

# Détecteurs semi-conducteurs

B. EQUER

DRTBT 1991-74



**DETECTEURS A SEMICONDUCTEURS**

**B. EQUER**

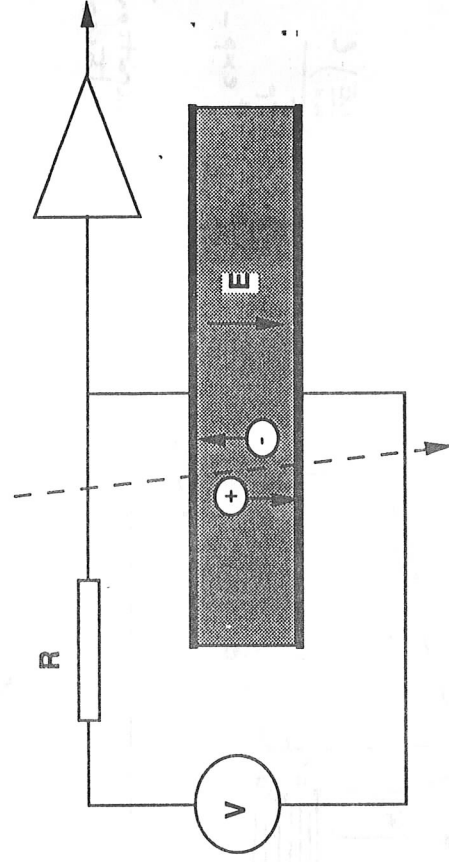
Laboratoire de Physique des Interfaces  
et des Couches Minces

Ecole Polytechnique-CNRS (UPR 258)  
(69 33 40 09)

- Rappels
- Signal et bruit
- Semiconducteurs et solides
- Mobilité
- Conclusion

**Quelques Rappels**

- ce sont des "chambres à ionisation" solides



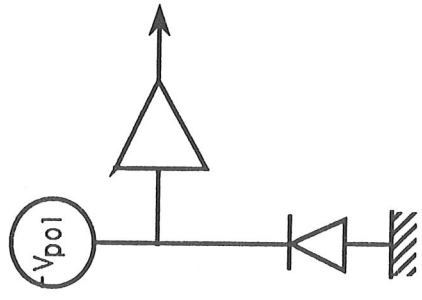
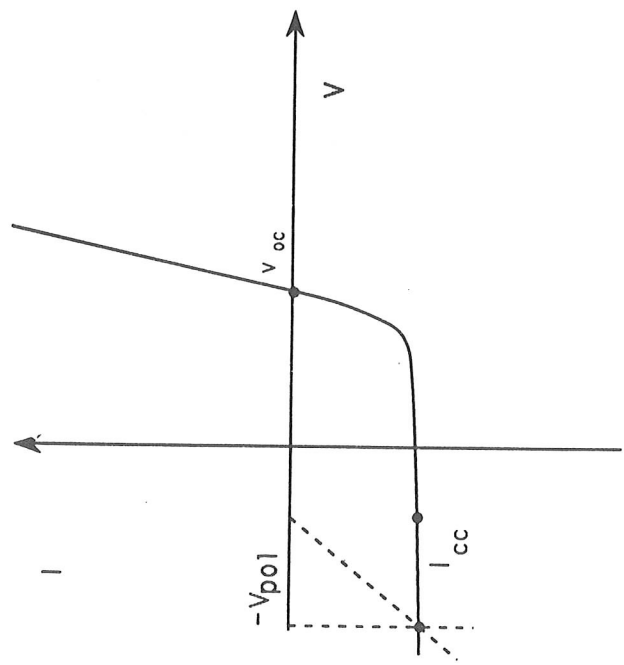
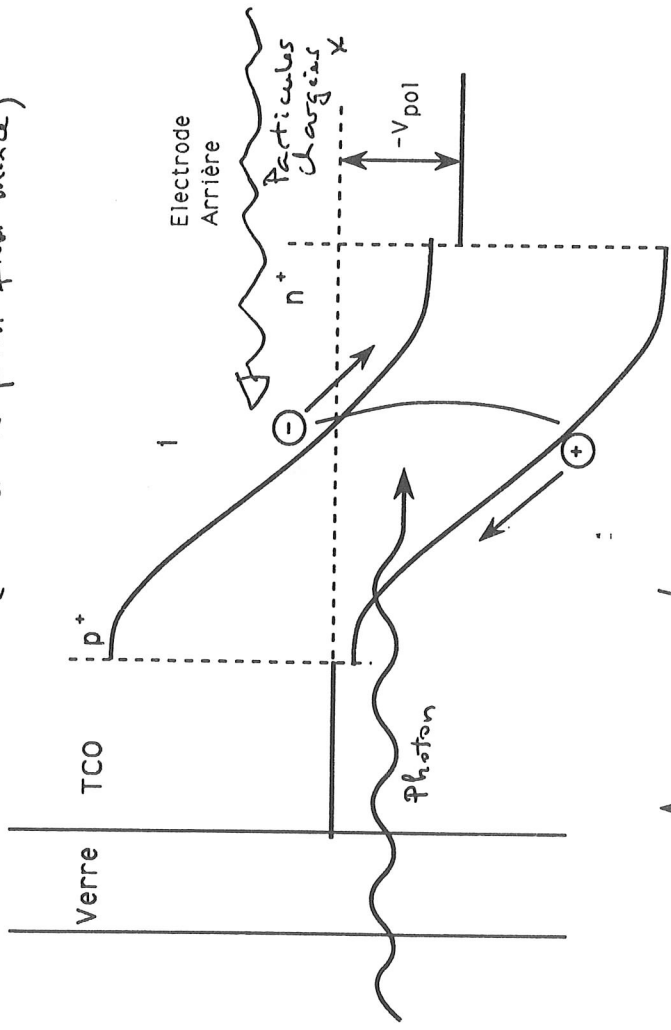
Il existe plusieurs modes :

- photoconducteur
- photovoltaïque
- déserté (détecteurs à jonctions, barrières, etc..)
- résistif

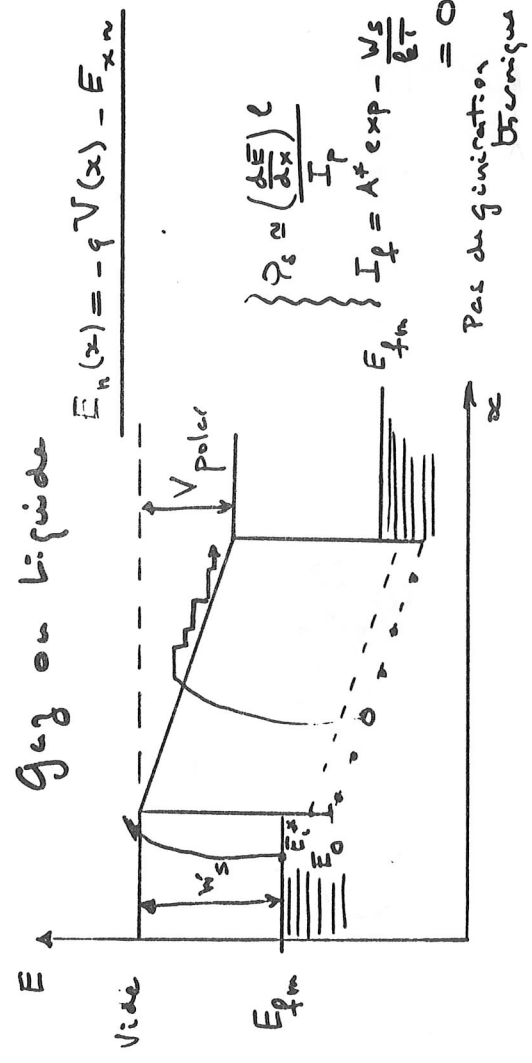
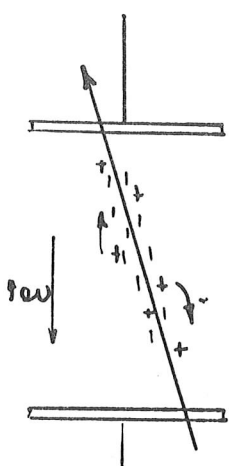
En général pas de gain dans les modes utilisés pour les particules.

**PHOTODIODE p-i-n en mode détecteur**

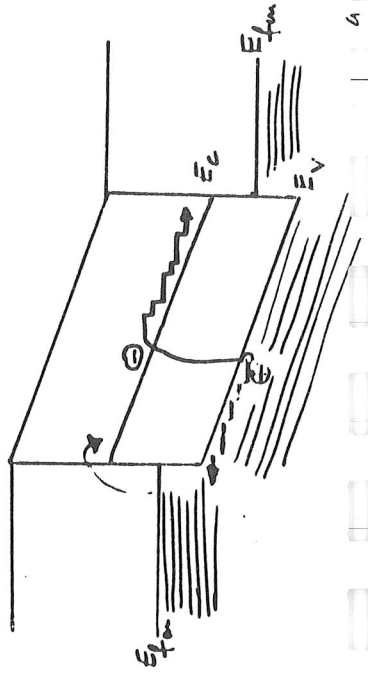
(Cas d'une p-i-n fine mince)



**Diagrammes de bandes**



**Semi conducteur Intrinsèque**



⇒ Le signal est le signal "primaire", d'ionisation :  
 Dans les semiconducteurs cristallins intrinsèques :  
 excitation bande à bande.

Pour des particules chargées (particule incidente  
 chargée, recul de noyau, électron de conversion de  $\gamma$ ) :

- le nombre de paires électrons-trous (électrons-ions) est :

$$N_s = \frac{\int_0^d \frac{dE(E)}{dx} dx}{\epsilon_p} \Rightarrow \text{Min. Ion. } N_s = \frac{dE(E)}{dx} \frac{d}{\epsilon_p}$$

-  $d$  = épaisseur du détecteur (ou  $d/\cos\theta$  en incidence oblique)

-  $\epsilon_p$  est l'énergie moyenne de création de paires. Elle ne dépend, en première approximation, ni de l'énergie, ni de la nature de la particule, mais seulement du milieu détecteur.

$$\epsilon_p = E_{\text{ion}} + E_{\text{autres excitations}}$$

$$E_{\text{ion}} \geq I_{\text{ion}}$$

Autres excitations : plasmons, phonons, etc...

⇒  $\epsilon_p$  constant veut dire que l'énergie se distribue en fractions constantes entre les différents mécanismes : création de paires et autres excitations. (Modèles de Shockley, Klein, Roederick, etc, etc, ....)

- Dans les semiconducteurs on observe expérimentalement la relation de Klein (1968) :

$$\epsilon_p(\text{eV}) = 2,8 E_g + 0,75$$

où  $E_g$  est la largeur de bande interdite (minimum des distances entre bandes et non pas distance entre bandes à  $\vec{k} = 0$ ).

! Mais : Relations analogues avec d'autres quantités ("gap moyen") et quelques violations...

- Ionisation extrinsèque :

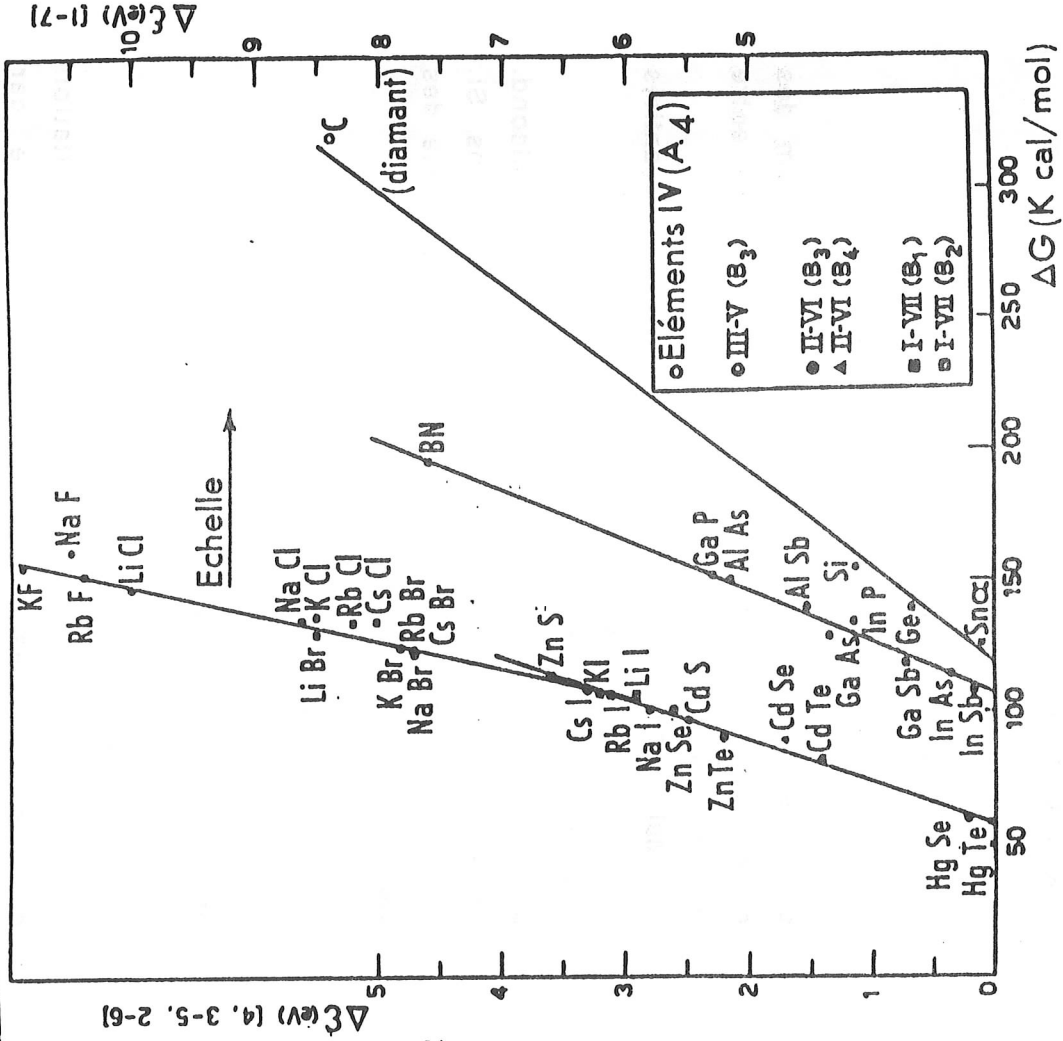
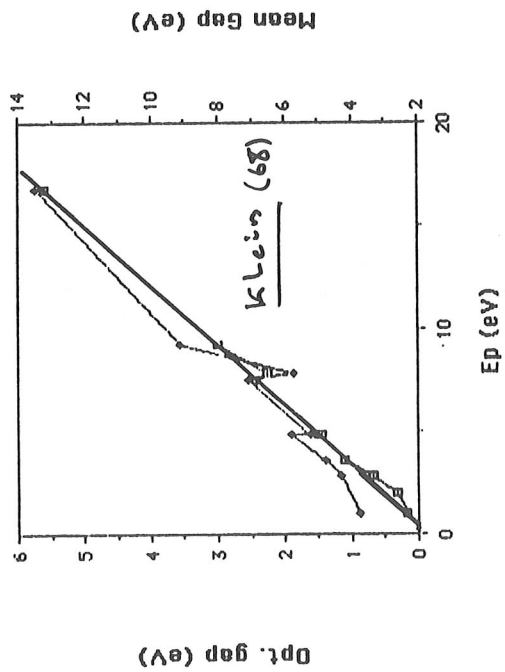
L'énergie d'ionisation d'impuretés dans un semicond. est  $\approx$  divisée par  $\epsilon_r^2$  (modèle hydrogénéoïde). Dans Si,  $\epsilon_r = 11,7$  ; dans Ge  $\epsilon_r = 16$ . Les niveaux d'énergie des électrons périphériques sont donnés par :

$$E_n = m^* \frac{1}{m} \frac{E_I}{\epsilon_r^2} \text{ avec } E_I = 13,6 \text{ eV}$$

d' où 12meV pour ioniser P ou As dans Ge.

- haute température  $kT \geq 25\text{meV} \Rightarrow$  dopage
- basse température  $kT \ll 12 \text{ mEV}$  excitation extrinsèque. Mais densité impuretés limitée car induit conductivité parasite (tunnel, transition isolant-métal)

### Pair generation Energy versus Gap



Dépendance de la largeur de bande interdite  $\Delta G$ , vis-à-vis d'atomisation  $\Delta G$  [F. BAILLY, P. MANCA, à paraître].

- Signal :

tension (charge) ou courant.

$$V_s = \frac{Q_s}{C} = \frac{q N_s}{C} \quad \text{et} \quad C = \epsilon \frac{S}{d}$$

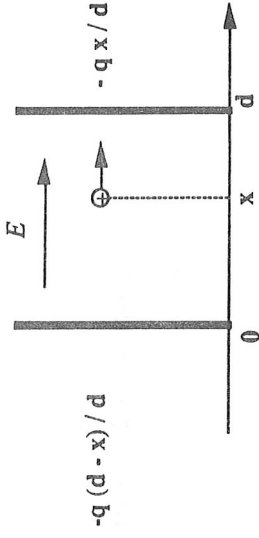
- GENERATION DU SIGNAL : (THEOREME DE RAMO)

Pour une charge q en mouvement :

$$i = q \frac{dx}{dt}$$

(reste vrai en présence de charges fixes)

origine : induction électrostatique (Th inverse de Green)



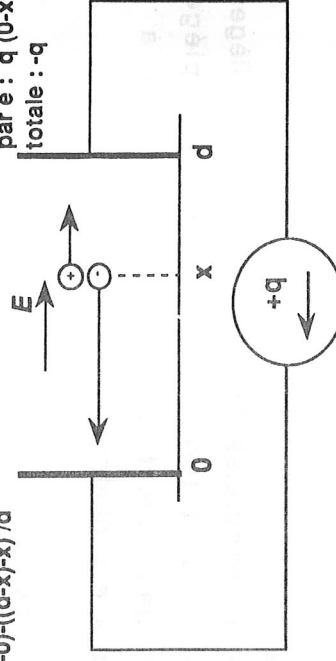
⇒ COLLECTION D'UNE PAIRE ELECTRON-TROU

Pour une paire créée en x, la charge totale induite ("collectée") est :

$$Q_{\text{paire}} = q \frac{(\text{parcours de l'électron} + \text{parcours du trou})}{d}$$

Variation des charges induites :  
 par h :  $-q((d-x)-d) = -(d-x-x)/d$   
 par e :  $q((d-x)-0) = (d-x-x)/d$   
 totale : +q

Variation des charges induites :  
 par h :  $-q(d-x)/d$   
 par e :  $q(0-x)/d$   
 totale : -q



Charge totale passant d'une électrode à l'autre

les semiconducteurs :

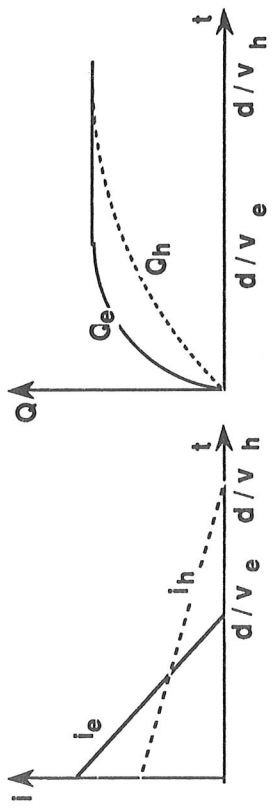
-par rapport aux gaz et liquides, ils ont l'avantage d'une petite énergie de création de paires, d'où une grande quantité de charges créées, donc de faibles fluctuations statistiques de ces charges. ( $\epsilon_p =$

$3.6\text{eV}(\text{Si}), 3\text{eV}(\text{Ge}), \approx 0.3\text{eV}(\text{InSb})$ )

-ont l'inconvénient d'être conducteurs (même si ce n'est que semi...) et le problème principal à  $T > 100^\circ\text{K}$  de ces détecteurs est qu'il faut bloquer le courant de fuite (d'où les "jonctions").

	courant induit	temps de dérive	Charge induite
électron	$q \mu_e E / d$	$x / \mu_e E$	$q x / d$
trou	$q \mu_h E / d$	$(d-x) / \mu_h E$	$q (d-x) / d$
Total			$q$

⇒ la collection d'une paire électron-trou induit  $q$  (et non  $2q$ ).  
 ⇒ signal idéal d'une particule au minimum d'ionisation dans un milieu à champ constant (vitesse uniforme) :



Courants et charges collectées pour une particule au minimum en champ constant

• "temps de montée" du signal : il n'est limité que par le temps de relaxation diélectrique du métal ( $\approx 10\text{-}20\text{s}$ ). En pratique par le RC du circuit ( $10\text{pF} \times 50\Omega \Rightarrow 0,5\text{ns}$ )

Piégeage-Recombinaison

•piégeage :

Les défauts et impuretés induisent des états "pièges" dans la bande interdite. Les porteurs piégés n'atteignent pas l'électrode. Leur contribution à la charge induite est diminuée :

$$Q_{\text{ind}}(z_0) = \int_{z_0}^{z_0} q \frac{dz}{d_0} \exp\left(-\int_{z_0}^z \frac{dz}{\mu\tau E(z)}\right)$$

elle dépend du "temps de vie" de piégeage  $\tau$  et donc du champ électrique local (d'où le terme  $dz / (\mu \tau E) = dz / (v(z) \tau) = dt / \tau$ ).

• Tous les pièges dont  $\tau$  est  $\ll$  temps d'intégration du signal ( $\leq$  temps de vol  $d_0 / \langle v \rangle$ ), jouent un rôle. Le dépiégeage thermique devient vite négligeable à basse température :

$$\text{Prob}_{\text{dép}} = v_0 \exp\left(-\frac{E_c - E_p}{kT}\right)$$

(ordre de grandeur  $v_0 \approx 10^{10} - 10^{13} \text{ s}^{-1}$ )



recombinaison :

Met en jeu un autre porteur éventuel de la paire originale (recomb. gémignée). Dans tous les cas, tout se passe comme si la paire, et donc q, était perdue.

auto-écranage (effet plasma)

Les paires e-h sont créées dans un cylindre étroit autour de la trajectoire. Pour des particules très ionisantes, dans des matériaux à faible coeff. de diffusion (ions lourds dans x-Si, protons 1 MeV dans a-Si:H) les porteurs dérivent jusqu'au moment où ils écrantent la charge externe ⇒ perte de charges et ralentissement de la collecte.

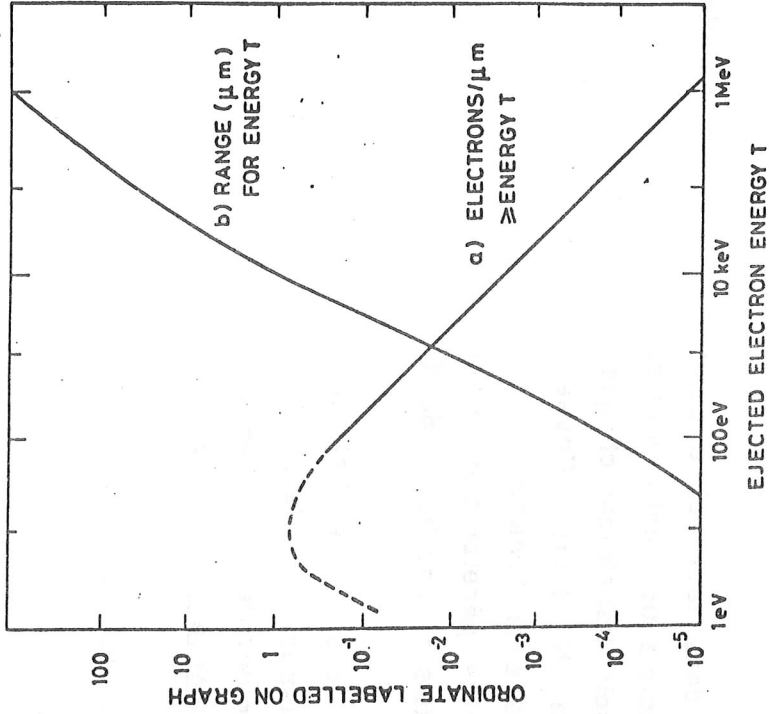
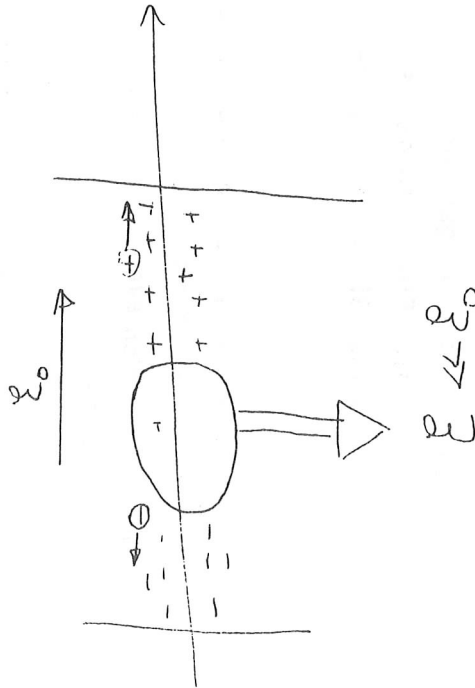


Figure 10 (a) The number of electrons ejected by a min-I particle per  $\mu\text{m}$  of path with energy  $> T$ .  
 (b) The range vs T.

## Signal et bruit

• à  $T > 100K$ , en général, pas de gain interne  $\Rightarrow$  faibles signaux (  $10^2 - 10^7$  q). Fluctuations statistiques importantes (20 KeV dans Si  $\Rightarrow$  6000 paires  $\Delta n/n = 1.3\%$ )

• à basse température,  $\lambda_{inél}$  augmente et la prob. d'ionisation par chocs aussi : critère de gain :

$$\lambda_{inél} E(z) > E_{ion} \text{ avec } \epsilon_p > E_{ion} > E_g$$

-tension de claquage baisse.

-Pas de bruit thermique du détecteur. Le bruit de l'étage d'entrée du préampli limite le rapport S/B.

$$S/B = \frac{V_s}{\sqrt{\langle V_n^2 \rangle}} = q \frac{N_s}{C} \sqrt{\frac{3 \tau g_m}{kT}}$$

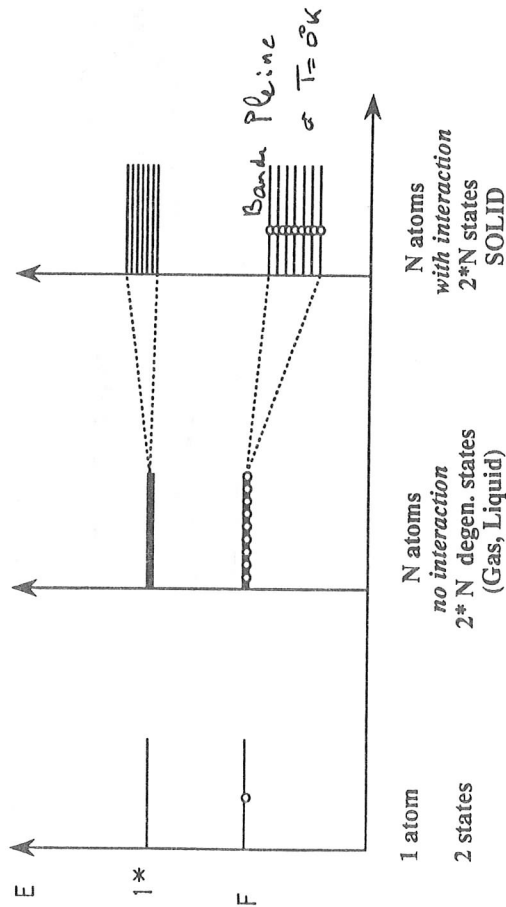
$\Rightarrow$  favorables : | basses températures  
détecteurs lents ( $\tau$ )  
faible capacité  
grand gain d'entrée

## Pourquoi des semiconducteurs? Pourquoi des cristaux?

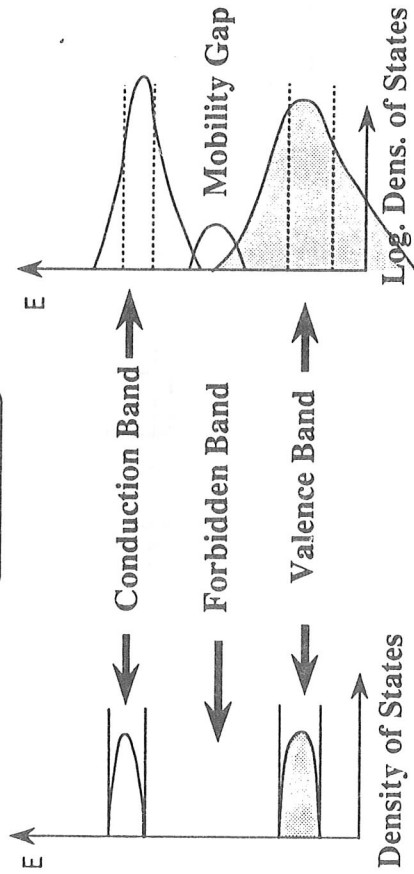
- il faut des matériaux :
  - à porteurs mobiles
  - sans porteurs libres
- dans tout solide composé de N atomes identiques, l'interaction entre voisins :
  - soit, transforme chaque état de l'atome en une bande de N états. (levée partielle ou complète de dégénérescence)
  - plus généralement transforme un sous espace de k états en une bande de N k états.
- lorsque la liaison chimique sature les liaisons disponibles, (éléments de la col. IV avec liaison covalente, composés III-V et II-VI), la bande de valence est pleine

$\Rightarrow$  pas de conduction à température nulle

### BAND FORMATION IN SOLIDS (Tight Bonding Approximation)



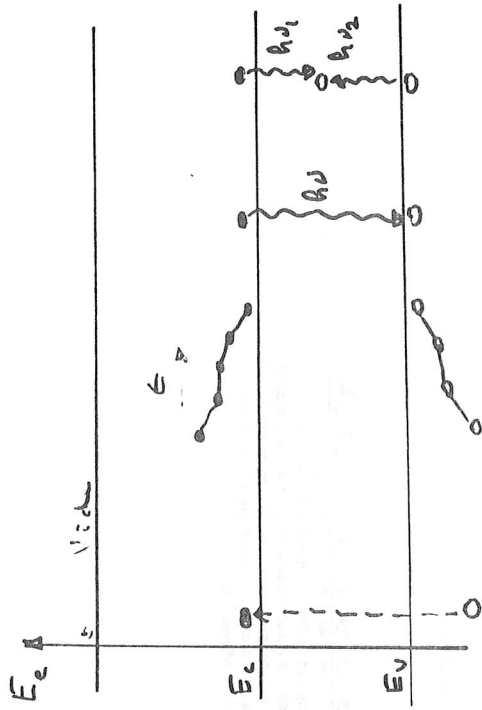
$$N \Rightarrow \infty$$



CRYSTAL (Long Range Order)      AMORPHOUS (no LRO)

### Quasi-particules: électrons et trous

- Principaux mécanismes  $T \approx 300^{\circ}K$

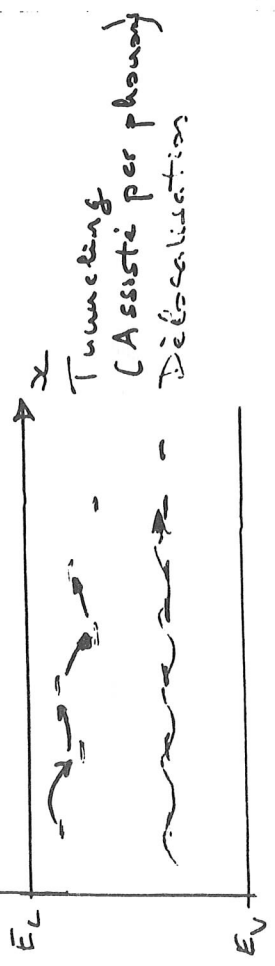
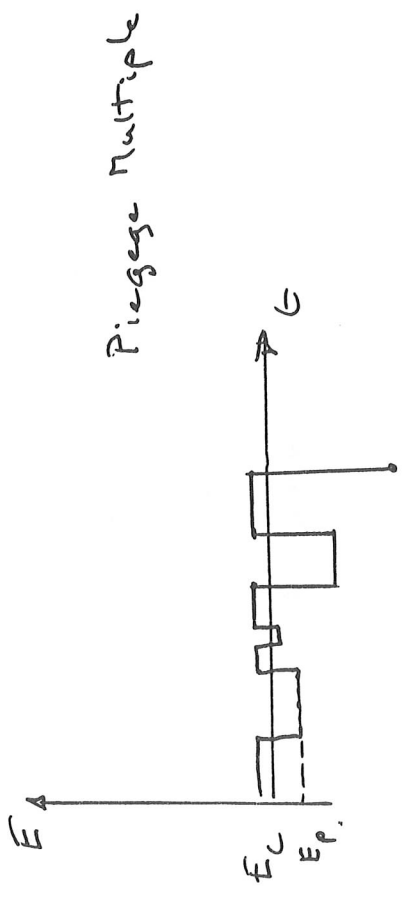


génération (particules photons) Thermalisation Recombinaison

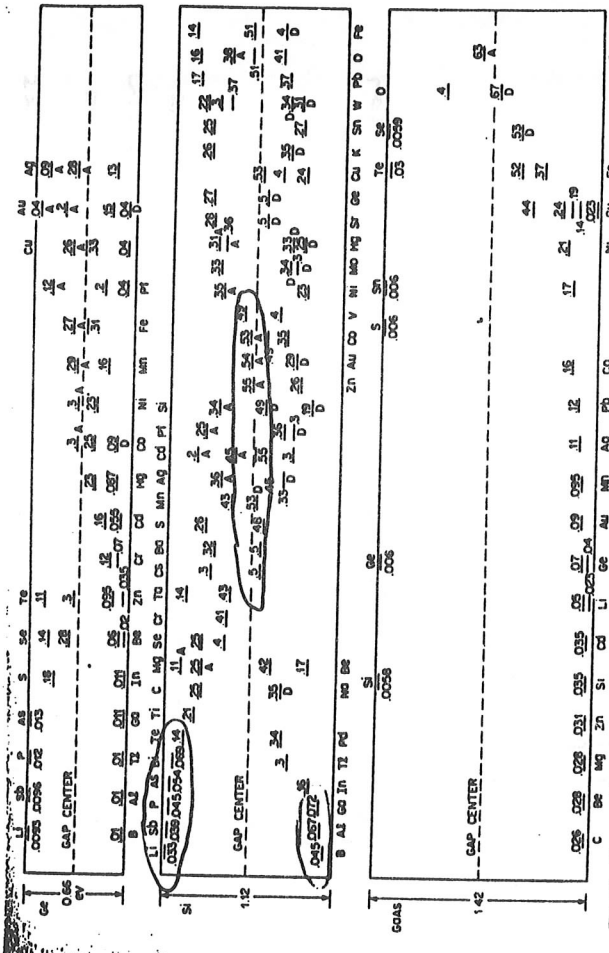
- thermalisation: diffusion sur phonons, impuretés, défauts
- rapide ( $10^{-12}s$ )  $\Rightarrow$  porteurs thermiques

- Recombinaison: radiative, rapide (g.A.S.) sur impuretés

Conduction base temperature



Donneurs  
Accepteurs  
Trous



à  $T > 0K$  :

$$n = p = N_c \exp(-E_g / 2 kT)$$

(intrinsèque)

$$n = N_D \exp(-(E_c - E_D) / kT)$$

(extrinsèque)

• à température  $\gg 100K$  la conduction est responsable d'un courant de fuite. De plus, les électrodes, réserves infinies de porteurs peuvent injecter  $\Rightarrow$  électrodes bloquantes et jonctions "désertées".

courant de fuite (conductivité) typique :  $1 nA/cm^2/300 \mu m$

- à température -  $kT \ll E_g$  plus de conductivité intrinsèque,  
-  $kT \ll q \phi$  plus de conductivité extrinsèque,

• il faut encore considérer la mobilité des paires du signal!

• dans un cristal semiconducteur parfait, les fonctions propres sont des ondes de Bloch et les porteurs se déplacent "comme" des particules libres.

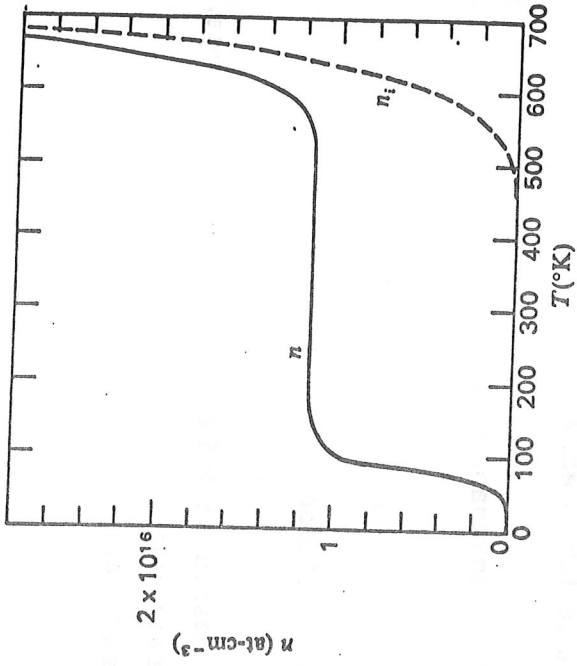


Fig. 4.8 Concentration en électrons dans du silicium de type  $n$  en fonction de la température [2].

Mais ils diffusent sur :

- les défauts (vacances, dislocations,...)
- les impuretés
- les autres excitations du solide et surtout les phonons.

Mobilité

- en régime de diffusion (non-ballistique) :  $\bar{v} = \pm \mu \bar{E}$

$$\mu = q \frac{\langle \tau(E) \rangle}{m^*}$$

- les mobilités sont très variables d'un élément à l'autre. (croissent lorsque  $m^*$  décroît, donc lorsque courbure des bandes augmente)  $\Rightarrow 1-10^6 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$

- mobilités des électrons > mob. trous (en général)

- effet de la température sur  $\langle \tau \rangle$  et sur  $\mu$  :

- phonons : dominant à haute température :

$$\mu_{ph} = \mu_0 \frac{T^{-2}}{m^{*2}}$$

$$\mu_{ch} \approx T^{\frac{3}{2}} \frac{1}{N_{ch}}$$

- impuretés chargées :

$\Rightarrow$  aux basses températures, "gel" des porteurs. Sauf très basses temp.

- impuretés neutres :  $\mu$  indépendant de T

$$\mu_n \approx \frac{m^*}{N_n}$$

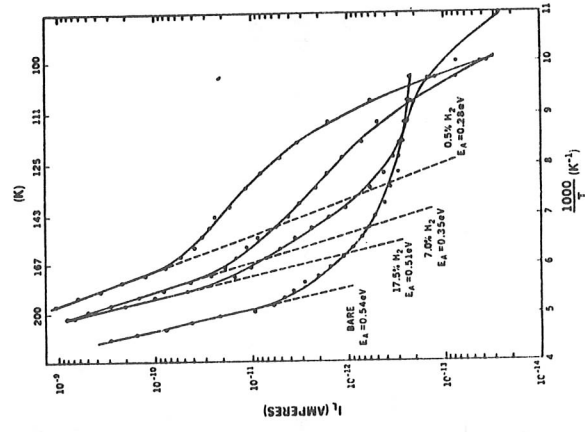


Fig. 10. Reverse leakage currents on Si(Li) detectors with and without a-Si:H coating.

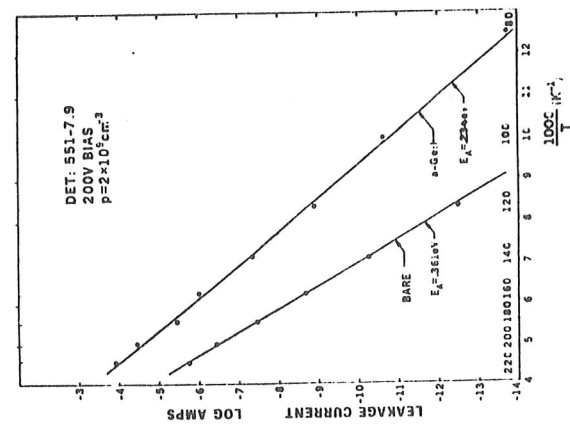


Fig. 5. Reverse leakage currents on a high-purity Ge detector with and without a-Ge:H coating.

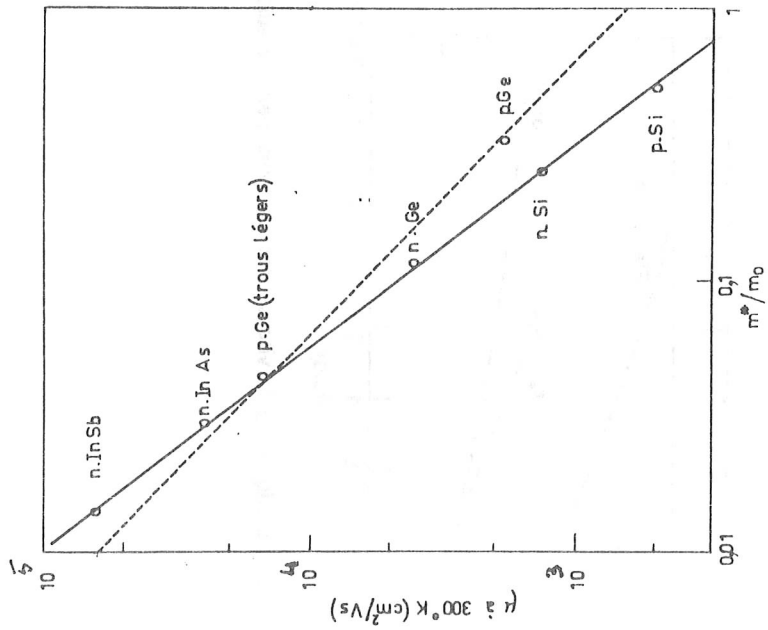
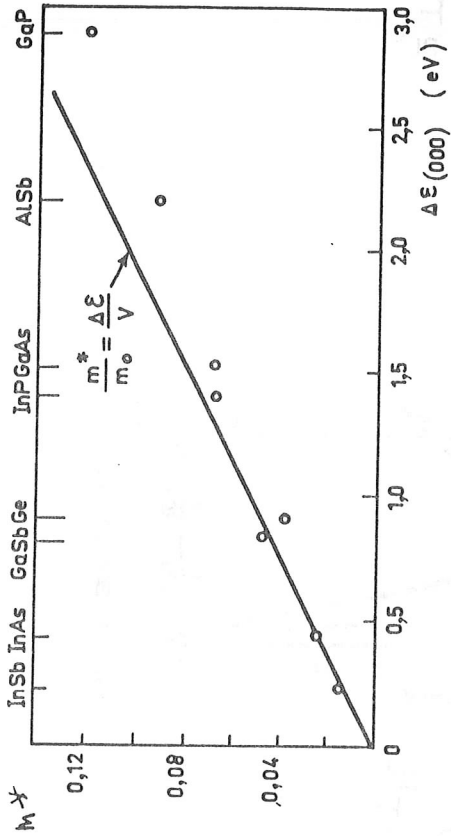
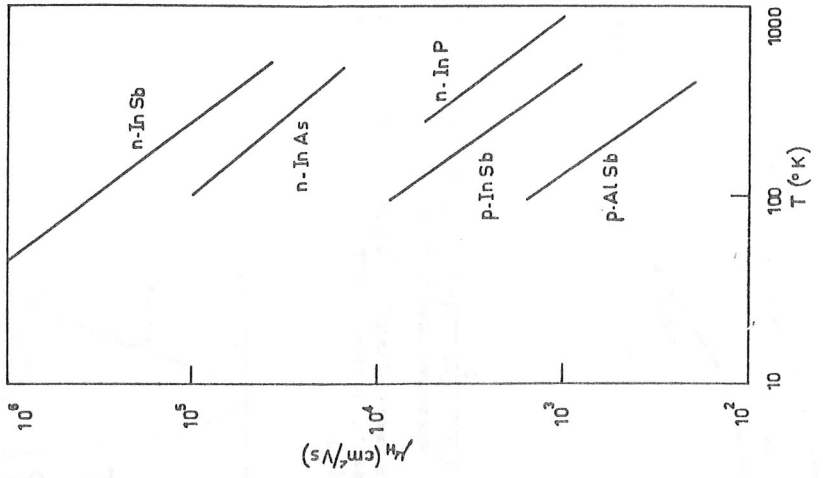
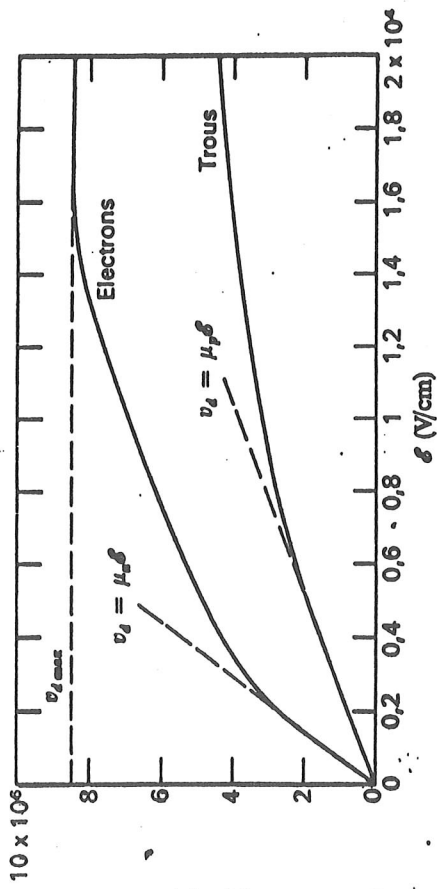


Fig. 102 - Relation entre la mobilité de réseau et la masse effective des porteurs de charge [R.W. KEYES, J. Appl. Phys., 30 (1959) 454].



# Effet des Impuretés et Phonons



4.10 Influence du champ électrique sur la vitesse des porteurs dans le silicium.

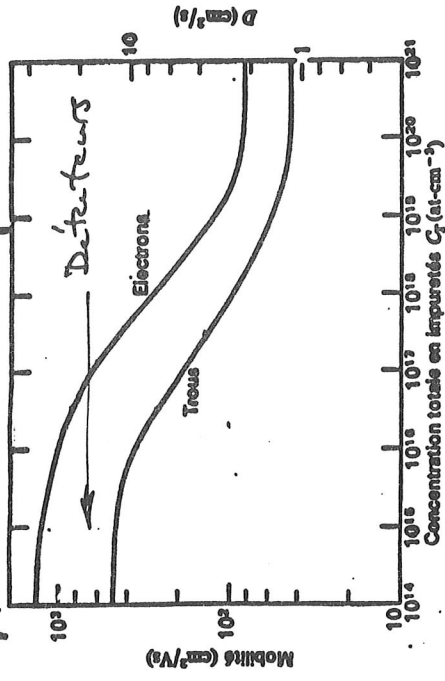


Fig. 4.11 Effet de la concentration totale en impuretés ionisées sur la mobilité du silicium à la température ambiante. Les valeurs correspondantes des constantes de diffusion sont également données [14].

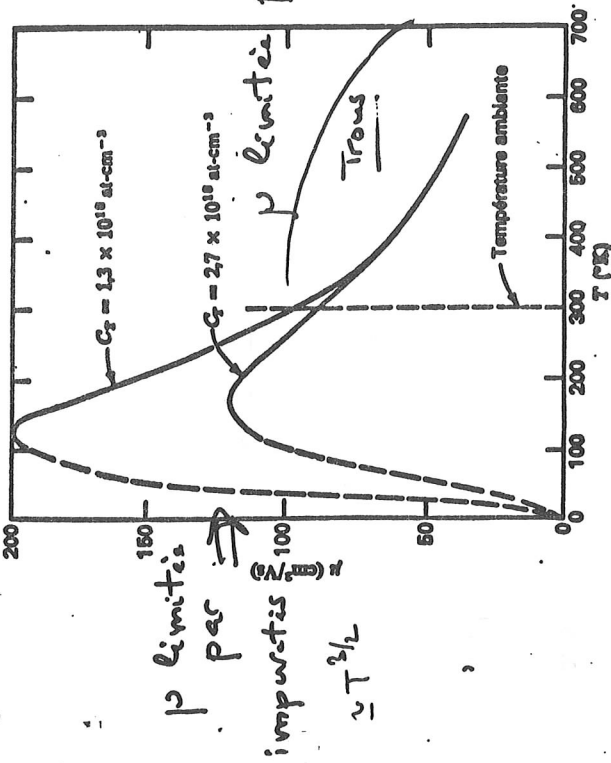


Fig. 4.12 Effet de la température sur la mobilité du silicium [5].



**CONCLUSION**

**Faisabilité et technologie**

- les matériaux hyper-purs et hyper-parfaits restent difficiles à élaborer et à contrôler.

Pureté du Si cristallin : Concentration maximum des impuretés contaminantes  $N(\text{cm}^{-3})$

Métallurg.	Solaire	Electroni.	Détecteur	Hyper-pur
1018	1016	1014	1012	1010

(par rapport à  $5 \cdot 10^{22}$  at  $\text{cm}^{-3}$ ) dans Si

- Toutes les étapes des procédés partant de lingots sont contaminantes. (sciage, polissage, etc...)
- les procédés par épitaxie donnent de très hautes qualités mais restent limités aux petites surfaces
- les procédés de dépôt de couches non épitaxiées permettent de réaliser de grandes surfaces mais avec des matériaux amorphes ou polycristallins...
- la mise au point d'une technologie prend des années, il vaut mieux partir de technologies maîtrisées... ou de celles qui suscitent un grand effort de développement (détection X, détection IR, ...)

