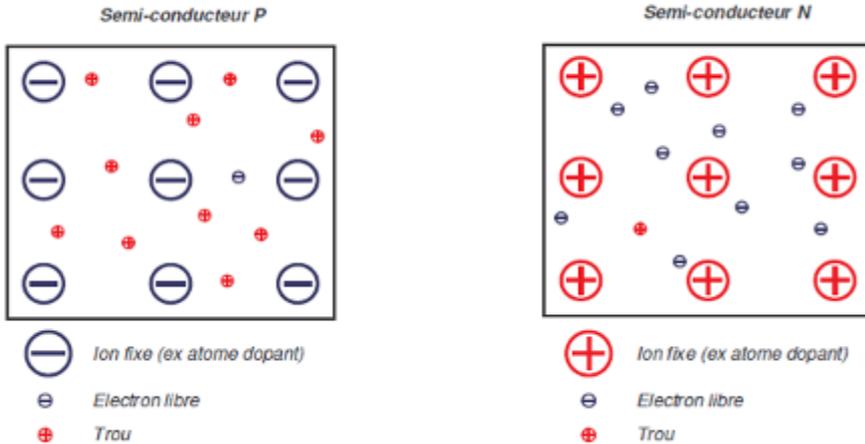


Jonction P-N

• Création d'une jonction PN.

Jonction PN

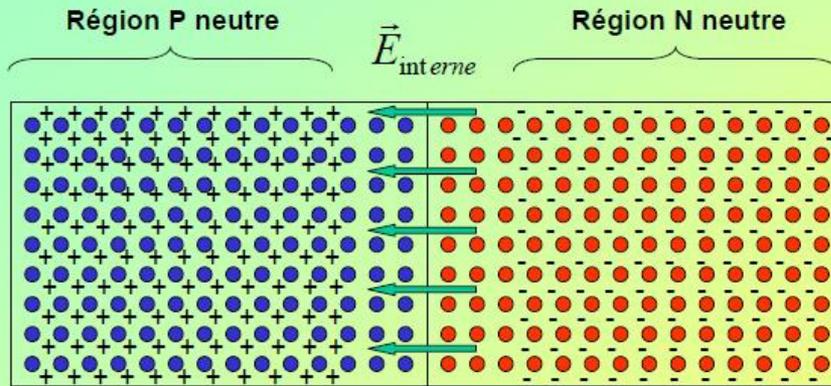
• Représentation simplifiée des semi-conducteurs dopés.



Jonction P-N = création d'un champ électrique à l'interface

- Les électrons (« libres ») majoritaires du côté "N" ont tendance à diffuser du côté "P", où ils sont minoritaires. Quand un électron arrive du côté "P", il se recombine avec un trou, et, en disparaissant, il laisse du côté "N" un atome donneur ionisé positivement non compensé électriquement.
- Les trous majoritaires du côté "P" ont tendance à diffuser du côté "N" où ils sont minoritaires. Quand un trou arrive du côté "N", il se recombine avec un électron libre, et, en disparaissant, il laisse du côté "P" un atome accepteur ionisé négativement non compensé électriquement.

Jonction P-N

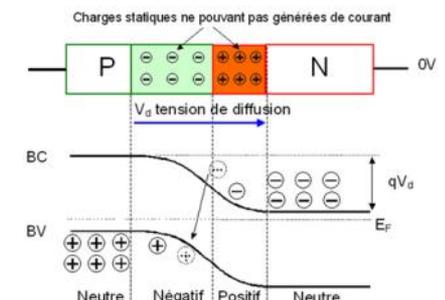
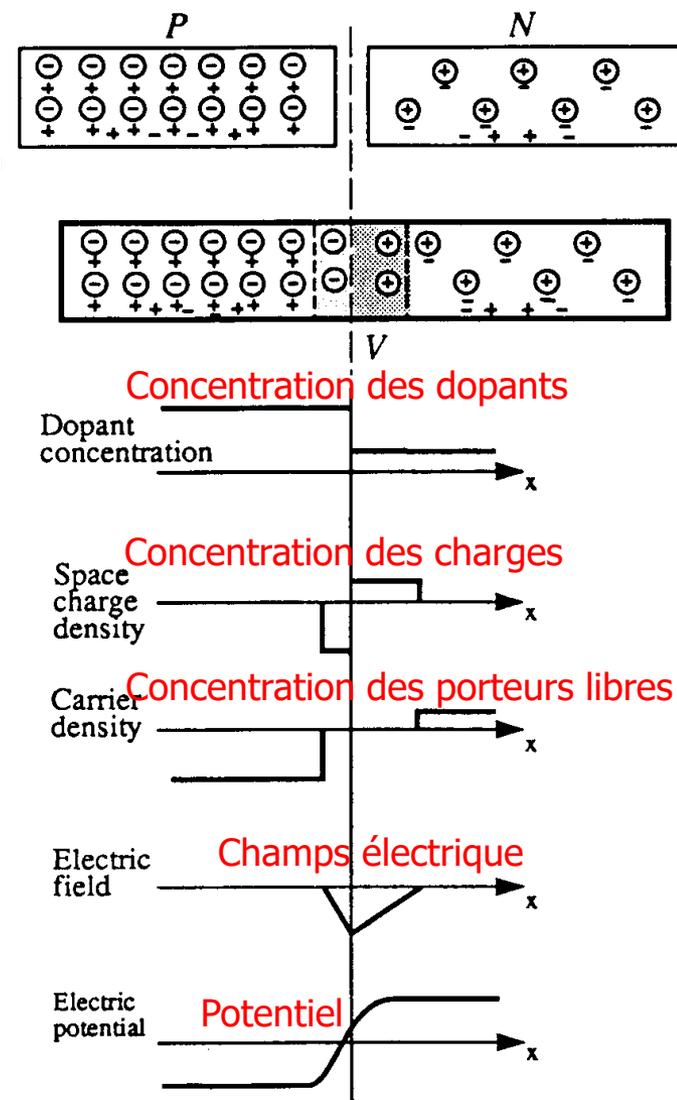


● → Accepteurs ionisés fixes dans le réseau charge - q
 ● → Donneurs ionisés fixes dans le réseau charge + q

Zone désertée par suite des RECOMBINAISONS des porteurs libres (électrons et trous)

Jonction P-N = zone désertée par les porteurs libres

- Accepteur -
- Donneurs +
- Trous +
- e- -



La relation liant les grandeurs charges d'espace $\rho [C \times cm^{-3}]$, champ électrique E et potentiel électrostatique φ est :

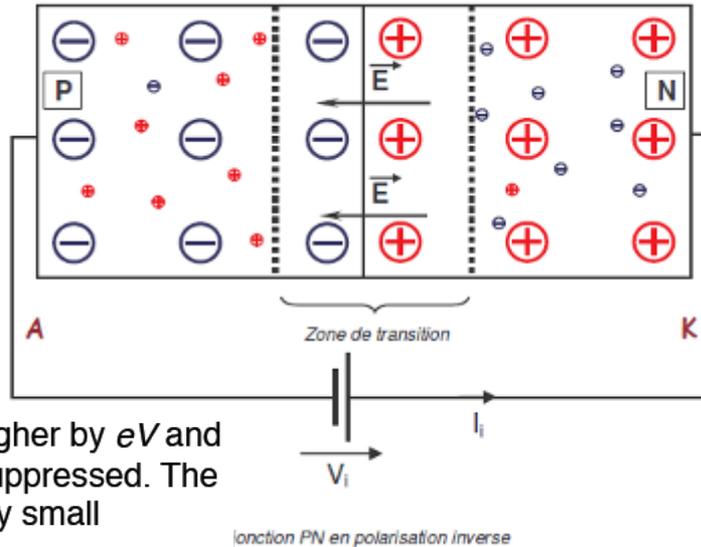
$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = \frac{-dE}{dx} = \frac{-\rho}{\epsilon_s}$$

Où ϵ_s est la permittivité du milieu (10^{-10} F/m pour le silicium).

Jonction PN: Polarisation inverse / directe

• Jonction PN polarisée en inverse.

Inverse (reverse)



Jonction PN en polarisation 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 I_s

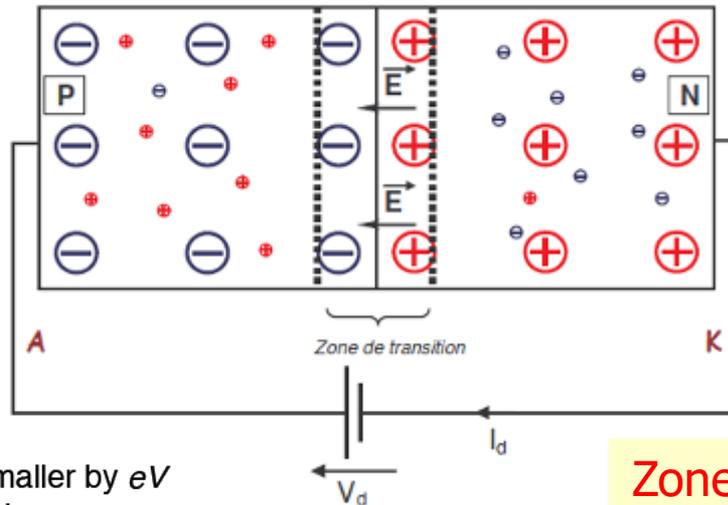
➔ Elargit la zone de transition

The diodes are reversely biased only a very small leakage current will flow across it

The potential barrier becomes higher by eV and diffusion across the junction is suppressed. The current across the junction is very small "leakage current".

• Jonction PN polarisée en direct.

Directe (forward)



La jonction PN en polarisation directe

➔ Réduit la zone de transition

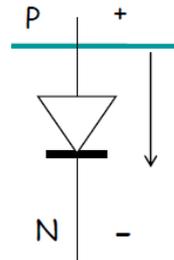
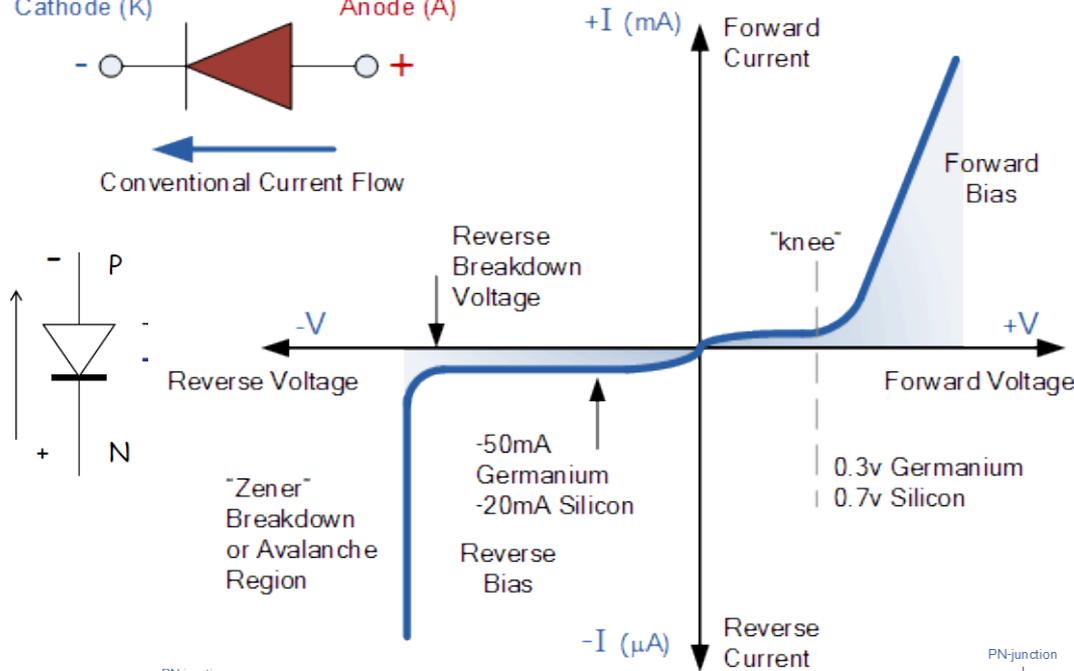
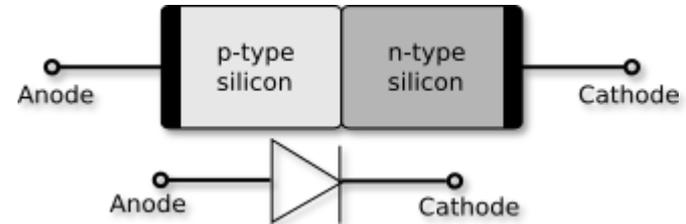
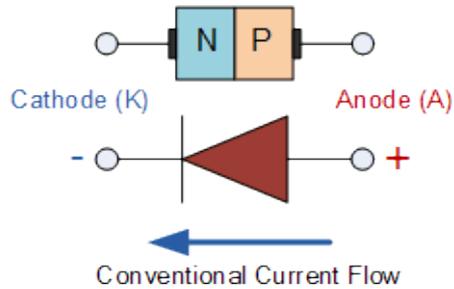
Zone de transition = zone dépletée
= zone où un champ E existe

The potential barrier becomes smaller by eV and diffusion across the junction becomes easier. The current across the junction increases significantly.

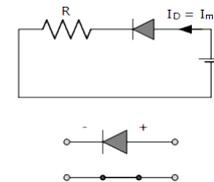
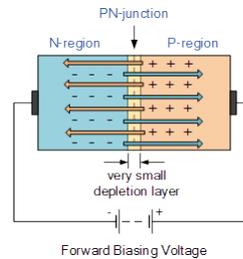
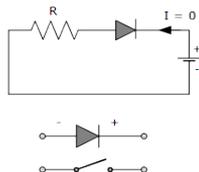
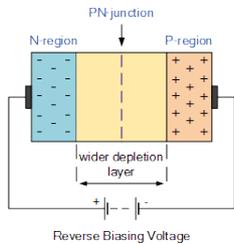
La Jonction PN est une Diode

Polarisation directe \Rightarrow Zone déplétée courte \Rightarrow résistance plus faible $\Rightarrow I \sim \mu\text{A} - \text{mA}$

Polarisation inverse \Rightarrow Zone déplétée élargie \Rightarrow résistance plus élevée $\Rightarrow I \sim \text{nA} - \mu\text{A}$



Diode = impose un sens unique pour le courant



Capacité d'un détecteur

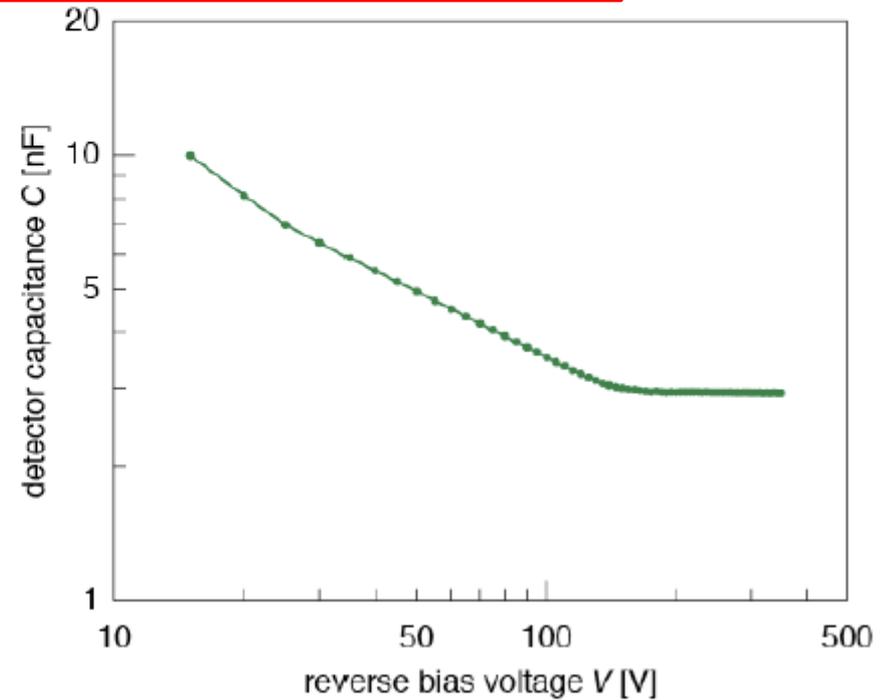
For a typical Si p-n junction ($N_a \gg N_d \gg n_i$) the detector capacitance is given as:

$$C = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{2\mu\rho|V|}} \cdot A$$

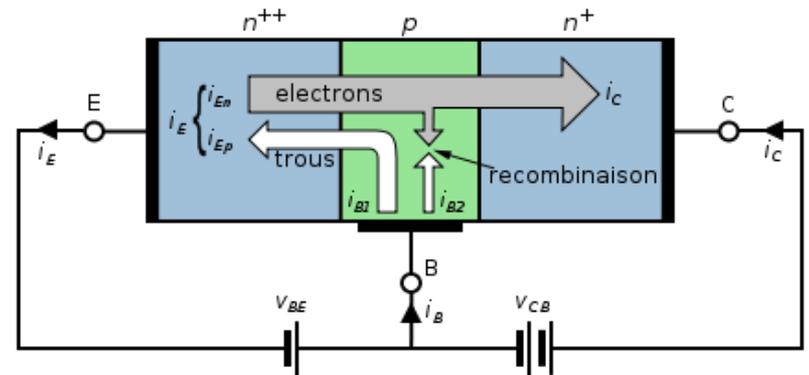
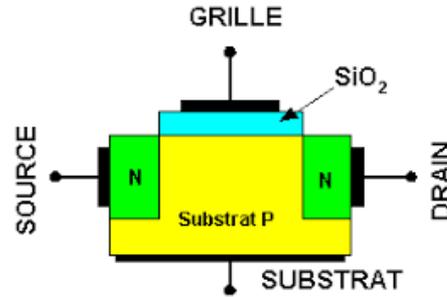
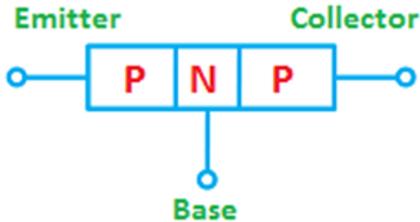
ρ ... specific resistivity of the bulk
 μ ... mobility of majority charge carrier
 V ... bias voltage
 A ... detector surface

Measured detector capacitance as a function of the bias voltage, CMS strip detector:

Capacité \propto surface A
La capacité influe sur le « bruit »

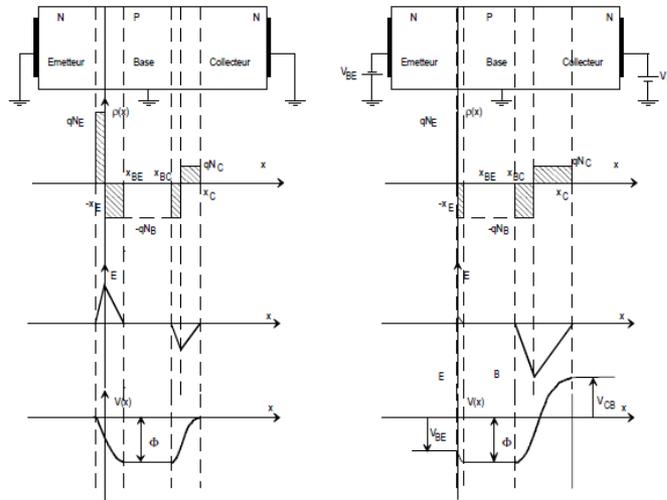
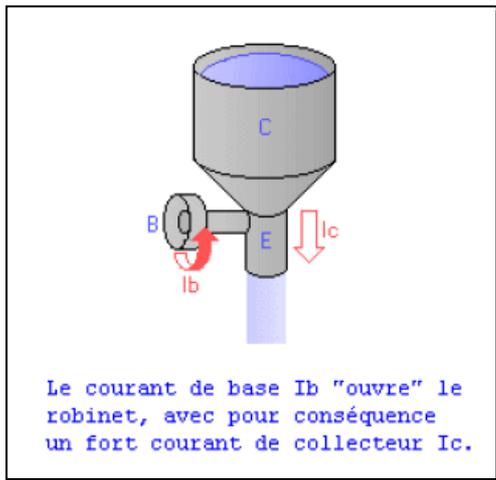


Transistors NPN ou PNP



- La Base fonctionne comme un interrupteur
 - En appliquant une petite tension à la base:
 - Le courant principal entre l'émetteur et le collecteur peut passer
 - Effet transistor = porte logique contrôlé électroniquement

En jouant sur les dopages, on peut construire les « briques élémentaires » des circuits électroniques (diodes, transistors, etc.)



Quelques propriétés de S.C. courants

Un consommateur averti en vaut deux...

Material	Z	E_g [eV]	w [eV]	μ_e [cm ² /Vs]	μ_h [cm ² /Vs]	τ_e [s]	τ_h [s]	ϵ	ρ [g/cm ³]
C (diamond)	6	5.4	13.2	1800	1200	10^{-8}	$<10^{-8}$	5.5	3.51
Si	12	1.12	3.61	1350	480	$>10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	11.7	2.33
Ge	32	0.67	2.98	3900	1900	$>10^{-3}$	10^{-3}	16	5.33
GaAs	32	1.42	4.70	8500	450	10^{-8}	10^{-7}	12.8	5.32
CdTe	50	1.56	4.43	1050	100	$3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	11	6.2
CdZnTe		1.5-2.2	5	1350	120	10^{-6}	$5 \cdot 10^{-8}$		6
HgI ₂	54	2.13	4.20	100	4	10^{-6}	10^{-5}	8.8	6.4
a-Si	12	1.8	4	1	0.005	$7 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-6}$	11.7	2.3
a-Se	34	2.3	7	0.005	0.14	10^{-6}	10^{-6}	6.6	4.3

Comparaison de quelques semi-conducteurs

Silicium

- Longueur de radiation X_0 élevée
 - Trajectographie, vertexing
- Peut être utilisé à T ambiante
- Synergie avec l'industrie
 - coûts, électronique

Germanium

- Concentration intrinsèque élevée
- E_{gap} petit (0.66 eV), X_0 faible
 - Mesure d'énergie, spectroscopie gamma
- Refroidissement nécessaire (N@77K)

Diamant

- E_{gap} grand, X_0 très élevé, eff. Coll. de charge moyenne
 - Signal faible
- Coût élevé
- Excellente résistance aux radiations
 - Mesures de luminosité (LHC, etc.)

Property		Si	Ge	GaAs	Diamant
Z		14	32	31/33	6
A		28.1	72.6	144.6	12.0
Band gap	[eV]	1.12	0.66	1.42	5.5
radiation length X_0	[cm]	9.4	2.3	2.3	18.8
mean energy to generate eh pair	[eV]	3.6	2.9	4.1	~ 13
mean E-loss dE/dx	[MeV/cm]	3.9	7.5	7.7	3.8
mean signal produced	[$e^-/\mu\text{m}$]	110	260	173	~ 50
intrinsic charge carrier concentration n_i	[cm^{-3}]	$1.5 \cdot 10^{10}$	$2.4 \cdot 10^{13}$	$1.8 \cdot 10^6$	$< 10^3$
electron mobility	[cm^2/Vs]	1500	3900	8500	1800
hole mobility	[cm^2/Vs]	450	1900	400	1200

Composés III-V (GaAs, etc.)

- Mobilité des électrons ↑
 - Efficacité de collection de charge
- Bonne résistance aux radiations
- Coût élevé

Composés II-VI (CdTe)

- Numéros atomiques élevés
 - Détection de photons
 - X-ray spectroscopy (spatial)
 - Imagerie médicale

Le silicium est largement dominant (99% du marché)

Dopage: Résumé

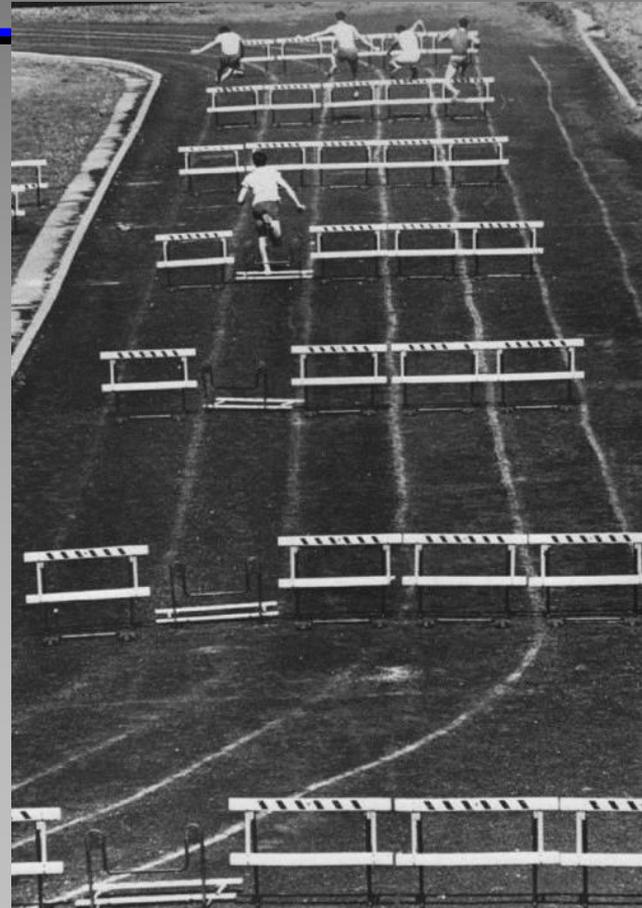
- Le dopage permet de modifier les propriétés de conduction du matériau semi-conducteur
 - Conductivité, mobilité, etc.
- Plusieurs volumes dopés différemment permettent de construire des briques élémentaires pour des circuits (micro)électroniques.
 - Diodes, transistors, amplification, etc.
 - La taille de gravure (feature size) définit la technologie employée
- Une zone déplétée (ou de transition ou de charge d'espace) est une zone où il existe un champ électrique
 - S'étend du côté le moins dopé de la jonction PN
 - Transport des charges libres ! = détecteur !



Le matériau semi-conducteur peut être à la fois le lieu de la création d'un signal suite au passage d'une particule et celui du prétraitement de ce signal.

Interaction particules / matière dans un semi-conducteur

Longueur de radiation
Photons
Particules chargées
Neutrons
Signal créé
Diffusion multiple
Delta rays



Notion de longueur de radiation X_0

- Pour les photons et les électrons, on définit une longueur typique commune qui dépend du matériau et qui définit la longueur traversée pour laquelle la particule incidente perdra $1/e$ de son énergie (e-) ou $7/9$ de son énergie (photons)

$$X_0 = \frac{716.4 \text{ g cm}^{-2} A}{Z(Z + 1) \ln(287/\sqrt{Z})} \cdot (\text{g/cm}^2) \quad \begin{array}{l} Z = \text{numéro atomique} \\ A = \text{masse atomique} \end{array}$$

Dépend aussi de la masse volumique

Exp: Silicium. $Z = 14$, $A = 28$

$X_0 = 22.01 \text{ g/cm}^2 \Rightarrow$ on divise par $\rho(\text{solide}) = 2.3 \text{ g/cm}^3$

$X_0 = 9.55 \text{ cm}$ (valeur réelle = 9.4)

Longueur de radiation (X_0)
= définit la perte d'énergie par unité de longueur traversée d'un matériau

Interaction des photons avec la matière (1)

- Grande variété sur tout le spectre
- Imagerie
 - $\gamma \sim 1 \text{ MeV} - 100 \text{ MeV}$
 - $X \sim 1 \text{ keV} - 1 \text{ MeV}$
 - visible $\sim 1\text{-}2 \text{ eV}$
- Équivalence énergie -fréquence – longueur

$$E = h \cdot \nu = h \cdot C / \lambda$$

avec

h = constante de Planck

ν = fréquence

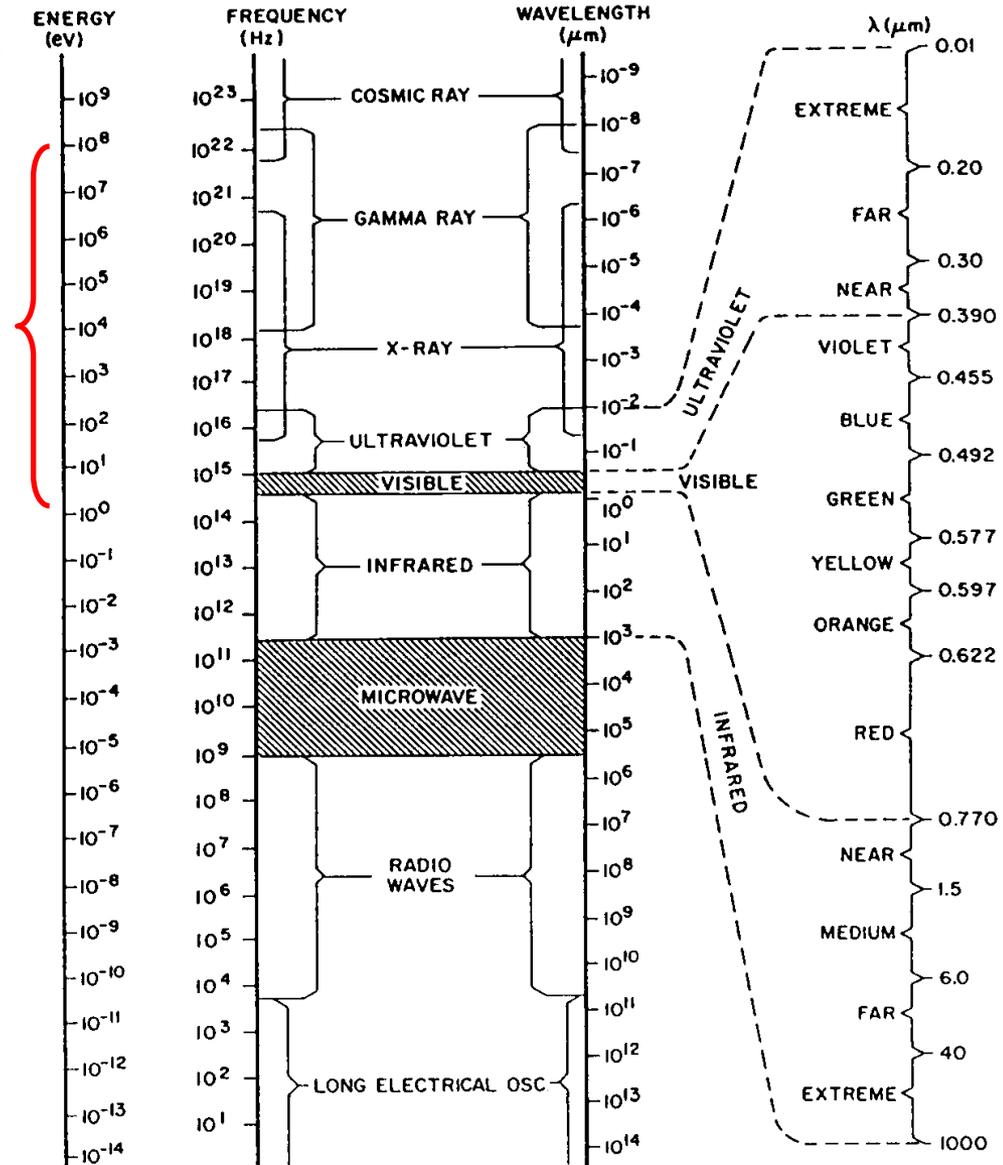
C = vitesse de la lumière

λ = longueur d'onde

Energie (eV)

↔ Fréquence (Hz)

↔ Longueur d'onde (m)

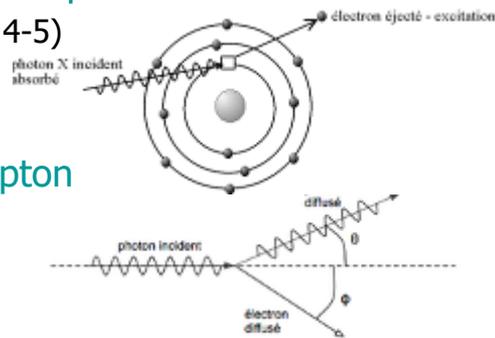


Interaction des photons avec la matière (2)

- Interaction dominante
 - effet photoélectrique
 - $\sim < 1 \text{ MeV}$
 - diffusion Compton
 - $\sim \text{MeV}$
 - création de paires e^+e^-
 - $> \text{MeV}$

- Les sections efficaces dépendent du Z du matériau

- effet photoélectrique
 - $\propto Z^n$ ($n \sim 4-5$)



Diffusion Compton: Collision d'un photon avec un électron au repos

- diffusion Compton
 - $\propto Z$

- création de paires e^+e^-
 - $\propto Z^2$

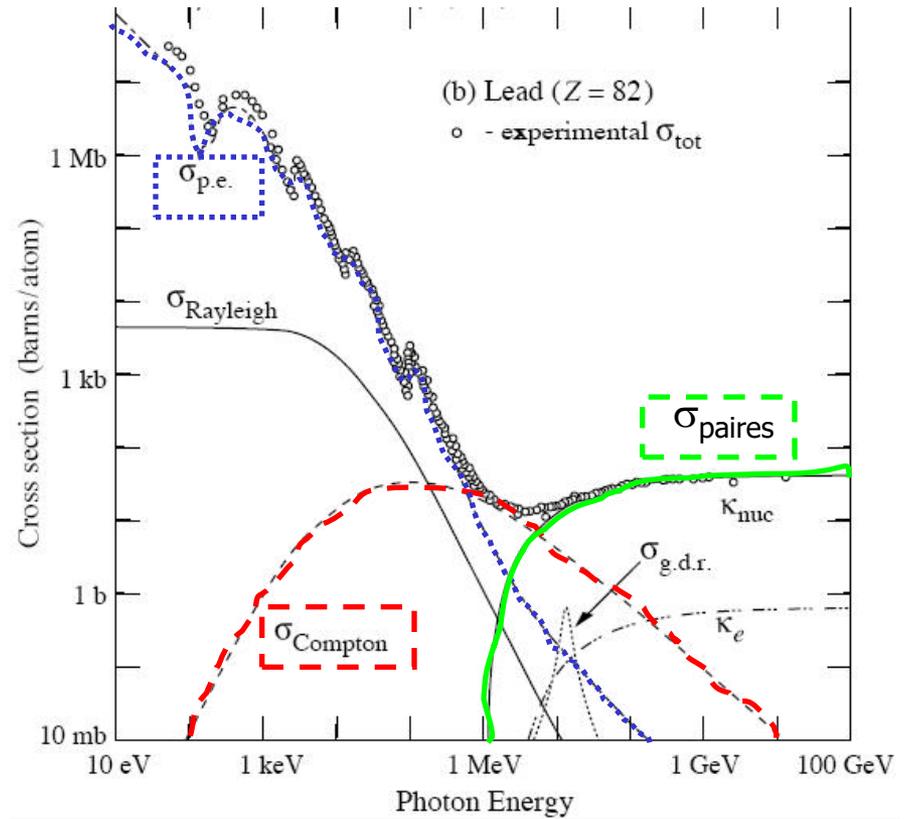
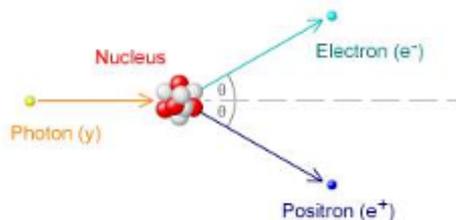


Figure 27.14: Photon total cross sections as a function of energy in carbon and lead, showing the contributions of different processes:

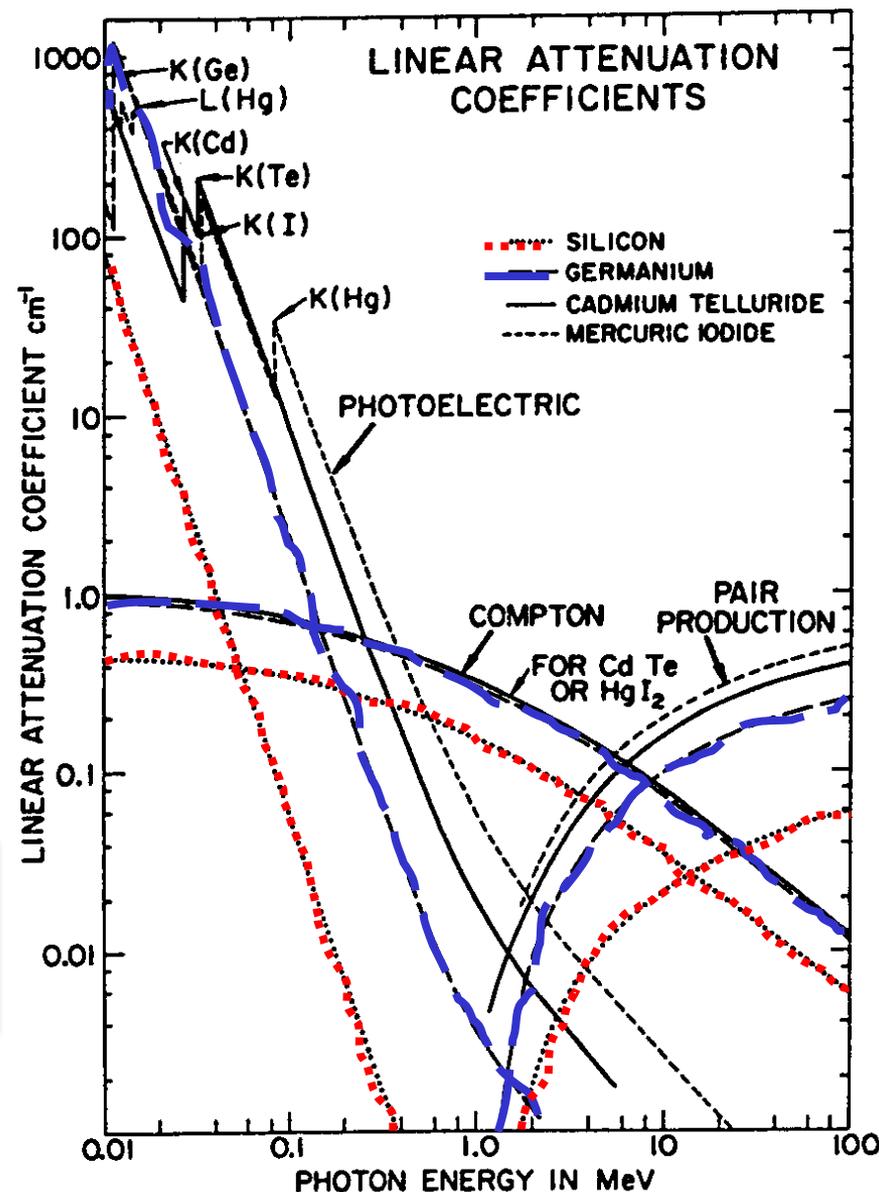
- $\sigma_{\text{p.e.}}$ = Atomic photoelectric effect (electron ejection, photon absorption)
- σ_{Rayleigh} = Rayleigh (coherent) scattering—atom neither ionized nor excited
- σ_{Compton} = Incoherent scattering (Compton scattering off an electron)
- κ_{nuc} = Pair production, nuclear field
- κ_e = Pair production, electron field
- $\sigma_{\text{g.d.r.}}$ = Photonuclear interactions, most notably the Giant Dipole Resonance [48]. In these interactions, the target nucleus is broken up.

Dépendance vis à vis du matériau

- longueur de pénétration typique dans le silicium
 - = longueur moyenne pour laquelle 90% de l'énergie est absorbée
 - photon visible (1-2 eV)
 - $\sim 0.2 \mu\text{m}$ (violet) – $60 \mu\text{m}$ (rouge)
 - X / γ (keV – MeV)
 - $\sim 2.7 \mu\text{m}$ (1keV)
 - $130 \mu\text{m}$ (10keV)
 - 2.3 cm (100keV)
 - 67 cm (1 MeV)

➤ Le détecteur doit être adapté au type de photon et au flux que l'on cherche à mesurer.

- épaisseur active, fenêtre d'entrée, gamme dynamique, etc.



Linear attenuation coefficient in silicon, germanium, cadmium telluride and mercuric iodide

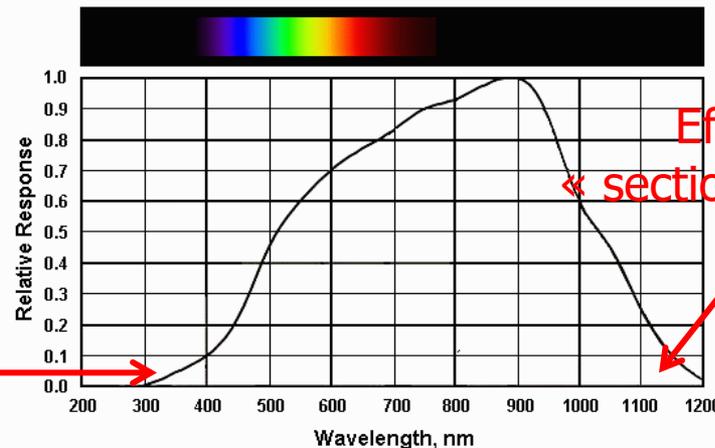
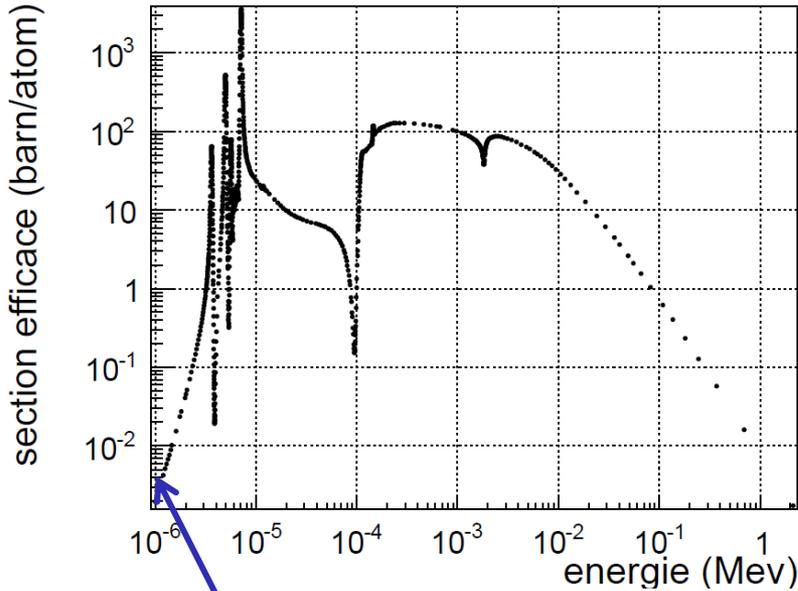
Interaction des photons avec la matière (3): dans le visible

Section efficace d'interaction photon dans le silicium vs Energie du photon

1 eV \Rightarrow 1240 nm
 2 eV \Rightarrow 620 nm
 3 eV \Rightarrow 400 nm

Photon Absorption Depth	
Wavelength (Nanometers)	Penetration Depth (Microns)
400	0.19
450	1.0
500	2.3
550	3.3
600	5.0
650	7.6
700	8.5
750	16
800	23
850	46
900	62
950	150
1000	470
1050	1500
1100	7600

Table 1



Effet de « Fenêtre d'entrée »

visible

Efficacité quantique

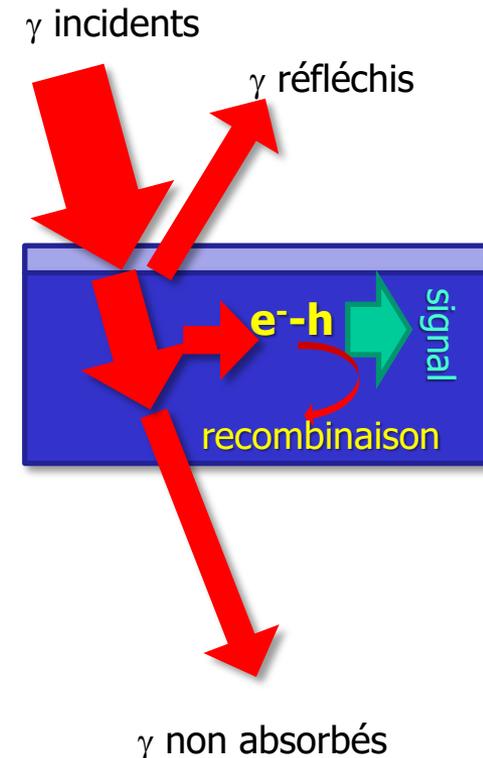
The quantum efficiency can therefore be written as

$$\eta = (1 - \mathcal{R})\zeta[1 - \exp(-\alpha d)],$$

(17.1-1)
Quantum Efficiency

where \mathcal{R} is the optical power reflectance at the surface, ζ the fraction of electron-hole pairs that contribute successfully to the detector current, α the absorption coefficient of the material (cm^{-1}) discussed in Sec. 15.2B, and d the photodetector depth. Equation (17.1-1) is a product of three factors:

- The first factor $(1 - \mathcal{R})$ represents the effect of reflection at the surface of the device. Reflection can be reduced by the use of antireflection coatings.
- The second factor ζ is the fraction of electron-hole pairs that successfully avoid recombination at the material surface and contribute to the useful photocurrent. Surface recombination can be reduced by careful material growth.
- The third factor, $\int_0^d e^{-\alpha x} dx / \int_0^\infty e^{-\alpha x} dx = [1 - \exp(-\alpha d)]$, represents the fraction of the photon flux absorbed in the bulk of the material. The device should have a sufficiently large value of d to maximize this factor.



Efficacité quantique = pourcentage de photon détectables

Particules chargées

- Particules chargées
 - μ^\pm , K^\pm , π^\pm , protons, α , etc.
 - Echelle typique d'énergie en physique des particules
 - $\sim 0.1 - 100$ GeV

➤ Formule Bethe-Bloch

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{n z^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)}\right) - \beta^2 \right]$$

$$\beta = v/c$$

v vitesse de la particule

E énergie de la particule

x longueur du chemin

c vitesse de la lumière

z charge de la particule

e charge élémentaire

m_e masse au repos de l'électron

n densité numérique des électrons du matériau

I potentiel d'excitation moyen du matériau

ϵ_0 vacuum permittivity

Here, the electron density of the material can be calculated by $n = \frac{N_A \cdot Z \cdot \rho}{A \cdot M_u}$, where ρ is the density of the material, Z , A its atomic number and mass number, respectively, N_A the Avogadro number and M_u the Molar mass constant.

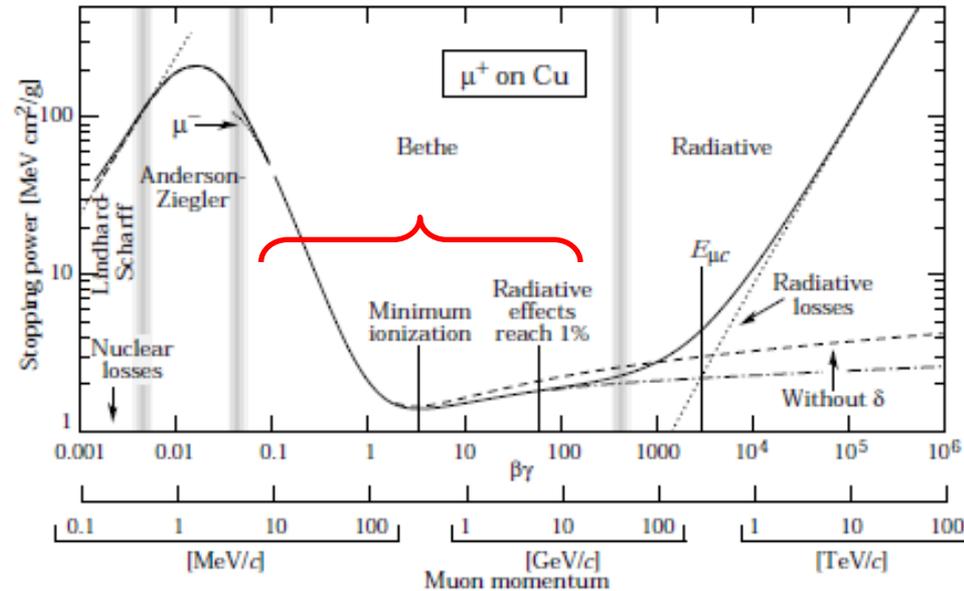


Fig. 27.1: Stopping power ($= \langle -dE/dx \rangle$) for positive muons in copper as a function of $\beta\gamma = p/M_e$ over nine orders of magnitude in momentum (12 orders of magnitude in kinetic energy). Solid curves indicate the total stopping power. Data below the break at $\beta\gamma \approx 0.1$ are taken from ICRU 49 [4], and data at higher energies are from Ref. 5. Vertical bands indicate boundaries between different approximations discussed in the text. The short dotted lines labeled " μ^- " illustrate the "Barkas effect," the dependence of stopping power on projectile charge at very low energies [6].

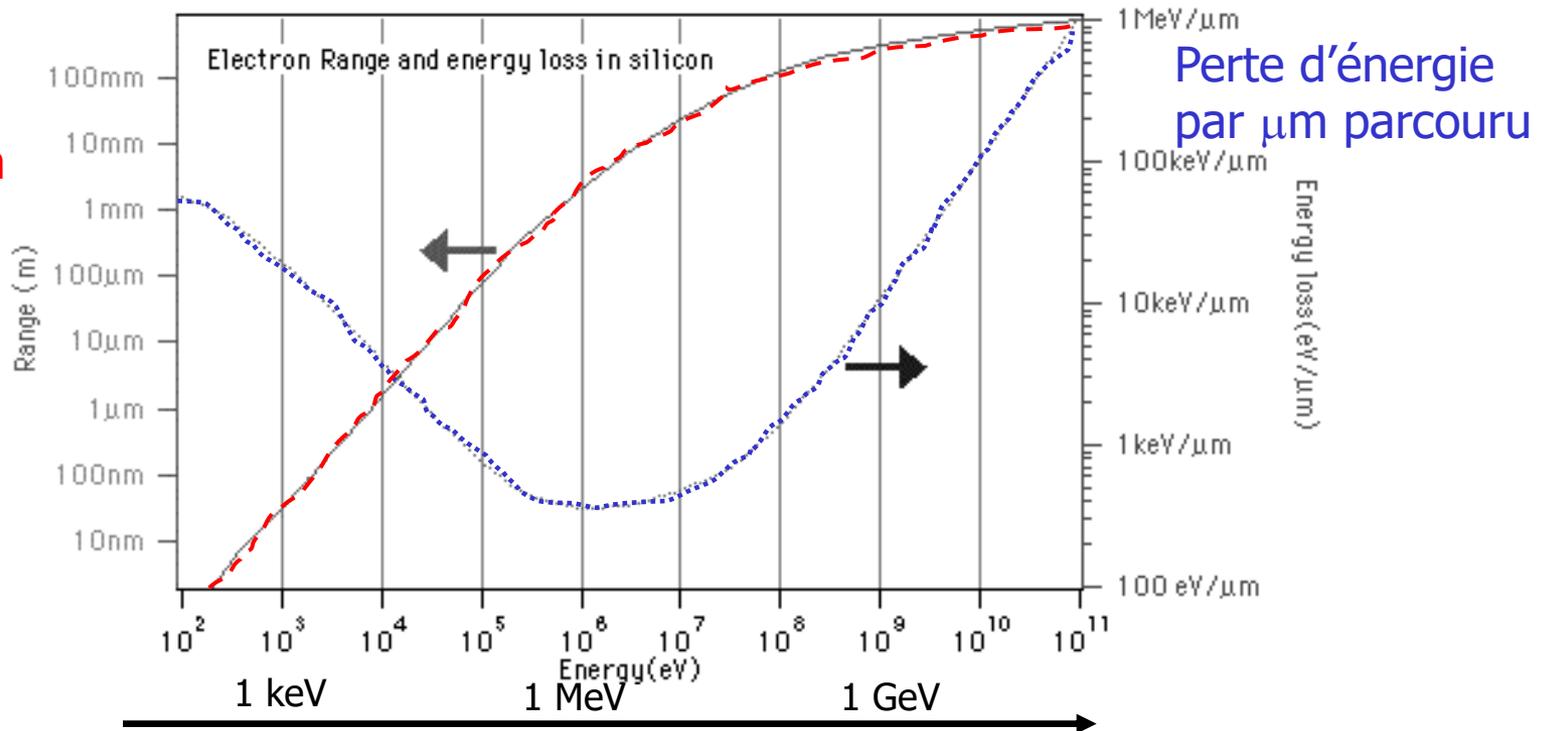
• électrons: beaucoup plus légers

- ✓ bremsstrahlung (rayonnement de freinage)
 - = perte d'énergie supplémentaire

dE/dx évolue peu dans la gamme d'énergie de la physique des particules

Pénétration des électrons dans le Silicium

distance
de pénétration
des électrons



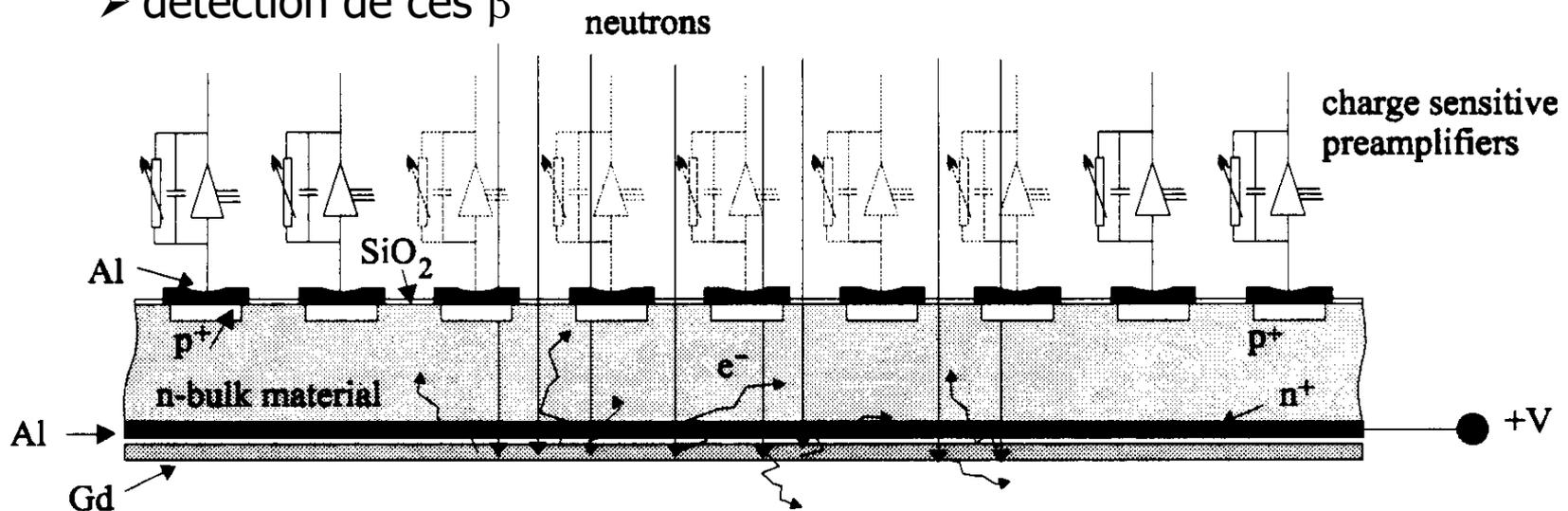
- Applications:
 - Imagerie β
 - Calorimétrie

L'énergie de l'e- incident détermine

- la fenêtre d'entrée
- le dépôt d'énergie par unité de longueur

Neutrons

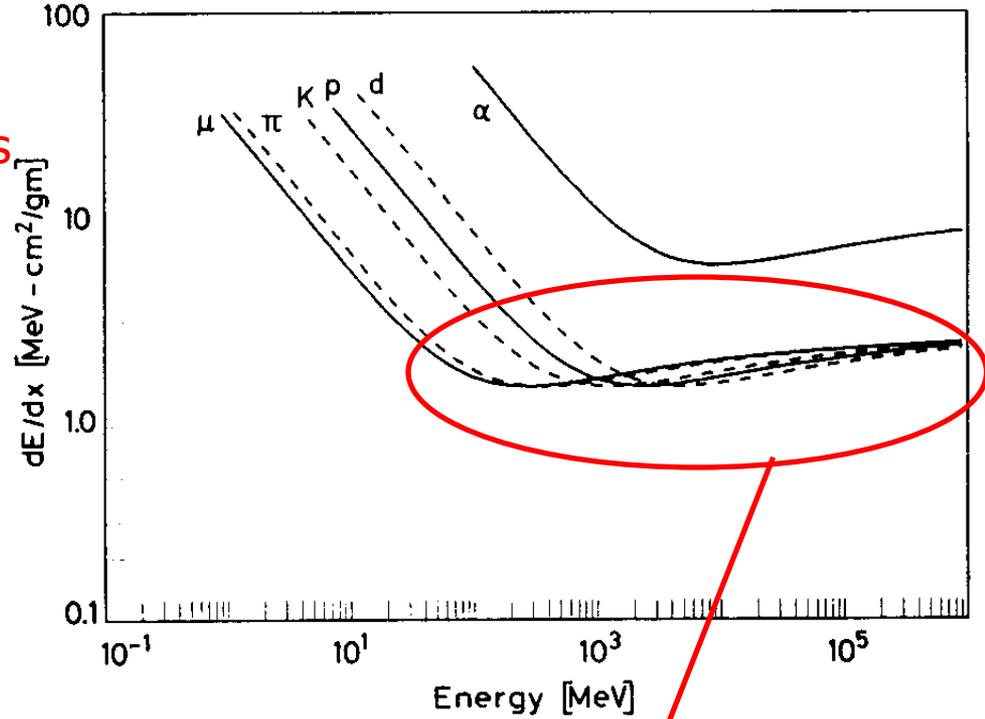
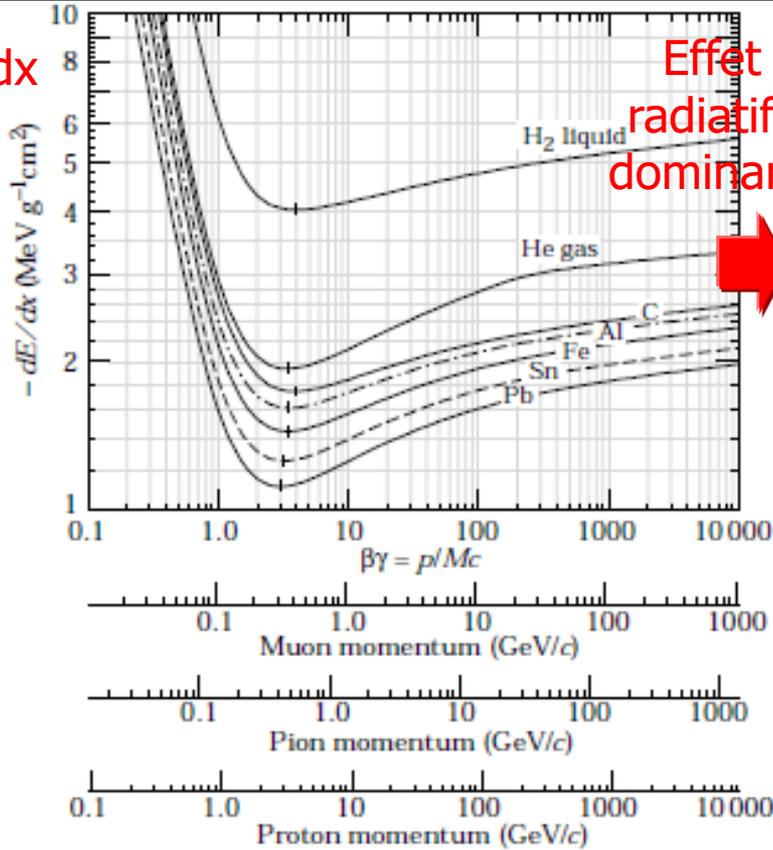
- Mesure de radioactivité, physique nucléaire
 - pas d'interaction électromagnétique
 - capture des neutrons lents (avec Bore)
 - $B + n \rightarrow Li + \alpha + 2.792 \text{ MeV}$
 - détection des α
 - réaction de capture (gadolinium, vanadium, rhodium...)
 - création d'isotopes radioactifs β
 - détection de ces β



Détection des neutrons nécessairement indirecte

Particules au Minimum d'Ionisation (MIP): $m \gg m_{e^-}$

dE/dx



- Bethe Bloch
- Diffusion inélastique
- Minimum @ $\beta\gamma = p/Mc \sim 3.5$
- $\propto Z$ absorber
- $\propto z^2$ particule incidente
- $E_{loss} \sim dE/dx \times \text{épaisseur} \times \text{densité}$

dE/dx

\sim constant et

\sim équivalent pour toutes les particules chargées dans cette région (~ 0.1 GeV – 1000 GeV)

\Rightarrow Particule au minimum d'ionisation (M.I.P. = Minimum Ionizing Particle)

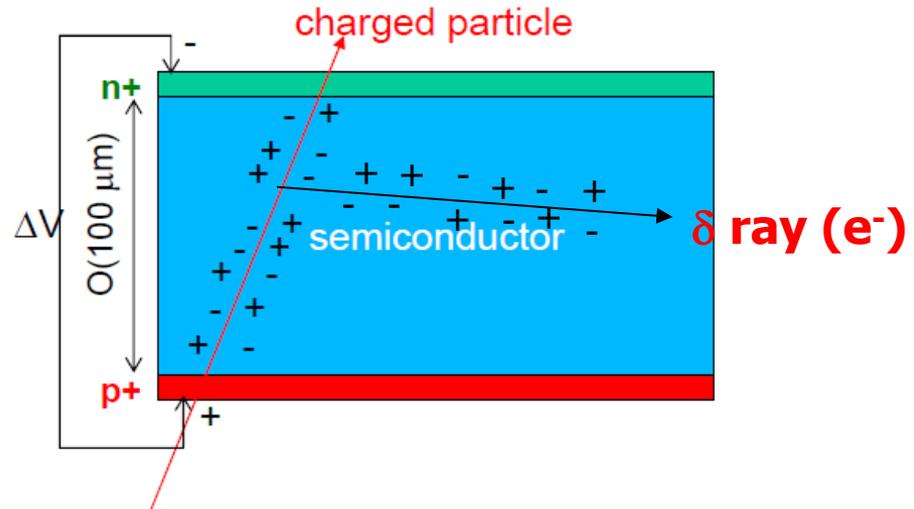
M.I.P. dans un semi-conducteur: cas du Silicium

- Energie d'ionisation:
 - 3.6 eV en moyenne pour une ionisation (paire e- - ion)
 - nombre de paire créées par μm parcouru ~ 80 paire/ μm (valeur la plus probable)
 - Exemple 1: strips, pixels hybrides:
 - ~ 300 μm d'épaisseur de couche active
 - Charge créée: $300 \mu\text{m} \times 80 \sim 24\,000$ e/h.
 - Charge équivalente ($\times 1.6 \times 10^{-19}$) $\sim 4 \times 10^{-15}$ C ~ 4 fC !
 - énergie déposée dans la couche active: $3.6 \times 80 \times 300 \sim 85$ keV
 - Exemple 2: pixels monolithiques actifs (MAPS):
 - ~ 10 μm d'épaisseur de couche active
 - Charge créée: $10 \mu\text{m} \times 80 \sim 800$ e/h. (~ 0.1 fC !)
 - énergie déposée dans la couche active: $3.6 \times 80 \times 10 \sim 2.9$ keV
- La charge créée initiale est très faible.
- Energie déposée dans la couche active \neq Energie totale perdue par la particule incidente
 - (tenir compte des matériaux non actifs pour calculer l'énergie perdue)

Rayons delta (delta rays)

- ionisation dans le milieu

- Parfois un électron provenant de la ionisation peut lui même avoir une impulsion significative
 - phénomène rare mais qui peut être observé si on a beaucoup d'événements
- Dans ce cas il peut ioniser lui même le milieu sur une distance $O(1-100 \mu\text{m})$
- Valeurs typiques:
 - 1 MeV électron \Rightarrow 1.7 mm de parcours dans le silicium.
 - 100 keV \Rightarrow 60 μm de parcours dans le silicium
 - 10 keV \Rightarrow 1 μm



- conséquence

- la charge totale créée est augmentée (meilleur signal !)
- la charge est plus étalée dans une direction aléatoire et sera collectée par plus de pixels/strips/voies de lectures
 - peut dégrader la résolution

Les électrons secondaires δ peuvent ioniser à leur tour et faire fluctuer le signal moyen

Distribution de Landau

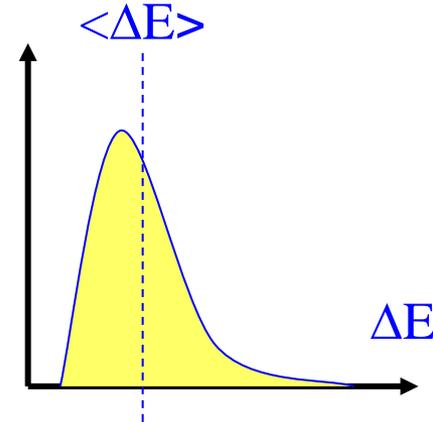
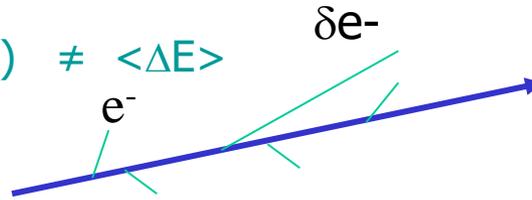
- Détecteur réel

- On mesure une énergie déposée ΔE dans une épaisseur finie δx
 - $\neq \langle dE/dx \rangle$
- Couches minces: certaines collisions avec une grande énergie transférée
 - Grandes fluctuations de l'énergie déposée

- Couches minces

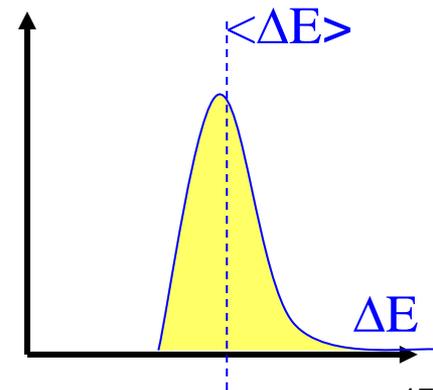
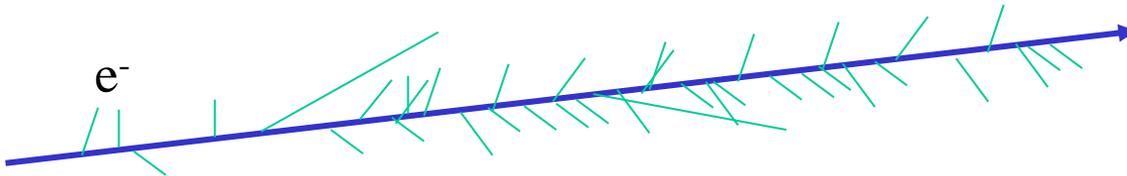
- Valeur la plus probable (MPV): $\Delta E(\text{MPV}) \neq \langle \Delta E \rangle$
 - distributions de Landau

Exemple: 300 μm : $\Delta E(\text{MPV}) \sim 82 \text{ keV} \neq \langle \Delta E \rangle \sim 115 \text{ keV}$



- Couches épaisses / matériaux denses

- Nombre plus élevé de collisions
- Théorème central limite \Rightarrow distribution gaussiennes



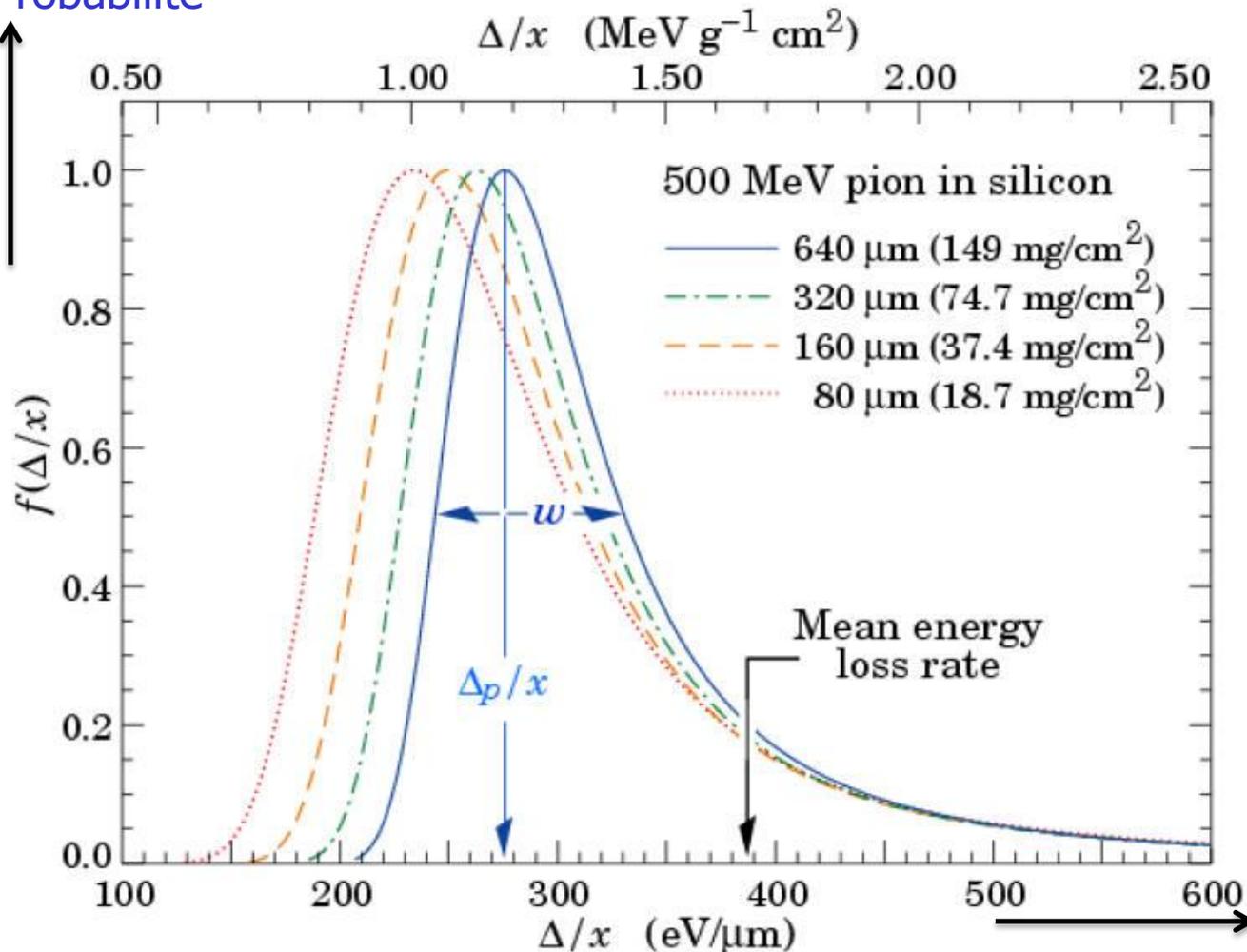
Fluctuations quantiques = grande variations de l'énergie déposée

Distribution de Landau

- Plus le matériau est épais plus $\langle \text{mean} \rangle$ proche de MPV

Distribution d'énergie déposée par micron pour différentes épaisseurs

Probabilité



Plus c'est épais,
plus les fluctuations
de dépôt d'énergie
sont symétriques

Énergie déposée
par longueur traversée

La diffusion multiple (Multiple Coulomb Scattering)

Diffusion angulaire des particules chargées

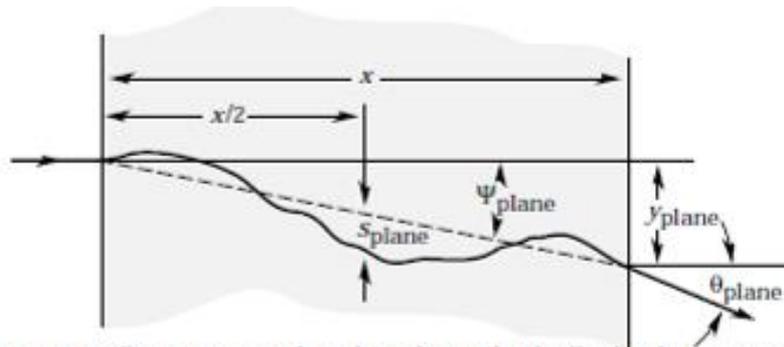


Figure 27.9: Quantities used to describe multiple Coulomb scattering. The particle is incident in the plane of the figure.

Profondeur traversée

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \left(\frac{x}{X_0} \right) \right]$$

$X_0 \equiv$ radiation length

impulsion

Nature du matériau

Here p , βc , and z are the momentum, velocity, and charge number of the incident particle, and x/X_0 is the thickness of the scattering medium in radiation lengths

$$10^{-3} < x/\bar{X}_0 < 100.$$

Faible impulsion et grande quantité de matière traversée = particules déviées !

Interaction particules-matière: Résumé

- Effet principal dans les S.C.
 - Ionisation
 - Création de porteurs libres qui peuvent
 - Devenir un courant mesurable s'ils se déplacent
 - Tenir compte de la nature de la particule incidente
 - Visible/UV \Rightarrow une seule paire e-h
 - X: dépôt localisé, \Rightarrow quelques 1000s e-h
 - Alphas: dE/dx plus élevé
 - Neutrons: conversion nécessaire
 - Haute énergie \Rightarrow MIP: dE/dx homogène sur une large plage d'énergie \Rightarrow 80 e-h / μm
 - Beta: proche des MIPs + radiations + diffusion multiple
 - Tenir compte du devenir de la particule incidente
 - Est-elle stoppée ?
 - A-t-elle perdue une partie significative de son énergie ?
 - Est-elle déviée ?
 - Interactions secondaires (delta rays)
 - Charge (ou courant) créée
 - Comment mesurer ce signal ?

... Il reste du chemin jusqu'au signal

Principes de base de fonctionnement

Le signal mesuré

Transport des charges

Notion de Signal / Bruit

Notions d'amas sur les détecteurs segmentés.



Retour sur le principe de base: exemple des détecteurs à bandes (Strip detector)

• Jonction P-N

- Segmentation (résolution)
- Polarisation inverse
 - Zone dépletée \Rightarrow champ E
 - Désertion des porteurs libres
- Passage d'une particule chargée
 - Dépôt de charge le long de la trajectoire pour les MIP
- Dérive des porteurs de charge
 - transport en fonction des propriétés du milieu

• Autres paramètres:

- Recombinaison
- Diffusion

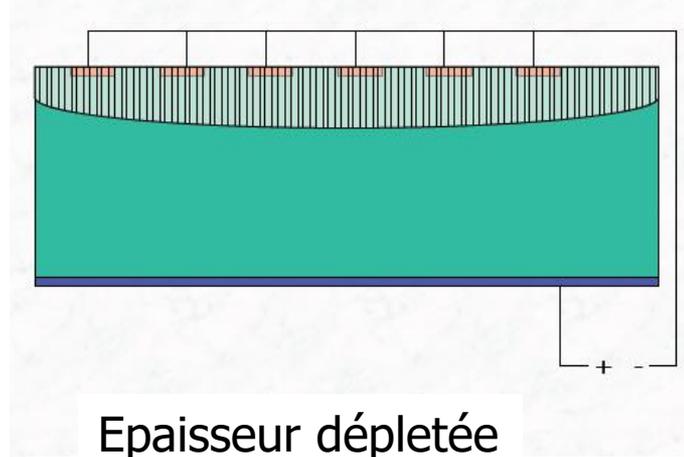
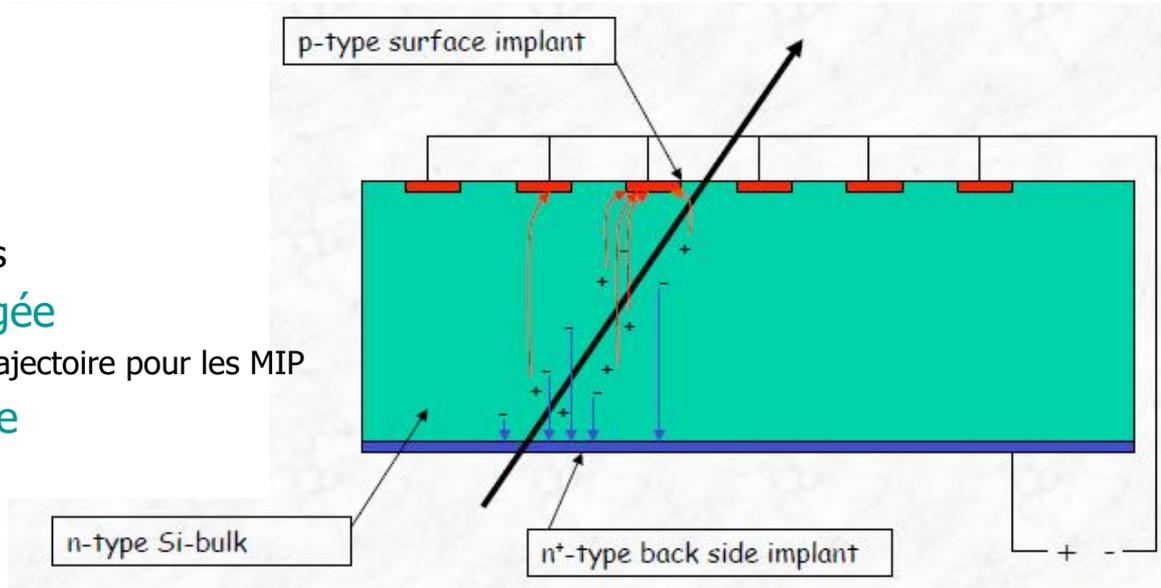
• Signal

- Doit-on collecter physiquement la charge ?
 - NON !
- Courant induit par le mouvement des porteurs de charge
 - Théorème de Ramo:

$$I = q v E$$

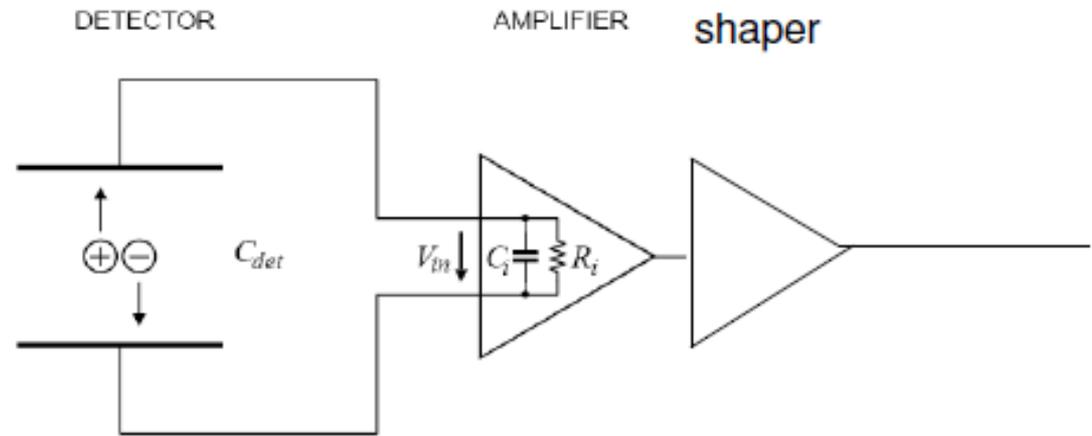
I = courant induit
q = charge de la particule
v = mobilité
E = champs électrique

Le déplacement
des charges
induit un courant

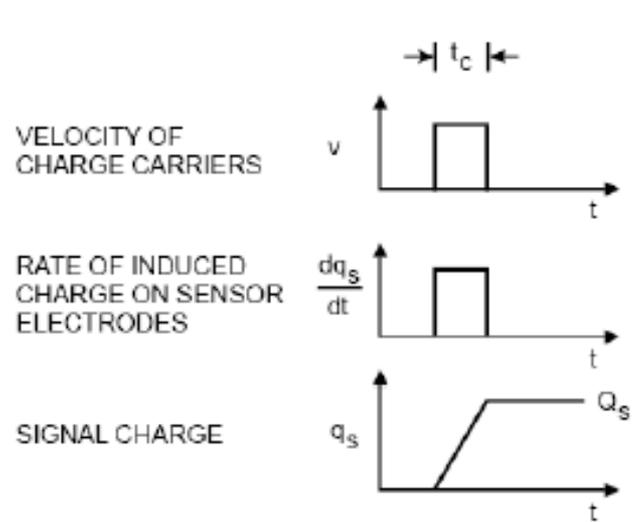


$$W \approx \left[\frac{2\epsilon_r\epsilon_0}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) (V_{bi} - V) \right]^{\frac{1}{2}}$$

Modélisation simplifiée d'un détecteur



Often charge sensitive amplifier: Integration of current to measure total charge



If $\tau_{\text{readout}} \ll R_i \cdot (C_{\text{Det}} + C_i)$
 peak voltage at amplifier input :

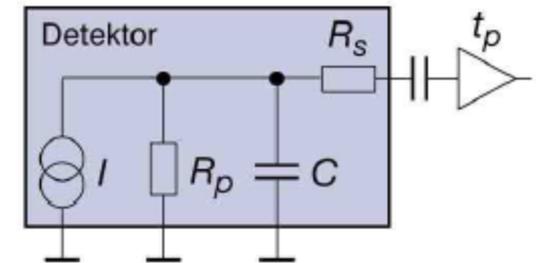
$$V_{in} = \frac{Q_S}{C} = \frac{\int i_s dt}{C} = \frac{Q_S}{C_{\text{Det}} + C_i}$$

Voltage depends on total capacitance at input!

➤ Intégration du courant
 \propto charge déposée

Sources de bruit

- En l'absence de signal, il existe toujours un bruit résiduel
 - Le bruit = fluctuation de la « charge » collectée en l'absence de signal
 - Exprimée en ENC (Equivalent Noise Charge $\Rightarrow e^-$)
 - Typiquement de qqs e^- à qqs 1000s e^-
 - Généralement gaussien ?
 - Pas toujours...
- Le Bruit peut dépendre de nombreux paramètres:
 - Irradiation
 - Vitesse de lecture
 - noise contribution from reverse current less significant
 - Courant de fuite $ENC_I \propto \sqrt{I}$
 - Bruit thermique $ENC_R \propto \sqrt{k_B T / R}$
 - Bruit capacitif
 - capacitance plus faible \Rightarrow bruit plus faible $ENC_c \propto C_d$



Alternate circuit diagram of a silicon detector.

- Le bruit s'ajoute en quadrature

$$ENC = \sqrt{ENC_C^2 + ENC_I^2 + ENC_{R_p}^2 + ENC_{R_s}^2}$$

➢ **Préamplifier le signal le plus tôt possible dans la chaîne de lecture**

Rapport Signal à Bruit (S/N)

- Sélection des événements

- Le rapport Signal à Bruit

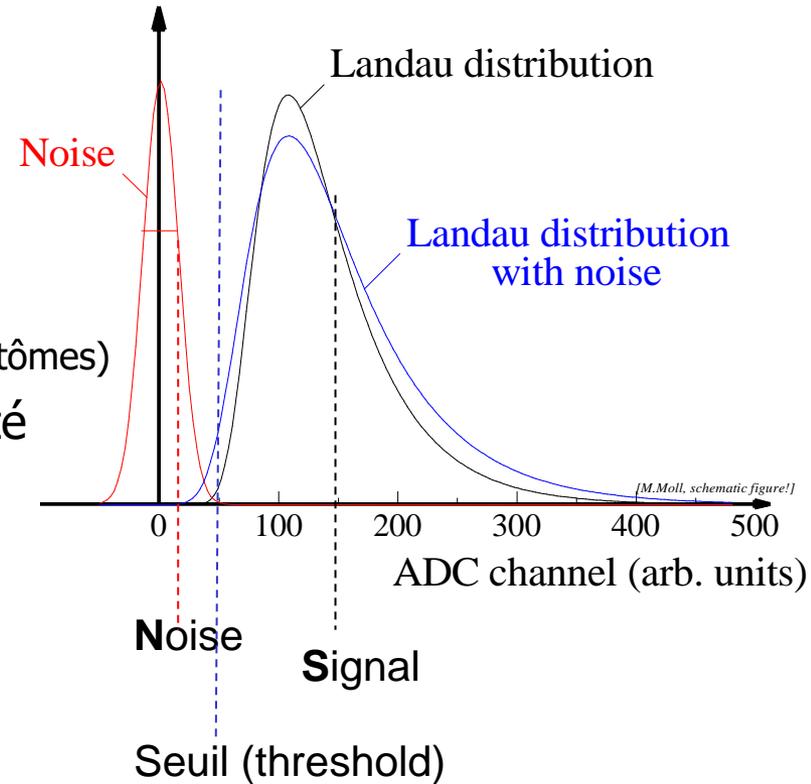
- Figure de mérite principale

- Coupure sur le rapport Signal à Bruit

- Coupure trop faible \Rightarrow Fakes (impacts fantômes)
- Coupure trop élevée \Rightarrow Perte d'efficacité
- Valeurs typiques de sélection: 5-15

- Partie non gaussienne du bruit

- Augmente le taux de fakes



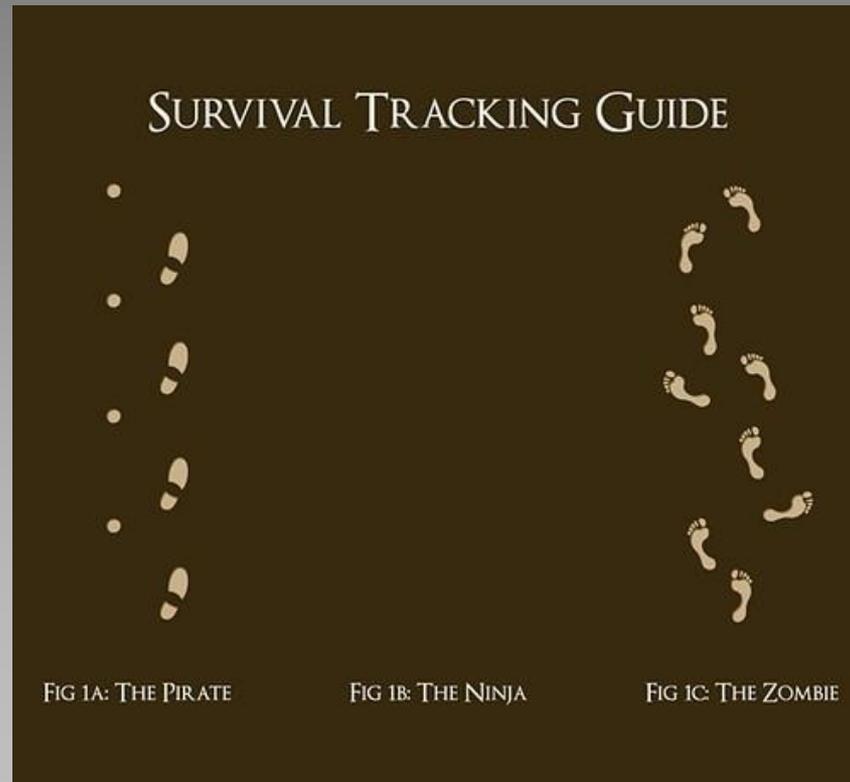
- Toute détérioration de S/N peut se traduire par une perte d'efficacité et/ou une augmentation des impacts fantômes

- Efficacité, tenue aux radiations, résolution spatiale.

➤ On veut S/N le plus grand possible

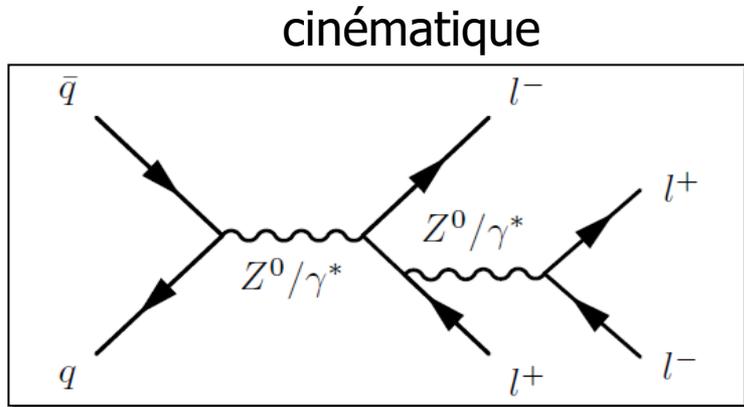
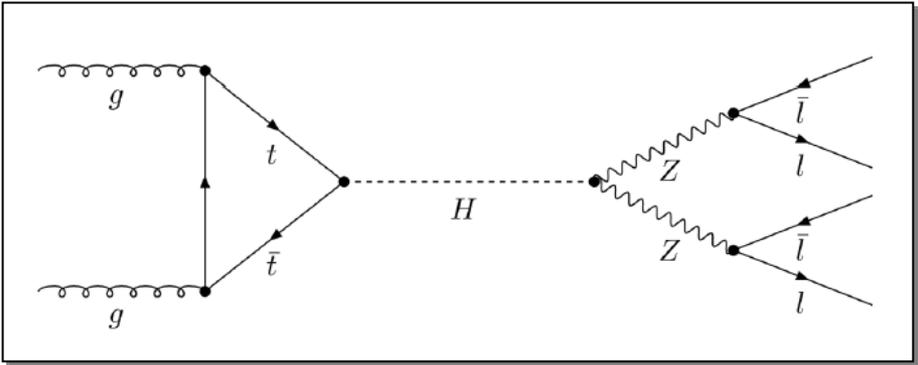
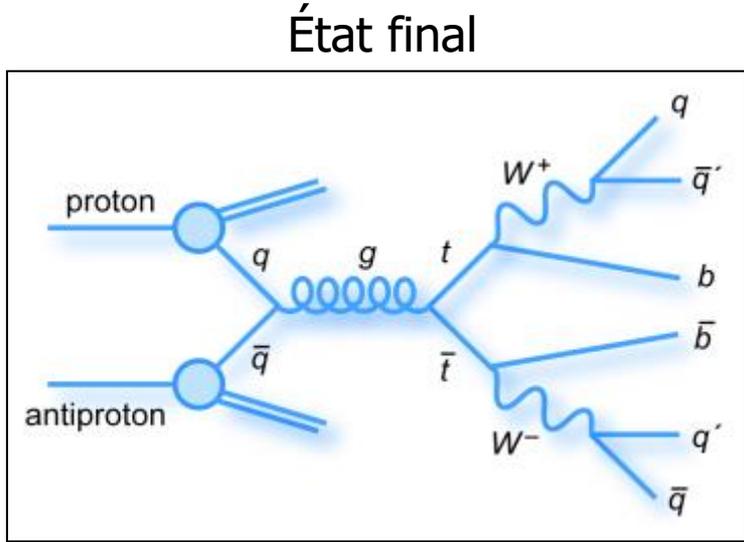
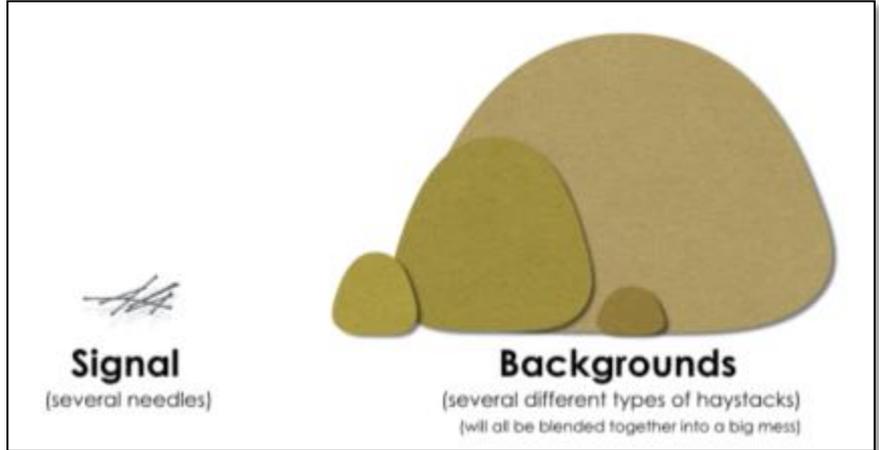
Trajectographie, vertexing (voir cours L. Chevalier)

Détermination de l'impulsion d'une particule
Détermination des vertex

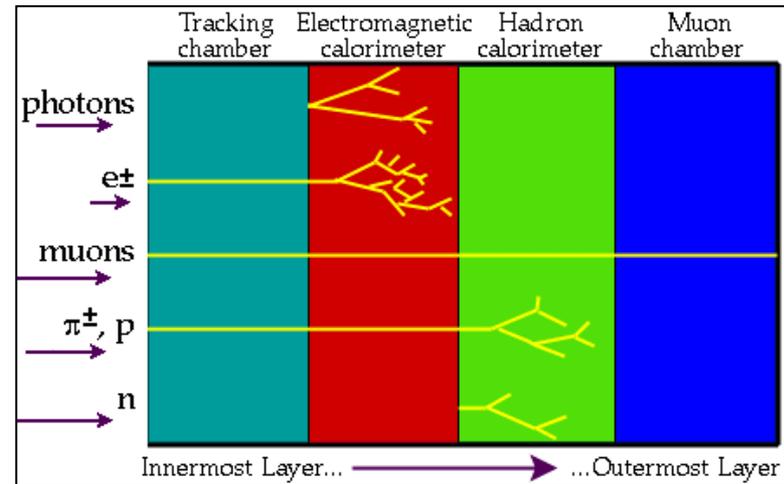
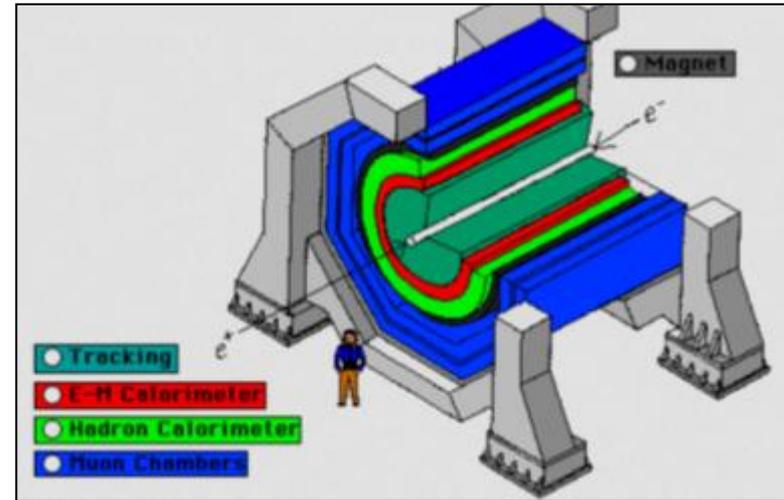
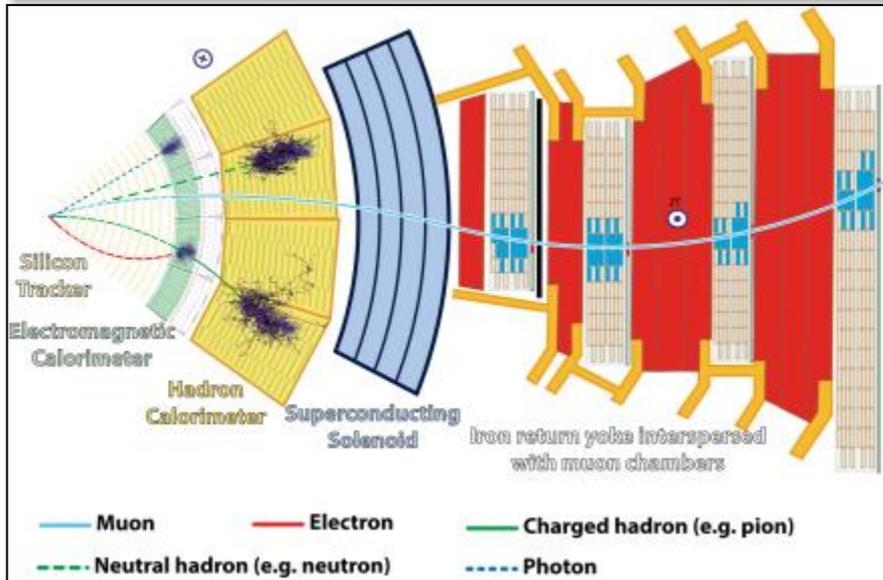
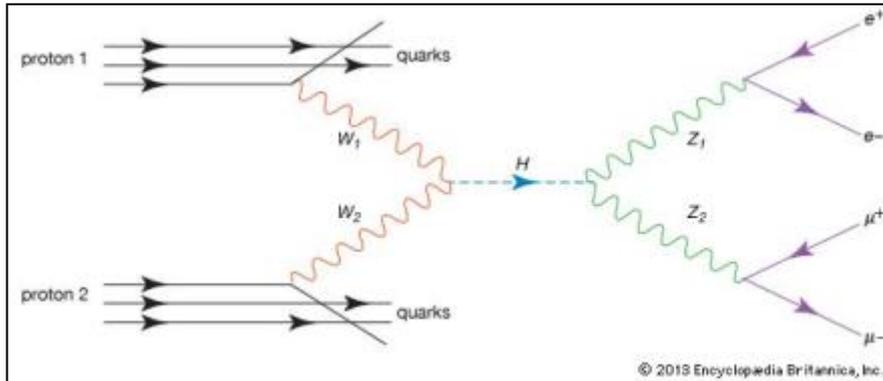


Physique des particules

- Tout est affaire de signal et de bruit de fond



Détecteurs en physique des particules



Idéalement on veut connaître :

- Identifier toutes les particules
- Reconstruire les vertex et les filiations
- 4-vecteurs (E, p_x, p_y, p_z) de toutes les particules

Trajectographie et détermination de l'impulsion

Lorentz Force: $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$

Centripetal force: $F = \frac{m \cdot v^2}{R}$

$p_t = qBR = 0.3 B R = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$

(p in GeV/c; B in Tesla; Radius in m)

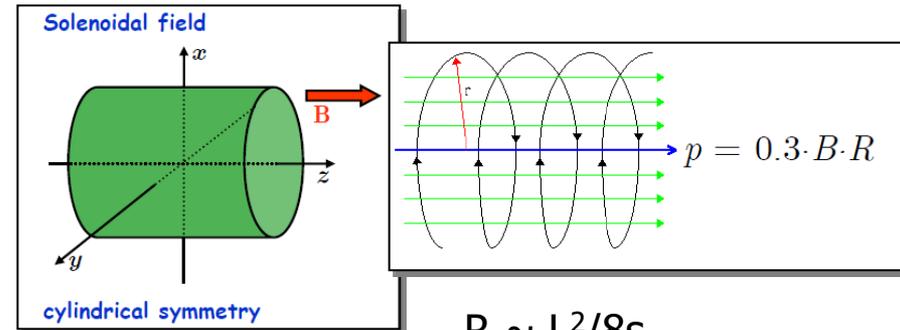
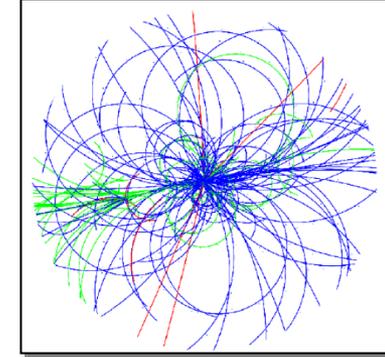
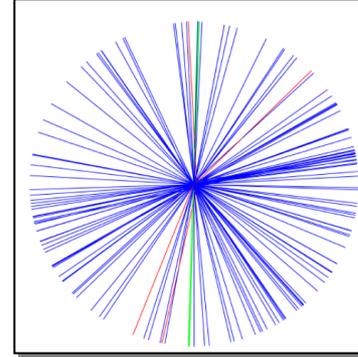
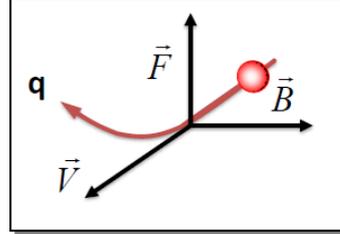
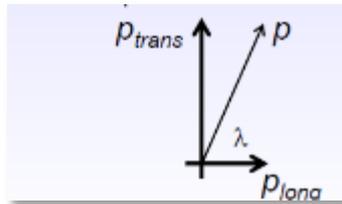
- p_t = transverse momentum
 - p component \perp to B field (\perp to beam axis)

$p = \frac{p_t}{\sin \lambda}$

- p_l = longitudinal momentum
 - p component \parallel to B field (\parallel to beam)

$p_z = p_l$

- λ = dip angle

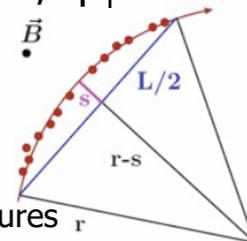


$R \sim L^2/8s$

$s = 0.3 B L^2 / 8p_T$

- Résolution sur l'impulsion:

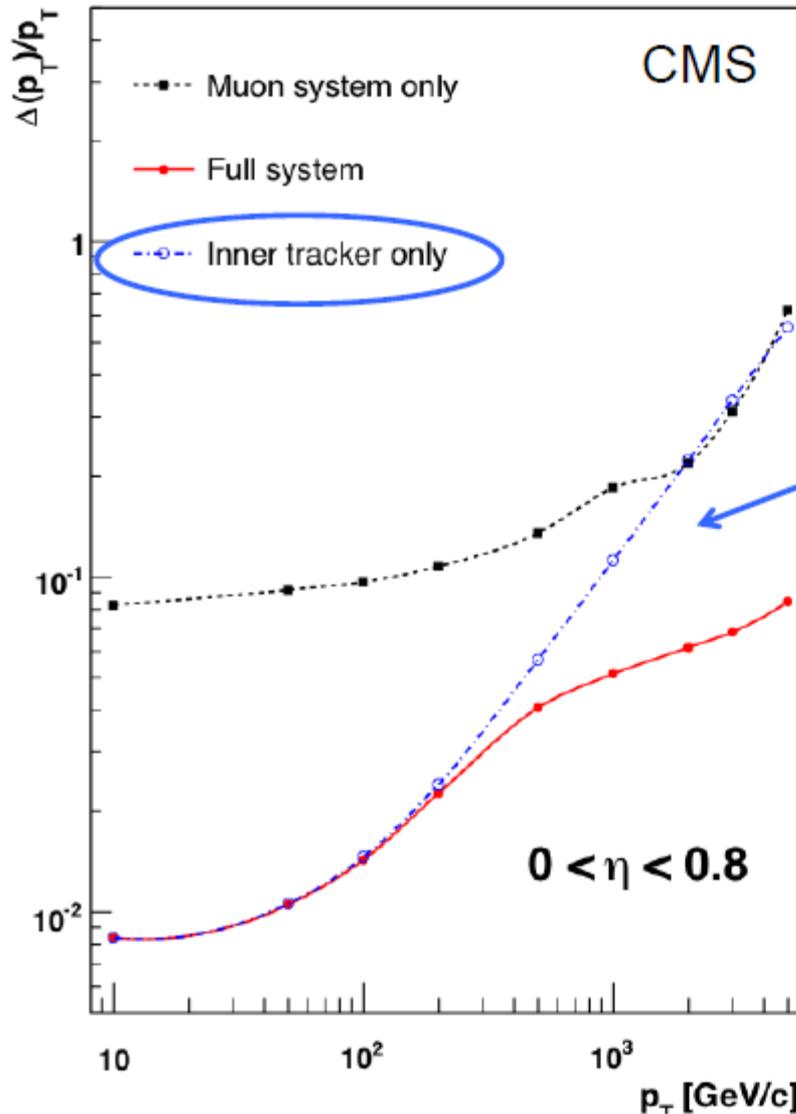
- Champ magnétique B
- L (bras de levier)
- nombre de points de mesures
- résolution spatiale de ces points de mesures



$\frac{\sigma_{pT}}{pT} = \frac{\sigma_s}{s} = \sqrt{\frac{720}{n+4}} \frac{\sigma_y pT}{0.3BL^2}$

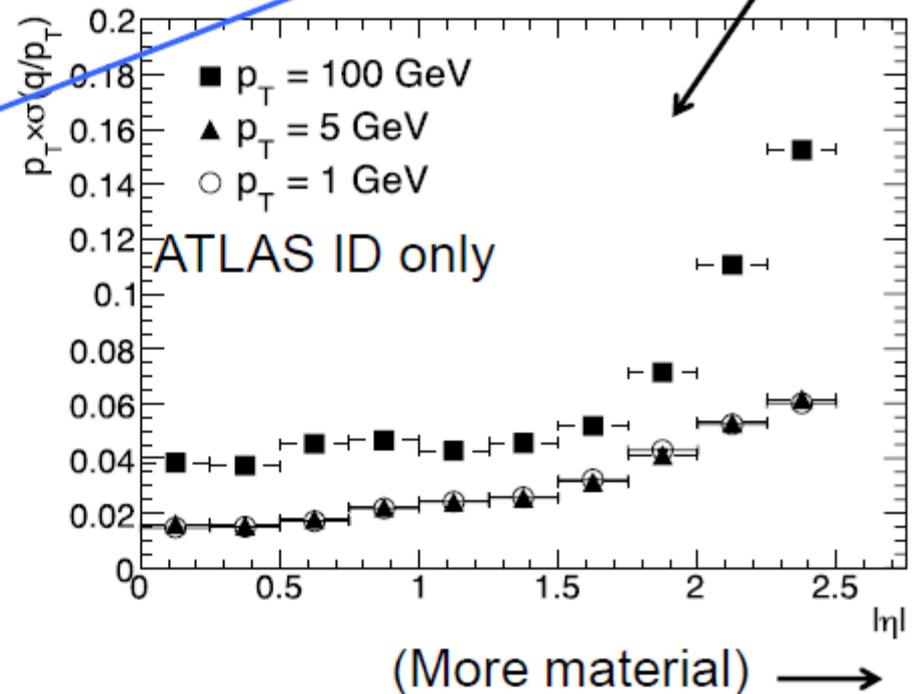
Nombre et précisions des points de mesures impactent directement la précision sur l'impulsion

Momentum resolution



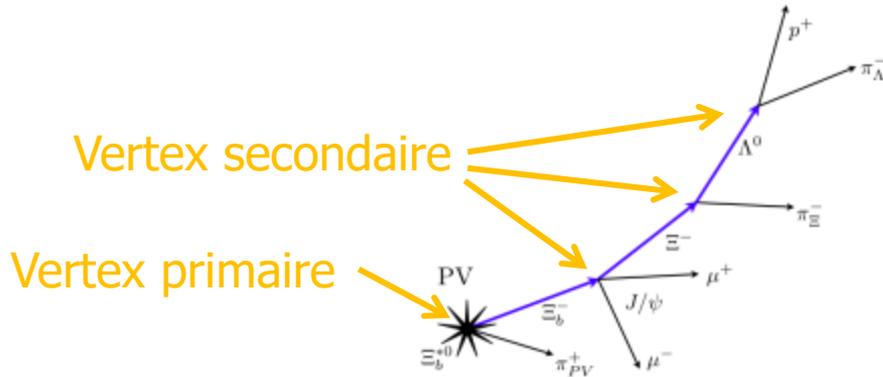
Expected relative p_T resolution for muons vs $|\eta|$ and p_T .

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \approx a \cdot p_T \oplus \frac{b}{\sin^{1/2} \theta}$$



Qu'est-ce que le "vertexing" ?

- Reconstruire les lieux des vertex

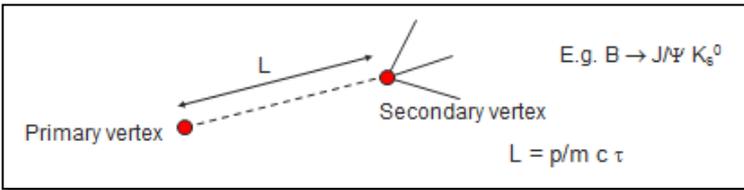


- Particules de saveur (b/c/ τ)
 - Besoin de les identifier dans de nombreuses analyses
 - Particules instables avec « long » temps de vie
 - Les distances de vols déterminent la résolution typique nécessaire

$$\langle d \rangle = \beta \cdot \gamma \cdot c \cdot \tau$$

$$\beta = v/c$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$



Stable particles	$\tau > 10^{-6}$ s	$c\tau$
n		2.66km
μ		658m
Very long lived particles $\tau > 10^{-10}$ s		
π, K^\pm, K_L^0	2.6×10^{-8}	7.8m
K_S^0, E^\pm, Δ^0	2.6×10^{-10}	7.9cm
Long lived particles $\tau > 10^{-13}$ s		
τ^\pm	0.3×10^{-12}	91 μ m + charm (D)
B_d^0, B_s^0, Δ_b	1.2×10^{-12}	350 μ m
Short lived particles		
π^0, η^0	8.4×10^{-17}	0.025 μ m
ρ, ω	4×10^{-23}	10 ⁻⁹ μ m!!

Jets contenant des quarks b et c & leptons tau :
 $\Rightarrow \langle d \rangle \sim O(10-100s \mu m)$

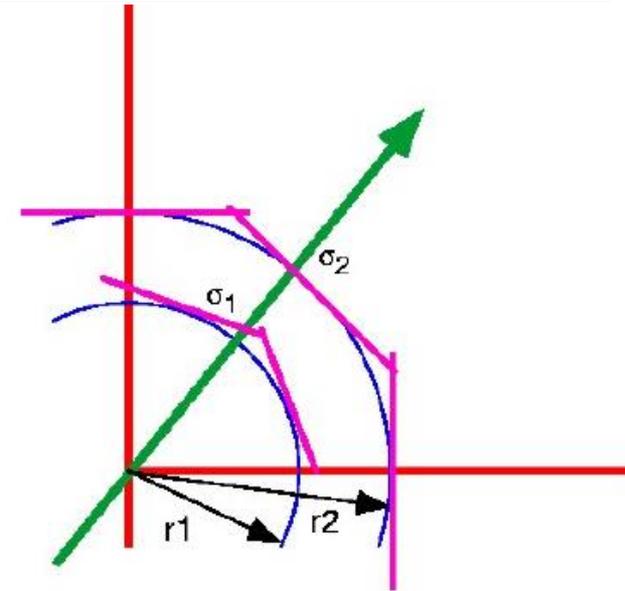
\Rightarrow Résolution nécessaire sur les vertex (paramètre d'impact): $\sim O(10-100 \mu m)$

Résolution d'un détecteur de vertex

- Modélisation simple (sans diffusion multiple)

- Résolution sur le paramètre d'impact

$$\sigma_{d_0}^2 = \frac{r_2^2 \sigma_1^2 + r_1^2 \sigma_2^2}{(r_2 - r_1)^2}$$



- Il faut

- Minimiser r_1
- Maximiser r_2
- Minimiser $\sigma_1 \sigma_2$

- Mais également:

- Nombre de points de mesure
- Budget de matière (y compris le tube à vide)
- Alignement et stabilité
- Efficacité de détection: $\sim 100\%$
- Lecture rapide pour éviter l'empilement

Terme de diffusion multiple

$$\sigma_{ip}^2 = a^2 + \left(\frac{b}{p}\right)^2 + c^2$$

Terme d'alignement

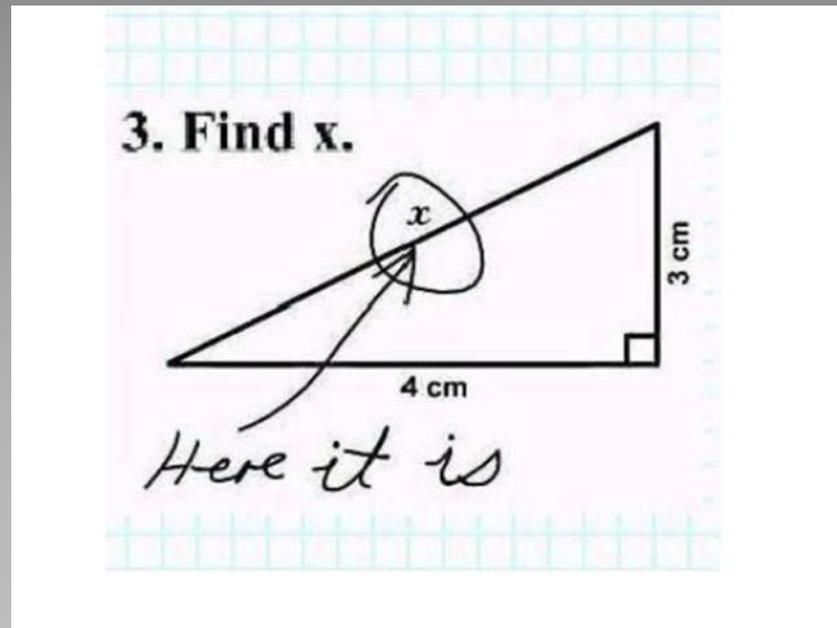
Voir exercices

Résolution spatiale

Digitale

Centre de gravité

Techniques avancées (fonctions eta)

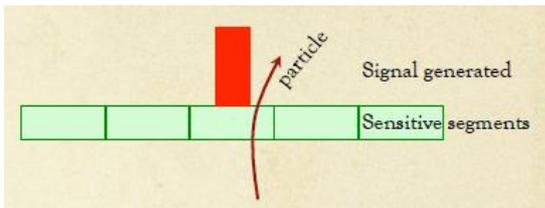


Résolution spatiale d'un détecteur

Le pas (pitch) p détermine la résolution

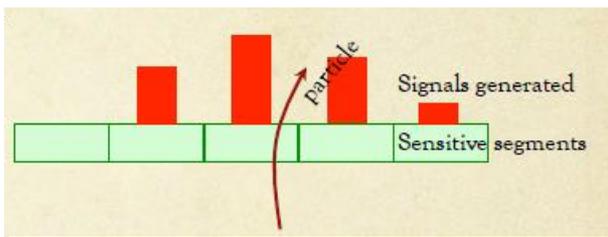
- La sortie peut être binaire (0-1) / numérique (N bits ADC) / Analogique

binaire: $\sigma_{sp} \sim \frac{p}{\sqrt{12}} \sim p/3.5$



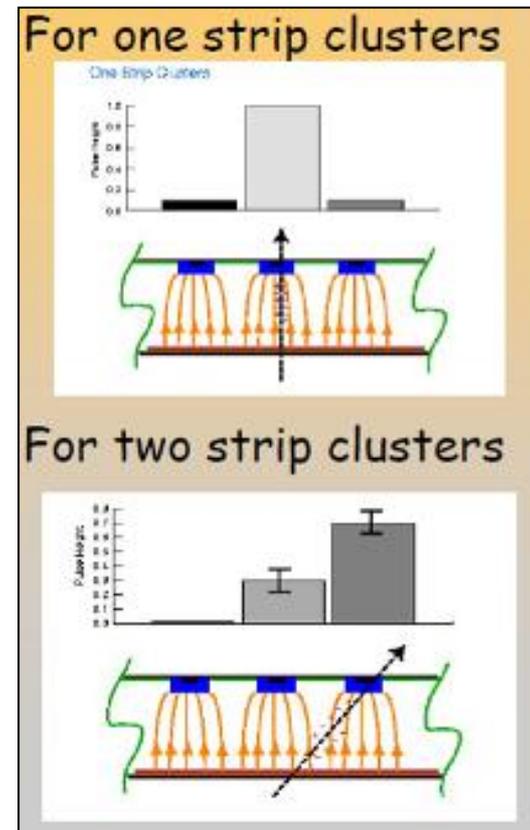
$$\sigma_x^2 = \langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle = \int_{-d/2}^{d/2} x^2 P(x) dx = \frac{d^2}{12}$$

Analogique: $\sigma_{sp} \sim \frac{p}{2 \cdot (S/N)}$



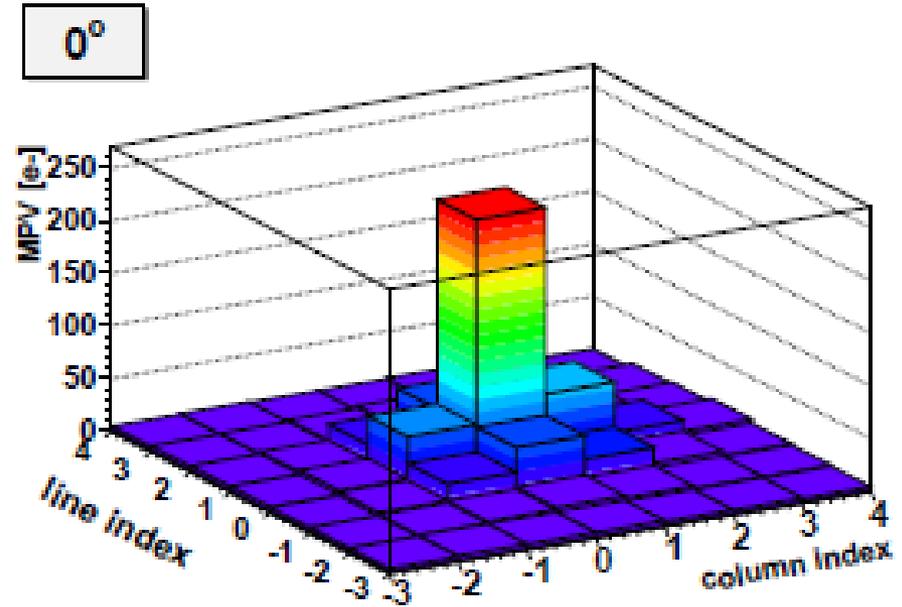
- ⇒ Méthode par centre de gravité
- ⇒ Méthode plus sophistiquées (fonctions η)

Le partage des charges entre plusieurs voies de lecture détériore S/N mais améliore la résolution

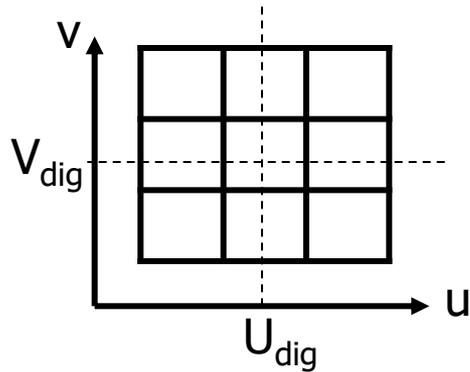


Notions d'amas (cas d'un détecteur pixelisé)

- la zone active est continue
 - signal récupéré par plusieurs pixels (2D)
 - Le pixel ayant le plus grand Signal (ou S/N) = Seed (ou siège ou graine)
 - A priori, l'impact réel se situe dans ce pixel siège.
 - En utilisant l'information de la charge déposée dans les voisins, on peut pondérer la position réelle et déterminer plus précisément cette position
 - Exemple: centre de gravité de la charge déposée.

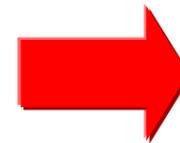
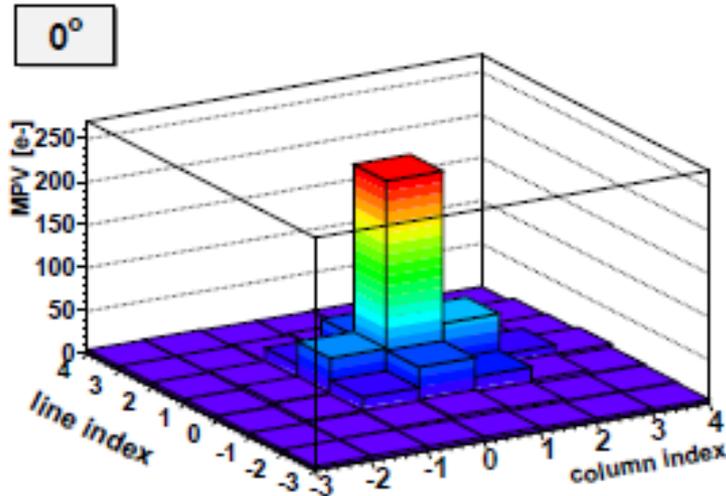


Centre de Gravité sur un détecteur à pixels (sortie analogique)



$$U_{CoG} = \frac{\sum_{i=1}^9 Q_i u_i}{\sum_{i=1}^9 Q_i}$$

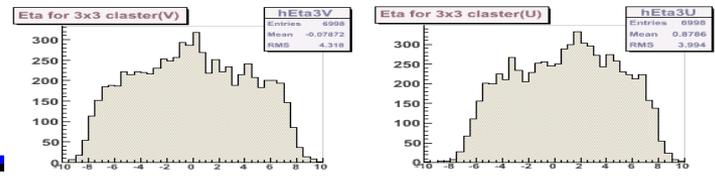
$$V_{CoG} = \frac{\sum_{i=1}^9 Q_i v_i}{\sum_{i=1}^9 Q_i}$$



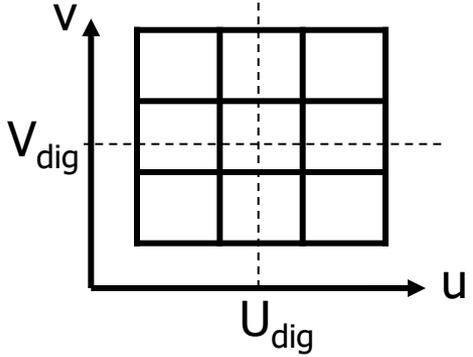
- Exemple de résolution
Pour un pitch de 20 μm
 $\sigma \sim 2.0\text{-}2.5 \mu\text{m}$

- Problème:
la position reconstruite est
souvent biaisée vers le centre

Supprimer le biais des C.de.G: fonctions eta



1/ Compute Center of gravity position from 3x3 cluster charge (Q_i) information



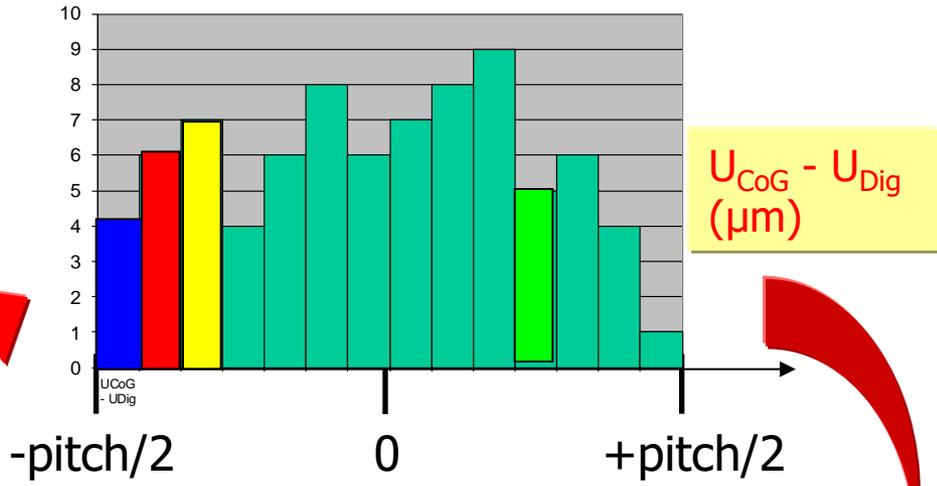
$$U_{CoG} = \frac{\sum_{i=1}^9 Q_i u_i}{\sum_{i=1}^9 Q_i}$$

2/ Plot Center of Gravity distance from the center of the pixel

$$U_{CoG} - U_{Dig} \text{ (}\mu\text{m)}$$

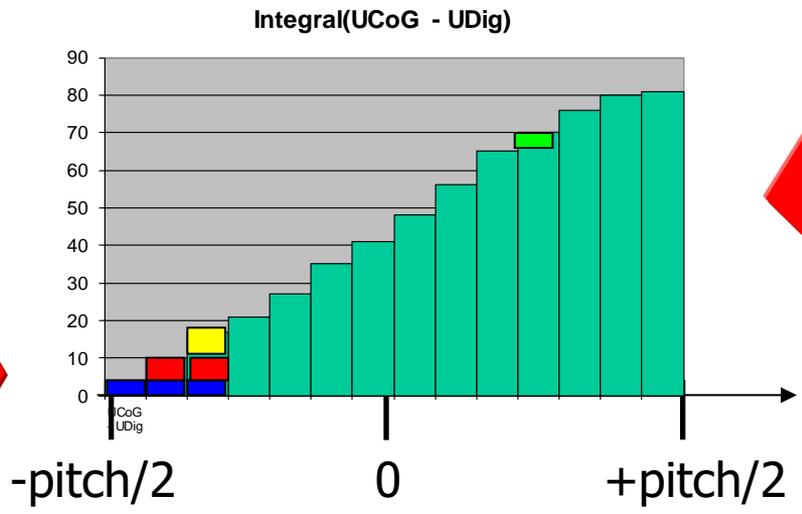
If there was no bias, this should be a flat distribution

N entries



3/ Integrate this distribution to get the eta distribution function:

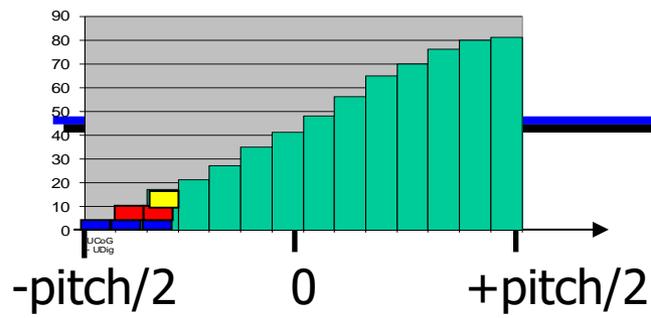
$$f = \int_{-pitch/2}^x (U_{CoG} - U_{Dig}) dx$$



Integral($U_{CoG} - U_{Dig}$)

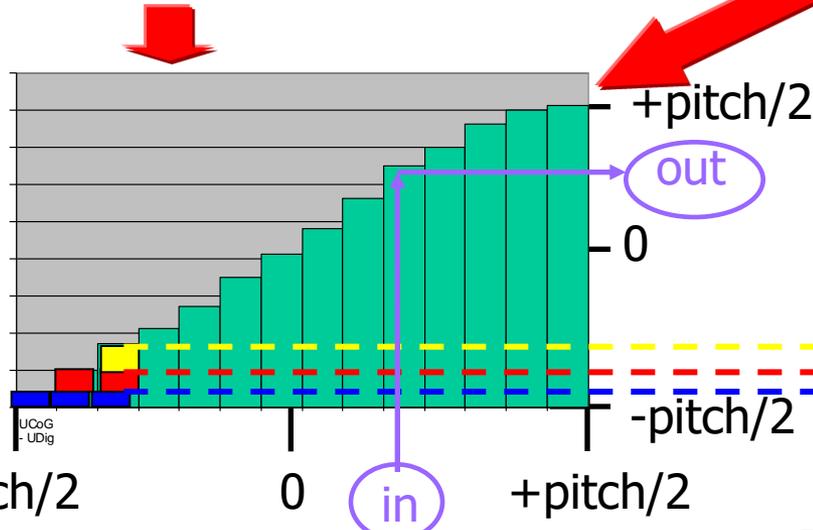
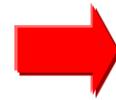
4/ Normalize by the Number of event (N entries), multiply by the pitch and shift it of - (pitch/2)

$$\left(\frac{\int_{-pitch/2}^x U_{CoG} - U_{Dig} dx}{\int_{-pitch/2}^{+pitch/2} U_{CoG} - U_{Dig} dx} \times pitch \right) - pitch/2$$



N entries

5/ Get a flat distribution of all hits in the pixel

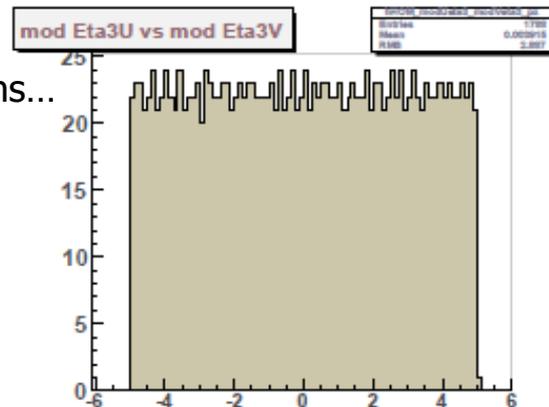


This width is proportionnal to the number of entries in the yellow bin.

Consequences/issues:

➤ Needs to generate these eta functions...

Densité de probabilité
Entre (-p/2 ; +p/2)

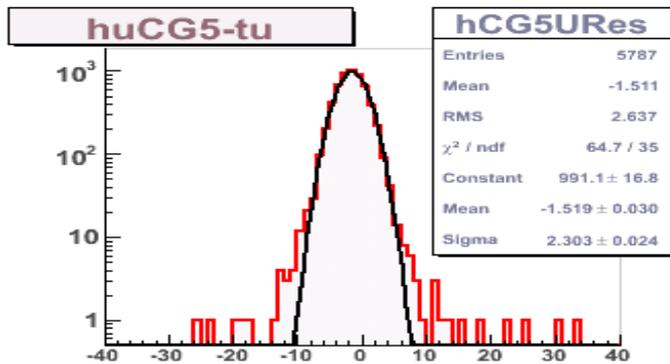


Transformation bijective qui rend toutes les positions équiprobables.

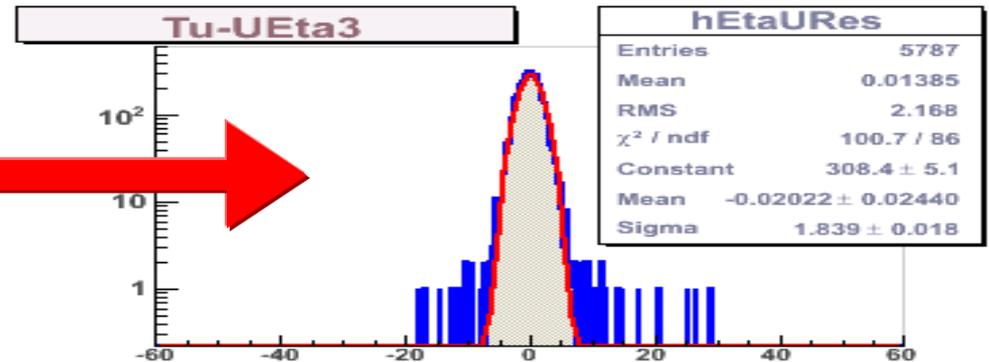
Amélioration de la résolution par les fonctions η

- Exemple d'un capteur CMOS de pitch 20 microns.

CoG(5x5) Residual: $\sigma = 2.30 \mu\text{m}$



Eta(3x3) Residual: $\sigma = 1.84 \mu\text{m}$

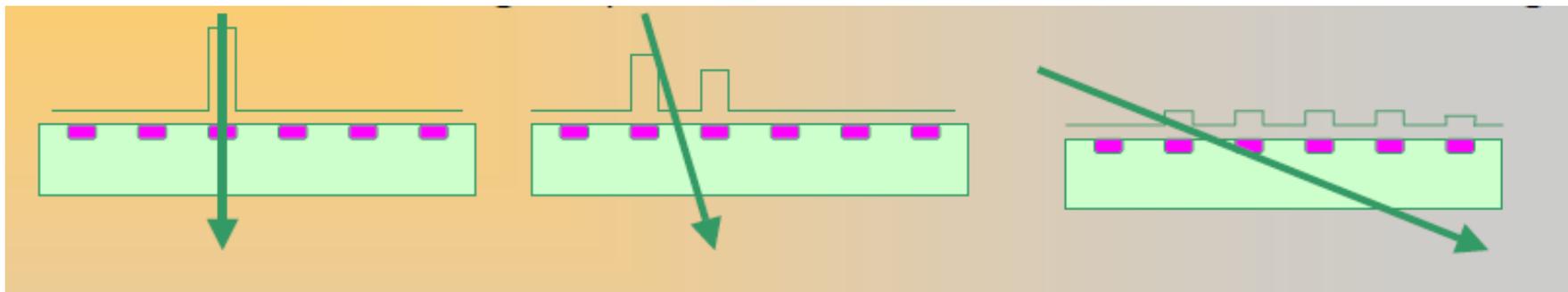


Fonctions η :

Extraire la substantifique moelle du signal pour optimiser la résolution

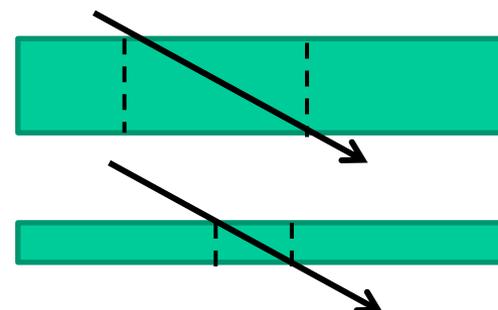
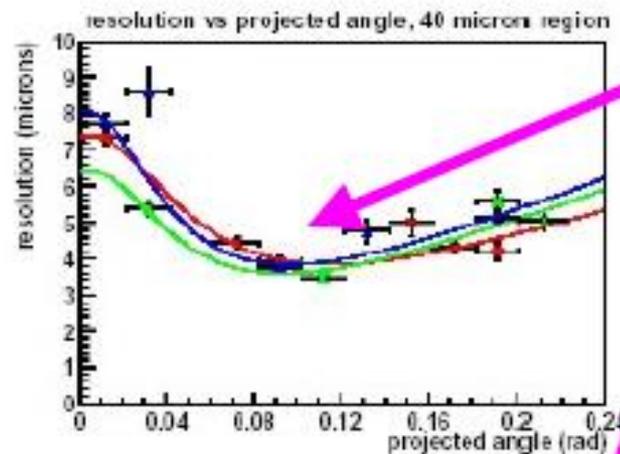
Dépendance angulaire

- Etalement des pistes touchées



- Gain en résolution a petit angle
 - partage des charges
- Dégradation à très grand angle
 - Ambiguïtés (série de pixels équivalents)
 - Algorithmes head-tails
- Paramètre important
 - Rapport pitch / épaisseur active

Dépendance angulaire non négligeable dans les détecteurs (régions avant, bas pT, etc.)



Force de Lorentz et effets sur le signal collecté (Effet Hall)

- Force de Lorentz sur les porteurs de charge

- En présence d'un champs magnétique (e.g. solénoïde)

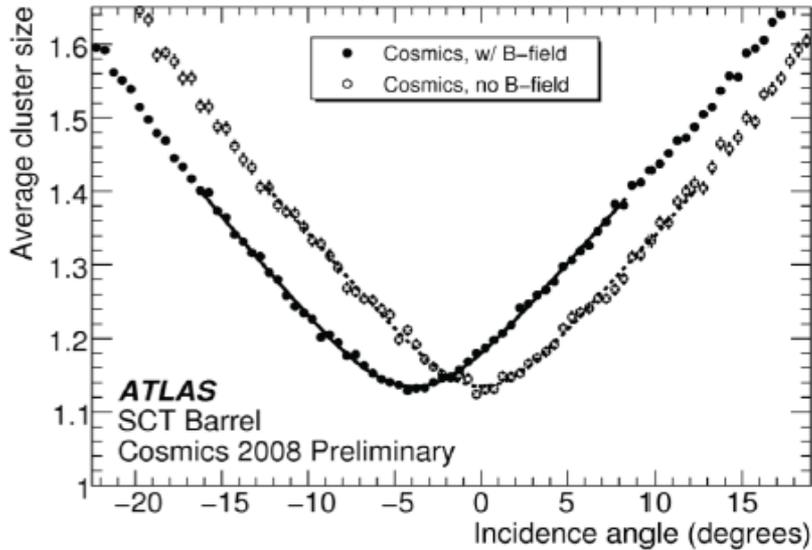
- Présent la plupart du temps sur les détecteurs auprès des collisionneurs

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

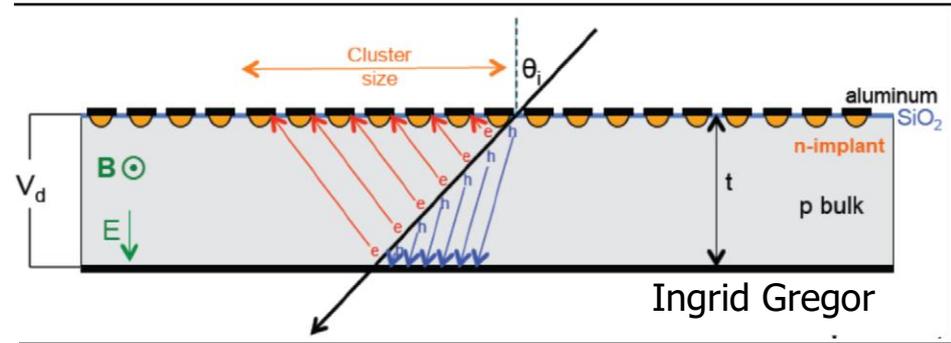
- La dérive de porteurs de charge est modifiée par un angle θ_L

- Dépend de la mobilité ($\mu_{e^-} \neq \mu_h$)
 - Peut être corrigée/calculée
 - Nécessite connaissance de B et de l'épaisseur active

Force de Lorentz \Rightarrow étalement des charges



Measurement in ATLAS after full installation



$\tan \theta_L = \mu^H \cdot B_{\perp} \approx \mu \cdot B_{\perp}$
 B_{\perp} = composante de $B \perp$ à E
 e.g. Silicium (T ambiante), $B = 1T$
 $\mu_{e^-}^H = 1670 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
 $\mu_h^H = 370 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

➔

$\theta_{e^-} \sim 10^\circ$
 $\theta_h \sim 2^\circ$

Effets des radiations sur les détecteurs S.C.

radiation ionisantes et non ionisantes

Facteur de NIEL



- Les détecteurs reçoivent des radiations en permanence puisqu'ils sont là pour détecter des particules !
 - Les flux de ces particules peuvent être élevé et avoir des conséquences sur le détecteur lui-même.
- 2 types de dommages
 - Radiations non ionisantes (bulk damage)
Dommages sur la structures cristalline du S.C. = déplacement des atomes
 - Causées par particules neutres et chargées (neutrons, etc.)
 - Rajoute des niveaux d'énergie dans la bande interdite (entre valence et conduction)
 - Détérioré la tension de déplétion, modifie le dopage effectif, augmente le courant de fuite, détériore l'efficacité de collection de charge (piégeage des charges)
 - Unité: Fluence = Neutrons 1 MeV équivalent par $\text{cm}^2 = n_{\text{eq}}(1\text{MeV}) / \text{cm}^2$
 - Radiations ionisantes
Ionisation = arrachage des électrons
 - Causées par Particules chargées / photons ($E > \text{UV}$)
 - Accumulation de charges aux interfaces (SiO_2), augmentation du courant de fuite.
 - Modifie les propriétés aux interfaces
 - Unite: Gray (1 Gy = 1 Joule / kg) ou le Rad (100 Rad = 1 Joule / kg)
- NIEL factor (Non Ionising Energy Loss)
 - Facteur empirique dépendant de la particule et de son énergie qui permet d'obtenir des $n_{\text{eq}}(1\text{MeV}) / \text{cm}^2$
- Dans tous les cas:
 - Détérioration possible du rapport S/N
 - Peut rendre le détecteur inefficace ou inopérant !

Non ionisant = endommage la structure
Ionisant = arrachage d'e⁻

Facteur de NIEL

- 1 neutron de 1 MeV \Rightarrow Niel factor = 1 = référence
- 1 electron de 10 MeV \Rightarrow Niel Factor $\sim 1/30$

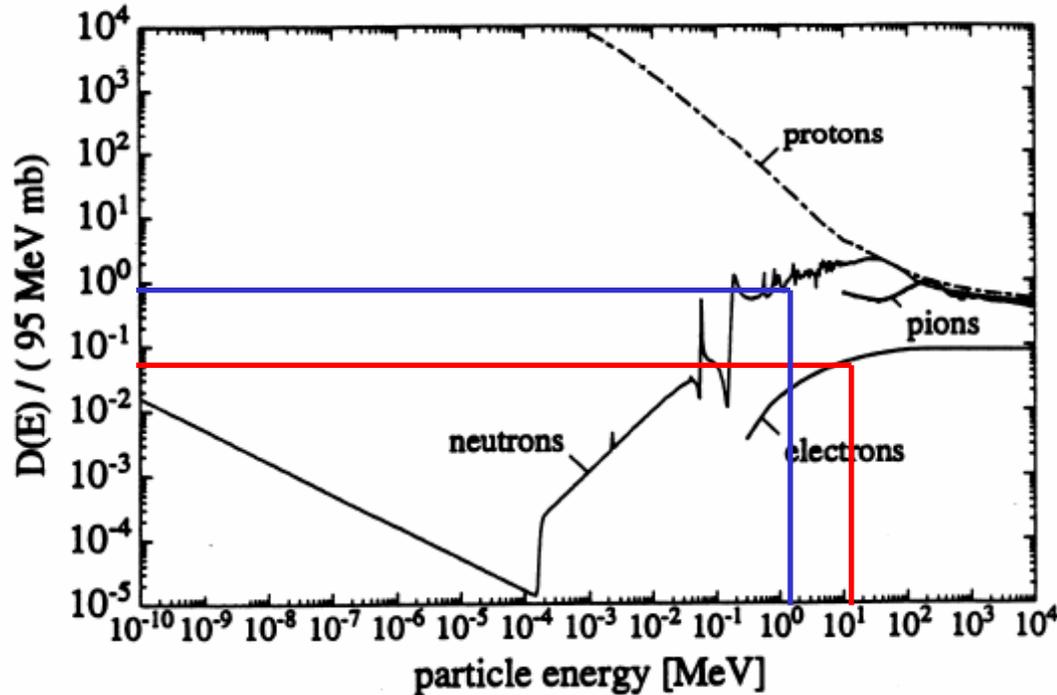


Figure 4.2.:

The NIEL-Factors of different particles as a function of their energy. The factors are normalized with respect to a 1 MeV neutron. From [25].

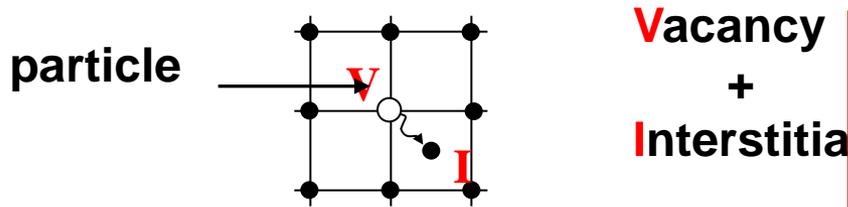
Relative displacement damage for various particles and energies:

Niel = équivalence en Unité de neutron de 1 MeV

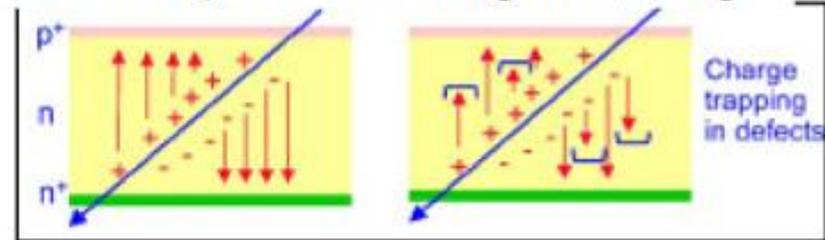
Particle	proton	proton	neutron	electron	electron
Energy	1 GeV	50 MeV	1 MeV	1 MeV	1 GeV
Relative Damage	1	2	1	0.01	0.1

Effets des radiations (1/2)

- Modification de la structure cristalline

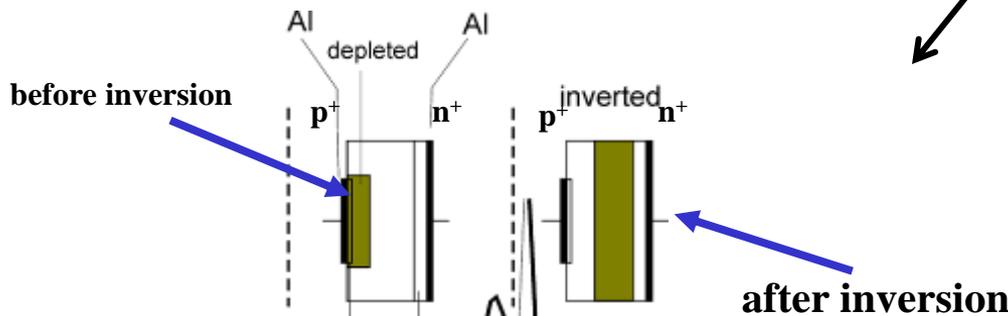


Decrease in charge collection efficiency due to charge trapping



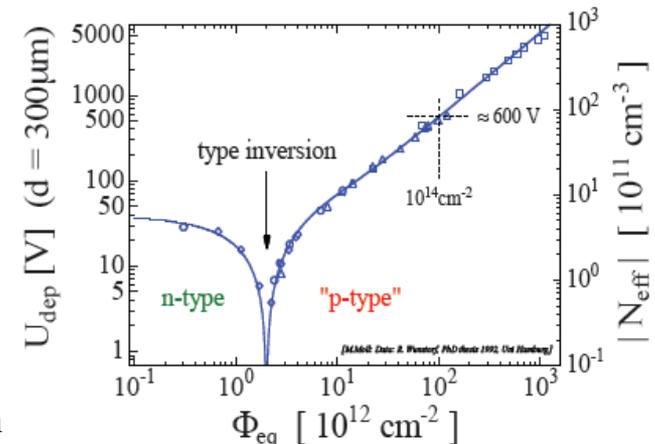
- Trapping (piégeage)
 - Niveau d'E supplémentaires
 - Efficacité de collection de charge ↓

- “**Type inversion**”: N_{eff} changes from positive to negative (Space Charge Sign Inversion)



- Inversion du dopage
 - Modifie la déplétion

Tension de déplétion



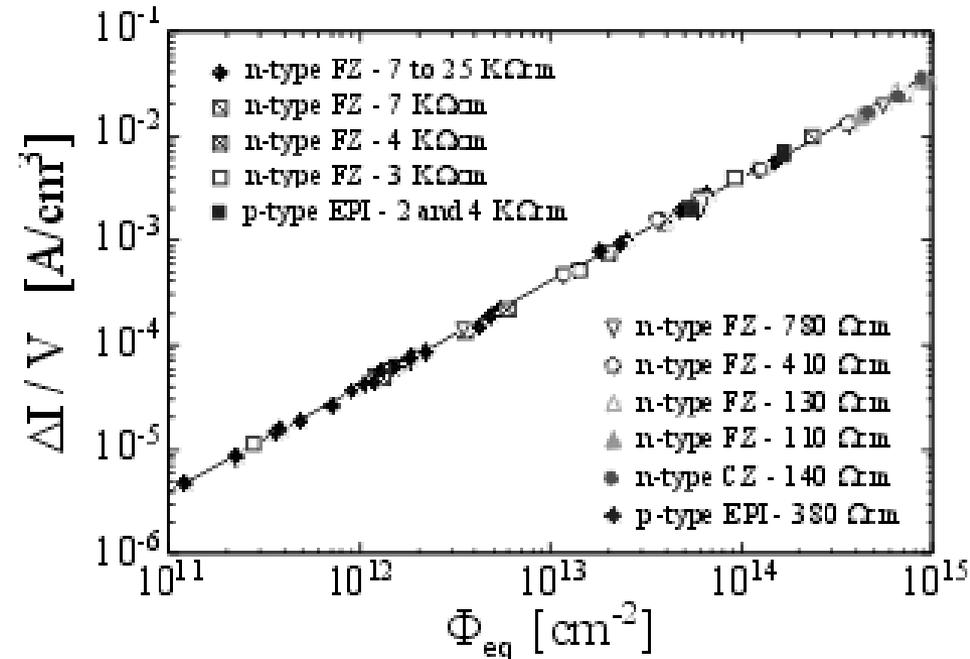
Effets des radiations (2/2)

- Augmentation du courante de fuite

Increase of a **leakage current**:

$$\Delta I = \alpha \Phi_{eq}$$

where α is a (universal) **damage parameter**



- Accumulation des charges aux interfaces Si-SiO₂
 - Dues aux radiations ionisantes
 - Modifie les capa. $\Rightarrow \uparrow$ Bruit

Radiations: comment s'en prémunir ?

- Solutions (toujours des compromis)

- Diminuer la taille du « volume sensible »

- \downarrow courant de fuite MAIS \uparrow canaux \Rightarrow \uparrow puissance dissipée, \downarrow vitesse

- Augmentation de la tension de déplétion

- Risque de claquage

- Refroidissement (Lazarus effect)

- \downarrow courant de fuite MAIS \uparrow budget de matière

- Vitesse de lecture

- Temps de lecture \downarrow \Rightarrow Courant de fuite \downarrow MAIS \uparrow puissance, Bruit pre-amp.

- Structures adaptées qui limitent l'accumulation des charges

- "blindage" des circuits électroniques, guard-ring, etc.

- Recuit (pas toujours possible)

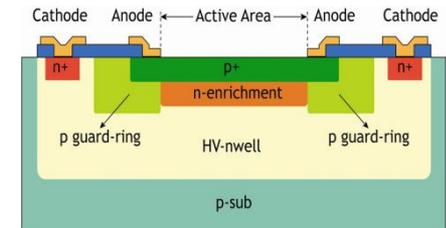
- Rétablit en partie la structure cristalline

- Structures ayant un S/N élevé

- Choix de matériaux radio-résistants (diamant, dopages additionnels, etc.)

- Les radiations ont aussi des effets sur la chaîne d'électronique.

- R & D extrêmement active (LHC upgrades)



Radiations : nécessite R&D @ LHC upgrades

Différents types de détecteurs

Strips

Pixels hybrides

Détecteurs monolithiques (CCD, CMOS, DEPFET...)

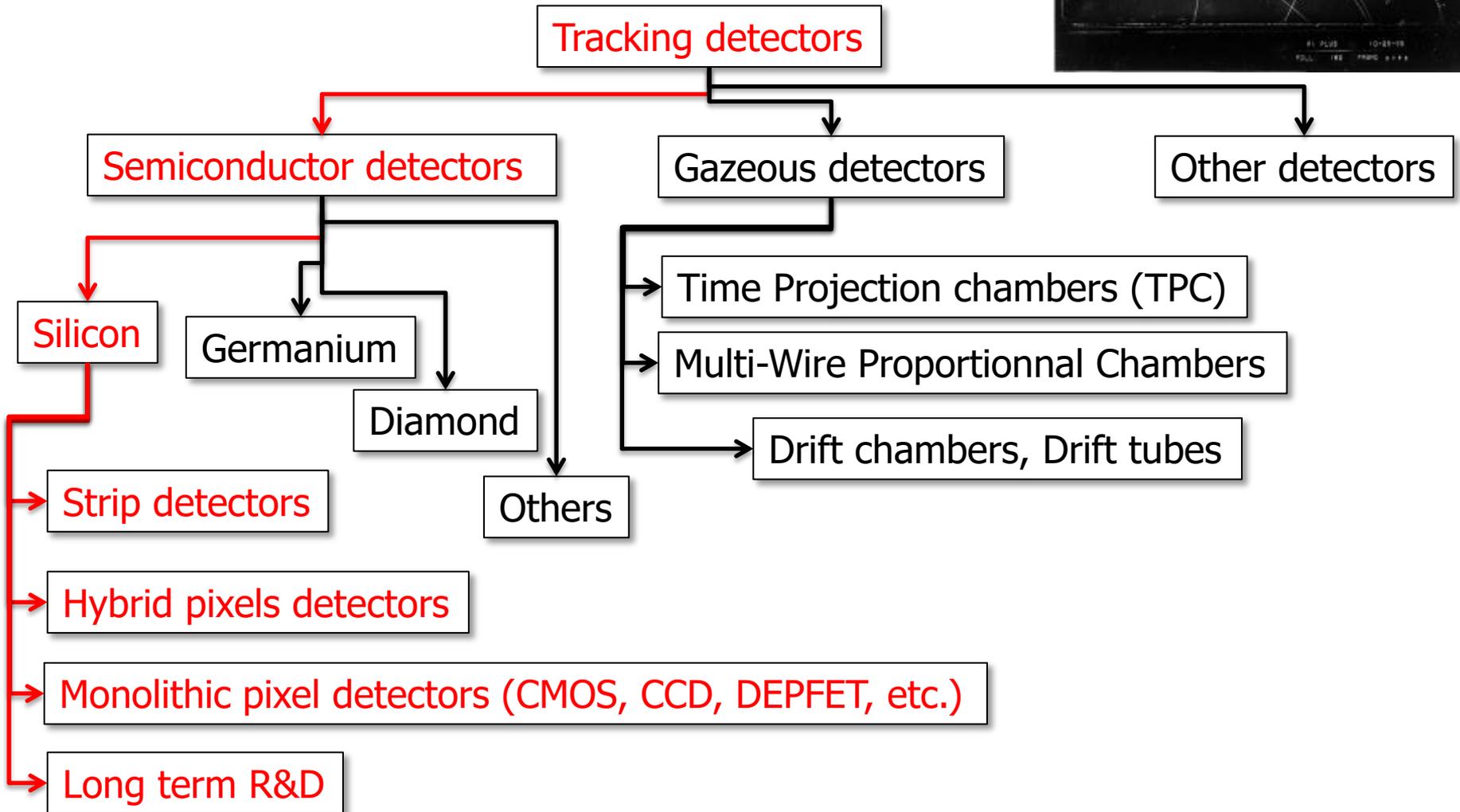
Spectrométrie



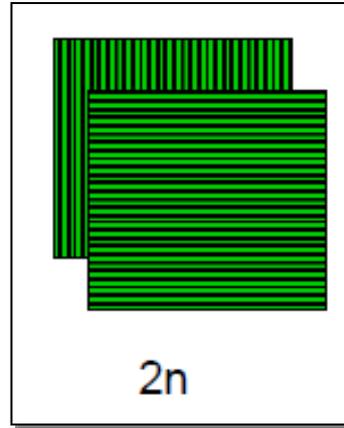
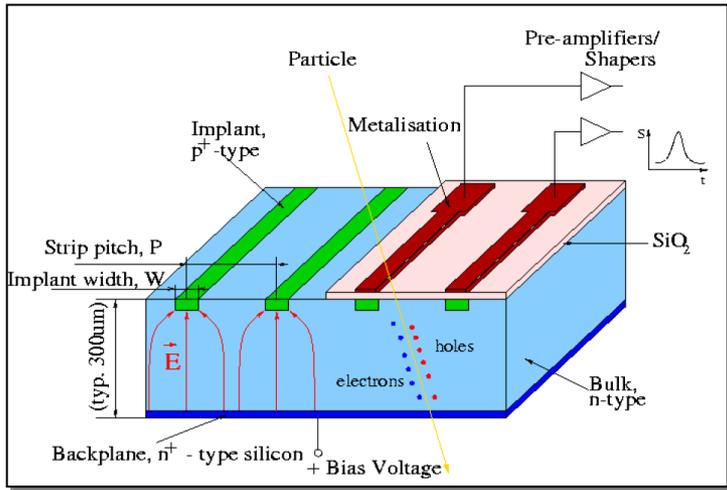
Tracking and semiconductors



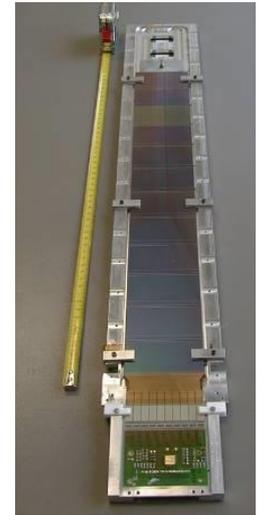
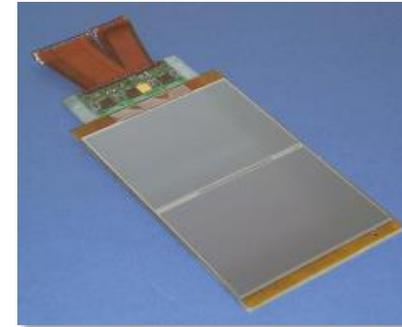
- Tracking detectors are a large family...



Single sided microstrip detectors



CMS tracker module



Principe de fonctionnement

- e⁻ et trous dérivent vers les electrodes ⇒ courant induit (théorème de Ramo)
- Mesure unidimensionnelle ⇒ 2 couches pour du 2D
- Rapide et flot de donnée ∝ 2N pistes
- Grandes surfaces pour un cout raisonnable ⇒ couches à grands rayons

Valeurs typiques

- Voltage ~ 100 V, épaisseur ~ 300 μm, pitch ~ 50 μm, résolution ~ 1.5 μm; surface ~ 10x10 cm², résolution temporelle ~ O(10-100 ns)
- Résolution :

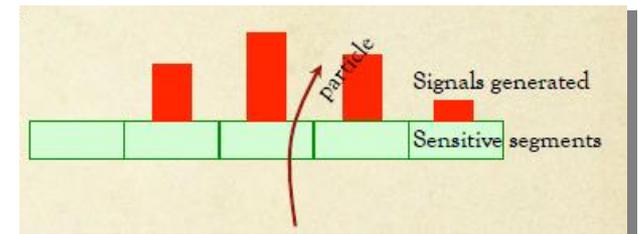
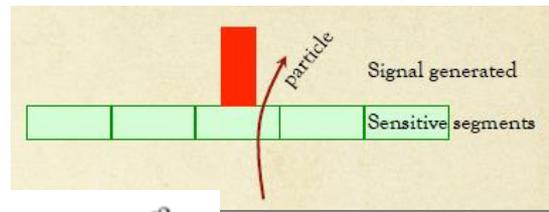
Strips: le lowcost des détecteurs S.C.

Analogique:

$$\sigma_{sp} \sim \frac{p}{2 \cdot (S/N)}$$

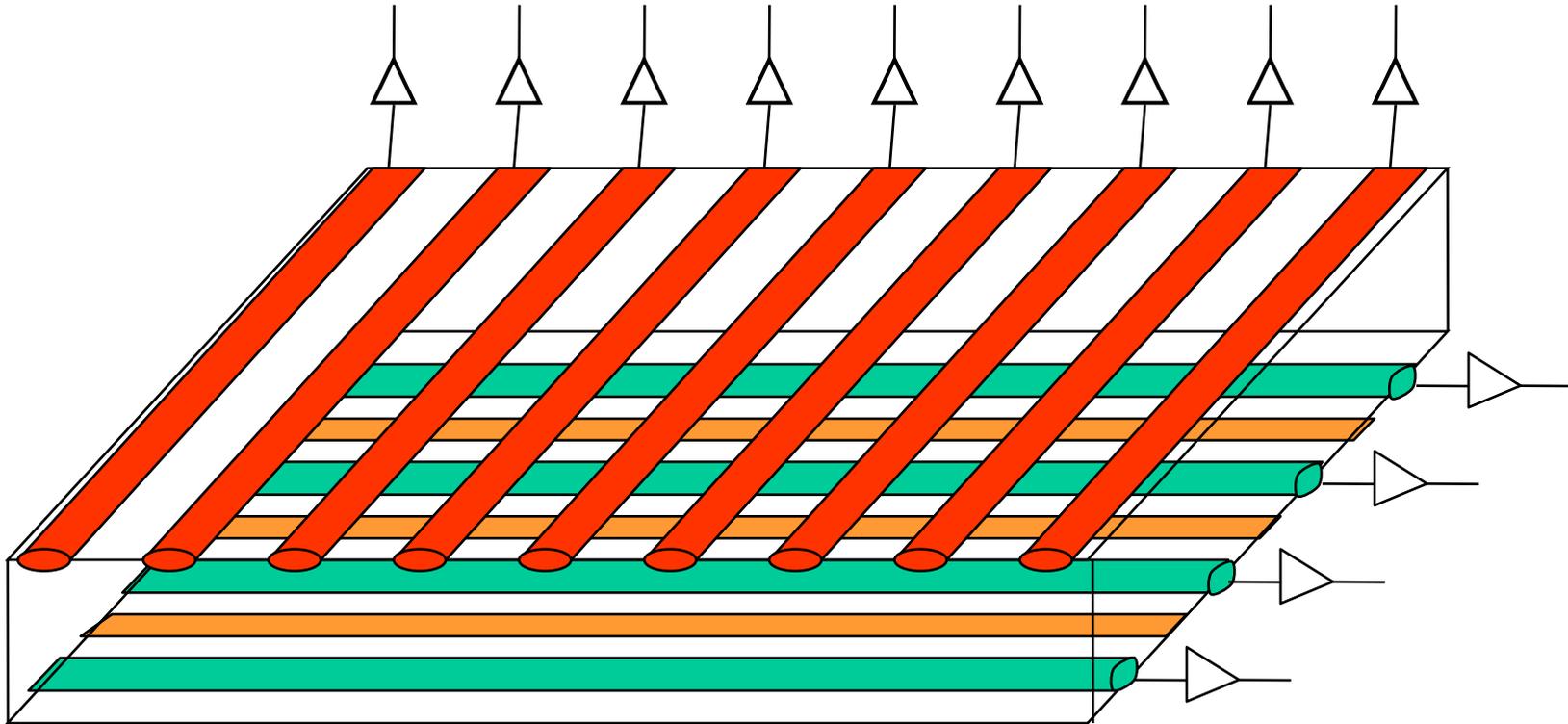
Digital:

$$\sigma_{sp} \sim \frac{p}{\sqrt{12}}$$



$$\sigma_x^2 = \langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle = \int_{-d/2}^{d/2} x^2 P(x) dx = \frac{d^2}{12}$$

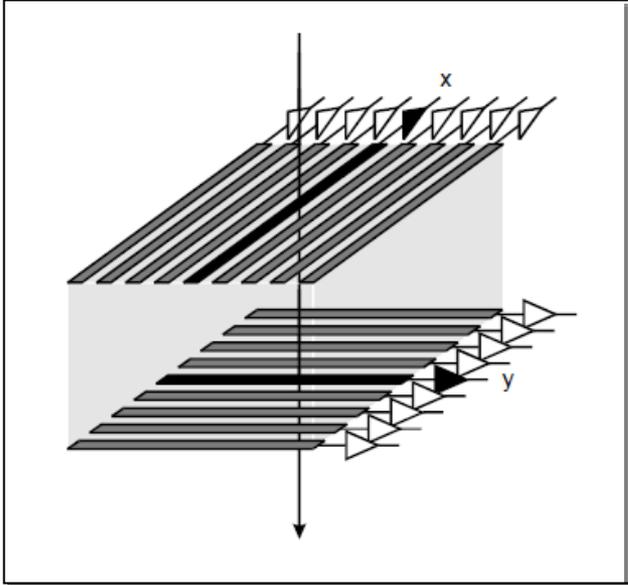
Détecteurs double bandes (Double Sided Microstrip Detector)



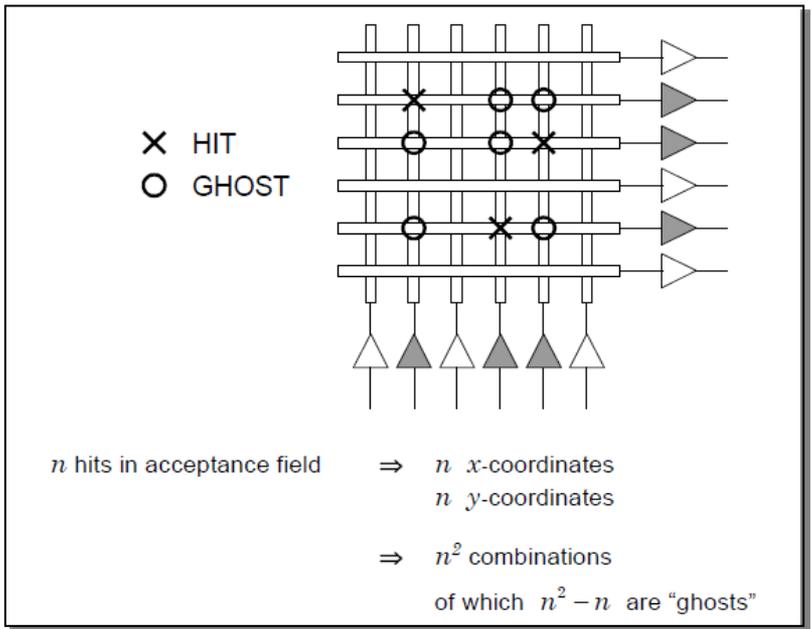
- Pas de matière supplémentaire
- Mais:
 - ✓ Fabrication plus complexe et plus chère
 - ✓ une des faces de lecture à un potentiel ($\sim 100\text{V}$)
 - ✓ problèmes des multi hits
 - ✓ On doit lire chaque face

Strip detectors: le problème des ambiguïtés

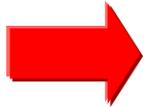
• 1 hit ça va...



• 3 hits...



In collider geometries often advantageous, as z resolution less important than $r\phi$



Angle stereo faible

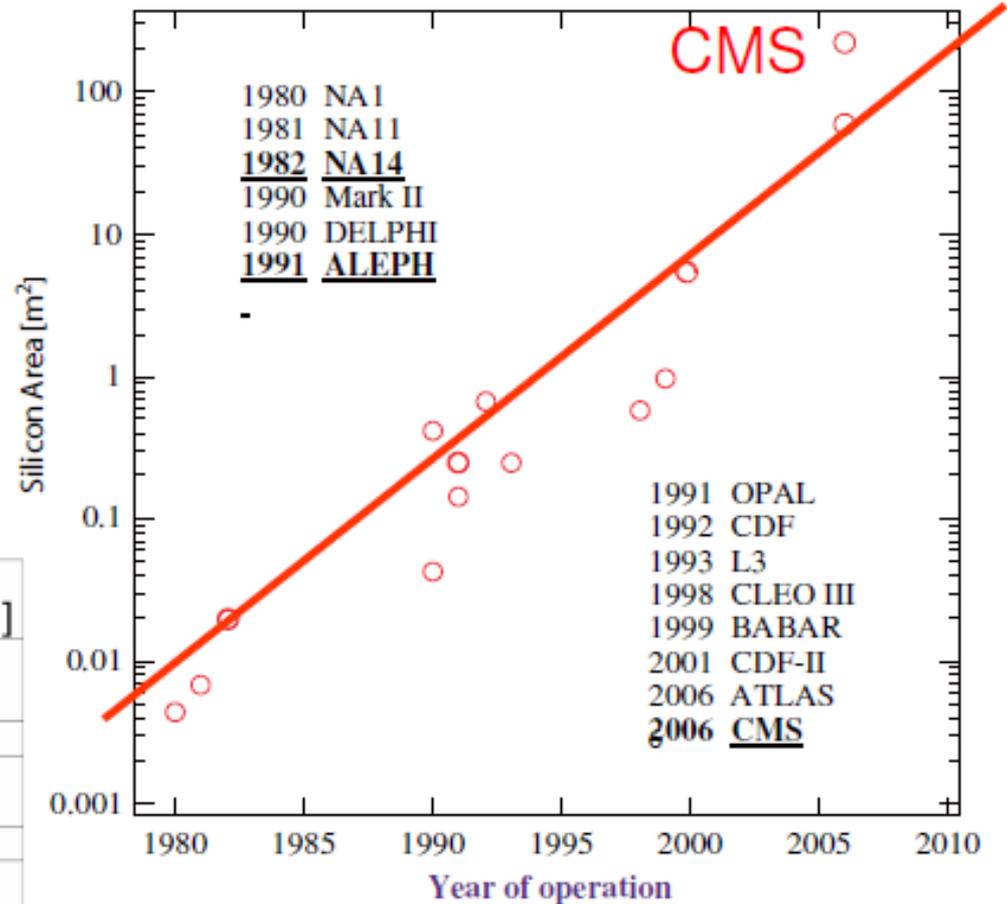
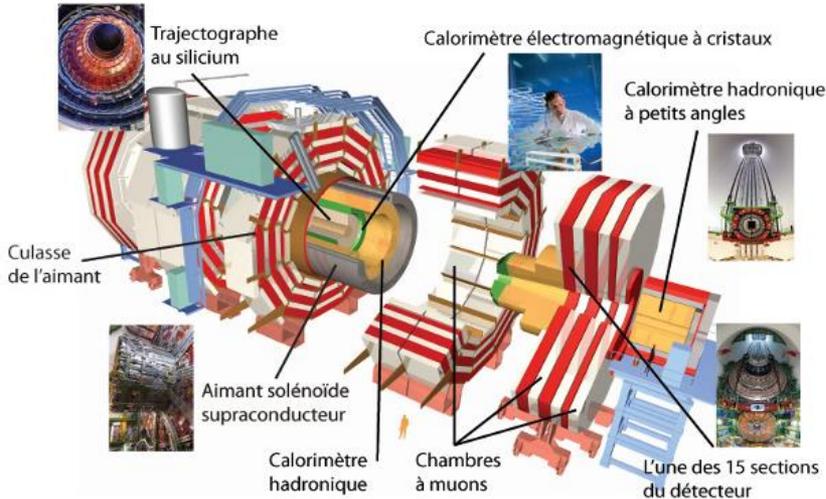


Réduit les ambiguïtés au prix d'une résolution dégradée dans une dimension

The width of the shaded area subject to confusion is $L \frac{p_2}{p_1} \tan \alpha + p_2$

Example: ATLAS SCT uses 40 mrad small-angle stereo
 Two single-sided strip detectors glued back-to-back

Exemple 1: trajectographe de CMS



experiment	nb. of detectors	nb. of channels	silicon area [m ²]
CMS	15.95 k	10 × 10 ⁶	223
ATLAS	16.0/2 k	6.15 × 10 ⁶	60
AMS 2	2.3 k	196 k	6.5
DO 2		793 k	4.7
CDF SVX II	720	405 k	1.9
Babar		140 k	0.95
Aleph	144	95 k	0.49
L3	96	86 k	0.23

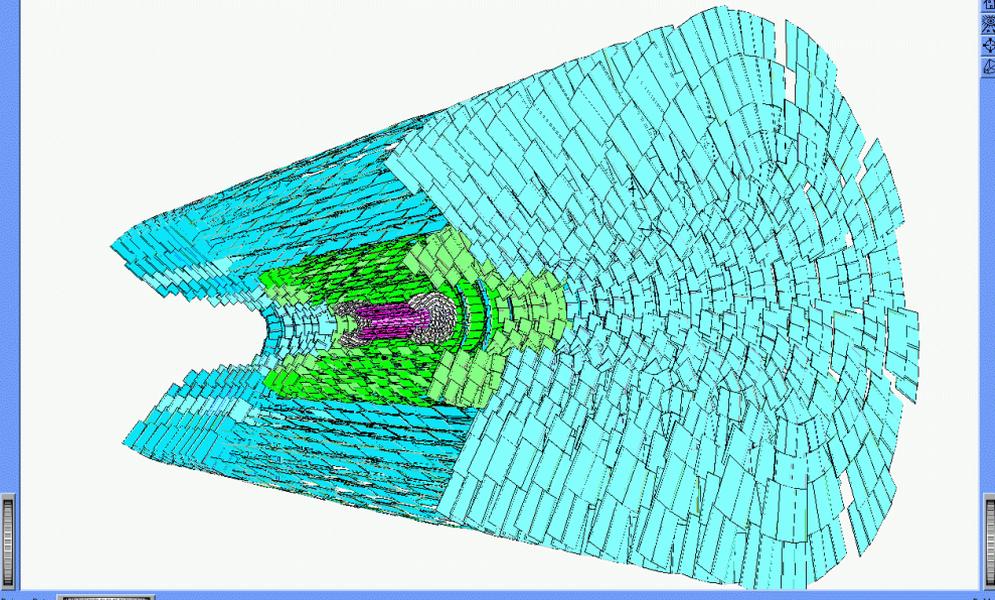
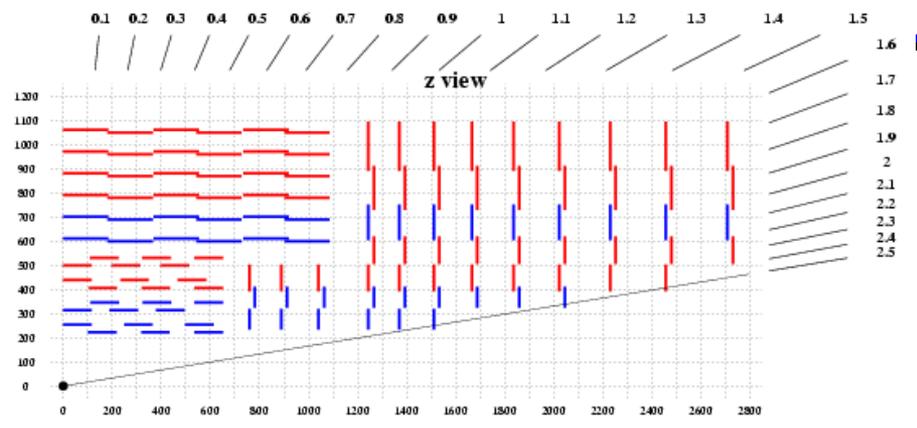
220 m² de Silicium !
3 couches de pixels ⇒ 66 M pixels

10 couches de strips (tonneau)
9 disques (bouchons)
25k strips sensors ⇒ 10 M canaux



Rotx Roty

Rotz



Insertion du trajectographe



1 couche du tonneau

Exemple 2: AMS

- Alpha Magnetic Spectrometer (étude matière / antimatière)

- Lancé en mai 2011

- Partie centrale: trajectographe

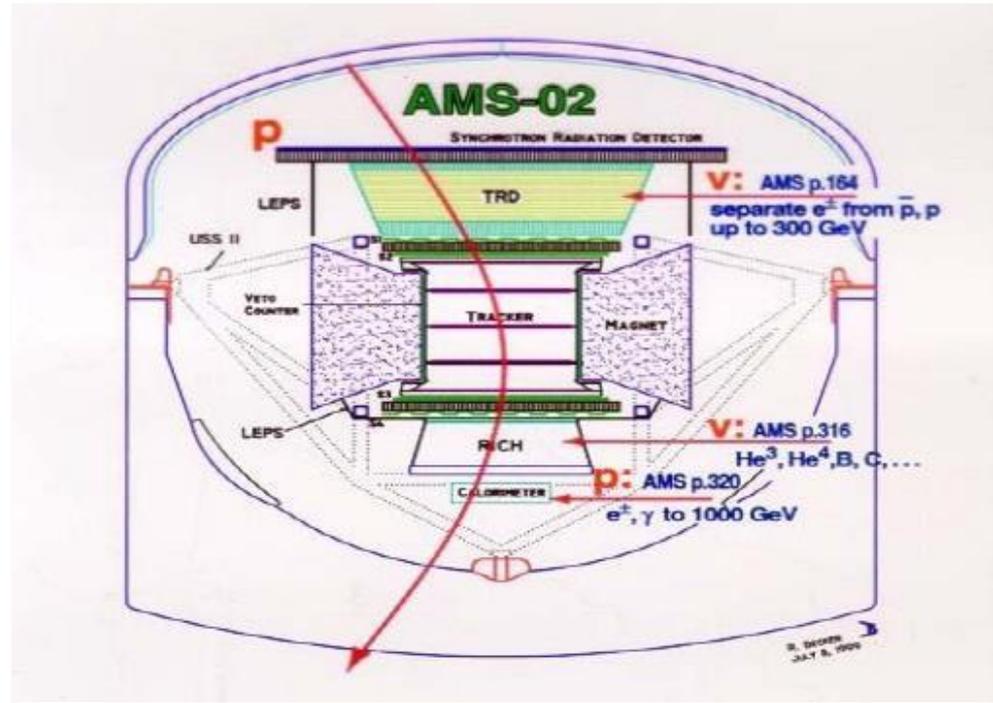
- 8 double couches de strips
- 200k canaux, 6 m²
- Résolution ~ 10 μm

- Buts: identifier les particules

- e⁻, e⁺, proton, antiprotons
- Signe de la charge
- Rigidité (p/Ze), dE/dx

- Défis:

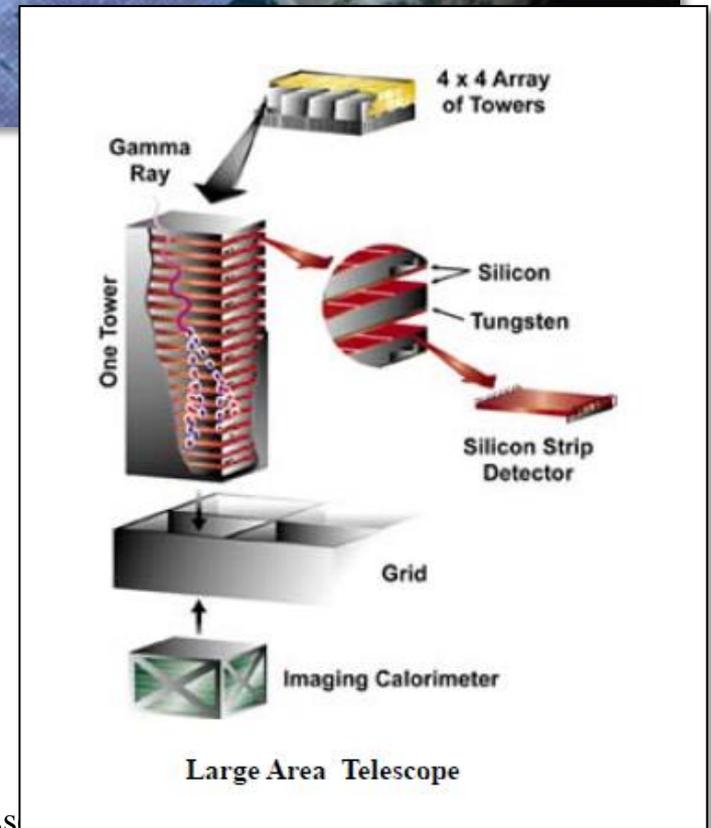
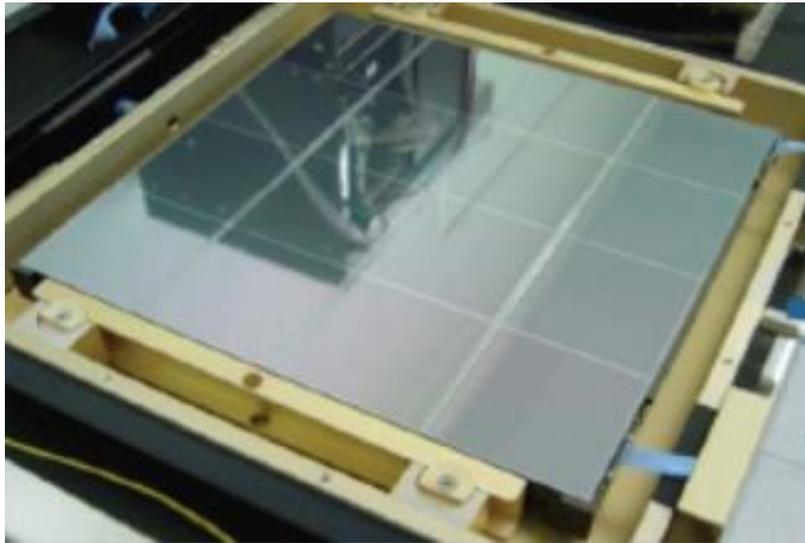
- Qualification pour l'espace.
- Puissance consommée (~800W)



Exemple 3: Fermi (ex-GLAST)

- Pair conversion gamma telescope

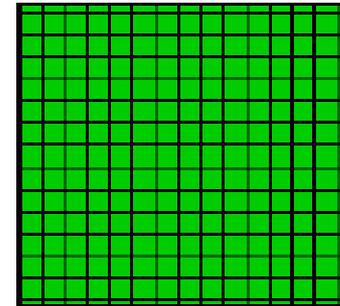
- Lancement en 2008
- Silicium / tungstene
- 16 tours
- $37 \times 37 \text{ cm}^2$ de surface active
- $\sim 70 \text{ m}^2$ de Silicium (pitch $228 \mu\text{m}$)
- 880k canaux



Les détecteurs à pixels (hybrides, CCDs, MAPS, etc.)

- Caractéristiques

- N^2 canaux
 - Flot de données
- Pas d'ambiguïtés sur les positions
 - Taux d'occupation
- Nombreuses technos différentes
- Détecteurs de vertex



n^2

- Many different technologies

- Hybrid pixels
- CCD
- CMOS
- DEPFET
- SOI
- Etc.



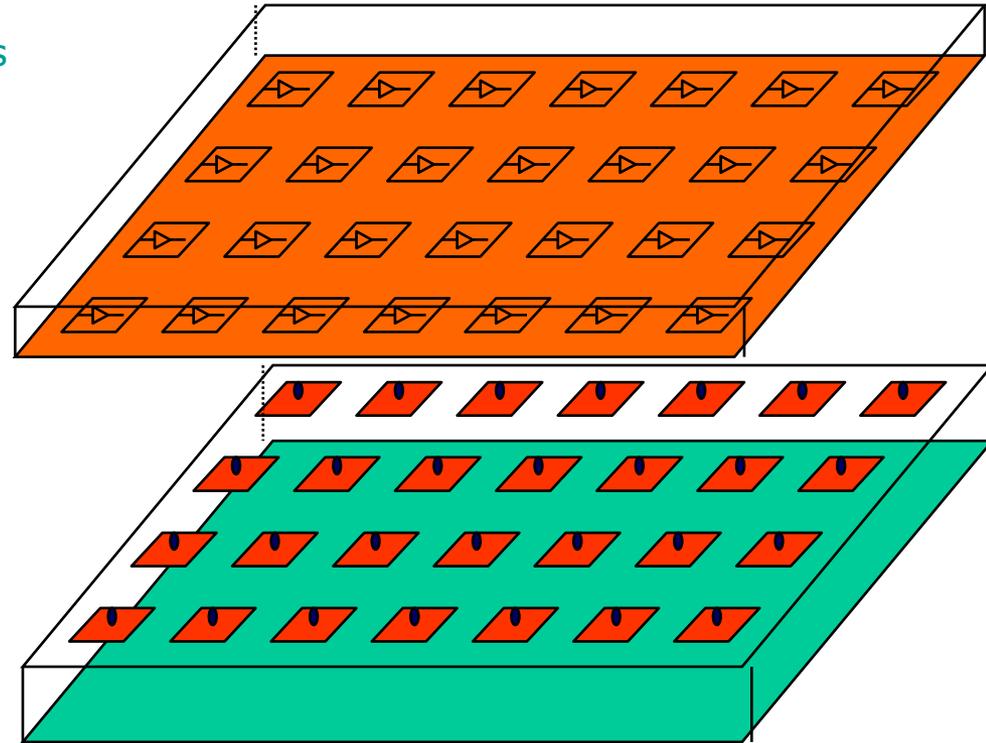
Détecteurs à pixels hybrides

- **But:**

- Mesure de position dans les deux dimensions
- Mesure temporelle

- **Principe**

- Détecteurs simple face segmentés dans les deux directions
- Chip de lecture montée directement dessus
- Connectique entre les 2 wafers
 - micro-billes de métal (bump bonding)
 - Procédure complexe et chère



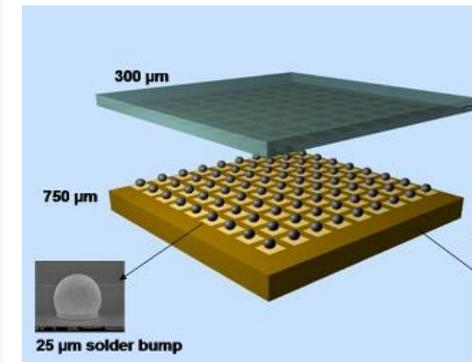
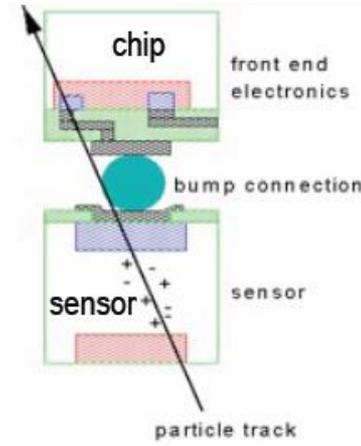
- **Équipe les couches internes des détecteurs de vertex au LHC**

- **Points forts:**

- Vitesse de lecture (facteur clef pour le LHC)
- Technologie mature
- Résistance aux radiations (facteur clef pour le LHC)

- **Faiblesses relatives**

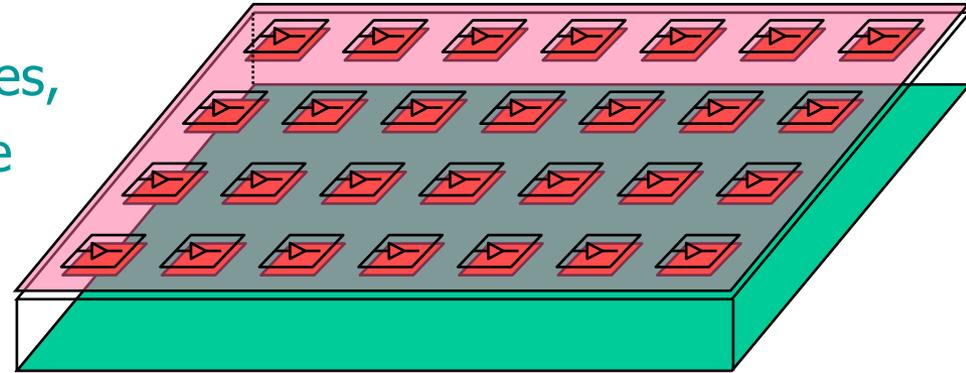
- Granularité moyenne
 - Pitch limité par la lecture et le bonding
 - e.g. $50 \times 400 \mu\text{m}^2$, $150 \times 150 \mu\text{m}^2$
- Budget de matière
- Puissance dissipée



Famille des détecteurs monolithiques à pixels

- Idée:

- Contrairement aux pixels hybrides, La partie « détecteur » et la partie « électronique de lecture » sont Intégrées sur le même wafer



- Avantages

- Budget de matière
- Granularité (pitch jusqu'à $\sim < 10 \mu\text{m}$ si nécessaire)
- Faible bruit (électronique intégrée au plus près du signal)

↓
CCD

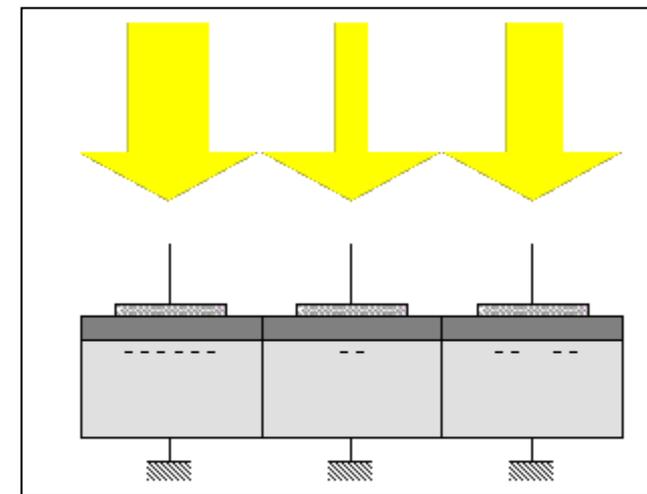
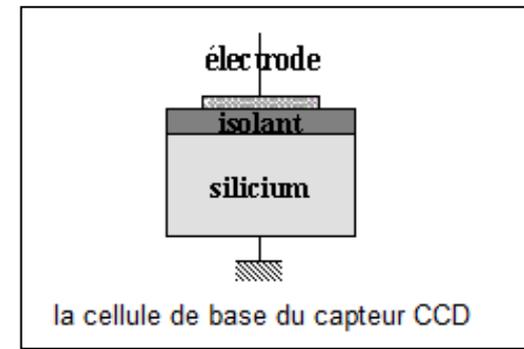
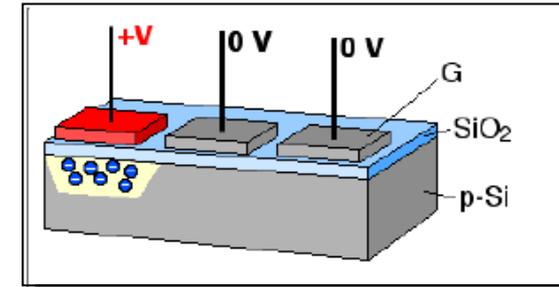
↓
CMOS

↓
DEPFET

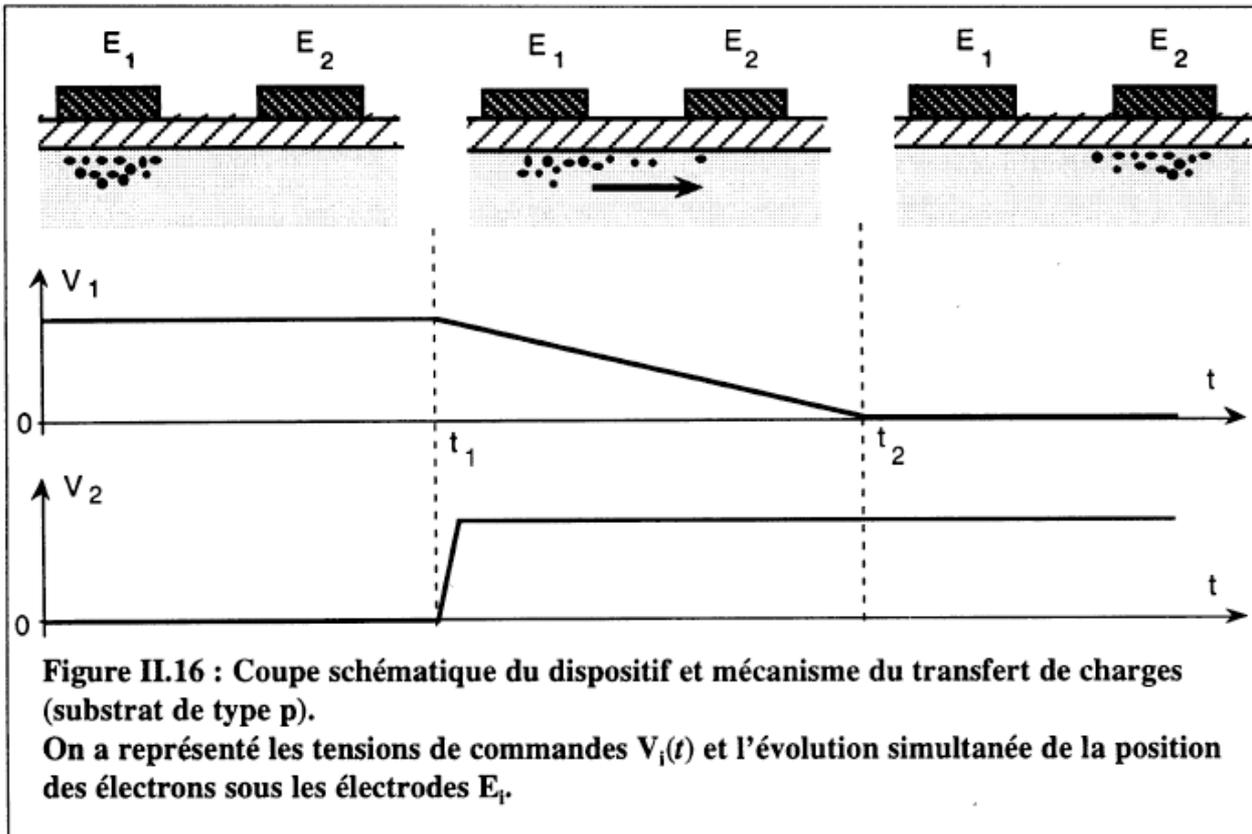
Monolithique = détecteur + électronique

CCD (Charged Coupled Devices)

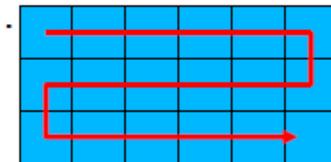
- Historique
 - Idée ancienne (1960s)
 - Au départ: usage dans les cameras / appareils photos
 - Prix Nobel 2009
 - Applications: visible, en astrophysique, imagerie médicale, etc.
- Principe
 - Chaque pixel = électrode séparée par un isolant
 - La lecture se fait par transfert de charge d'un électrode à l'autre jusqu'en bout de ligne, en jouant sur les tensions des électrodes
 - Efficacité quantique ($> \sim 70\%$)
 - Utilisé avec succès dans SLD (détecteur de vertex)
- Faiblesses relatives
 - Vitesse de lecture
 - Radio-résistance modérée (transfert des charges)
 - Nécessite un refroidissement ($\sim < -10-20\text{ C}$)



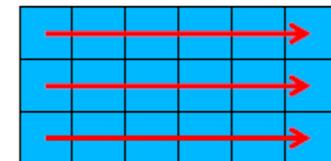
CCD: transfert des charges



En jouant sur les tensions aux électrodes, on transfère les charges d'un pixel à l'autre



Signal treatment



CMOS pixel sensor (CPS) (point de vue biaisé)

Principes

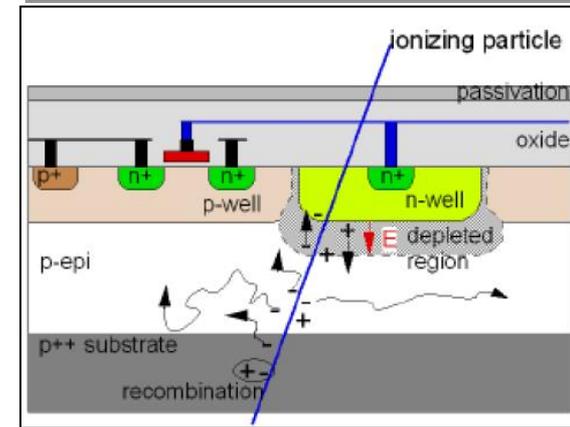
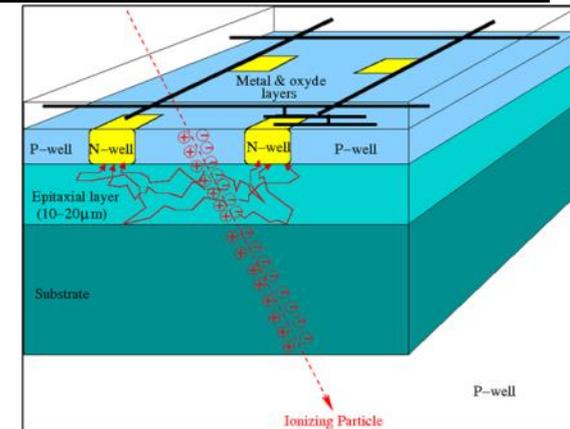
- monolithique, p-type Si
 - Signal créé dans couche epitaxiale faiblement dopée et mince $\sim 10\text{-}20\ \mu\text{m}$
 - $\sim 80\ \text{e}^-/\mu\text{m} \Rightarrow$ signal total $\sim O(1000\ \text{e}^-)$
- Diffusion thermique des e^-
 - Profondeur deplétée limitée
 - Interface hautement dopée P: réflexion des charges
- Collection de charge: Puits dope N (N-Well diodes)
 - Partage des charges \Rightarrow résolution
- Collection de charge continue
 - Pas de temps mort

Avantages

- Granularité
 - Pixel pitch jusqu'à $10 \times 10\ \mu\text{m}^2 \Rightarrow$ résolution spatiale jusqu'à $\sim 1\ \mu\text{m}$
- Budget de matière
 - partie sensible $\sim 10\text{-}20\ \mu\text{m} \Rightarrow$ amincissement jusqu'à $\sim 50\ \mu\text{m}$
- Traitement du signal intégré au senseur
 - compacité, flexibilité, flux de donnée
- Conditions de fonctionnement flexibles
 - de $\leq 0^\circ\text{C}$ jusqu'à $30\text{-}40^\circ\text{C}$ si nécessaire
 - Puissance dissipée faible ($\sim 150\text{-}250\ \text{mW}/\text{cm}^2$) \Rightarrow budget de matière
 - Tolérance au rayonnements: $> \sim \text{qqs MRad}$ and $O(10^{13}\ n_{\text{eq}}) \Rightarrow f(T, \text{pitch})$
- Production industrielle
 - Coûts, rendements, évolution des technologies, soumissions fréquentes

Limitation principales

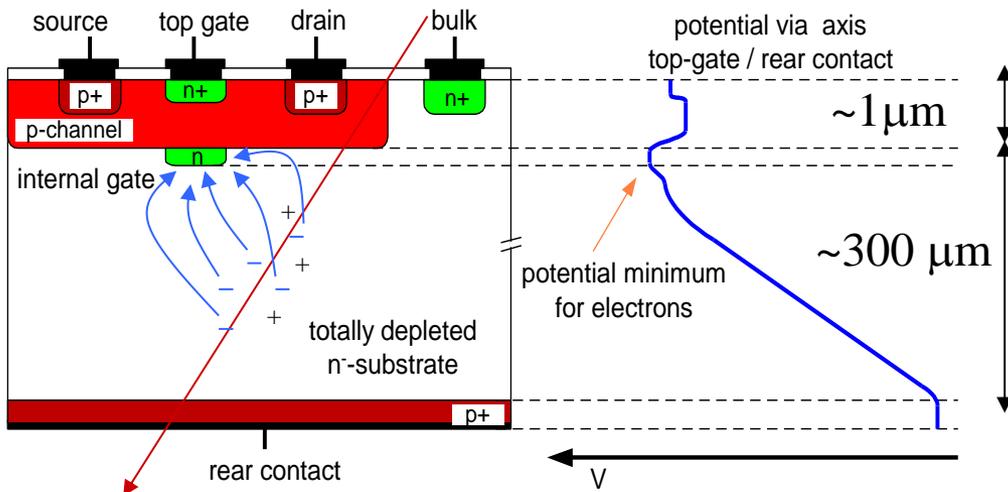
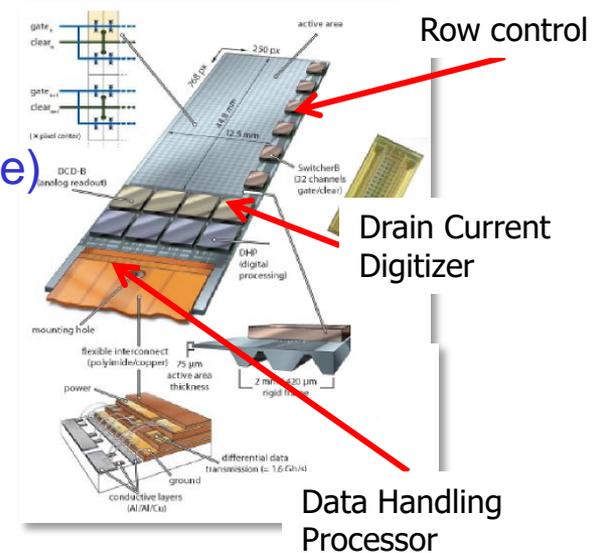
- L'industrie développe des technologies éloignées des préoccupations de la physique des particules
 - Différentes optimisations sur les paramètres de la technologie (dopage, métallisations, etc.)
- Récemment: nouveaux process accessibles
 - Taille de grille plus petite, couche epitaxiale adaptée, deep N-Well, etc.
 - **Ouvre le champ à de nouvelles applications**



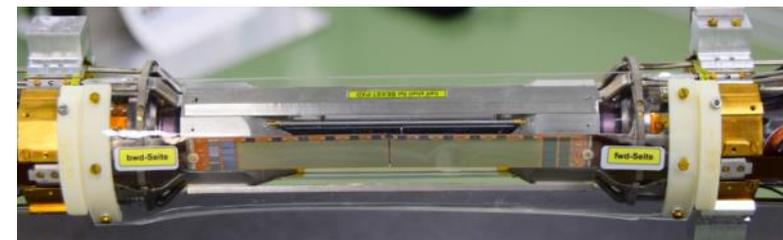
**CMOS: base industrielle
Extrêmement forte**

DEPFET - DEP(leted)F(ield)E(ffect)T(ransistor)

- Transistor à effet de champs intégré à chaque pixel
- Capteur pleinement dépleté
- électrons collectés au minimum de potentiel (internal gate)
 - Courant à travers les transistors modulé par la charge collectée
 - Charge retirée par un mécanisme de reset (clear)
 - Amplification de la charge à l'emplacement de la collection
 - \Rightarrow pas de perte de charge lors du transfert \neq CCD
 - Epaisseur active $\sim 300 \mu\text{m}$ \Rightarrow Amincissement à $50 \mu\text{m}$ si nécessaire
 - Capacité d'entrée très faible \Rightarrow bas bruit



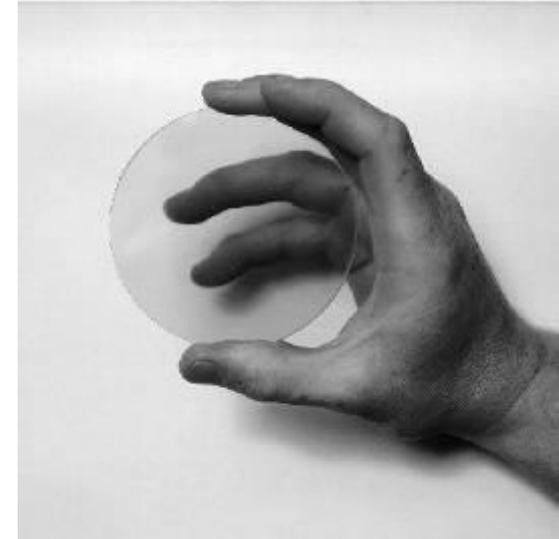
Installation dans Belle-2 (2018)



Inconvénient: le reset nécessite généralement un chip dédié à la périphérie

Détecteurs diamant CVD (RD42 collab.)

- Chemical Vapor Deposition
- Propriétés les plus remarquables :
 - extrême tenue mécanique
 - Intégration mécanique
 - excellente conductibilité thermique
 - refroidissement
 - très grande résistivité électrique
 - Courant de fuite faible
 - large spectre de transparence optique (VUV - IR)
 - inertie chimique (compatibilité biologique)
 - Radio-résistant
 - rapide
- Contraintes
 - Pas de dopage
 - Pas d'industrie sous-jacente
 - Développement couteux et contraignant
 - R & D en cours



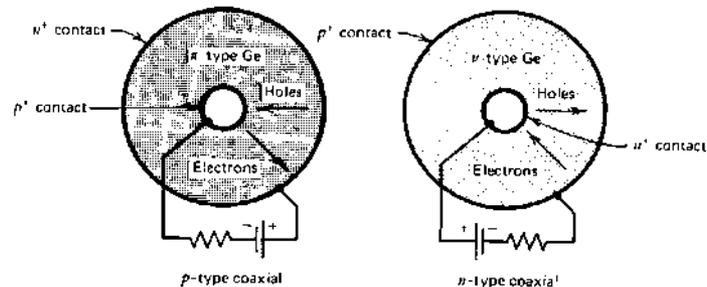
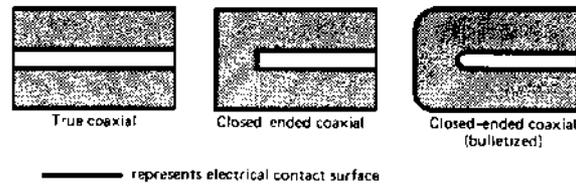
Monitoring de faisceau
Super LHC

Diamants: Employés lorsque la radiotolérance est le paramètre le plus important

Spectroscopie gamma: détecteurs au Germanium

- But
 - Mesurer l'énergie de γ
 - (typiquement plage 1 keV – 10MeV)
- Il faut absorber totalement la particule incidente
 - Il faut un volume (X_0) suffisant
 - Le silicium ne permet pas de fabriquer des détecteurs ayant une zone active $> \sim$ qqs mm
- Un autre S.C. le permet:
 - Le Germanium
 - Détecteur \sim qq cm
 - Peut absorber $> \sim$ qqs MeV
 - Excellente résolution en énergie
 - Doit être refroidi (N2 liquide)
 - excitation thermique des e- de Valence \Leftrightarrow bruit

Germanium: mesure d'énergie

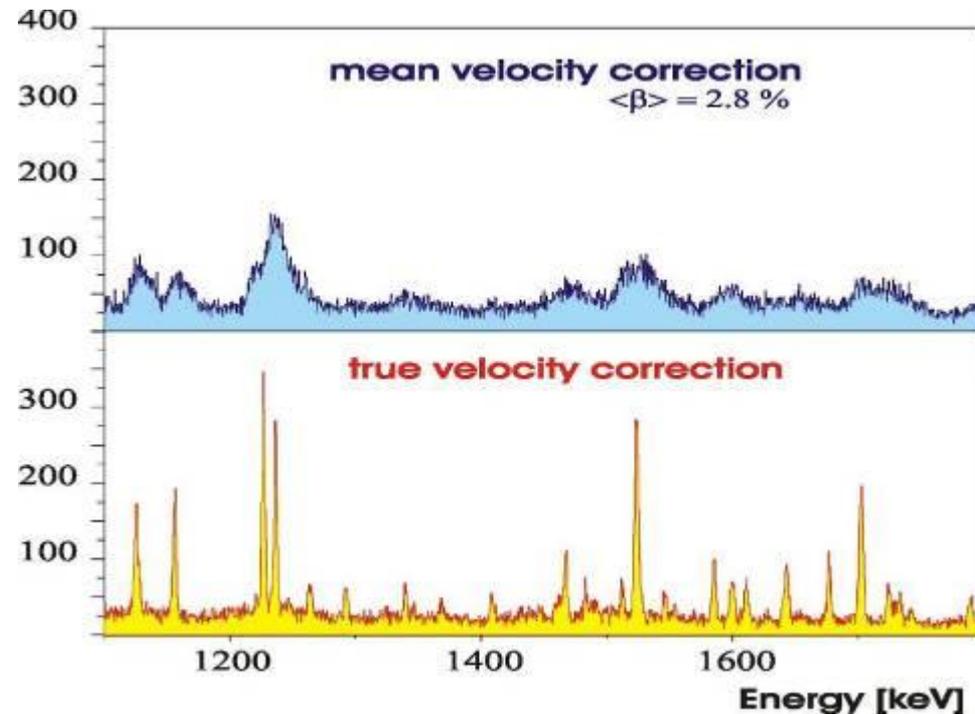
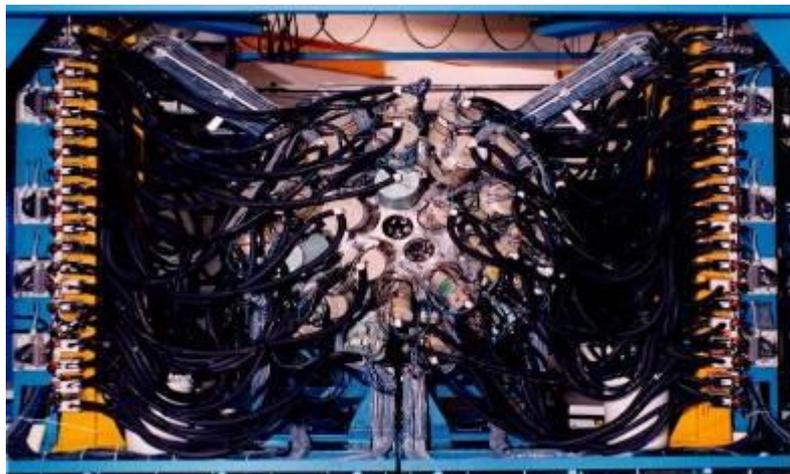
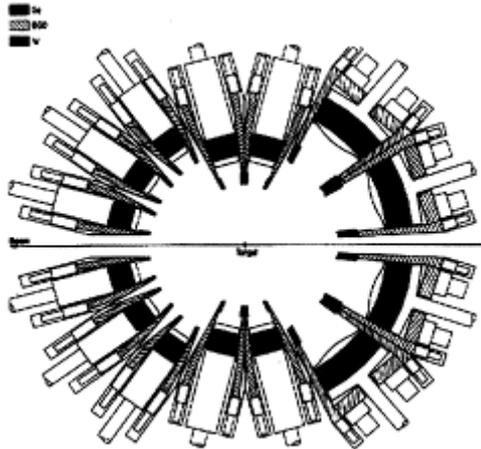


Application: spectroscopie γ 4π

γ -detector array EUROBALL
(239 Ge detectors)



Etude des noyaux super déformés



Refroidissement azote liquide
Sensibilité au radiation
Résolution $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$

Résolution en énergie

- Fano factor Ge – Si : 0.115 – 0.13

Charge Carriers Creation

The number of charge carriers created inside detector active volume after absorption of energy E depends on the material parameter w , which is an average energy needed for creation of one pair of charge carriers.

$$N = E/w$$

The intrinsic energy resolution:

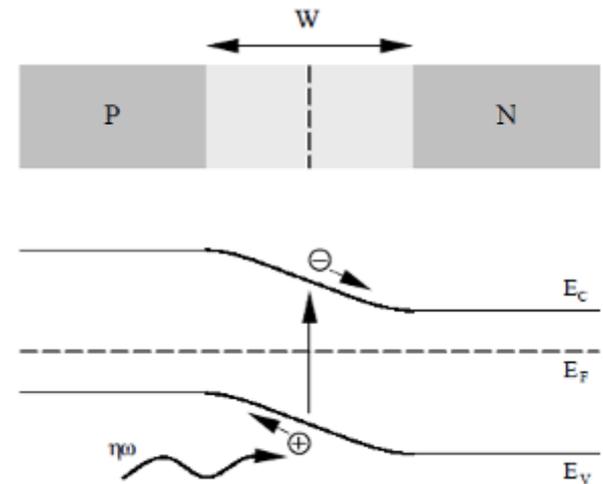
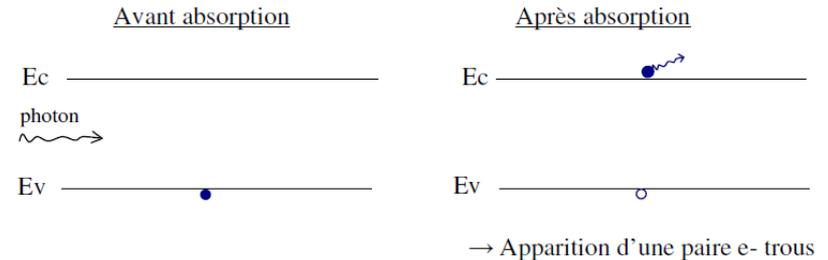
$$R = 2.35 \frac{\Delta N}{N} = 2.35 \sqrt{\frac{Fw}{E}}$$

where F is the **Fano Factor** (on the order of 0.12 in silicon)

Photodiodes

- But:

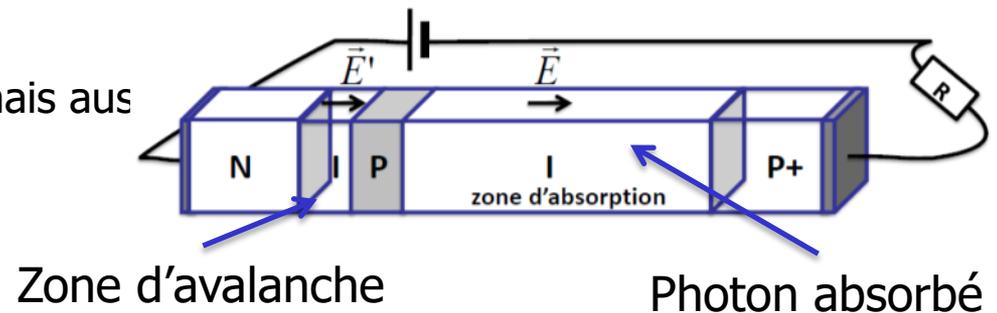
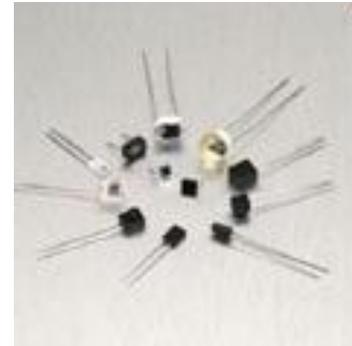
- détection de photons (IR/visible/UV)
 - Conversion de lumière en signal électrique
- Excitation par le photon d'un e- de valence vers la bande de conduction
 - L'e- créé est accéléré par le champs électrique et migre vers la jonction P, le trou migre vers la jonction N.



Photodiodes à avalanche

- Principe:

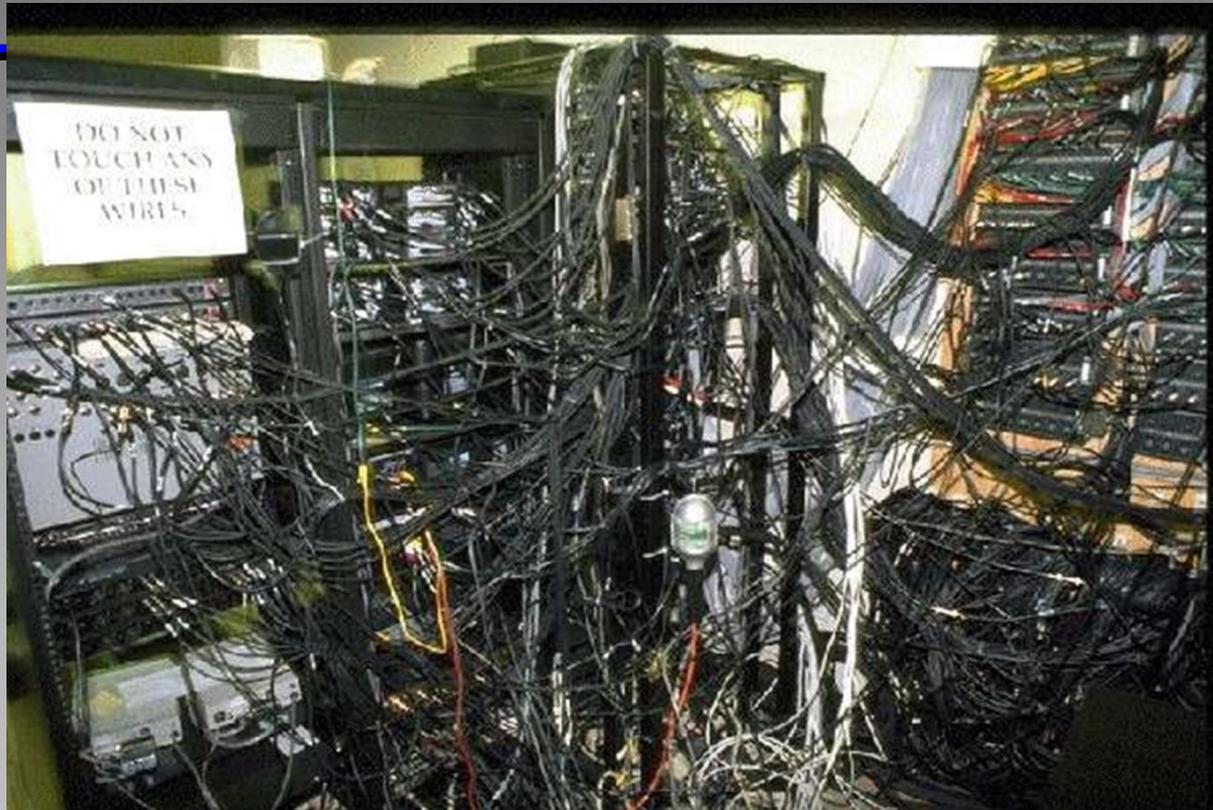
- Jonction PN fortement polarisée en inverse
 - Utilisation de la zone de déplétion
 - Collisions dans le cristal, et nouvelles ionisations
 - Phénomène d'avalanche (x 100)
 - Temps de réponse très court
 - Sensibilité au photon unique
 - Amplification interne du signal mais avec du bruit.



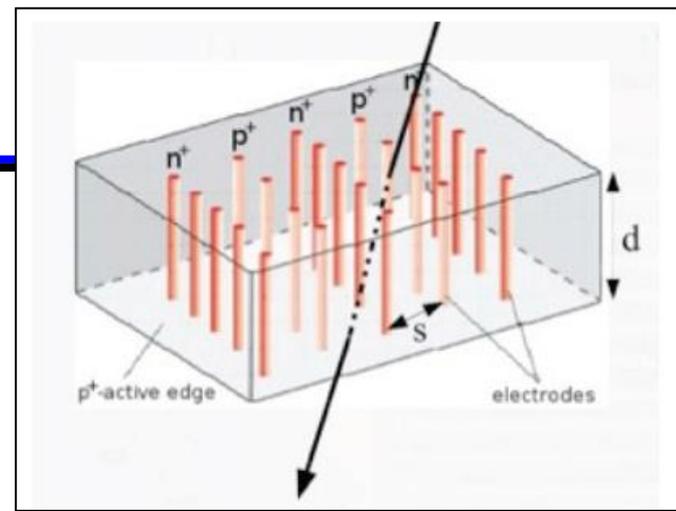
- Télécommunications optiques lorsque le rapport S/B est limité par le bruit d'amplification

Photodiodes à avalanche: amplification au plus près du signal

Autres R & D



Senseurs 3D



- Motivations: upgrades LHC (idée ~ 1985)

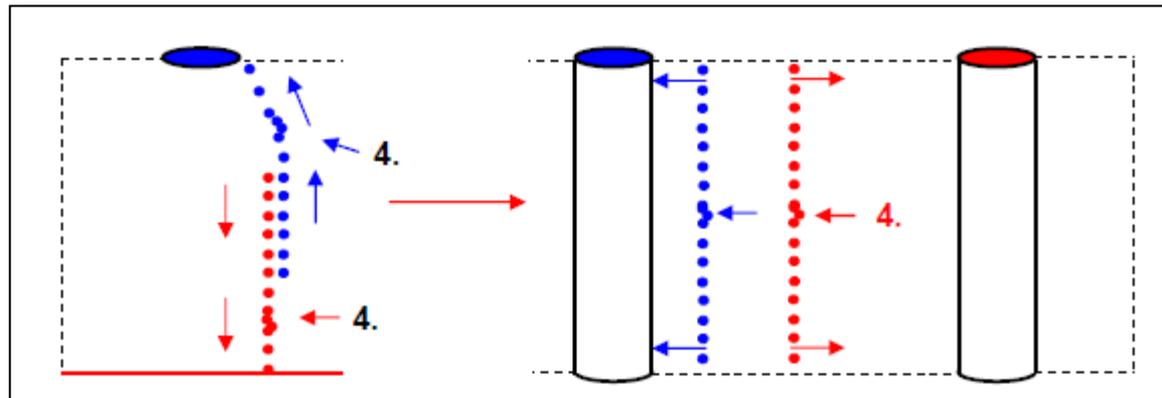
- Principe

- Maillage vertical des électrodes (p+ / n+)
 - Dans la partie sensible
- Dérive latérale des charges
 - Epaisseur de la couche active non reliée à la distance de collection !
 - Distance de dérive fixée par l'espacement entre les électrodes
 - Temps de collection des charges réduit (qqns)
 - Tension de déplétion réduite
 - Détecteurs épais possible : ↑ signal (autre application: X-rays)
 - Partage des charges entre les voies de lecture réduit
- Radiorésistance potentielle élevée

- Limitations

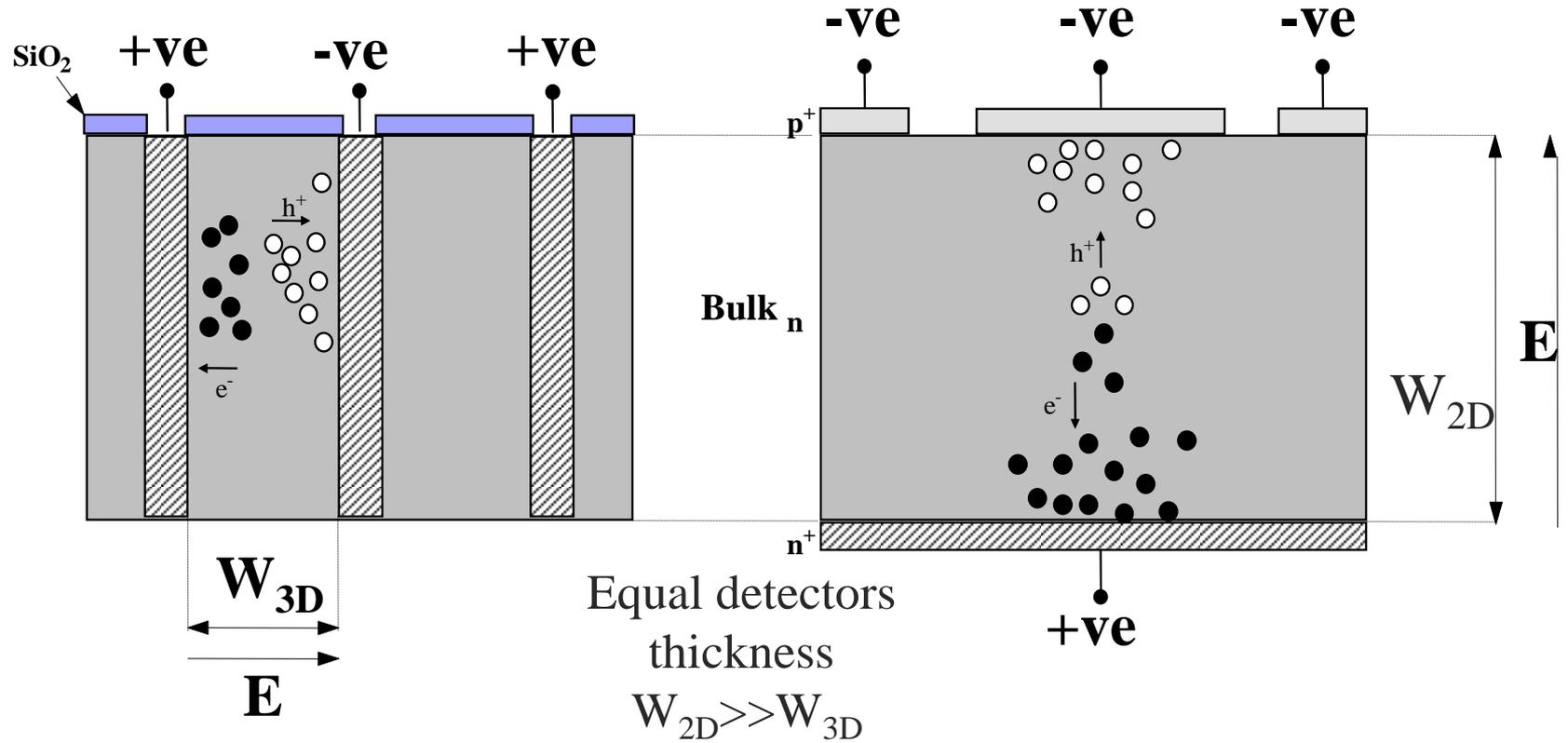
- Technologie non standard

- R & D très active



Senseur 3D: Découpler épaisseur active et distance de dérive

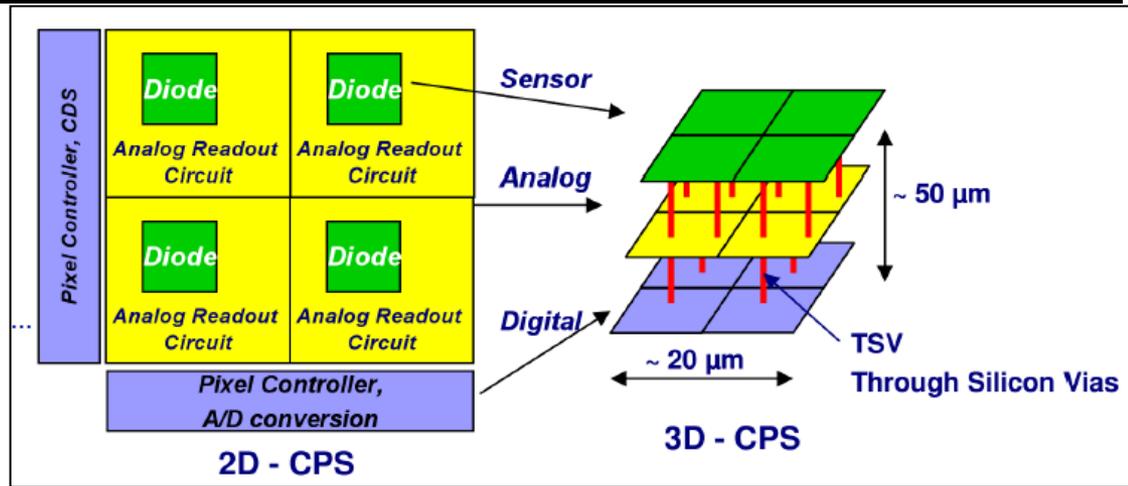
Senseurs 3D: vue en coupe



Le long terme: les technologies 3D

- Idée:

- Détecteur
- Traitement analogique
- Traitement numérique
- Transfert des données



➤ Choisir le meilleur procédé de fabrication pour chaque étape

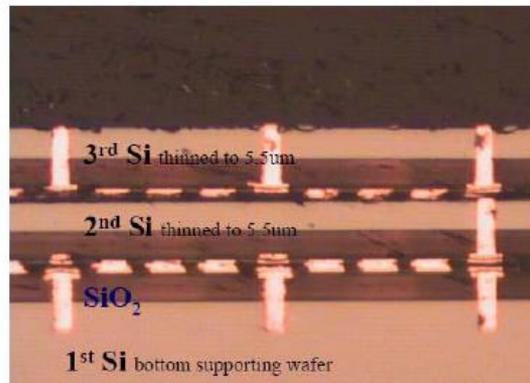
- Avantage

- 100 % d'acceptance (pas de chips dans la périphérie)
- Meilleure intégration (vitesse, traitement des données, etc.)

- R & D

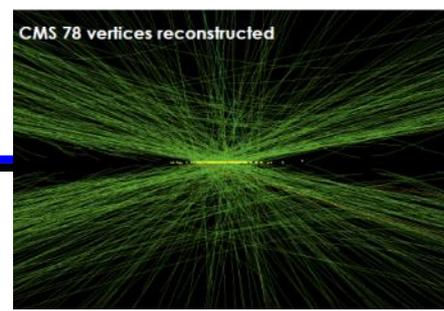
- connectique
- Budget de matière (vias, etc.)
- Puissance consommée

➤ Long terme



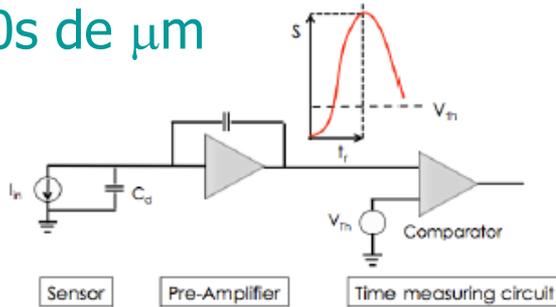
Nous serons tous 3D en 2030 (?)

LGAD (Low Gain Avalanche Detector)



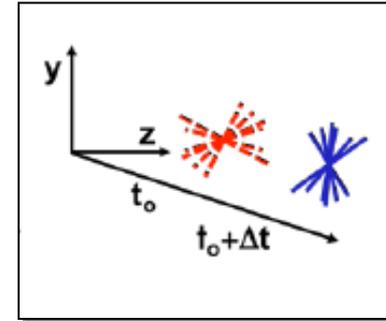
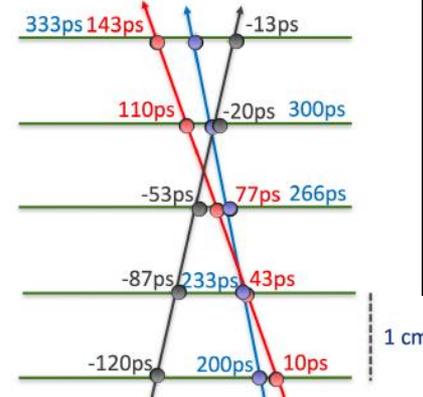
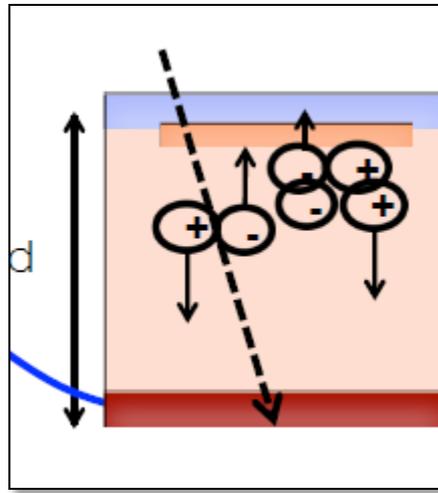
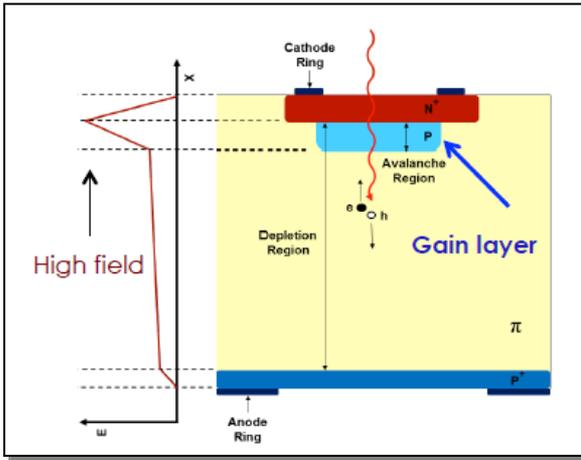
- Défi du 4D \Rightarrow information temporelle ultra-précise
 - ~ 10 s ps \Rightarrow quelques 10s de μ m

$$\frac{dV}{dt} \propto \frac{G}{d}$$



$$\sigma_{\text{Jitter}} \approx N / (dV/dt) \approx t_{\text{rise}} / (S/N)$$

- Maximiser le rapport Amplitude (S) / temps de montée (t_r)

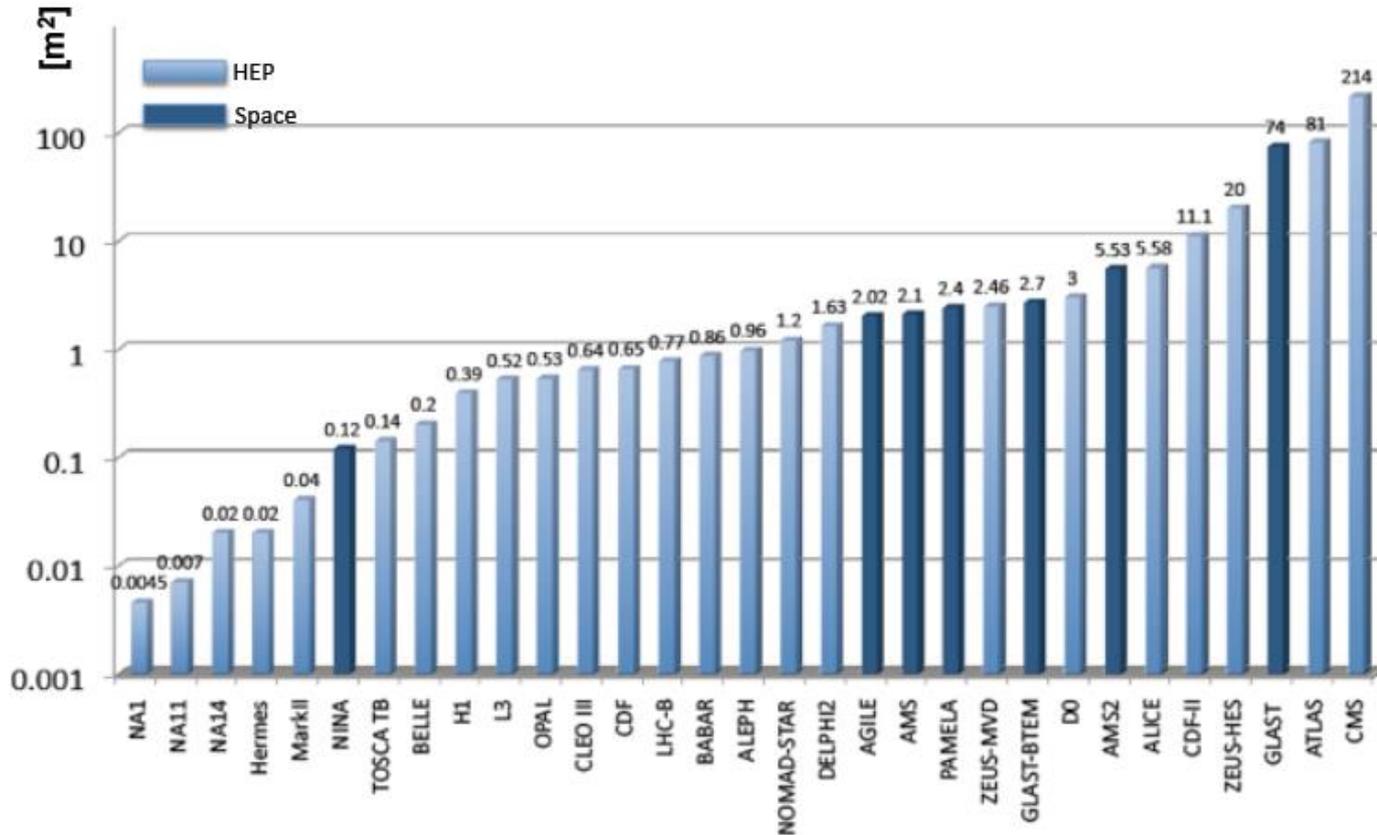


Fort gain (avalanche) + faible épaisseur \Rightarrow information temporelle

Surface des détecteurs

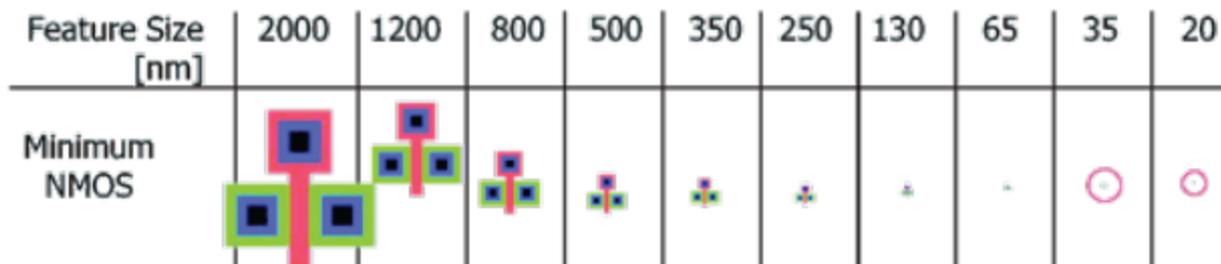
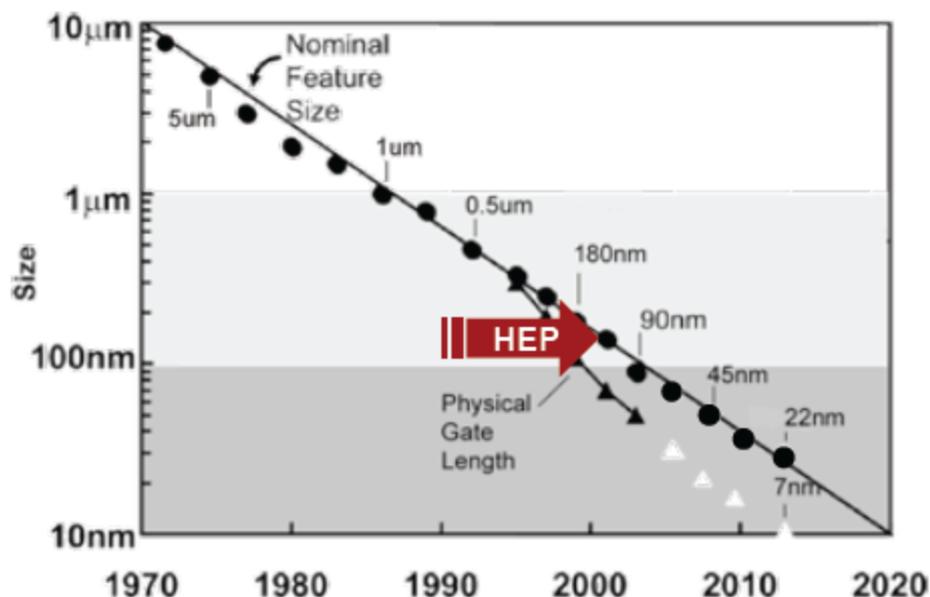


SILICON DETECTOR SIZE 1981 - 2006



INDUSTRY SCALING ROADMAP

- New generation every ~2 years with $\alpha = \sqrt{2}$
- from 1970 (8 μm) to 2013 (22 nm) (industrial application)
- End of the road ? Power dissipation sets limits
- HEP nowadays at 90nm and 130nm
- Problem: by the time a technology is ready for HEP -> "old" in industry standards



R&D: Cas du détecteur de vertex pour l'ILC (International Linear Collider)



Un S.C. peut être caractérisé par...

- Caractéristiques
 - Rapport S/N
 - Granularité (pitch)
 - Budget de matière
 - Vitesse de lecture / taux d'occupation / séparation des impacts voisins
- Performances (facteur de mérite)
 - Efficacité de détection (lié au S/N)
 - Résolution (spatiale ou énergie)
 - Taux de fantômes (faux impacts)
- Robustesse / contraintes
 - Résistance aux radiations
 - Intégration mécanique, connectique
 - Refroidissement / Puissance dissipée
 - Coût, facilité de production

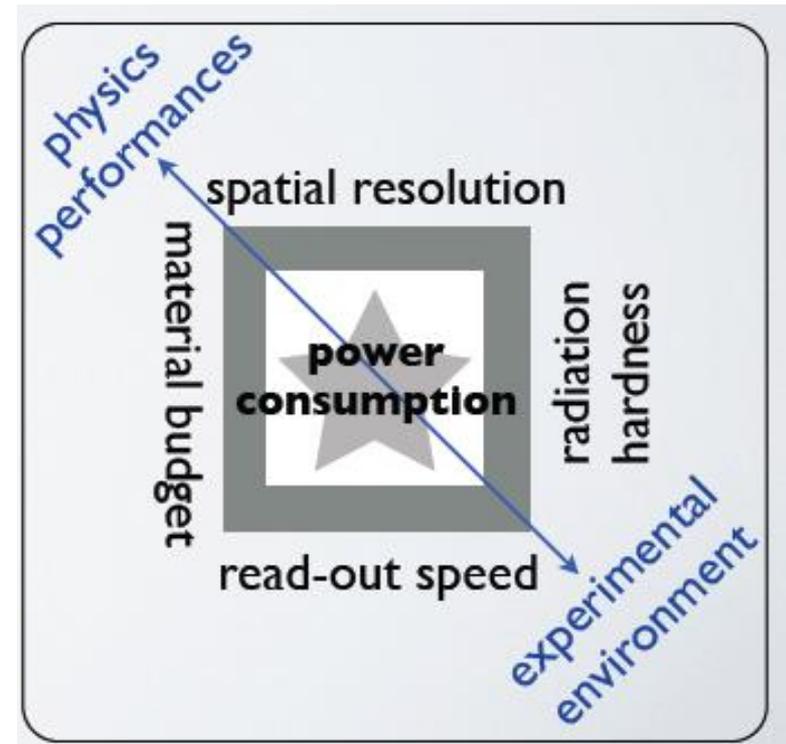
Règle générale:
Bien définir le cahier
des charges

Défis de la R&D en physique des particules

- Environnement expérimental
 - Flux de particules
(y compris bruit de fond machine)
 - Radiorésistance
 - vitesse de lecture + flux de données
 - Puissance dissipée

- Performances de physique
 - Etiquetage des saveurs - vertexing
 - Résolution spatiale
 - Budget de matière

- Performances ultimes
 - Ne peuvent être atteintes toutes en même temps
 - Hiérarchiser les priorités
 - Aucune technologie n'est la mieux adaptée à toutes les conditions
 - Motivations pour une R & D active

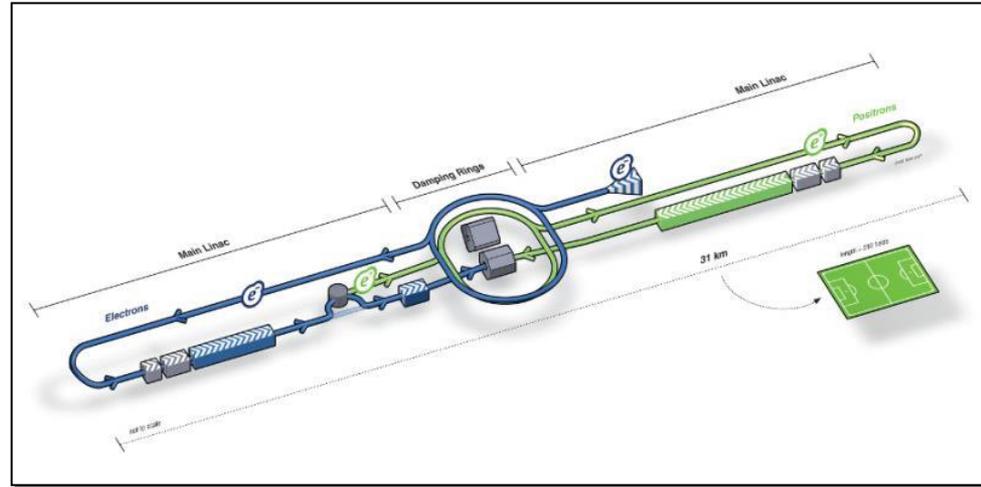


**Règle générale:
améliorer un paramètre
en dégrade
généralement un autre**

International Linear Collider (ILC)

ILC:

- e^+e^- linear collider
- 31 km linear tunnel
- Baseline: $\sqrt{s} = 250$ GeV
 - Upgrade: 500 GeV, 1 TeV
- 2 detectors in « push pull »
 - only one collision point
 - ILD and SiD
- Luminosity:
 - $1.8 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - 500 fb^{-1} (4 years)
- Polarisation: $e^- = 80\%$; $e^+ = 30\%$ (upgrade 60%)



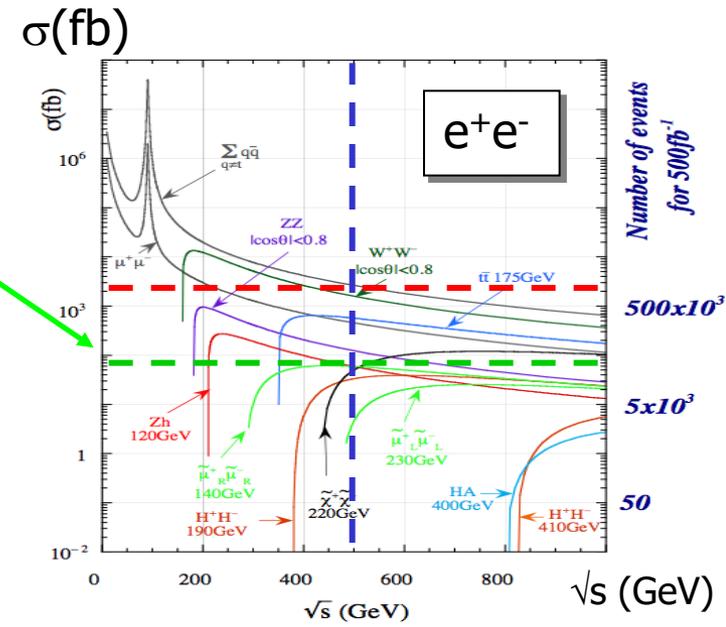
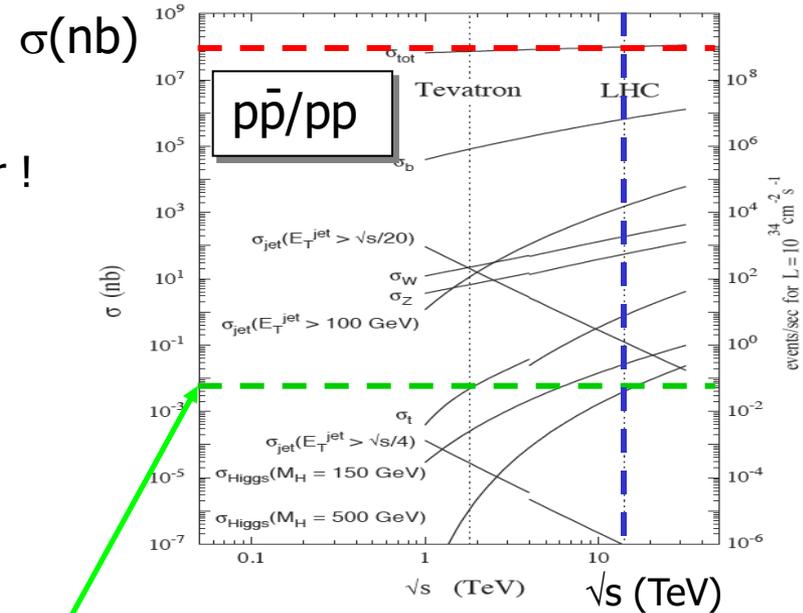
Brief history and prospects

- First studies in 80^s
- 2005: choice of accelerator technology (cold)
- 2007: ILC Reference Design Report (RDR)
- 2009: Letter Of Intent (LOI) of ILC detectors : **ILD & SiD**
- 2012: Accelerator TDR and Detector Baseline Document (DBD)
- 2013: Japan chose a potential site that could welcome ILC @ Kitakami (Sendai)
- ~2018: Japan expected to express its official interest to build the ILC
- ~2018-20 ? Negotiations between all regions
- ~2021 ? construction works begin
- ~2030: First collisions ?

Premier feu vert ~ fin 2018
Décision définitive 2-3 ans plus tard

ILC Running conditions

- Key features of ILC (physics)
 - Clean environment
 - no QCD background \Rightarrow no pile up, no trigger !
 - well kown initial state
 - all channels fully reconstructable
 - Precise theoretical predictions
 - radiative corrections O(1%) level
 - theoritical uncertainties O(0.1%) level
 - Tunable \sqrt{s}
 - threshold scans, flexibility
 - Beam polarisation to enhance S/N
 - Democratic cross sections
 - Higgs event production @ LHC : 1 evt / 10^{10}
 - Higgs event production @ ILC : 1 evt / 10^2
 - Globally small ($\sigma_{ZH} \sim 100$ fb)
 - \Rightarrow study all channels (even fully hadronics)

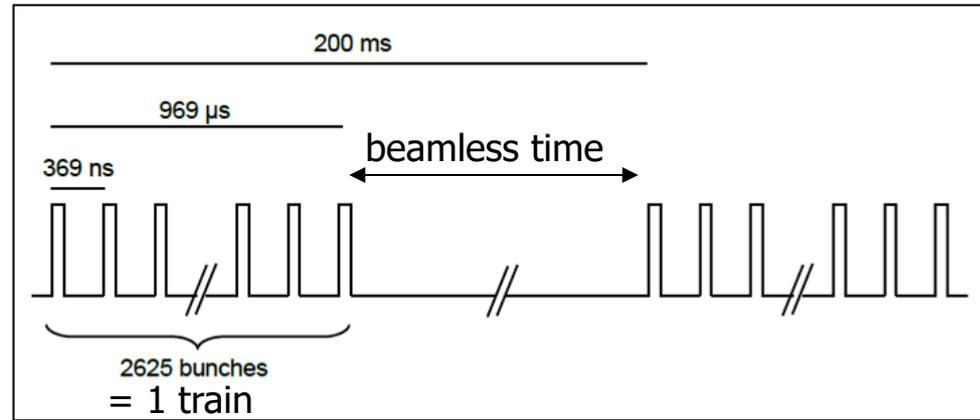


Moins d'aiguilles et beaucoup moins de foin

ILC experimental conditions

Beam structure

- 5 trains/s of ~ 2600 bunches
- 1 bunch every ~ 300 ns
- « Quiet time » of ~ 200 ms (between each train)
- Consequences on read-out
 - No trigger, power pulsing, cooling
 - Possible read-out during beamless time



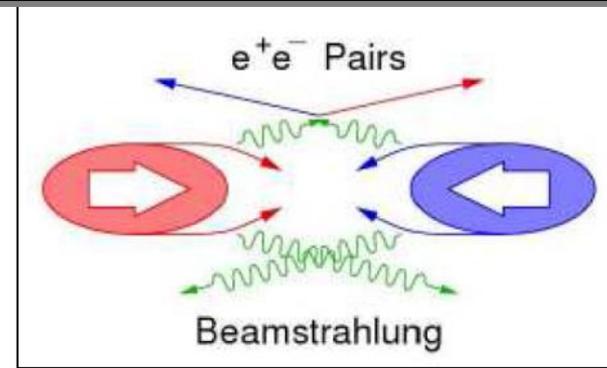
Beam background :

- Beamstrahlung: RMS energy loss:
 - $\delta_{BS} \sim 1\%$ @ $\sqrt{s} = 250$ GeV
- Drives occupancy :
 - Read-out speed, Inner radius
 - Physics cross section: $e^+e^- \rightarrow qq\bar{q}$ ~ 1 evt/s \Rightarrow negligible
- Drives radiation level
 - Moderate (compared to LHC)
 - Vertex detector 1st layer: $O(100)$ kRad/yr & $O(10^{11})$ $n_{eq}(1\text{MeV})/\text{cm}^2/\text{yr}$
- Required tiny flat bunches
 - $x \sim 500$ nm, $y \sim 5$ nm

Bunches have electric space charge

\Rightarrow particles deflected

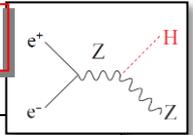
\Rightarrow photons emissions ("beamstrahlung")



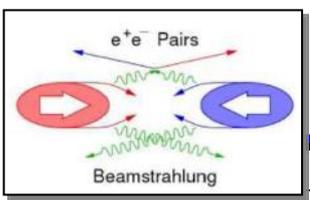
Background typical value (layer 1)

~ 5 hits/ cm^2/BX

$$\sigma_b < 5 \oplus 10/p\beta \sin^{3/2} \theta \text{ } \mu\text{m.}$$



Reminder: ILC VXD requirements



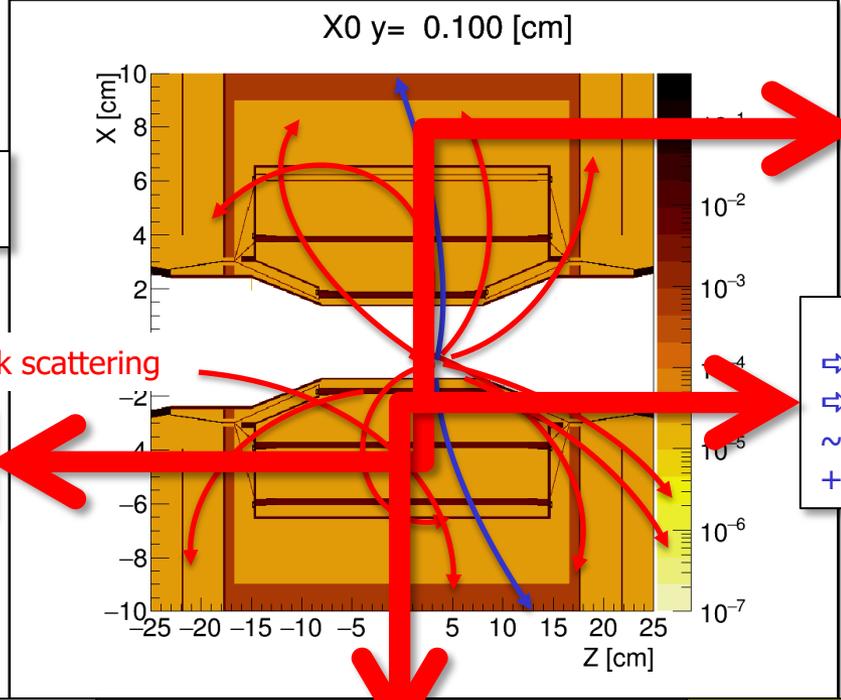
Beam background

Radiation hardness
 $O(100\text{kRad/an})$ & $O(10^{11})\text{neq/an}$
Rad.Tol. devices

Read-out speed
 $O(1-10 \mu\text{s})$

Power consumption
 $\sim < 50\text{mW/cm}^2$
Fast read-out & low Power architectures

Physics ($< \text{Hz/cm}^2$)
Beam background ($\sim 5 \text{ hits/BX/cm}^2$ on layer 0)



Physics
 \Rightarrow Flavour tagging
 \Rightarrow Low p_T tracks

Vertex reconstruction
 \Rightarrow granularity
 \Rightarrow Pitch $\sim 17 \mu\text{m}$
 \Rightarrow $(\sigma_{sp} \sim 3 \mu\text{m})$

Material Budget
 $\Rightarrow \sim 0.15\% X_0 / \text{layer}$
 $\Rightarrow < 1\% X_0$ for the whole VTX
 $\sim 900 \mu\text{m Si}$
 $+ \sim 0.14\% X_0$ for the beam pipe

Low material detectors & supports structures

Cooling
Stiffness / Alignment

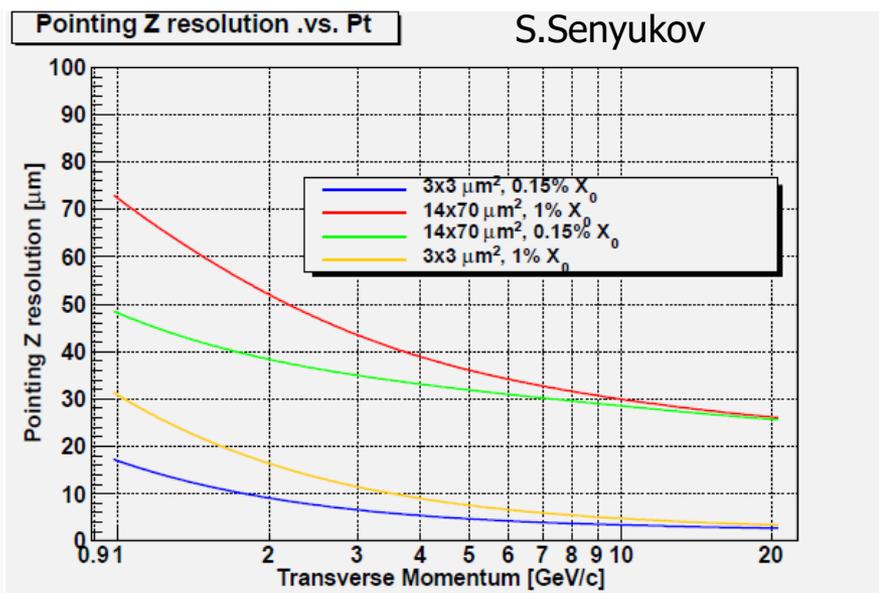
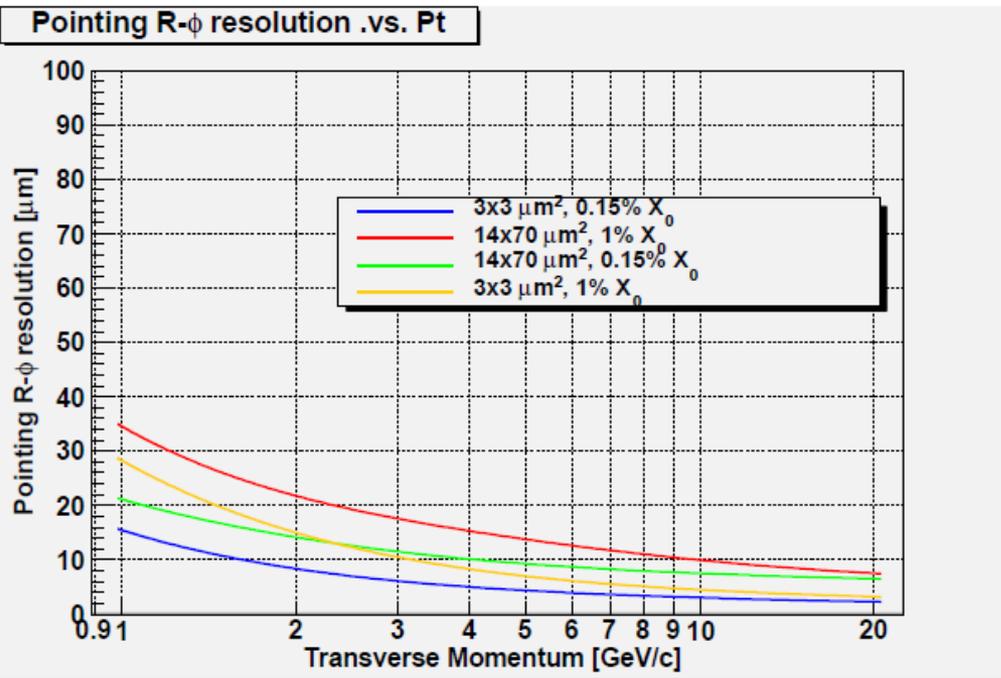
Challenge : meet the requirements all together

Expected Vertex performances (1): pointing resolution

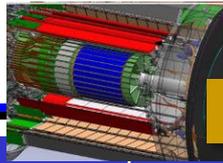
- Compared pointing resolutions

● LC VERTEXING GOAL : $\sigma_{R\phi,Z} \leq 5 \oplus 10 - 15/p \cdot \sin^{3/2}\theta \text{ } \mu\text{m}$
 ▷ LHC: $\sigma_{R\phi} \simeq 12 \oplus 70/p \cdot \sin^{3/2}\theta$

- ILC baseline
- ILC mat.budget/layer 0.15% $X_0 \Rightarrow 1\%X_0$
- ATLAS-IBL
- ATLAS-IBL with ILC mat.budget

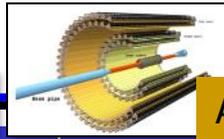


Evolving CPS



ULTIMATE

STAR-PXL



ALPIDE

ALICE-ITS



MIMOSIS

CBM-MVD

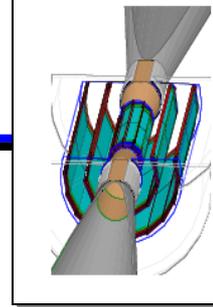
PSIRA proposal

ILD-VXD



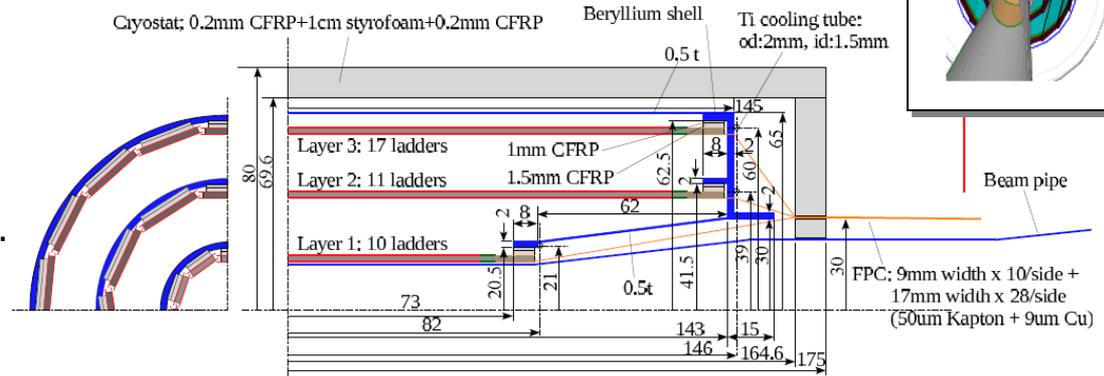
	STAR-PXL	ALICE-ITS	CBM-MVD	ILD-VXD
Data taking	2014-2016	>2021-2022	>2021	>2030
Technology	AMS-opto 0.35 μm	0.18 μm	0.18 μm	0.18 μm (conservative) < 0.18 μm ?
	4M	HR, $V_{\text{bias}} \sim -6\text{V}$ Deep P-well	HR, Deep P-well	?
Architecture	Rolling shutter + sparsification + binary output	Asynchronous r.o. In pixel discri.	Asynchronous r.o. In pixel discri.	Asynchronous r.o. (conservative)
Pitch (μm^2) / Sp. Res.	20.7 x 20.7 / 3.7	27 x 29 / 5	22 x 33 / <5	~ 22 / ~ 4
Time resolution (μs)	~ 185	5-10	5	1 - 4
Data Flow		$\sim 10^6$ part/cm ² /s Peak data rate ~ 0.9 Gbits/s	peak hit rate @ 7×10^5 /mm ² /s >2 Gbits/s output (20 inside chip)	~ 375 Gbits/s (instantaneous) ~ 1166 Mbits / s (average)
Radiation	O(50 kRad)/year	2×10^{12} n _{eq} /cm ² 300 kRad	3×10^{13} n_{eq}/cm²/yr & 3 MRad/yr	O(100 kRad)/year & O(1×10^{11} n _{eq} (1MeV)) /yr
Power (mW/cm ²)	< 150 mW/cm ²	< 35 mW/cm²	< 200 mW/cm ²	~ 50 -100 mW/cm ²
Surface	2 layers, 400 sensors, 360x10 ⁶ pixels 0.15 m ²	7 layers, 25x10 ³ sensors > 10 m²	4 stations Fixed target	3 double layers 10 ³ sensors (4cm ²) 10 ⁹ pixels ~ 0.33 m ²
Mat. Budget	~ 0.39 % X_0 (1st layer)	$\sim 0.3\%$ X_0 / layer		~ 0.15 -0.2 % X_0 / layer
Remarks	1 st CPS in colliding exp.	(with CERN)	Vacuum operation Elastic buffer	Evolving requirements

ILD: Vertex detector



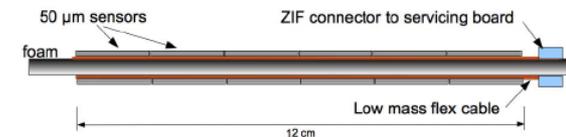
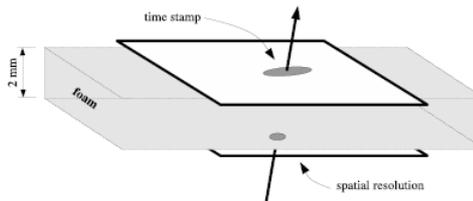
Layout (DBD geometry):

- Long Barrel approach
- Radius: ~15 mm – 60mm
- 3 x double sided ladders
 - Optimize material budget / alignment.
 - Stand alone tracking improvement
 - Background tagging capabilities
 - Small pixels: 22 x 22 μm^2 (or 17-18)
 - Binary charge encoding
 - Read-out time ~ 1-4 μs
 - $\sigma_{\text{sp}} \sim 4 \mu\text{m}$
 - Puissance instantanée ~ 300 W



	R (mm)	$ z $ (mm)	$ \cos \theta $	σ (μm)	Readout time (μs)
Layer 1	16	62.5	0.97	2.8	50
Layer 2	18	62.5	0.96	6	10
Layer 3	37	125	0.96	4	100
Layer 4	39	125	0.95	4	100
Layer 5	58	125	0.91	4	100
Layer 6	60	125	0.9	4	100

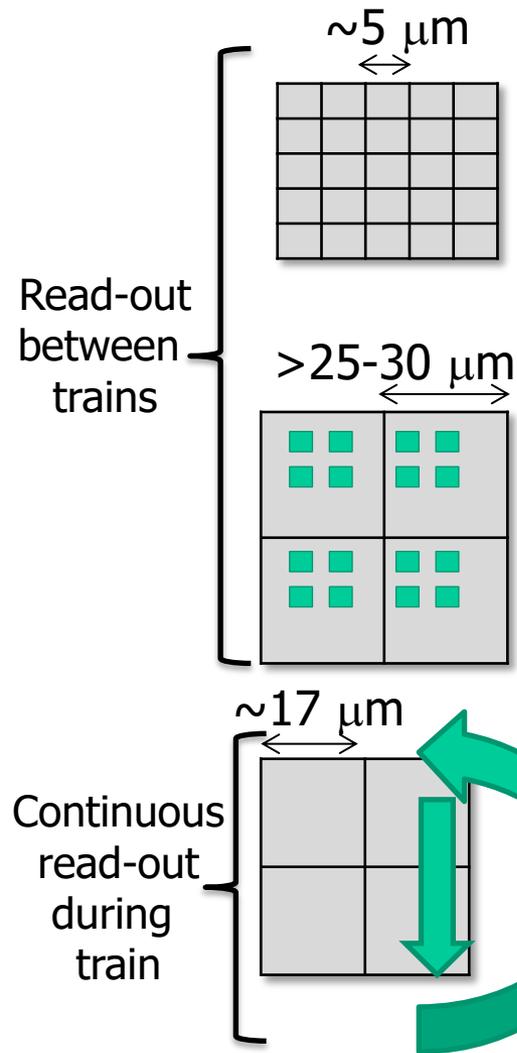
$$\sigma_b < 5 \oplus 10/p\beta \sin^{3/2} \theta \mu\text{m}.$$



Stratégies de lecture

- Comment garder la résolution voulue et tenir compte du taux d'occupation ?
 - 3 stratégies:
 - Lire entre les trains (chronopixels \Rightarrow mémoires)
 - Lire assez vite (CMOS, DEPFET)
 - Etre extrêmement granulaire et lire après les trains (FPCCD)

Read-out strategies vs resolution/occupancy

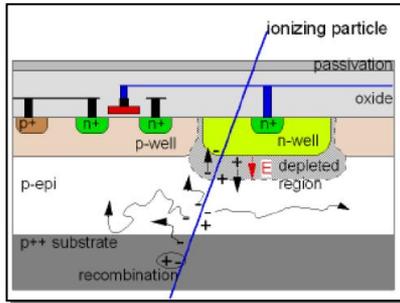


Power	Time resolution	Spatial resolution	Advantages	Caveats
Fine pixels (e.g. FPCCD)				
Low	1 complete train	~ 1 μm	Spatial Resolution Hit separation Beam background tagging capabilities ? (cluster shapes)	⇒x16 #pixels to read-out in 200ms ⇒ No time stamping ⇒Occupancy issues ?
In pixel circuitry to store hits with time stamping (e.g. chronopixels, SOI)				
Low	Single or few bunches ($> \sim 0.5 \mu\text{s}$)	$> \sim 5 \mu\text{m}$	Hit time stamping Well suited to outer layers	⇒ BX time stamping storage in conflict with granularity
Continuous read-out during train (e.g. DEPFET, CMOS): rolling shutter or priority encoding.				
High	Few to 10s bunches (5-50 μs)	~ 3 μm	Time & spatial resolution compromise	Power cycling mandatory ? ⇒F(Lorentz) ~ 10 ^s grams ⇒Distribute 100s Amps shortly before train ⇒heat cycles the ladders.

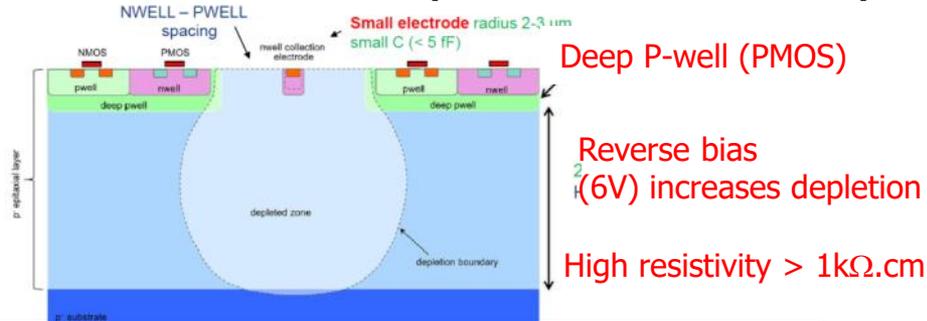
- ⇒ Figures may evolve significantly with R&D and access to new technologies e.g. feature size ⇒Power, read-out speed, granularity, etc.
- ⇒Different options / room for mixed strategies ? e.g. double sided ladders: 1-fast / 1-precise

Long term: CMOS is an evolving technology

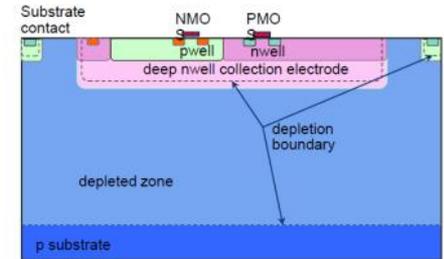
Classical CMOS



State of the art (ALPIDE & MIMOSIS)



HV-CMOS



- ~100 V
- High capa
- Large pixels
- Full depletion
- Radiation hardness
- ⇒ Not suited for ILC

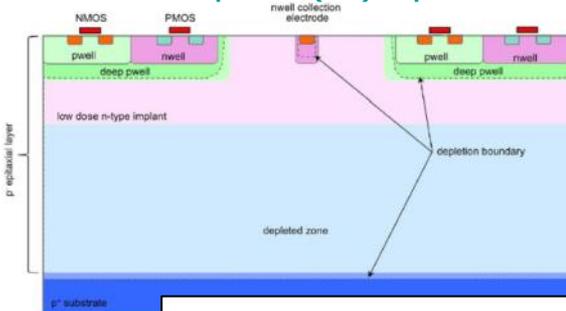
Monolithic Pixel Developments - T. Kugathasan - ACES 2018 - CERN - 25/04/2018

- Explore smaller feature sizes 180 nm ⇒ 110 nm or even 65 nm.
 - Motivations
 - Smaller pixel dimensions & faster read-out
 - Reduced power consumption

⇒ Smaller feature size offers opportunities to get closer to ILC bunch tagging

- Emerging fast timing perspectives

- New option (TJ) : planar n-implant



⇒ Explored by U.Bonn & CERN: MALTA (for ATLAS)

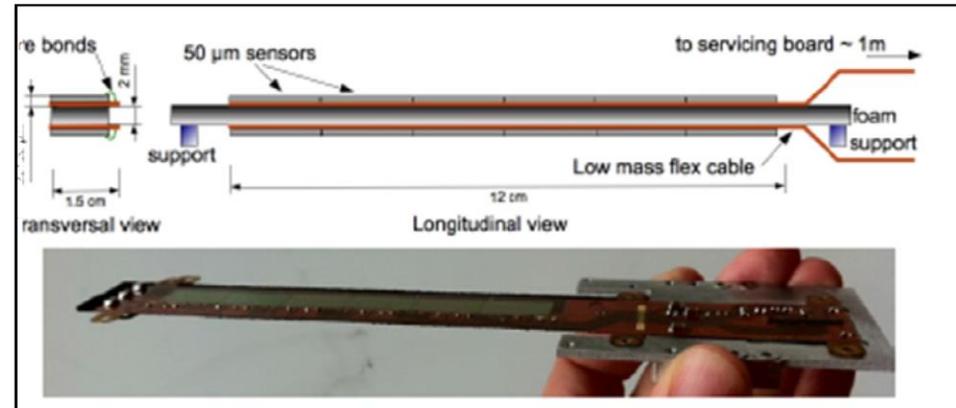
- Full depletion
- Low capacitance ⇒ low power

W. Snoeys et al.
DOI 10.1016/j.nima.2017.07.046

Sensor integration in Ultra Light Devices

- Double sided ladders expected benefits

- Alignment & tracking (pointing)
- Beam background rejection ?
- Material budget, 1 mechanical support
- Redundancy (efficiency)
- Each layer optimized
 - read-out speed vs resolution



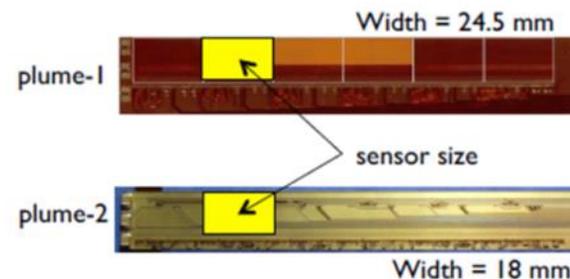
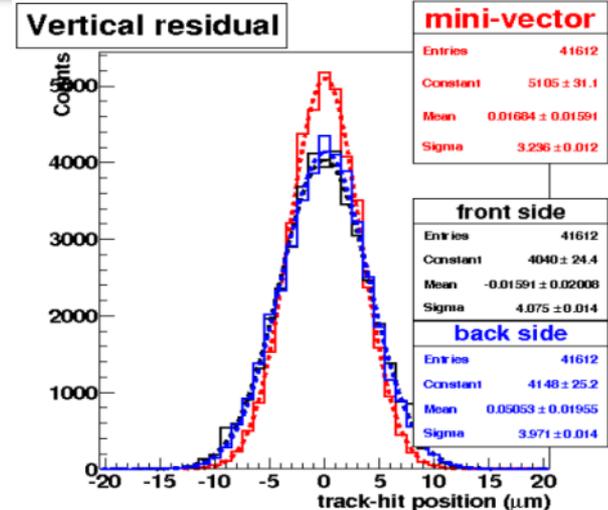
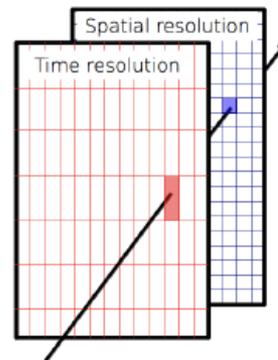
- PLUME coll. (Bristol, DESY, IPHC)

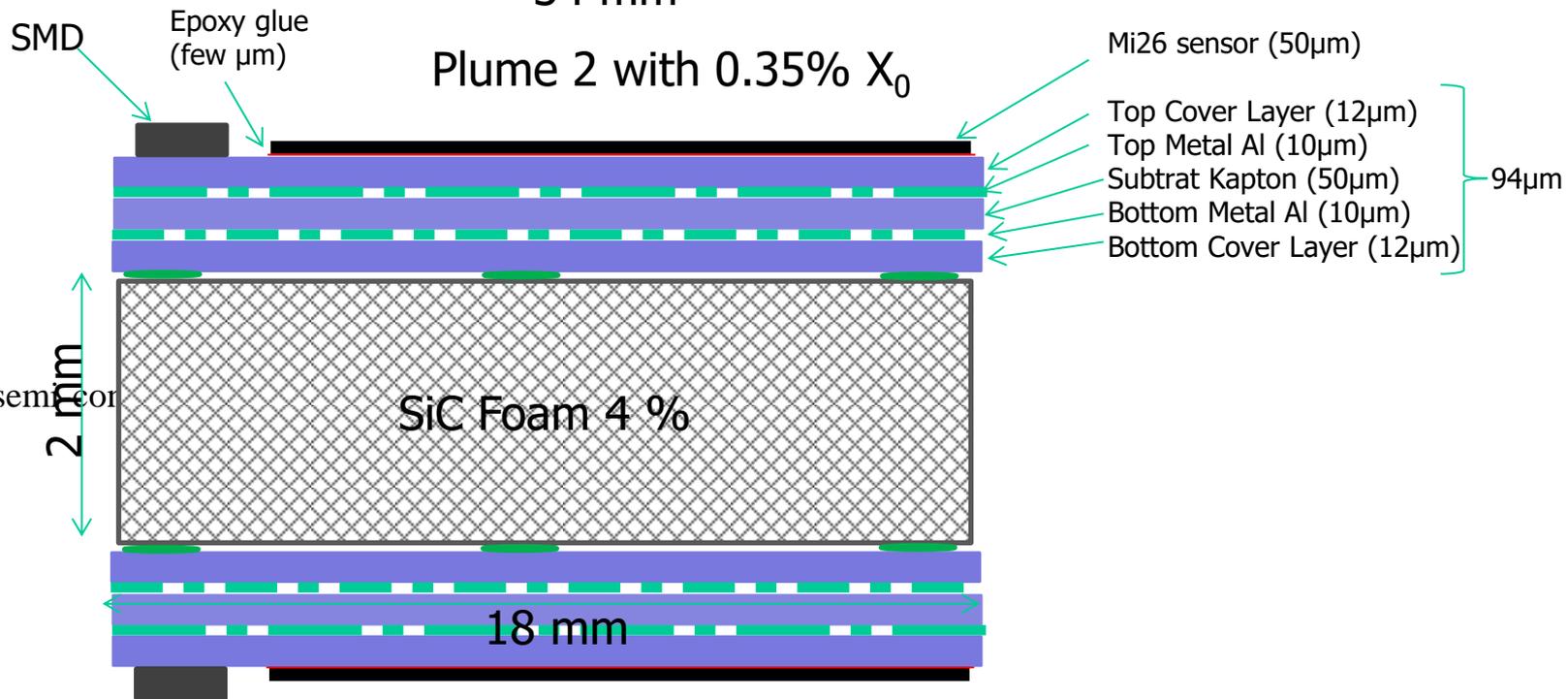
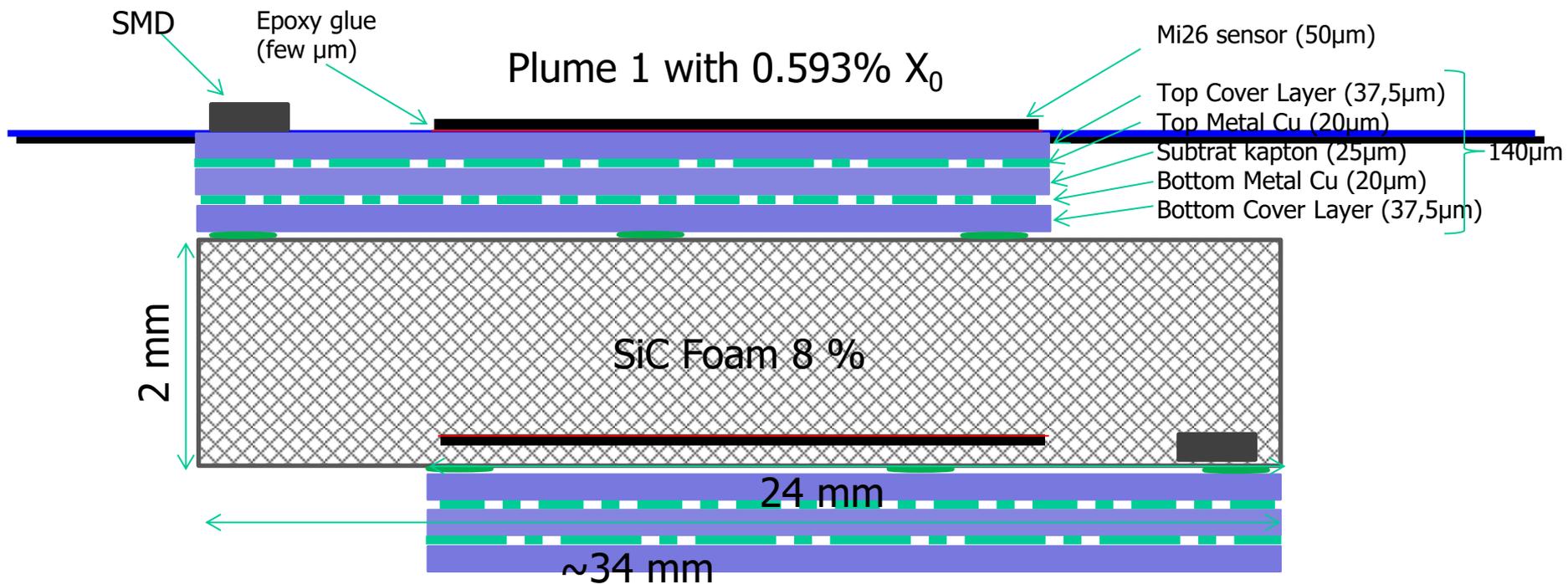
- Plume 01 prototype (<2012)

- Fabricated
 - 2 x 6 Mimosa 26 chips
 - 2 mm low density SiC foam
 - Validated in test beam (2011)
 - Operated with air cooling
 - 0.6 % X_0

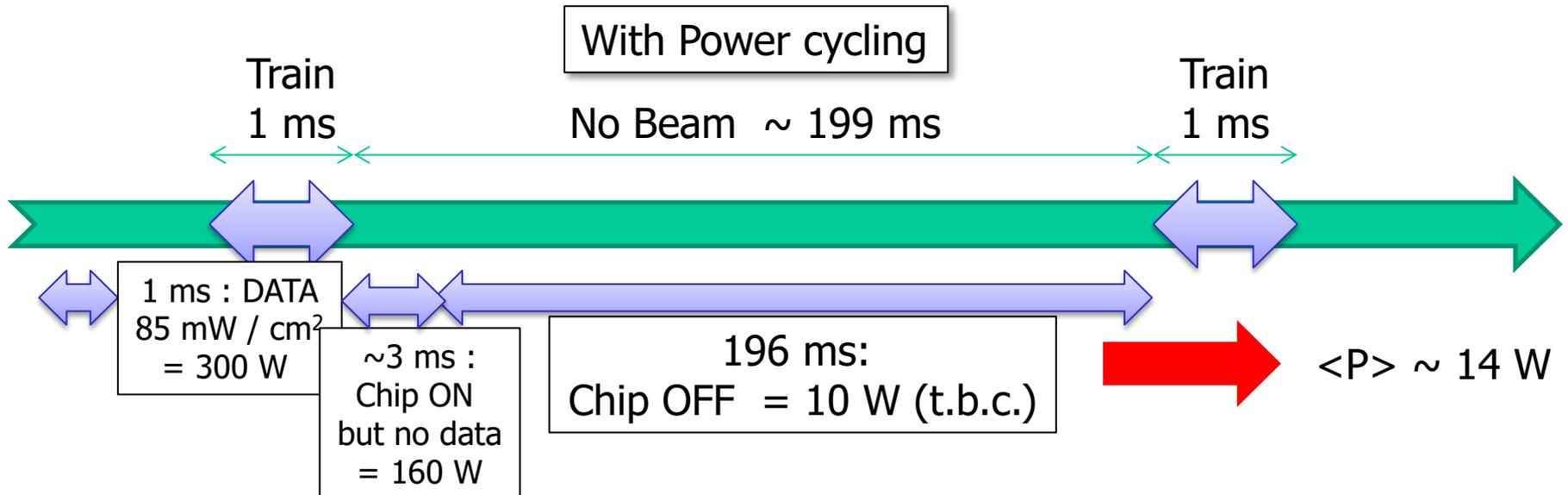
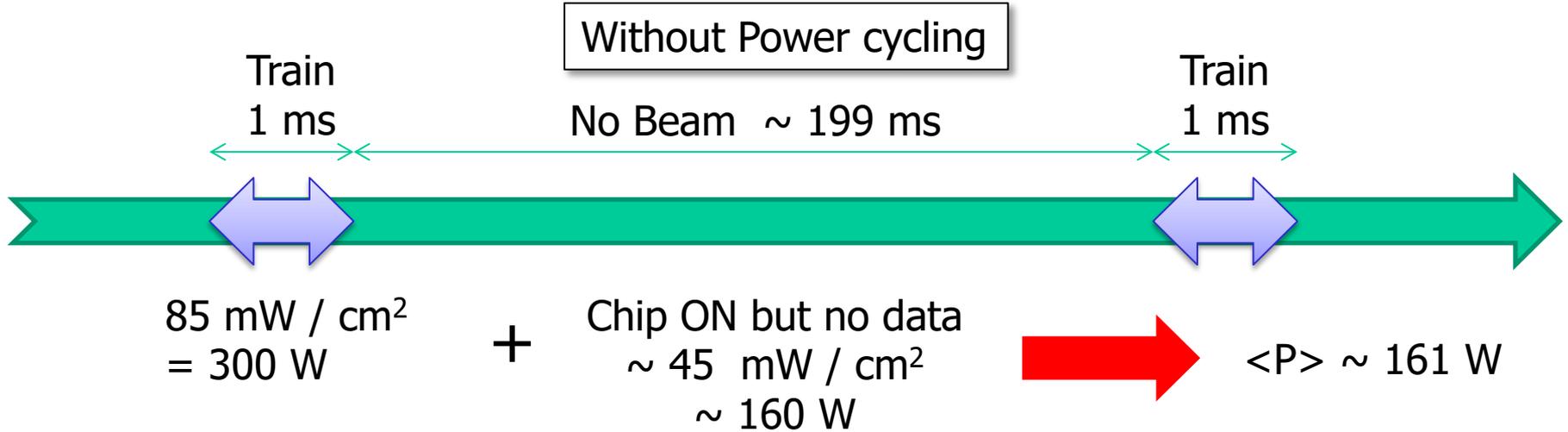
- Plume 02 prototype

- Under construction (spring 2015)
- Reduced mat. Budget
 - Reduced width (24.5 mm \Rightarrow 18mm)
 - Lighter (alu) flex cable, mechanical support
 - 0.6 % $X_0 \Rightarrow \sim 0.35$ % X_0 (cross-section)





Power scheme



Resumé



Détecteurs S.C. : résumé

- Technologies matures après > 30 années de R&D
 - Base industrielle
 - Nombreuses applications dans l'industrie
 - Réduction des coûts
 - Techniques d'assemblages, amincissement
 - Electronique de lecture, intégration
 - Forte expertise nécessaire
 - L'expertise interne existe à l'IN2P3 !
 - Nombreux prototypes et applications existantes
 - Maturité du design
 - Applications
 - Trajectographie, vertexing (physique des particules)
 - Calorimétrie, spectroscopie, identification (physique nucléaire, physique des particules)
 - Imagerie, Spatial, etc.
- Pour chaque application, il existe une solution adaptée mais une longue R&D est généralement nécessaire
- La R & D sera encore active pendant de nombreuses décennies

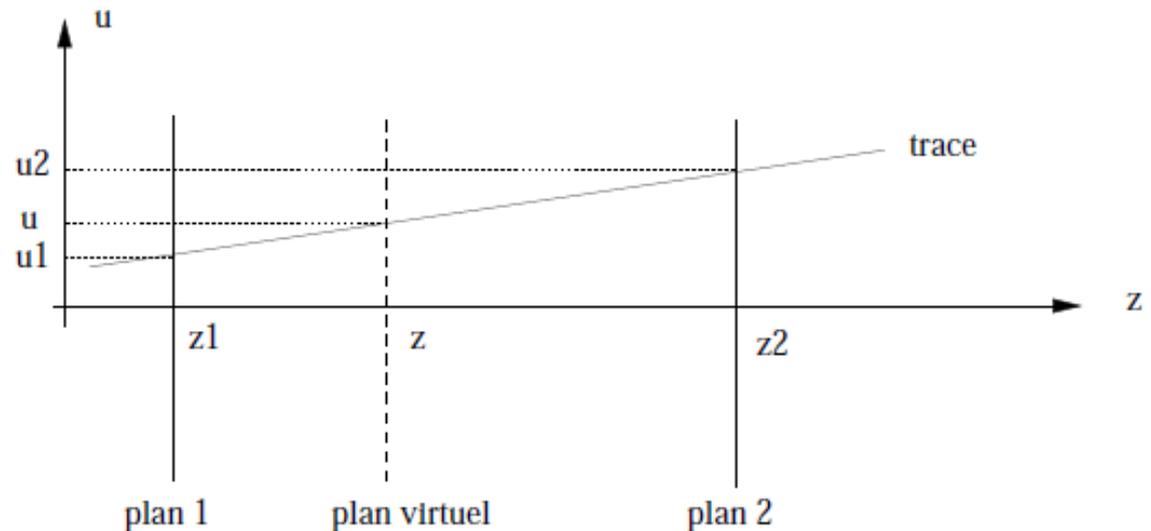
FIN



Exercices

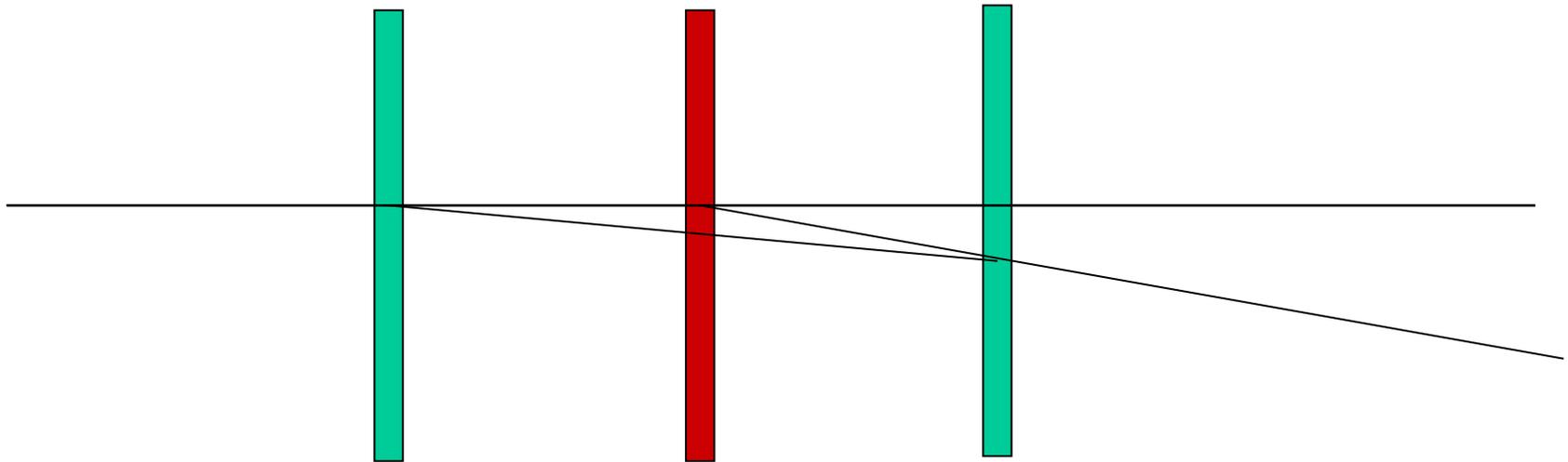
Résolution sur le paramètre d'impact

- On suppose deux plans de détecteurs situés à $Z1$ et $Z2$ de l'origine et de résolutions intrinsèques respectives $\Delta u1$ et $\Delta u2$.
- Pour une particule MIP dont on négligera la diffusion multiple et traversant les deux plans aux ordonnées $u1$ et $u2$, trouver la résolution Δu de la trace extrapolée sur un plan virtuel d'abscisse z et d'ordonnée u .
- Retrouver la formule de la résolution d'un détecteur de vertex cylindrique
- A.N.
 - $\Delta u1$ et $\Delta u2 = 3.5 \mu\text{m}$
 - $Z1 = 1.5 \text{ cm}$
 - $Z2 = 6 \text{ cm}$



Diffusion multiple

- On place 300 μm de silicium entre deux plans de détecteurs ayant une résolution intrinsèque de 2 μm . Les 2 plans de détecteurs sont situés à 10 cm de part et d'autre.
- Evaluer la perte en résolution pour des électrons incidents de 5 GeV à cause de la diffusion multiple.



Évaluation de la dose reçue

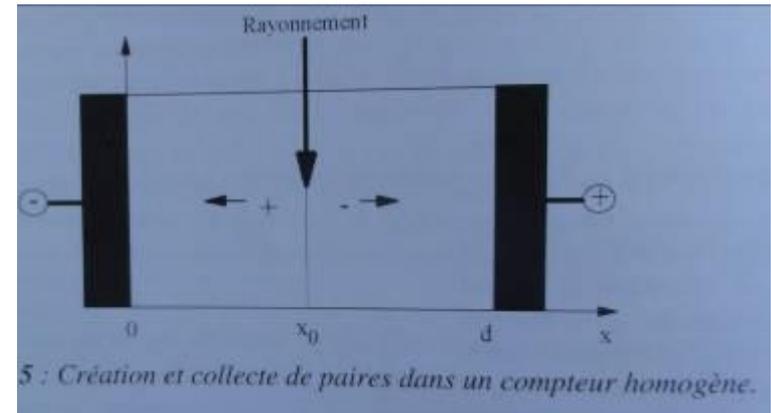
- La première couche du détecteur de vertex du futur collisionneur linéaire s'attend à recevoir le passage de 5 particules MIP/cm²/croisement de paquets de e⁺/e⁻
- Sachant que
 - Il y a 2825 paquets par train
 - Il y 5 trains par seconde
 - l'accélérateur fonctionnant 180 jours/an
- Evaluer la dose (kRad) reçue par le détecteur
- On donne:
 - 3.6 eV par paires e/h. + 110 paires créées par μm parcouru en moyenne
 - 100 Rad = 1 Joule/kg
 - rho silicium = 2.32 g/cm³
- En fait il faut tenir compte du fait que les particules sont souvent rasantes (x3).
- Calculer la fluence équivalente (on supposera que les particules traversant le détecteur sont des électrons de 10 MeV \Rightarrow NIEL factor $\sim 1/30$).
- Quelles sont les alternatives pour diminuer cette dose reçue ?

Résolution digitale d'un détecteur

- Calculer la résolution spatiale d'un détecteur à strip de pitch "p" n'ayant qu'une strip touchée quand une particule le traverse

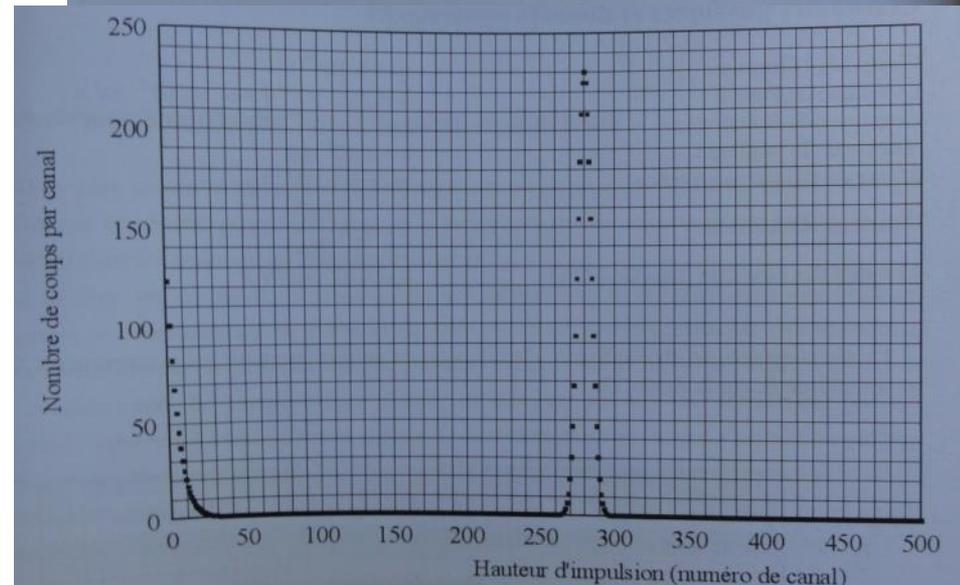
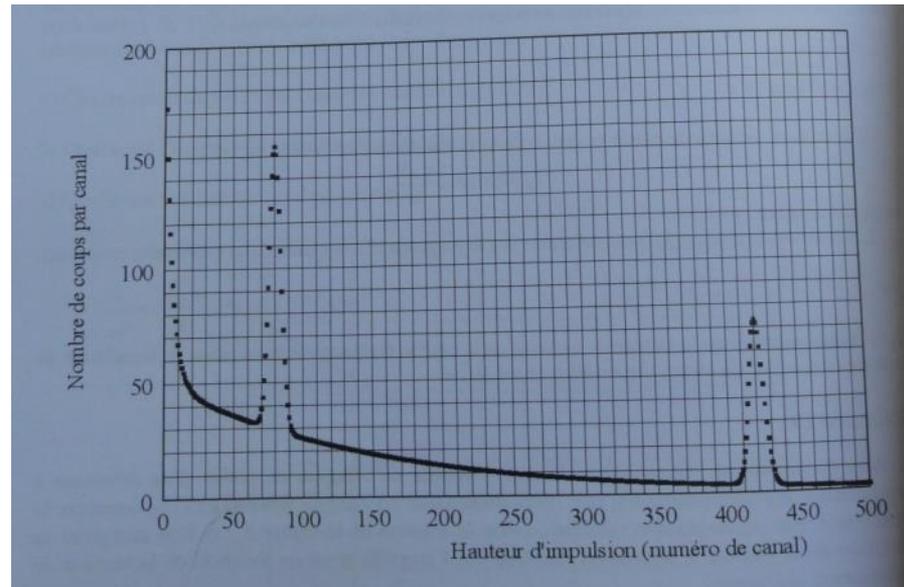
Theorème de Ramo et efficacité de collection de charge

- Un détecteur homogène est modélisé par un condensateur de capacité C . Un rayonnement pénètre dans le détecteur et crée N_0 paires e^-/h^+ en $x=x_0$.
 - Montrer que le courant induit dans le circuit par une charge élémentaire q est
 - $I = q.v/d$ (theoreme de Ramo)
 - Ou v est la vitesse de dérive du porteur de charge.
 - En déduire les allures du courant et de la charge reçue par le circuit en fonction du temps.
 - En fait, Il existe une probabilité non nulle que les charges se recombinent. Refaire les calculs avec cette hypothèse.
 - On prendra comme loi:
 $N_{e^-}(t) = N_0 e^{-t/\tau}$ avec
 $N_{e^-}(t)$ = nombre d' e^- au temps t
 N_0 = nombre d' e^- à $t=0$
 τ = durée de vie des e^-



Calibration d'un détecteur

- Un détecteur est irradié par une source radioactive émettant deux raies gamma de 76.7 keV et de 360 keV comme indiqué par la figure ci-contre
- On irradie le détecteur avec une nouvelle source inconnue (figure 2)
 - Quelle est l'énergie du rayonnement émis par cette source ?
 - Quelle est la résolution (en keV) du détecteur ?



Annexes

Bibliographie sommaire

- G. Lutz, *Semiconductor radiation detector*, Springer (1999)
- H.G. Moser, *Silicon detector systems in high energy physics*, Progress in Particle and Nuclear Physics 63 (2009) 186-237
- Helmuth Spieler, *Semiconductor Detector Systems*, Oxford University Press (2005)
- L.Rossi, P.Fischer, T.Rohe, N.Wermes, *Pixel Detectors From fundamental to Applications*, Springer (2006)
- J.P. Ponpon, *Détecteurs à semi-conducteurs*, Ellipses (2007)
- G.F. Knoll, *Radiation detection and measurement*, New York, Wiley (2000)

Bibliography (Moll)

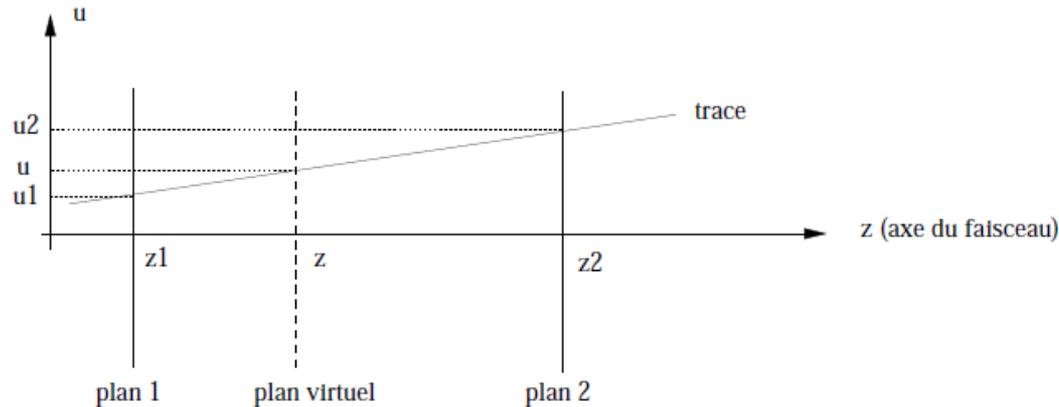
- Some material taken from the following presentations
 - Michael Hauschild, CERN, *Tracking Detectors* (ESI 2009)
 - Leszek Ropelewski, CERN, *Gas Detectors* (CERN Academic Training 2005)
 - Christian Joram, CERN, *Particle Interactions with Matter* (ICFA School 2010)
Particle Detectors (CERN Summer Student Lectures 2003)
 - Werner Riegler, CERN, *Fundamentals of Particle Detectors* (CERN Academic Training 2008)
 - Gregor Herten, Uni Freiburg, *Particle Detection: Trackers* (HCP School 2009)
 - Pippa Wells, CERN, *Tracking at the LHC* (EDIT 2011 School)
- Literature – Further Reading
 - C.Grupen and B.Shwartz, *Particle Detectors*, Cambridge University Press
 - G.Lutz, *Semiconductor Radiation Detectors*, Springer
 - H.Spieler, *Semiconductor Detector Systems*, Oxford University Press
 - G.Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley and Sons
 - M.Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley-Interscience
 - L.Rossi, *Pixel Detectors*, Springer
 - F.Hartmann, *Evolution of Silicon Sensor Technology in Particle Physics*, Springer

Corrections

Dose reçue

- Dose:
 - $2825 \times 5 \times 3600 \times 24 \times 180 \times 5 = 1.1 \times 10^{12}$ hits/cm²/an
 - $\times 3.6$ eV/paires $\times 110 \times 10^4$ paires/cm
 - $/ 2.32 \times 10$ (kg/cm³)
 - $\times 1.6$ eV/Joules
 - ~ 300 J/kg ~ 30 kRad
 - $\times 3$ (à cause des angles d'incidence) ~ 90 kRad
- Fluence
 - 1.1×10^{12} hits/cm²/an $\times 1/30$ (NIEL) $\times 3$ (angles)
 - $\sim 1.1 \times 10^{11}$ n_{eq}/cm²/an
- « solutions »
 - Rayon
 - Champs magnétique
 - Prototypes radioresistants

résolution sur le paramètre d'impact



$$u = \frac{u_2 - u_1}{z_2 - z_1}z + u_1 - \frac{u_2 - u_1}{z_2 - z_1}z_1 \quad (1.1)$$

De plus on suppose que les incertitudes Δz_1 et Δz_2 sur la position en z des 2 plans de référence sont négligeables. D'où :

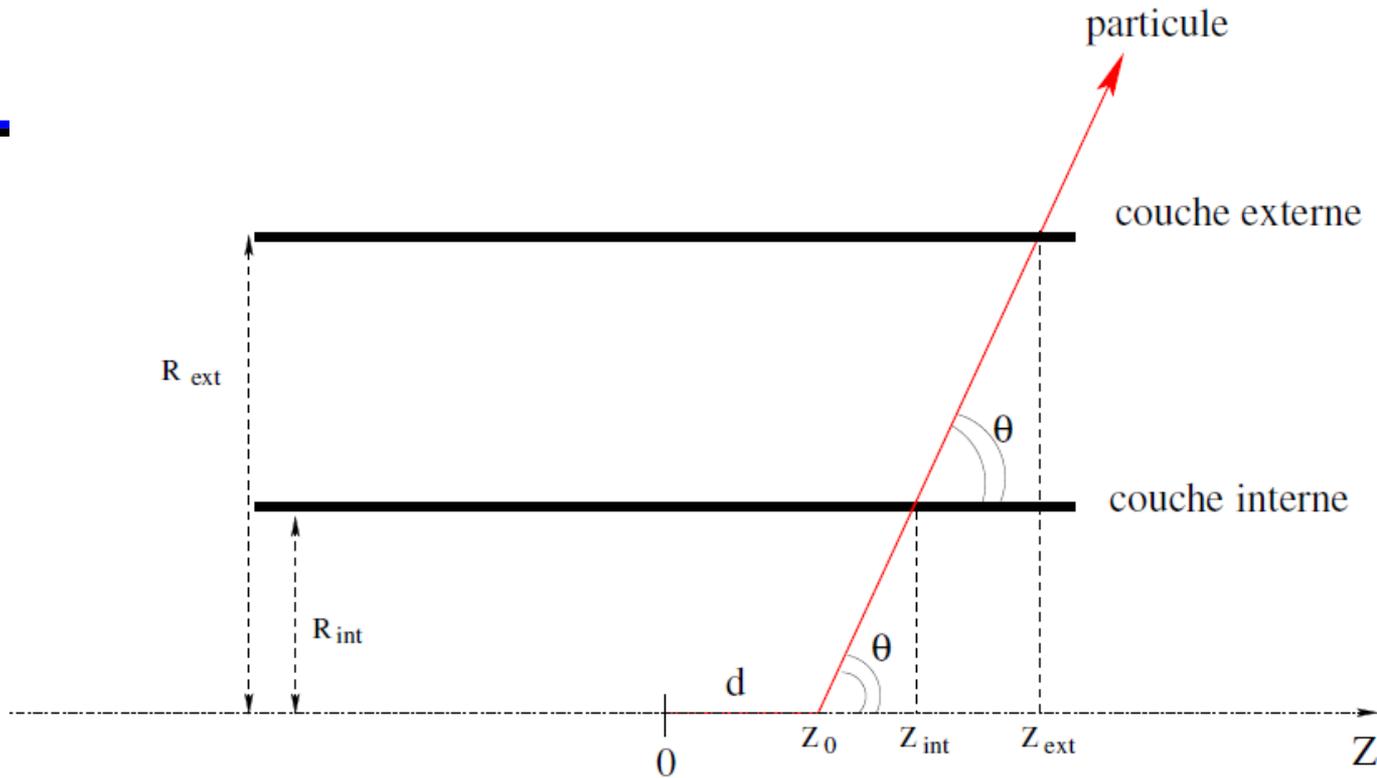
$$du = \frac{\partial u}{\partial u_1}du_1 + \frac{\partial u}{\partial u_2}du_2 \quad (1.2)$$

$$= \frac{z_2 - z}{z_2 - z_1}du_1 + \frac{z - z_1}{z_2 - z_1}du_2 \quad (1.3)$$

L'incertitude Δu est donné par :

$$(\Delta u)^2 = \left(\frac{z_2 - z}{z_2 - z_1} \right)^2 (\Delta u_1)^2 + \left(\frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \right)^2 (\Delta u_2)^2$$

$$\sigma = \frac{r_2 \sigma_1 \oplus r_1 \sigma_2}{(r_2 - r_1)}$$



$$Z_0 = \frac{R_{ext}Z_{int} - R_{int}Z_{ext}}{R_{ext} - R_{int}} \quad (4.3)$$

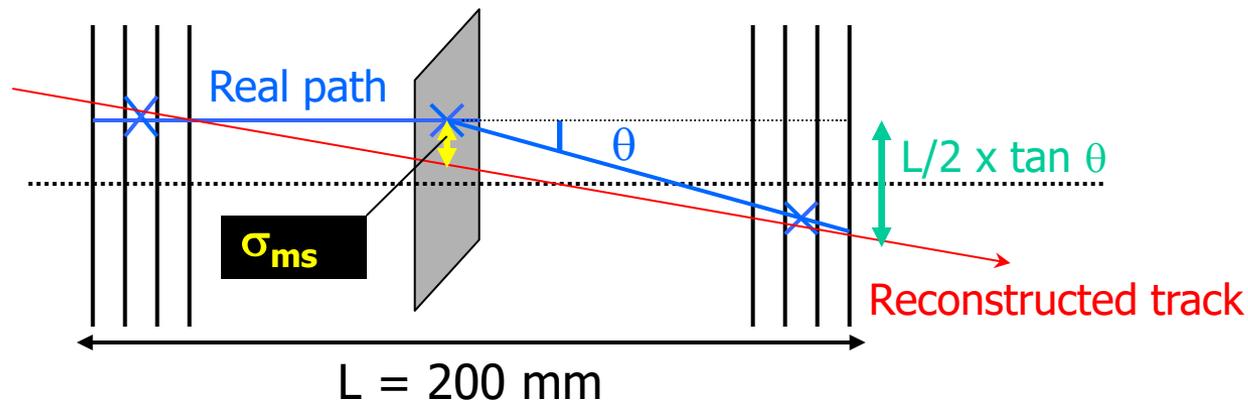
L'incertitude ΔZ_0 peut être calculé à partir de l'équation précédente en prenant

$$a \sim \Delta Z_0 = \sqrt{\left(\frac{\partial Z_0}{\partial Z_{int}} \cdot \Delta Z_{int}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_0}{\partial Z_{ext}} \cdot \Delta Z_{ext}\right)^2} \quad (4.4)$$

on trouve finalement que

$$a \sim \Delta Z_0 = \frac{R_{int}\Delta Z_{ext} \oplus R_{ext}\Delta Z_{int}}{R_{ext} - R_{int}} \quad (4.5)$$

Diffusion multiple



$$\theta = \frac{13.6 \text{ MeV}}{(\beta \cdot c \cdot p)} \times z \sqrt{(x/X_0)} [1 + 0.038 \ln(x/X_0)]$$

- $p = 5 \text{ GeV}/c$
- $\beta \sim 1$
- $z = \text{charge number}$
- $x = \text{Si thickness} = 300 \mu\text{m}$
- $X_0 = 9.36 \text{ cm (Si)}$

$$\theta \sim 1.2 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

$$\sigma_{ms} \sim L/4 \times \tan \theta \sim 6 \mu\text{m}$$

Résolution digitale

$$N(x) = \frac{1}{p} \text{ si } -p/2 \leq x \leq +p/2 \quad (1.13)$$

$$= 0 \text{ sinon} \quad (1.14)$$

où p est le pas du pixel, de telle sorte que la densité de probabilité soit normée à 1 :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} N(x).dx = 1 \quad (1.15)$$

Le calcul de l'écart type de cette distribution correspond à la résolution digitale $\Delta(hud)$:

$$\Delta(hud) = \sqrt{\langle x^2 \rangle} \quad (1.16)$$

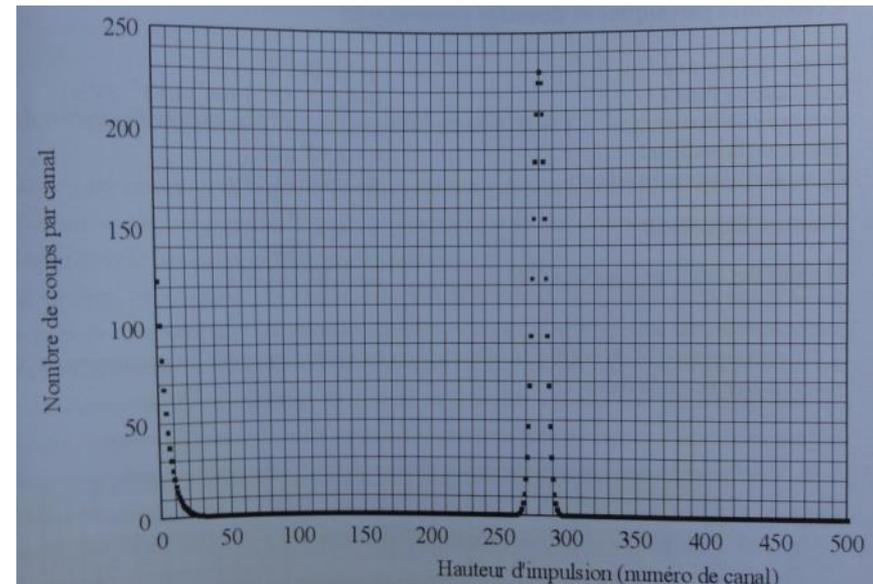
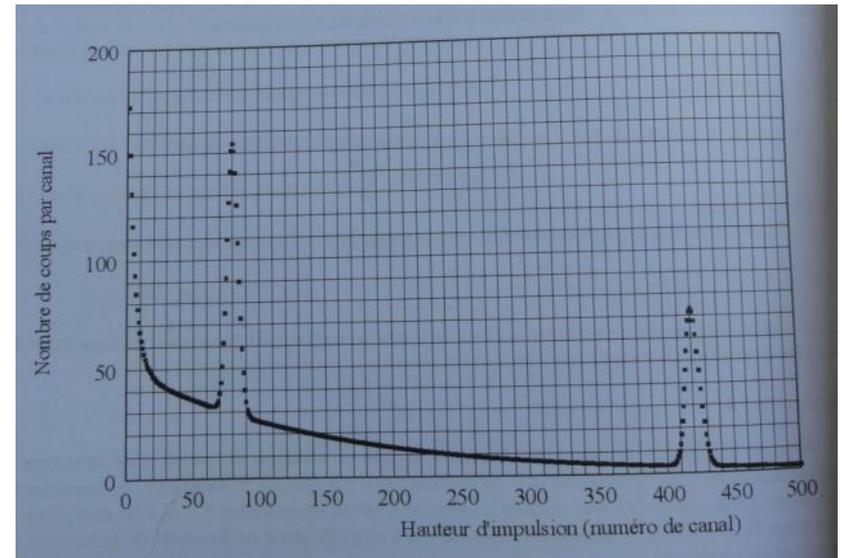
$$= \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} x^2.N(x).dx} \quad (1.17)$$

$$= \sqrt{\int_{-p/2}^{+p/2} x^2.N(x).dx} \quad (1.18)$$

$$= \frac{p}{\sqrt{12}} \quad (1.19)$$

Calibration d'un détecteur

- On établit l'étalonnage:
 - Hauteur d'Impulsion en fonction de l'énergie
 - $HI(E=360) = 420$ canaux
 - $HI(E=76.7) = 70$ canaux
 - $HI(E)=a.E+b$
 - $a = \Delta HI/\Delta E = (420-70)/(360-76.7) \sim 1.2$
 - $b = HI(E) - a.E = 420-1.2 \times 360 = -12$
 - $HI(E)=1.2.E - 12$
- Calcul de l'énergie de la source
 - $280=1.2.E - 12$
 - $E = (280 + 12) / 1.2 = 243$ keV
- Résolution:
 - Largeur à mi-hauteur ~ 10 canaux
 - 10 canaux $\Rightarrow (10 + 12) / 1.2 = 18$ keV
 - Résolution = $\Delta E/E = 18/243 = 7.5\%$



Theorème de Ramo et efficacité de collection de charge

E = champ électrique

V = tension aux bornes du condensateur

d = distance entre les électrodes

v = vitesse de dérive

$$\vec{F} = q \vec{E}$$

$$E = V/d$$

$$v = \mu_e E$$

• travail pour une charge élémentaire q

$$dW = F \cdot dx = q E dx$$

• Puissance : $P = VI = \frac{dW}{dt} = q E \frac{dx}{dt}$

$$\Rightarrow I = \frac{q E}{V} \frac{dx}{dt} = \frac{q}{d} v$$

• On crée $N_0 e^-$ et $N_0 h^+$

$$\Rightarrow I_{e^-} = \frac{N_0 q v_{e^-}}{d} ; I_{h^+} = \frac{N_0 q v_{h^+}}{d}$$

$$(v_{e^-} \neq v_{h^+} \text{ en général}) . I_{tot} = I_{e^-} + I_{h^+}$$

• temps pendant lequel les charges dérivent

$$t_{e^-} = (d - x_0) / v_{e^-} \quad t_{h^+} = x_0 / v_{h^+}$$

- charge regere dans le circuit comme pendant au courant induit: $I = \frac{dQ}{dt}$

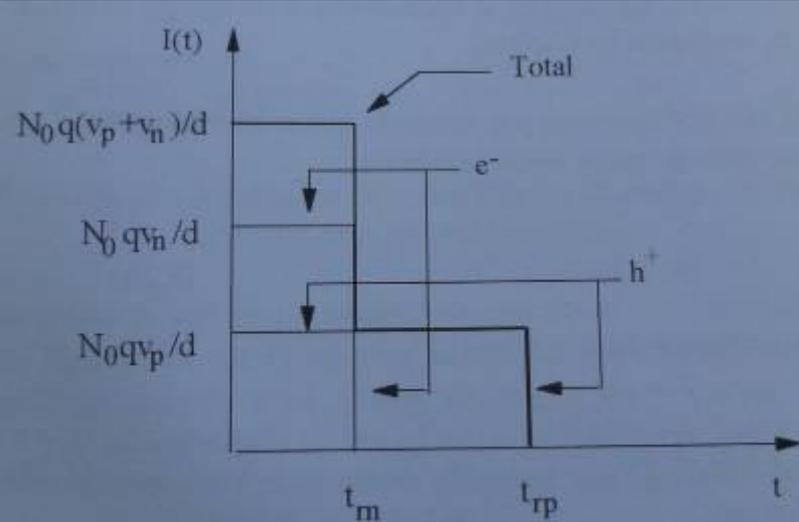
$$dQ_{e^-} = I_{e^-} dt$$

$$Q_{e^-} = \int_0^{t_{e^-}} I_{e^-} dt$$

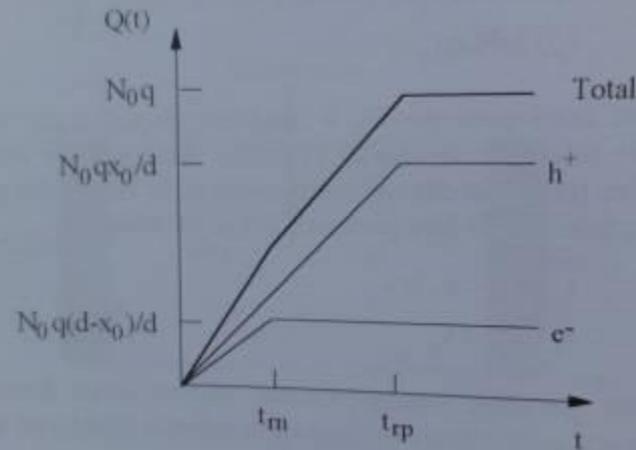
$$\text{et } \begin{cases} Q_{e^-} = \frac{N_0 q v_{e^-}}{d} \frac{(d-x_0)}{v_{e^-}} = \frac{N_0 q (d-x_0)}{d} \\ Q_{h^+} = \frac{N_0 q x_0}{d} \end{cases}$$

⊕
d

⊖



.16a : Impulsions de courant délivrées par un détecteur homogène.



Contributions respectives des électrons et des trous et impulsion de charge totale délivrée par un détecteur homogène.

de charge est finalement...

maintenant $I_{e^-} = \frac{N_0 e^{-t/\tau_{e^-}} \cdot q v_{e^-}}{d}$

$$\Rightarrow Q = \int I_{e^-} dt = \frac{N_0 q v_{e^-}}{d} \int_0^{t_{e^-}} e^{-t/\tau_{e^-}} dt$$

avec $t_{e^-} = (d - x_0) / v_{e^-}$

$$Q = \frac{N_0 q v_{e^-}}{d} \left[-\tau_{e^-} e^{-t/\tau_{e^-}} \right]_0^{t_{e^-}}$$

$$= \frac{N_0 q v_{e^-} \tau_{e^-}}{d} \left[1 - e^{-\frac{(d-x_0)}{v_{e^-} \tau_{e^-}}} \right]$$

si de plus $v_{e^-} = \mu_{e^-} E$...

μ_{e^-}, τ_{e^-} , \rightarrow caractérisé par le matériau.

de même pour les h^+ :

$$Q_{h^+} = \frac{q N_0 v_{h^+} \tau_{h^+}}{d} \left(1 - e^{-\frac{x_0}{v_{h^+} \tau_{h^+}}} \right)$$

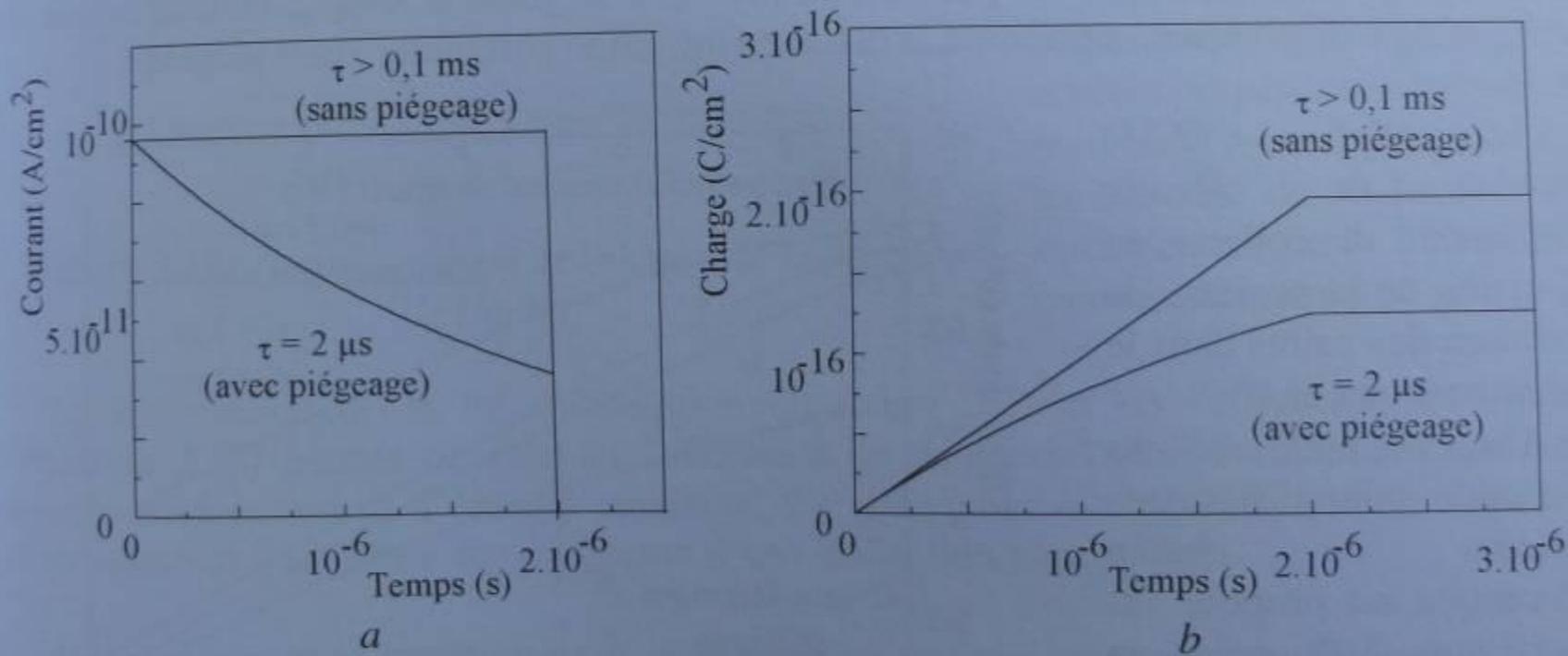


Figure 2.17 : Forme des impulsions de courant (a) et de charge (b) en présence de piégeage dans un détecteur HgI_2 .

BACK UP

(mostly stolen material)

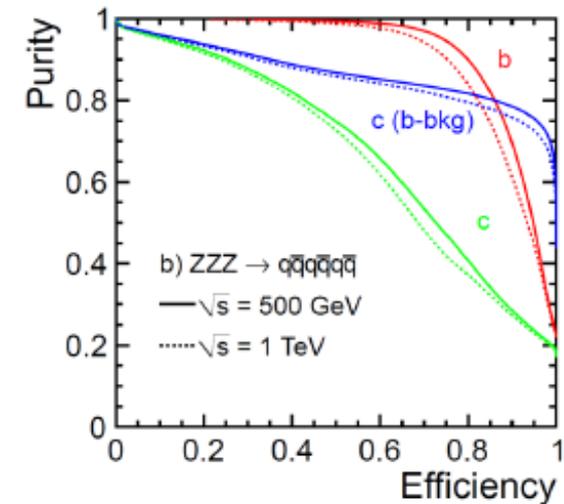
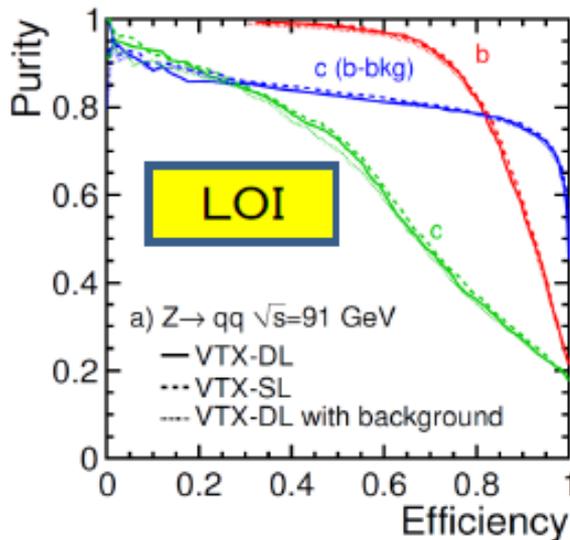
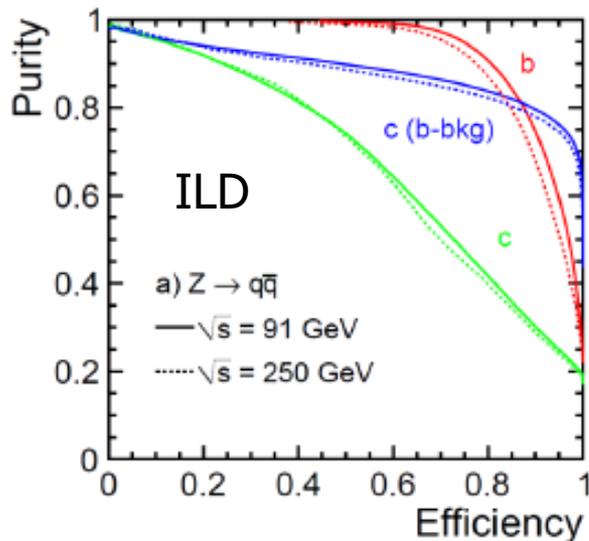


Divers

Experiment	Techno.	Date	Pitch	σ_{sp}	X0 (%)	Radiation load		Surface	channels	t.r.o.
						Non ion.	Ion.			
Detector			(μm)	(μm)	/ladder	(n_{eq}/cm^2)	(Mrad)	(m^2)	# (M)	(μs)
DELPHI VFT	hybrid	1996	330	~ 10	1.1		0.01	0.13	1.2	1500
SLD VXD3	CCD	1996	22	5	0.5		<0.01	0.12	307	10^5
D0-Run2 SD	Strips	2001	50-150	10			1.5		0.8	
CDF-Run2 SD	strips	2001	60-140	16					0.7	
ATLAS PXL	hybrid	2008	50x400	~ 10	2.5	1×10^{15}	50	1.7	80	0.025
STAR PXL	CMOS	2013	20.7	3.5	0.37	3×10^{12}	0.15	0.16	360	200
CMS phase 1 Pixel	hybrid	2016				$10^{16} ?$			170	
Belle-2 PXD	DEPFET	2017	50-75	15	0.21	$2 \times 10^{12}/\text{yr}$	2/yr	0.03	8.5	20
ALICE-ITS	CMOS	2018	20-30	<10	0.3	1×10^{12}	0.1	0.5-10	>1k	10-30
CBM-MVD	CMOS	2019	20-30	~ 5	0.3-0.5	1×10^{14}	≤ 10	0.5	800	10-30
CMS phase 2		2025				$> 10^{16} ?$				
ILD-500 VTX	t.b.d.	2030	16-80	~ 3	0.15	1×10^{11}	0.1	0.35	~ 500	10-100
ILD-1000 VTX	t.b.d.	?	16-80	~ 3	0.15	1×10^{11}	>0.3	0.35	~ 500	2-100
CLIC VTX	t.b.d.	?	~ 25	~ 3	0.2	$1 \times 10^{11}/\text{yr}$		~ 0.35	~ 500	0.1-0.01

Expected Vertex performances (2) : Flavor tagging

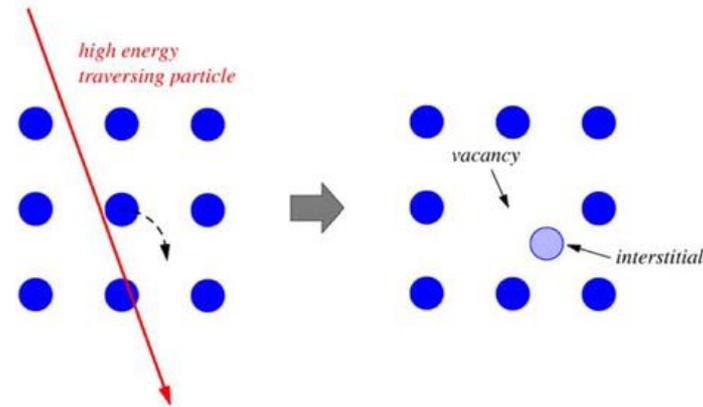
- ILD example
- Full simulation
- Multi-variable tagging algorithm (BDT)
 - LCFIplus
- Continuous improvements



Effet Lazarus

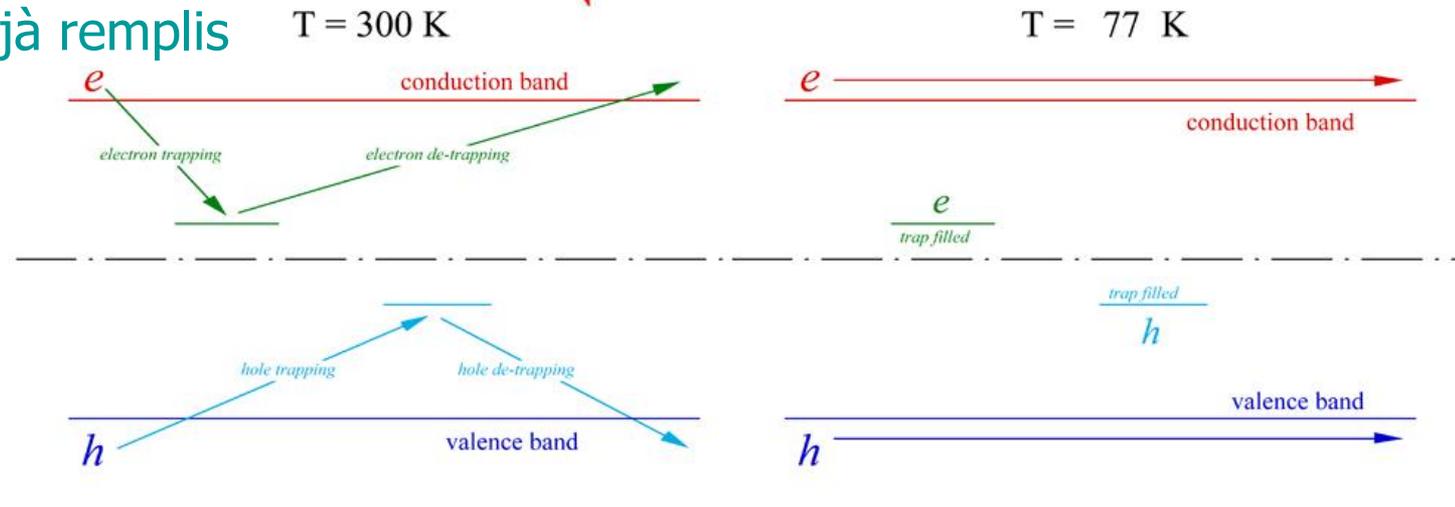
- Effet des radiations

- Déplacement d'atomes dans le cristal
- Création de niveaux supplémentaires dans le gap
- Piégeage des e-/h
- ($t_{\text{libération}} > \sim t_{\text{read-out}}$)
 - Perte de signal



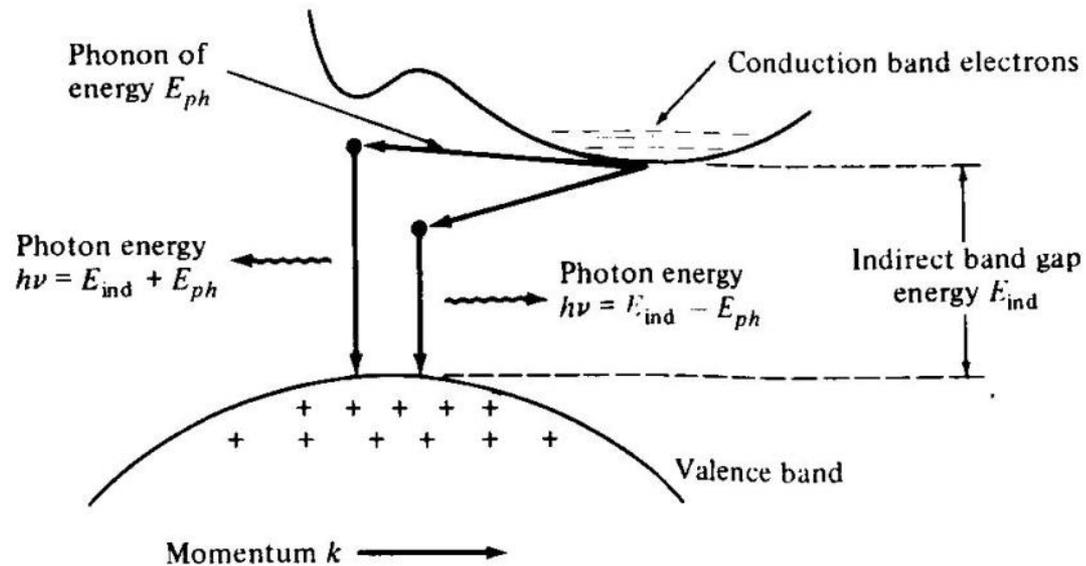
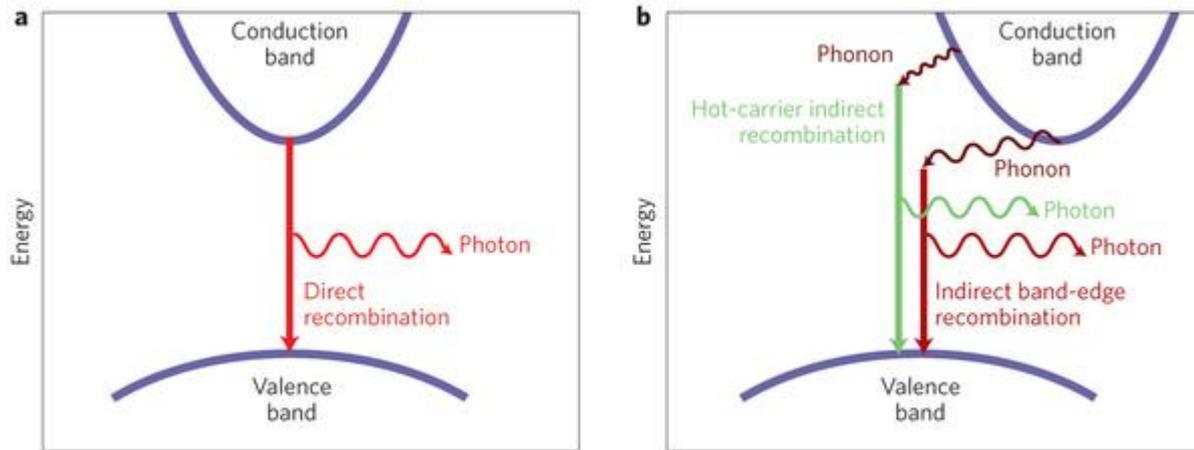
- Effet Lazarus

- À basse température
- Niveaux déjà remplis
- Effets des radiations atténué



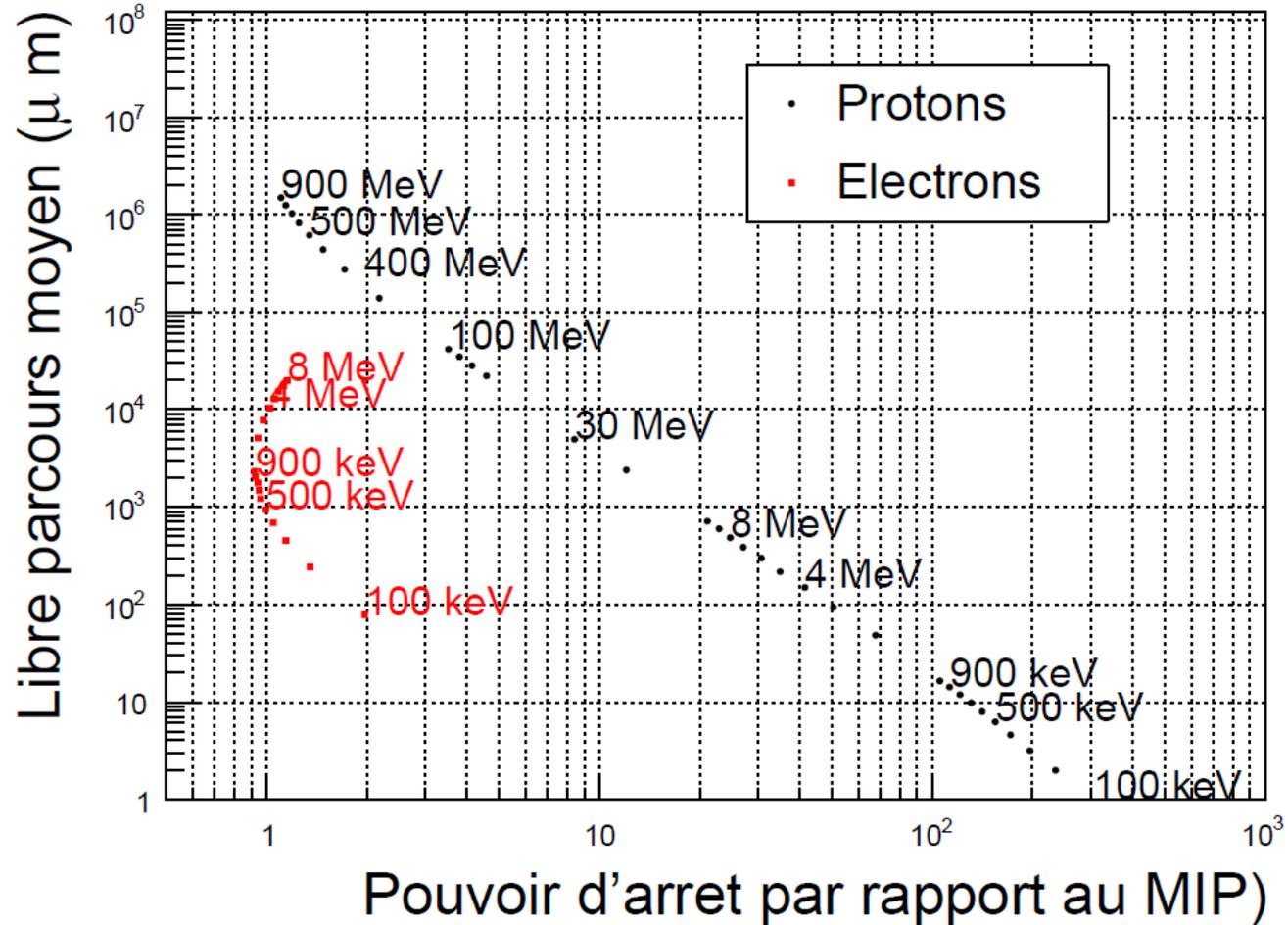
Divers

Bandes directes et indirectes



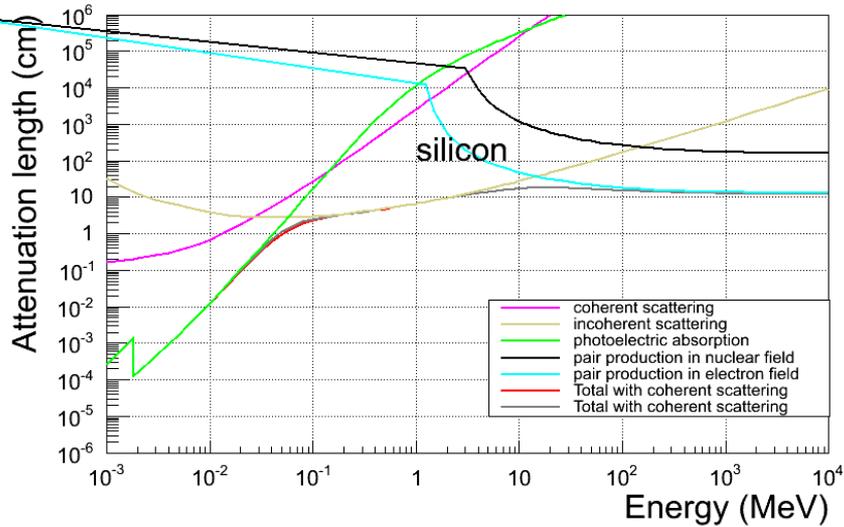
Pouvoir d'arrêt e- / proton

Electrons - protons comparison

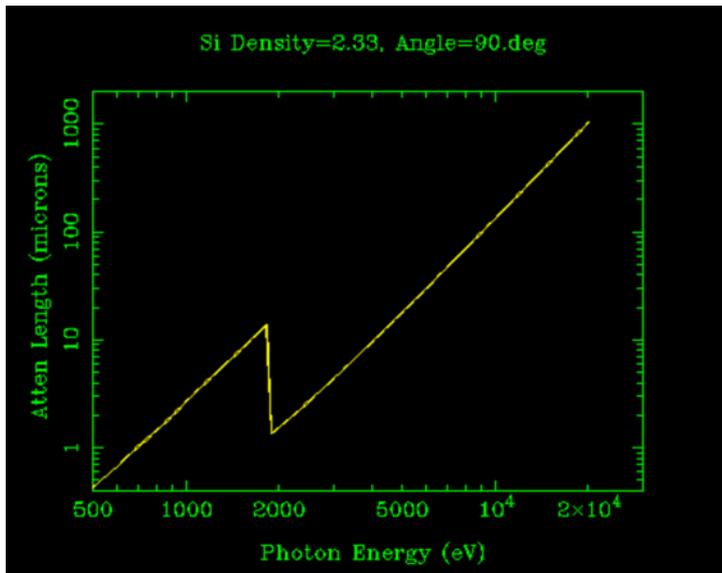
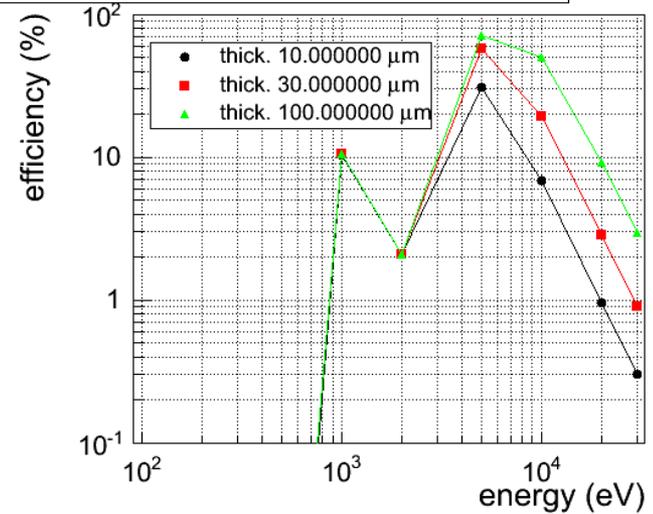


Photons interaction

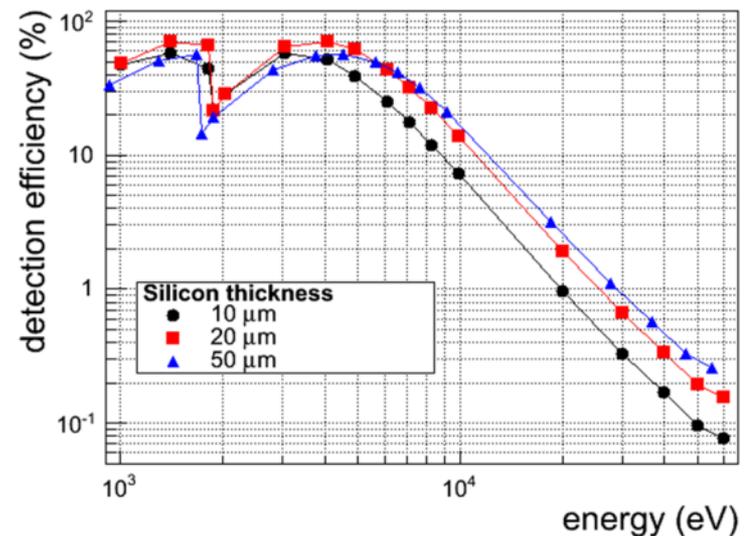
Photon interaction



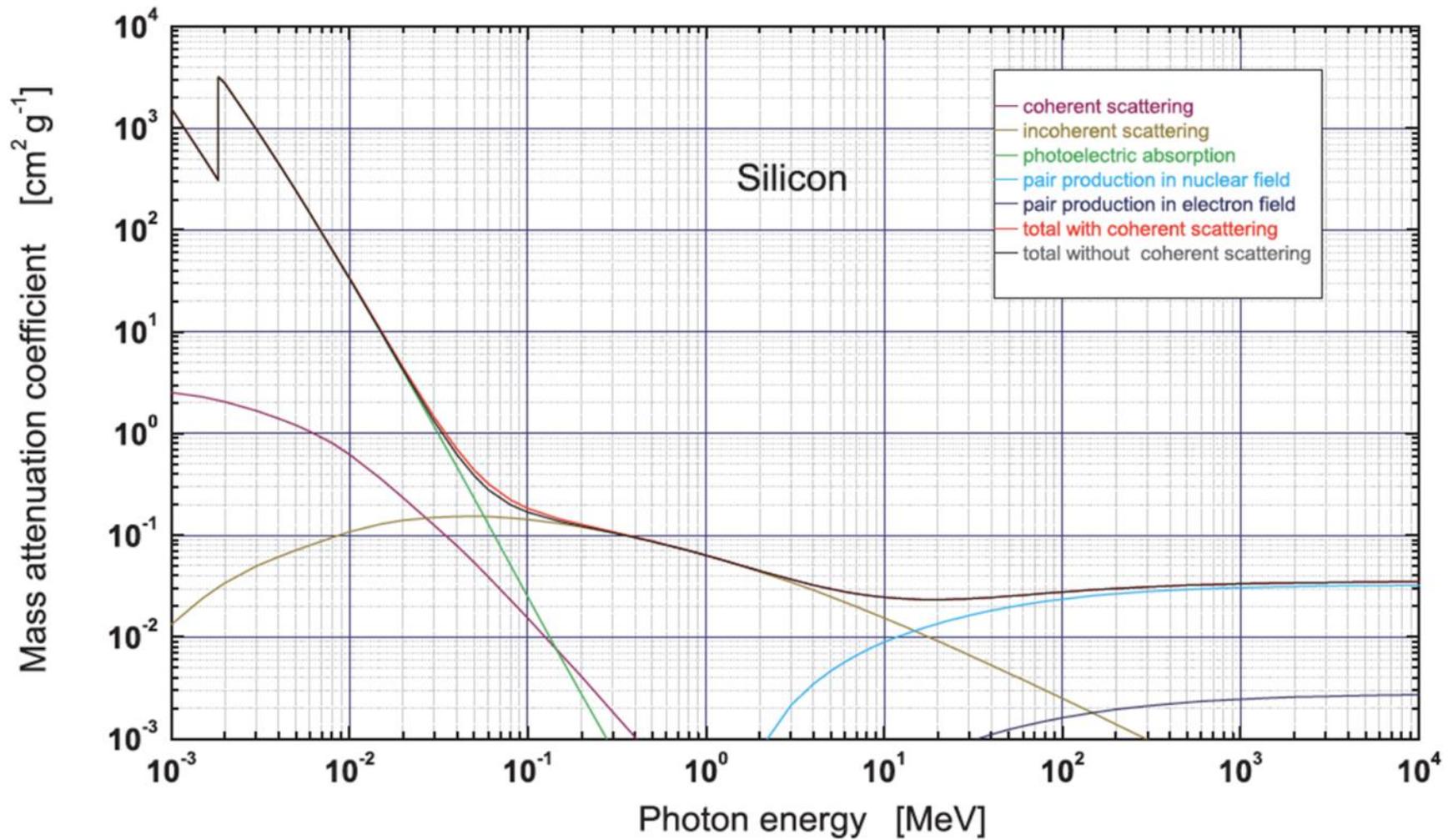
X-ray efficiency in silicon with 6 μm dead layer



Beer-Lambert law: $1 - e^{-\mu x}$



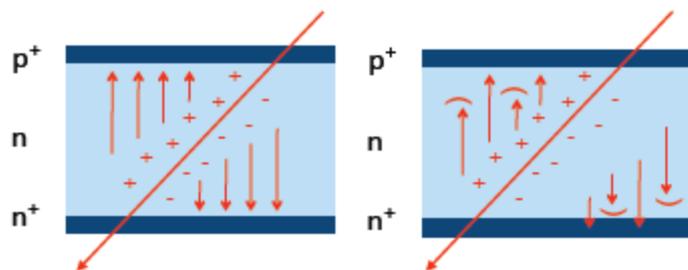
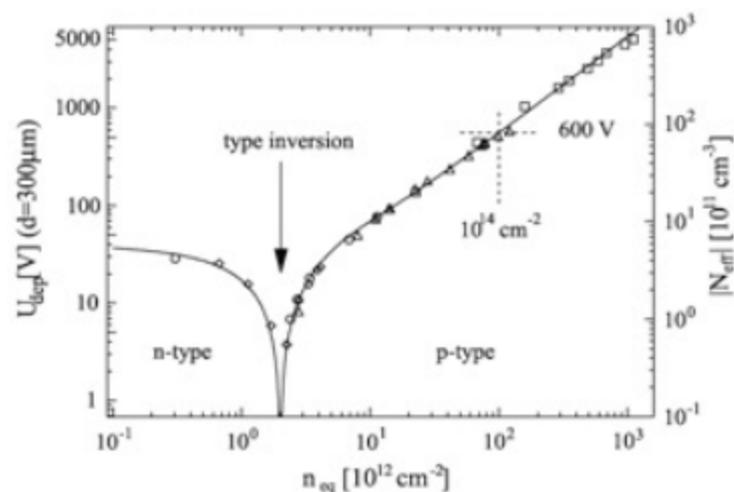
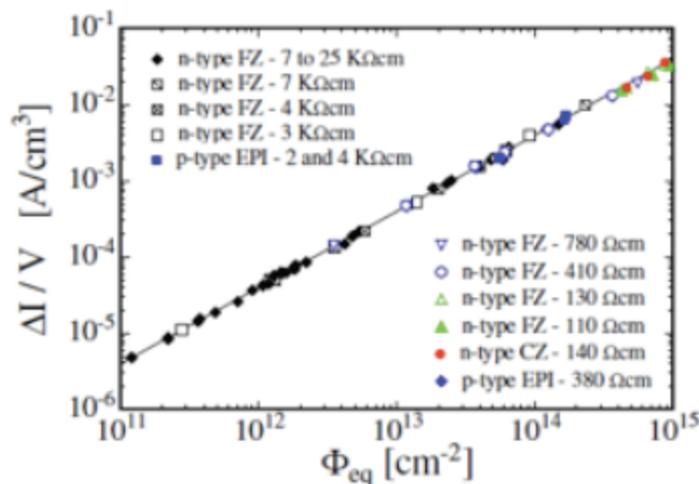
Photon: Coefficient d'atténuation



Radiations

CONSEQUENCES OF RADIATION DAMAGE

Macroscopic constant: leakage current and depletion voltage



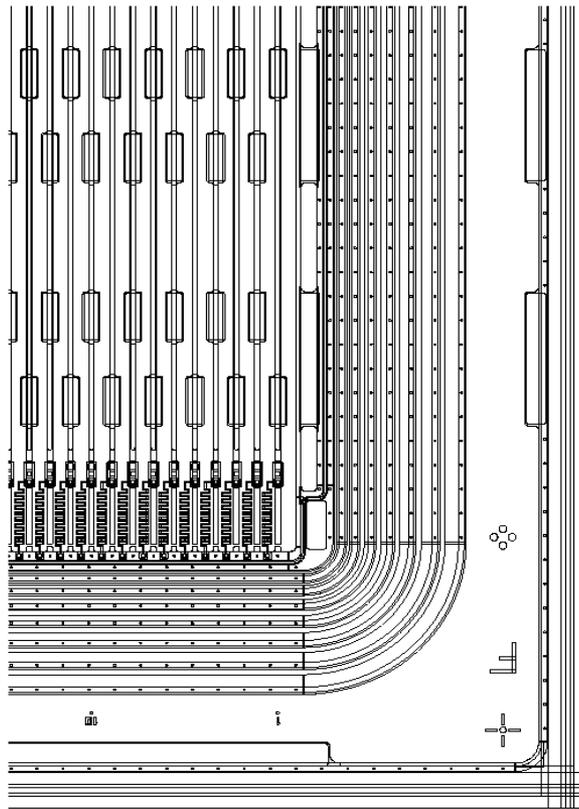
Charge trapping in defects

Counter measures

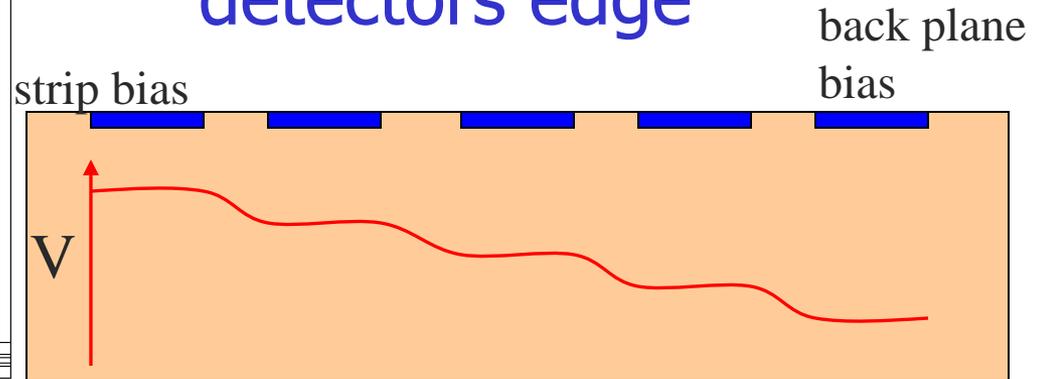
- Geometrical: develop sensors that can withstand higher depletion voltages
- Thinner sensors (but FE electronics with higher sensitivity needed)
- Environment: sensor cooling (~ -10 C)
- Slowing down of “reverse annealing”
- Lower leakage currents

Multiguard rings

Poly
Guard
rings



- Enhance high voltage operation
- Smoothly decrease electric field at detectors edge

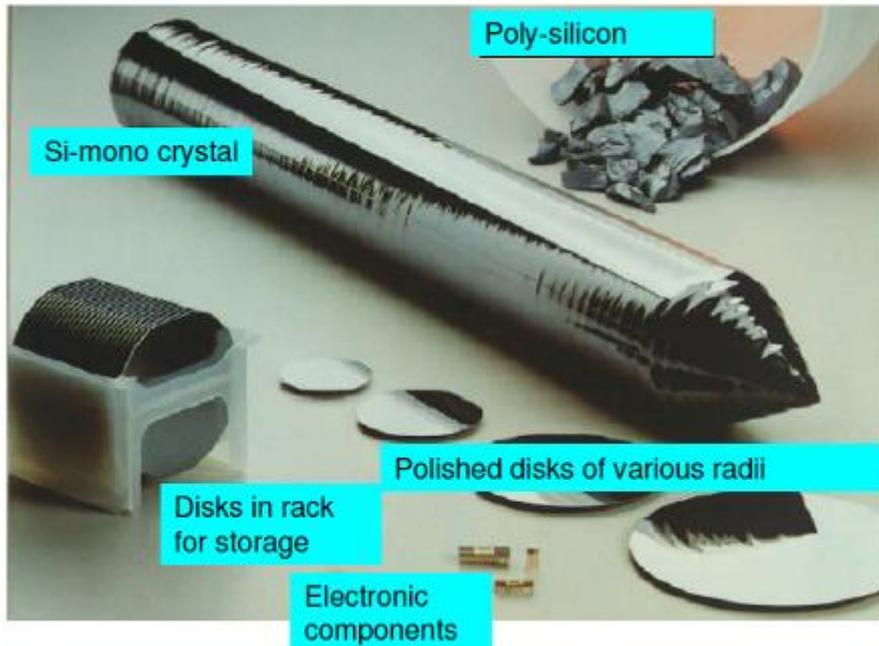


Substrate Choice

- Minimise interface states
- Substrate orientation $\langle 100 \rangle$ not $\langle 111 \rangle$
 - Lower capacitive load
 - Independent of ionising radiation
- $\langle 100 \rangle$ has less dangling surface bonds

Processus de fabrication

Cristaux de silicium



General procedure:

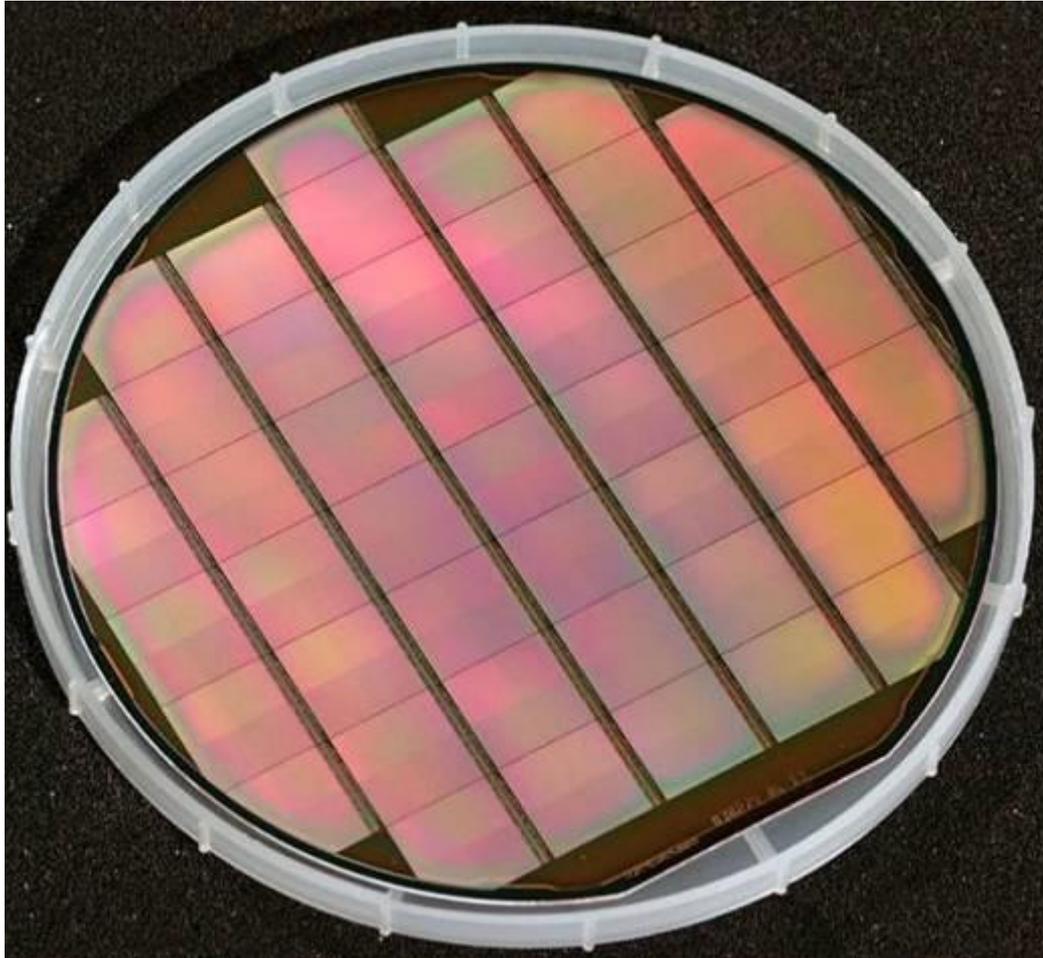
- Production of highly pure poly-silicon from silica sand
- Drawing of a mono-crystalline Si-rod
- Making of Silicon disks from the crystal

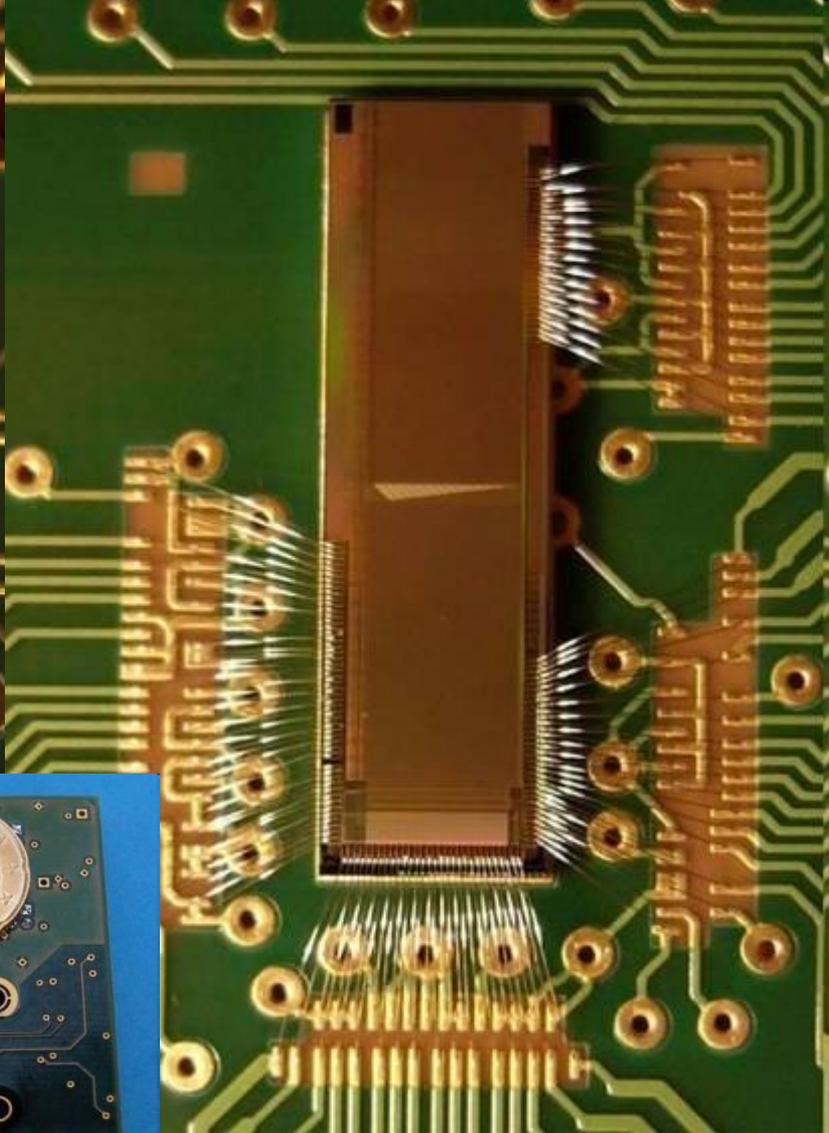
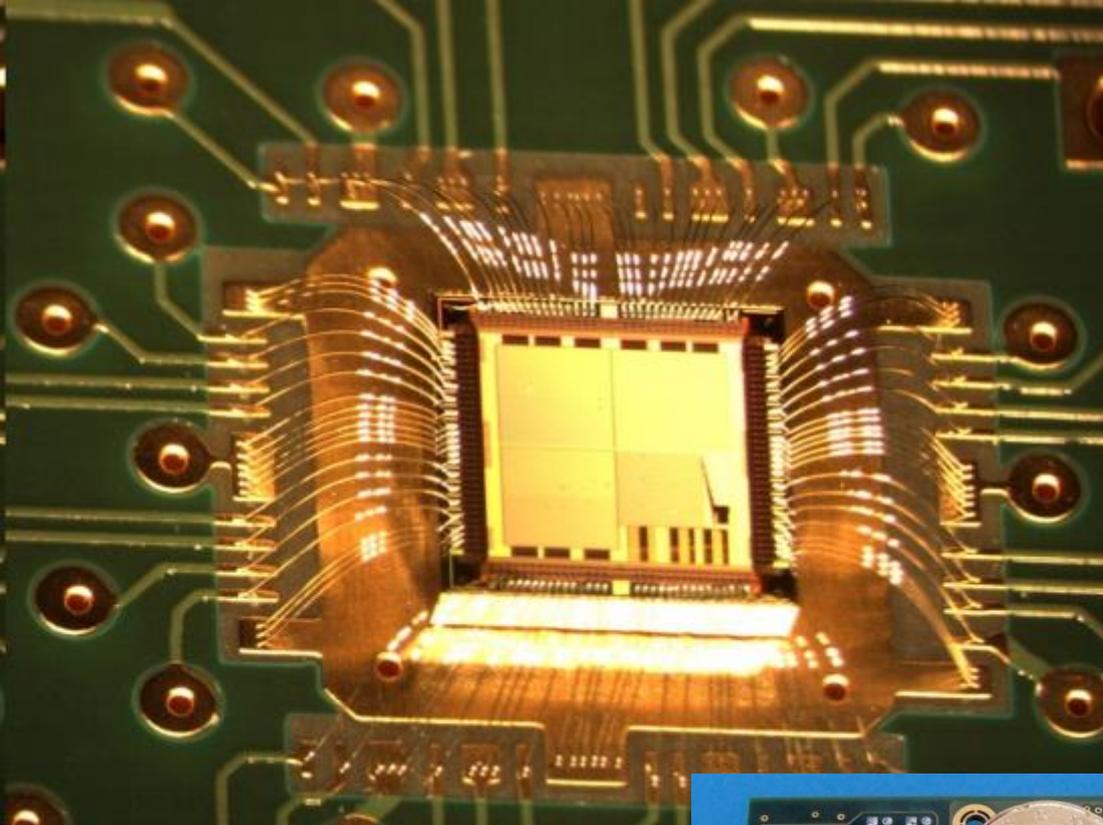
■ Wafer production

- Slice the ingot into wafers of 300-500 μm (diamond saw)
- lapping of wafers
- etching of wafers
- polishing of wafers



Galette de silicium





Le détecteur passivé et implanté



➤ Wafer de Si type N de haute résistivité ($> 1000\Omega.cm$)



➤ Oxydation à $\sim 1000^\circ C$ (200 nm)

➤ Gravure de l'oxyde

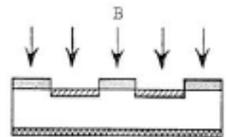


➤ Dépôt de résine

➤ Masque

➤ Insolation

➤ Etching

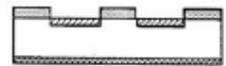


➤ Implantation ($\sim 50nm$)

➤ Bore ($15\text{ keV} - 5.10^{14}cm^{-2}$) $\rightarrow P^+ \rightarrow$ jonction

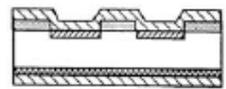
➤ Phosphore ($30\text{ keV} - 2.10^{15}cm^{-2}$)

ou As ($30\text{ à }170\text{ keV} - \sim 10^{16}cm^{-2}$) $\rightarrow N^+ \rightarrow$ ohmique



➤ Recuit sous N_2 ($800\text{ à }900^\circ C$)

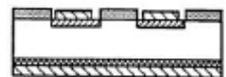
➤ Évaporation d'aluminium ($\sim 100\text{ nm}$)



Éventuellement :

➤ Gravure de l'Al

➤ passivation



Dopage:

le dopage par diffusion ;

le dopage par implantation ionique ;

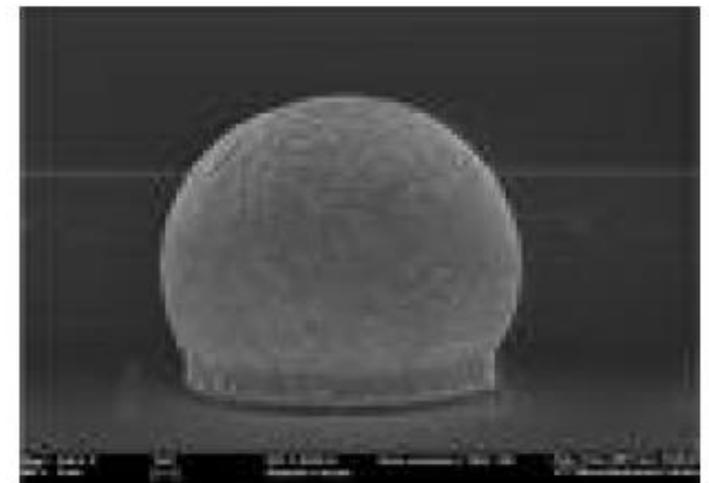
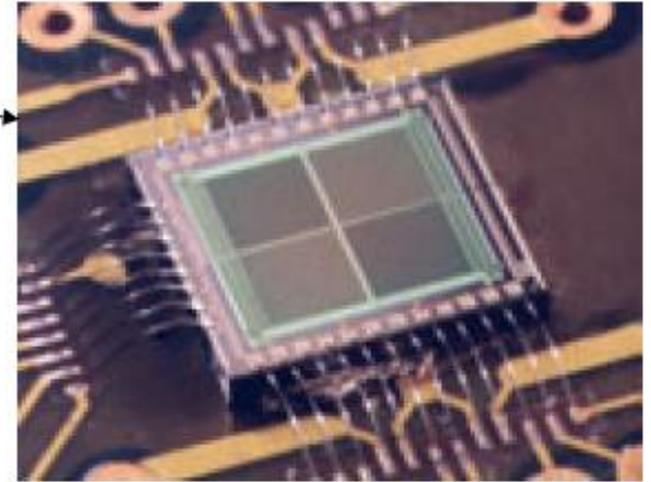
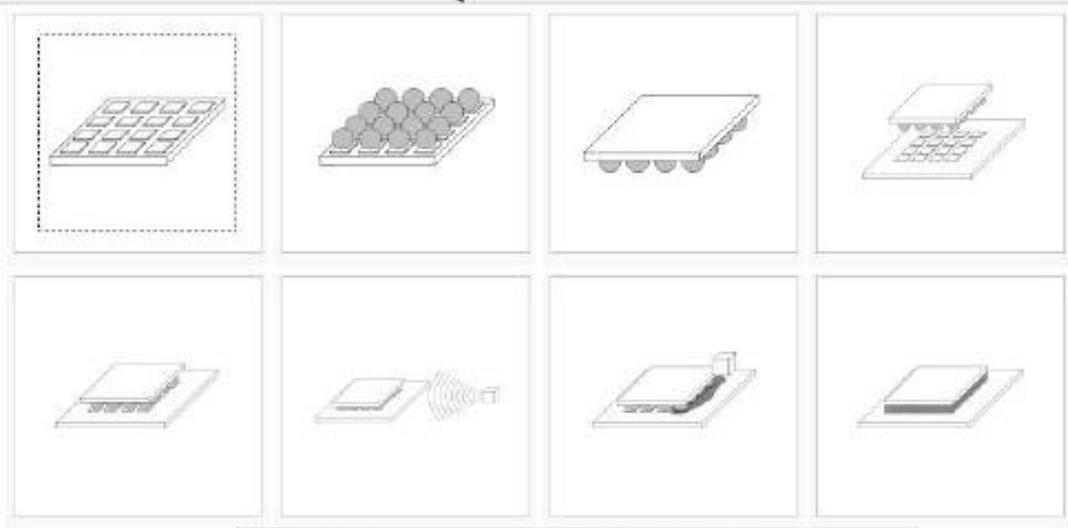
le dopage par transmutation nucléaire ;

le dopage par technique laser.

Integration techniques: bonding

Connect the sensor to its readout electronics

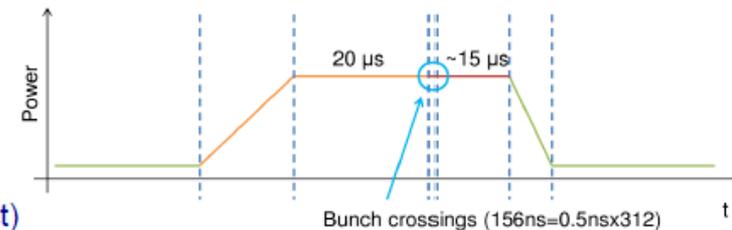
- wire bonding
- bump bonding



20kV 100x 100µm 0264 02-28-2002

Power Delivery & Cycling

- PIXEL SENSORS : $\sim 0.1\text{--}1\text{ W/cm}^2 \Rightarrow 1\text{--}10\text{ kW/m}^2$
 - ↳ would require active cooling, generating material budget overheads
- EXPLOIT THE VERY LOW DUTY CYCLE OF THE ACCELERATOR :
 - ILC : few 10^{-3}
 - CLIC : few 10^{-6}
 - * EITHER very slow (\equiv low power) signal processing \Rightarrow read-out postponed inbetween trains
 - * OR fast signal processing during train (occupancy !) & detectors switched off between trains \equiv power pulsing/cycling
- SUBSTANTIAL DIFFICULTIES :
 - * Low power slow read-out imposes :
 - either $\sim 5\ \mu\text{m}$ pitch against occupancy \Rightarrow large Nb(pixels) read out in 200 ms
 - \Rightarrow long serial read-out fitting inbetween trains (// read-out tends to break power limit)
 - or in-pixel circuitry to timestamp consecutive hits in same (larger) pixel
 - \Rightarrow conflict between pixel dimensions (spatial resolution) and timing resolution
 - * Continuous read-out with power cycling leads to :
 - switching on & off a few grams light ladders in a high B field (3.5 - 5 T) \Rightarrow F(Lorentz) of several tens of grams ...
 - distributing several hundreds of Amperes shortly before each train arrival
 - heat cycle the ladders ...
- TESTS ALREADY STARTED :
 - * DEPFETS: power cycling test outside of magnet successful
 - * CMOS pixel sensor power cycling test foreseen in 2T magnet (AIDA project)
 - * CLIC inner tracking system test bench



CLIC power pulsing scheme