



# Photodétection quantique

Emmanuel Rosencher MNO 1 1/02/2006

## A: Photoexcitation

Principe

Distribution des porteurs

Rendement quantique

## B: Détecteurs Photoconductifs

Gain photoconductif

Bande passante

Exemple

## C: Détecteurs Photovoltaïques

Rendement photovoltaïque

Bande passante

Exemple

Notion de détecteurs CCD

## D: Détecteurs à Puits Quantiques

Principes de fonctionnement

Rendement

Technologie

## E: Détecteurs à avalanche

Origine de l'avalanche

Facteur de multiplication

## F: Bruit de détection\*

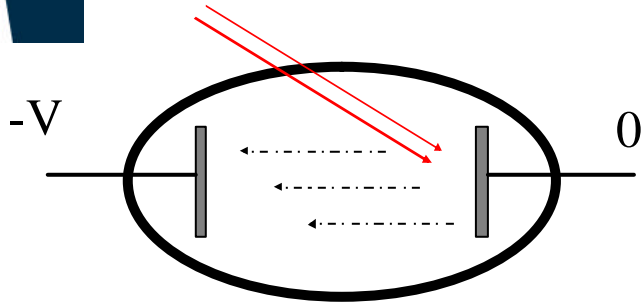
Bruit de génération-  
recombinaison

## G: Notion de détectivité\*

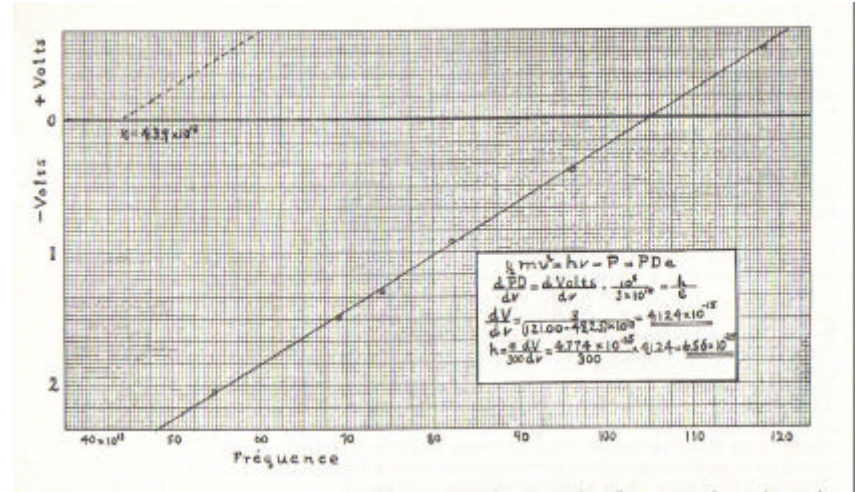
\*hors programme



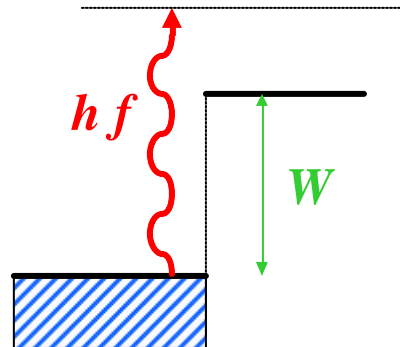
## Expérience de Millikan



$V$  = énergie cinétique des électrons émis



Albert Einstein:



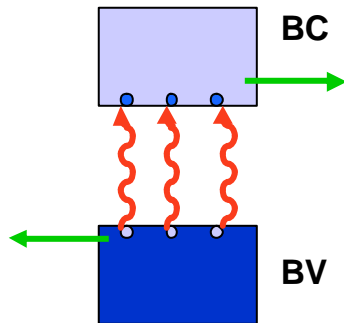
Albert Einstein:

$$X = h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

ONERA

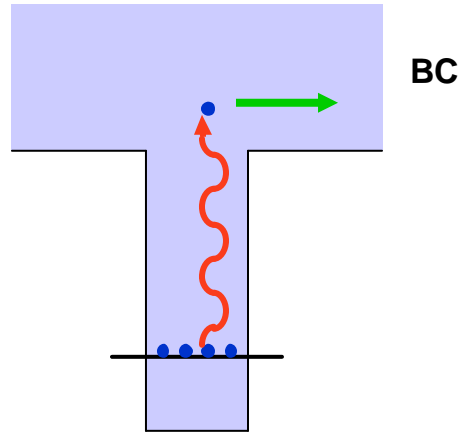


# PHOTOEXCITATIONS QUANTIQUES



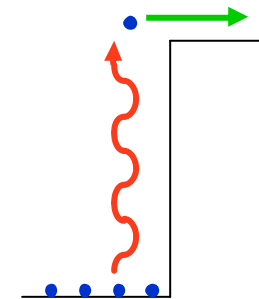
transition interbande

Si  
GaAs  
InP  
HgCdTe  
InAsSb  
GaAs/AlGaAs



transition inter-sousbande

$0.4 \mu\text{m} \rightarrow 1.1 \mu\text{m}$   
 $0.4 \mu\text{m} \rightarrow 0.85 \mu\text{m}$   
 $0.4 \mu\text{m} \rightarrow 1.55 \mu\text{m}$   
 $1.5 \mu\text{m} \rightarrow 10 \mu\text{m}$   
 $3 \mu\text{m} \rightarrow 5.5 \mu\text{m}$   
 $4 \mu\text{m} \rightarrow 20 \mu\text{m}$



photoémission interne

CCD, cellules solaires  
Zapettes, liaison IR, ...  
Télécom  
Infrarouge thermique  
Infrarouge thermique  
Infrarouge thermique

ONERA



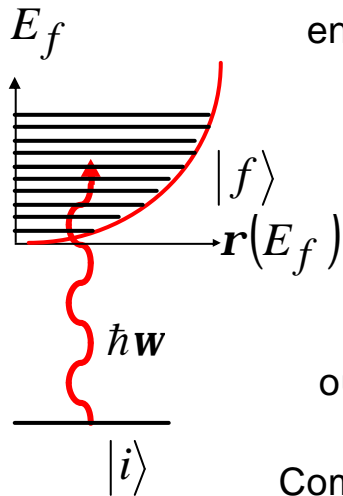
## Rappel de Mécanique Quantique

### Règle d'Or de Fermi

Le taux de transition par seconde induit par un champ électromagnétique  $F$

$$\hat{W} = -q F \hat{z}$$

entre deux niveaux quantiques  $|i\rangle \rightarrow |f\rangle$  est donné par:



$$G_{op} = \frac{\rho}{2\hbar} |\langle f | q F \hat{z} | i \rangle|^2 r(E_f = E_i + \hbar\omega)$$

où  $r(E_f)$  est la densité d'états finals  $|f\rangle$

Comme le flux de photons est donné par:  $P_{op} = \hbar\omega\Phi = \frac{Z_0}{2} F^2$



$$G_{op} = a \Phi$$

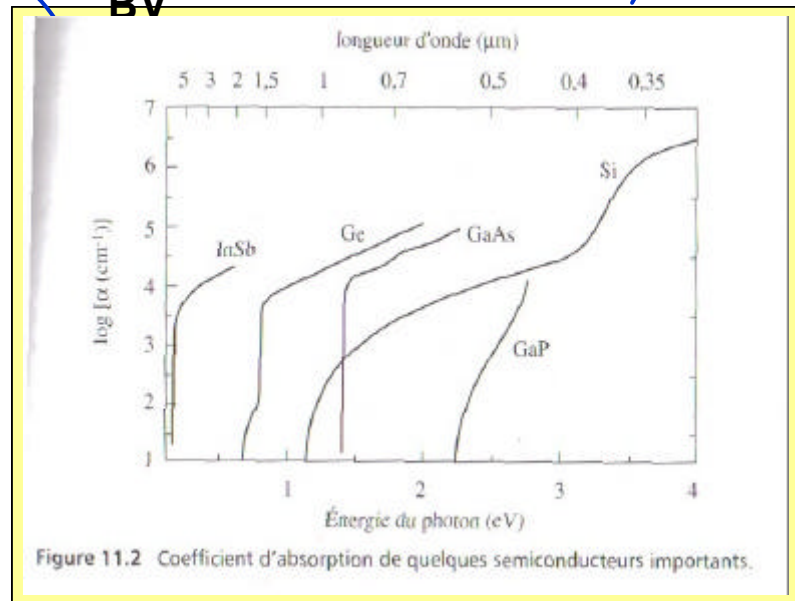
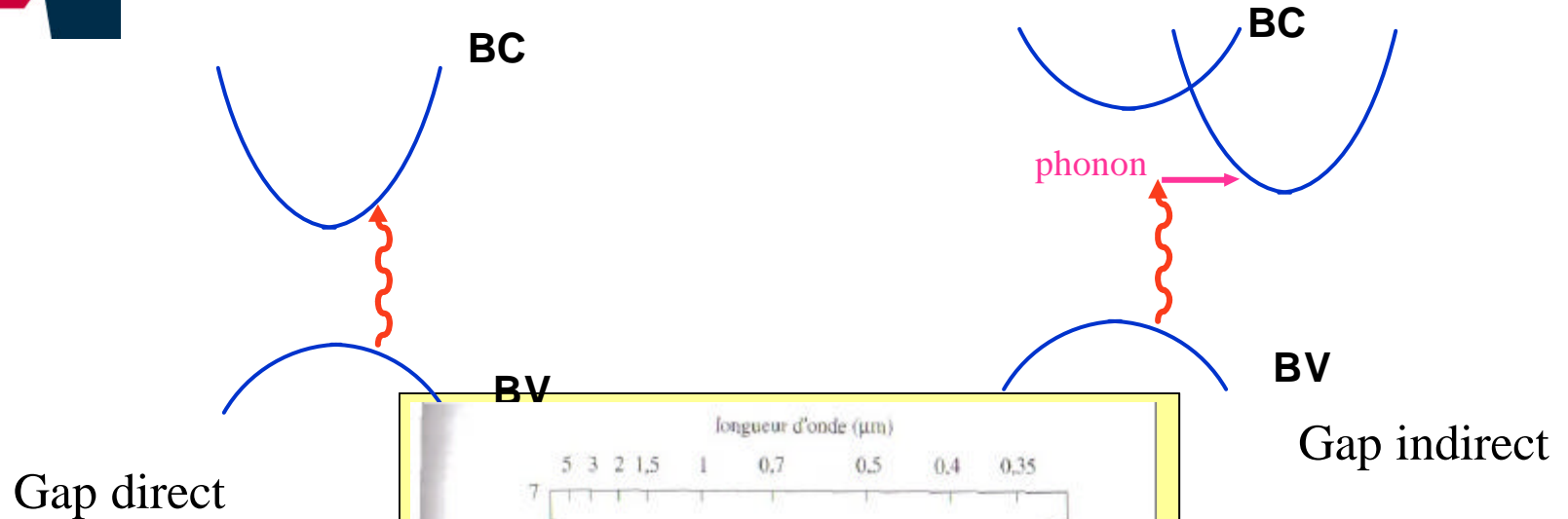
$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1} \quad \text{cm}^{-1} \quad \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$



ONERA

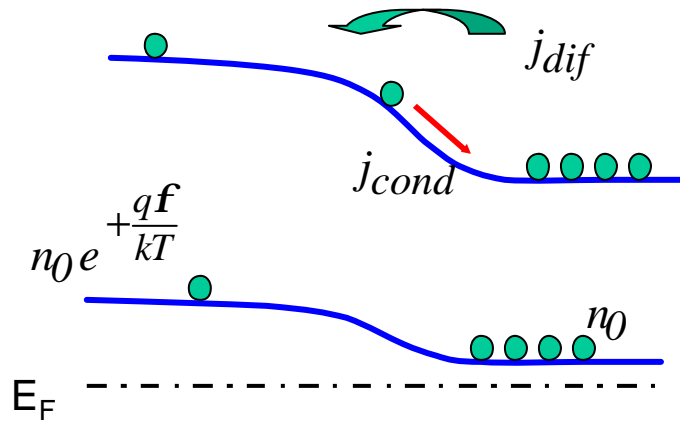
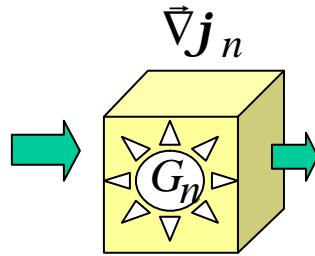


# PHOTOEXCITATIONS DANS LES SEMICONDUCTEURS





Équations  
de continuité



Poisson

Potentiel

$$\frac{\partial}{\partial t} n - \frac{1}{e} \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_n = G_n - R_n$$

$$\frac{\partial}{\partial t} p + \frac{1}{e} \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_p = G_p - R_p$$

$$\vec{j}_n = e \mathbf{m}_n n \vec{F} + e D_n \vec{\nabla} n$$

$$\vec{j}_p = e \mathbf{m}_p p \vec{F} - e D_p \vec{\nabla} p$$

$$n(\vec{r}) = n_0 e^{+\frac{q\mathbf{f}(\vec{r})}{kT}}$$

$$p(\vec{r}) = p_0 e^{-\frac{q\mathbf{f}(\vec{r})}{kT}}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{F} = \frac{e \mathbf{r}(\vec{r})}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

$$\vec{\nabla} \mathbf{f} = -\vec{F}$$

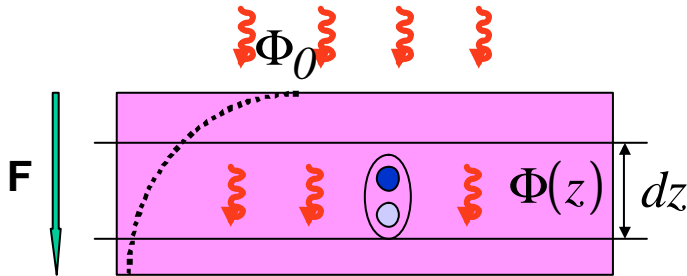
ONERA



## EQUATIONS DE BASE

Loi de Beer - Lambert  $\Phi(z) = \Phi_0 e^{-a z}$

1 photon absorbe  $\rightarrow$  1 paire électron-trou



Distribution de génération optique par unité de volume

$$G_{op}(z) = -\frac{d}{dz} \Phi(z) = a \Phi_0 e^{-a z} \quad cm^{-3} s^{-1} \quad (1)$$

Distributions  $\Delta n$  et  $\Delta p$  données à l'état stationnaire par les équations de continuité:

$$\frac{d}{dz} \Phi_p = \frac{d}{dz} \left[ \frac{1}{q} J_p \right] = G_{op}(z) - \frac{\Delta p}{t_p} \quad \frac{d}{dz} \Phi_n = \frac{d}{dz} \left[ -\frac{1}{q} J_n \right] = G_{op}(z) - \frac{\Delta n}{t_n} \quad (2)$$

où les courants  $J_n$  et  $J_p$  sont dus à la diffusion et le drift

$$\frac{1}{q} J_n = D_n \frac{d}{dz} n + n m_n F \quad \frac{1}{q} J_p = -D_p \frac{d}{dz} p + p m_p F \quad (3)$$

ONERA



# DISTRIBUTION SPATIALE DES PORTEURS PHOTOEXCITES

Exemple: pour un semiconducteur dopé ( $p=p_0 \gg n_0$ ) et sans champs électrique appliqué

$$\underbrace{\frac{\Delta n}{t_n}}_{\text{recombinaison}} - \underbrace{D_n \frac{d^2}{dz^2}}_{\text{diffusion}} \Delta n = \underbrace{a \Phi_0 e^{-az}}_{\text{source}}$$



$$\Delta n(z) = A e^{-z/L_D} + B e^{+z/L_D} + \frac{a t \Phi_0}{1 - (a L_D)^2} e^{-a z} \quad \text{si } z \gg \text{ } \quad \text{¥}$$

**Longueur de diffusion**

$$L_D = \sqrt{D_n t_n}$$

**Difficulté: les différentes longueurs en jeu (diffusion  $L_D$ , absorption  $a^{-1}$ , zone de charge d'espace  $d$ , longueur de recombinaison) sont proches !**

$t_n$  durée de vie des porteurs n minoritaire dans la partie p

ONERA





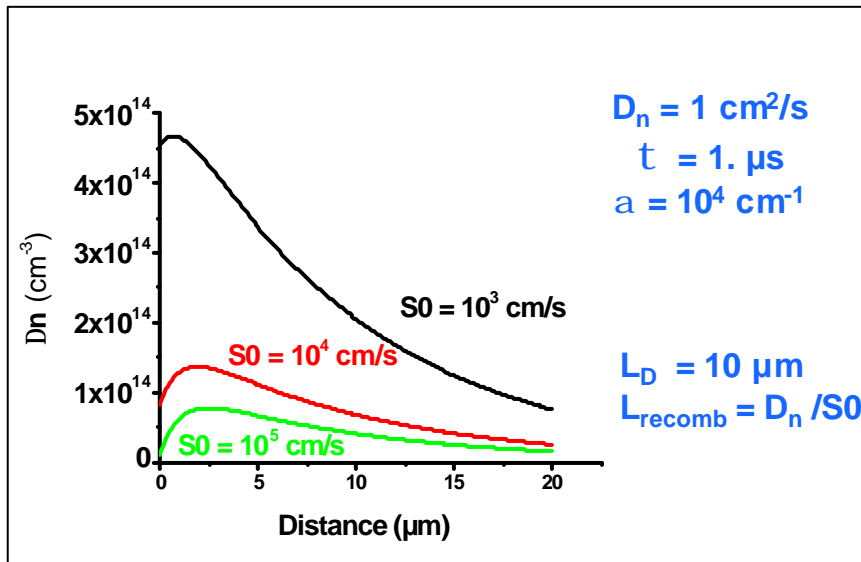
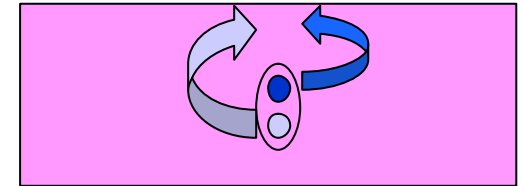
# INFLUENCE DES RECOMBINAISONS DE SURFACE

*J. Bardeen Prix Nobel 1949*

Recombinaison de surface:  $S_0$  en cm/s

$$J_n(0) = qS_0 \Delta n|_{z=0}$$

$$\Delta n(z) = \frac{at}{(aL_D)^2 - 1} \Phi_0 \left( \frac{S_0/D_n + a}{S_0/D_n + 1/L_D} e^{-z/L_D} - e^{-az} \right)$$



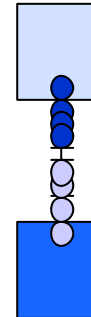
**Défi technologique:**  
Minimiser la densité de  
centre recombinant de  
surface



Si/SiO<sub>2</sub>

InP/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

HgCdTe/ secret





## RENDEMENT QUANTIQUE: UN EXEMPLE

- gap direct ® durée de vie très faible ®  $L_D \ll a^{-1}$ :

$$\frac{\Delta n}{\tau_n} - D_n \frac{d^2}{dz^2} \Delta n = a \Phi_0 e^{-az} \quad \rightarrow$$

$$\frac{\Delta n}{\tau_n} \approx a \Phi_0 e^{-az} \quad \rightarrow \quad \Delta n_{tot} = \int_0^d \Delta n(z) dz = \tau_n \Phi_0 (1 - e^{-ad})$$

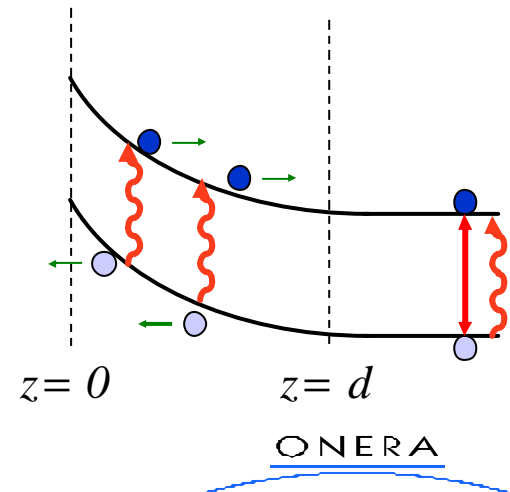
**RENDEMENT QUANTIQUE:**

$$h = \frac{\text{flux d'électrons photocréés}}{\text{flux de photons incidents}} = \frac{J_{ph}/q}{\Phi_0}$$

$$J_{ph} = q \frac{\Delta n_{tot}}{\tau_n}$$

$$h = 1 - e^{-ad}$$

si  $ad \ll 1$



ONERA



# Photodéttection quantique

## A: Photoexcitation

Principe

Distribution des porteurs

## B: Détecteurs Photoconductifs

Gain photoconductif

Bande passante

Exemple

## C: Détecteurs Photovoltaïques

Rendement photovoltaïque

Bande passante

Exemple

Notion de détecteurs CCD

## D: Détecteurs à Puits Quantiques

Principes de fonctionnement

Rendement

Technologie

## E: Détecteurs à avalanche

Origine de l'avalanche

Facteur de multiplication

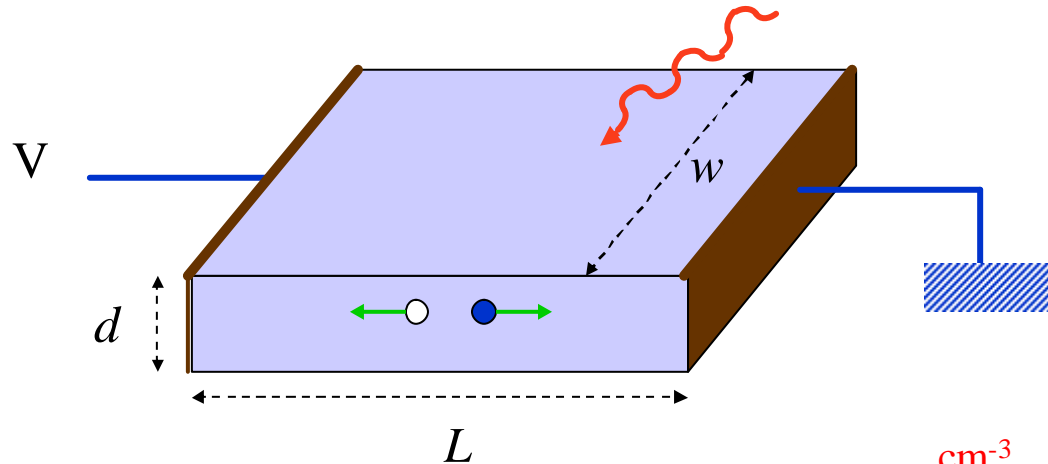
## F: Bruit de détection

Bruit de génération-  
recombinaison

## G: Notion de détectivité



## PHOTOCONDUCTEUR



Si l'épaisseur  $d$  est petite devant la longueur de diffusion  $L_D$



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{cm}^{-3} \\ \Delta n(z) = \Delta n = \frac{\Delta n_{tot}}{d} \\ \text{cm}^{-2} \\ \Delta n_{tot} = h t \Phi_0 \end{array} \right.$$

Densité de courant entre les contacts dans la structure ( $\text{A/cm}^2$ ) si

$$m_n \gg m_p$$

$$j_{ph} = \Delta n q v = \frac{h t \Phi_0}{d} q m_n \frac{V}{L}$$



## GAIN DE PHOTOCONDUCTION

Courant total circulant entre les contacts dans la structure (A):  $I_{ph} = \boxed{w d} j_{ph}$  

$$I_{ph} = h q t m_n \frac{w}{L} \Phi_0 V$$



Puissance lumineuse incidente sur la structure:  $P_{inc} = h n \Phi_0 \boxed{w L}$  

Réponse d'un photoconducteur (A/W)

$$\mathfrak{R} = \frac{I_{ph}}{P_{inc}} = h \frac{m_n t}{L^2} \frac{V}{h n / q} = h g \left( \frac{q}{h n} \right)$$

1 photon → 1 électron

Gain de photoconduction:  $g = \frac{t}{t_{tr}}$  avec le temps de transit des porteurs donné par:

$$t_{tr} = \frac{L^2}{m_n V} = \frac{L}{m_n F}$$

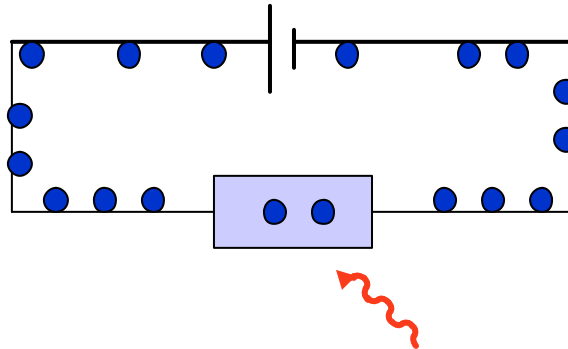


# GAIN DE PHOTOCONDUCTION

## Interprétation physique

Exemple instructif d'une interprétation physique non triviale  
d'un résultat de calcul issue d'une théorie triviale

1 photon au mieux  $\rightarrow$  1 électron  $\rightarrow$  si pas d'avalanche  $\frac{q}{hn}$  au mieux



Chaque électron créé fait  $g$  fois le tour du circuit (grâce à la source de tension) avant de se recombiner et disparaître. Le nombre  $g$  est le rapport entre la durée de vie et le temps de transit dans le photoconducteur



## GAIN DE PHOTOCONDUCTION

### Facteur de performance des matériaux

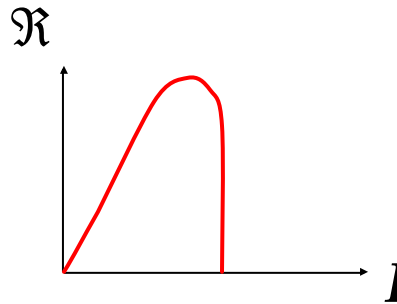
$$\mathfrak{R} = \frac{I_{ph}}{P_{inc}} = h \frac{\boxed{m_n t}}{L^2} \frac{V}{h\nu / q} \longrightarrow \text{Le produit } \mathbf{m}t \text{ n'est fonction que du matériau}$$

	$t$ (s)	$m_n$ (cm <sup>2</sup> /V.s)	$E_g$ (eV)	$m_n t$
Si	10 <sup>-4</sup>	1350	1.12	0.13
Ge	10 <sup>-2</sup>	3900	0.67	39
GaAs	10 <sup>-6</sup>	8500	1.42	8.5 10 <sup>-3</sup>
InAs	10 <sup>-7</sup>	33000	0.36	3.3 10 <sup>-3</sup>
InSb	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>5</sup>	0.18	10 <sup>-2</sup>



## REPONSE D'UN PHOTOCONDUCTEUR

$$\mathfrak{R} = \frac{I_{ph}}{P_{inc}} = h_{ext} g \frac{l(\mu m)}{1.24}$$



avec le rendement quantique externe  $\eta_{ext}$  donné par:

$$h_{ext} = (1 - R)h$$

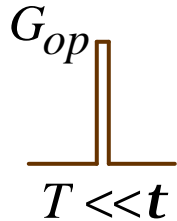
où  $R$  est la réflectivité de la surface du détecteur



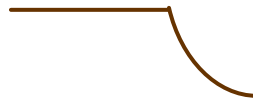


## TEMPS DE REPONSE D'UN PHOTOCONDUCTEUR

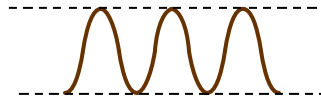
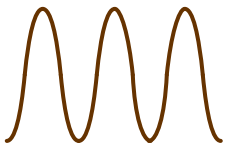
Éclairement et matériau homogène  $\longrightarrow \frac{d}{dt} \Delta n_{tot} + \frac{\Delta n_{tot}}{\tau} = h G_{op}(t)$



$$h T G_{op} e^{-t/\tau}$$



$$h t G_{op} e^{-t/\tau}$$



$$h t G_{op} \frac{1}{\sqrt{1+(wt)^2}}$$

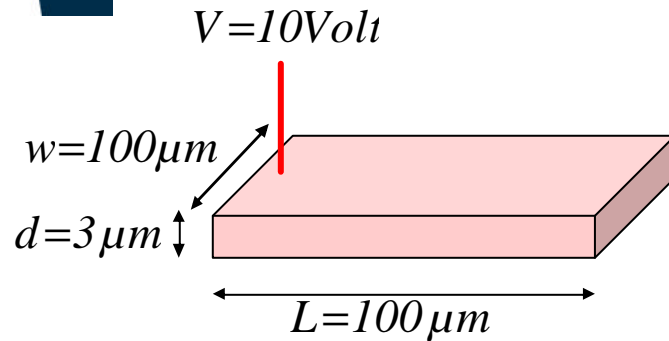
Bande passante:

$$1/2\pi \tau$$

Le produit *gain*  $\times$  *bande passante* est une constante



## EXEMPLE: photoconducteur GaAs



$$h = 0.6$$

$$m_n = 8500 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$$

$$t_n = 10 \text{ ns}$$

Temps de transit: 
$$t_{tr} = \frac{L^2}{m_n V} = \frac{(10^{-2} \text{ cm})^2}{8500 \text{ cm}^2 / \text{V.s} \cdot 10 \text{ V}} = 1.17 \text{ ns}$$

Gain photoconductif: 
$$g = \frac{t_n}{t_{tr}} = \frac{10}{1} \approx 10$$

Réponse: 
$$\mathfrak{R} = h g \frac{1}{h n / q} = 0.6 \times 10 \times \frac{1}{1.4} = 4.2 \text{ A/W}$$



# Photodéttection quantique

## A: Photoexcitation

Principe

Distribution des porteurs

## B: Détecteurs Photoconductifs

Gain photoconductif

Bande passante

Exemple

## C: Détecteurs Photovoltaïques

Rendement photovoltaïque

Bande passante

Exemple

Notion de détecteurs CCD

## D: Détecteurs à Puits Quantiques

Principes de fonctionnement

Rendement

Technologie

## E: Détecteurs à avalanche

Origine de l'avalanche

Facteur de multiplication

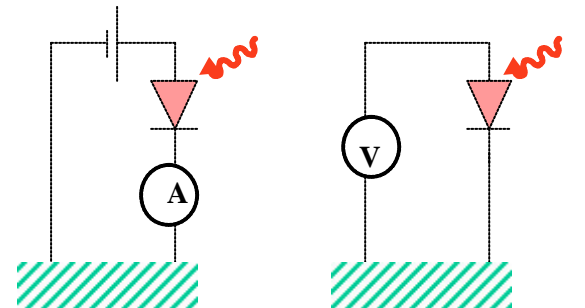
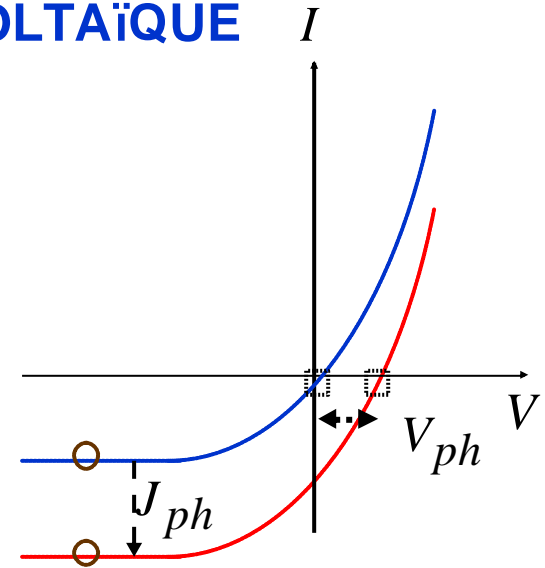
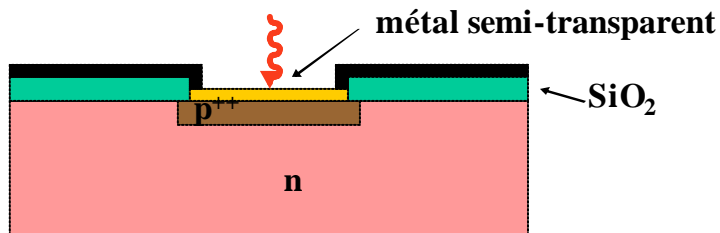
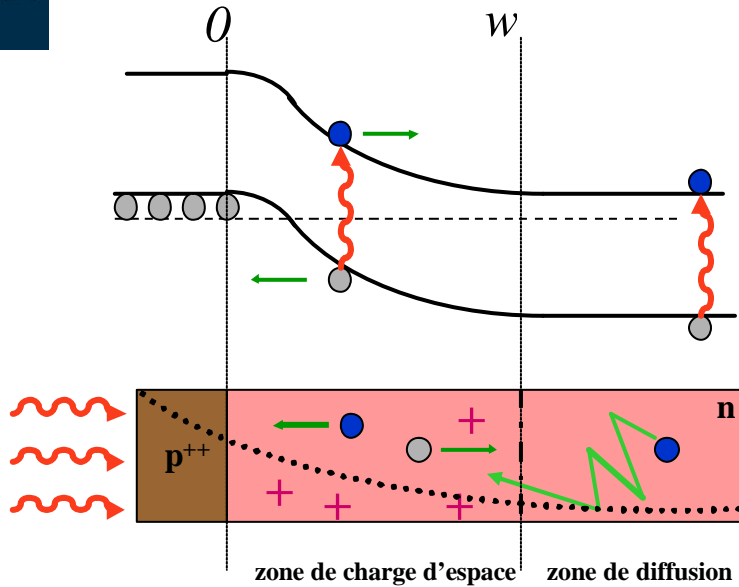
## F: Bruit de détection

Bruit de génération-  
recombinaison

## G: Notion de détectivité



# DETECTEUR PHOTOVOLTAÏQUE



ONERA



## DETECTION EN REGIME PHOTOVOLTAÏQUE

Le courant d'obscurité et le photocourant s'ajoutent:  $J = J_{sat} \left( e^{qV/kT} - 1 \right) - J_{ph}$

Contribution de la zone de charge d'espace au photocourant ( $z$  compris entre 0 et  $w$ ):  
On néglige la diffusion dans la zone de charge d'espace

$$-\frac{1}{q} \frac{d}{dz} J_G = G_{op}(z) = a \Phi_0 e^{-az} \quad \Rightarrow \quad J_G = -q \Phi_0 (1 - e^{-aw})$$

Contribution de la zone de diffusion ( $z > w$ ):

$$-D_n \frac{d^2}{dz^2} \Delta n + \frac{\Delta n}{\tau} = a \Phi_0 e^{-az} \quad \Rightarrow \quad \Delta n = A e^{-z/L_D} + B e^{z/L_D} + \frac{a \tau \Phi_0}{1 - (aL_D)^2} e^{-az}$$

Tout porteur capté par la ZCE est balayé:  $\Delta n(w) \approx 0$

$$\Rightarrow \Delta n = \frac{a \tau \Phi_0 e^{-aw}}{1 - (aL_D)^2} \left( e^{-a(z-w)} - e^{-(z-w)/L_D} \right)$$



## DETECTION EN REGIME PHOTOVOLTAÏQUE

Le courant de diffusion en  $w$  donné par:  $J_{diff} = q D_n \frac{d}{dz} \Delta n \Big|_{z=w}$

$$\longrightarrow J_{diff} = -q \frac{a L_D}{1 + a L_D} \Phi_0 e^{-a w}$$

Courant total:  $J_{ph} = J_G + J_{diff}$



$$J_{ph} = -q \Phi_0 \left( 1 - \frac{e^{-a w}}{1 + a L_D} \right)$$

D'où la réponse d'un détecteur photovoltaïque:

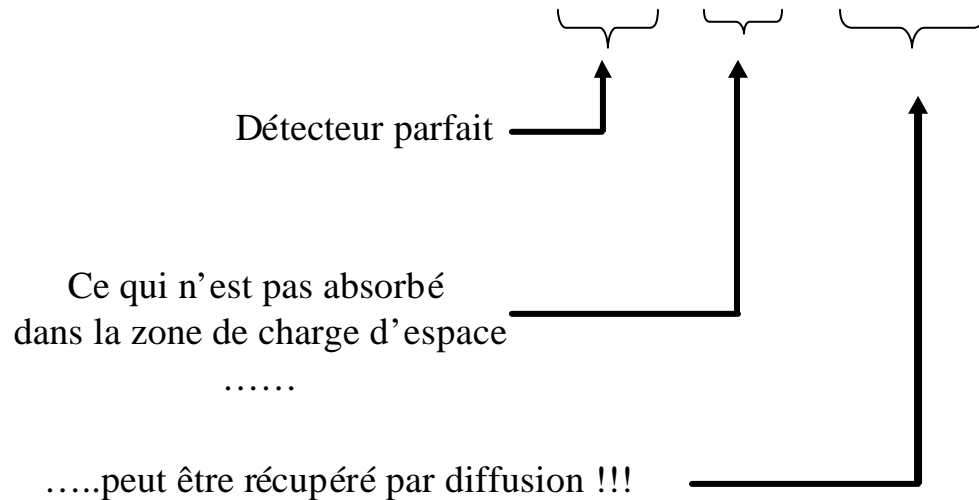
Rappel de la définition

$$\mathfrak{R} = \frac{J_{ph}}{P_{inc}} = h \frac{1}{h\nu/q} = h \frac{1(\mu m)}{1.24} (A/W)$$



## RENDEMENT QUANTIQUE D'UN DETECTEUR PHOTOVOLTAÏQUE

$$h = 1 - e^{-a w} \frac{1}{1 + a L_D}$$



**Pas de gain photoconductif !!!**



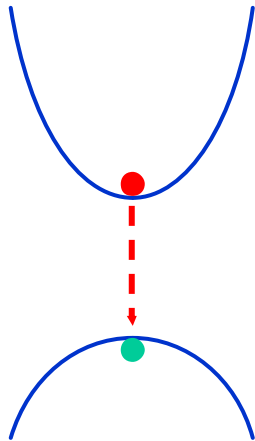
# DUREE DE VIE DES PORTEURS MINORITAIRES ET COURANT DE FUITE

Courant de saturation

$$I_{sat} = \frac{q D_n n_{p0}}{L_{Dn}}$$

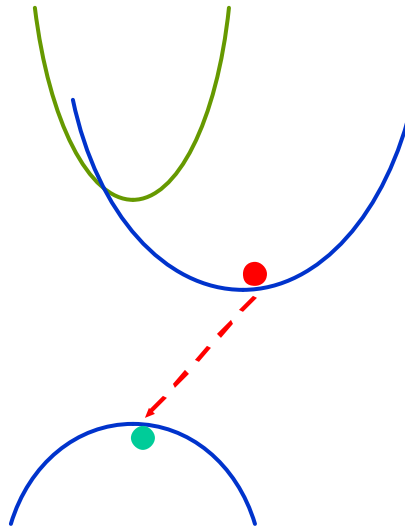


Courant de fuite:  $I_{sat} \propto \frac{1}{\sqrt{t_n}}$



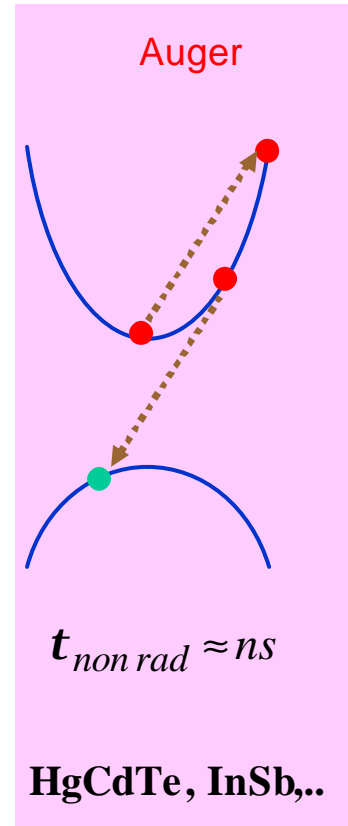
$t_{rad} \approx ns$

GaAs, InP



$t_{rad} \approx ms$

Si, Ge



$t_{non rad} \approx ns$

HgCdTe, InSb,..

$t_{non rad} \approx ns \rightarrow ms$

Dépend de la pureté  
du matériau

ONERA



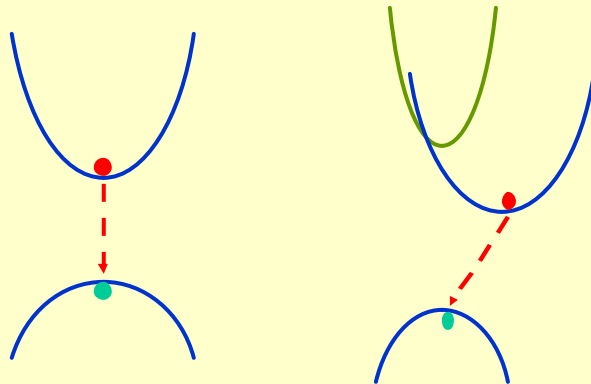


# DUREE DE VIE DES PORTEURS MINORITAIRES ET COURANT DE FUITE

Le courant de saturation est une source de bruit (voir détectivité).

$$I_{sat} = \frac{q D_n n_{p0}}{L_{Dn}} \quad \Rightarrow \quad I_{sat} \propto \frac{1}{\sqrt{t_n}} \quad \Rightarrow \quad \text{Maximiser } t_n$$

## Recombinaison radiative



$$t_{rad} \approx ns$$

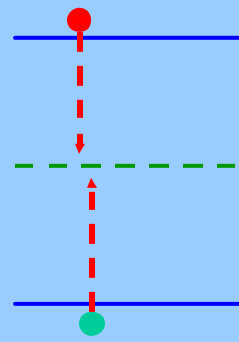
GaAs, InP

$$t_{rad} \approx ms$$

Si, Ge

$$t_n \approx \frac{1}{N_A}$$

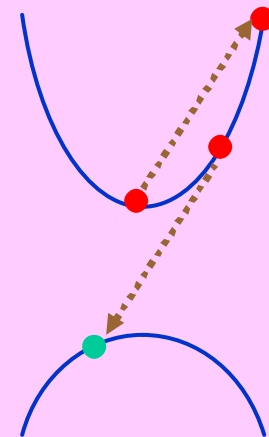
## Impuretés



$$t_{nonrad} \approx ns \rightarrow ms$$

$$t_n \propto N_{def} e^{-E_g/2kT}$$

## Auger



$$t_{Aug} \approx n_i^2 \propto e^{-E_g/kT}$$

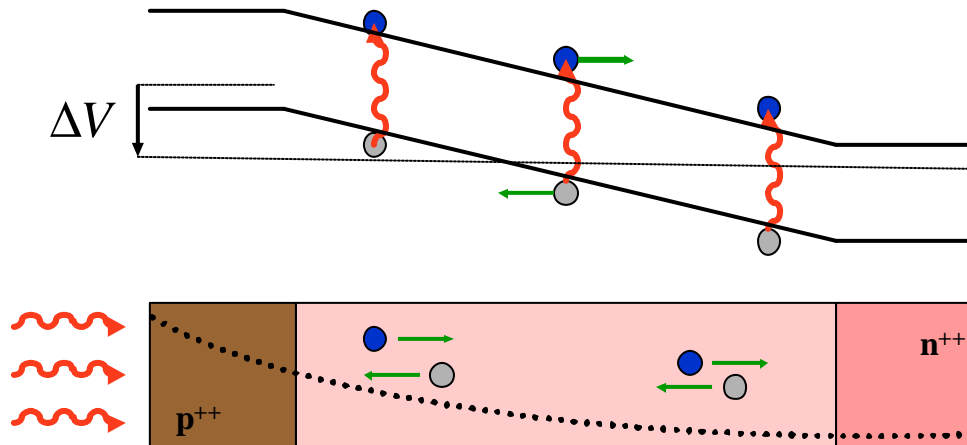
HgCdTe, InSb, ...



## DETECTEUR pin

Temps de réponse d'un détecteur photovoltaïque:  $C = A \frac{e_0 e_R}{w} = A \sqrt{\frac{q e_0 e_R N_D}{2 \Delta V}}$

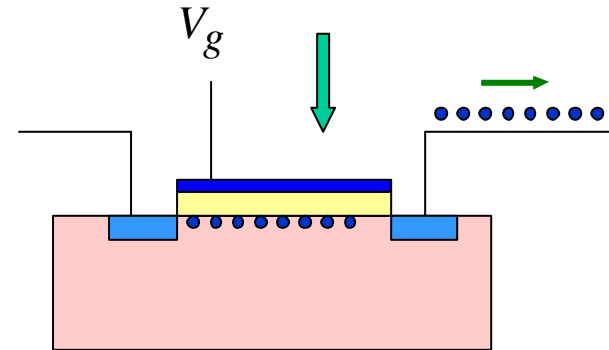
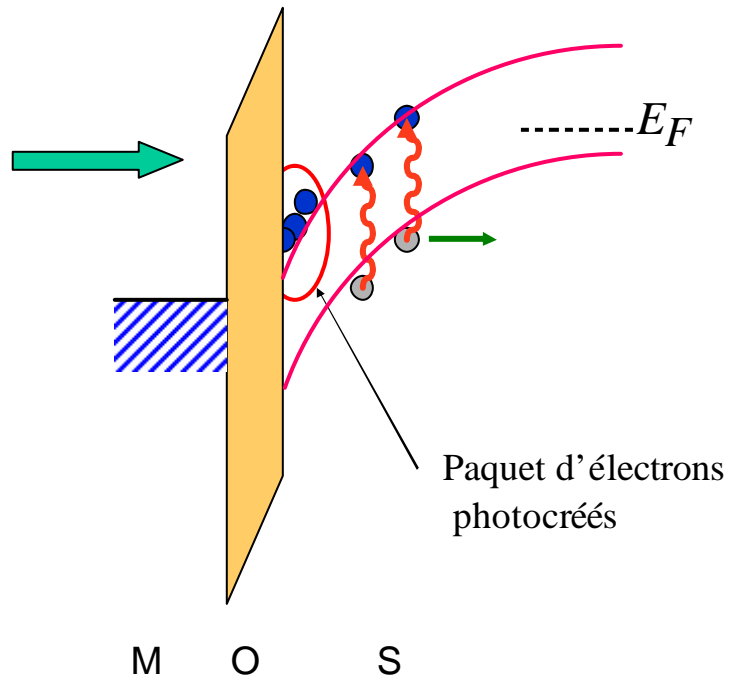
Pour augmenter la bande passante, augmenter la zone de charge d'espace  $w$



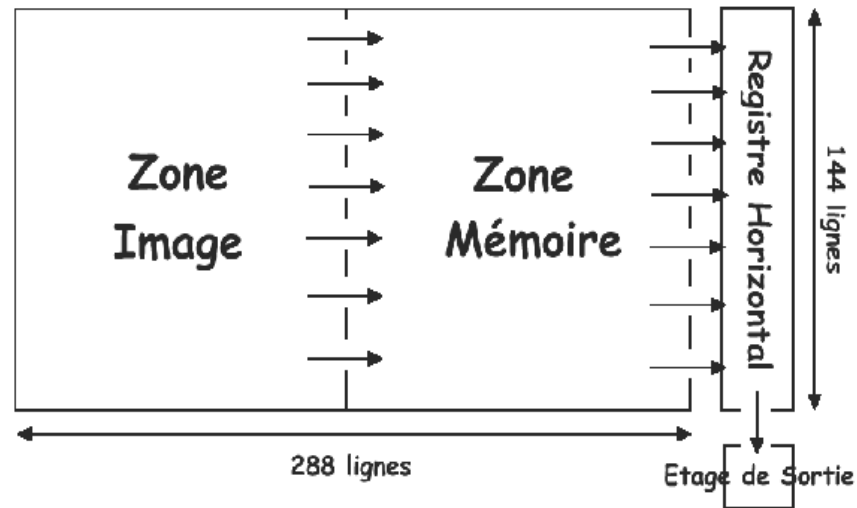
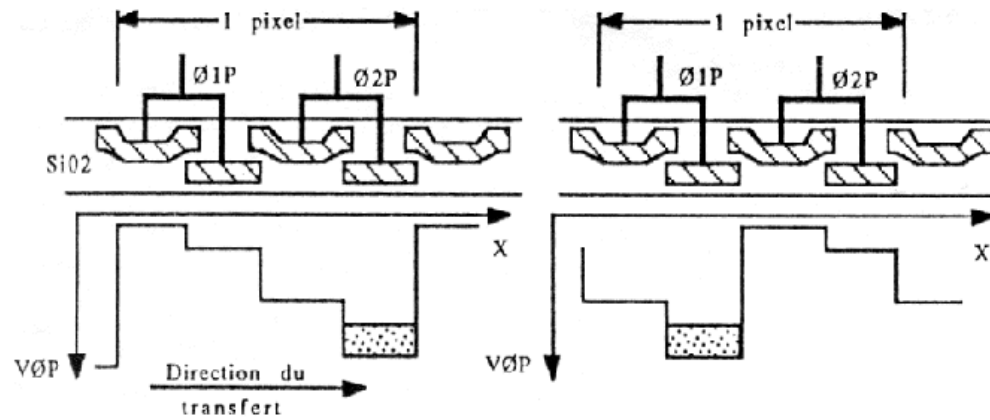


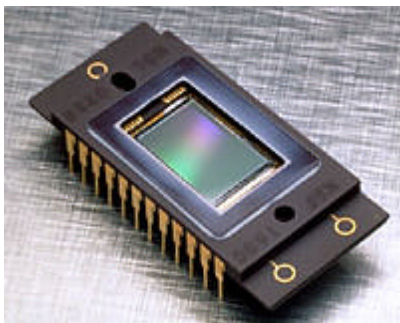
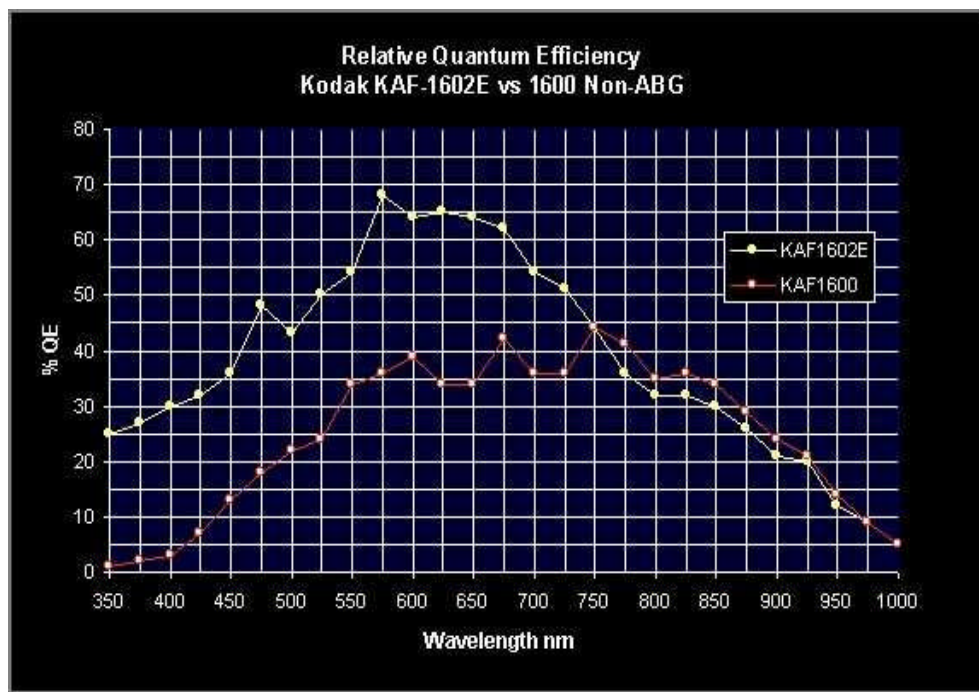
## Exemple 1: MATRICE CCD

Déplétion profonde



En fait, mouvement de péristaltisme...





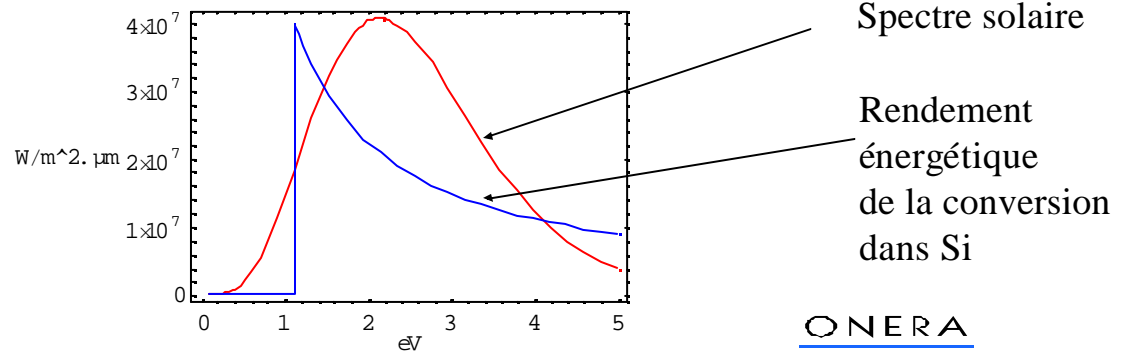
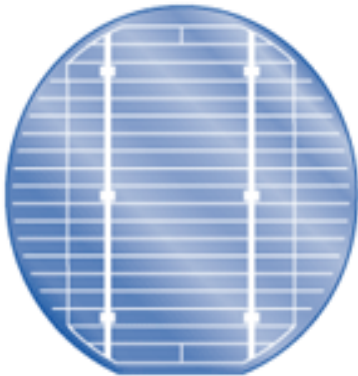


## Exemple 2: Cellule solaire en silicium

Ensoleillement maximal :  $1000 \text{ W/m}^2$   
Rendement quantique :  $\eta_{\text{max}} \approx 0.15$  }  $\Rightarrow \text{rendement} < 150 \text{ W/m}^2$

Plusieurs origines :

- recouvrement entre le gap de Si et le spectre solaire
- résistance de contact
- surface des contacts électriques
- recombinaison (Si amorphe ou polycristalin)
- etc...



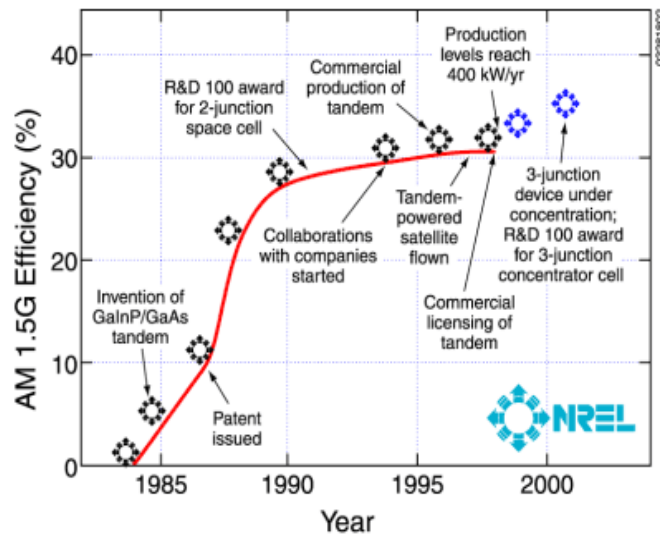
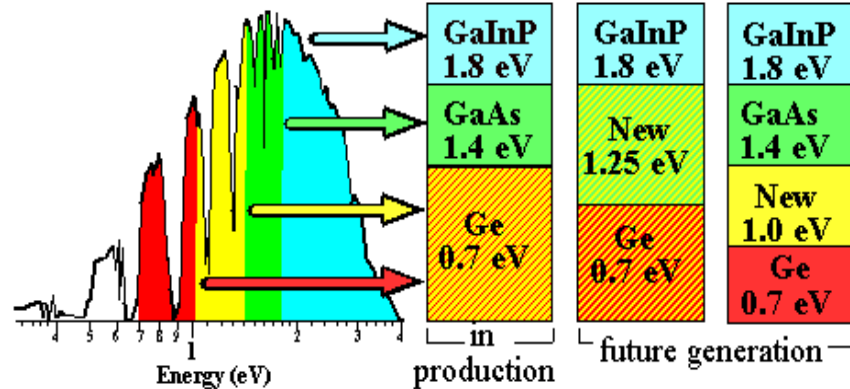


## Exemple 2: Cellule solaire

Cellules de hautes performances  
pour missions spatiales:

projected real-world efficiencies at 500 suns

39% 42% 42%



ONERA



# Photodéttection quantique

## A: Photoexcitation

Principe

Distribution des porteurs

## B: Détecteurs Photoconductifs

Gain photoconductif

Bande passante

Exemple

## C: Détecteurs Photovoltaïques

Rendement photovoltaïque

Bande passante

Exemple

Notion de détecteurs CCD

## D: Détecteurs à Puits Quantiques

Principes de fonctionnement

Rendement

Technologie

## E: Détecteurs à avalanche

Origine de l'avalanche

Facteur de multiplication

## F: Bruit de détection

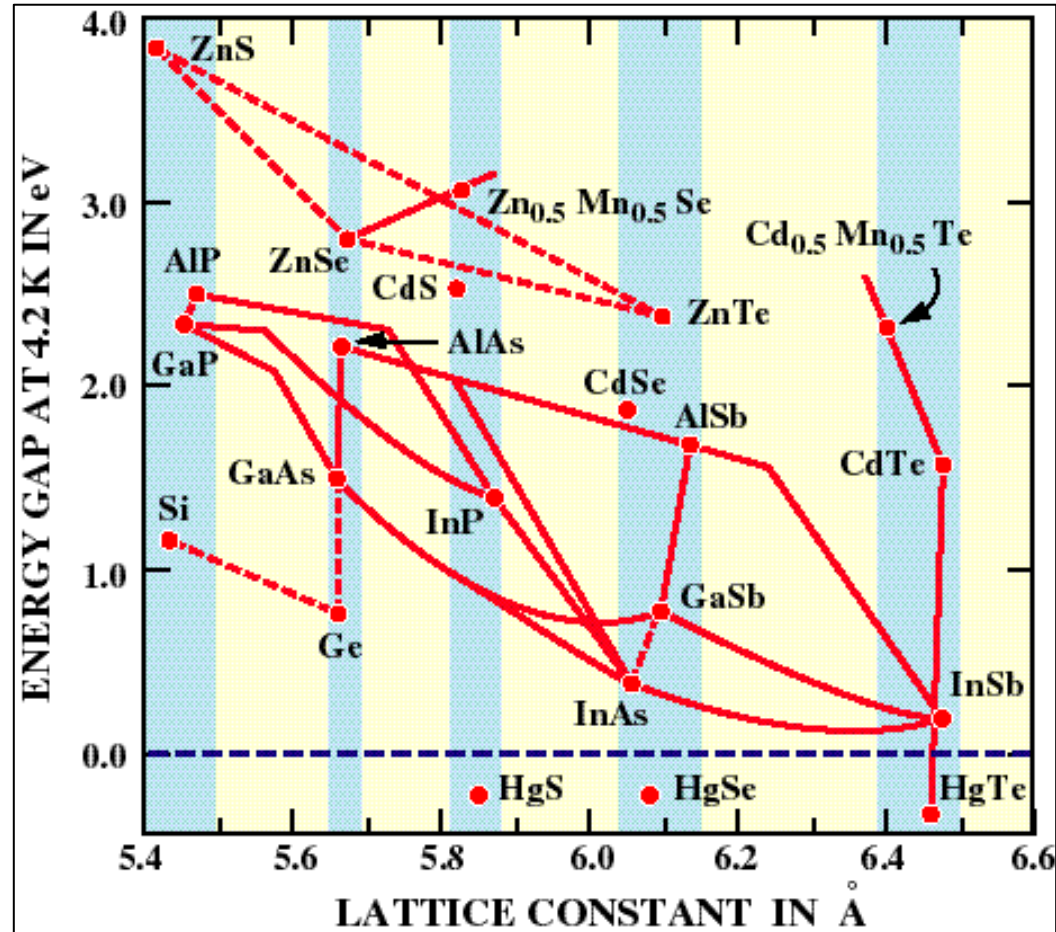
Bruit de génération-  
recombinaison

## G: Notion de détectivité

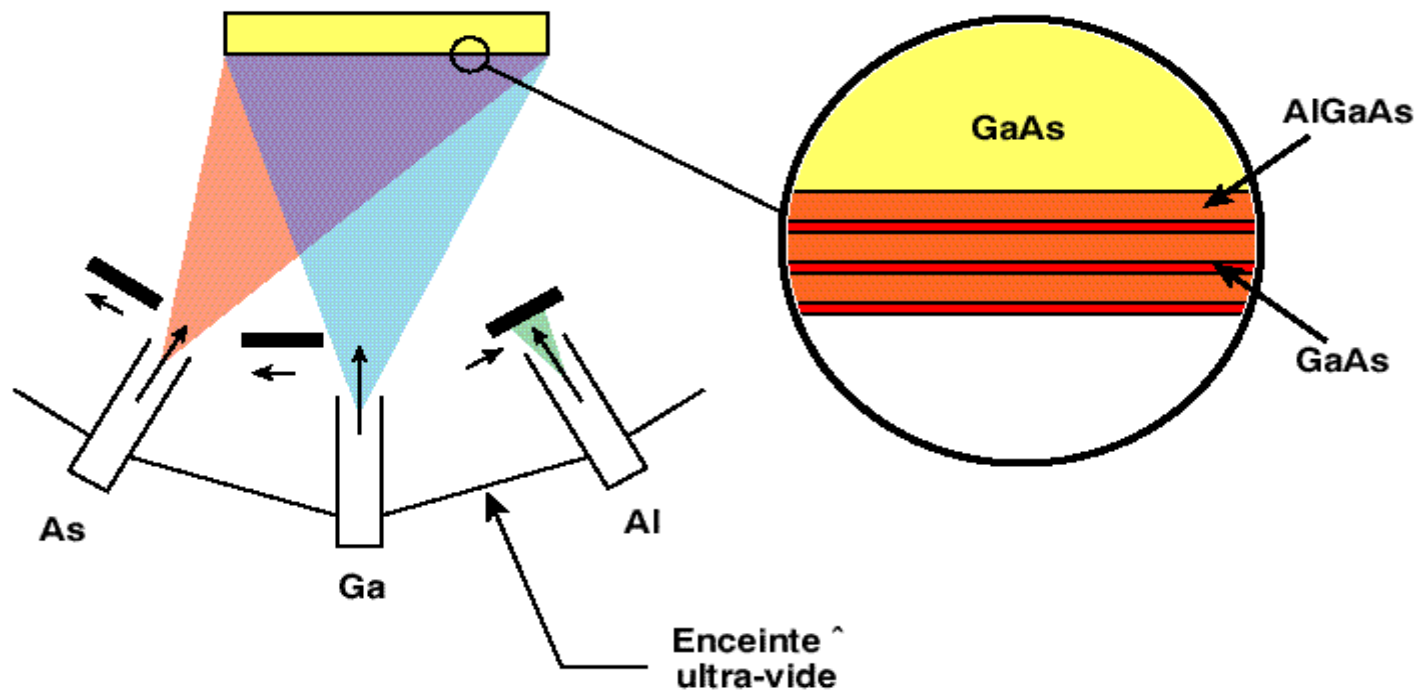


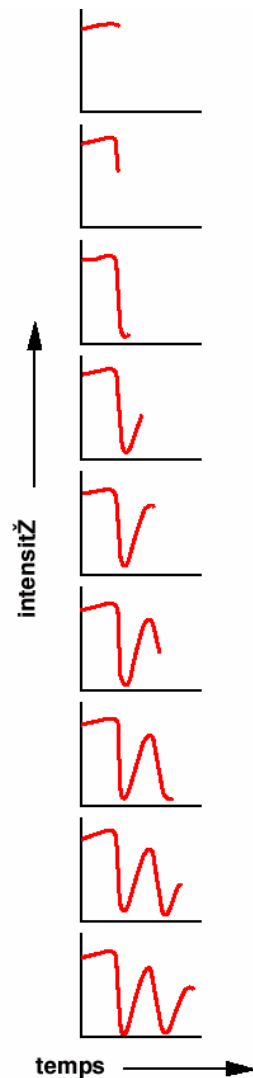
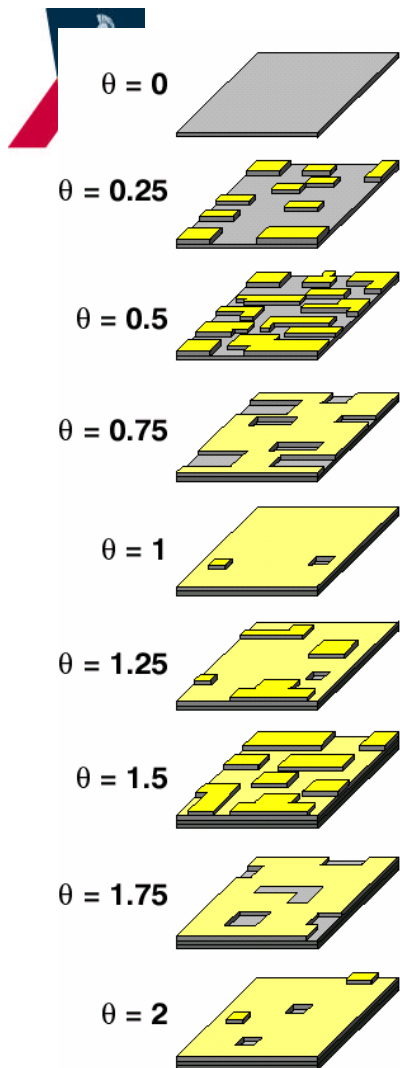


## Gaps de différentes familles de semiconducteurs

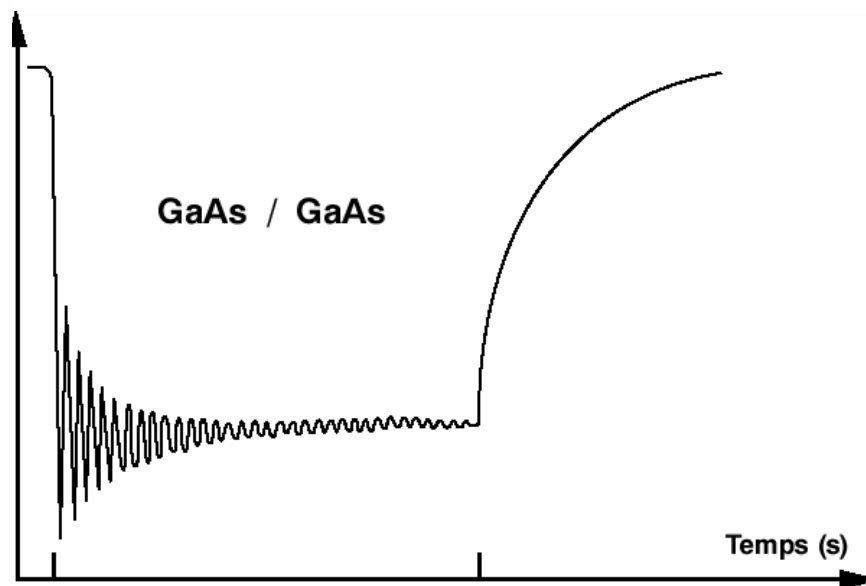


## EPITAXIE PAR JETS MOLECULAIRES





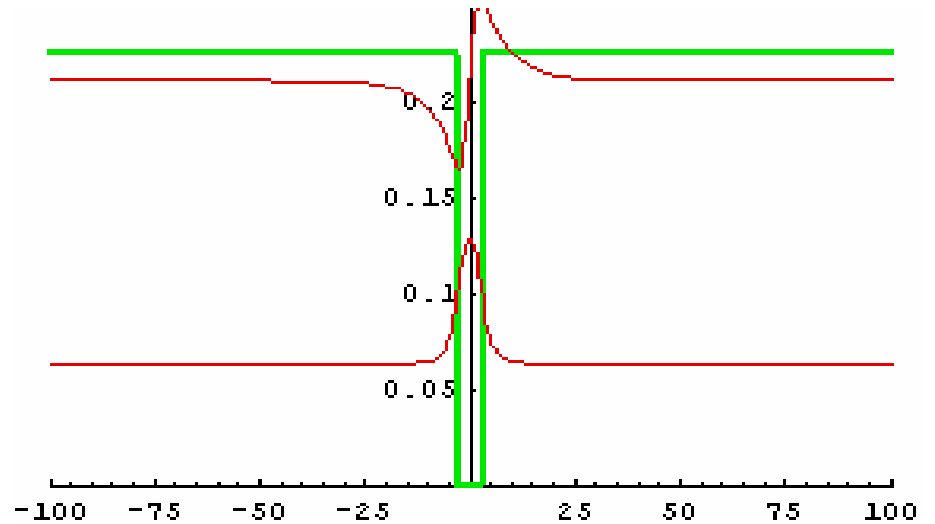
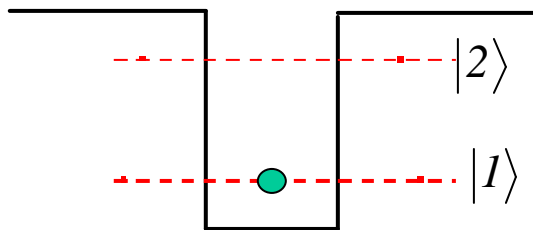
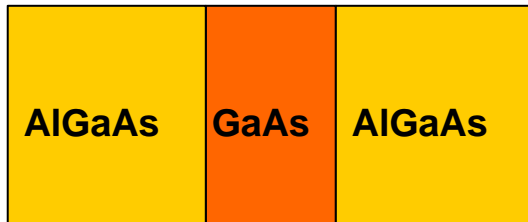
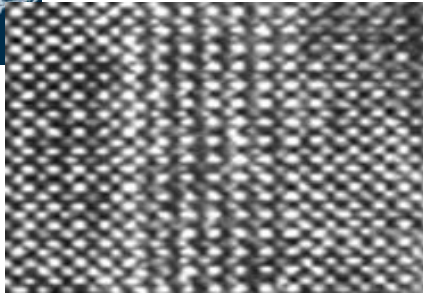
## UTILISATION DES OSCILLATIONS RHEED POUR LE COMPTAGE DE MONOCOUCHE



ONERA

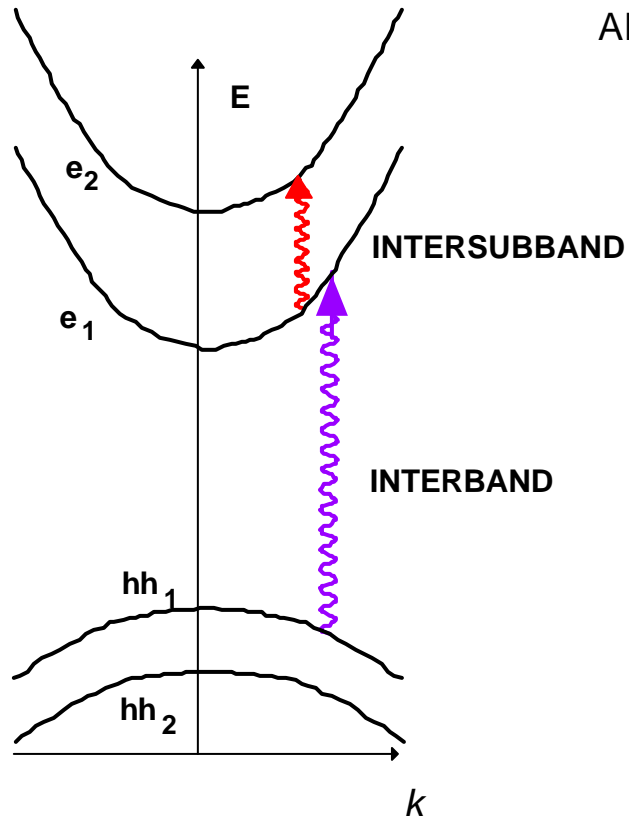


# Le puits quantique

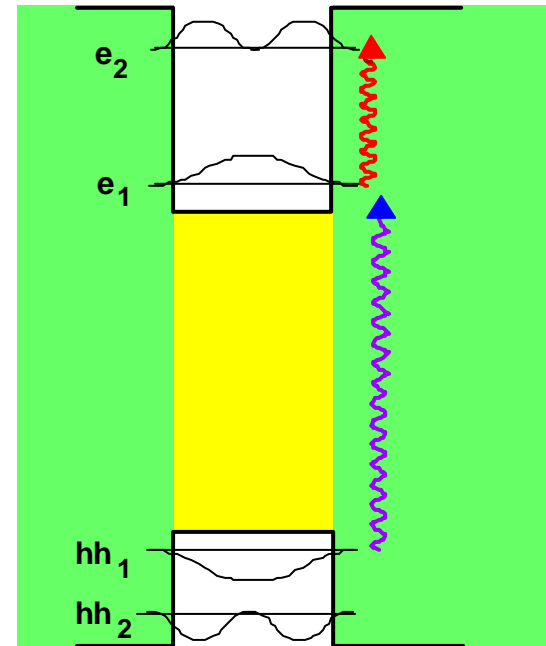




# TRANSITION INTERBANDE vs INTER-SOUS BANDE



$Al_xGa_{1-x}As$      $GaAs$      $Al_xGa_{1-x}As$

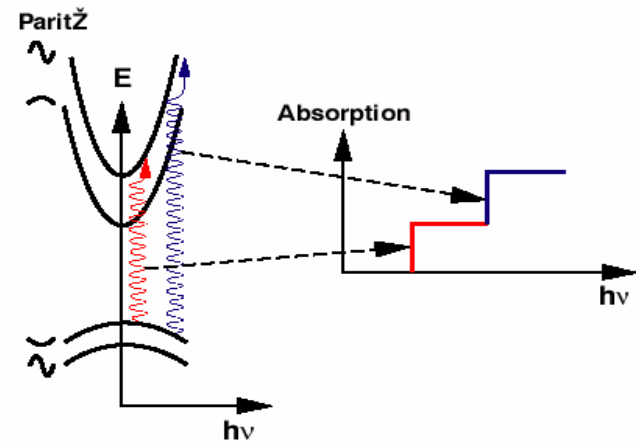


$d$

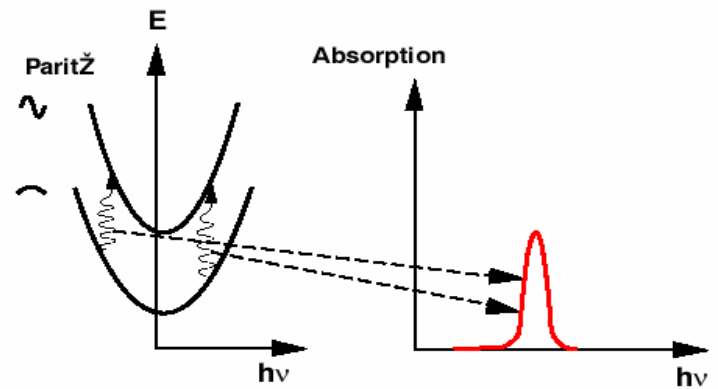


# **ABSORPTION INTERBANDE VS INTERSOUSBANDE**

## **INTERBANDE**

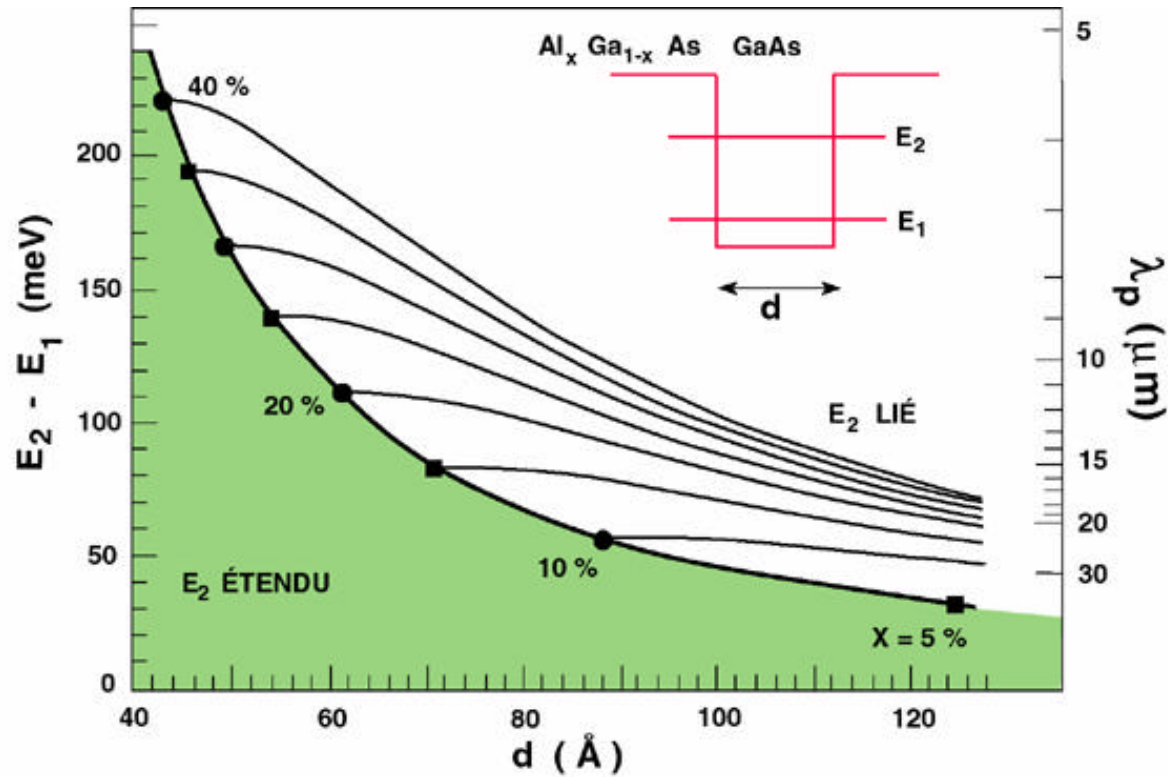


## **INTERSOUSBANDE**





# INGENIERIE QUANTIQUE

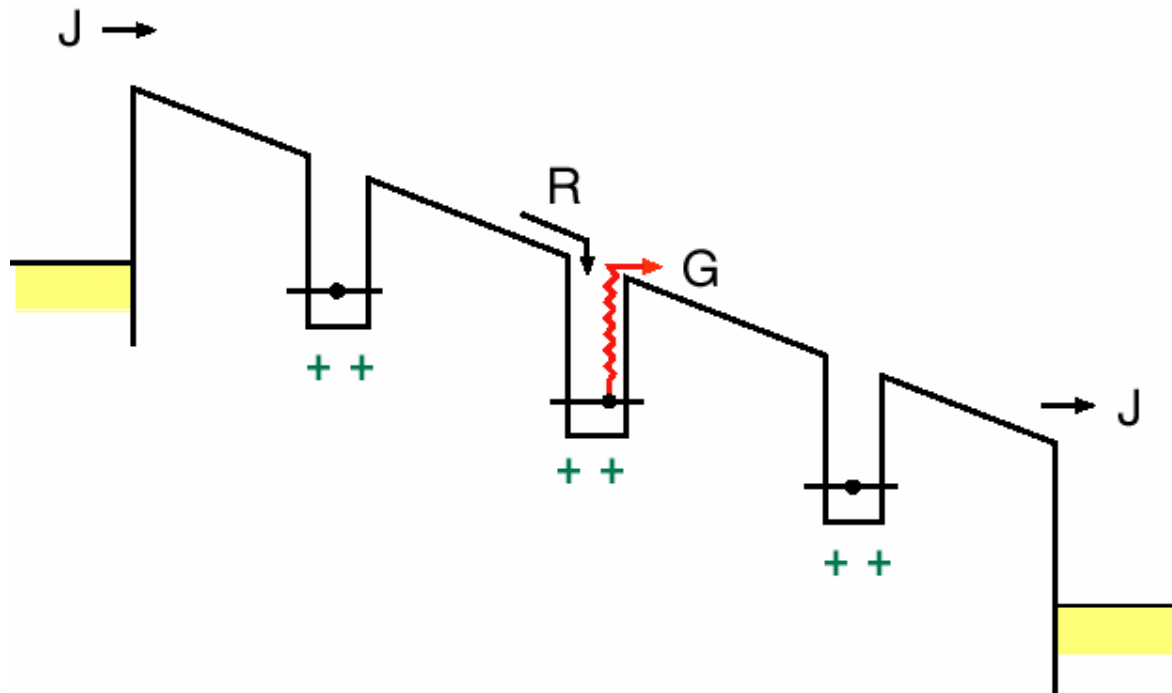


JERA

39/57



## PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT



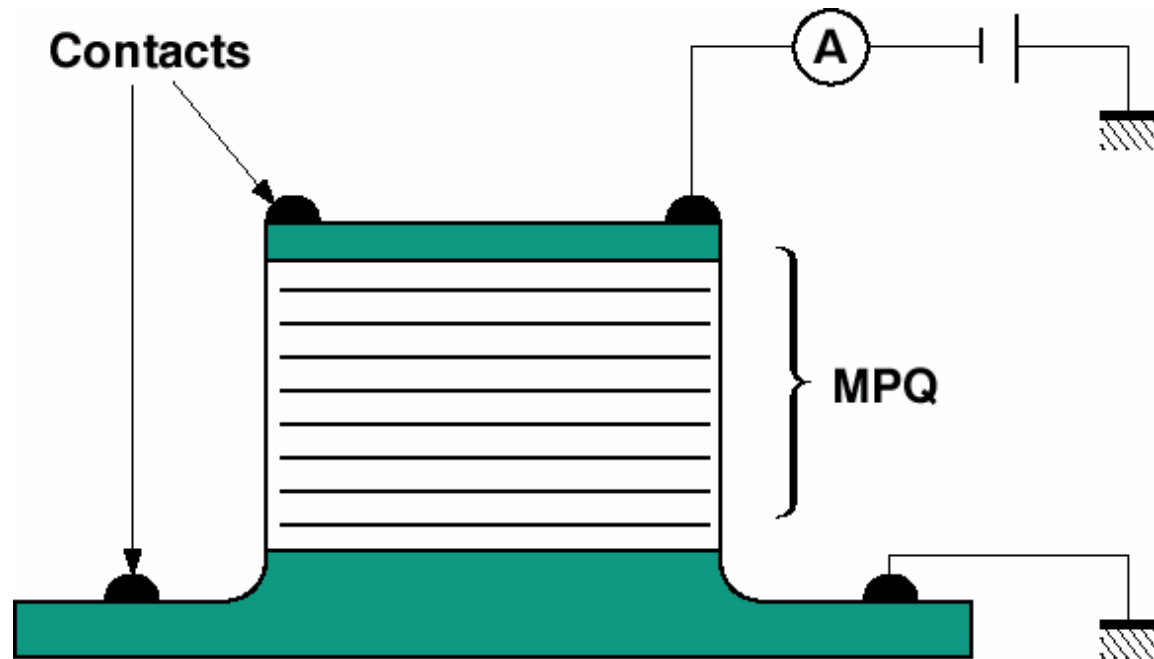
ONERA





# PHOTOCONDUCTEUR A MULTIPUITS QUANTIQUES

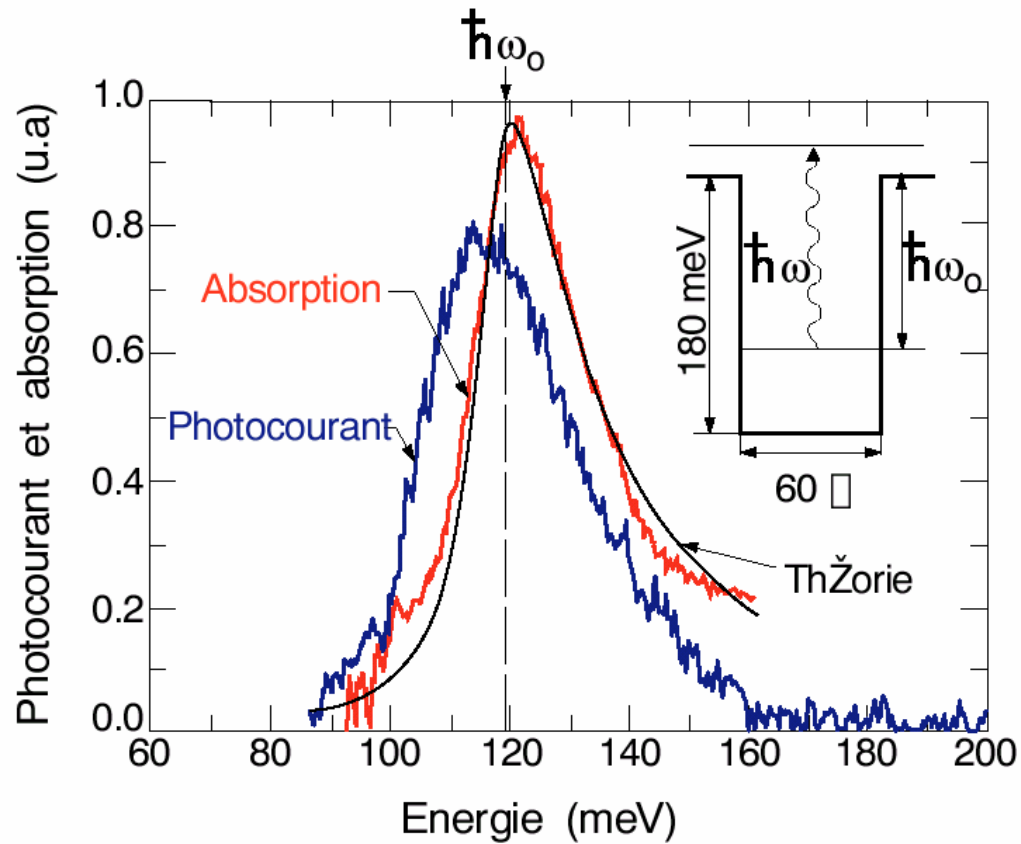
## STRUCTURE DU DISPOSITIF



ONERA



# SPECTRE DE PHOTOCOURANT ET D'ABSORPTION





# REPONSE D'UN DETECTEUR A Puits QUANTIQUE

Taux de génération optique par puits quantique ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ):

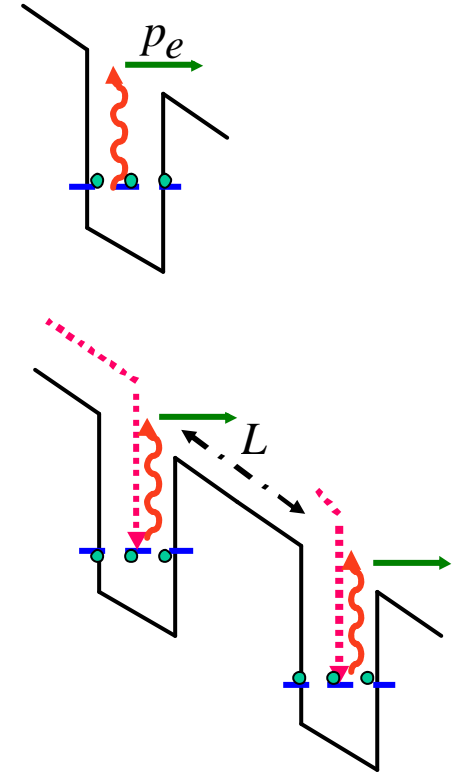
$$G_{op} = p_e \mathbf{a}_{1pq} \Phi_0$$

Taux de recombinaison par puits quantique ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ):

$$R = \frac{n_{2d}}{t_c} = \frac{L n_{3d}}{t_c} \quad \leftarrow \text{Pas trivial !!!}$$

A l'état stationnaire:  $G_{op} = R$

$$n_{3d} = \frac{p_e \mathbf{a}_{1pq} t_c \Phi_0}{L}$$





## REPONSE D'UN DETECTEUR A Puits QUANTIQUE

$$\left. \begin{array}{l} \text{Photocourant donné par: } J_{ph} = n_{3d} q m_n \frac{V}{L} \\ \text{Réponse donnée par: } \mathfrak{R} = \frac{J_{ph}}{h n \Phi_0} \end{array} \right\} \text{rappel}$$

$$\Rightarrow \boxed{\mathfrak{R} = h_{lpq} G_{lpq} \frac{1}{h n / q}}$$

Rendement quantique par puits  $h_{lpq} = p_e a_{lpq}$

Gain photoconductif par puits  $G_{lpq} = \frac{t_c}{t_{tr}} = \frac{t_c}{L / m_n E}$

La réponse d'un détecteur à puits quantique est indépendant du nombre de puits !!!

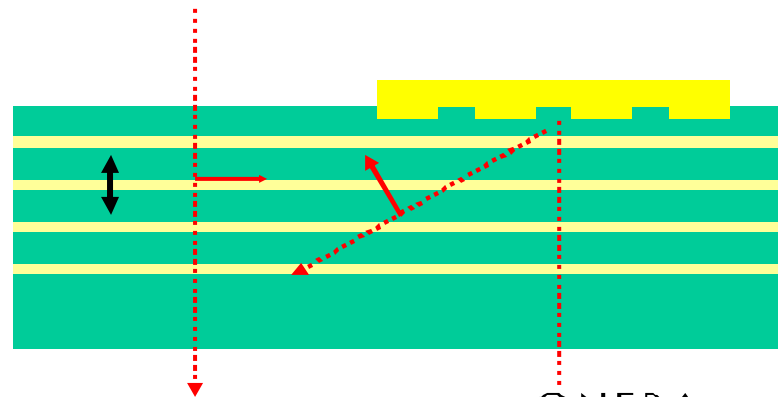
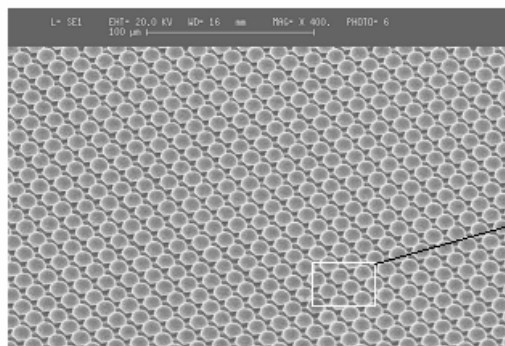
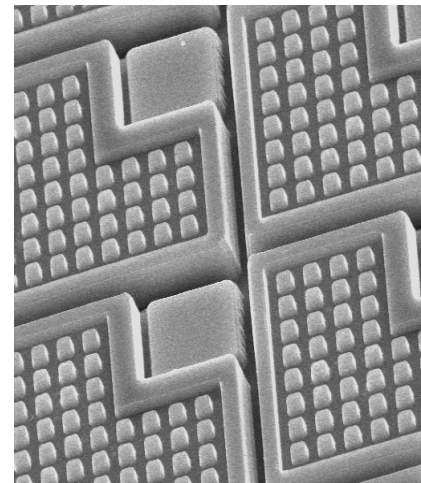
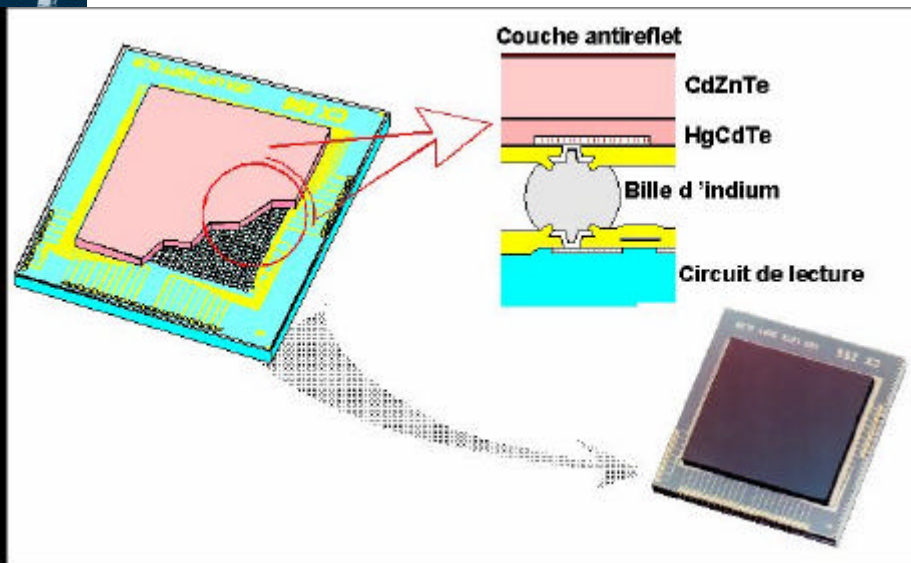
.... mais pas sa détectivité !!!



## Exemple: REPONSE D'UN DETECTEUR A Puits QUANTIQUE TYPIQUE

$$\begin{array}{l}
 E = 1V \text{ sur } 1\mu m = 10^4 V/cm \\
 m_n = 10^2 cm^2/V.s \\
 L = 25nm \\
 t_c = 10ps \\
 p_e \approx 1 \\
 a_{lpq} = 10^{-2}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 t_{tr} = \frac{L}{m_n E} = \frac{25 \times 10^{-7} cm}{10^2 cm^2/V.s \cdot 10^4 V/cm} = 2.5ps \\
 \\
 G_{lpq} = \frac{t_c}{t_{tr}} = \frac{10ps}{2.5ps} = 4 \\
 \\
 \Rightarrow h_{lpq} = 10^{-2} \\
 \\
 hn = 0.1 eV
 \end{array}
 \right\}
 \Rightarrow$$

$$\mathfrak{R} = h_{lpq} G_{lpq} \frac{1}{hn/q} \approx 0.4 A/W$$



ONERA



# Photodéttection quantique

## A: Photoexcitation

Principe

Distribution des porteurs

## B: Détecteurs Photoconductifs

Gain photoconductif

Bande passante

Exemple

## C: Détecteurs Photovoltaïques

Rendement photovoltaïque

Bande passante

Exemple

Notion de détecteurs CCD

## D: Détecteurs à Puits Quantiques

Principes de fonctionnement

Rendement

Technologie

## E: Détecteurs à avalanche

Origine de l'avalanche

Facteur de multiplication

## F: Bruit de détection

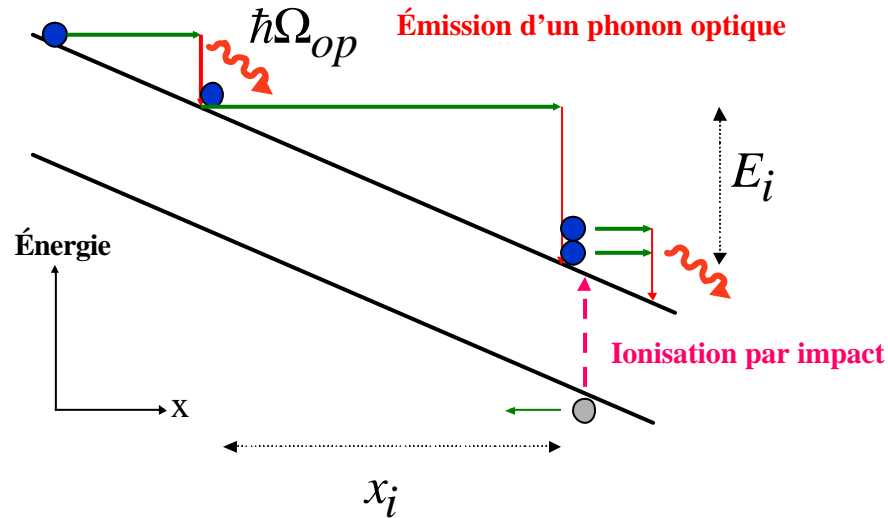
Bruit de génération-  
recombinaison

## G: Notion de détectivité



# MODELE PHYSIQUE DE L'AVALANCHE

superbe calcul du à W. Shockley (*modèle de l'électron chanceux*)



$E_i$  énergie nécessaire pour une ionisation par impact  
 $\lambda_{op}$  libre parcours moyen avant émission d'un phonon

Probabilité d'acquérir l'énergie d'ionisation  $E_i$  :  $P_i = e^{-x_i / l_{op}}$

$E_i = q F x_i$

$\Rightarrow P_i = e^{-E_i / q F l_{op}}$

ONERA





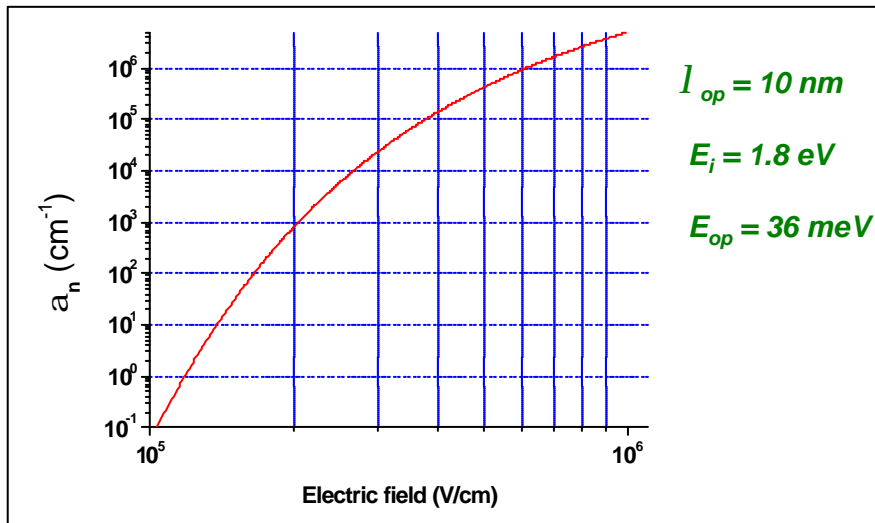
# MODELE PHYSIQUE DE L'AVALANCHE

Ce que l'on cherche:

$a_i$  : coefficient d'ionisation par impact par unité de longueur (cm<sup>-1</sup>)

Conservation de l'énergie:  $qFl_{op} \approx \hbar\Omega_{op} \Rightarrow a_{op} \approx \frac{qF}{\hbar\Omega_{op}}$  (1)

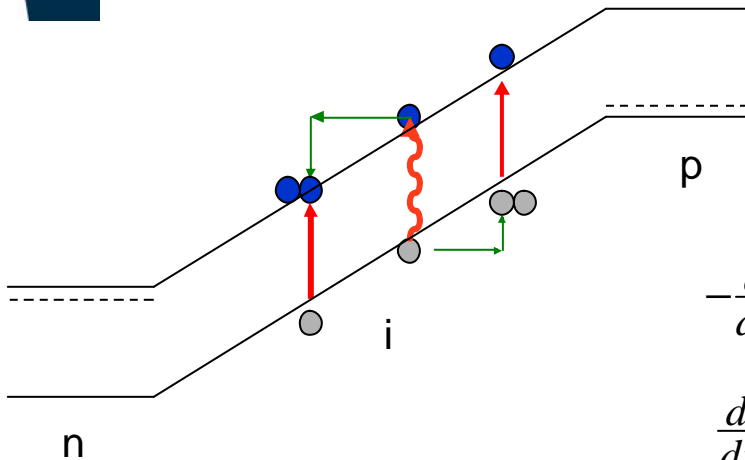
Probabilité d'ionisation par impact;  $a_i \approx a_{op} P_i$  (2)



$$a_i \approx \frac{qF}{\hbar\Omega_{op}} e^{-\frac{E_i}{qFl_{op}}}$$



# PHOTODETECTION A AVALANCHE



$a_n$  Coefficient d'avalanche des électrons

$a_p$  Coefficient d'avalanche des trous

$$-\frac{d}{dx}I_n = a_n I_n + a_p I_p + q G_{op}$$

$$\frac{d}{dx}I_p = a_n I_n + a_p I_p + q G_{op}$$

continuité du courant total:  $I_n(x) + I_p(x) = I$



$$\frac{d}{dx}I_p = (a_p - a_n)I_p + a_n I + q G_{op}$$




$$I_p(x) = C e^{-(a_n - a_p)x} + \frac{a_n I + q G_{op}}{a_n - a_p}$$



# PHOTODETECTION A AVALANCHE

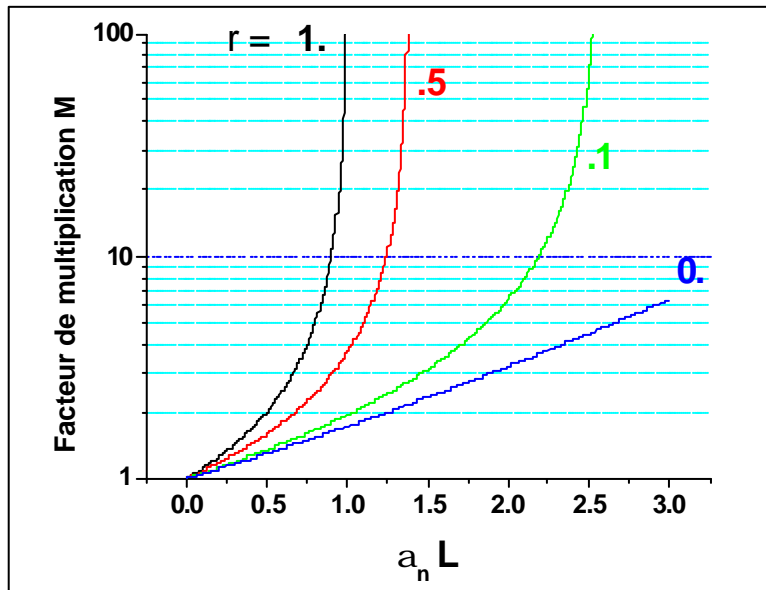
Condition limite: en  $x=0$ , le contact ne peut injecter aucun trou  $\rightarrow I_p(0)=0$

$\rightarrow I_p(x) = \frac{a_n I + q G_{op}}{a_n - a_p} \left( 1 - e^{-(a_n - a_p)x} \right)$

Condition limite:  $I = I_p(L) = I_n(0)$  

$\rightarrow I = q G_{op} \frac{e^{(a_n - a_p)L} - 1}{a_n - a_p e^{(a_n - a_p)L}}$

Le flux de photons captés est de  $I_{capté} = q G_{op} L$



$$M = \frac{1}{L} \frac{e^{(a_n - a_p)L} - 1}{a_n - a_p e^{(a_n - a_p)L}}$$

On pose  $r = \frac{a_p}{a_n}$

**Facteur d'amplification:**

$$M = \frac{1}{a_n L} \frac{e^{(1-r)a_n L} - 1}{1 - r e^{(1-r)a_n L}}$$

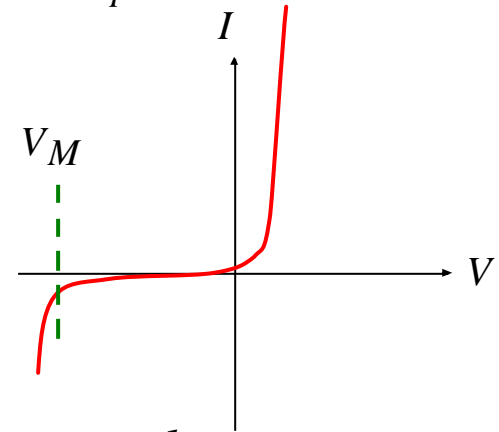
ONERA



## PHOTODETECTION A AVALANCHE

Remarque 1: divergence pour  $a_n L = \frac{\ln I/r}{1-r}$  avec  $r = a_p / a_n$

Avalanche sur une caractéristique  $I(V)$



Remarque 2: pour  $a_n = a_p$  Optimum avec  $M = \frac{1}{1-aL}$

Remarque 3: gain désiré  $M$  obtenu par le champ électrique  $F_M$  donné par L'équation implicite:

$$\frac{qF_M}{E_{op}} e^{-E_i / qF_M} I_{op} = \frac{1}{L} \left( 1 - \frac{1}{M} \right)$$



# Photodéttection quantique

## A: Photoexcitation

Principe

Distribution des porteurs

## B: Détecteurs Photoconductifs

Gain photoconductif

Bande passante

Exemple

## C: Détecteurs Photovoltaïques

Rendement photovoltaïque

Bande passante

Exemple

Notion de détecteurs CCD

## D: Détecteurs à Puits Quantiques

Principes de fonctionnement

Rendement

Technologie

## E: Détecteurs à avalanche

Origine de l'avalanche

Facteur de multiplication

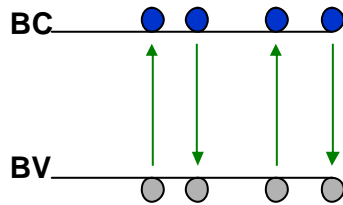
## F: Bruit de détection

Bruit de génération-  
recombinaison

## G: Notion de détectivité



# NOTION DE BRUIT DE GENERATION-RECOMBINAISON



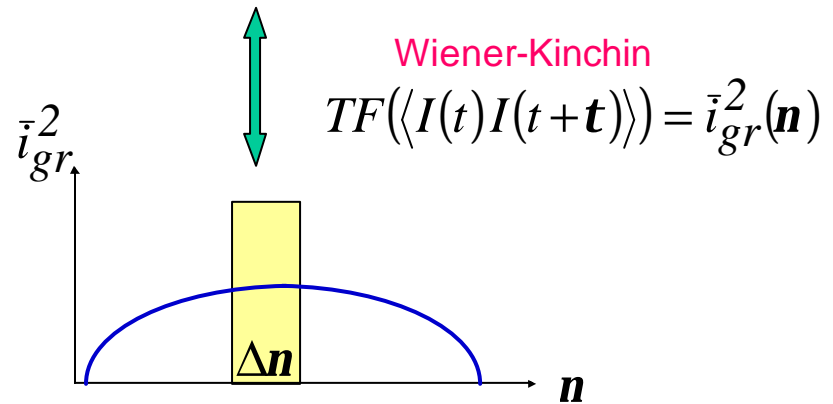
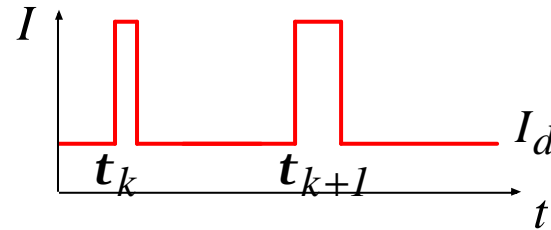
$$I_k(t-t_k) = \begin{cases} -qv/L & \text{pour } 0 < t < t_k \\ 0 & \text{pour } t < 0 \text{ ou } t > t_k \end{cases}$$

$$I = \sum_k I_k(t-t_k)$$

$I_d$  : courant moyen (d'obscurité)

$\Delta\nu$  : bande de fréquence

$g$  : gain de photoconduction



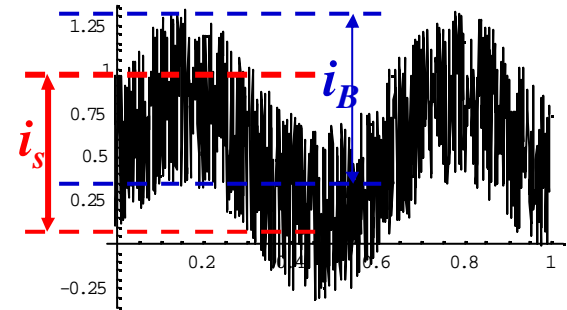
$$\bar{i}_{gr}^2 = 4 q g I_d \Delta n$$

ONERA



# RAPPORT SIGNAL SUR BRUIT

Capacité à détecter un signal hors du bruit  $S/B = \frac{i_s}{i_B}$



Signal donné par la réponse du photodétecteur  $i_s = \Re P_{inc}$

Bruit donné par :  $i_B = \sqrt{i_{gr}^2} = \sqrt{u q A J_d \Delta n}$

$u = 2$  photovoltaïque  
 $u = 4 g$  photoconducteur

$\longrightarrow$ 

$$S/B = \frac{\Re P_{inc}}{\sqrt{u q A J_d \Delta n}}$$

Le courant d'obscurité  $J_d$  fixe une limite à la puissance incidente détectable  $NEP$  pour laquelle  $S/B = 1$

$S/B = 1$



$$NEP = \frac{\sqrt{u q A J_d \Delta n}}{\Re}$$

Noise equivalent power

ONERA  
55/57



# NOTION DE DETECTIVITE

La dépendance en  $\sqrt{A \Delta n}$  n'est pas intrinsèque au matériau

Notion de délectivité propre au matériau et au composant

$$D^* \equiv \frac{\sqrt{A \Delta n}}{NEP} \quad (\text{en } cm\sqrt{Hz}/W)$$



$$D^* = \frac{\Re}{\sqrt{u q J_d}}$$

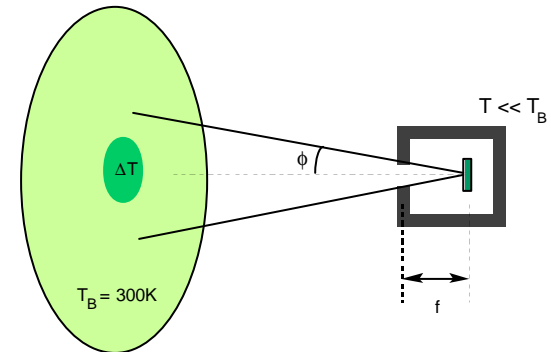
Origine du courant d'obscurité:  $J_d$   $J_d = J_f + J_{cn}$

$J_f$  courant de fuite lié au détecteur

$$J_f \propto e^{-E_g / kT_f} = e^{-h\nu / kT_f}$$

$J_{cn}$  du à la détection des photons du corps noir

$$J_{cn} \approx q g h \Phi_{cn}$$

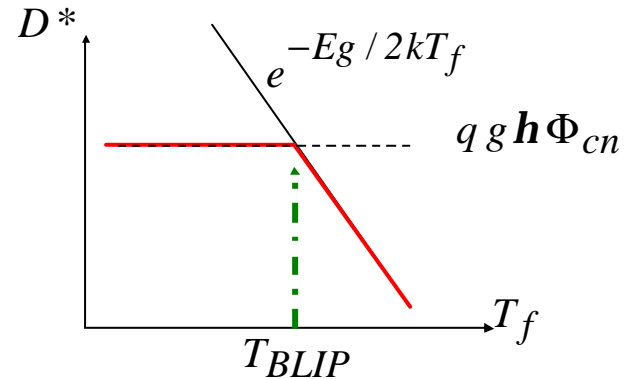






# TEMPERATURE ET DETECTIVITE DE BLIP

Température de refroidissement du détecteur en dessous de laquelle il est inutile de descendre car les performances du détecteur sont limitées par le corps noir

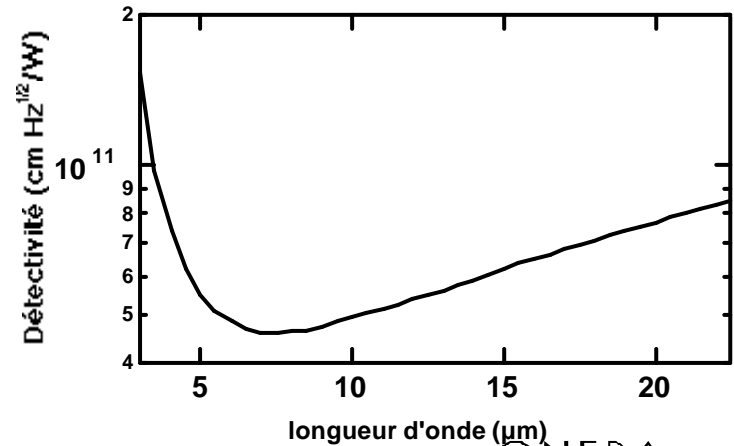


Limite fondamentale de détectivité d'une photodiode:  $J_f=0$ ,  $\eta = 1$

$$\mathfrak{R} = \frac{J_{ph}}{P_{inc}} = \frac{1}{h\nu / q}$$



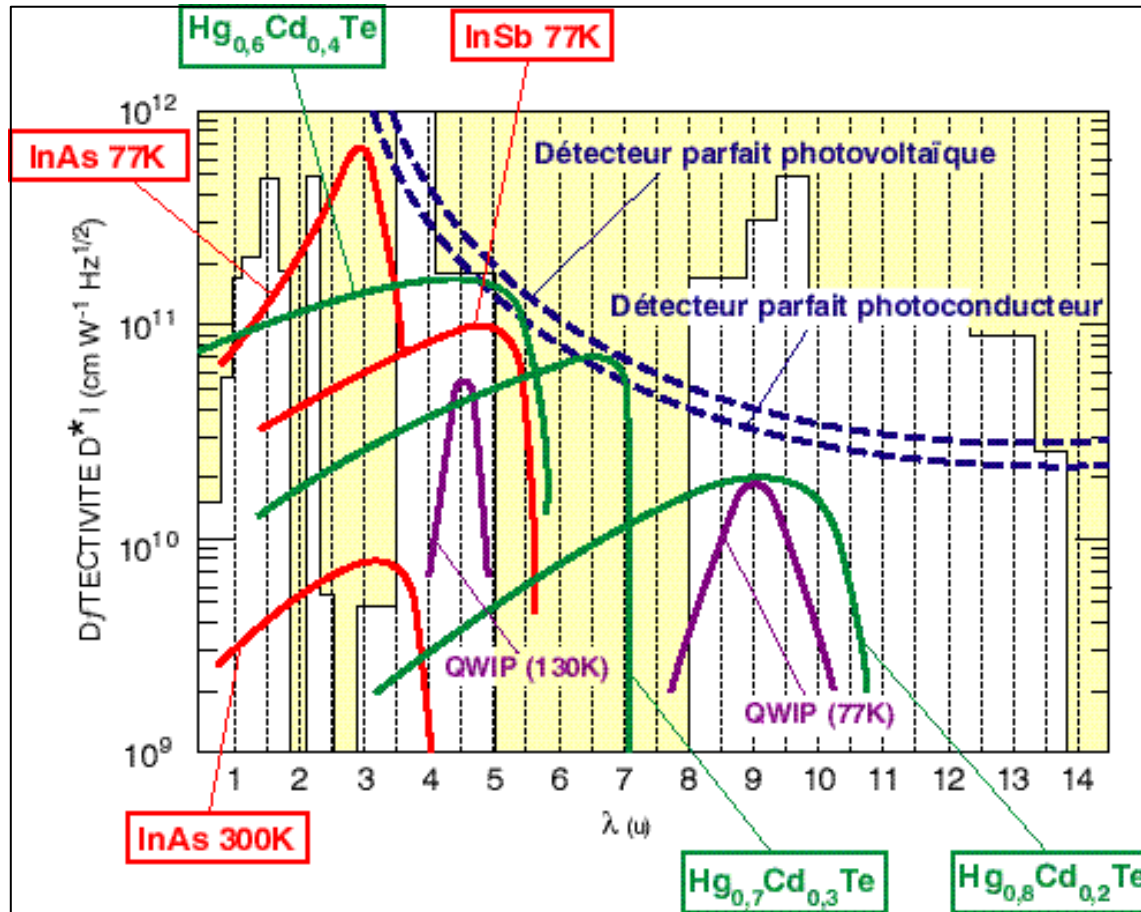
$$D_{BLIP}^* = \frac{1}{h\nu} \frac{1}{\sqrt{2\Phi_{cn}}}$$



ONERA



## DETECTIVITE DES PRINCIPALES FILIERES DE DETECTEURS INFRAROUGES



ERA



## Exemple: performances d'un détecteur infrarouge HgCdTe

$$\lambda_{\text{coup}} = 9 \mu\text{m}$$

$$D^* = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}} / \text{W}$$

$$A = 25 \times 25 \mu\text{m}^2$$

$$\Delta n = 40 \text{ Hz}$$



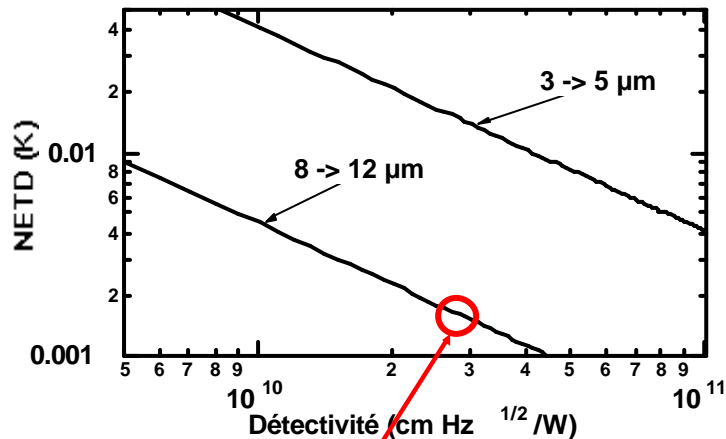
$$NEP = \frac{25 \cdot 10^{-4} \sqrt{40}}{3 \cdot 10^{10}} = 5 \cdot 10^{-13} \text{ W}$$

Une variation de température de  $\Delta T$  conduit à une variation de la puissance émise par le corps noir donnée par:

$$\Delta P = \frac{d}{dT} R_{\text{cn}}(T, \lambda_{\text{coup}}) \Delta T$$

Le contraste minimal de température détectable (NETD) est donc:

$$NETD = \frac{NEP}{\frac{d}{dT} R_{\text{cn}}(T, \lambda_{\text{coup}})}$$



2 mK !

ONERA

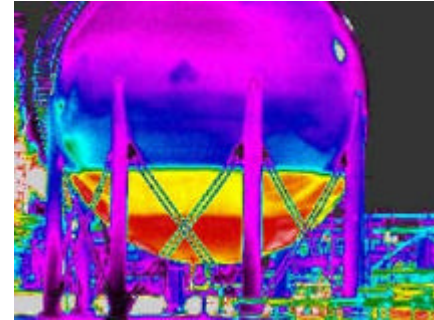
59/57



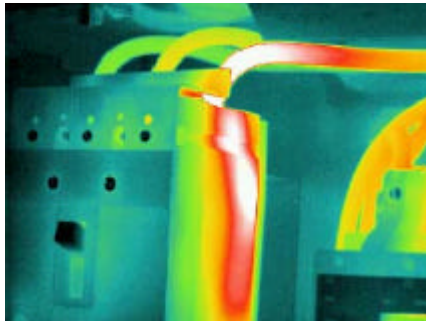
# Caméra infrarouge et applications



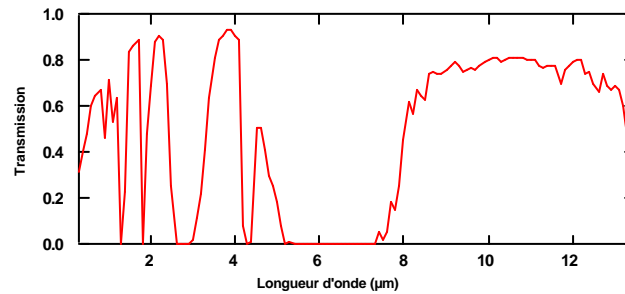
*Caméra infrarouge avec son cryogénérateur miniature*



*Niveau de carburant*



*Niveau de carburant*



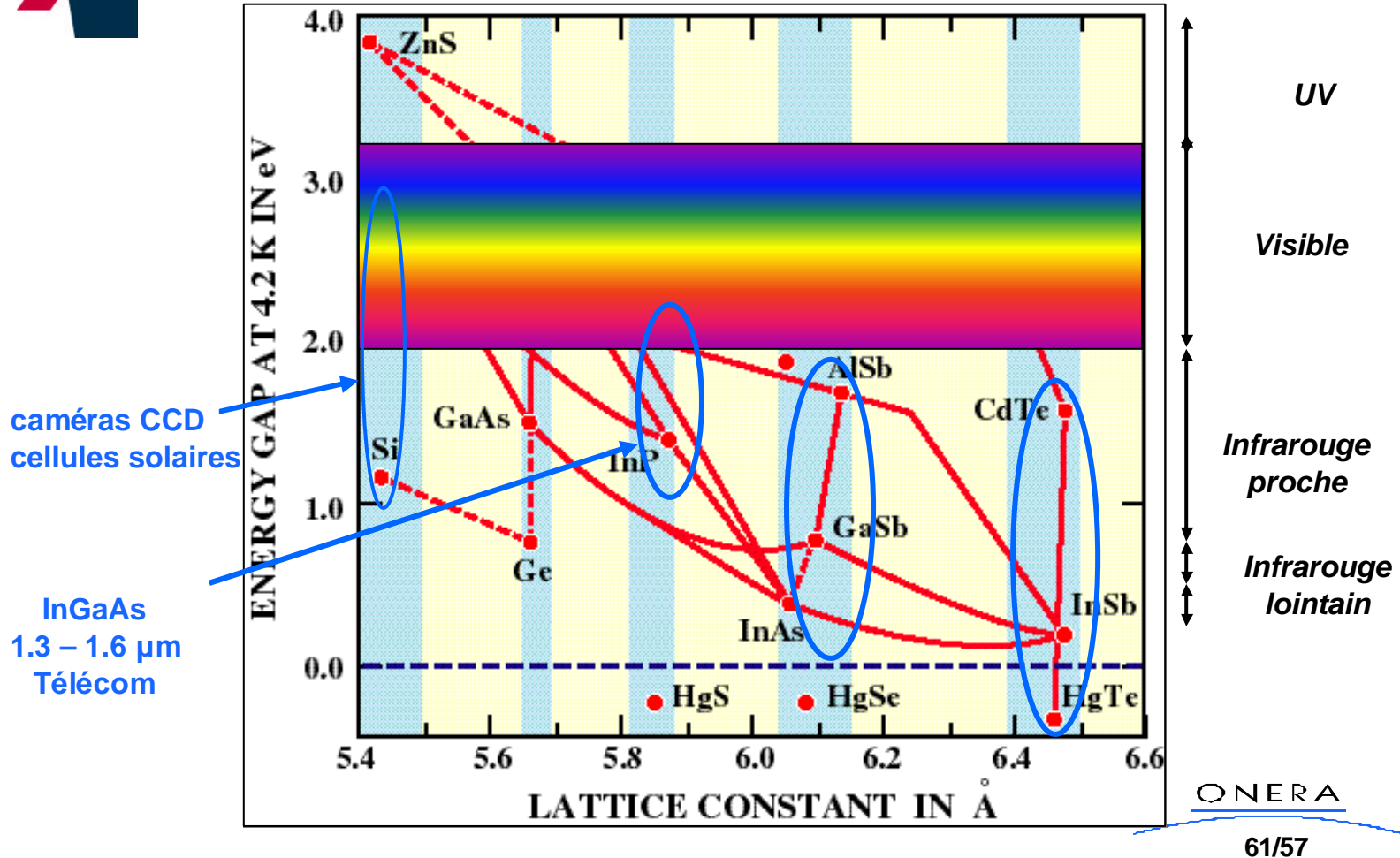
*Transparence sur 5 km*



*Défense*



## Gaps et couleurs





## QUELQUES CONCLUSIONS

- Les détecteurs quantiques ont pratiquement tous atteint leurs limites quantiques
- Des hétérostructures complexes vont continuer à améliorer les rendements quantiques des cellules solaires, mais les progrès les plus importants attendus sont d'ordre économique
- Des progrès très importants devraient être obtenus dans les températures de fonctionnement des détecteurs quantiques infrarouge
- Les percées fondamentales les plus importantes sont attendues dans les domaines des circuits de lecture et les fonctions intégrées sur composants.