

# Détecteurs à semi-conducteurs

---

## Une introduction

# Plan du cours

- 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.
  - Strips
  - Pixels hybrides
  - Détecteurs monolithiques (CCD, CMOS, DEPFET...)
  - Spectrométrie
  - (HPD, APD, imagerie)
- R & D (ILC, CLIC, LHC)
- + Bibliographie sommaire
- + Exercices
- + Back up
  - Fabrication,HPD, etc.

Pas un cours de:

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



Approche généraliste

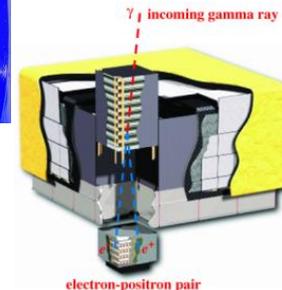
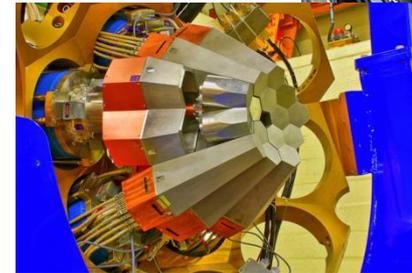
# Motivations

---

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

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

- Dans votre camera/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,  $\gamma$ , infrarouge, etc.
  - cf cours Aline Meuris
- En imagerie médicale, santé
- Autres:
  - Auprès des Machines Synchrotron,
  - Sécurité,
  - Biologie,
  - etc.



# chaîne de détection

ce qu'on veut détecter



ce qu'on mesure



interaction

- ✓ électrons
- ✓ photons (X, visible,  $\gamma$ , etc.)
- ✓ neutrons
- ✓ protons, baryons ( $\pi^\pm$ , K, etc.)
- ✓  $\nu$

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

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

les contraintes

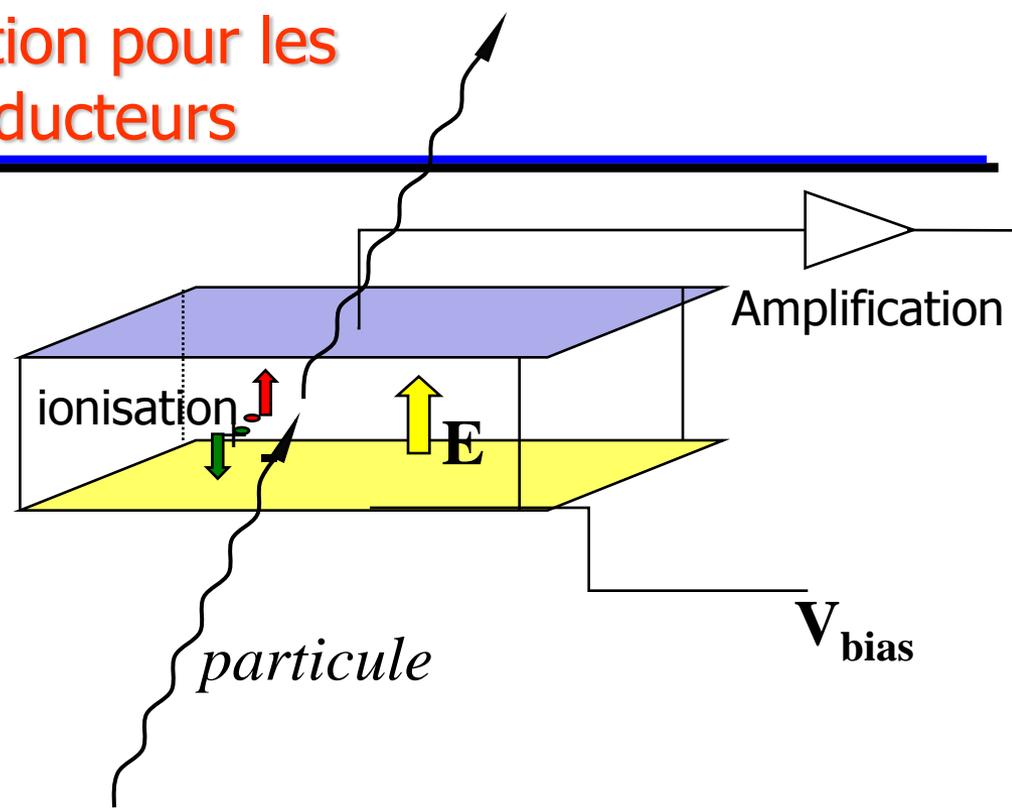
- ✓ Efficacité
- ✓ Résolution spatiale
- ✓ Coût
- ✓ Vitesse de lecture
- ✓ Résistance aux radiations
- ✓ Budget de matière

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

# 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

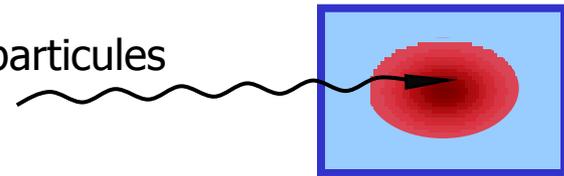
- Spectroscopie  $\gamma$  ou calorimétrie

- 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  $\gamma$  en physique nucléaire.
- calorimétrie en physique des particules, astroparticules
- imagerie
- comptage (dosimétrie)



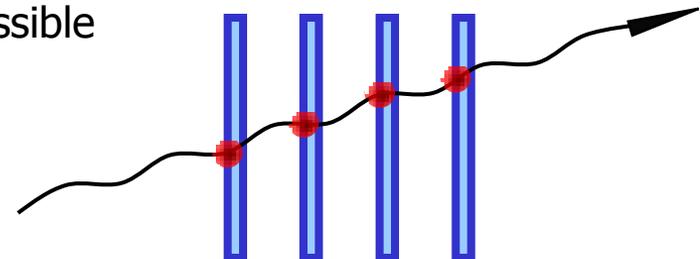
- Mesure de position

- 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:

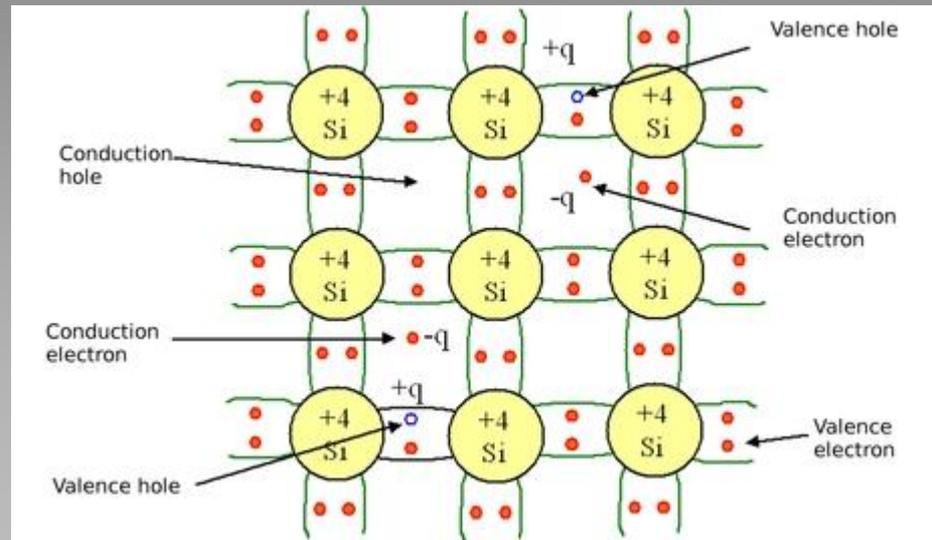
- détecteurs de vertex
- trajectographie



# Avantages / inconvénients des semi-conducteurs

- 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 coûts 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)
  - $O(1-100 \mu\text{m})$
- Génération du signal rapide
  - $O(1-10 \text{ ns})$
- Collection de charge
  - possibilité d'appliquer un champ 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**

1A	1	2																	0	
	1	2	IIA																	He
	3	4		IIIA	IVA	VVA	VIA	VIIA	VIIIA									Ne		
	11	12		Al	Si	P	S	Cl	Ar											
	19	20	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIIB	VII	IB	IB	31	32	33	34	35	36				
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54		
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86		
	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
	87	88	89	104	105	106	107	108	109	110										
	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	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

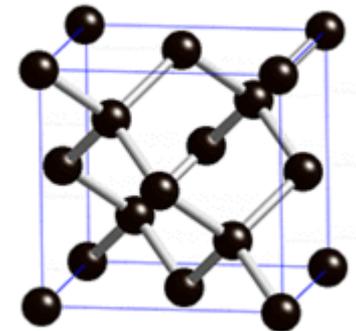
Halogens

Alkali Metals

Alkali Earth Metals

Other Metals

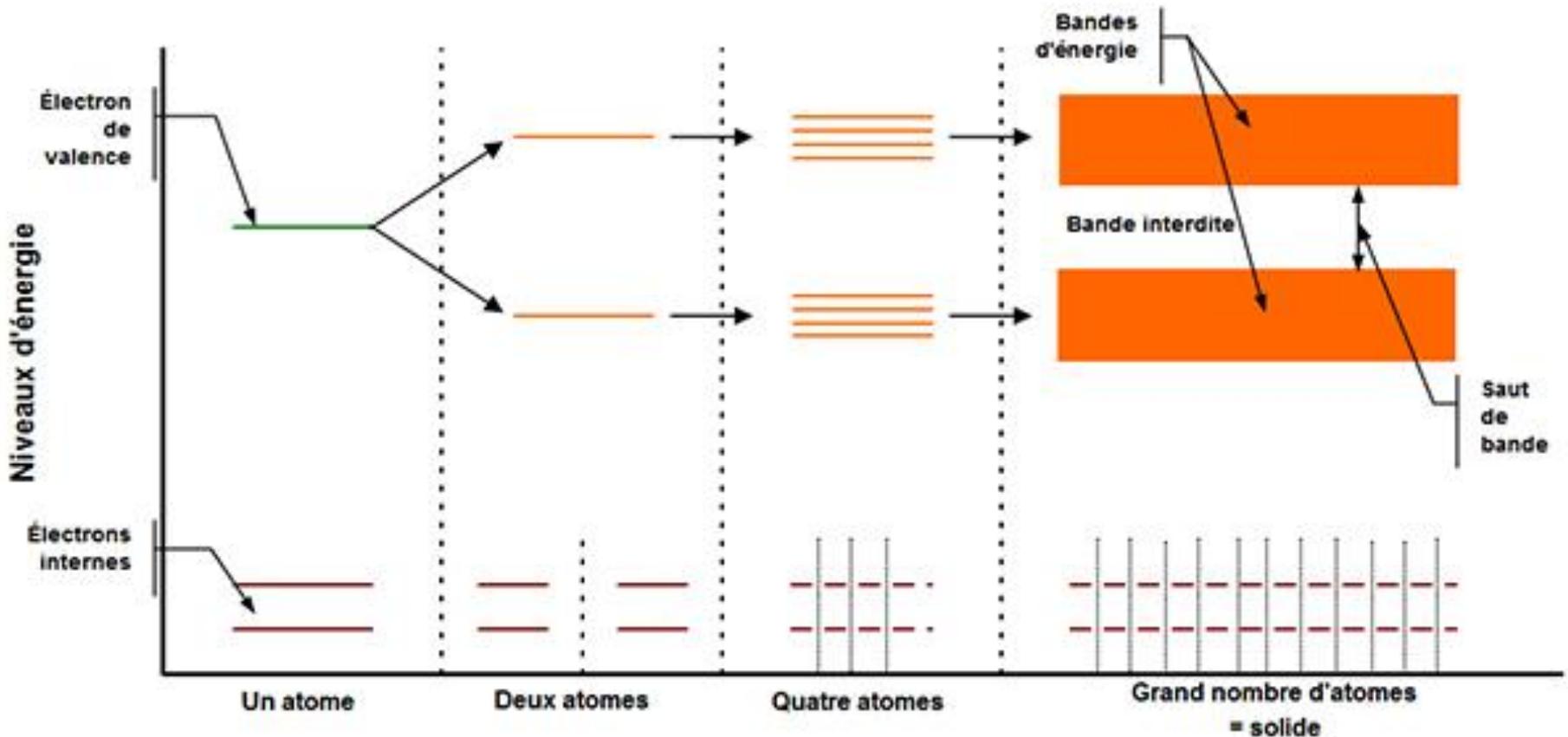
Inert Elements



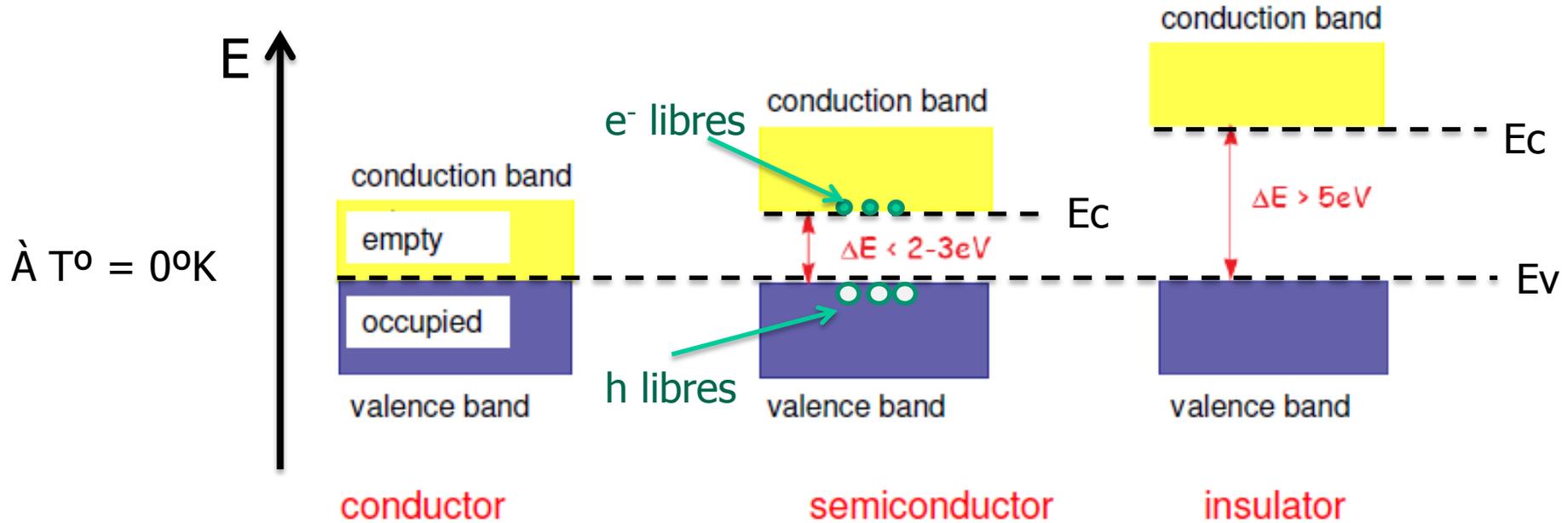
# Niveaux d'énergie: de l'atome au solide

1 Atome: Niveaux d'énergie discrets

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



# Le semi-conducteur



Distribution de Fermi-Dirac  
pour les  $e^-$ :

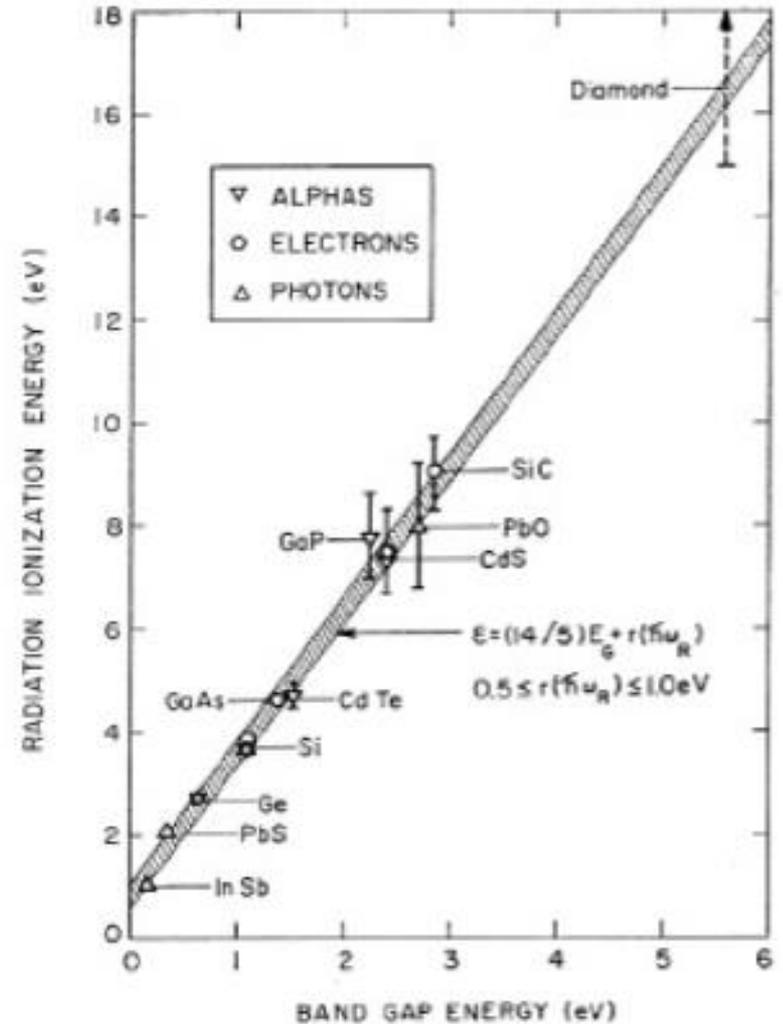
$$f_e(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1} \quad \text{Pour les trous (h=holes):} \quad f_h(E) = 1 - f_e(E) = \frac{1}{e^{(E_F-E)/kT} + 1} = \text{probabilité d'occupation d'un niveau d'énergie E}$$

Pour les semiconducteurs intrinsèques (mêmes concentrations d' $e^-/h$ ):  
Énergie de Fermi =  $E_F = E_{gap}/2$

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

# Energie gap $\neq$ Energie d'ionisation

- A priori
  - pour arracher un électron de valence, il faut apporter  $E_{\text{gap}}$
- 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



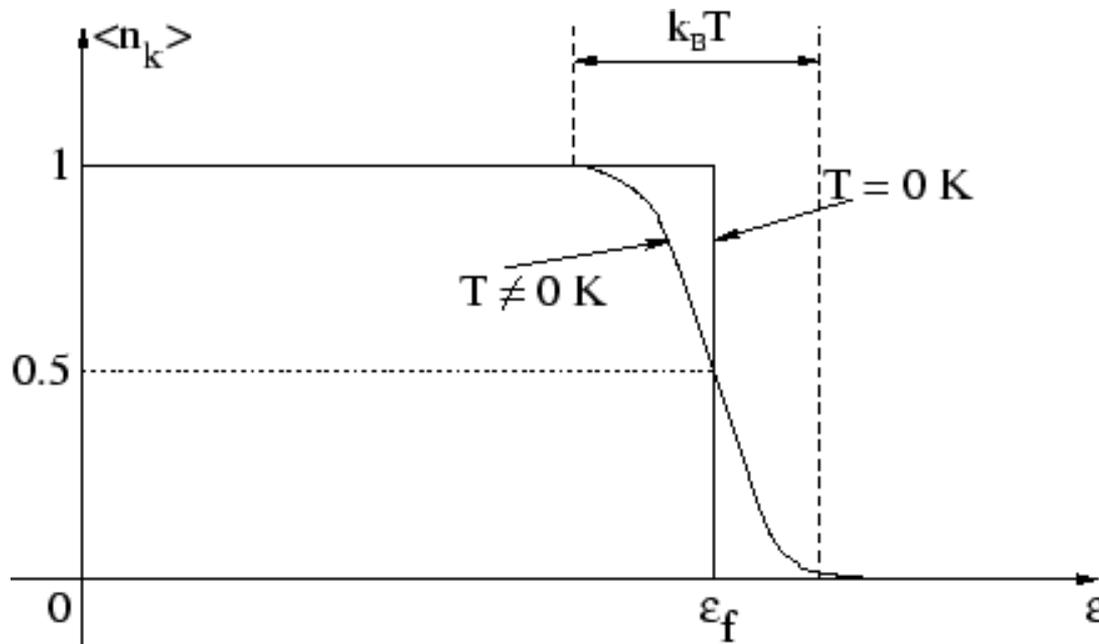
# Quelques propriétés de S.C. courants

Material	Z	Bandgap [eV]	Mobility [cm <sup>2</sup> /Vs]		Density g/cm <sup>3</sup>
			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 <sub>2</sub>	74-34	1.4	100	80	
BiI <sub>3</sub>	83-53	1.7	680	20	
Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	83-16	1.3	1100	200	6.7
Cs <sub>3</sub> Sb	55-51	1.6	500	10	
PbI <sub>2</sub>	82-53	2.6	8	2	6.2
HgI <sub>2</sub>	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			

# Distribution de Fermi-Dirac

Fermi-Dirac-Distribution:

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



- $f(E_F) = 1/2$
- 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.

# Signal et concentration des porteurs de charge

- Nombre d'atomes
  - $\sim 10^{22}$  atomes/cm<sup>3</sup>
- 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

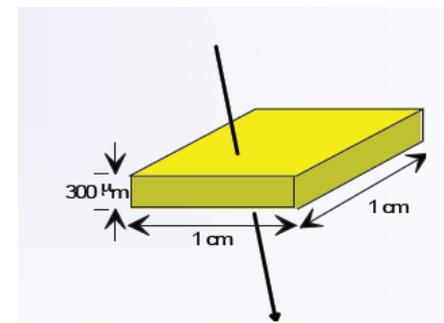
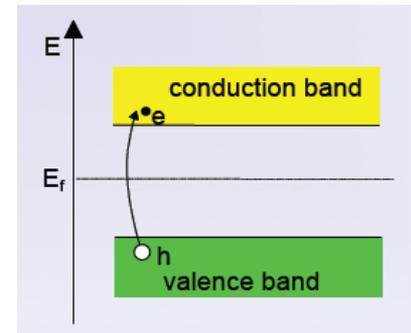
➤  $n_i = n_{e^-} = n_h =$

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

➤ Silicium à 300K:  $n_i \sim 1.45 \times 10^{10}$  /cm<sup>3</sup>  $\Rightarrow$  1/10<sup>12</sup> atomes ionisés

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

- Détecteur d'épaisseur 300 $\mu$ m, surface 1cm<sup>2</sup>, énergie d'ionisation=3.6 eV,
- Nombre d'ionisations  $\sim 100$  e-h /  $\mu$ m
- Signal  $\sim 3000$  e<sup>-</sup> ; porteurs libres  $\sim 4.5 \cdot 10^8$
- $\Rightarrow$  Comment changer ce rapport ? (déplétion, dopage)



# Le dopage



# Dopage

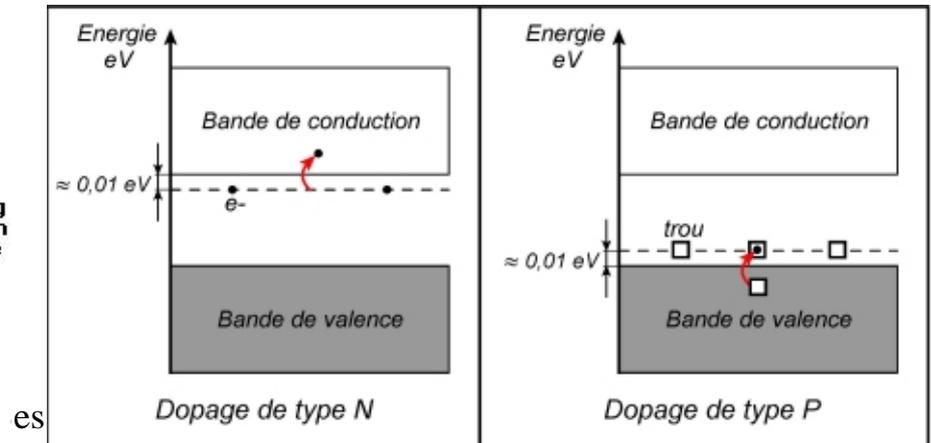
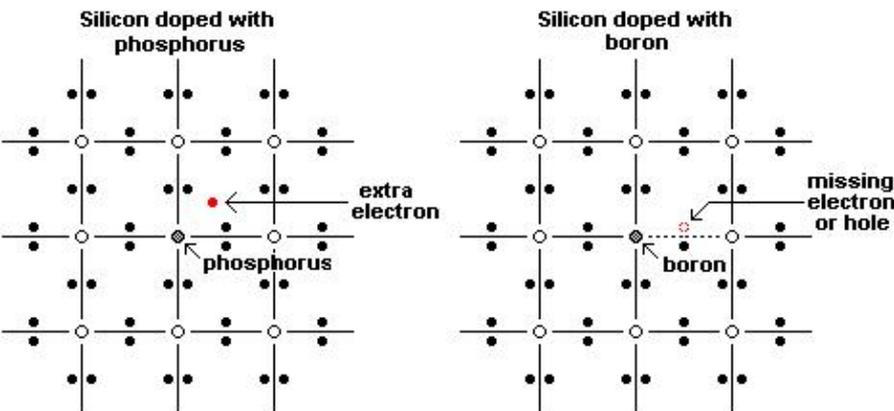
## Principe:

- 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

- N**
- e- supp. ⇒ niveau supp. près de la bande de conduction
  - A T ambiante ⇒ e- libre sur la bande de conduction

- P**
- h supp. ⇒ niveau supp. près de la bande de valence
  - 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-

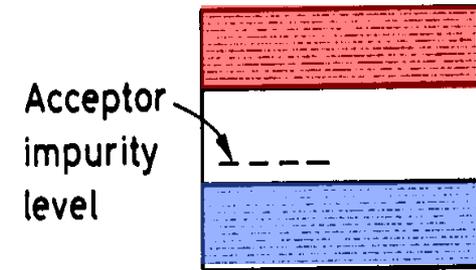
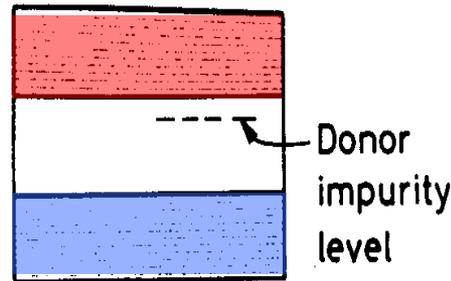
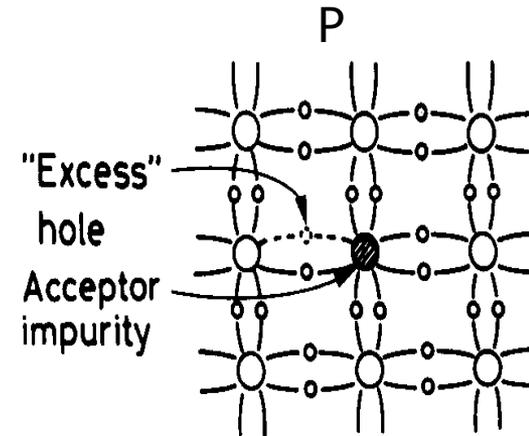
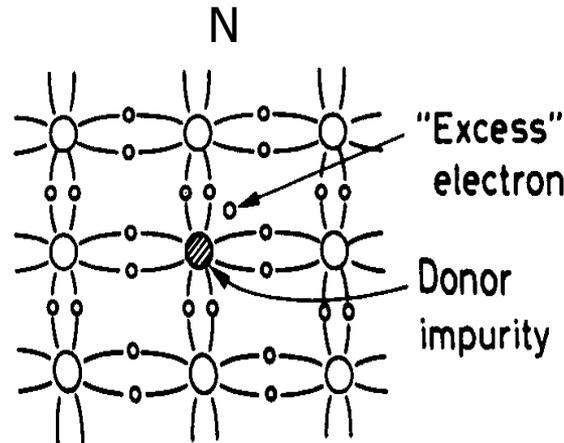
- Dopage N (Phosphore)

- 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
Donor level (eV)	0.033	0.039	0.044	0.049	0.069
Acceptor 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 ( $\text{cm}^{-3}$ ): joue sur la longueur de diffusion, la résistivité (et conductivité).
- Mobilité  $\mu$ 
  - $V = \mu E$
- Résistivité (1/conductivité)  $\Rightarrow$  change avec le dopage

Dépend du dopage :  $N_A$  et  $N_D$

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

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

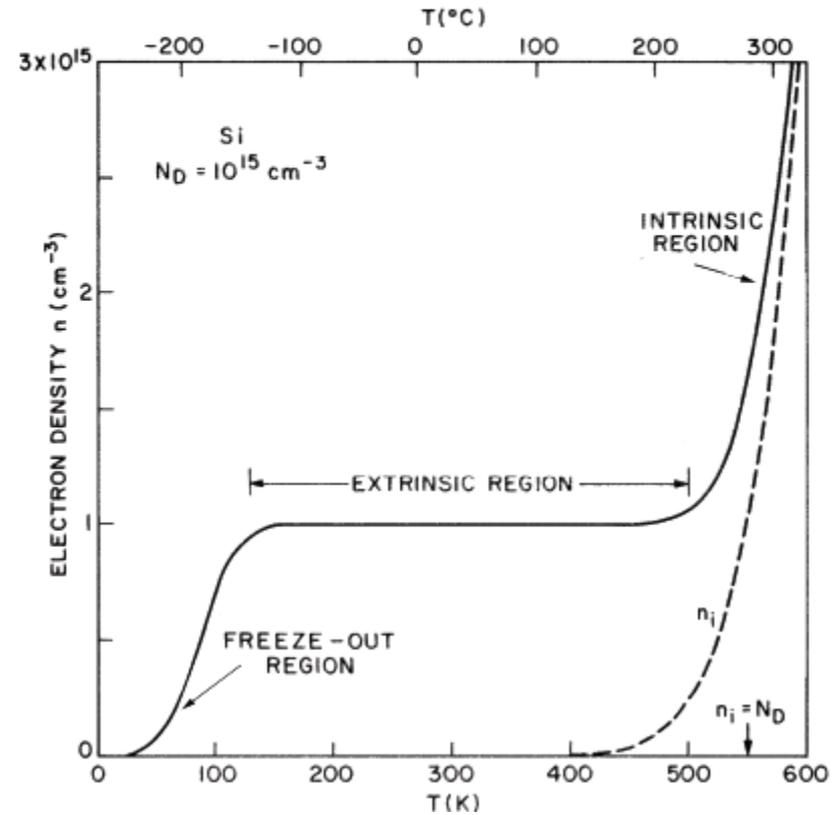
Si :  $\rho_i \sim 200 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$   
Ge :  $\rho_i \sim 47 \text{ }\Omega \cdot \text{cm}$

# Dopage et conductivité

- Intrinsicque:
  - La Température gouverne la densité de porteurs libres
- Extrinsicque
  - 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.

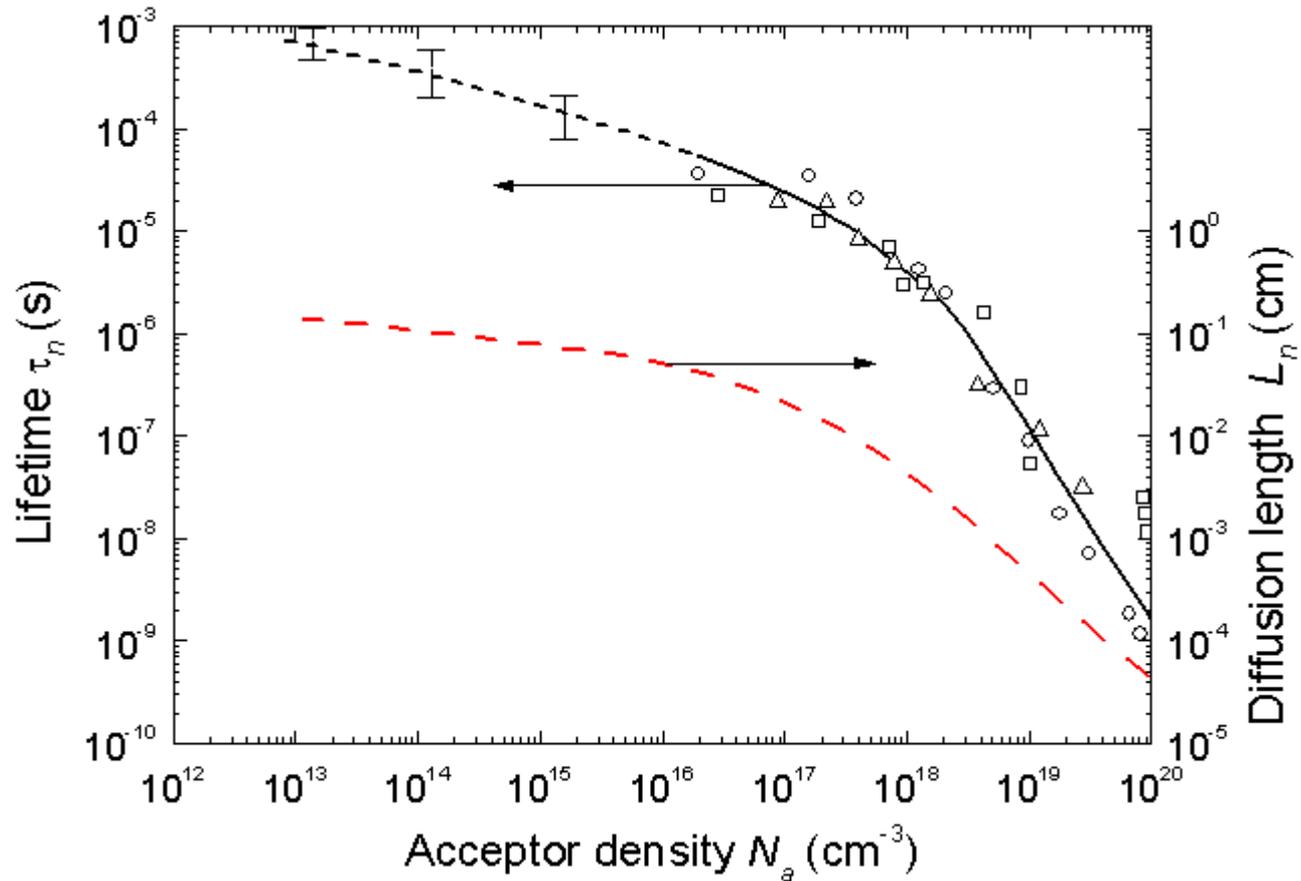
Electron density as a function of temperature for a Si sample with a donor concentration of  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ :



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

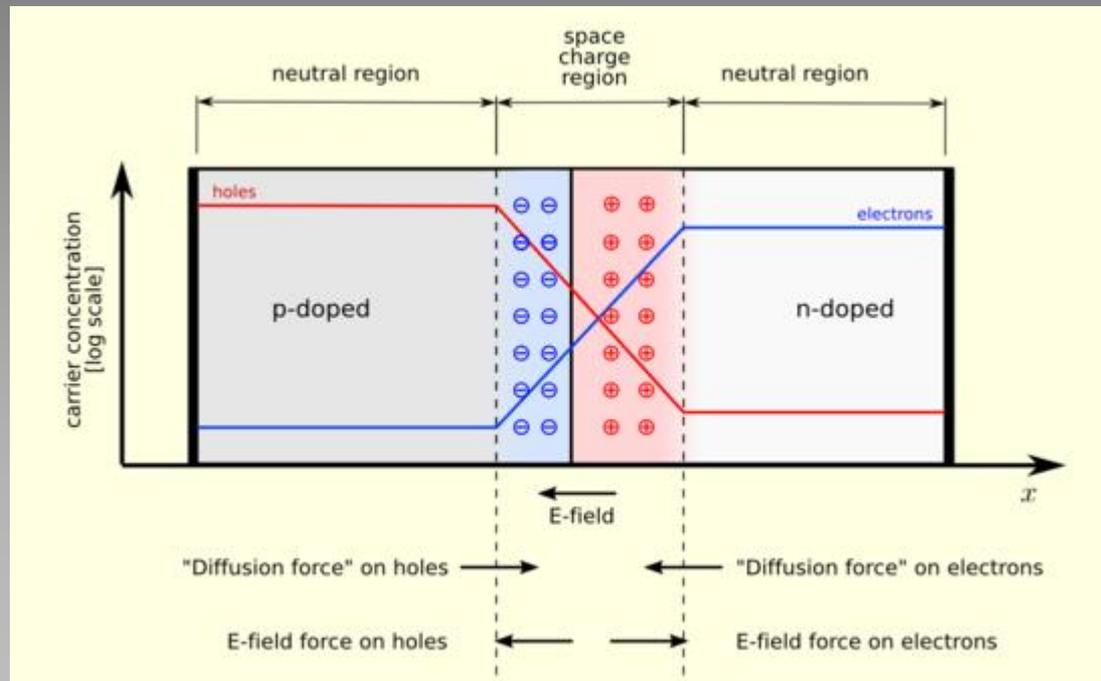
T (K)

# Relation entre le dopage et la longueur de diffusion



Augmenter le dopage  $\Rightarrow$  diminue la longueur de diffusion

# Jonction P-N

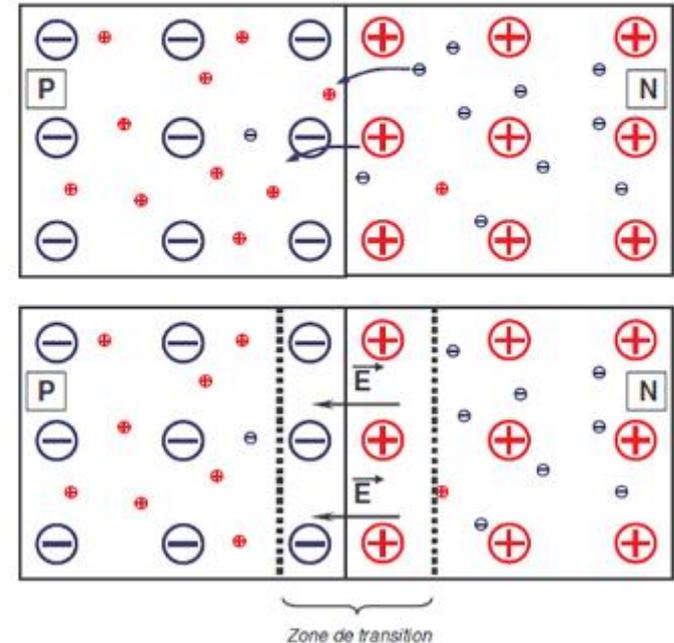
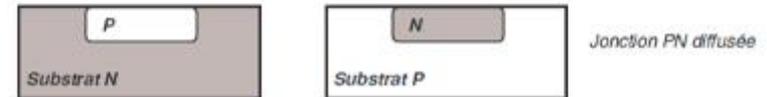
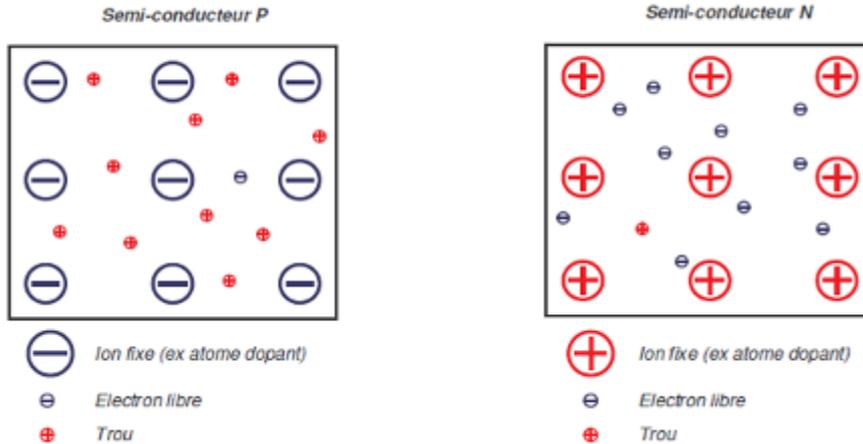


# Jonction P-N

## • Création d'une jonction PN.

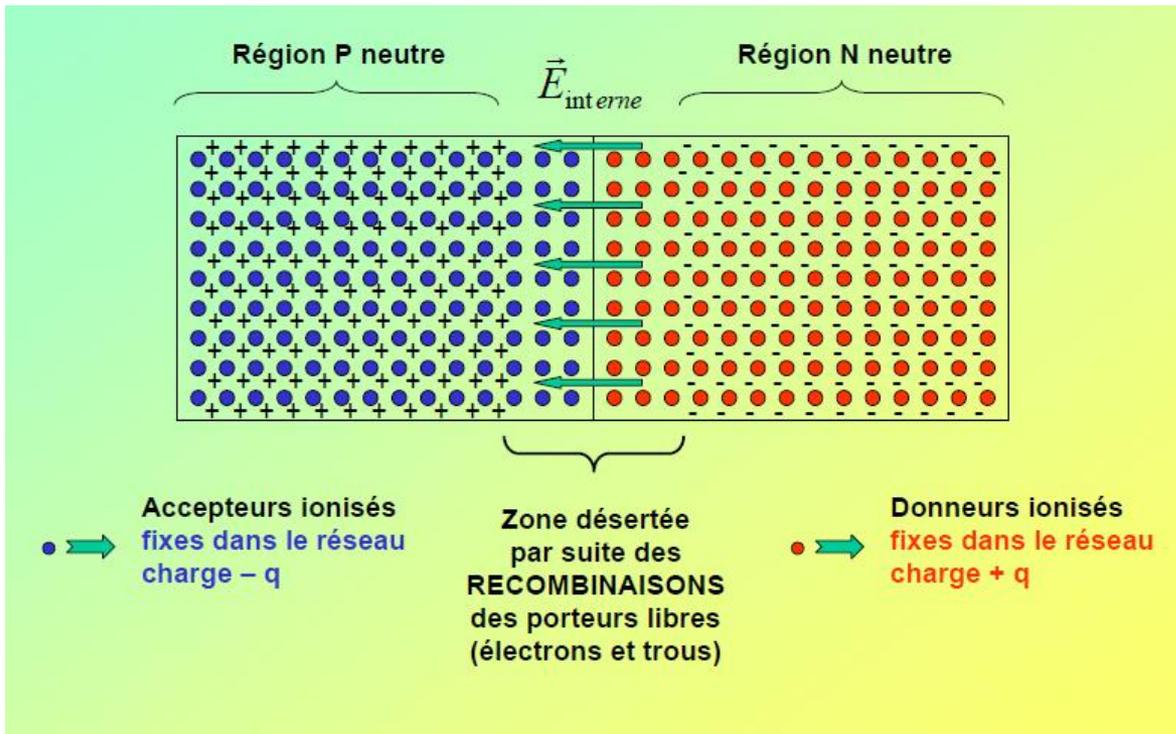
### Jonction PN

#### • Représentation simplifiée des semi-conducteurs dopés.

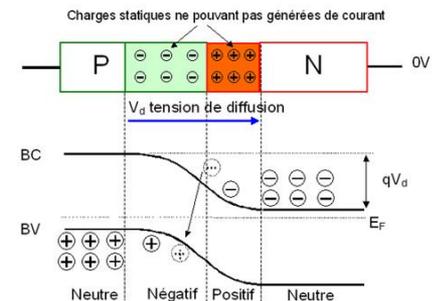
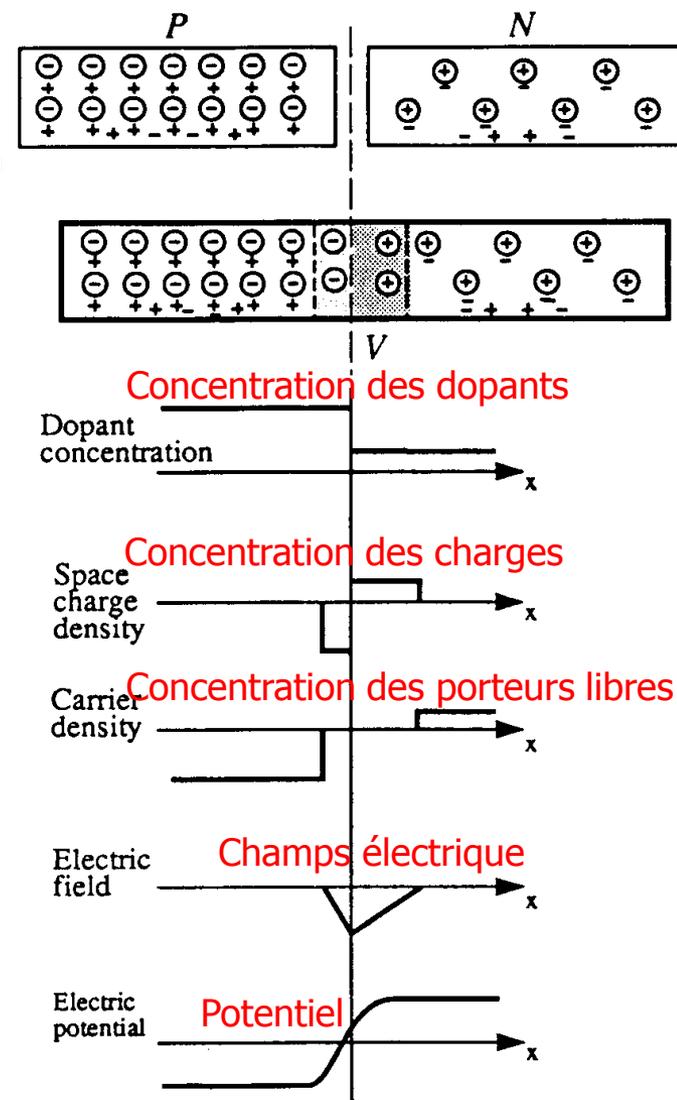


- Les électrons majoritaires du côté "N" ont tendance à diffuser du côté "P", où ils sont minoritaires. Quand un électron arrive du côté "P", il se recombine avec un trou, et, en disparaissant, il laisse du côté "N" un atome donneur ionisé positivement non compensé électriquement.
- Les trous majoritaires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



- Accepteur ●
- Donneurs ○
- Trous +
- e- -



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

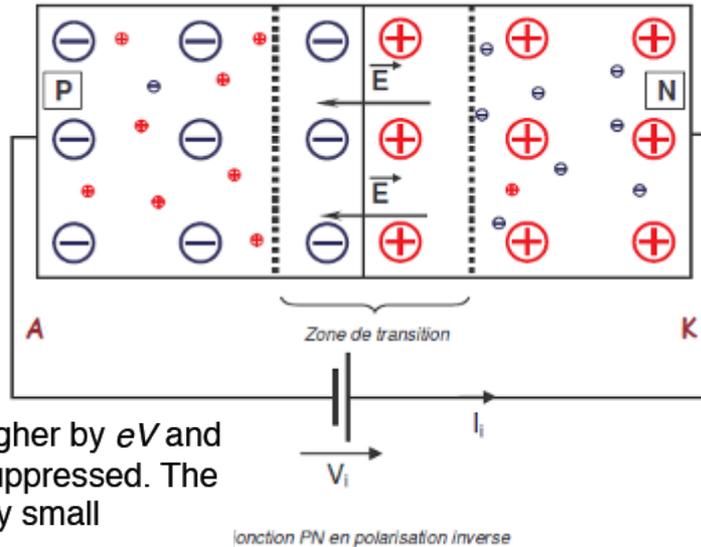
$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = \frac{-dE}{dx} = \frac{-\rho}{\epsilon_s}$$

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

# Jonction PN: Polarisation inverse / directe

• Jonction PN polarisée en inverse.

Inverse (reverse)



La jonction PN en polarisation inverse

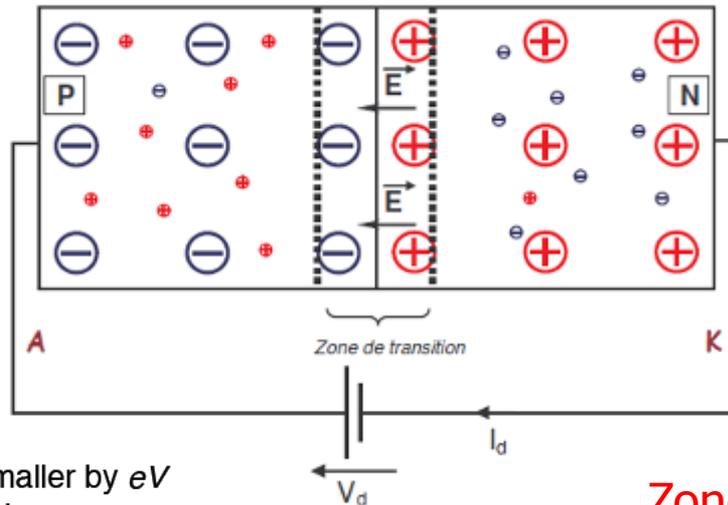
- La tension  $V$  se superpose au potentiel de diffusion  $V_d$
- La barrière de potentiel augmente et devient infranchissable pour les porteurs majoritaires
- La zone de déplétion augmente
- Le courant est dû aux porteurs minoritaires  $I_i$

➔ Elargit la zone de transition

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

• 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 higher by  $eV$  and diffusion across the junction is suppressed. The current across the junction is very small "leakage current".

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

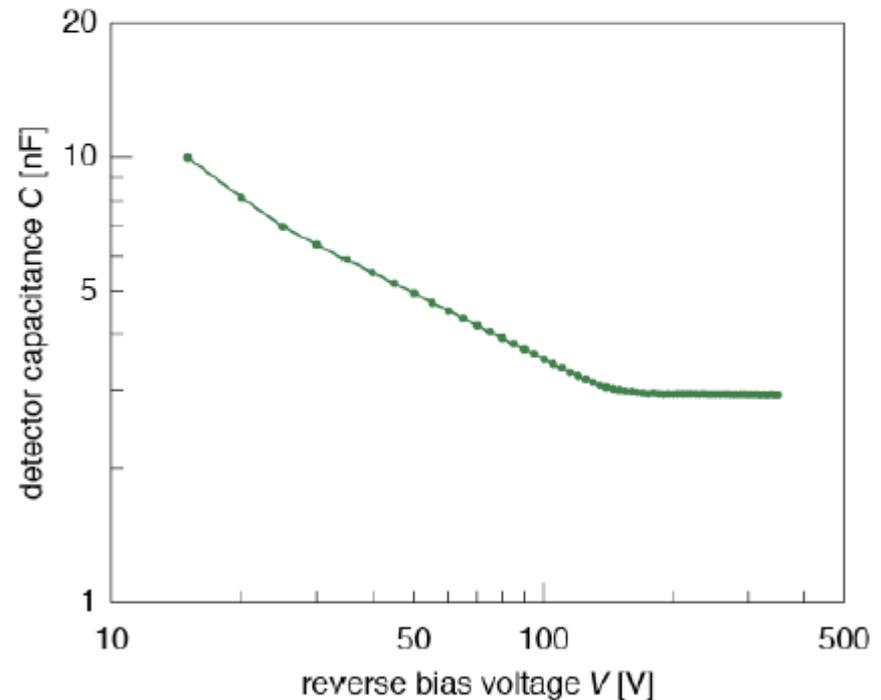
# Capacité d'un détecteur

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

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

$\rho$  ... specific resistivity of the bulk  
 $\mu$  ... mobility of majority charge carrier  
 $V$  ... bias voltage  
 $A$  ... detector surface

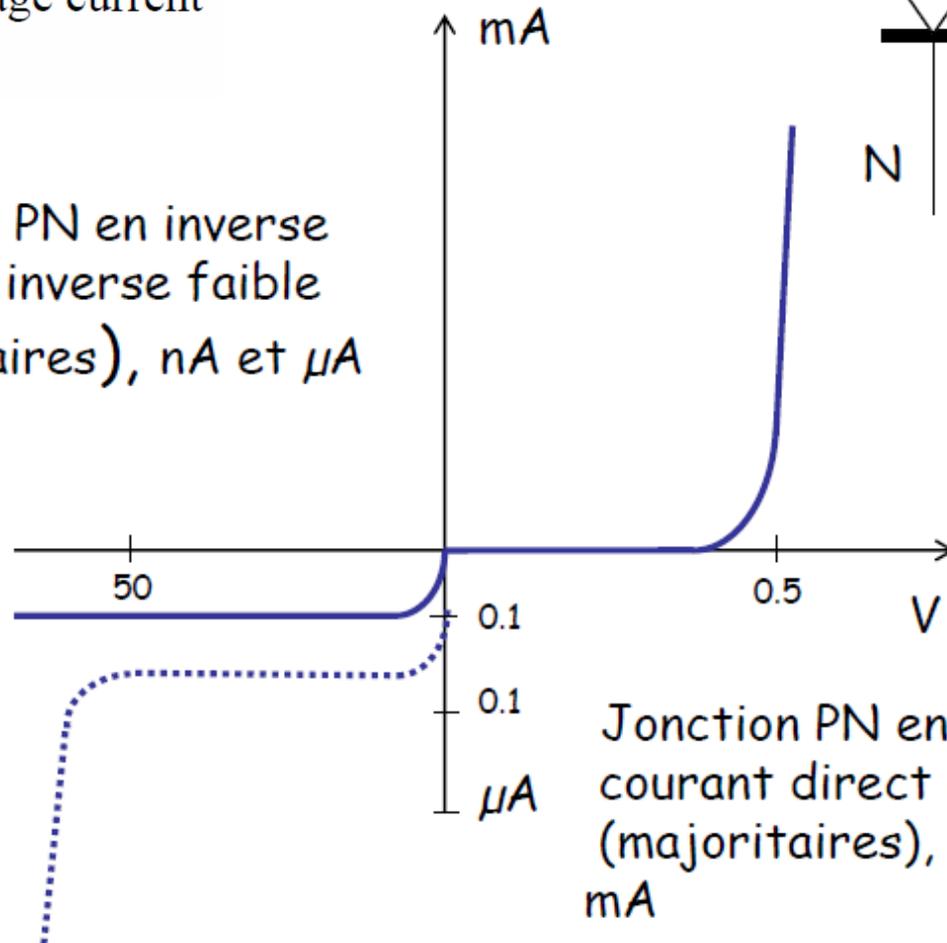
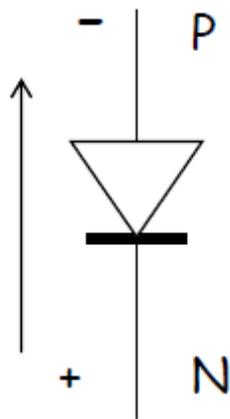
Measured detector capacitance as a function of the bias voltage, CMS strip detector:



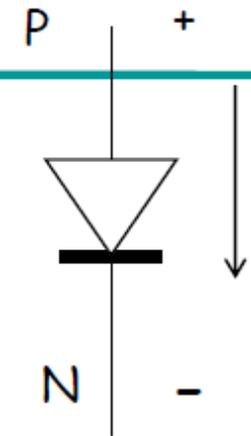
# Jonction PN = Diode

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

Jonction PN en inverse  
courant inverse faible  
(minoritaires), nA et  $\mu A$



Jonction PN en direct  
courant direct élevé  
(majoritaires),  $\mu A$  et  
mA



# Transistors NPN

## 2) REALISATION DES TRANSISTORS NPN INTEGRES

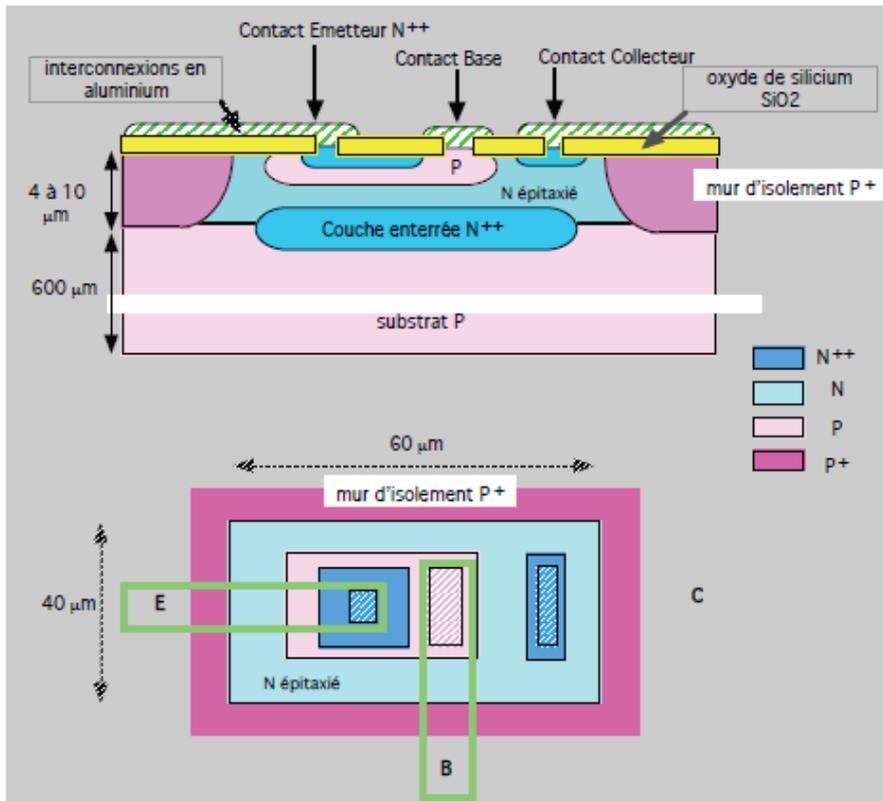
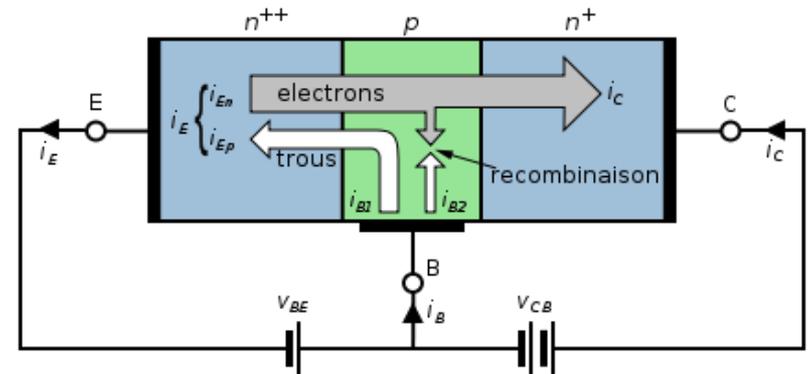


Figure 3 : Transistor NPN intégré

La figure 3 représente la coupe et la vue de dessus d'un transistor NPN intégré qui nécessite l'utilisation de **6 masques de réalisation**.



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

# Quelques propriétés de S.C. courants

Material	Z	$E_g$ [eV]	w [eV]	$\mu_e$ [cm <sup>2</sup> /Vs]	$\mu_h$ [cm <sup>2</sup> /Vs]	$\tau_e$ [s]	$\tau_h$ [s]	$\epsilon$	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
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 <sub>2</sub>	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

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 $n_i$	[ $\text{cm}^{-3}$ ]	$1.5 \cdot 10^{10}$	$2.4 \cdot 10^{13}$	$1.8 \cdot 10^6$	$< 10^3$
electron mobility	[ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ]	1500	3900	8500	1800
hole mobility	[ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ]	450	1900	400	1200

## 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
- $E_{\text{gap}}$  petit (0.66 eV),  $X_0$  faible
  - Mesure d'énergie, spectroscopie gamma
- Refroidissement nécessaire (N@77K)

## Diamant

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

## 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

# 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)

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

Dépend aussi de la masse volumique

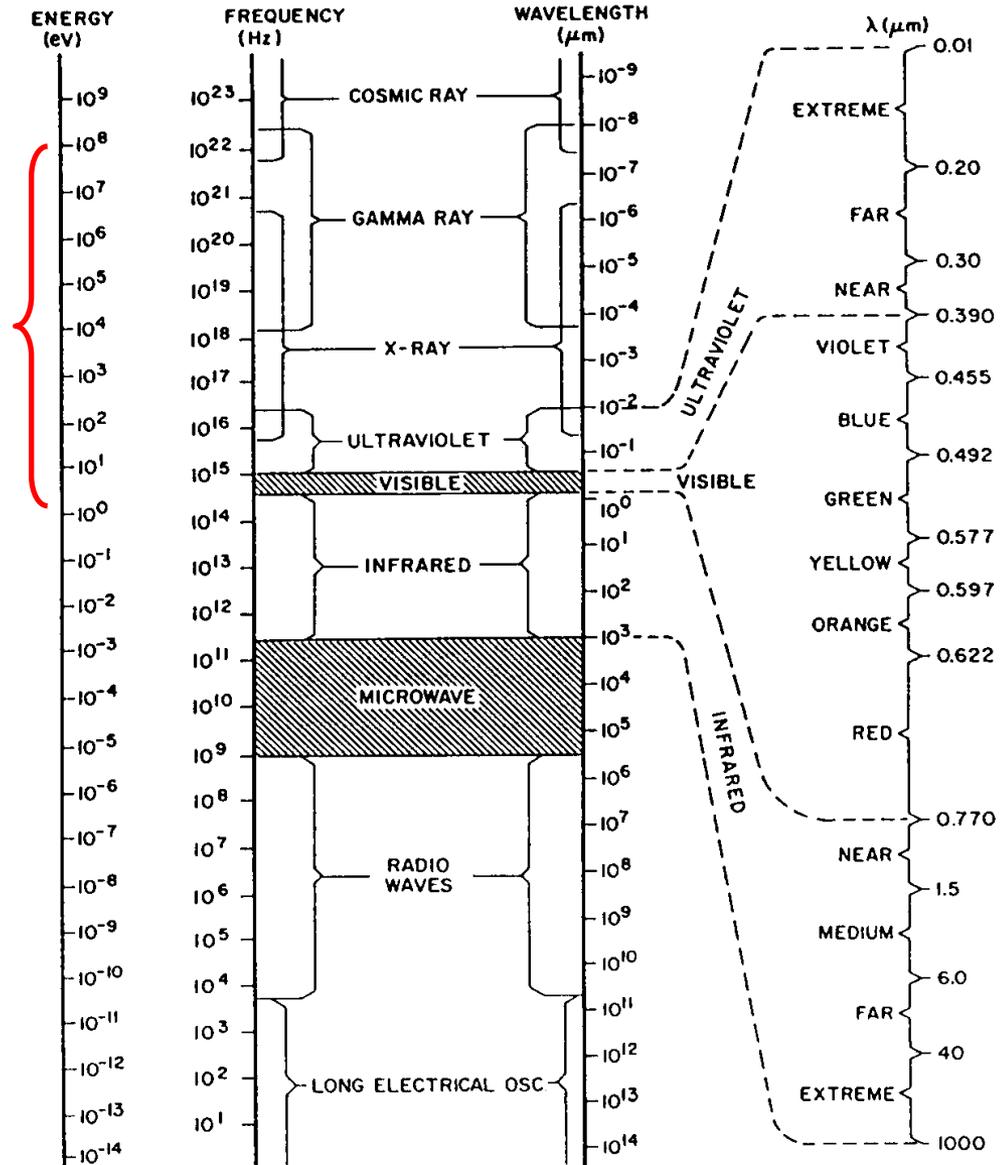
Exp: Silicium.  $Z = 14$ ,  $A = 28$

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

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

# 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  $\sim 1\text{-}2 \text{ eV}$

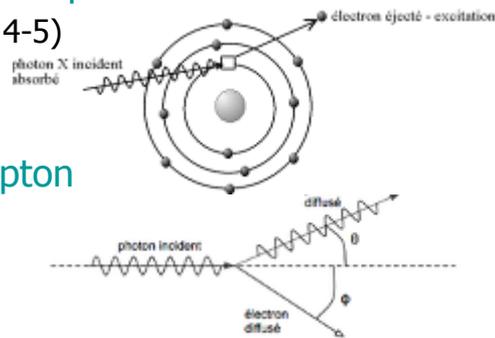


# Interaction des photons avec la matière (2)

- 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  $e^+e^-$ 
  - $\propto Z^2$

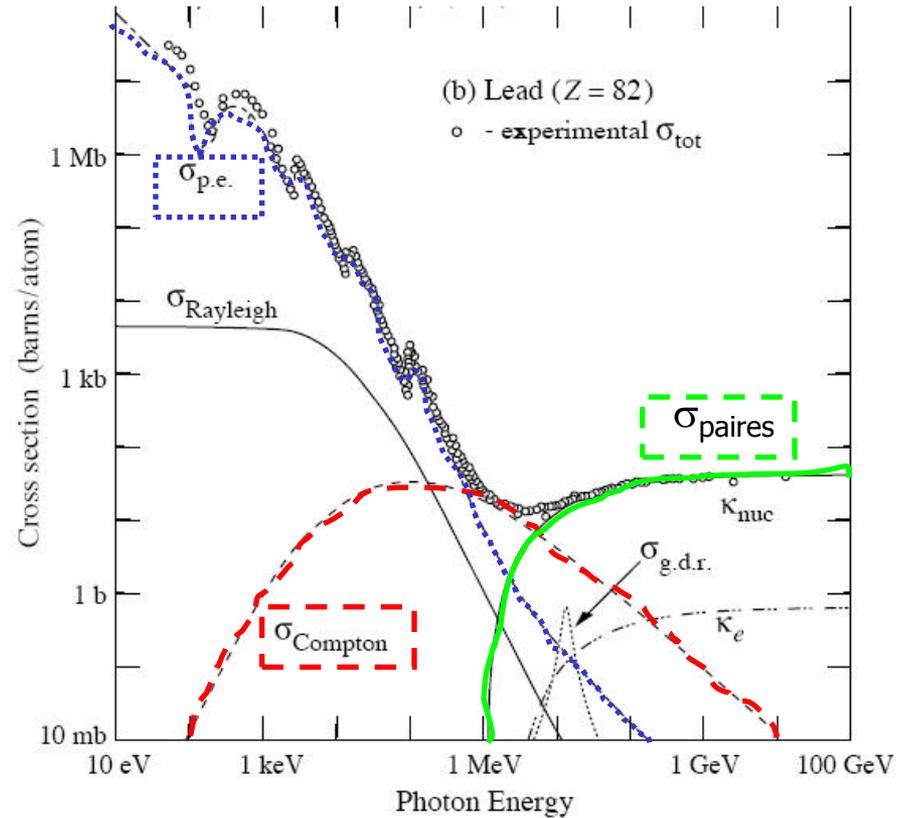
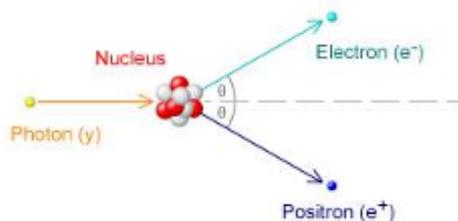
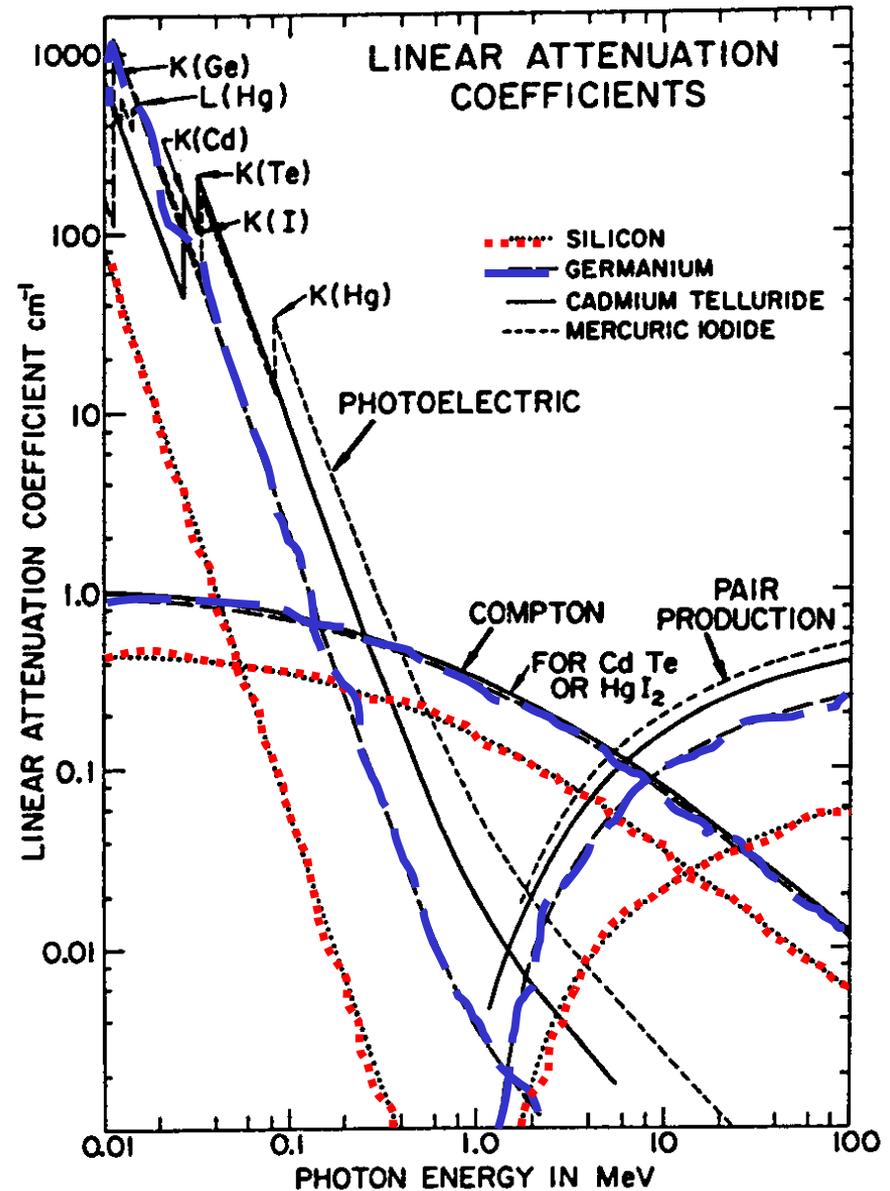


Figure 27.14: Photon total cross sections as a function of energy in carbon and lead, showing the contributions of different processes:

- $\sigma_{p.e.}$  = Atomic photoelectric effect (electron ejection, photon absorption)
- $\sigma_{\text{Rayleigh}}$  = Rayleigh (coherent) scattering—atom neither ionized nor excited
- $\sigma_{\text{Compton}}$  = Incoherent scattering (Compton scattering off an electron)
- $\kappa_{\text{nuc}}$  = Pair production, nuclear field
- $\kappa_e$  = Pair production, electron field
- $\sigma_{g.d.r.}$  = 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 /  $\gamma$  (keV – MeV)
    - $\sim 2.7 \mu\text{m}$  (1keV)
    - $130 \mu\text{m}$  (10keV)
    - $2.3 \text{ cm}$  (100keV)
    - $67 \text{ cm}$  (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

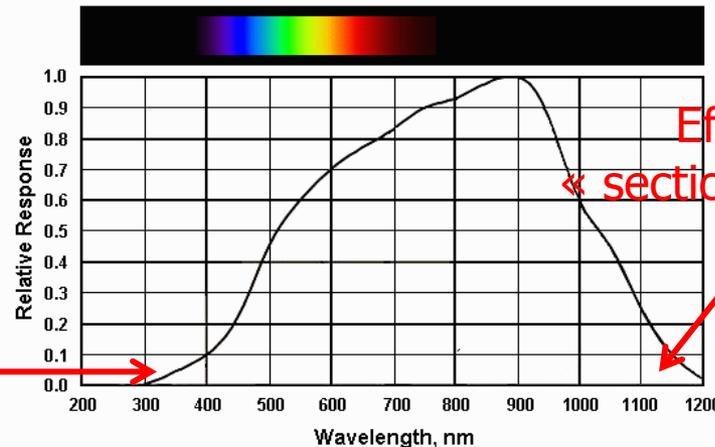
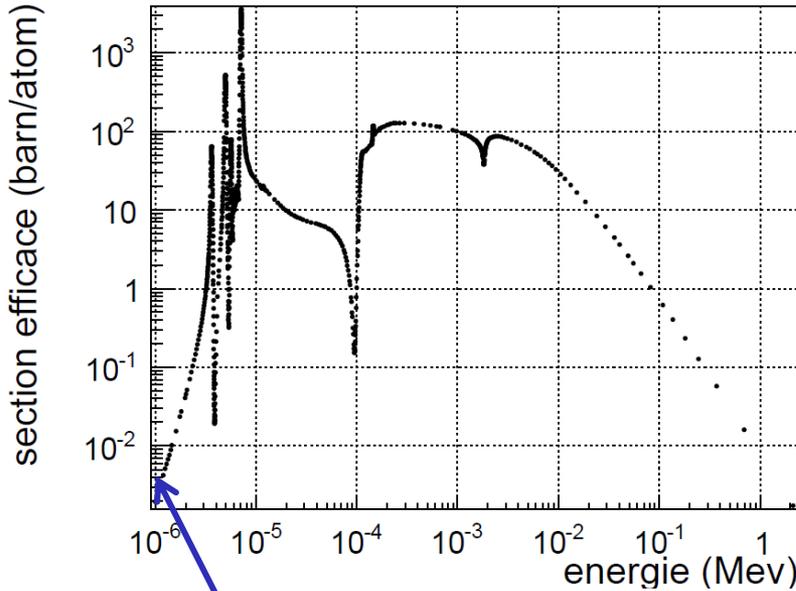
Section efficace d'interaction photon dans le silicium vs Energie du photon

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

$$\eta = (1 - \mathcal{R})\zeta[1 - \exp(-\alpha d)], \quad (17.1-1)$$

Quantum Efficiency

where  $\mathcal{R}$  is the optical power reflectance at the surface,  $\zeta$  the fraction of electron–hole pairs that contribute successfully to the detector current,  $\alpha$  the absorption coefficient of the material ( $\text{cm}^{-1}$ ) 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  $\zeta$  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.

# Particules chargées

- Particules chargées
  - $\mu^\pm$ ,  $K^\pm$ ,  $\pi^\pm$ , protons,  $\alpha$ , 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

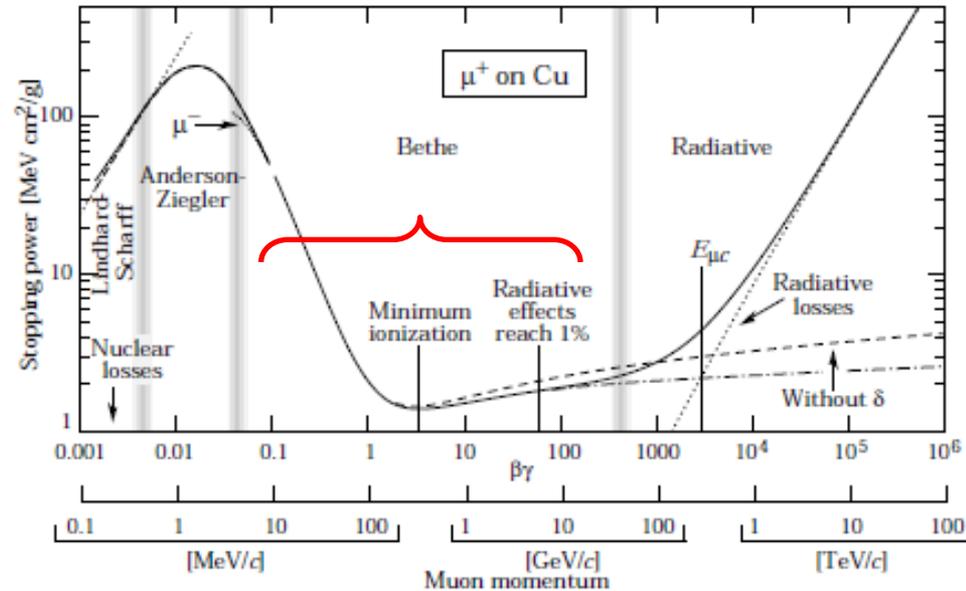
$m_e$  masse au repos de l'électron

$n$  densité numérique des électrons du matériau

$I$  potentiel d'excitation moyen du matériau

$\epsilon_0$  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  $\rho$  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.



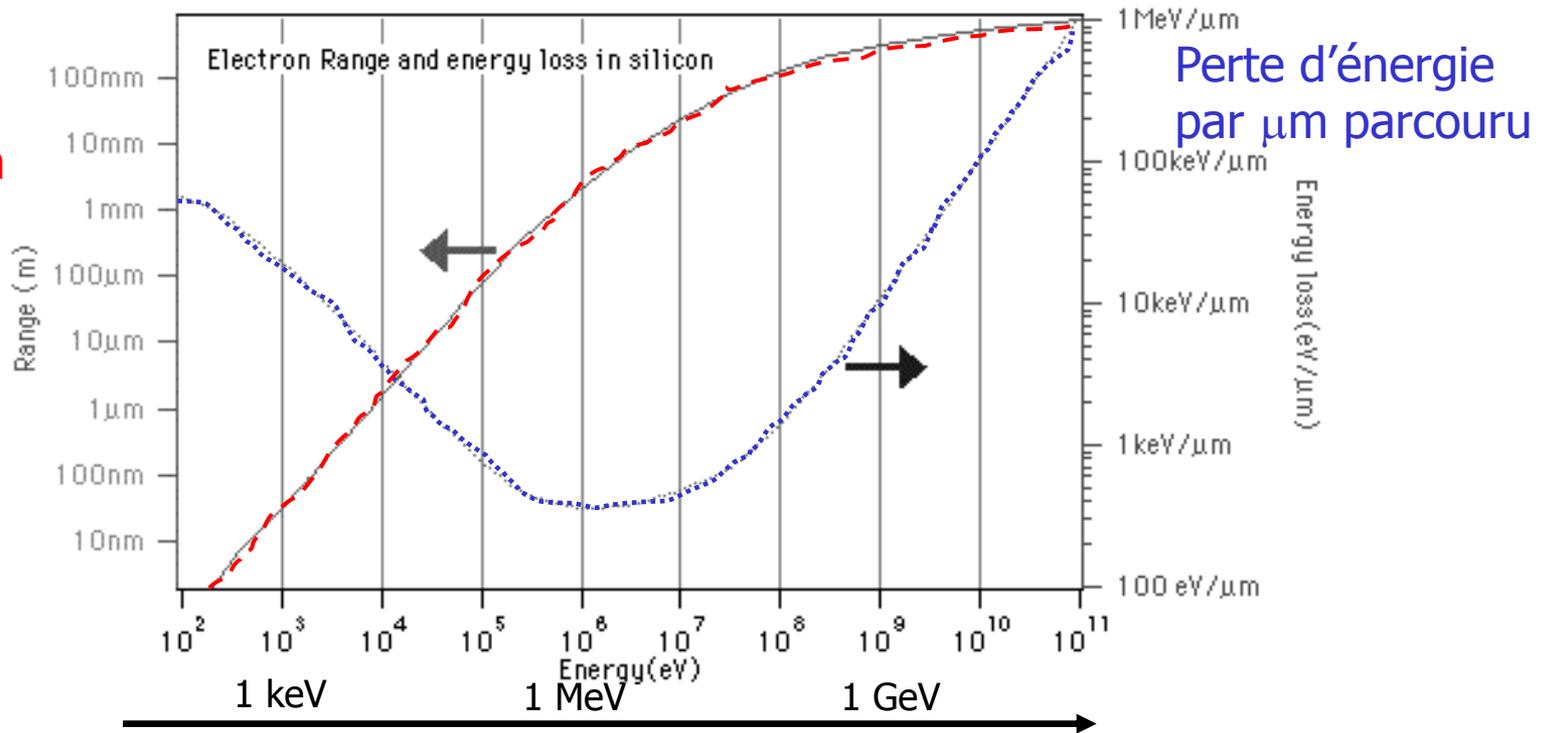
**Fig. 27.1:** Stopping power ( $= \langle -dE/dx \rangle$ ) for positive muons in copper as a function of  $\beta\gamma = p/M_e$  over nine orders of magnitude in momentum (12 orders of magnitude in kinetic energy). Solid curves indicate the total stopping power. Data below the break at  $\beta\gamma \approx 0.1$  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 " $\mu^-$ " illustrate the "Barkas effect," the dependence of stopping power on projectile charge at very low energies [6].

## • électrons: beaucoup plus légers

- ✓ sections efficaces différentes
- ✓ diffusion multiple significative à basse énergie
  - = changement de direction
- ✓ bremsstrahlung (rayonnement de freinage)
  - = perte d'énergie supplémentaire

# Pénétration des électrons dans le Silicium

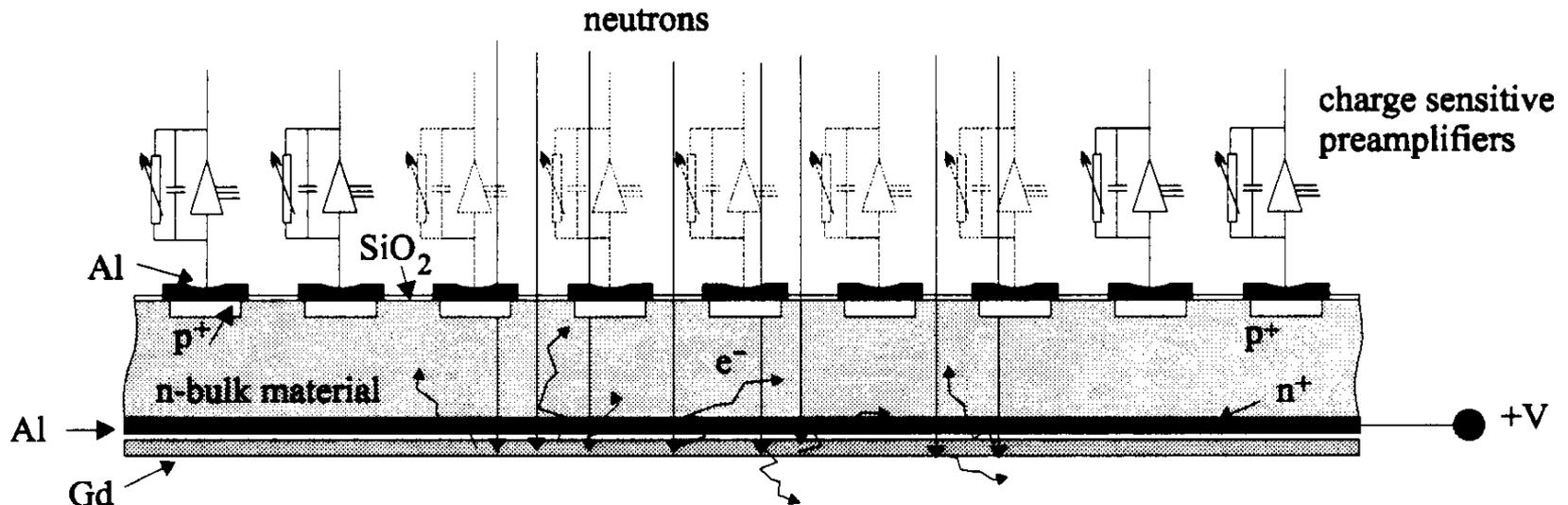
distance  
de pénétration  
des électrons



- Applications:
  - Imagerie  $\beta$
  - Calorimétrie

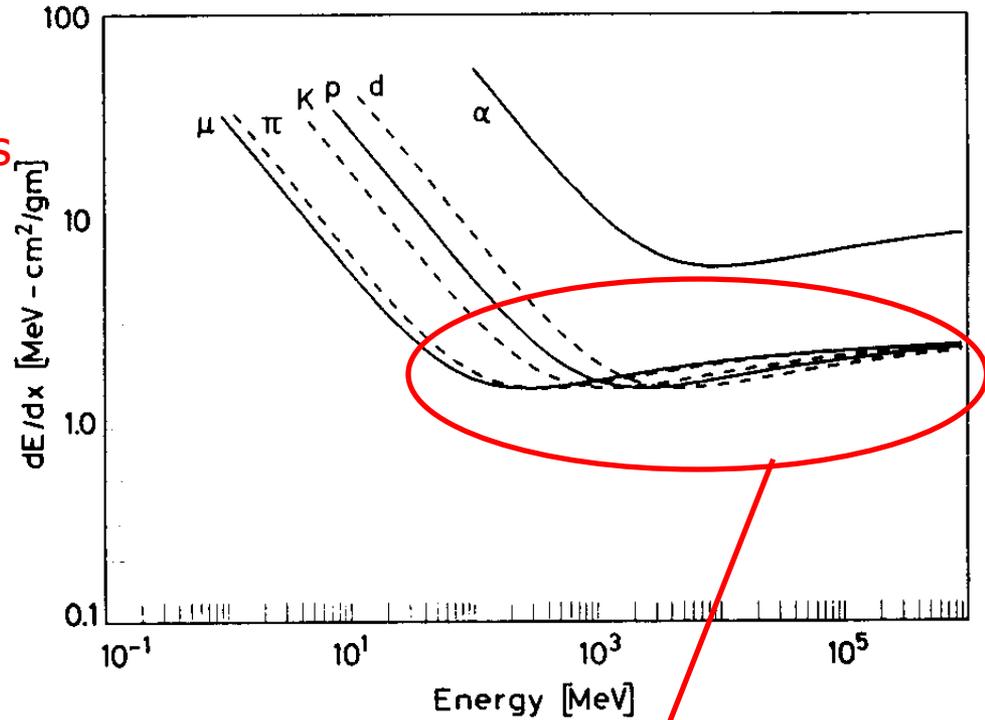
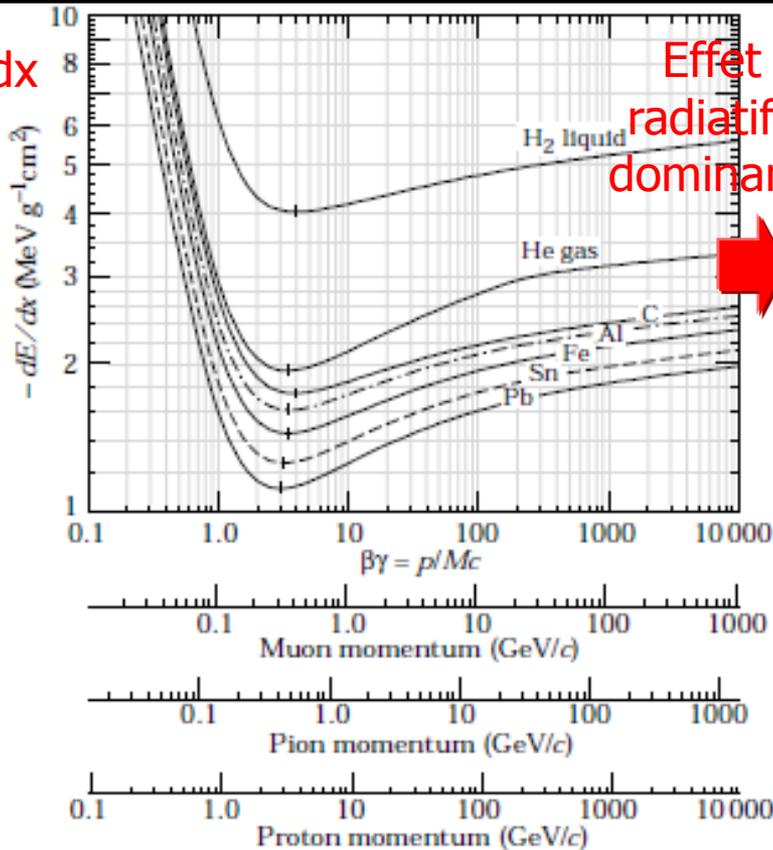
# Neutrons

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



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

$dE/dx$



$dE/dx$

$\sim$  constant et

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

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

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

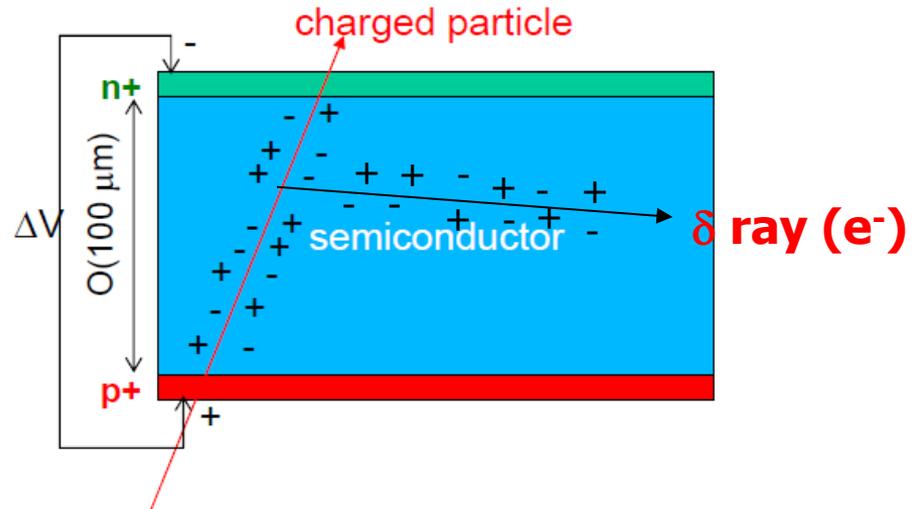
# M.I.P. dans un semi-conducteur: cas du Silicium

- Energie d'ionisation:
  - 3.6 eV en moyenne pour une ionisation (paire e- - ion)
  - nombre de paire créées par  $\mu\text{m}$  parcouru  $\sim 80$  paire/ $\mu\text{m}$  (valeur la plus probable)
  - Exemple 1: strips, pixels hybrides:
    - $\sim 300$   $\mu\text{m}$  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  $\sim 4$  fC !
    - énergie déposée dans la couche active:  $3.6 \times 80 \times 300 \sim 85$  keV
  - Exemple 2: pixels monolithiques actifs (MAPS):
    - $\sim 10$   $\mu\text{m}$  d'épaisseur de couche active
    - Charge créée:  $10 \mu\text{m} \times 80 \sim 800$  e/h. ( $\sim 0.1$  fC !)
    - énergie déposée dans la couche active:  $3.6 \times 80 \times 10 \sim 2.9$  keV
- La charge créée 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)

# 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  $\mu\text{m}$  de parcours dans le silicium
  - 10 keV  $\Rightarrow$  1  $\mu\text{m}$



- 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

# Distribution de Landau

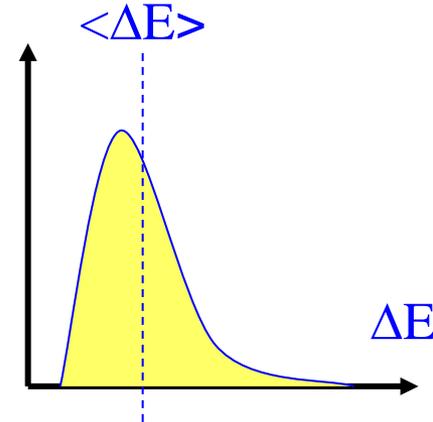
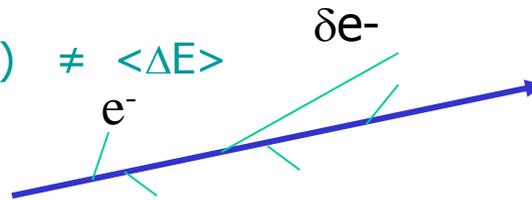
- Détecteur réel

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

- Couches minces

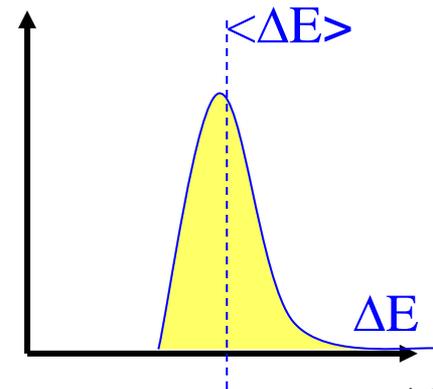
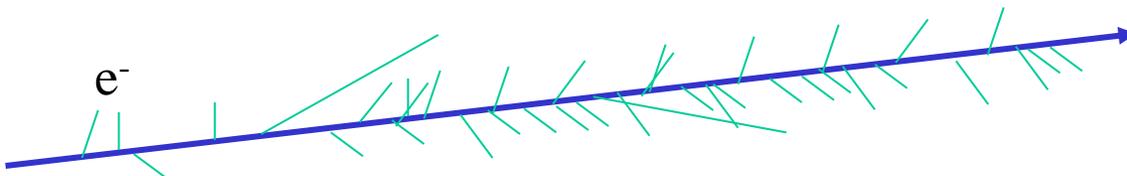
- Valeur la plus probable (MPV):  $\Delta E(\text{MPV}) \neq \langle \Delta E \rangle$ 
  - distributions de Landau

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



- Couches épaisses / matériaux denses

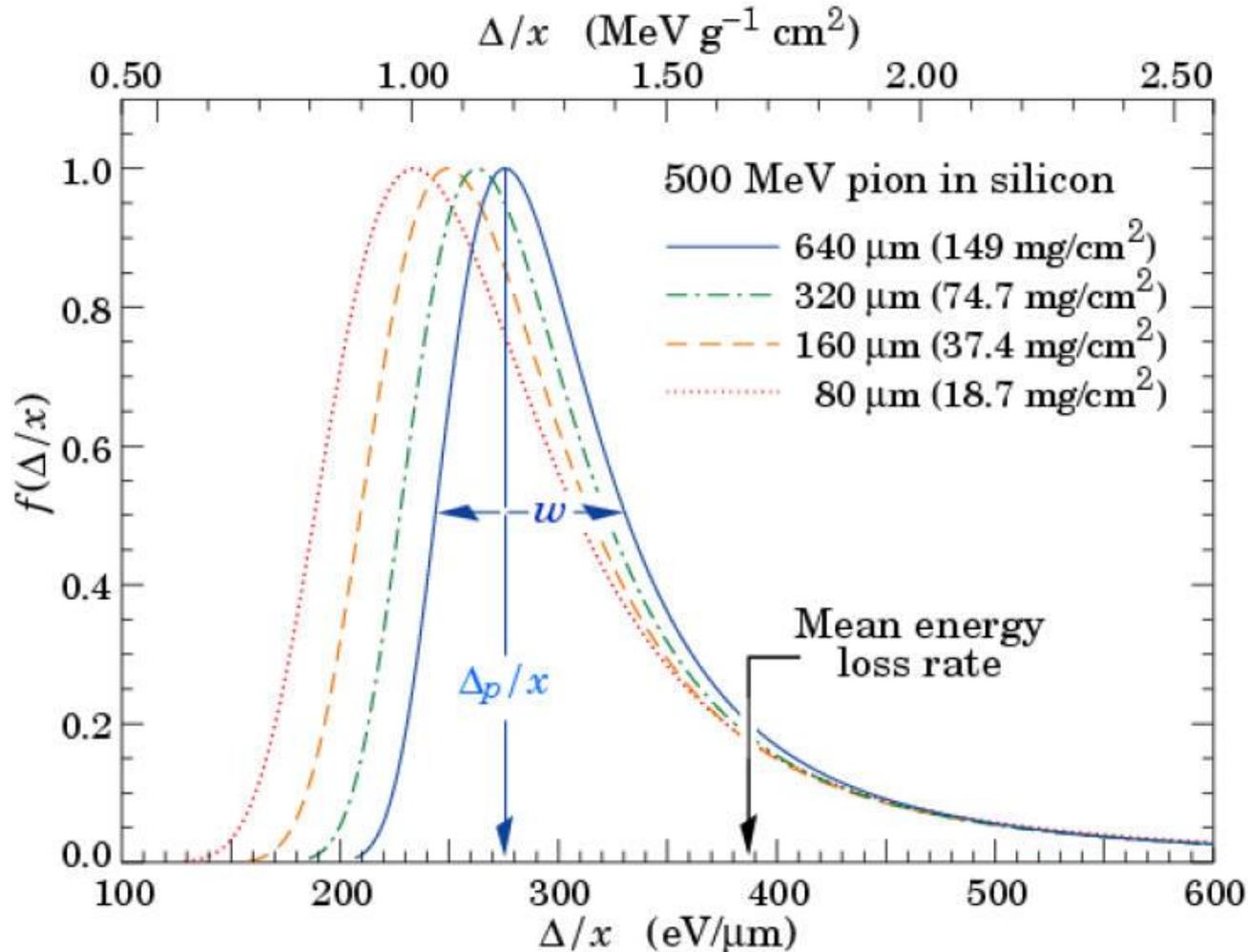
- Nombre plus élevé de collisions
- Théorème central limite  $\Rightarrow$  distribution gaussiennes



# 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



# La diffusion multiple (Multiple Coulomb Scattering)

Diffusion angulaire des particules chargées

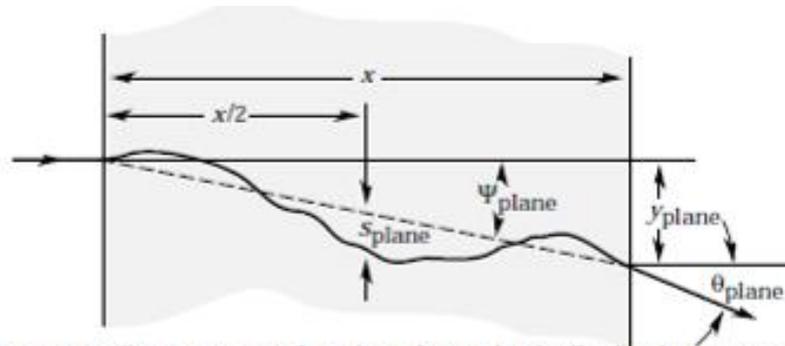


Figure 27.9: Quantities used to describe multiple Coulomb scattering. The particle is incident in the plane of the figure.

Profondeur traversée

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

$X_0 \equiv \text{radiation length}$

impulsion

Nature du matériau

Here  $p$ ,  $\beta c$ , 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

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

# 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 /  $\mu\text{m}$
    - 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 ?

# Principes de base de fonctionnement

## Le signal mesuré

---

Transport des charges

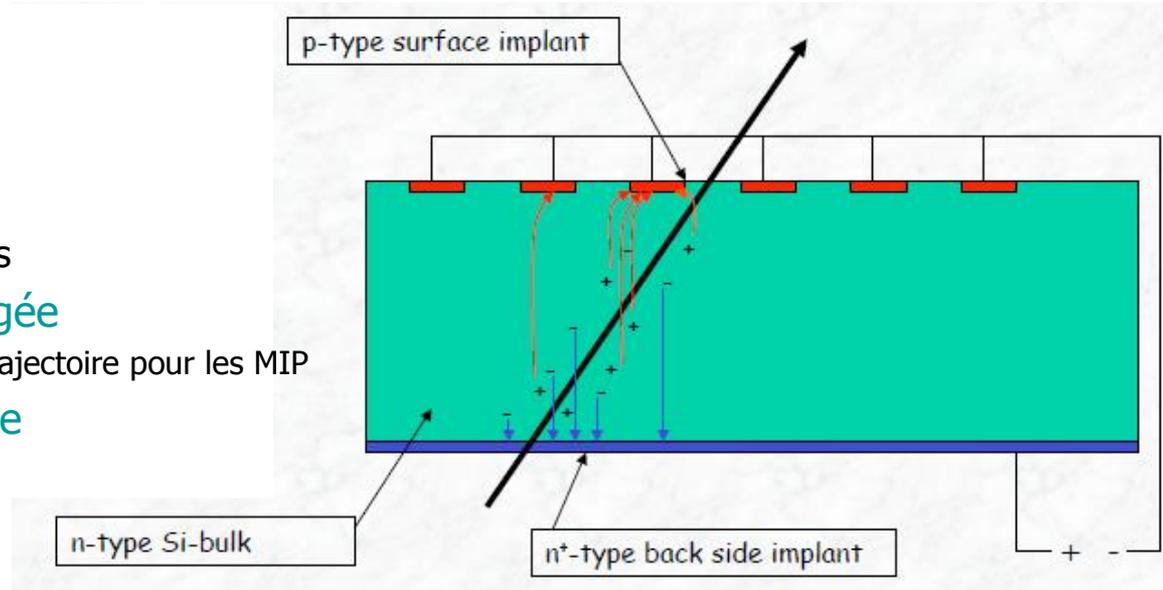
Notion de Signal / Bruit

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:

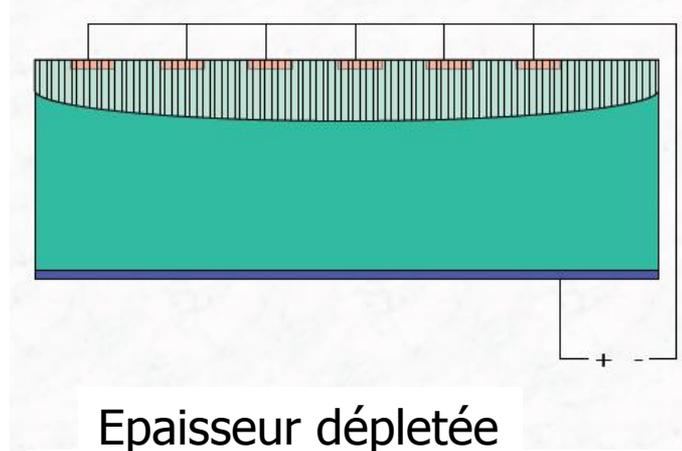
- Recombinaison
- Diffusion

## • Signal

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

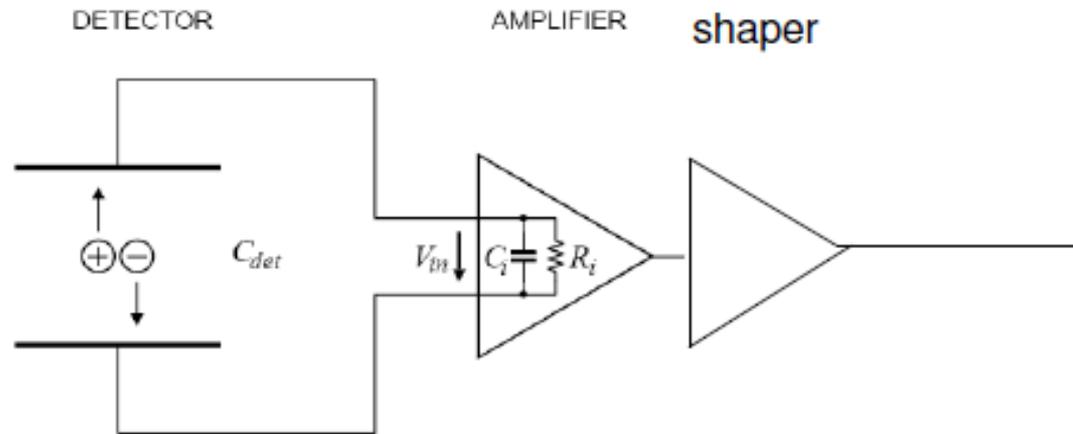
$$I = q v E$$

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

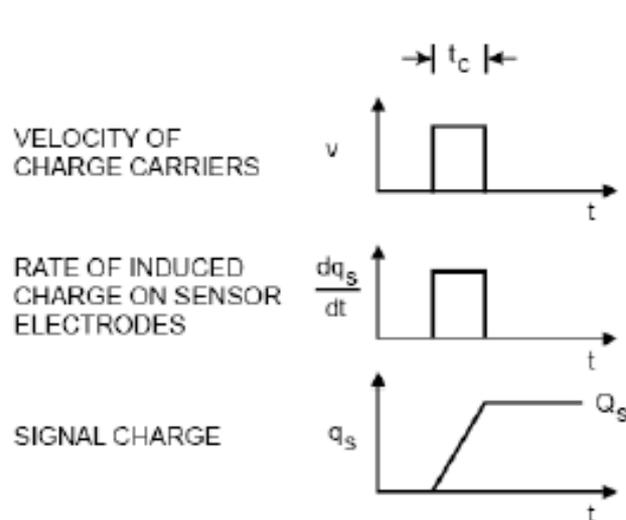


$$W \approx \left[ \frac{2\epsilon_r\epsilon_0}{q} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) (V_{bi} - V) \right]^{\frac{1}{2}}$$

# Modélisation simplifiée d'un détecteur



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



If  $\tau_{\text{readout}} \ll R_i \cdot (C_{\text{Det}} + C_i)$

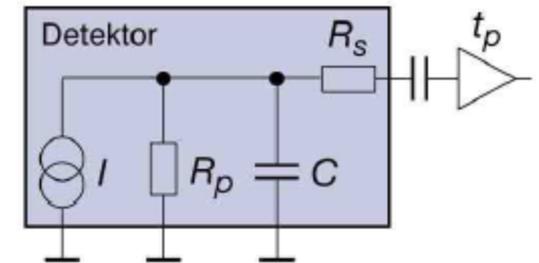
peak voltage at amplifier input :

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

Voltage depends on total capacitance at input!

# 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

$$ENC = \sqrt{ENC_C^2 + ENC_I^2 + ENC_{Rp}^2 + ENC_{Rs}^2}$$

- 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

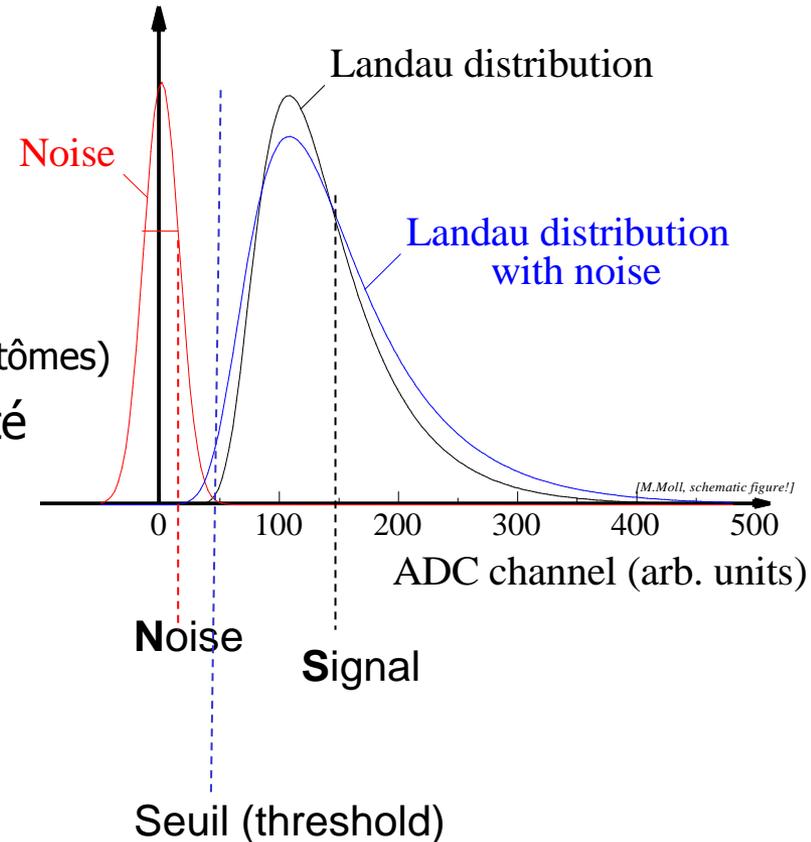
- Coupure trop faible  $\Rightarrow$  Fakes (impacts fantômes)

- Coupure trop élevée  $\Rightarrow$  Perte d'efficacité

- Valeurs typiques de sélection: 5-15

- Partie non gaussienne du bruit

- Augmente le taux de fakes

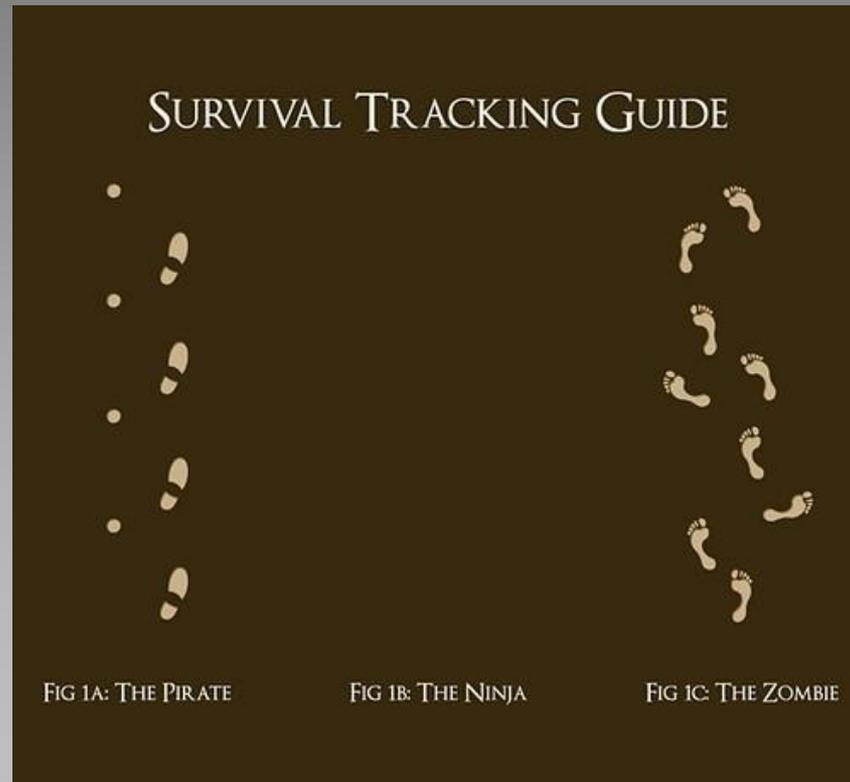


- Toute détérioration de S/N peut se traduire par une perte d'efficacité et/ou une augmentation des impacts fantômes

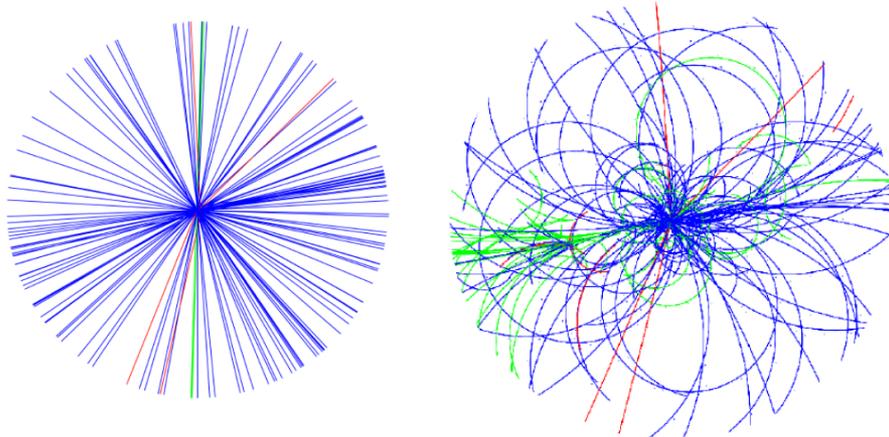
# Trajectographie, vertexing

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

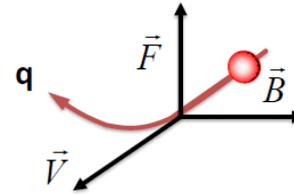
---



# Trajectographie et détermination de l'impulsion



Avec champ magnétique



Newton :  $\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{V^2}{R} \vec{i}$

Maxwell :  $\vec{F} = q\vec{V} \wedge \vec{B}$

$$\Rightarrow R = \frac{mV}{qB} = \frac{P}{qB}$$

$$R \sim L^2/8s$$

$$p_T \text{ (GeV)} = 0.3 B \text{ (Tesla)} R \text{ (m)}$$

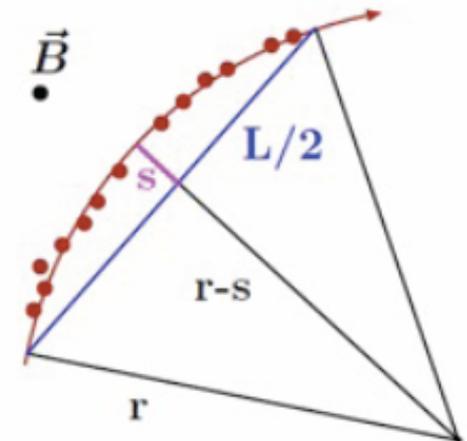
$$s = 0.3 B L^2 / 8p_T$$

- Courbure de la trajectoire = mesure de l'impulsion
- Sens de la courbure = signe de la charge

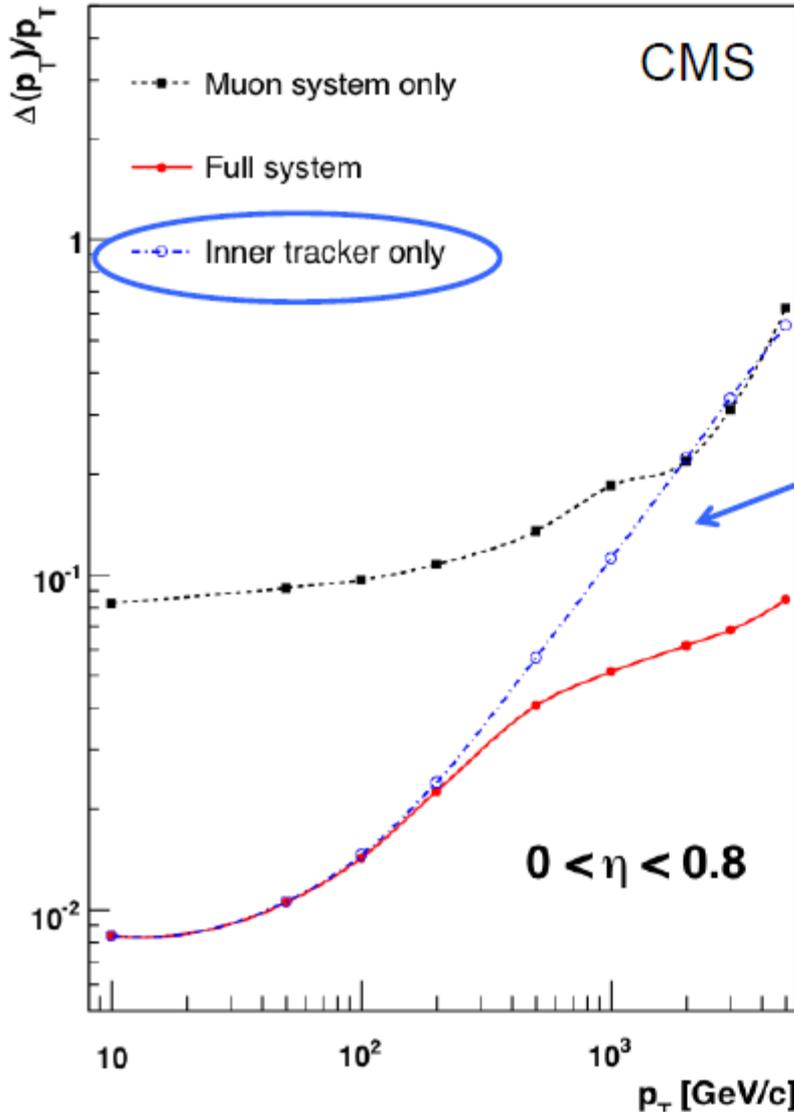
– Résolution sur l'impulsion:

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

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \frac{\sigma_s}{s} = \sqrt{\frac{720}{n+4}} \frac{\sigma_y p_T}{0.3 B L^2}$$

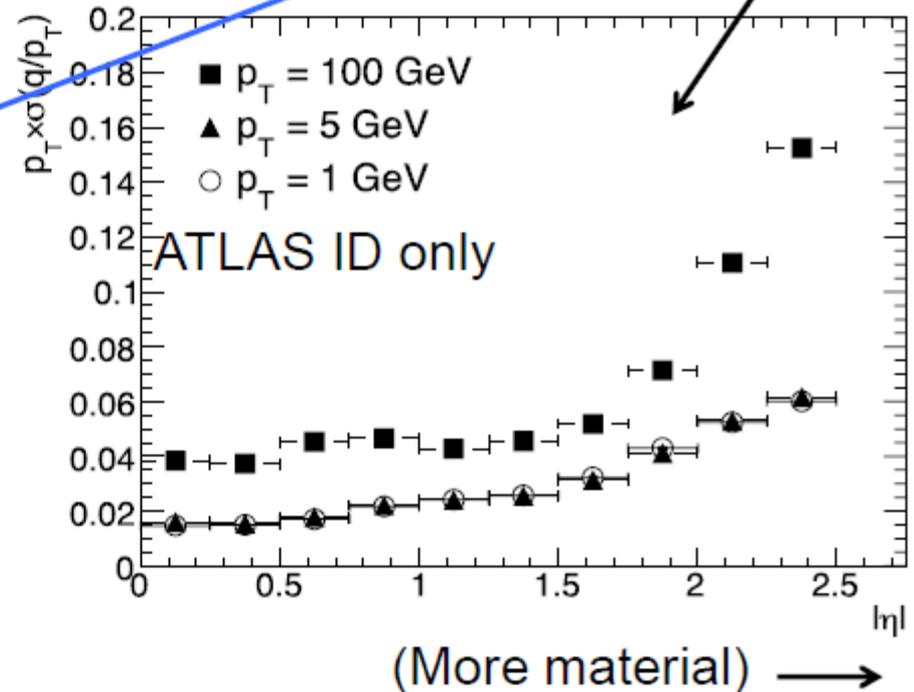


# Momentum resolution



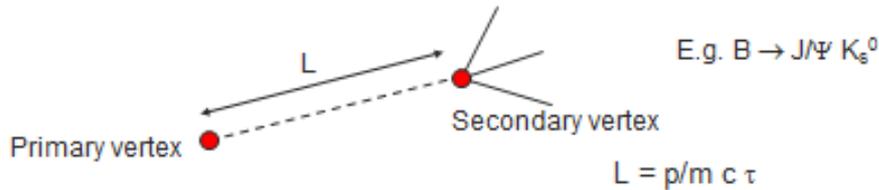
Expected relative  $p_T$  resolution for muons vs  $|\eta|$  and  $p_T$ .

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



# Etiquetage des saveurs lourdes (b,c, $\tau$ )

- Reconstruction des Vertex



Stable particles $\tau > 10^{-6}$ s		$c\tau$
n		2.66km
$\mu$		658m
Very long lived particles $\tau > 10^{-10}$ s		
$\pi, K^\pm, K_L^0$	$2.6 \times 10^{-8}$	7.8m
$K_S^0, E^\pm, \Delta^0$	$2.6 \times 10^{-10}$	7.9cm
Long lived particles $\tau > 10^{-13}$ s		+ charm (D)
$\tau^\pm$	$0.3 \times 10^{-12}$	91 $\mu$ m
$B_d^0, B_s^0, \Delta_b$	$1.2 \times 10^{-12}$	350 $\mu$ m
Short lived particles		
$\pi^0, \eta^0$	$8.4 \times 10^{-17}$	0.025 $\mu$ m
$\rho, \omega$	$4 \times 10^{-23}$	10 <sup>-9</sup> $\mu$ m!!

Etiquetage de particules  $\Rightarrow$  reconstruction des vertex

Performances clefs dans de nombreuses analyses

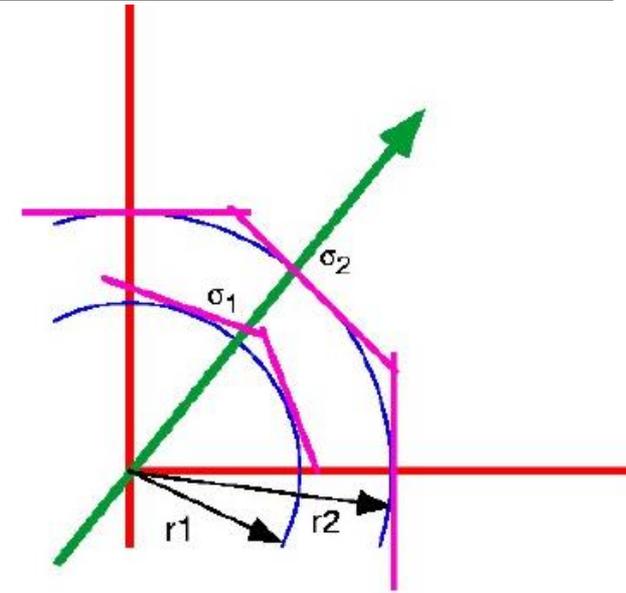
Les distances de vols déterminent la résolution typique nécessaire

# 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 a vide)
- Alignement et stabilité
- Efficacité de detection:  $\sim 100\%$
- Lecture rapide pour éviter l'empilement

Terme de diffusion multiple

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

Terme d'alignement

Voir exercices

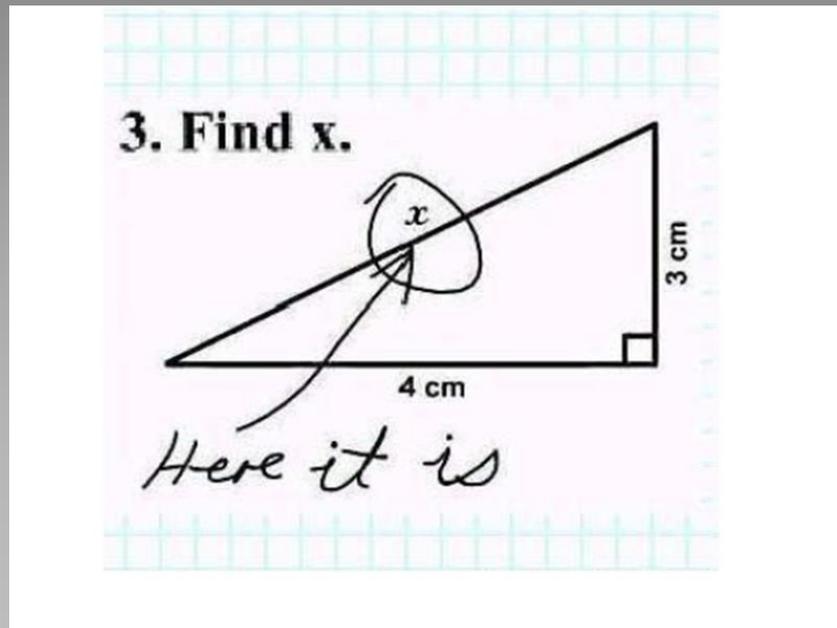
# Résolution spatiale

Digitale

Centre de gravité

Techniques avancées (fonctions eta)

---



# Résolution digitale

- Détecteur à bandes

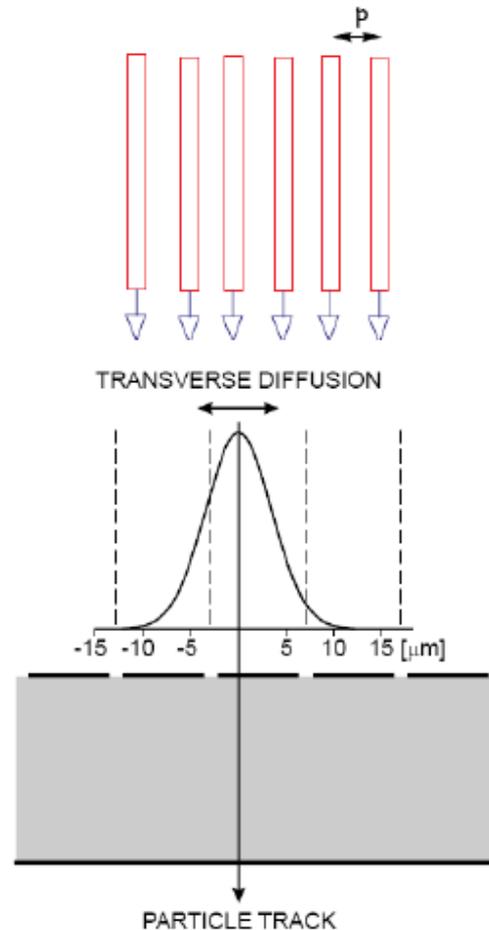
- Si le signal n'est collecté que par une seule voie
  - Résolution digitale  $\Rightarrow$  gouverné par le pitch
- On peut montrer que :

$$\sigma_x = \frac{p}{\sqrt{12}}$$
$$\text{Resolution} = \overline{x - \bar{x}} = \sqrt{\frac{\int_{-p/2}^{p/2} (x - \bar{x})^2 dx}{p}} = \sqrt{\frac{1}{3} \frac{p^3/4}{p}} = \frac{p}{\sqrt{12}}$$

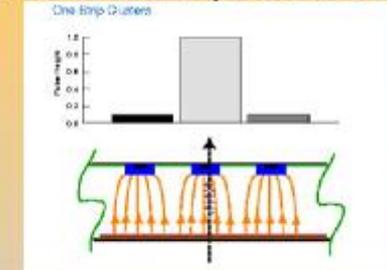
Voir exercice

- Amélioration si :

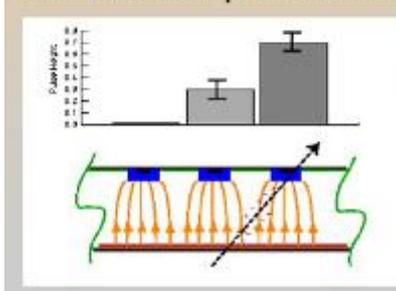
- partage des charges



## For one strip clusters

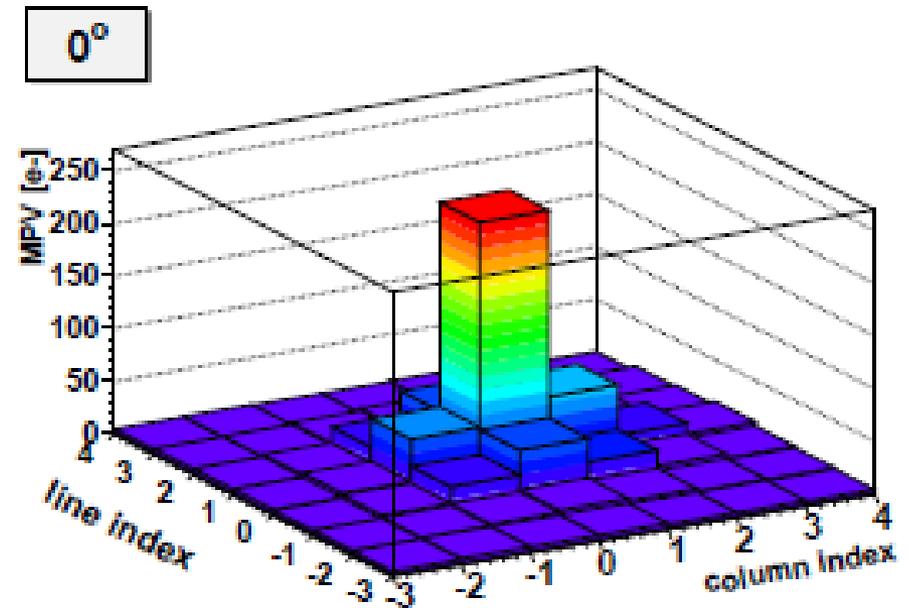


## For two strip clusters

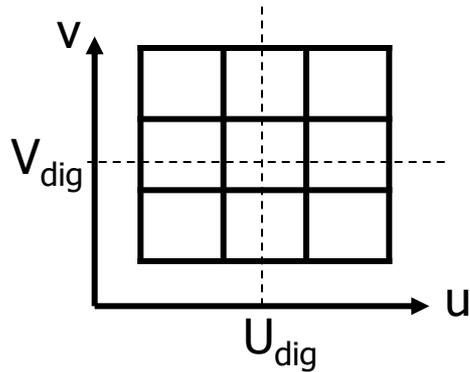


# Notions d'amas (cas d'un détecteur pixelisé)

- 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.

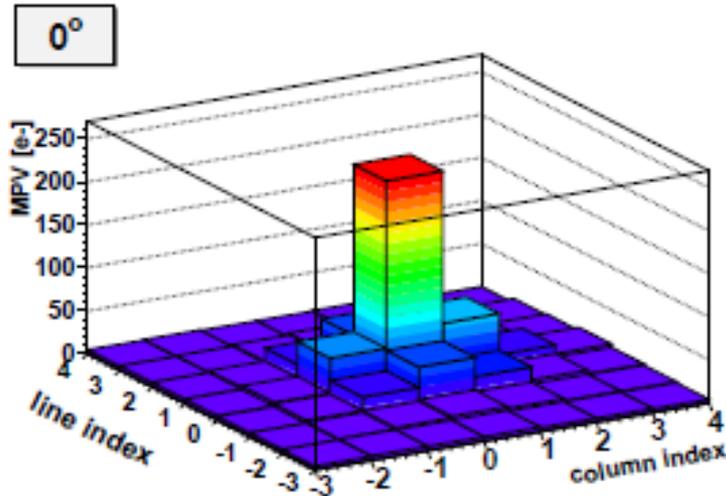


# Centre de Gravité sur un détecteur à pixels (sortie analogique)



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

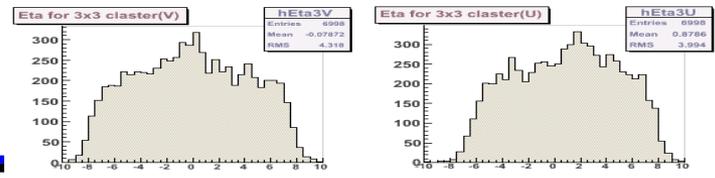
$$V_{CoG} = \frac{\sum_{i=1}^9 Q_i v_i}{\sum_{i=1}^9 Q_i}$$



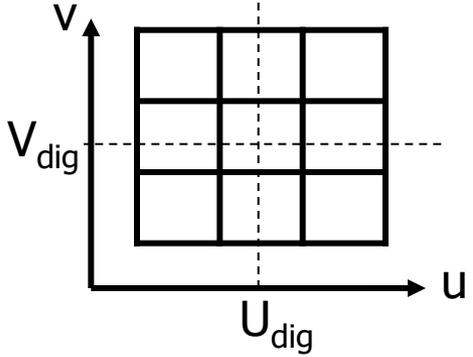
- Exemple de résolution  
Pour un pitch de 20  $\mu\text{m}$   
 $\sigma \sim 2.0\text{-}2.5 \mu\text{m}$

- 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



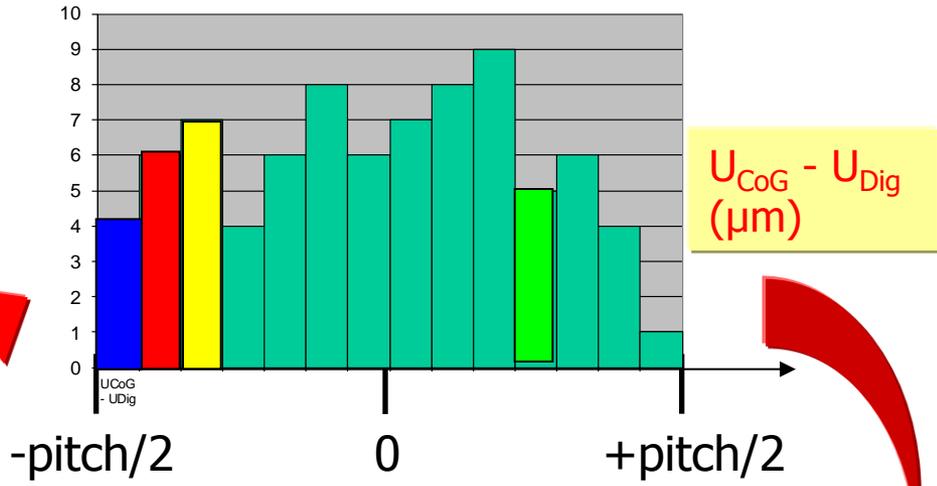
$$U_{CoG} = \frac{\sum_{i=1}^9 Q_i u_i}{\sum_{i=1}^9 Q_i}$$

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

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

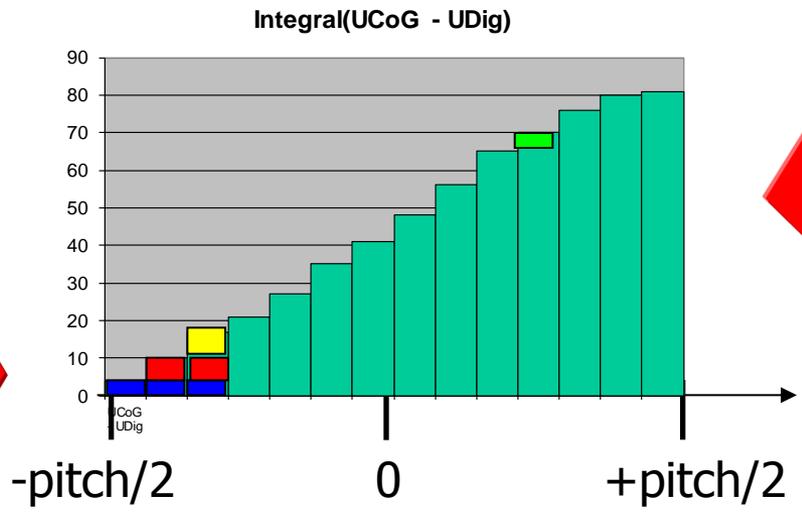
If there was no bias, this should be a flat distribution

N entries

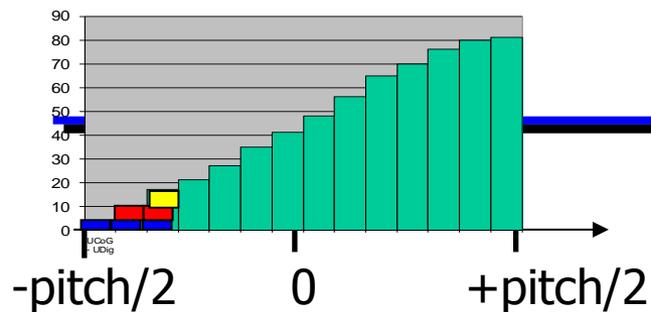


3/ Integrate this distribution to get the f eta distribution:

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



Integral(U<sub>CoG</sub> - U<sub>Dig</sub>)

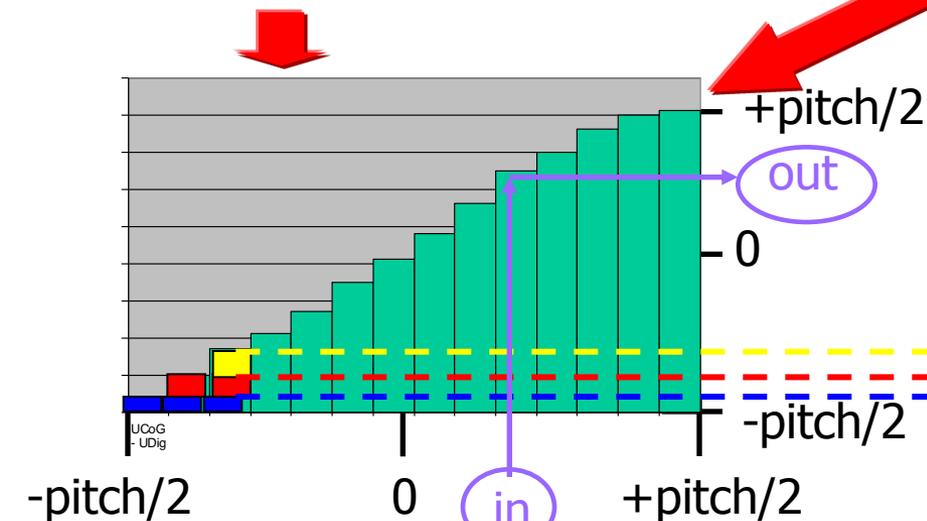


4/ Normalize by the Number of event (N entries), multiply by the pitch and shift it of - (pitch/2)

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

N entries

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

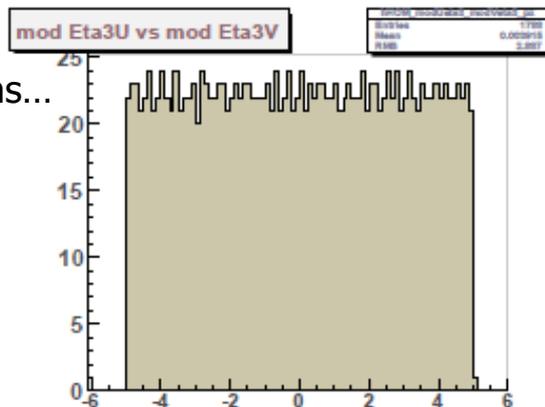


This width is proportionnal to the number of entries in the yellow bin.

**Consequences/issues:**

➤ Needs to generate these eta functions...

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

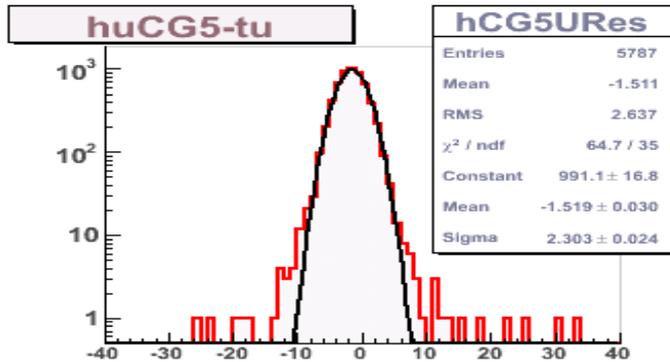


Transformation  
bijective qui rend  
toutes les  
positions  
équiprobables.

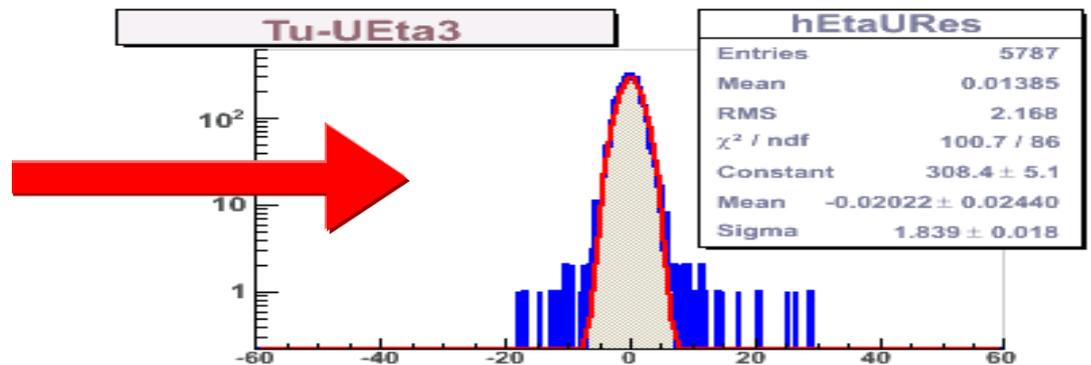
# Amelioration de la résolution par les fonctions $\eta$

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

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

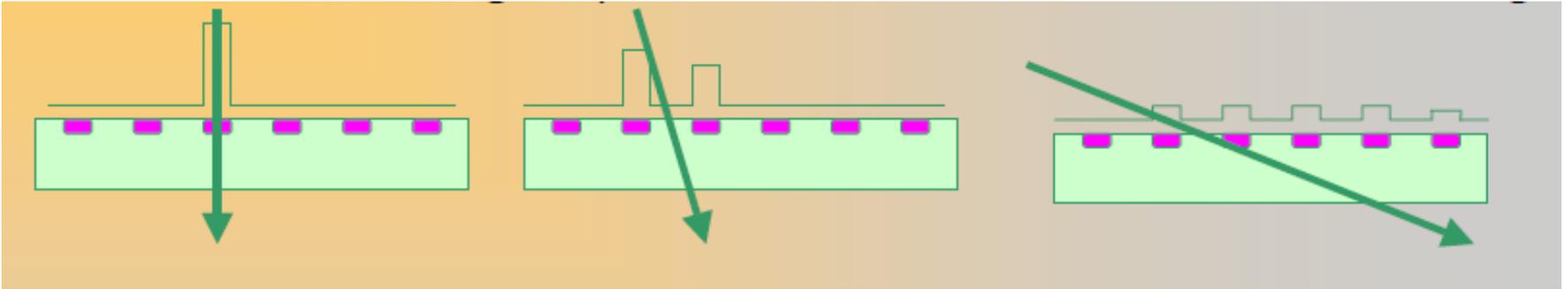


Eta(3x3) Residual:  $\sigma = 1.84 \mu\text{m}$

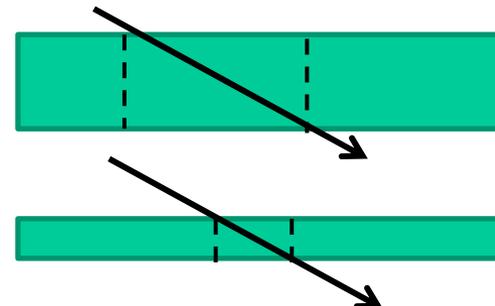
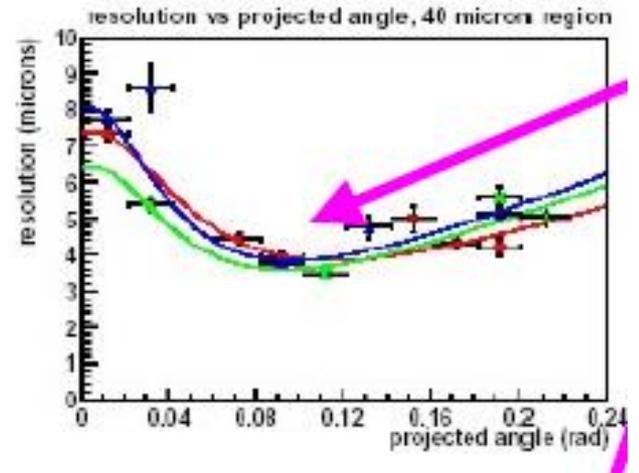


# Dépendance angulaire

- Etallement 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



# 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

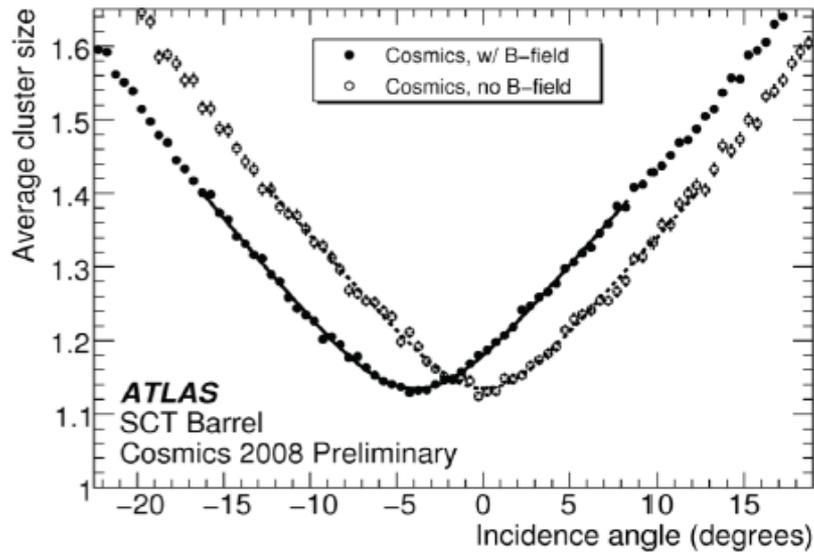
$$\vec{F} = q \left( \vec{E} + \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{B} \right)$$

- La dérive de porteurs de charge est modifiée par un angle  $\theta_L$

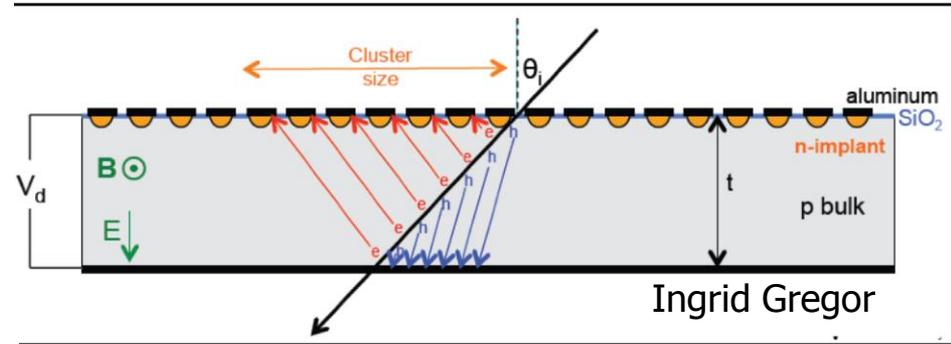
- Dépend de la mobilité ( $\mu_{e^-} \neq \mu_h$ )

- Peut être corrigée/calculée

- Nécessite connaissance de B et de l'épaisseur active



Measurement in ATLAS after full installation



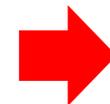
$$\tan \theta_L = \mu^H \cdot B_{\perp} \approx \mu \cdot B_{\perp}$$

$B_{\perp}$  = 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



# Effets des radiations

- Les détecteurs reçoivent des radiations en permanence puisqu'ils sont là pour détecter des particules !
  - Les flux de ces particules peuvent être élevés et avoir des conséquences sur le détecteur lui-même.
- 2 types de dommages
  - Radiations non ionisantes (bulk damage)  
Dommages sur la structure 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 ( $\text{SiO}_2$ ), augmentation du courant de fuite.
    - Modifie les propriétés aux interfaces
    - Unité: 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 !

# Facteur de NIEL

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

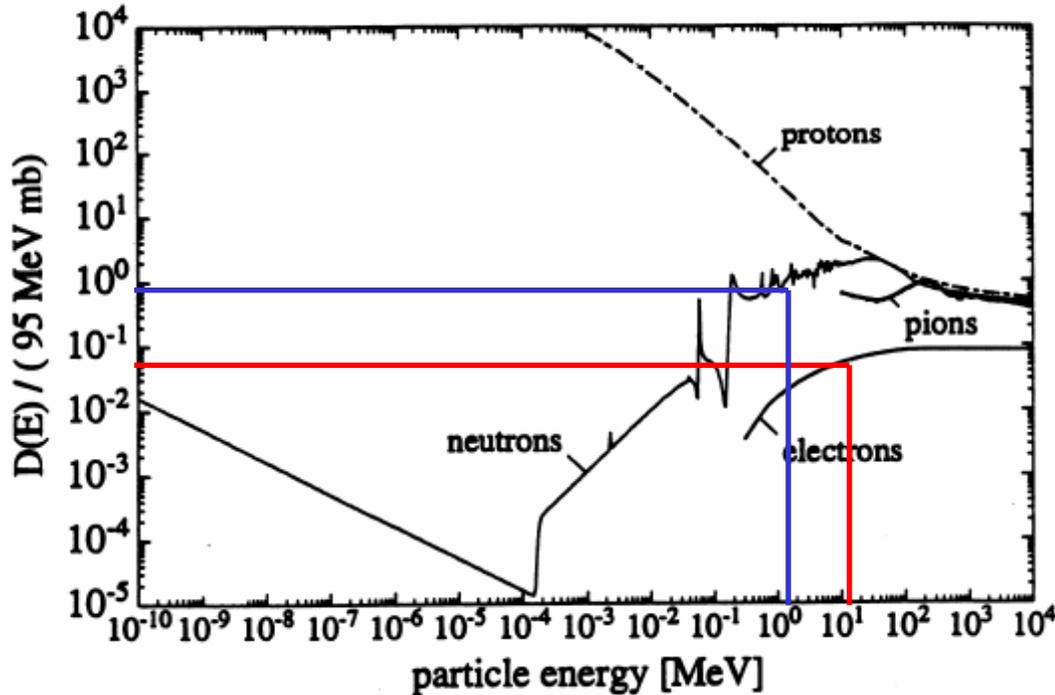


Figure 4.2.:

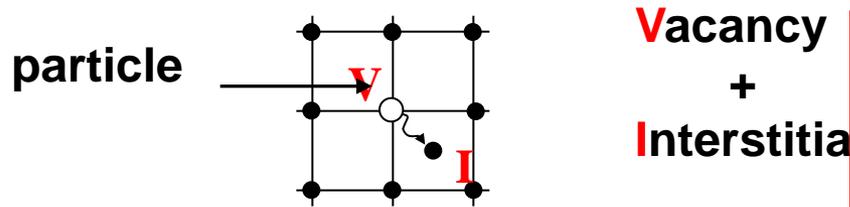
*The NIEL-Factors of different particles as a function of their energy. The factors are normalized with respect to a 1 MeV neutron. From [25].*

Relative displacement damage for various particles and energies:

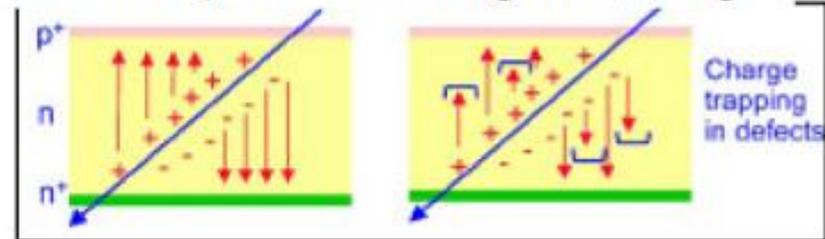
Particle	proton	proton	neutron	electron	electron
Energy	1 GeV	50 MeV	1 MeV	1 MeV	1 GeV
Relative Damage	1	2	<b>1</b>	0.01	0.1

# Effets des radiations (1/2)

- Modification de la structure cristalline

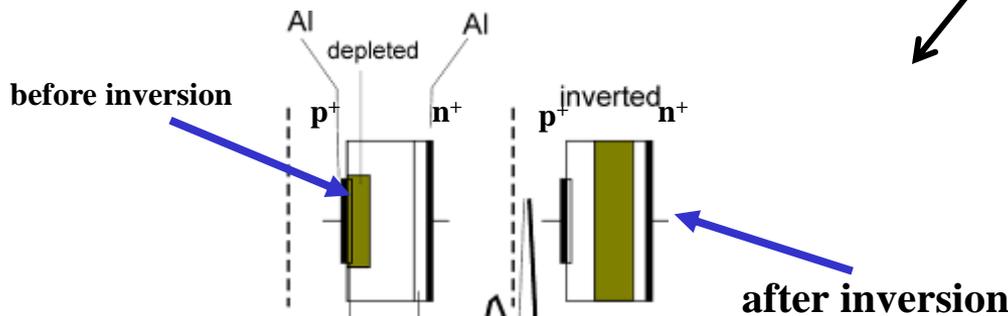


Decrease in charge collection efficiency due to charge trapping



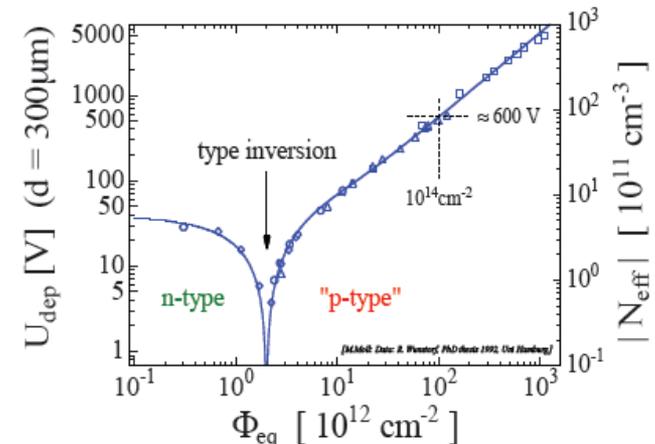
- Trapping (piégeage)
  - Niveau d'E supplémentaires
  - Efficacité de collection de charge ↓

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



- Inversion du dopage
  - Modifie la déplétion

Tension de déplétion



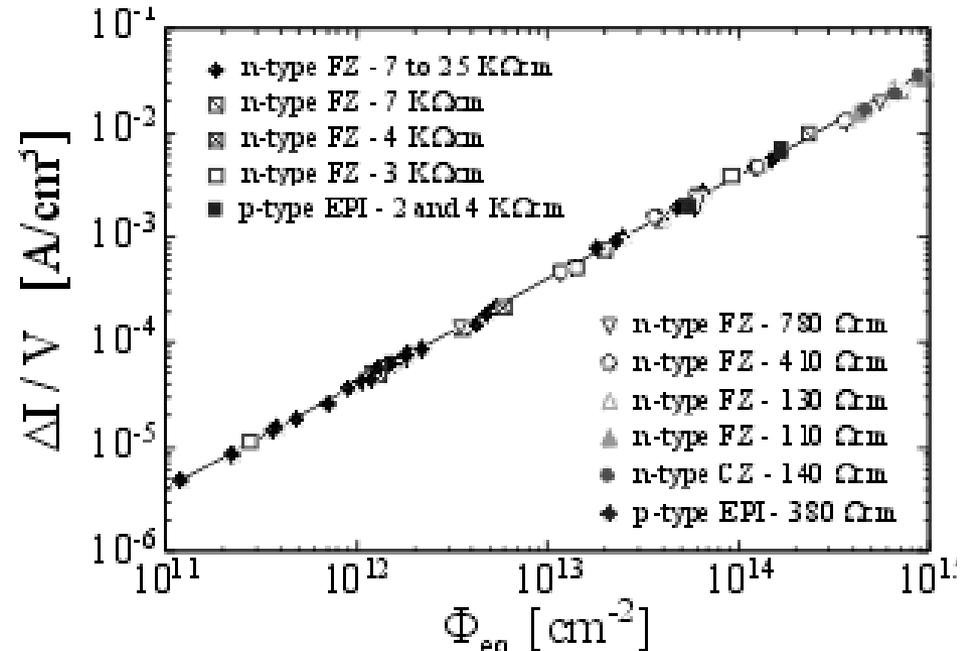
# Effets des radiations (2/2)

- Augmentation du courante de fuite

Increase of a **leakage current**:

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

where  $\alpha$  is a (universal) **damage parameter**



- Accumulation des charges aux interfaces Si-SiO<sub>2</sub>
  - Dues aux radiations ionisantes
  - Modifie les capa. ⇒ ↑ 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)

# Différents types de détecteurs

---

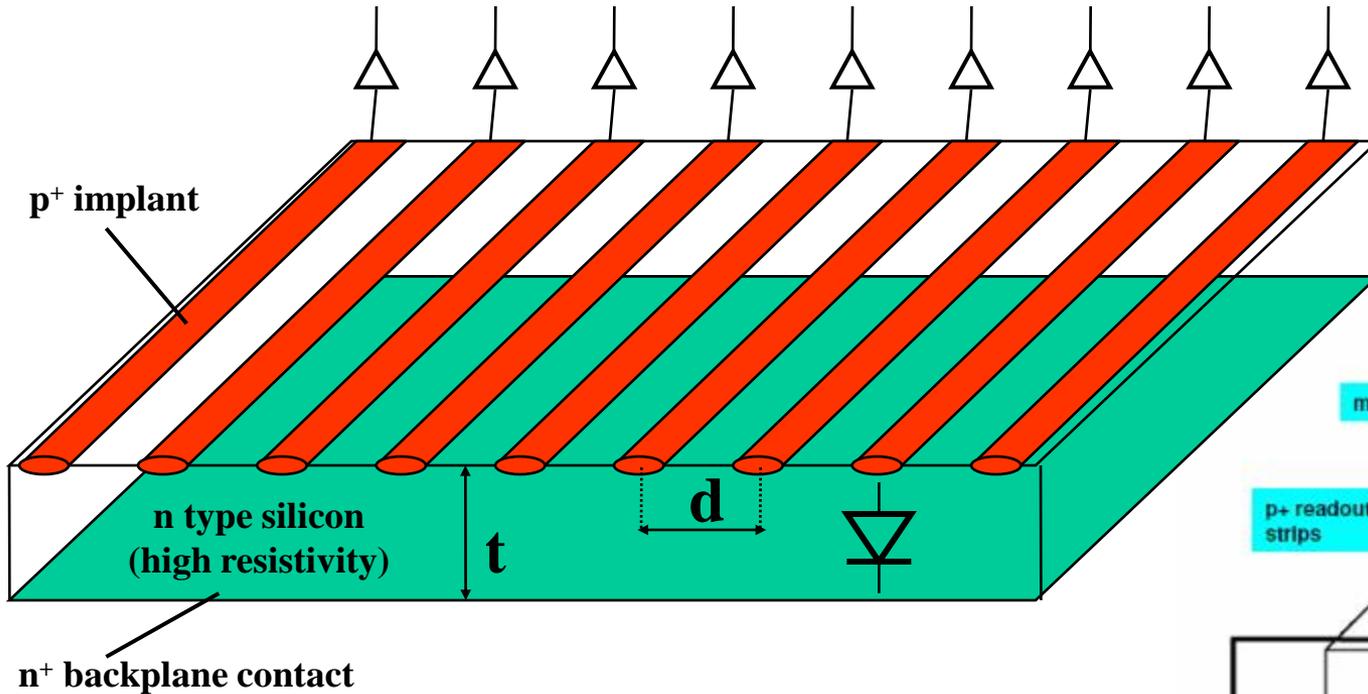
Strips

Pixels hybrides

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

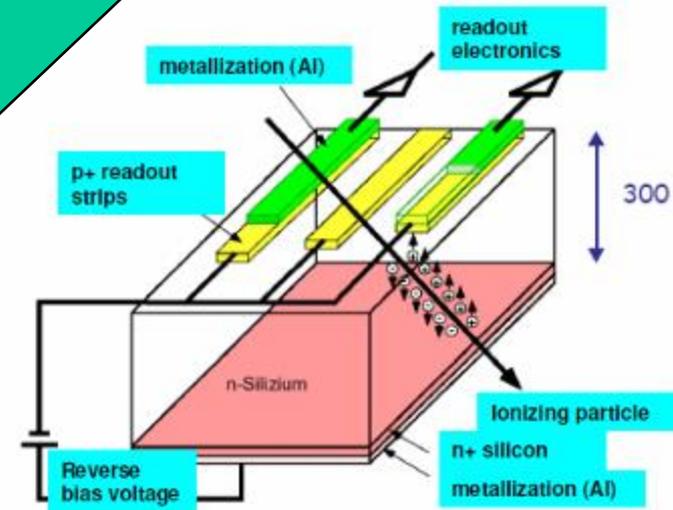
Spectrométrie

# Détecteurs à bandes (Strip detectors)



e<sup>-</sup> et h contribuent au signal

Paramètres typiques:  $V \sim 100 \text{ V}$ ,  $t \sim 300 \mu\text{m}$ ,  $d \sim 50 \mu\text{m}$ , surface  $\sim 10 \times 10 \text{ cm}^2$



## Paramètre crucial

**résolution**  $\sigma = 1.3 \mu\text{m}$  (partage des charges sur des bandes voisines)

$$\sigma \approx d / \sqrt{12}$$

$$\sigma \sim d/2 (S/N)^{-1}$$

If analog readout

# Détecteurs à bandes (Strip detectors) (2)

- Caractéristiques

- Avantages:

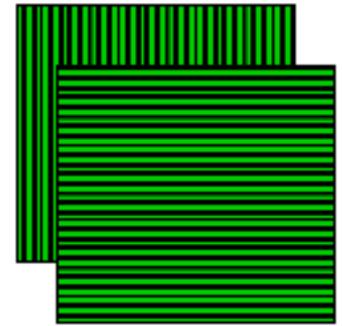
- Technologie bien connue
    - Relativement rapides  
(+flot de données réduits % pixels)
    - Grandes surfaces
    - Résolution  $\ll$  pas des bandes (partage des charges)

- Mesure de position dans une seule dimension  $\Leftrightarrow$  solutions:

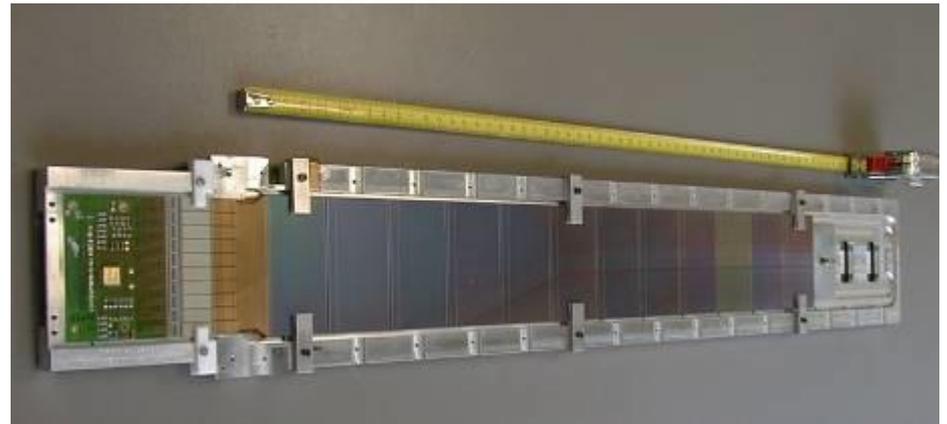
- 2 couches orthogonales
    - Strips double faces (transparent suivant)

- Ambiguïtés quand la multiplicité augmente:

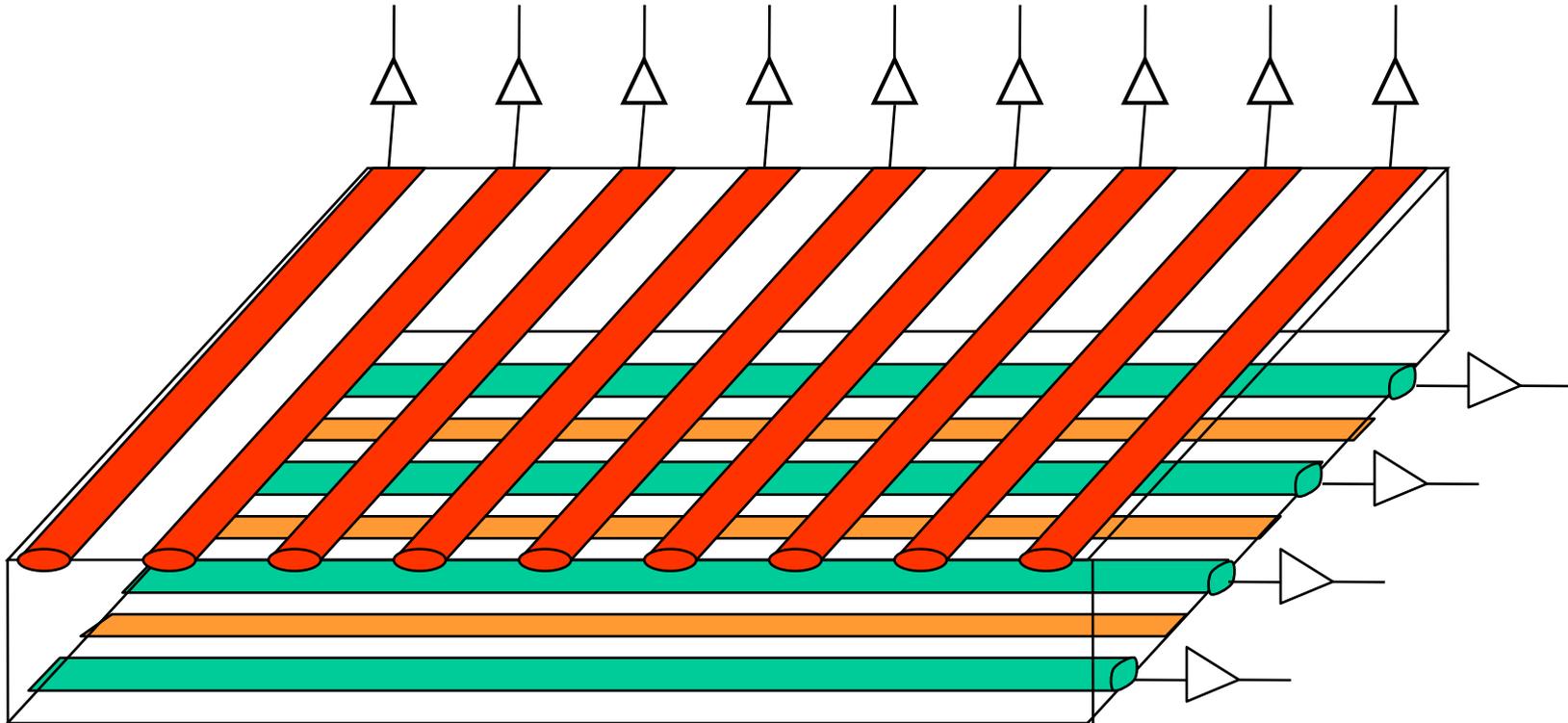
- Angles stereo



$2n$



# Détecteurs double bandes (Double Sided Microstrip Detector)

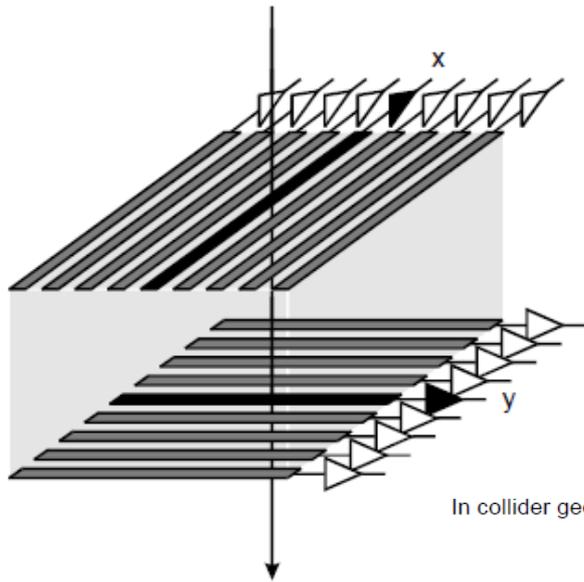


- Pas de matière supplémentaire
- Mais:
  - ✓ Fabrication plus complexe
  - ✓ une des faces de lecture a un potentiel ( $\sim 100\text{V}$ )
  - ✓ problèmes des multi hits

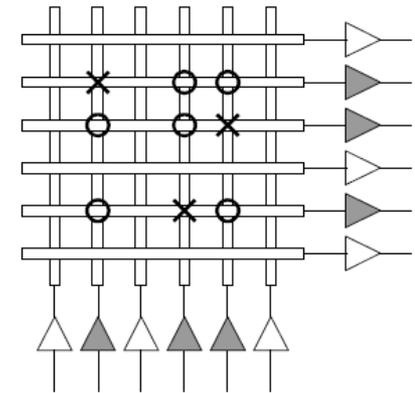
**2-D Information, but both sides must be processed and read out**

# Strip detectors: le problème des ambiguïtés

- Quand il y a un hit ça va...



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

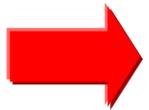


X HIT  
O GHOST

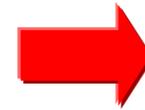
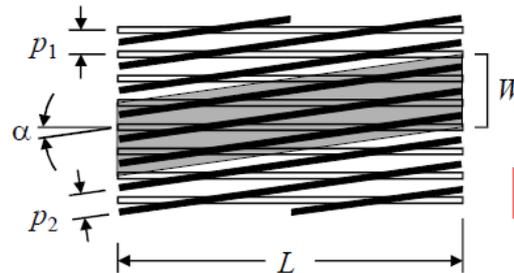
$n$  hits in acceptance field

$\Rightarrow n$   $x$ -coordinates  
 $n$   $y$ -coordinates

$\Rightarrow n^2$  combinations  
of which  $n^2 - n$  are "ghosts"



Angle stereo faible

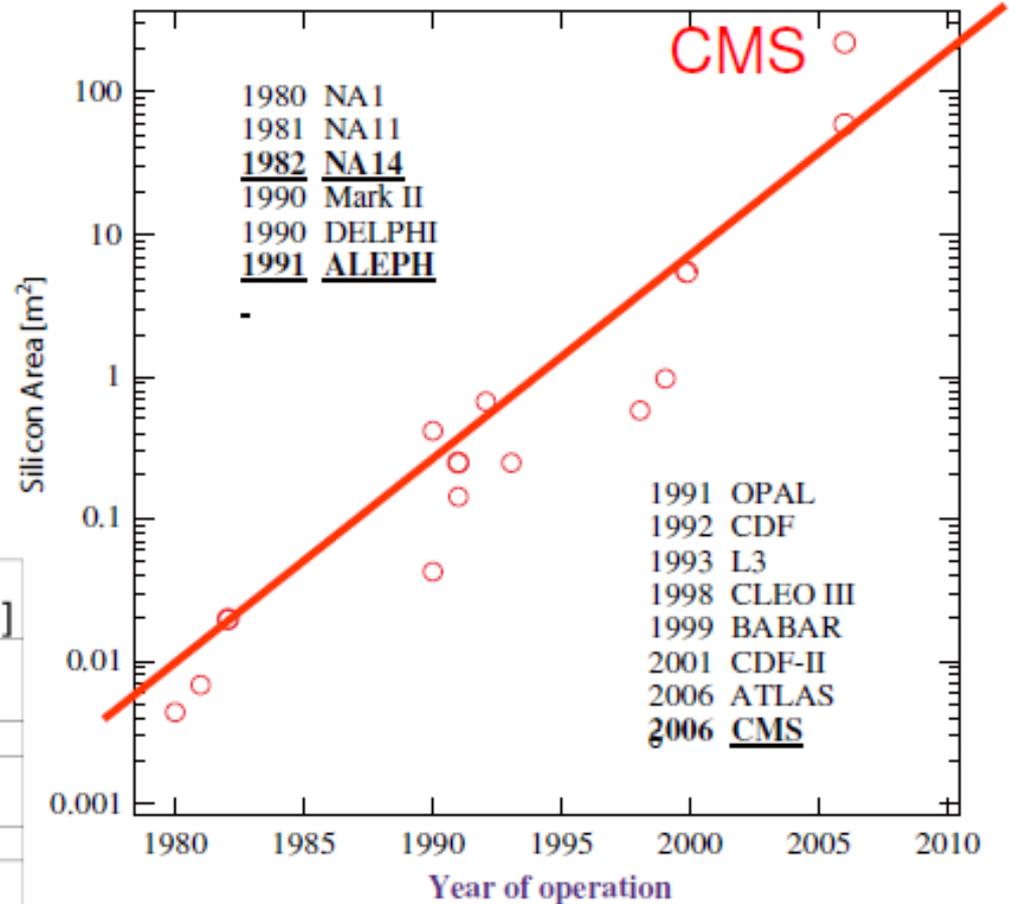
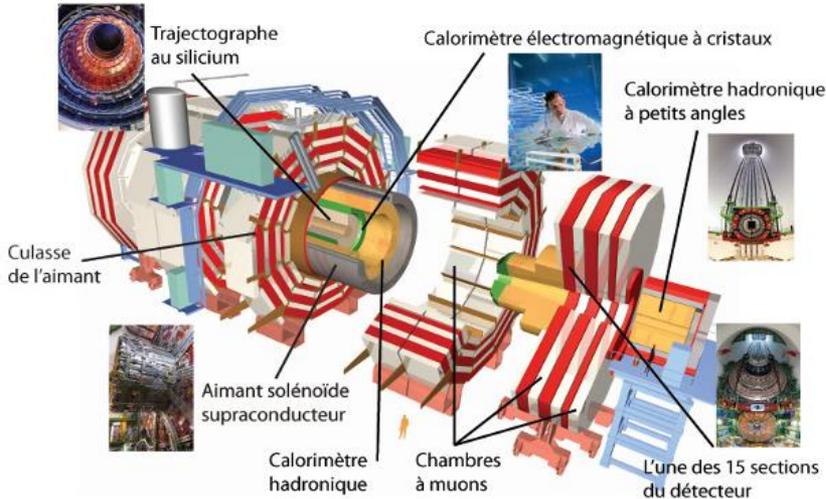


Limite la surface où des ambiguïtés peuvent survenir  
Au prix d'une résolution moins bonne dans une direction

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

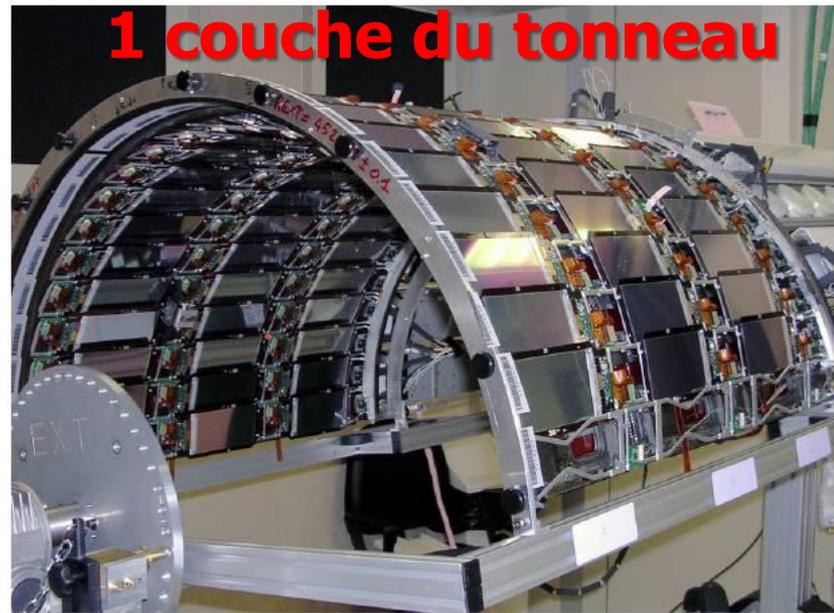
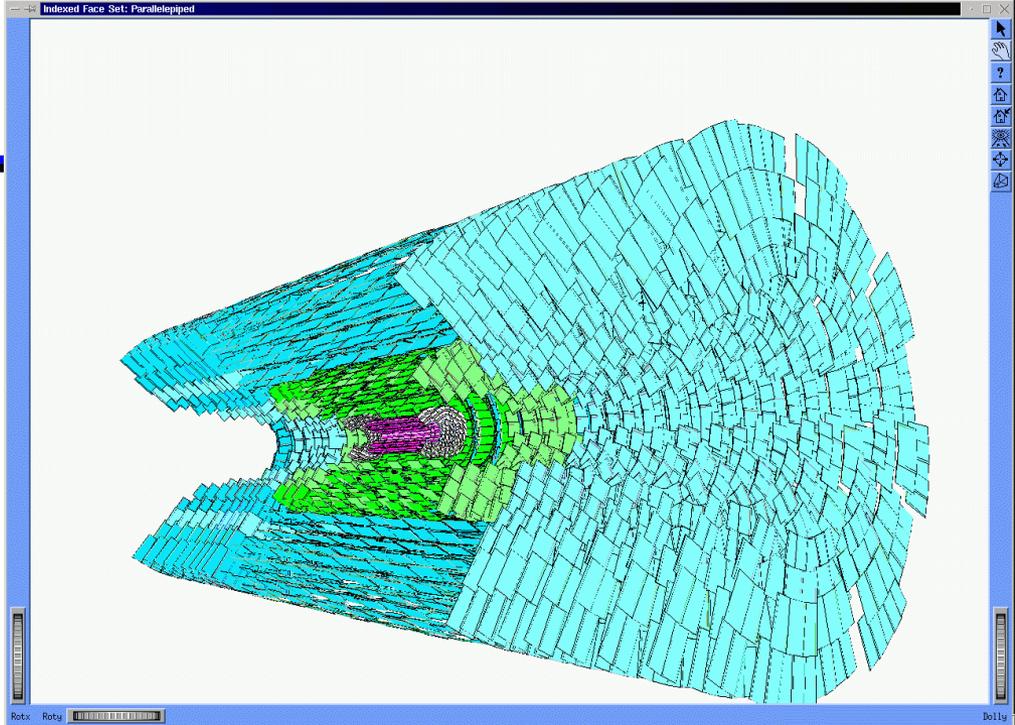
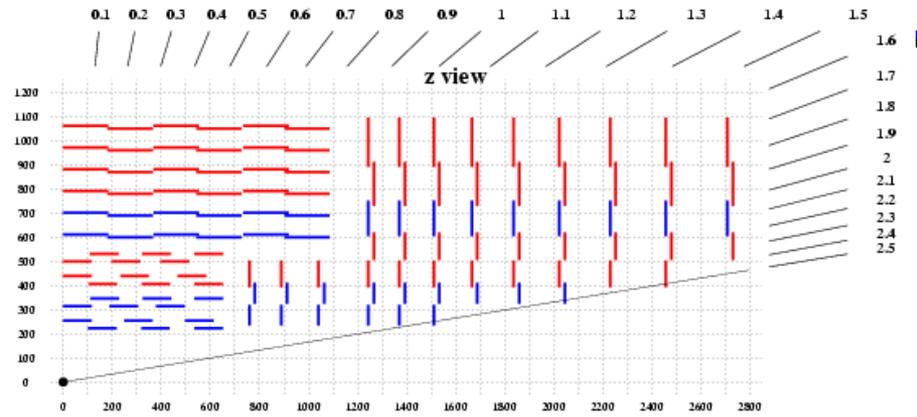
# Exemple 1: trajectographe de CMS



experiment	nb. of detectors	nb. of channels	silicon area [m <sup>2</sup> ]
<b>CMS</b>	15.95 k	10 × 10 <sup>6</sup>	223
<b>ATLAS</b>	16.0/2 k	6.15 × 10 <sup>6</sup>	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 m<sup>2</sup> de Silicium !  
 3 couches de pixels ⇒ 66 M pixels

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



# Exemple 2: AMS

- Alpha Magnetic Spectrometer (étude matière / antimatière)

- Lancé en mai 2011

- Partie centrale: trajectographe

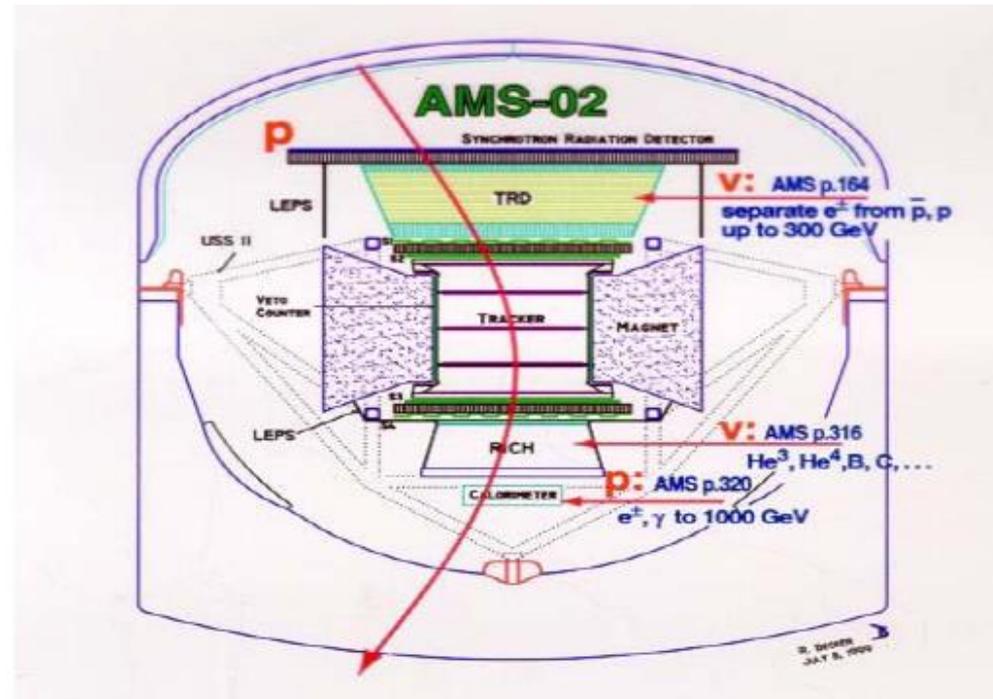
- 8 double couches de strips
- 200k canaux, 6 m<sup>2</sup>
- Résolution  $\sim 10 \mu\text{m}$

- Buts: identifier les particules

- $e^-$ ,  $e^+$ , proton, antiprotons
- Signe de la charge
- Rigidité ( $p/Z_e$ ),  $dE/dx$

- Défis:

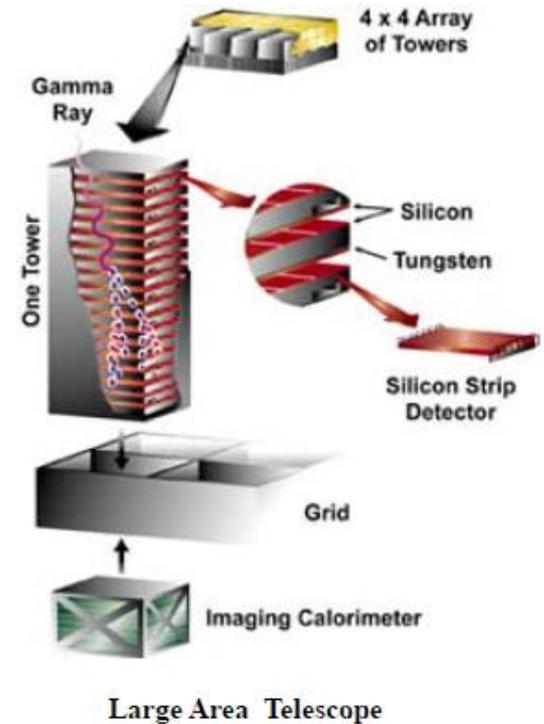
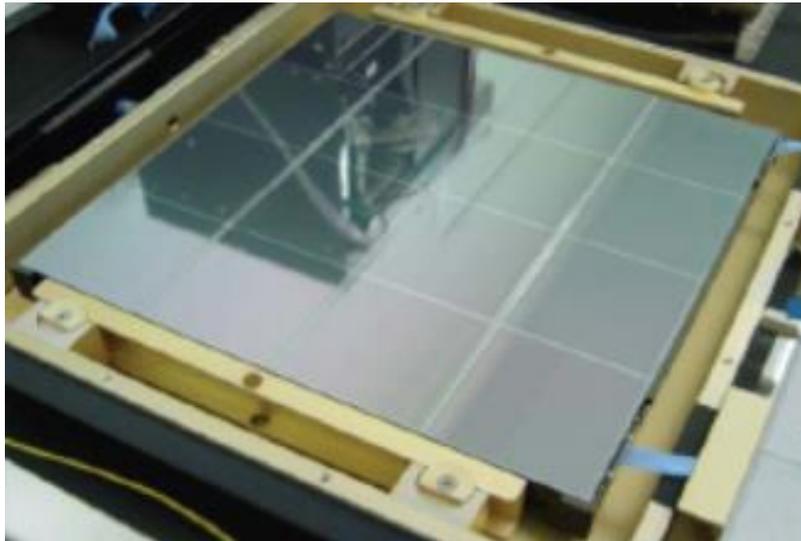
- Qualification pour l'espace.
- Puissance consommée ( $\sim 800\text{W}$ )



# Exemple 3: Fermi (ex-GLAST)

- Pair conversion gamma telescope

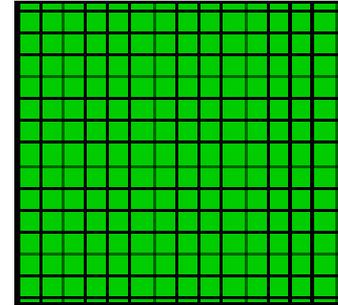
- Lancement en 2008
- Silicium / tungstene
- 16 tours
- $37 \times 37 \text{ cm}^2$  de surface active
- $\sim 70 \text{ m}^2$  de Silicium (pitch  $228 \mu\text{m}$ )
- 880k canaux



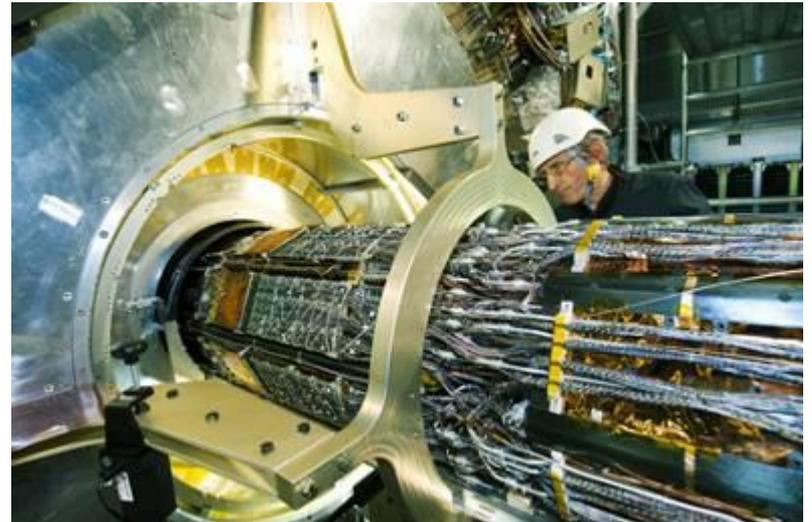
# Les détecteurs à pixels (hybrides, CCDs, MAPS, etc.)

- Caractéristiques

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



$n^2$



# 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

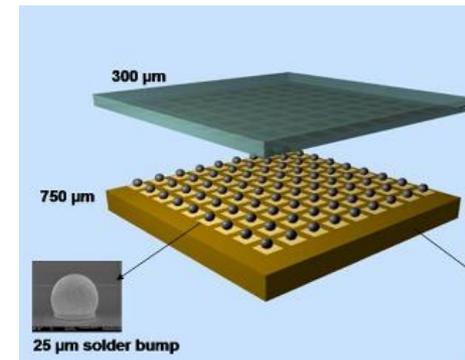
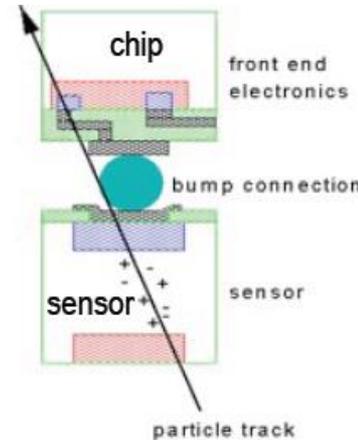
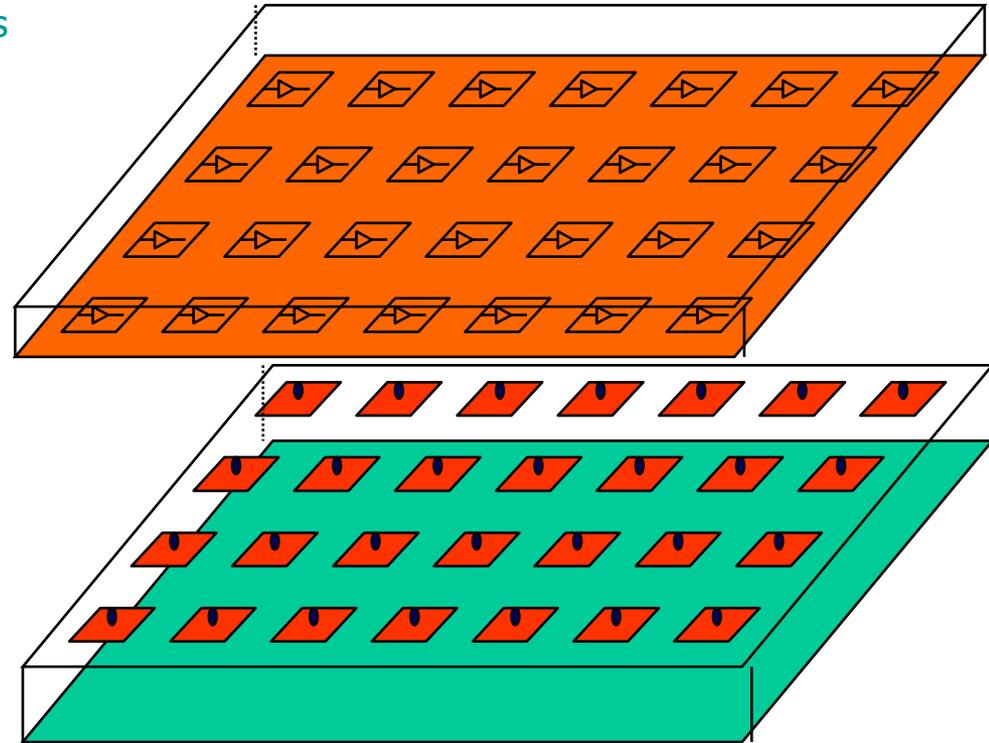
- Équipe les couches internes des détecteurs de vertex au LHC

- Points forts:

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

- Faiblesses relatives

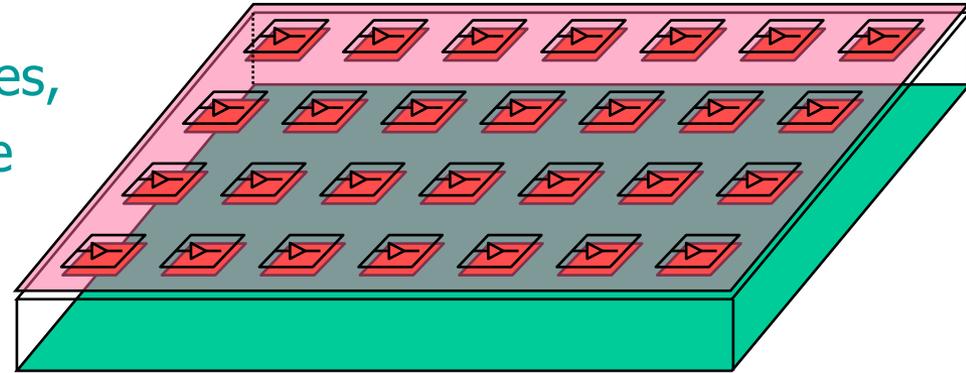
- Granularité moyenne
  - Pitch limité par la lecture et le bonding
  - e.g.  $50 \times 400 \mu\text{m}^2$ ,  $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ )
- Budget de matière
- Puissance dissipée



# 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

# CCD (Charged Coupled Devices)

- Historique

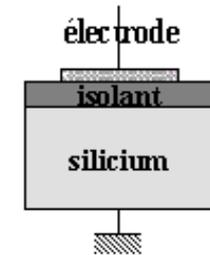
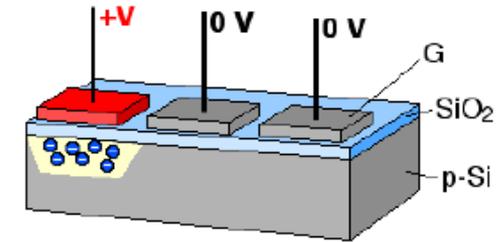
- Idée ancienne (1960s)
- Au départ: usage dans les cameras / appareils photos
- Prix Nobel 2009
- Applications: visible, en astrophysique, imagerie médicale, etc.

- Principe

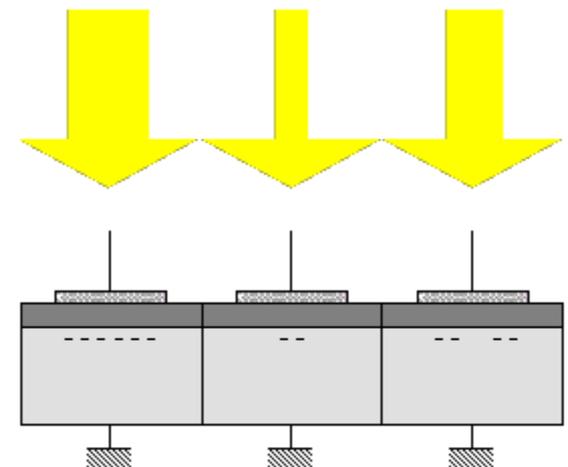
- Chaque pixel = électrode séparée par un isolant
- La lecture se fait par transfert de charge d'un électrode à l'autre jusqu'en bout de ligne, en jouant sur les tensions des électrodes
- Efficacité quantique ( $> \sim 70\%$ )
- Utilisé avec succès dans SLD (détecteur de vertex)

- Faiblesses relatives

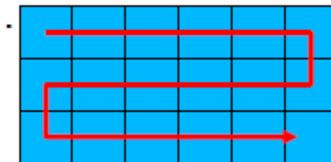
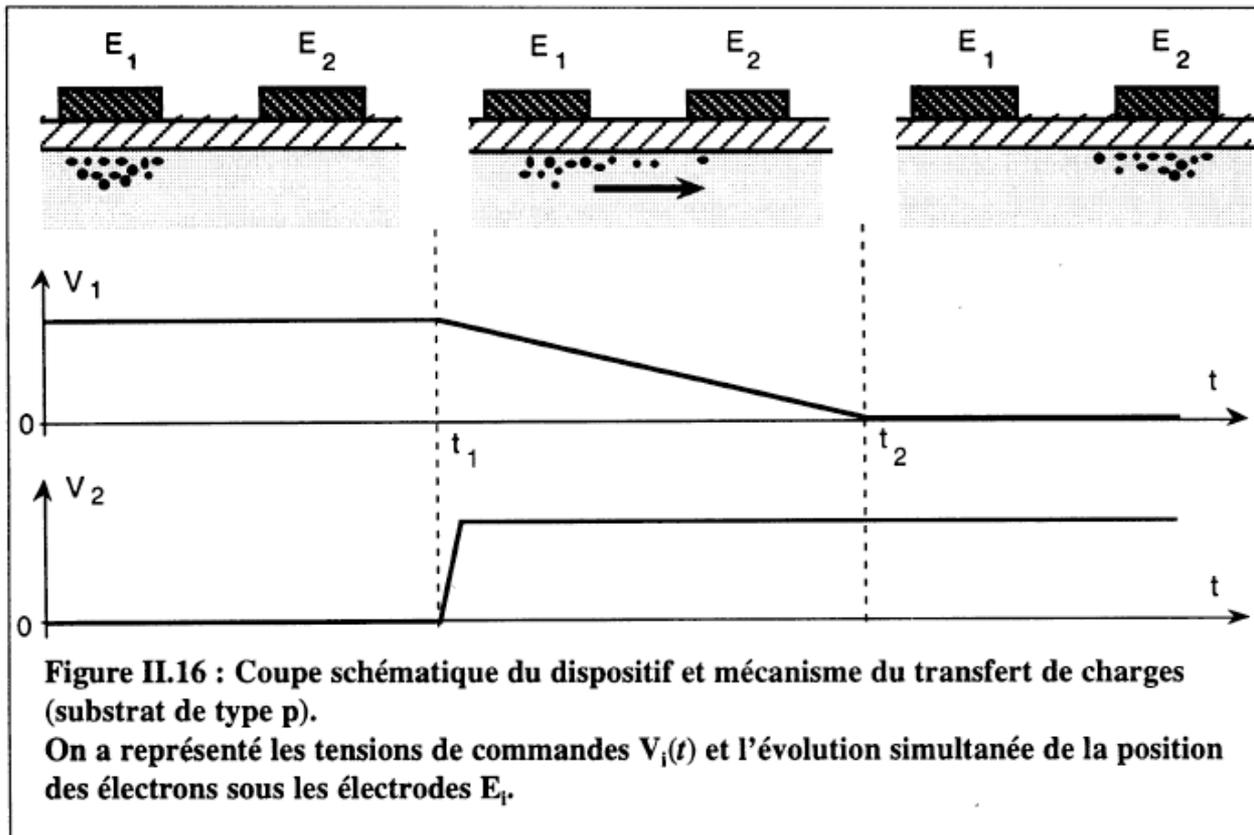
- Vitesse de lecture
- Radio-résistance modérée (transfert des charges)
- Nécessite un refroidissement ( $\sim < 10-20$  C)



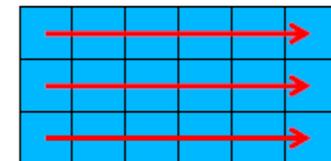
la cellule de base du capteur CCD



# CCD: transfert des charges



Signal treatment



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

## Principes

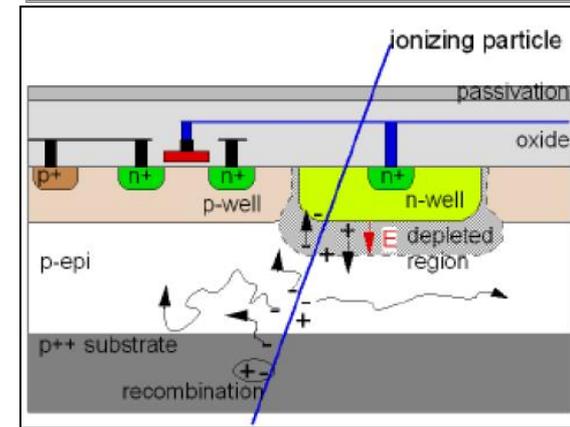
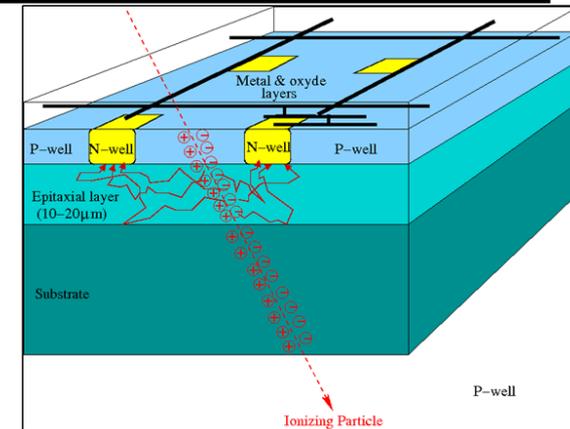
- monolithique, p-type Si
  - Signal créé dans couche epitaxiale faiblement dopée et mince  $\sim 10\text{-}20\ \mu\text{m}$
  - $\sim 80\ \text{e}^-/\mu\text{m} \Rightarrow$  signal total  $\sim O(1000\ \text{e}^-)$
- Diffusion thermique des  $\text{e}^-$ 
  - Profondeur deplétée limitée
  - Interface 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 des la physique des particules
  - Différentes optimisations sur les paramètres de la technologies (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**



# Present status of MAPS: just one example of mature design

## Binary sparsified readout sensor for EUDET beam telescope:

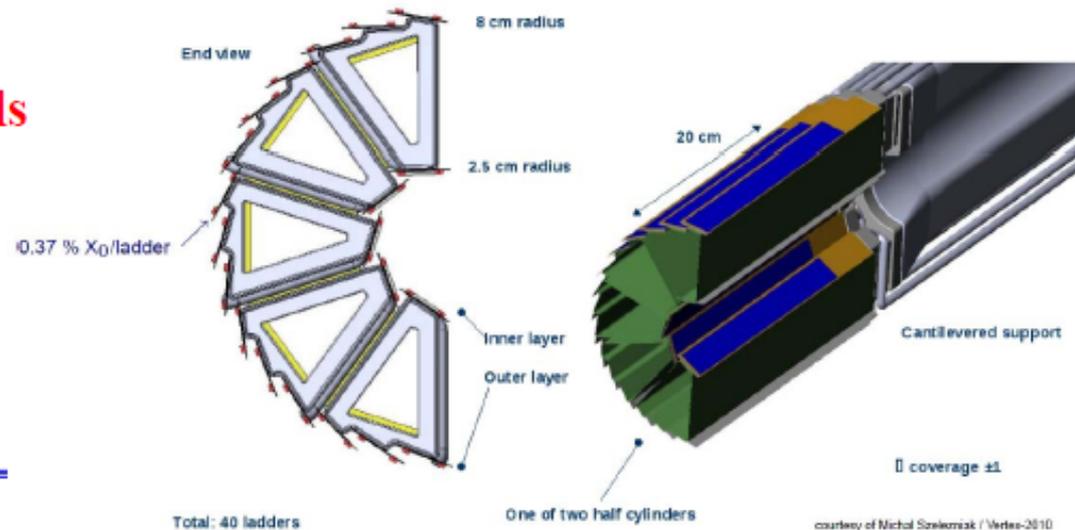
> 2 cm<sup>2</sup> active area, 0.7 Mpixel tracker

- Medium speed readout (100  $\mu$ m integration  $\rightarrow$  10 kFrame/s)
- Spatial resolution < 4  $\mu$ m for a pitch of 18.4  $\mu$ m
- Efficiency for MIP > 99.5 %
- Fake hit rate < 10<sup>-6</sup>
- Radiation hardness > 10<sup>13</sup> n/cm<sup>2</sup> (high resistivity epi substrate)
- Easy to use, “off-shell” product: used already in several application



## First real scale exercise of large system based on MAPS: new STAR Microvertex Detector: AMS 0.35 $\mu$ m OPTO CMOS

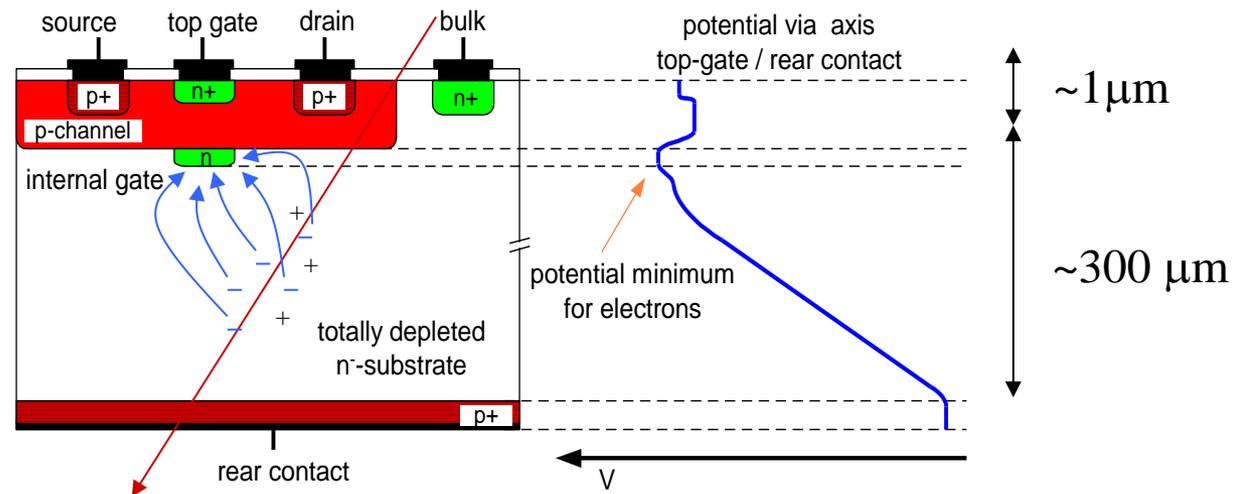
400 sensors (2x2 cm<sup>2</sup>), 300 Mpixels





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

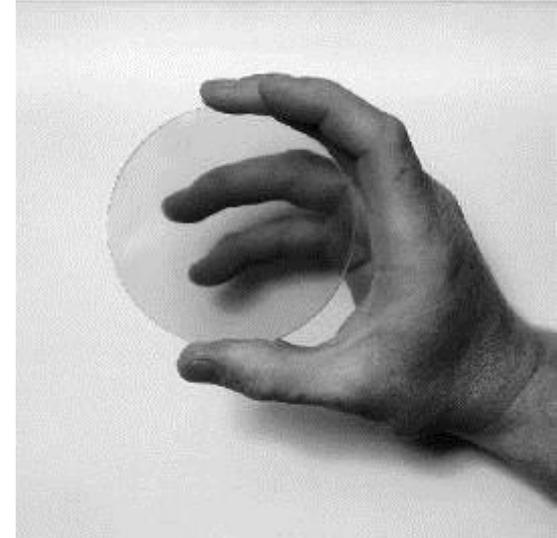
- Transistor à effet de champs intégré à chaque pixel
- Capteur pleinement dépleté
- électrons collectés au minimum de potentiel (internal gate)
  - Courant à travers les transistors modulé par la charge collectée
  - Charge retirée par un mécanisme de reset (clear)
  - Amplification de la charge à l'emplacement 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



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

# Détecteurs diamant CVD (RD42 collab.)

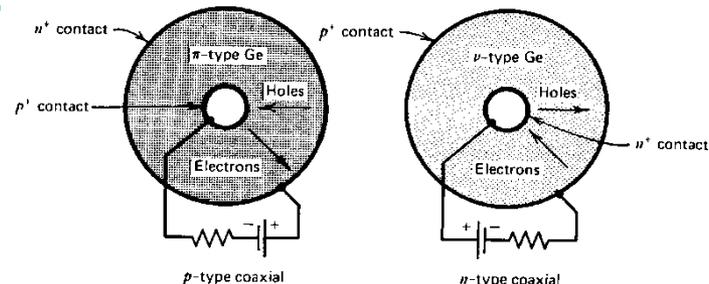
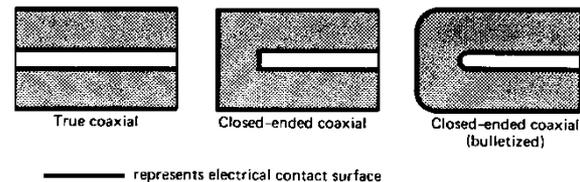
- Chemical Vapor Deposition
- Propriétés les plus remarquables :
  - extrême tenue mécanique
    - Intégration mécanique
  - excellente conductibilité thermique
    - refroidissement
  - très grande résistivité électrique
  - Courant de fuite faible
  - large spectre de transparence optique (VUV - IR)
  - 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

# Spectroscopie gamma: détecteurs au Germanium

- But
  - Mesurer l'énergie de  $\gamma$ 
    - (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  $\Rightarrow$  bruit

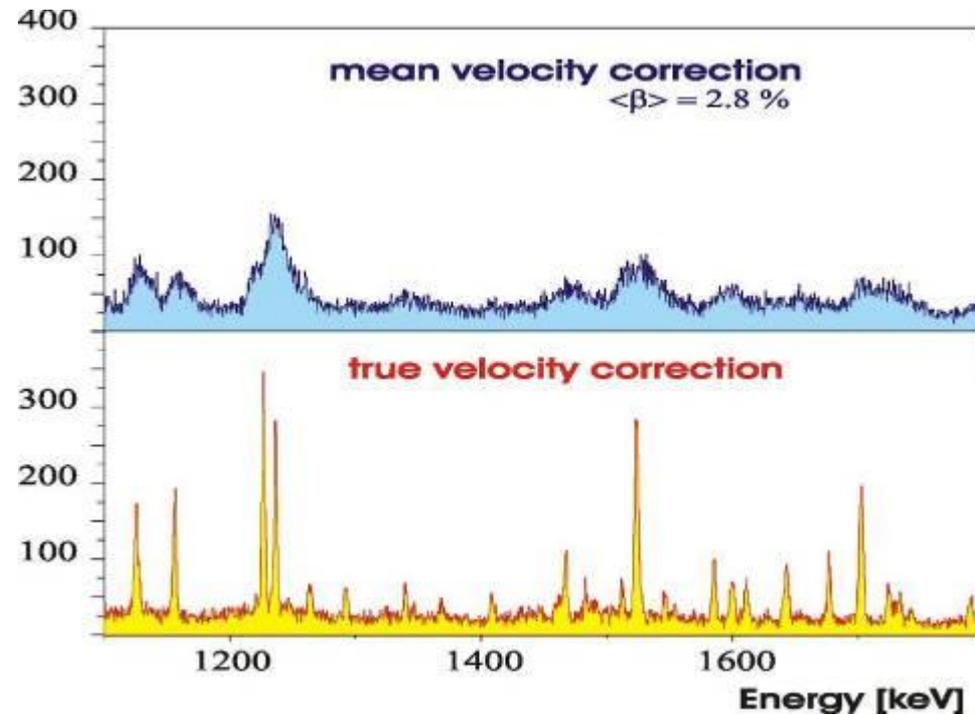
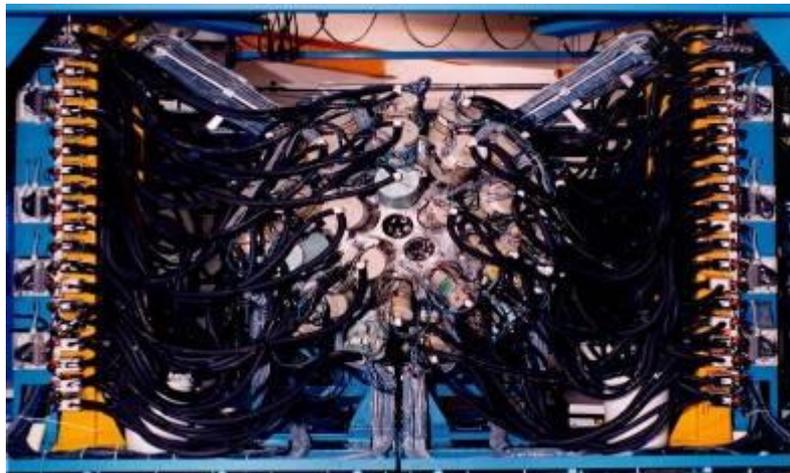
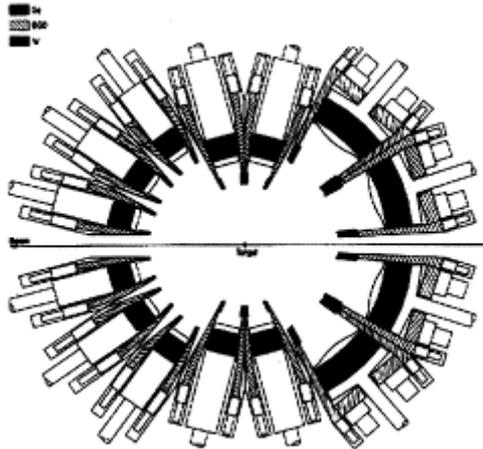


# Application: spectroscopie $\gamma$ $4\pi$

$\gamma$ -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)

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

(LHC: un tout petit peu...)

---



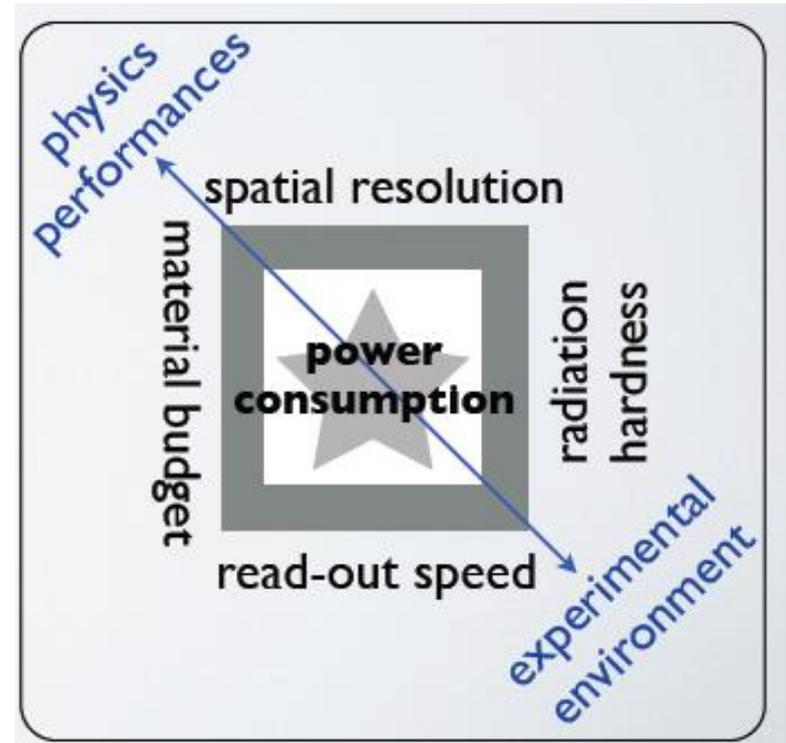
# Un S.C. peut être caractérisé par...

---

- 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

# Défis de la R&D en physique des particules

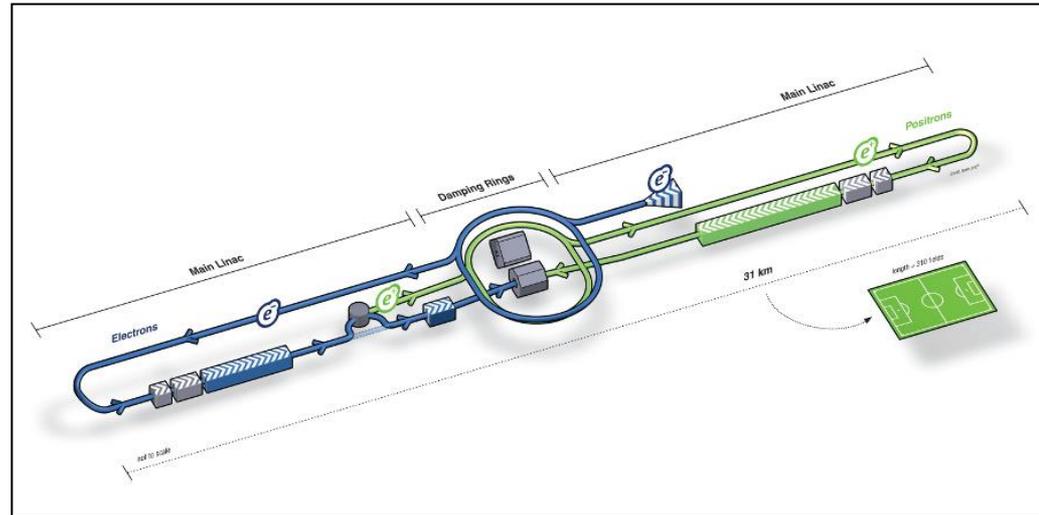
- Environnement expérimental
  - Flux de particules  
(y compris bruit de fond machine)
    - Radiorésistance
    - vitesse de lecture + flux de données
    - Puissance dissipée
- Performances de physique
  - Etiquetage des saveurs - vertexing
    - Résolution spatiale
    - Budget de matière
- Performances 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



# International Linear Collider (ILC)

## ILC:

- $e^+e^-$  linear collider
- 31 km linear tunnel
- Baseline:  $\sqrt{s} = 500$  GeV
  - Phase @ 250 GeV (Higgs factory)
  - Options : 90 GeV(GigaZ),  $e^-e^-$ ,  $\gamma\gamma$ ,  $e^-e^+\gamma$
  - Upgrade: 1 TeV
- 2 detectors in « push pull »
  - only one collision point
  - ILD and SiD
- Luminosity:
  - $1.8 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
  - $500 \text{ fb}^{-1}$  (4 years)
- Polarisation:  $e^- = 80\%$  ;  $e^+ = 30\%$  (upgrade 60%)



## Brief history and prospects

- First studies in 80<sup>s</sup>
- 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)
- ~2016-17: Japan expected to express its official interest to build the ILC
- ~2016-18 ? Negotiations between all regions
- ~2019-20 ? construction works begin
- ~2030: First collisions ?

# ILC Running conditions

## Key features of ILC (physics)

### Clean environment

- no QCD background  $\Rightarrow$  no pile up, no trigger !
- well known initial state
- all channels fully reconstructable

### Precise theoretical predictions

- radiative corrections  $O(1\%)$  level
- theoretical uncertainties  $O(0.1\%)$  level

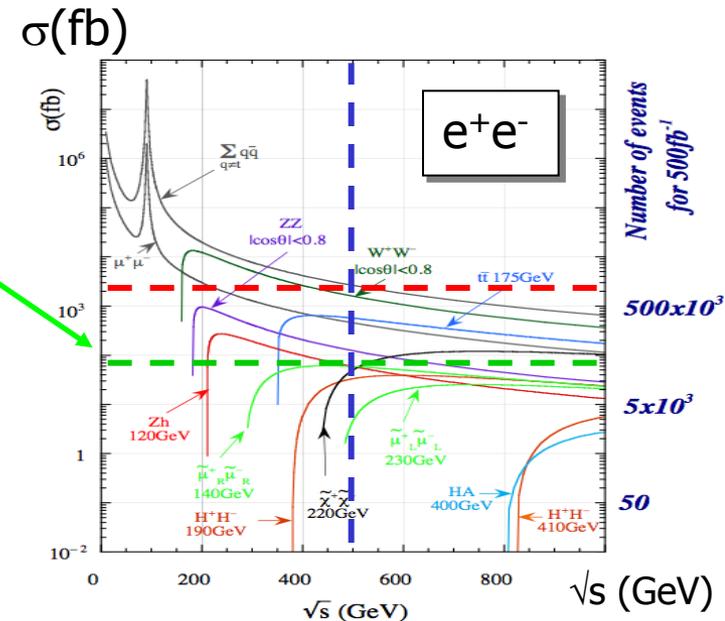
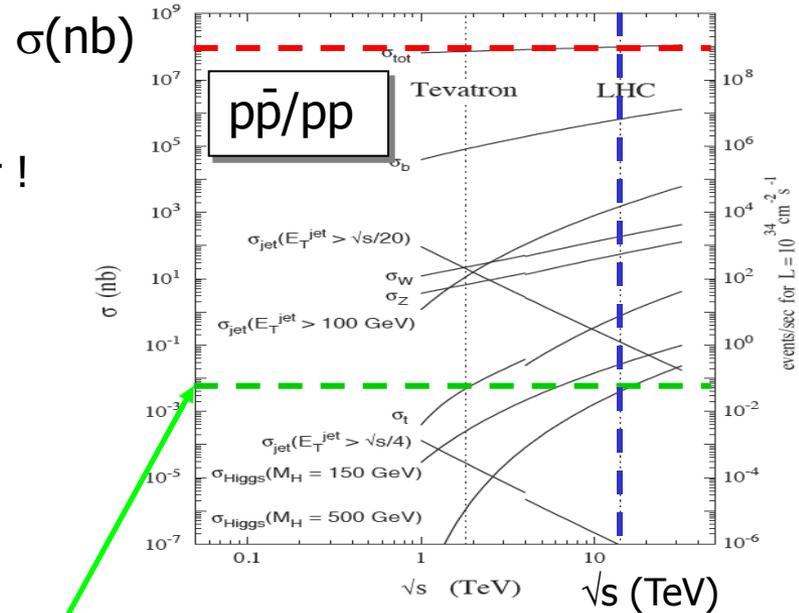
### Tunable $\sqrt{s}$

- threshold scans, flexibility

### Beam polarisation to enhance S/N

### Democratic cross sections

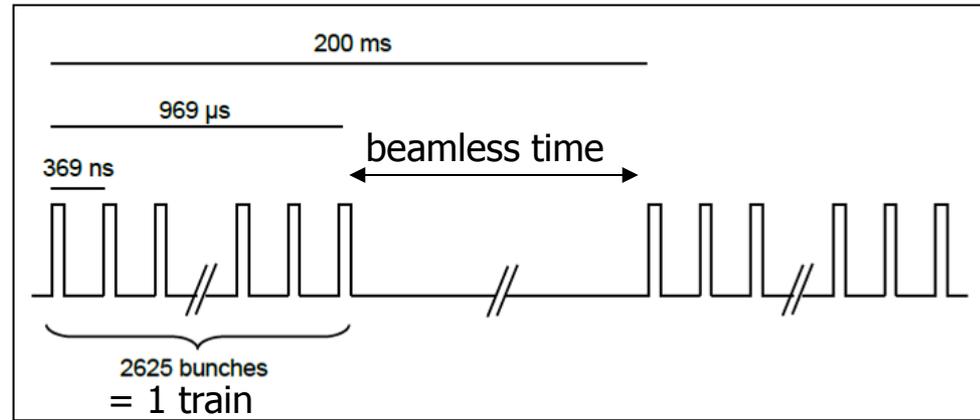
- Higgs event production @ LHC : 1 evt /  $10^{10}$
- Higgs event production @ ILC : 1 evt /  $10^2$
- Globally small ( $\sigma_{ZH} \sim 100$  fb)
- $\Rightarrow$  study all channels (even fully hadronics)



# ILC experimental conditions

## Beam structure

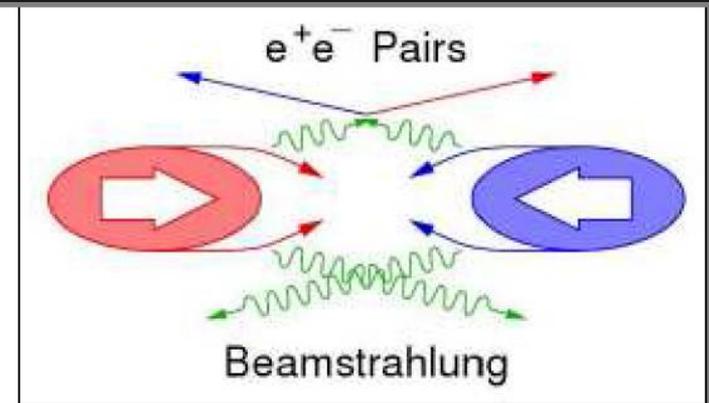
- 5 trains/s of  $\sim 2600$  bunches
- 1 bunch every  $\sim 300$  ns
- « Quiet time » of  $\sim 200$  ms (between each train)
- Consequences on read-out
  - No trigger, power pulsing, cooling
  - Possible read-out during beamless time



## Beam background :

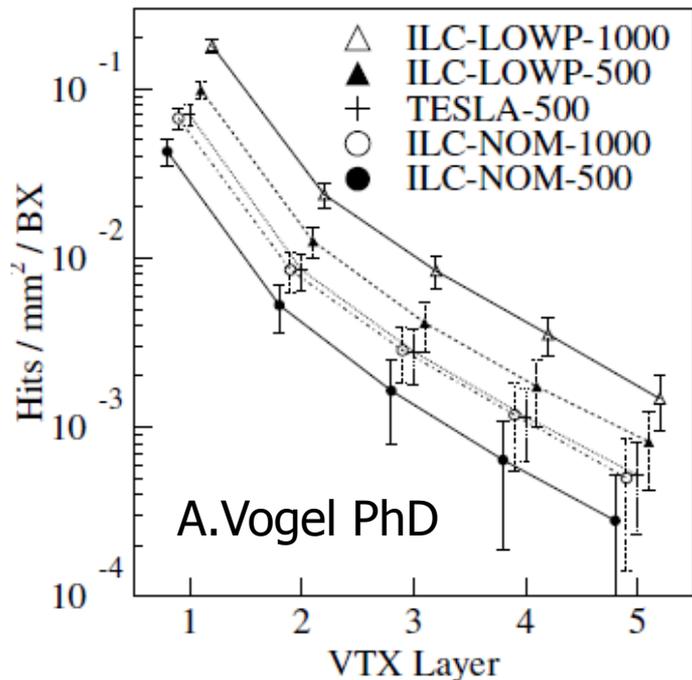
- Beamstrahlung: RMS energy loss:
  - $\delta_{BS} \sim 1\%$  @  $\sqrt{s} = 250$  GeV
- Drives occupancy :
  - Read-out speed, Inner radius
  - Physics cross section:  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$   $\sim 1$  evt/s  $\Rightarrow$  negligible
- Drives radiation level
  - Moderate (compared to LHC)
  - 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")



# Beam background in various detectors (ILD example)

- (A.Vogel, DBD, De Masi, etc.)
- 100 BX simulated
  - Pair induced background
  - Depends on  $\sqrt{s}$
  - 20 % due to back scatterers
  - Statistical error only
    - systematics much higher



Subdetector	Units	Layer	Nom-500	Low-P-500	Nom-1000
VTX-DL	hits/cm <sup>2</sup> /BX	1	3.214±0.601	7.065±0.818	7.124±1.162
		2	1.988±0.464	4.314±0.604	4.516±0.780
		3	0.144±0.080	0.332±0.107	0.340±0.152
		4	0.118±0.074	0.255±0.095	0.248±0.101
		5	0.027±0.026	0.055±0.037	0.046±0.036
		6	0.024±0.022	0.046±0.030	0.049±0.044
SIT	hits/cm <sup>2</sup> /BX	1	0.017±0.001	0.031±0.007	0.032±0.012
		2	0.004±0.003	0.016±0.005	0.008±0.002
FTD	hits/cm <sup>2</sup> /BX	1	0.013±0.005	0.031±0.007	0.019±0.006
		2	0.008±0.003	0.023±0.007	0.013±0.005
		3	0.002±0.001	0.005±0.002	0.003±0.001
		4	0.002±0.001	0.007±0.002	0.004±0.001
		5	0.001±0.001	0.006±0.002	0.002±0.001
		6	0.001±0.001	0.005±0.002	0.002±0.001
		7	0.001±0.001	0.007±0.002	0.001±0.001
SET	hits/BX	1	5.642±2.480	57.507±10.686	13.022±7.338
		2	5.978±2.360	59.775±8.479	13.711±7.606
TPC	hits/BX	-	408±292	3621±709	803±356
ECAL	hits/BX	-	155±50	1176±105	274±76
HCAL	hits/BX	-	8419±649	24222±744	19905±650

- typical value (layer 1)
  - ~ 5 hits/cm<sup>2</sup>/BX
- Very sensitive to geometry
- Safety factor needed !
  - at least x 5 !

# ILC vertex detector: squaring the circle

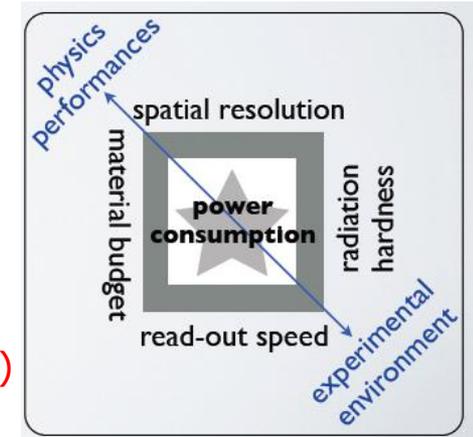
- Linear e+e- collider
    - Different approach compared to hybrid pixels & LHC
    - Experimental environment much less demanding
- ⇒ favors technologies which allow to focus on resolution and material budget

- Vertex detector design and specifications

- Physics performances

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

- Spatial resolution: highly granular sensor:  $\sigma_{R\phi} \sim 3 \text{ } \mu\text{m}$  (pitch  $\sim 17 \text{ } \mu\text{m}$ )
    - multiple scattering : very low material budget  $O(0.15\%X_0/\text{layer})$
  - Experimental environment constraints
    - Radiation hardness (ionising and non ion. rad.)  $\Rightarrow O(100 \text{ kRad})$  &  $O(1 \times 10^{11} n_{\text{eq}(1\text{MeV})} / \text{year (layer 1)})$
    - Occupancy  $\Leftrightarrow$  Read-out speed  $\Rightarrow$  1<sup>st</sup> layer:  $\sim 5 \text{ part/cm}^2/\text{BX}$   $\Rightarrow$  few % occupancy max
    - Power dissipation  $\Leftrightarrow$  preferably air cooling  $\Rightarrow 600\text{W}/12\text{W}$  (Power cycling,  $\sim 3\%$  duty cycle)
    - EM compliance (pick-up noise)
  - Read-out & electronics
    - Single Event Effect safety (Upset, latchup)
    - highly integrated read-out microcircuits
    - high data transfer rate (no trigger)
  - Other parameters
    - Costs, fabrication reliability and flexibility
    - Mechanical integration: low mass, rigidity, heat conductive
    - Geometry: short or long barrel ?
    - Alignment: micron level capabilities needed



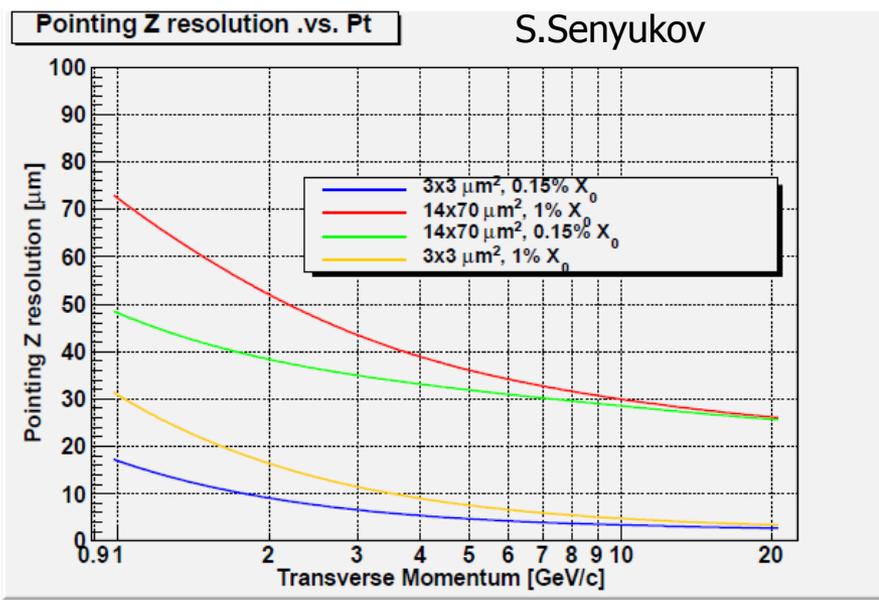
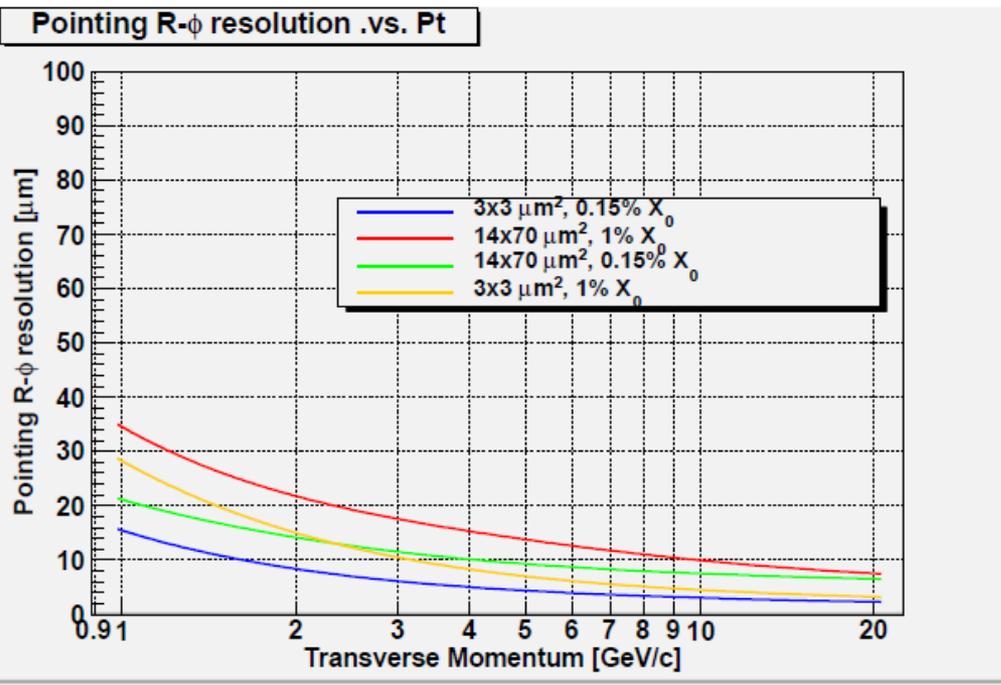
⇒ reaching the specifications all together is the real challenge

# Expected Vertex performances (1): pointing resolution

- Compared pointing resolutions

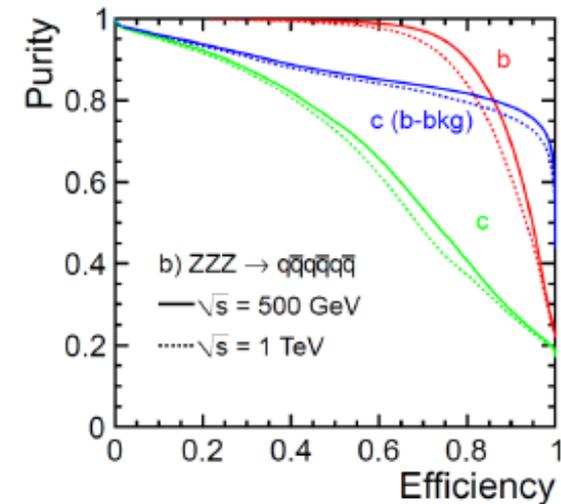
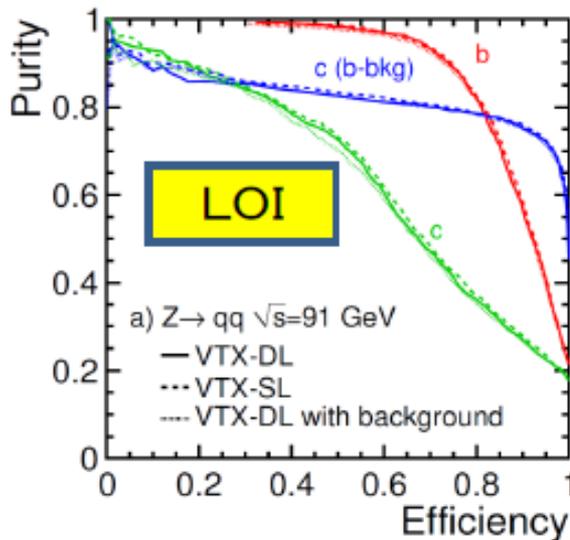
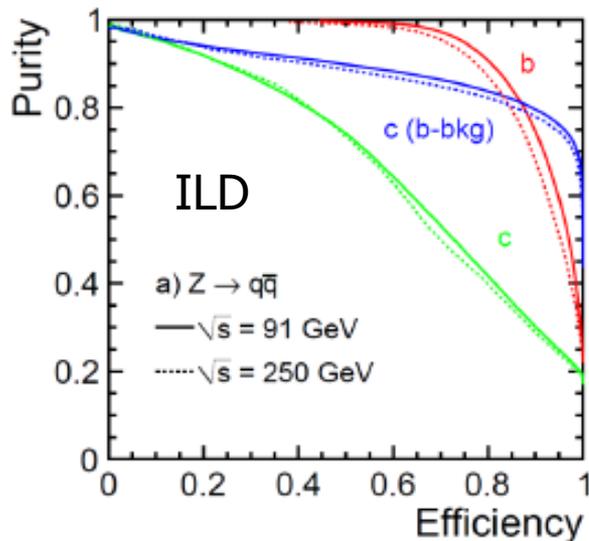
● LC VERTEXING GOAL :  $\sigma_{R\phi,Z} \leq 5 \oplus 10 - 15/p \cdot \sin^{3/2}\theta \text{ } \mu\text{m}$   
 ▷ LHC:  $\sigma_{R\phi} \simeq 12 \oplus 70/p \cdot \sin^{3/2}\theta$

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

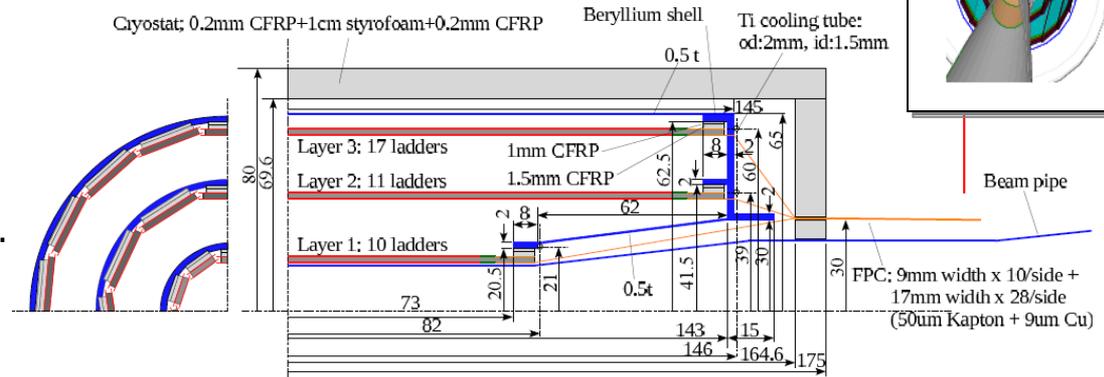
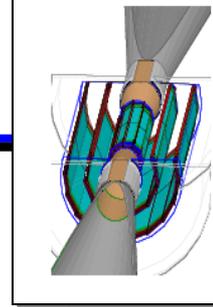


# Expected Vertex performances (2) : Flavor tagging

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



# ILD: Vertex detector



	$R$ (mm)	$ z $ (mm)	$ \cos \theta $	$\sigma$ ( $\mu\text{m}$ )	Readout time ( $\mu\text{s}$ )
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

## Layout (DBD geometry):

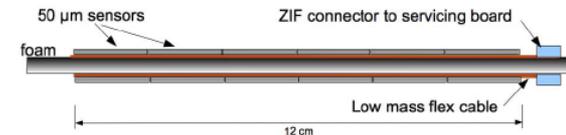
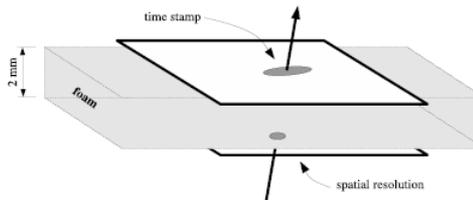
- Long Barrel approach
- Radius:  $\sim 15$  mm – 60mm
- 3 x double sided ladders
  - Optimize material budget / alignment.
  - Stand alone tracking improvement
  - Background tagging capabilities
  - Other option: 5 single sided layers

## Layers 1 & 2:

- Priority to read-out speed & spatial resolution
- Small pixels:  $17 \times 17 / 33 \mu\text{m}^2$
- Binary charge encoding
- Read-out time  $\sim 50 / 8 \mu\text{s}$
- $\sigma_{\text{sp}} \sim 3 / 5 \mu\text{m}$

## layers 3 – 6

- Optimized for power consumption
- Large pixels ( $25/35 \times 35 \mu\text{m}^2$ )
- 3-4 bits charge encoding
- Read-out time  $\sim 60 \mu\text{s}$
- $\sigma_{\text{sp}} \sim 4 \mu\text{m}$



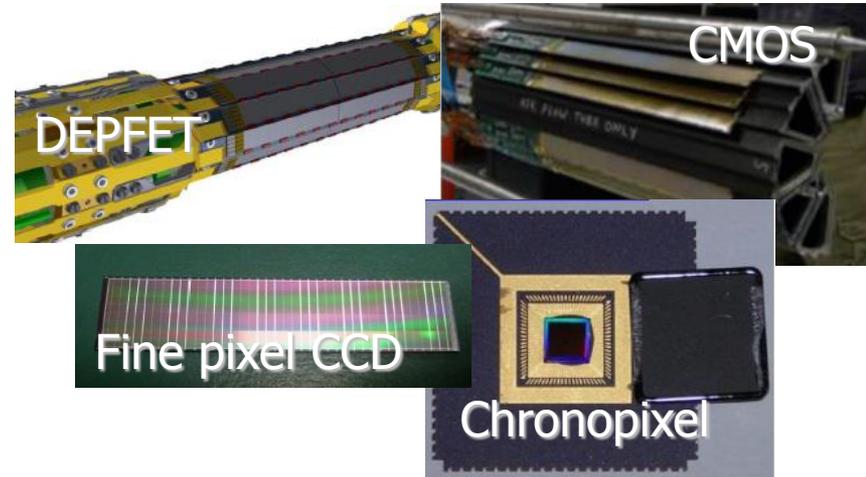
# Stratégies de lecture

---

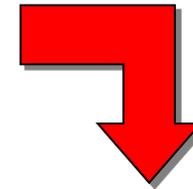
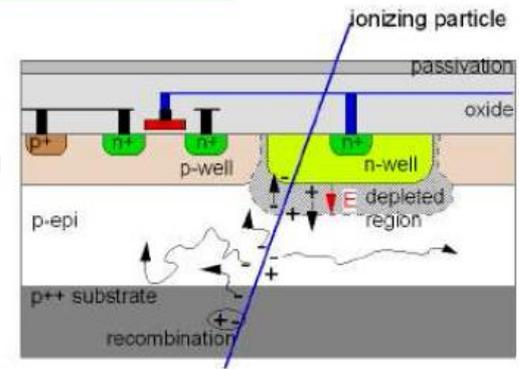
- Comment garder la résolution voulue et tenir compte du taux d'occupation ?
  - 3 stratégies:
    - Lire entre les trains (chronopixels  $\Rightarrow$  mémoires)
    - Lire assez vite (CMOS, DEPFET)
    - Etre extrêmement granulaire et lire après les trains (FPCCD)

# Vertex detector technologies

- ILD and SiD share the vertex R&D
  - Already several mature technologies are considered as satisfactory.
  - What is the safety margin ?
    - The beam background estimate is not known precisely ( $\sim$ factor 3-5 ?)
    - The beam background evolves with  $\sqrt{s}$  and so the vertex design requirements too !
- No technology chosen
  - Too early ?
    - All technologies will be evolving
  - Demanding physics benchmarks needed
    - Not only b-tagging
    - Low momentum tracks w.r.t beam background
    - Charm tagging performances
    - Secondary vertex charge determination
  - Different geometries considered
    - 3 x double sided or 5 single sided ?
    - Long or short barrel with disks ?
  - Different read-out strategies
  - The ultimate performances may be obtained with specific tracking and vertexing algorithms taking advantages of a given technology/geometry specifications
    - e.g. double sided option should help for low momentum tracks and background rejection (mini-vectors)
- Many options
  - DEPFET, FPCCD, CMOS, HV-CMOS, chronopixels, 3D-integrated, hybrid pixels, SOI, etc.



# CMOS



Experiment -Detector	Pitch [ $\mu m$ ]	$\sigma_{sp}$ [ $\mu m$ ]	$t_{r.o.}$ [ $\mu s$ ]	ladder X <sub>0</sub> [%]	Dadiation load [MRad]	$n_{eq}/cm^2$	Area [m <sup>2</sup> ]
STAR-PXL '13	20.7	3.5	200	0.37%	0.15	$3 \cdot 10^{12}$ (30°C)	.16
ALICE-ITS '18	20-30	~ 5	10-30	0.3%	0.7	$10^{13}$ (30°C)	0.5-10
CBM-MVD '19	20-30	~ 5	10-30	0.3-0.5%	≤10	≤ $10^{14}$ (≪ 0°C)	~ 0.5
ILD-500	16-80	<3	10-100	<0.15	0.1	$10^{11}$ (30°C)	0.35
ILD-1000	16-80	<3	2-100	<0.15	> 0.3	few $10^{11}$ (30°C)	0.35



## Technology

- High granularity, very thin (10-20  $\mu m$ ), only partially depleted
- Signal processing integrated on sensor substrate
- Material budget: routinely thinned down to 50  $\mu m$
- Rolling shutter read-out architecture (baseline)

## Applications

- STAR-VTX : successfully operating
- EUDET & AIDA telescope
- ALICE-ITS upgrade:
  - next step (« progress carrier »)
    - 3 architectures considered: MISTRAL, ASTRAL, ALPIDE (CERN)

## Read-out speed: 3 approaches

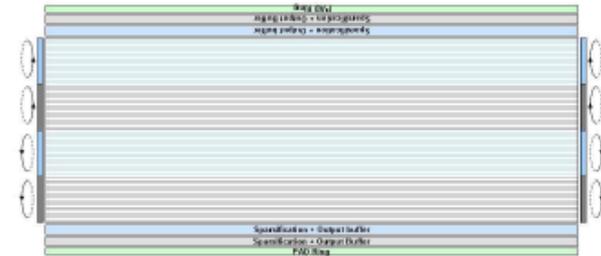
- Conservative (end-of column discriminators)
  - (MISTRAL ~ 30 $\mu s$ , 200mW/cm<sup>2</sup>)
- Fast (in pixels discri)
  - (ASTRAL ~ 15 $\mu s$ , 85mW/cm<sup>2</sup>)
  - architecture validated
- More ambitious (token ring architecture)
  - (ALPIDE ~ 5 $\mu s$ , 50mW/cm<sup>2</sup>)
  - prototype fonctionnal

## Next steps

- 2 sided ladder developement
  - (PLUME collab.): next prototype 0.35% $X_0$  on the way
  - next step : validate the concept with 2 different sensor types
- Investigate more challenging approach  $\Rightarrow$  to reach r.o. speed ~ 1 $\mu s$

# Improving read-out speed

- State of the art (fab. process: 0.35  $\mu\text{m}$ )
  - STAR:  $O(100 \text{ ns}) / \text{row} \Rightarrow \sim 60/30 \mu\text{s}$  (17/33  $\mu\text{m}$  pitch)
- Motivations for faster read-out
  - Robustness w.r.t. predicted beam background @  $\sqrt{s} = 0.5 \text{ TeV}$
  - Standalone tracking (e.g. low momentum tracks)
  - Compatibility with high luminosity and  $\sqrt{s} = 1 \text{ TeV}$
- Strategies to accelerate read-out (ALICE-ITS upgrade: MISTRAL/ASTRAL/ALPIDE)
  - Read-out from both side  $\Rightarrow \times 2$  (moderate additional mat. budget)
  - Elongated pixels (17  $\mu\text{m} \Rightarrow 33 \mu\text{m}$  or more)  $\Rightarrow \times 2$
  - Read-out simultaneously 2 or 4 rows  $\Rightarrow \times 2-4$  (MISTRAL)
  - Subdivide arrays in 4 sub-arrays read-out in //  $\Rightarrow \times 4$ 
    - Achievable in 0.18  $\mu\text{m}$  process (6-7 Metal layers)
  - In pixel discriminators  $\Rightarrow$  ASTRAL
  - Different read-out strategy: Asynchronous  $\Rightarrow$  ALPIDE



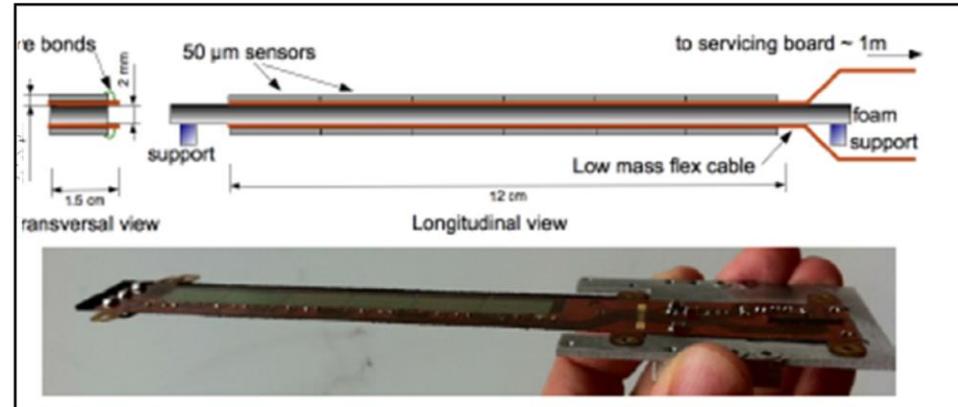
- Expected VTX performances
  - @ 1 TeV / 0.5 TeV

Layer	$\sigma_{sp}$	$t_{int}$	Occupancy [%]	Power
	MIMOSA/AROM	MIMOSA/AROM		
VXD-1	3 / 5-6 $\mu\text{m}$	50 / 2 $\mu\text{s}$ (8 $\mu\text{s}$ )	4.5(0.9) / 0.5(0.1)	250/5 W
VXD-2	4 / 10 $\mu\text{m}$	100 / 7 $\mu\text{s}$ (100 $\mu\text{s}$ )	1.5(0.3) / 0.2(0.04)	120/2.4 W
VXD-3	4 / 10 $\mu\text{m}$	100 / 7 $\mu\text{s}$ (100 $\mu\text{s}$ )	0.3(0.06) / 0.05(0.01)	200/4 W

# 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



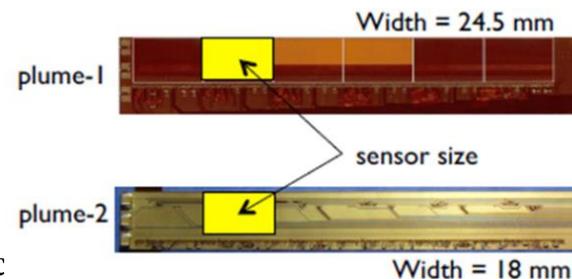
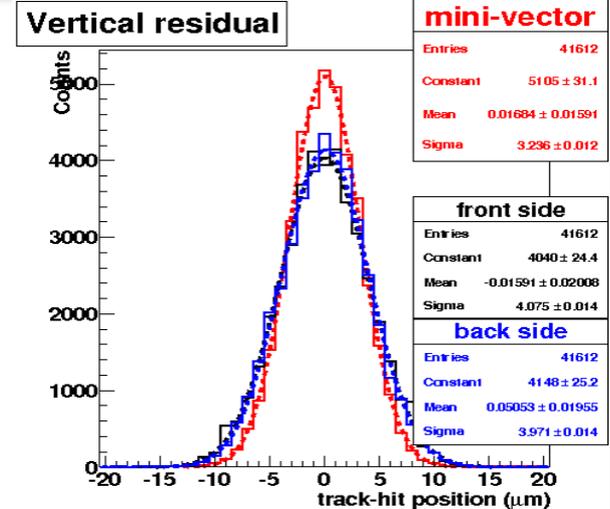
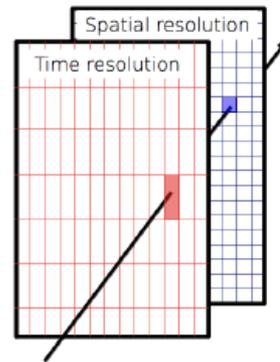
- PLUME coll. (Bristol, DESY, IPHC)

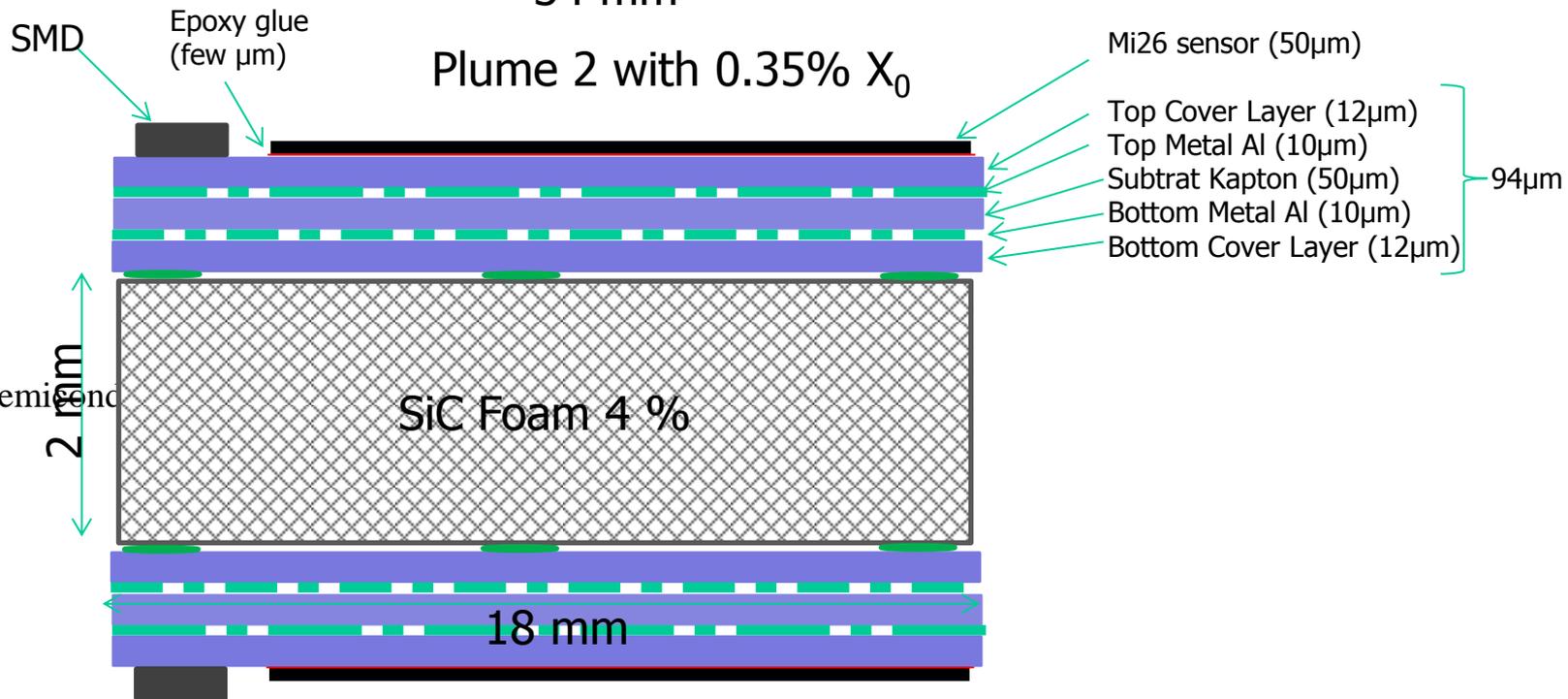
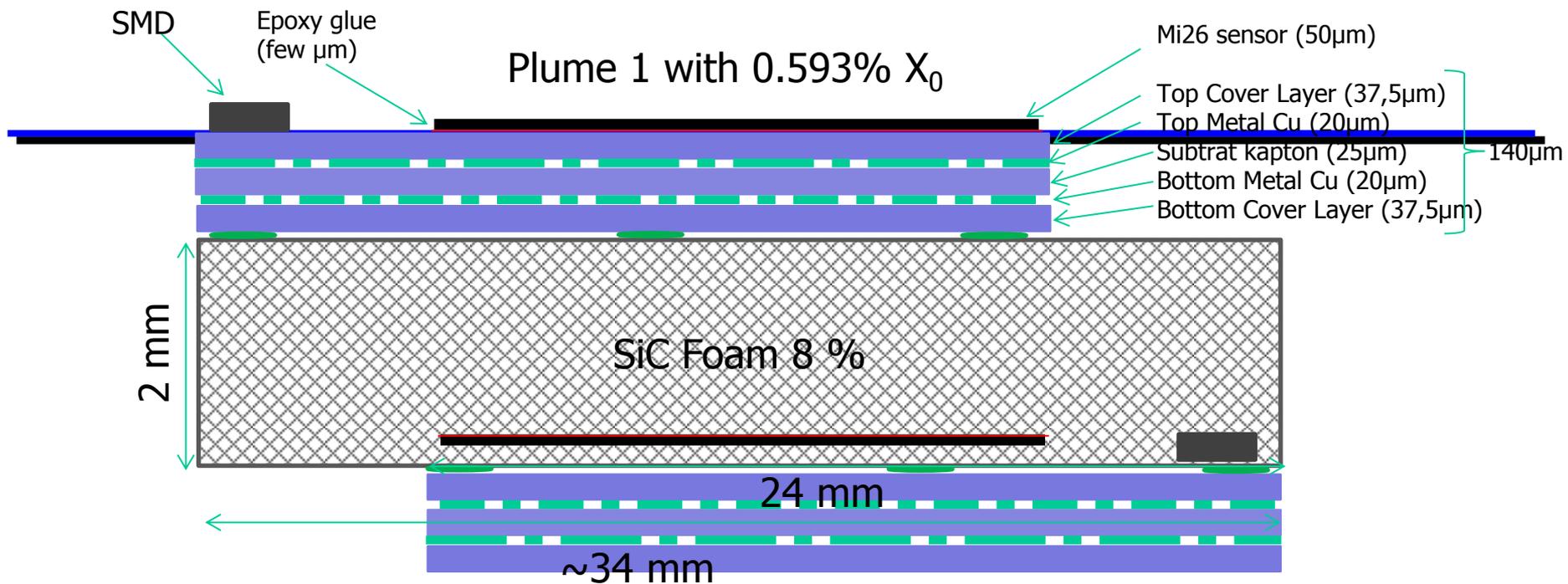
- Plume 01 prototype (<2012)

- 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)

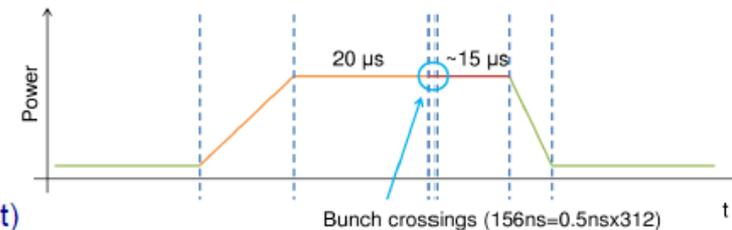




détecteurs semi-conducteurs

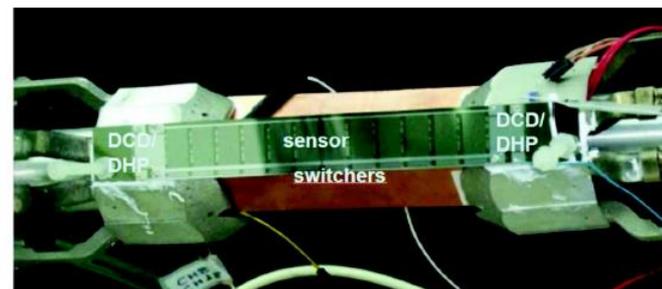
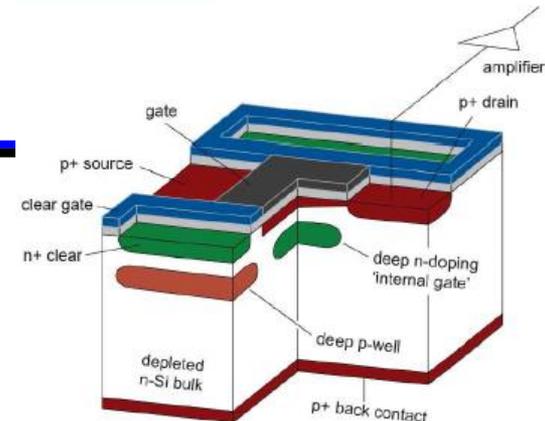
# Power Delivery & Cycling

- 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

# DEPFET



- Technology
  - Signal created in fully depleted Si and collected by internal gate (deep-n)  $\Rightarrow$  under a FET
  - Delivered current  $\propto$  collected charge
  - Clear contact removes charge
- Features
  - Signal processing ASICs bonded on ladder edges
  - Rolling shutter mode read-out
    - low power
  - High granularity
  - Sensors embedded in Si mechanical support
    - low material budget
- R&D includes
  - mechanical support, cooling and services
    - Thermal performances, power pulsing,
    - micro-cooling circuits
  - read-out time / pixel size
    - more parallelisation
- Applications
  - Belle 2 : in devt/prod.
    - Fully engineered ladders 0.21%  $X_0$
    - Several specs close to ILC
    - Granularity x speed still to improve

	ILC	Belle-II
occupancy	0.13 hits/ $\mu\text{m}^2/\text{s}$	0.4 hits/ $\mu\text{m}^2/\text{s}$
Radiation	< 100 krad/year, $10^{11}$ 1 MeV $n_{\text{eq}}$ /year	> 1Mrad/year, $2 \times 10^{12}$ 1 MeV $n_{\text{eq}}$ /year
Duty cycle	1/200	1
Frame time	25-100 $\mu\text{s}$ (10 ns @ CLIC)	20 $\mu\text{s}$
Momentum range	All momenta	Low momentum (< 1 GeV)
Acceptance	6°-174°	17°-150°
Resolution	Excellent 3-5 $\mu\text{m}$ (pixel size = 20 x 20 $\mu\text{m}^2$ )	Moderate (pixel size = 50 x 75 $\mu\text{m}^2$ )
Material budget	0.15 % $X_0$ /layer	0.21 % $X_0$ /layer

# FPCCD

- Fine Pixel Charge-Coupled Devices

- $\sim 15 \mu\text{m}$  depleted region

- Pixel size

- $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  (L1-2)

- $10 \times 10 \mu\text{m}^2$  (L3-6)

- $\sigma_{\text{sp}} \sim 1 \mu\text{m}$

- Occupancy kept low

- Read-out

- Integrate over a train

- Read-out between trains

- High bandwidth (10MPixels/s)

- No time stamping

- Power:  $\sim 40\text{W}$

- No power pulsing

- CO<sub>2</sub> Cooling:  $\sim -40^\circ\text{C}$  (rad.tol. purposes)

- Features

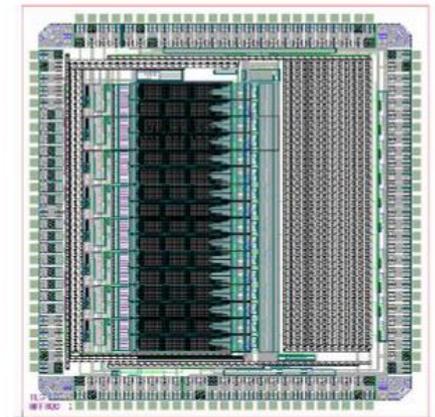
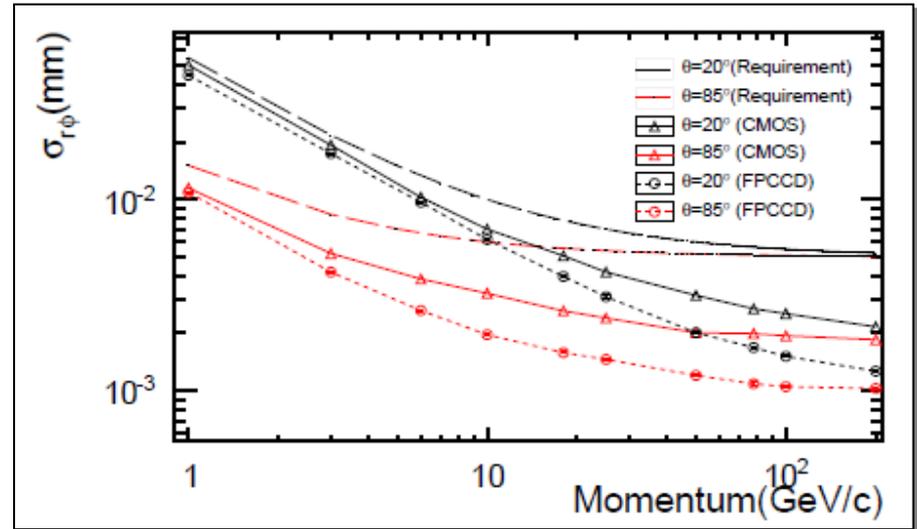
- Background rejection:

- Pattern recognition

- R&D includes

- Detection performances, low mass cooling, read-out electronics

- Approach not limited to CCDs.



# Chronopixels

## – CMOS based Chronopixels

- In pixel 12 bits time stamping (single bunch crossing)
- Read-out between trains (power saving)
- Reduce beam background
- Allows tracking with VTX seeding

## – Requires very advanced technology (90 nm)

- 90 nm, deep P-well, high  $\mu$ circuits density

## – Challenges

- Cost, design optimisation, development time

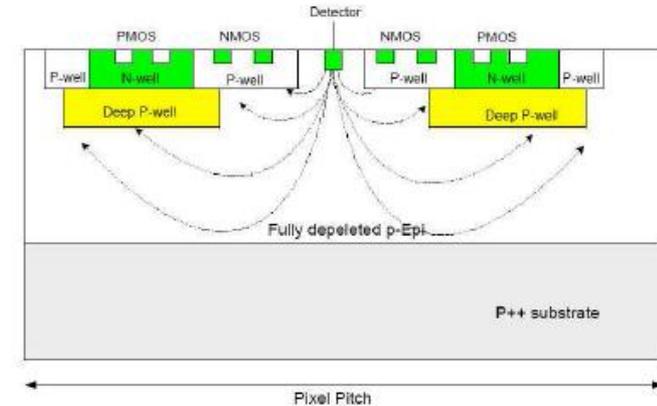
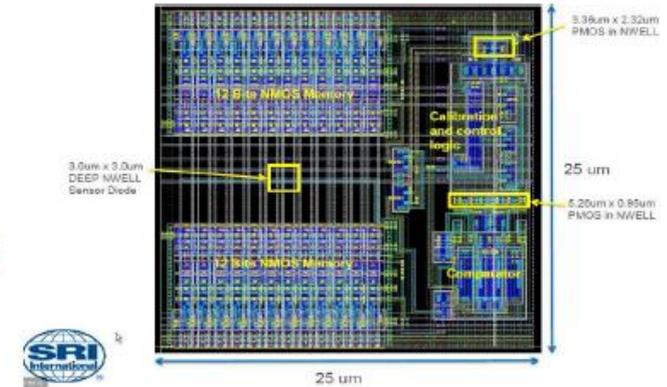


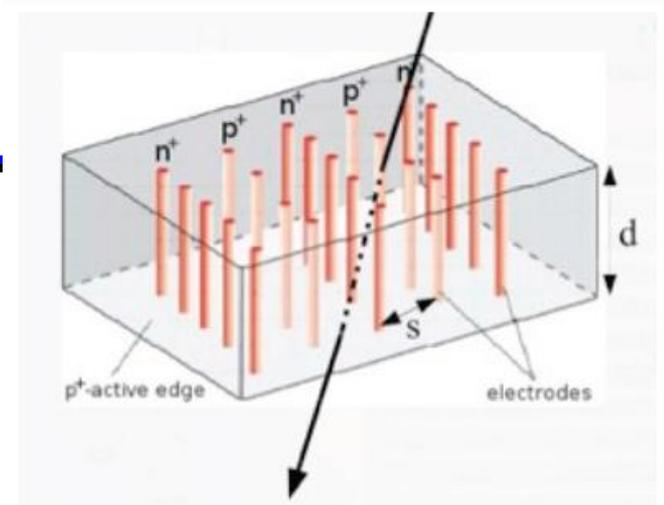
Figure 11.1 Proposed pixel architecture employing the deep p-well layer

M. WINTER

# Autres R & D

---

# Senseurs 3D



- Motivations: upgrades LHC (idée ~ 1985)

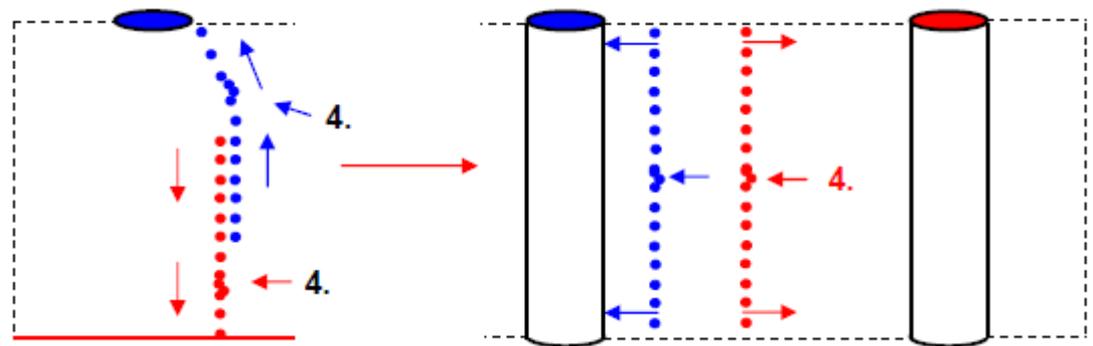
- Principe

- 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

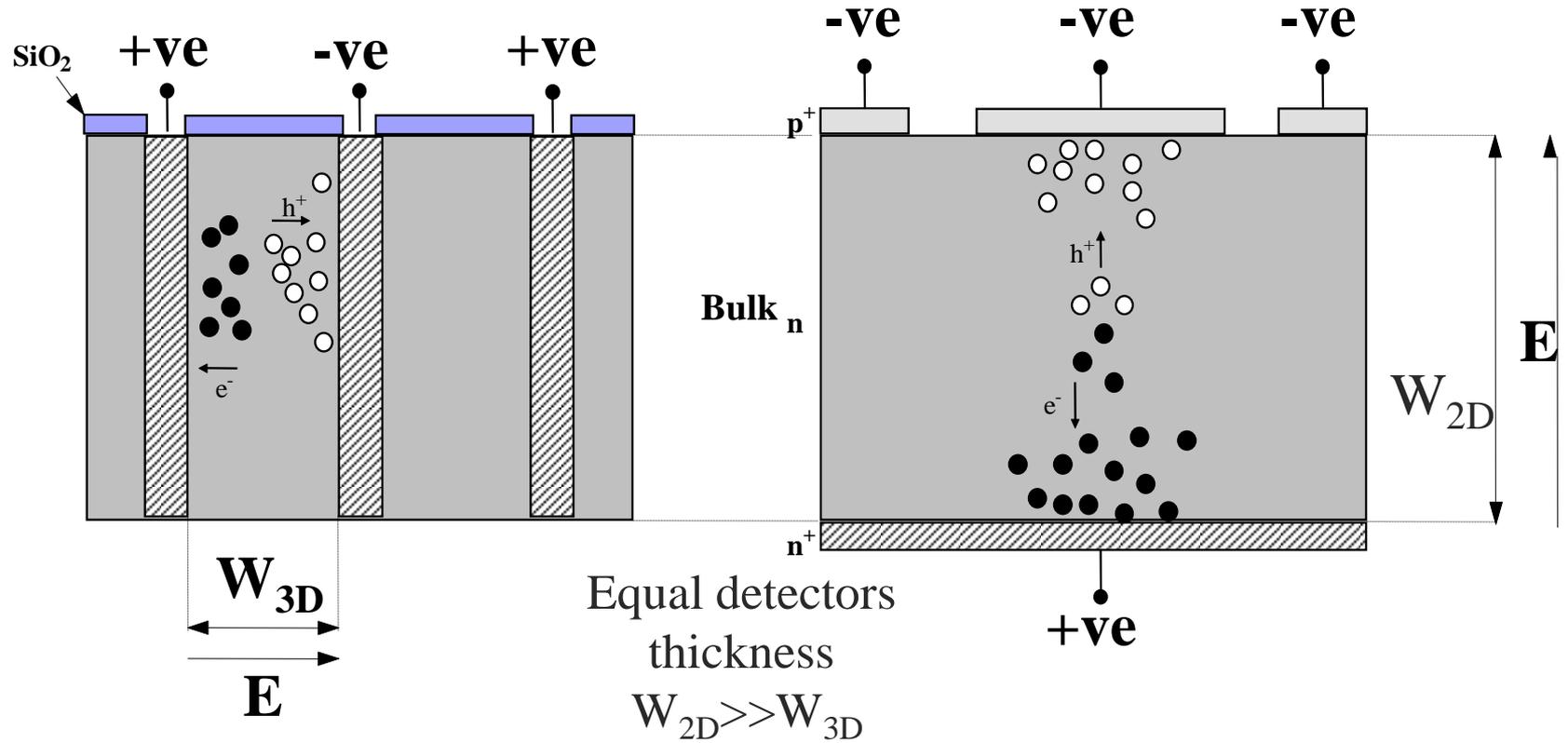
- Limitations

- Technologie non standard

- R & D très active



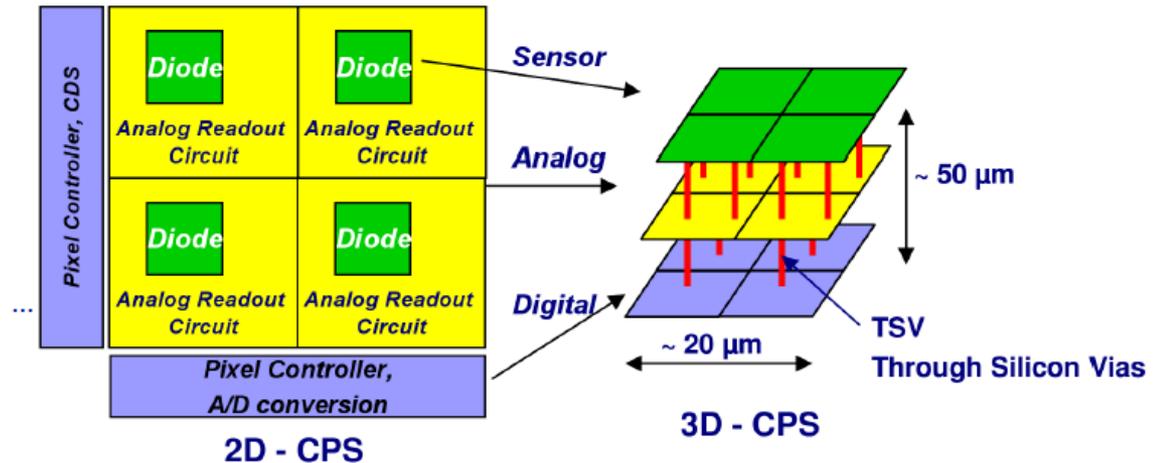
# Senseurs 3D: vue en coupe



# Le long terme: les technologies 3D

- Idée:

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



➤ Choisir le meilleur process pour chaque tache

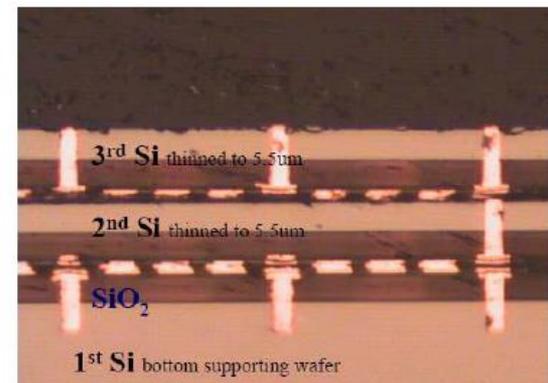
- Avantage

- 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



Experiment	Techno.	Date	Pitch	$\sigma_{sp}$	X0 (%)	Radiation load		Surface	channels	t.r.o.
						Non ion.	Ion.			
Detector			( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	/ladder	( $n_{eq}/\text{cm}^2$ )	(Mrad)	( $\text{m}^2$ )	# (M)	( $\mu\text{s}$ )
DELPHI VFT	hybrid	1996	330	$\sim 10$	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	$\sim 10$	2.5	$1 \times 10^{15}$	50	1.7	80	0.025
STAR PXL	CMOS	2013	20.7	3.5	0.37	$3 \times 10^{12}$	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	$1 \times 10^{12}$	0.1	0.5-10	>1k	10-30
CBM-MVD	CMOS	2019	20-30	$\sim 5$	0.3-0.5	$1 \times 10^{14}$	$\leq 10$	0.5	800	10-30
CMS phase 2		2025				$> 10^{16} ?$				
ILD-500 VTX	t.b.d.	2030	16-80	$\sim 3$	0.15	$1 \times 10^{11}$	0.1	0.35	$\sim 500$	10-100
ILD-1000 VTX	t.b.d.	?	16-80	$\sim 3$	0.15	$1 \times 10^{11}$	>0.3	0.35	$\sim 500$	2-100
CLIC VTX	t.b.d.	?	$\sim 25$	$\sim 3$	0.2	$1 \times 10^{11}/\text{yr}$		$\sim 0.35$	$\sim 500$	0.1-0.01

# 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

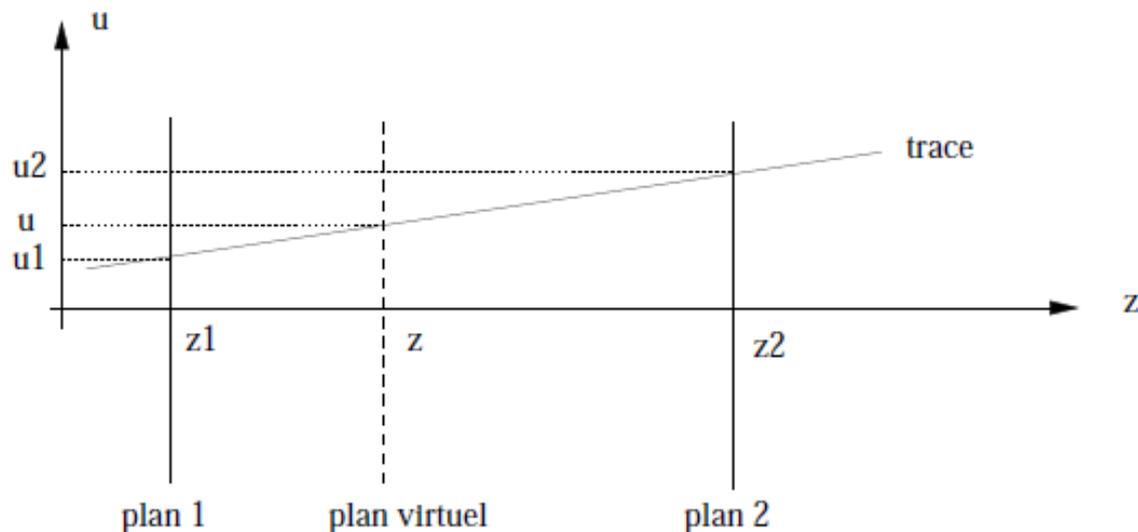


# Exercices

---

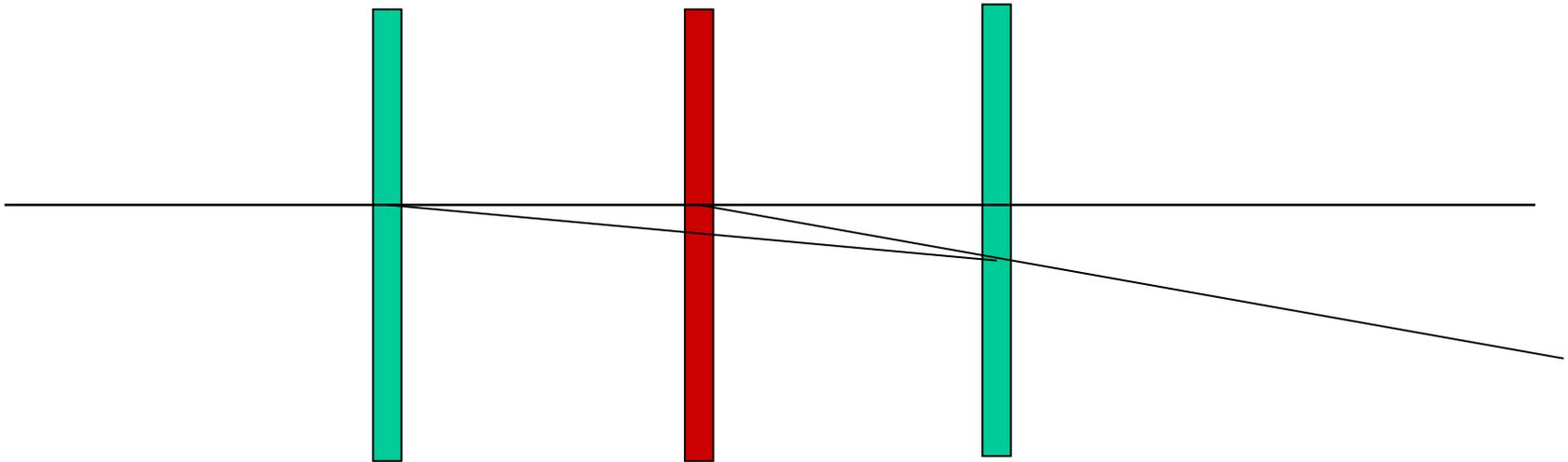
# Résolution sur le paramètre d'impact

- 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  $\Delta u$  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  $\mu\text{m}$  de silicium entre deux plans de détecteurs ayant une résolution intrinsèque de 2  $\mu\text{m}$ . 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/cm<sup>2</sup>/croisement de paquets de e<sup>+</sup>/e<sup>-</sup>
- 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  $\mu\text{m}$  parcouru en moyenne
  - 100 Rad = 1 Joule/kg
  - rho silicium = 2.32 g/cm<sup>3</sup>
- 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 ?

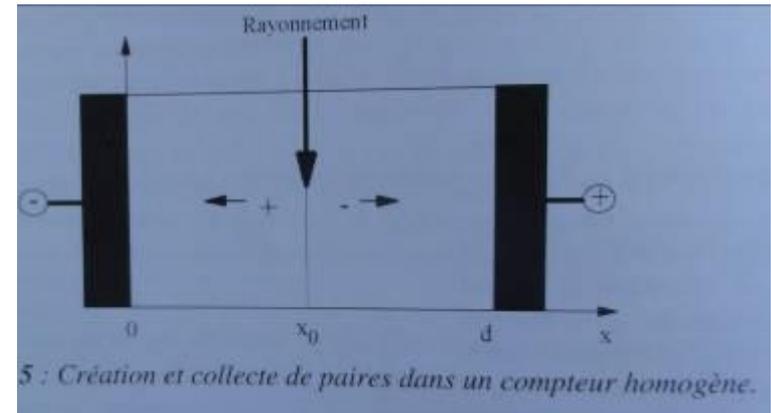
# Résolution digitale d'un détecteur

---

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

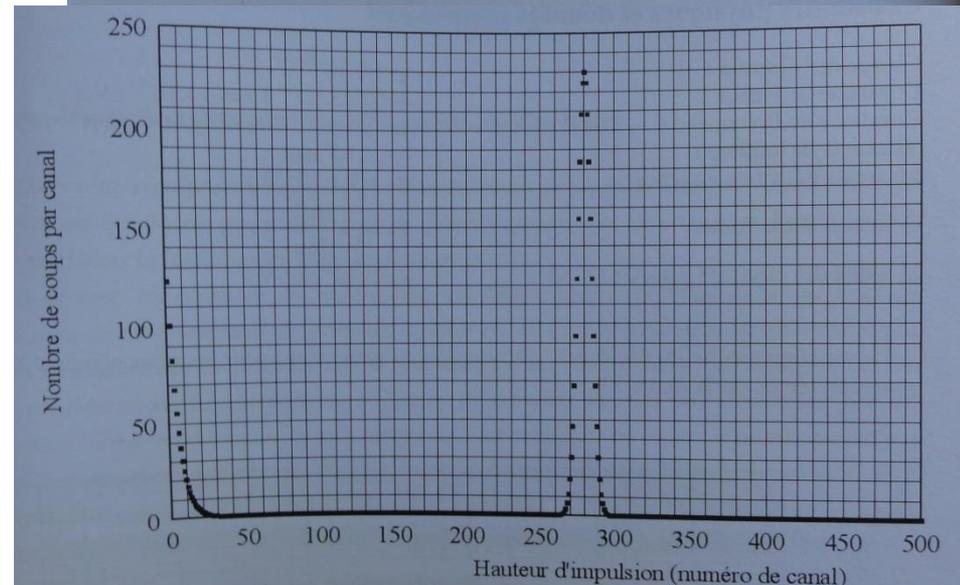
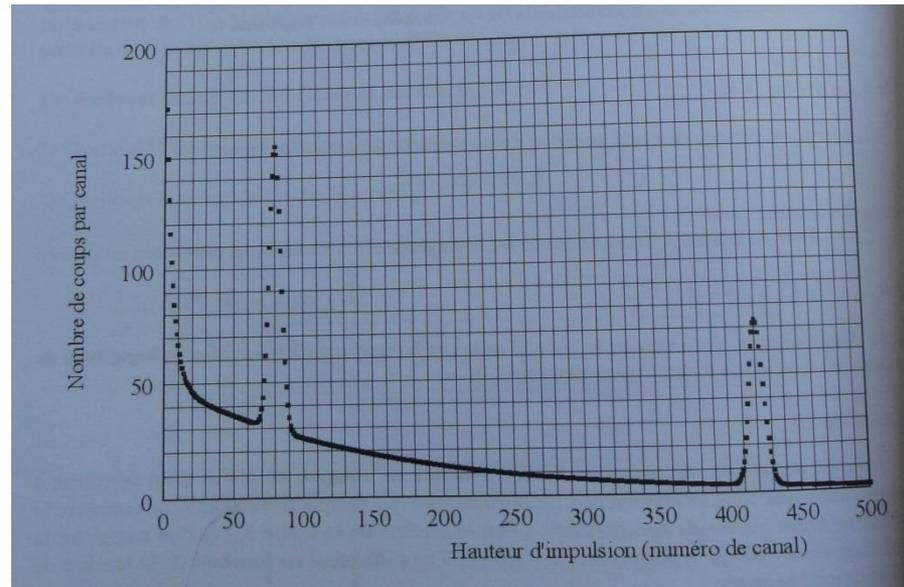
# Theorème de Ramo et efficacité de collection de charge

- 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  $t=0$   
 $\tau$  = 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

---

# Liens utiles

---

- Production de détecteurs

[http://www.microelectronique.univ-rennes1.fr/fr/index\\_chap1.htm](http://www.microelectronique.univ-rennes1.fr/fr/index_chap1.htm)

- électronique

<http://xcotton.pagesperso-orange.fr/electron/coursetdocs.htm>

- détecteurs semi-conducteurs

[http://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9tecteur\\_%C3%A0\\_semiconducteur](http://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9tecteur_%C3%A0_semiconducteur)

[http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:vjluhVzg7VgJ:ppewww.physics.gla.ac.uk/~batesr/post\\_grad\\_lectures/PG\\_lectures\\_Semiconductor\\_detectors.ppt+semiconductor+detector+particle+physics&cd=11&hl=fr&ct=clnk&gl=fr](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:vjluhVzg7VgJ:ppewww.physics.gla.ac.uk/~batesr/post_grad_lectures/PG_lectures_Semiconductor_detectors.ppt+semiconductor+detector+particle+physics&cd=11&hl=fr&ct=clnk&gl=fr)

- autres

PDG: (particle Data Group):

- divers

[http://ireswww.in2p3.fr/ires/dea/master/master\\_physique\\_instrumentation\\_cours2.html](http://ireswww.in2p3.fr/ires/dea/master/master_physique_instrumentation_cours2.html)

# 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)

# Corrections

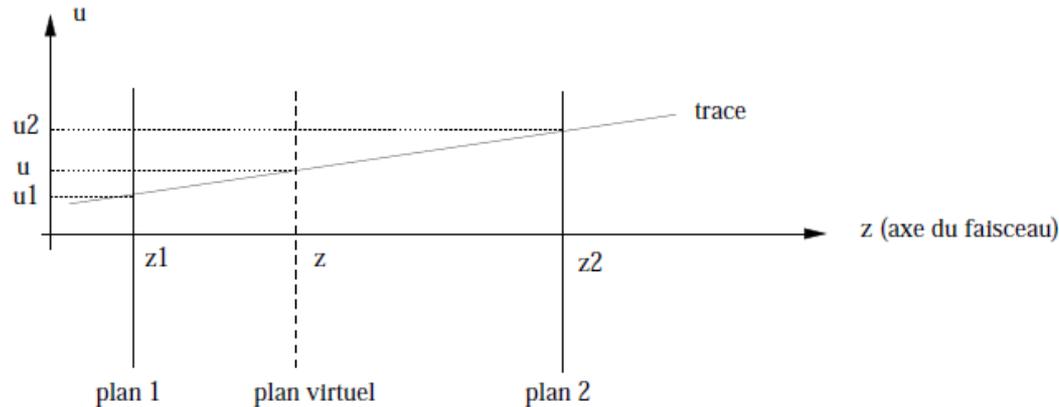
---

# Dose reçue

---

- Dose:
  - $2825 \times 5 \times 3600 \times 24 \times 180 \times 5 = 1.1 \times 10^{12}$  hits/cm<sup>2</sup>/an
  - $\times 3.6$  eV/paires  $\times 110 \times 10^4$  paires/cm
  - $/ 2.32 \times 10$  (kg/cm<sup>3</sup>)
  - $\times 1.6$  eV/Joules
  - $\sim 300$  J/kg  $\sim 30$  kRad
  - $\times 3$  (à cause des angles d'incidence)  $\sim 90$  kRad
- Fluence
  - $1.1 \times 10^{12}$  hits/cm<sup>2</sup>/an  $\times 1/30$  (NIEL)  $\times 3$ (angles)
  - $\sim 1.1 \times 10^{11}$  n<sub>eq</sub>/cm<sup>2</sup>/an
- « solutions »
  - Rayon
  - Champs magnétique
  - Prototypes radiorésistants

# 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  $\Delta z_1$  et  $\Delta z_2$  sur la position en  $z$  des 2 plans de référence sont négligeables. D'où :

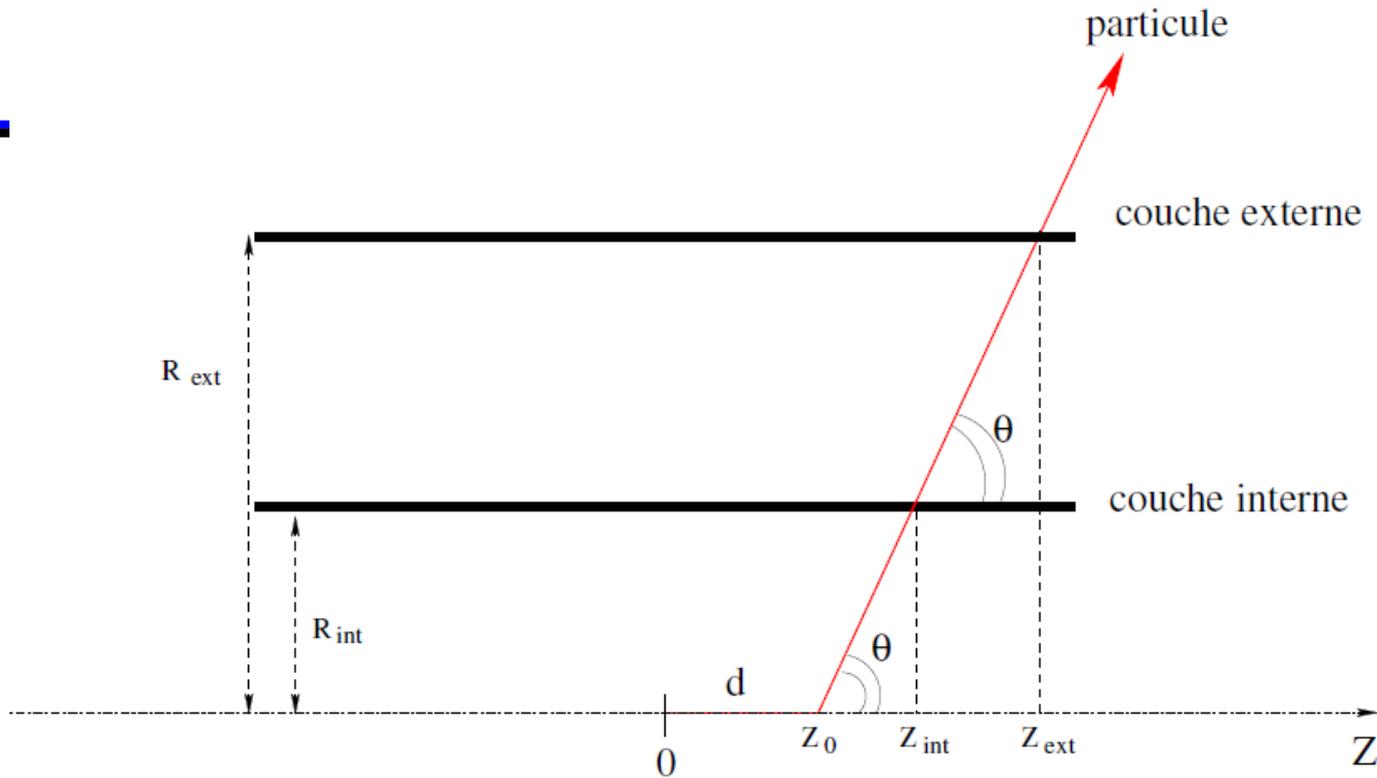
$$du = \frac{\partial u}{\partial u_1} du_1 + \frac{\partial u}{\partial u_2} du_2 \quad (1.2)$$

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

L'incertitude  $\Delta u$  est donné par :

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

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



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

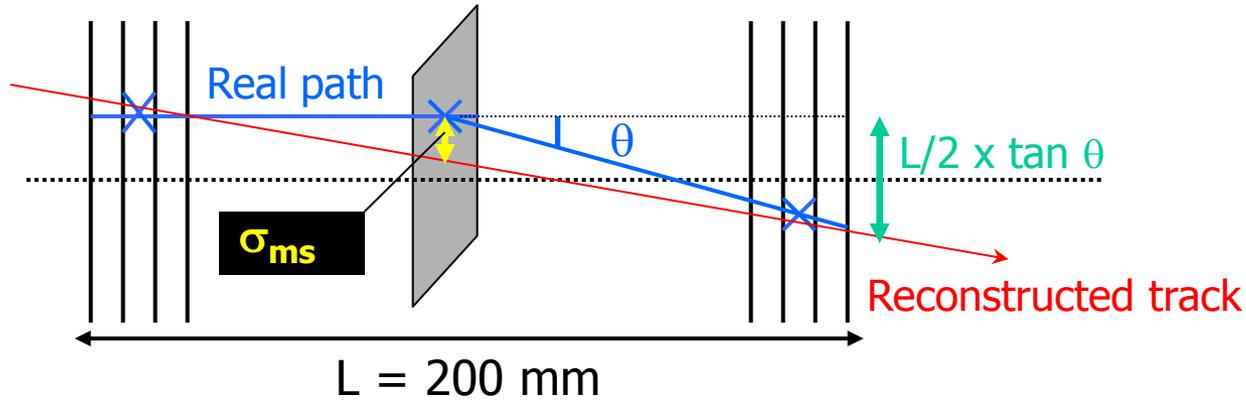
L'incertitude  $\Delta Z_0$  peut être calculé à partir de l'équation précédente en prenant

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

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

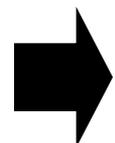


$$\theta = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta \cdot c \cdot p} \times z \sqrt{\frac{x}{X_0}} [1 + 0.038 \ln(\frac{x}{X_0})]$$

( $\beta \cdot c \cdot p$ )

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

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



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

# 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  $\Delta(hud)$  :

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

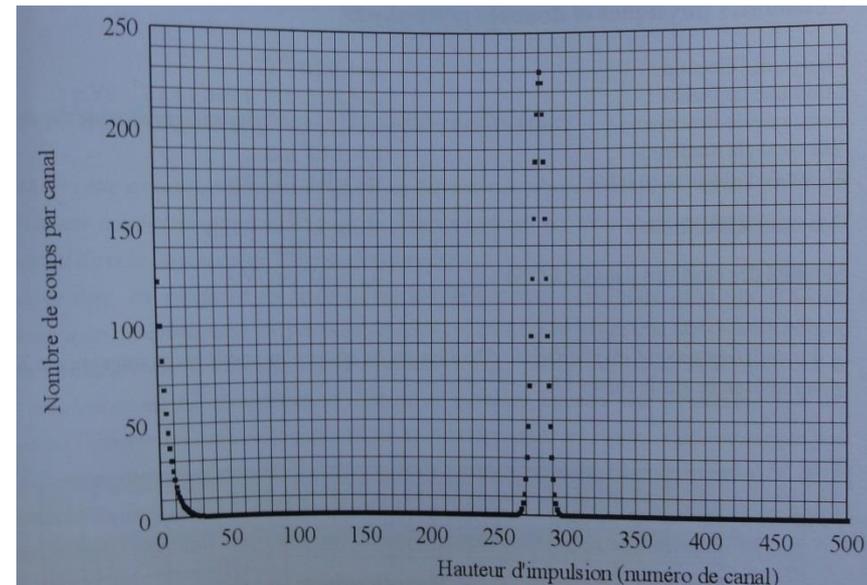
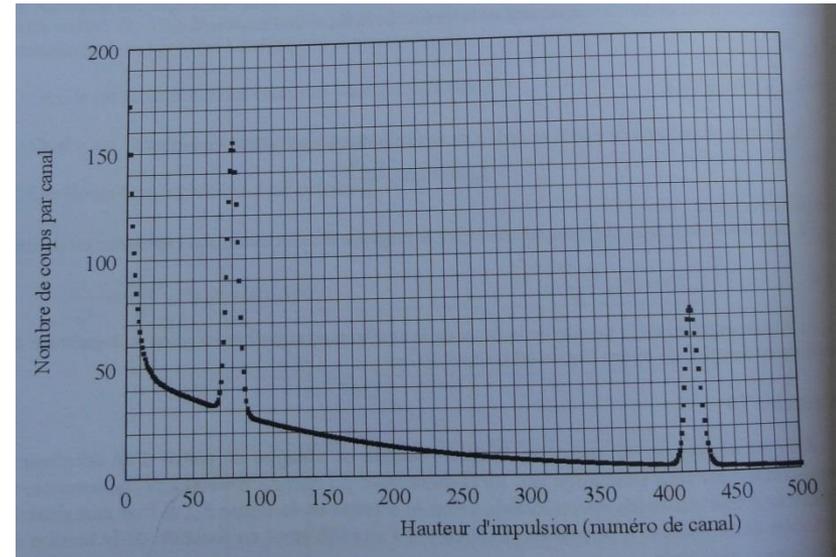
$$= \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} x^2.N(x).dx} \quad (1.17)$$

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

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

# 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  $\sim 10$  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 reçue dans le circuit comme pendant au courant induit:  $I = \frac{dQ}{dt}$

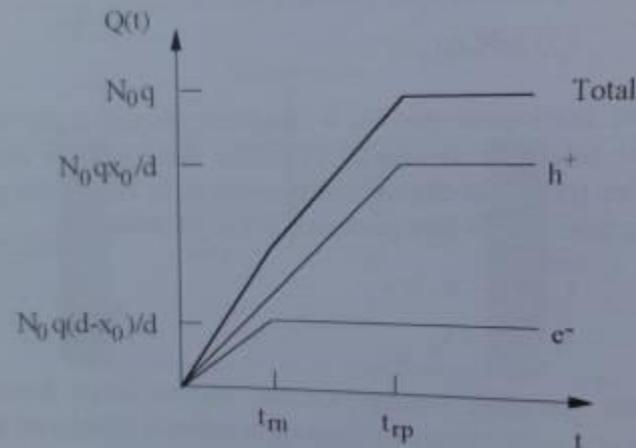
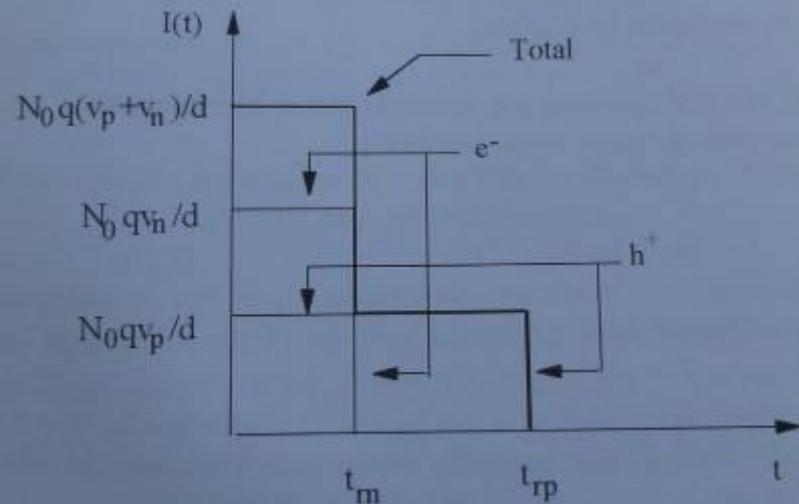
$$dQ_{e^-} = I_{e^-} dt$$

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

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

⊕  
⊖

o)



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

.16a : Impulsions de courant délivrées 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  $v_{e^-} = \mu_{e^-} E$  ...

$\mu_{e^-}, \tau_{e^-}$ ,  $\rightarrow$  caractérisé par le matériau.

de même pour les  $h^+$ :

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

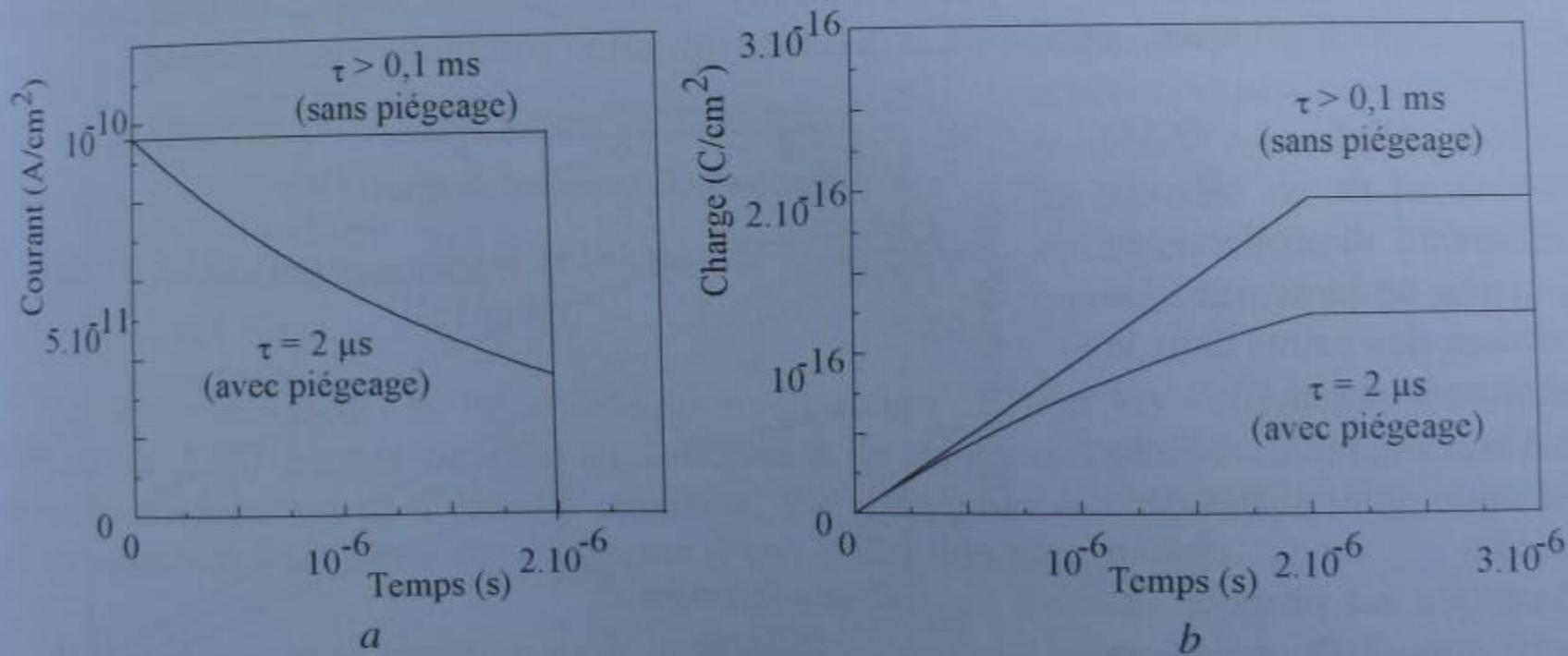


Figure 2.17 : Forme des impulsions de courant (a) et de charge (b) en présence de piègeage dans un détecteur  $\text{HgI}_2$ .