

---

# Optoelectronics

M2 Nanosciences: nano-dispositifs

M2 Composants et Antennes pour les Telecoms

M2 Réseaux Optiques & Systèmes Photoniques

Part 2

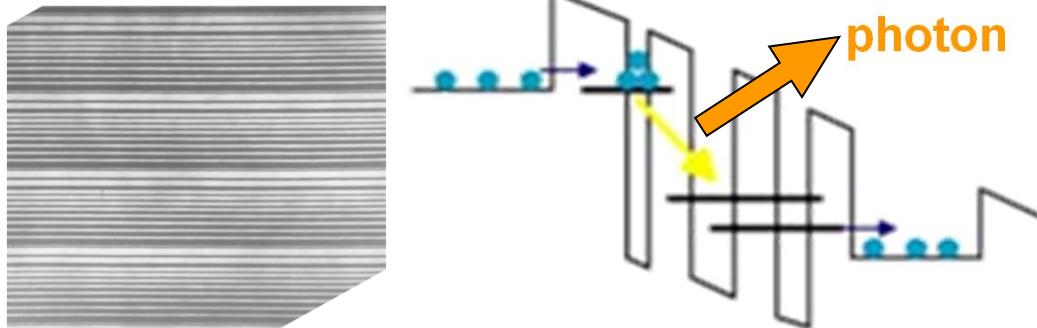
Adel Bousseksou

Centre de Nanosciences et Nanotechnologies , Université Paris-Sud/CNRS.

[adel.bousseksou@u-psud.fr](mailto:adel.bousseksou@u-psud.fr)

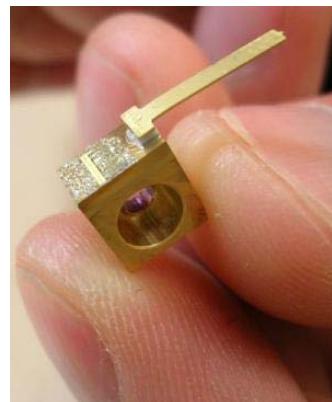
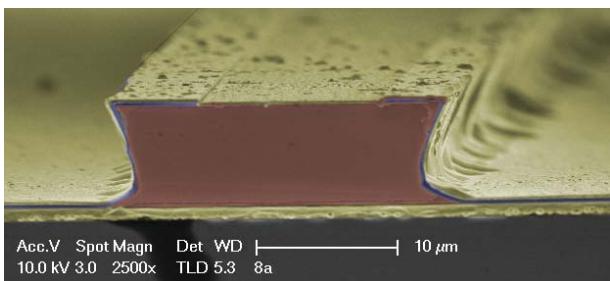
# Plan du cours

**Photonique inter-sous-bande:** Les photons sont émis ou absorbés dans une transition entre sous-bandes de la bande de conduction.

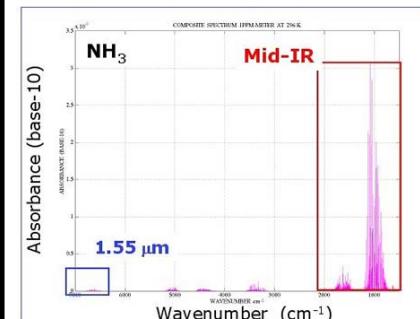


**Émission:** Laser à cascade quantique (QCL)

- Sources compactes qui couvrent une large gamme spectrale, dans le moyen-infrarouge et dans le THz.



**Détection:** Quantum cascade detector (QCD), Quantum Well Infrared Photodetector (QWIP)



- Moyen infrarouge (3μm-20μm): Gamme privilégiée pour la détection d'espèces chimiques pour la santé et l'environnement.

# Plan

---

- Semiconductor lasers (1):
  - I. Diode laser: Inter-band transition (Near Infrared)
  - II. Quantum cascade laser: Inter sub-band transition (Mid Infrared )
- Mid Infrared Detectors (2)
  - III. Inter sub-band detectors: QWIP (Quantum Well Infrared Photo detector)
- Journal club (3)

## III. Mid-IR Detectors:

---

### III-1. Introduction

### III-2. Mid-IR detectors

III-2-1 Thermal detectors

III-2-1 Photonic detectors

### III-3 Inter-sub-band detectors (QWIP exemple)

III-3-1 What is it

III-3-2 How it works

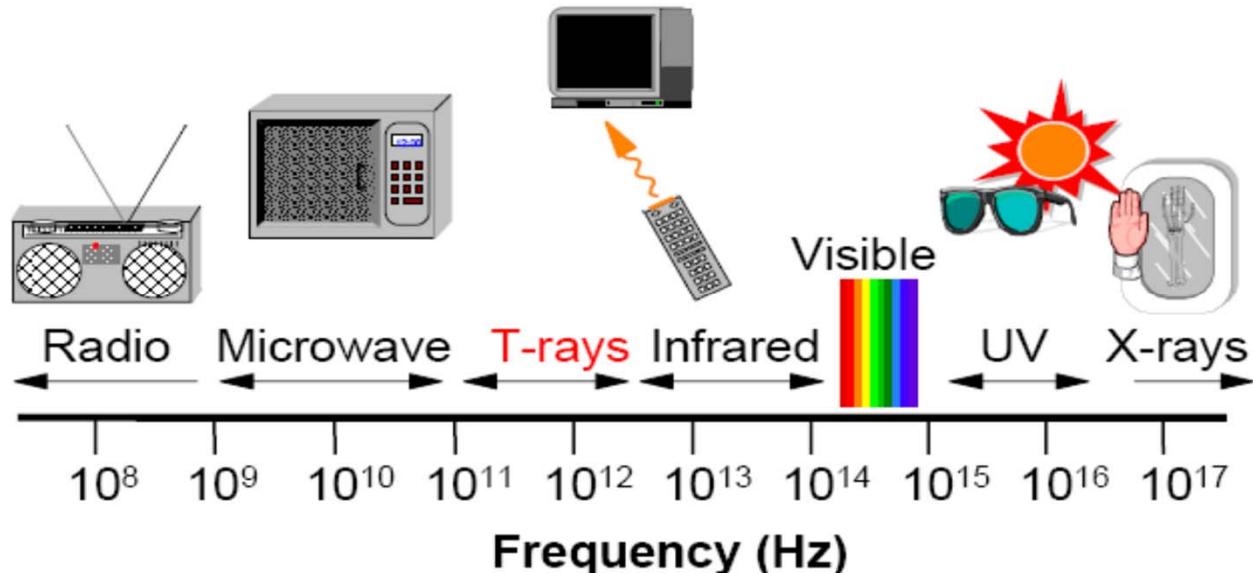
III-3-3 Fabrication

III-3-4 Applications

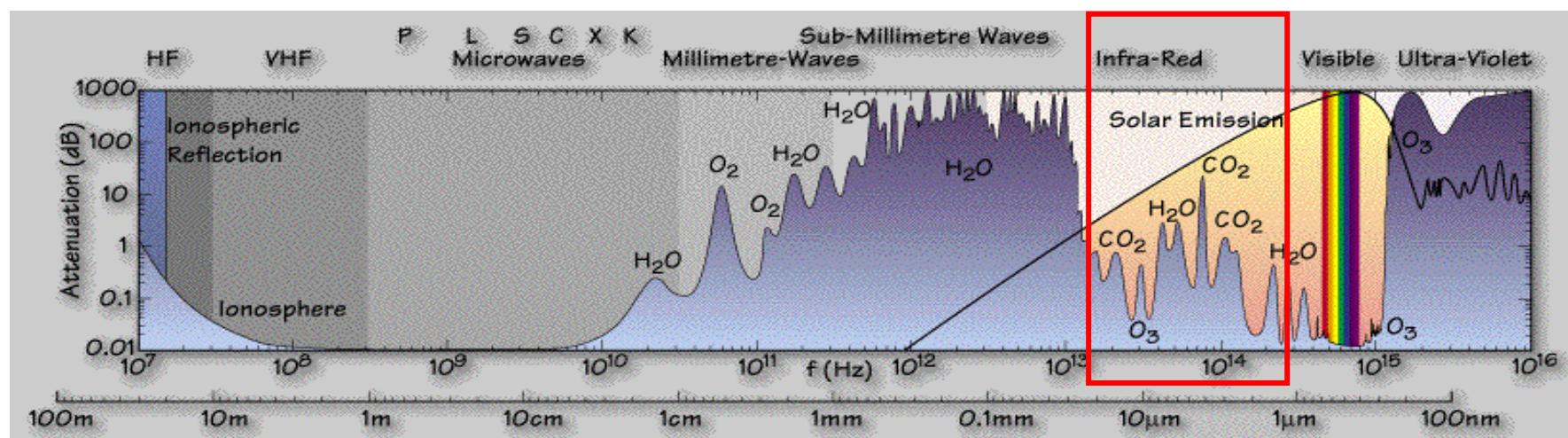
III-3-5 Other ISB based detectors, QCD, QDIP.

# III-1 Where is Mid-IR?

Domaine Moyen Infrarouge :  
 $10 \rightarrow 100 \text{ THz}$   
 $30\mu\text{m} \rightarrow 3\mu\text{m}$

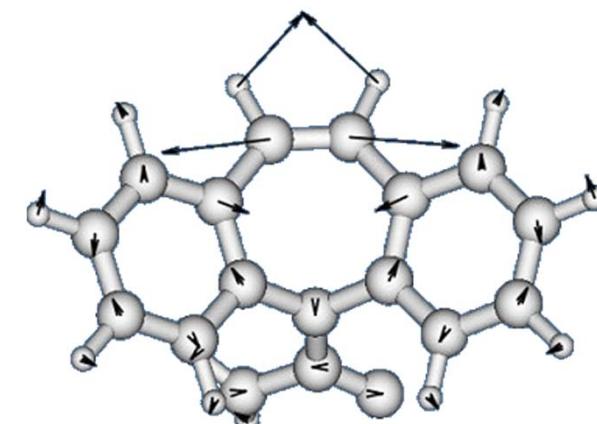
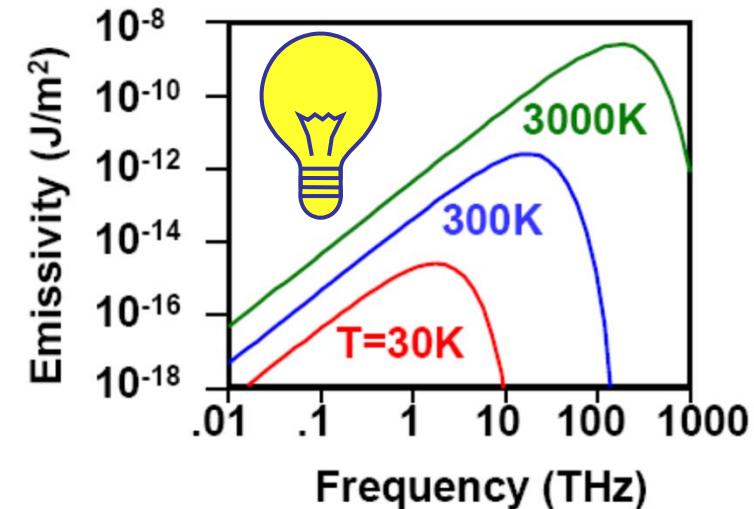


$\nu=40 \text{ THz}$ ,  $\lambda=7.5\mu\text{m}$ ,  $\sigma=1330 \text{ cm}^{-1}$ ,  $h\nu=0.16 \text{ eV}$ ,

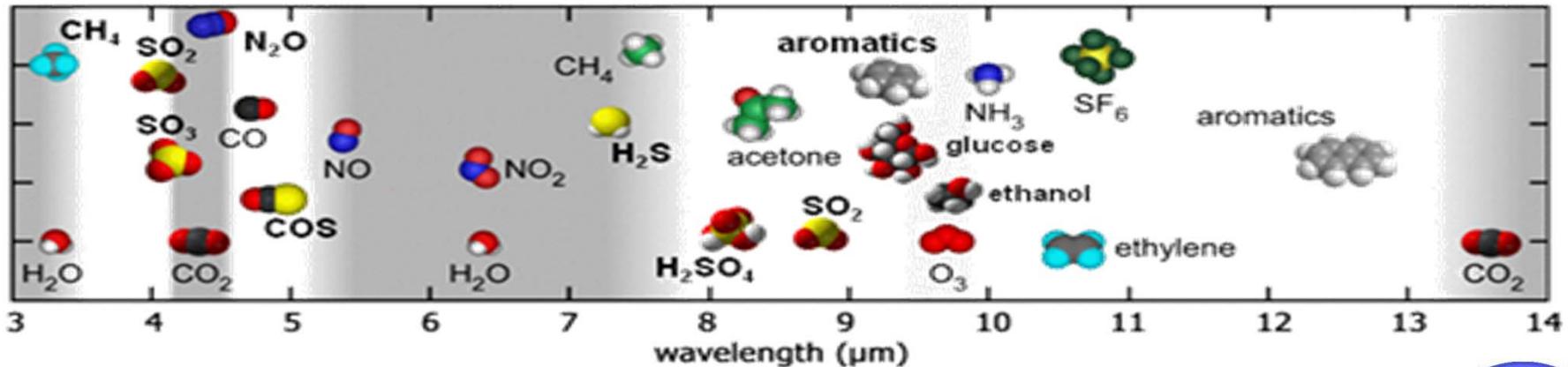


## III-1 Applications

- Les sources de chaleur émettent naturellement dans le moyen-infrarouge.
- Les espèces chimiques ont une signature spectrale intense dans le moyen-infrarouge.
- Domaines d'applications:
  - Spectroscopie
  - Détection
  - Imagerie
  - Défense
  - Communication en espace libre

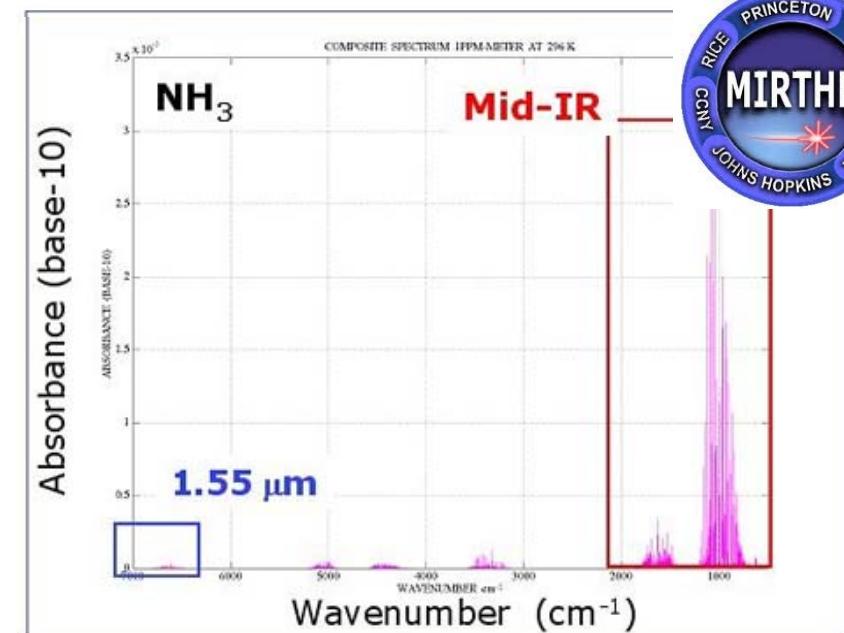


# III-1 Applications: Spectroscopy

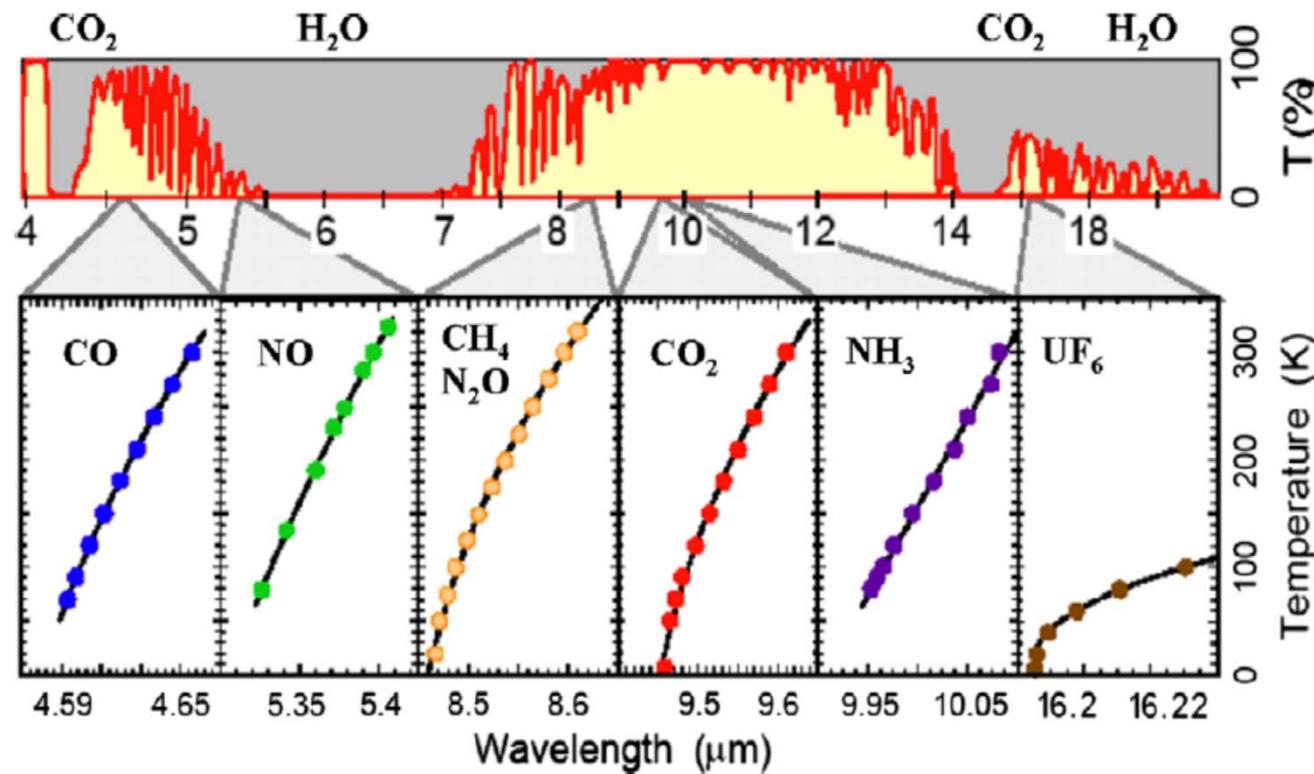


## Infrared Spectral Region

- Intramolecular bond vibrations
- Indirectly affected by crystal changes
- La signature spectrale des espèces chimiques est très fortes dans le Mid-IR=> détection de molécule unique



# III-1 Applications: Gaz detection



R.F. Curl et al. Chem. Phys. Lett. 487 (2010) 1–18

# III-1 Applications: Imagery

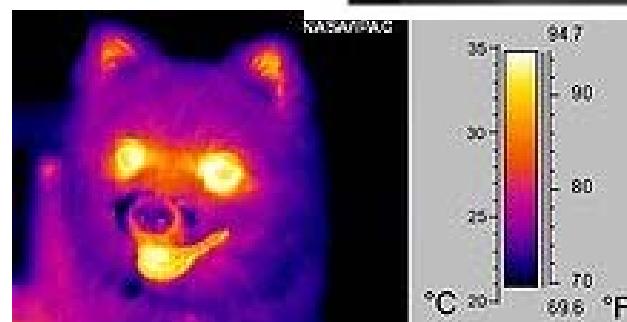
## • Vision nocturne:

- **Passive:** Un détecteur infrarouge permet de détecter les objets les plus chauds, quand le nombre de photons visibles est réduit (nuit).
- **Active:** Un spot infrarouge permet d'illuminer une scène ,les photons infrarouges réfléchis permettent alors de faire de l'imagerie.



## • Vision thermique: (thermographie)

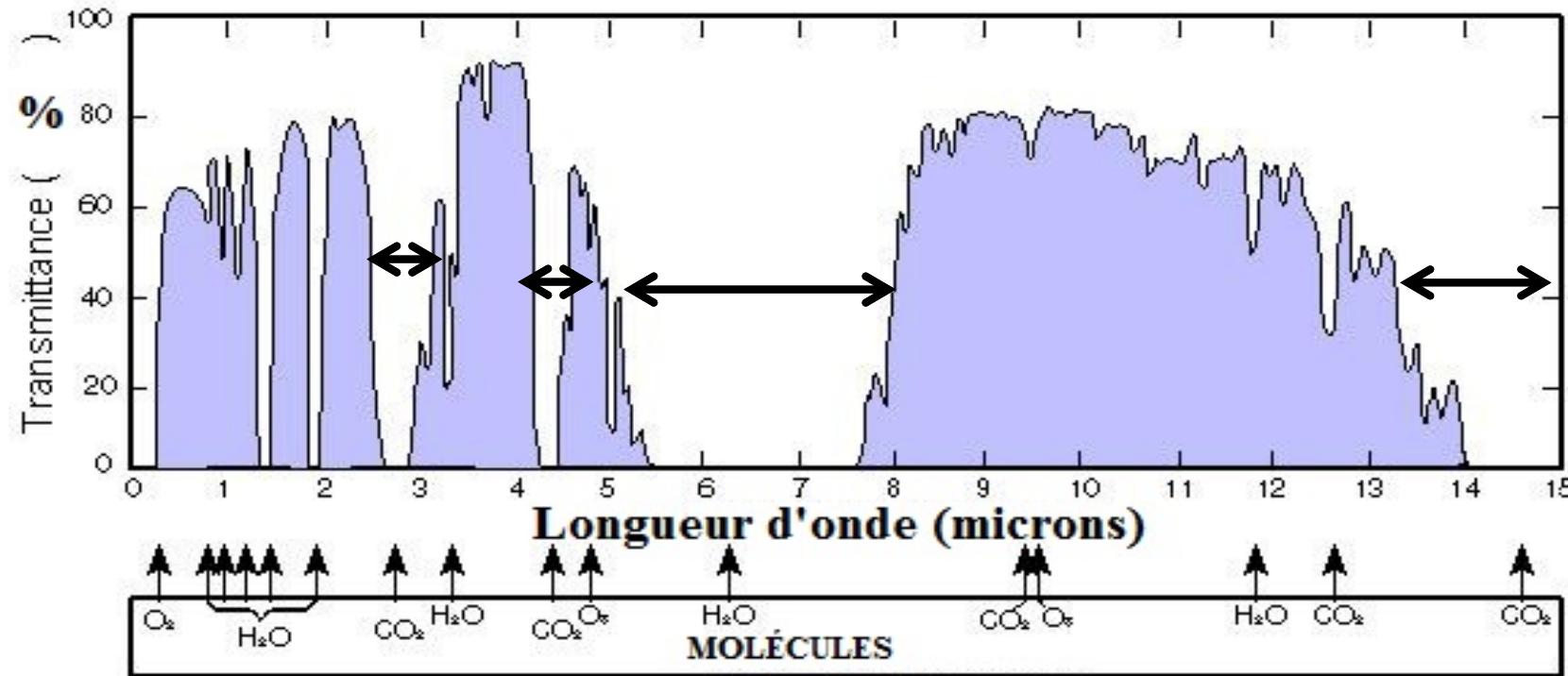
- Permet de voir et de mesurer à distante la température des objet.



## • Imagerie terrestre et satellitaire



# III-1 Applications: Communication



- **Communications en espace libre:** Il existe des gammes de longueur d'onde où l'atmosphère terrestre est transparente « Fenêtres atmosphériques »

# III-1 Applications: Targeting/against targeting

---

- **Applications militaires:**

- **Guidage:** La détection thermique (Passive ou active) permet le guidage des missiles sur des cibles (qui sont en générale chaudes= émettent dans le moyen infrarouge).



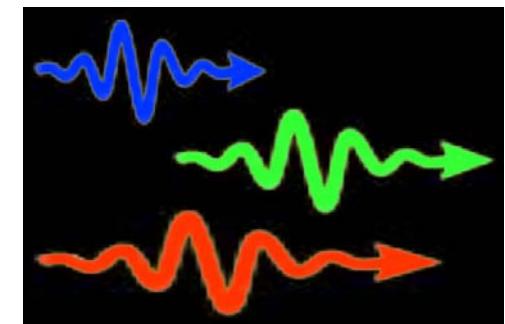
- **Contre mesure:** Une source Infrarouge intense (un laser ) permet d'aveugler, ou de leurer les systèmes de détection et de guidage d'un missile (ou autre projectile). Utile pour la protection des avions contre les attaques.



## III-2 Mid-IR detectors

---

- Il existe deux types de détecteurs:
  - **Détecteurs thermiques:** Ils sont sensibles à la l'énergie thermique des photons incidents (indirectement aux photons).
  - **Détecteurs photoniques:** Ils sont sensibles directement aux photons incidents. C'est des dispositifs quantiques!



## III-2-1 Thermal detectors

---

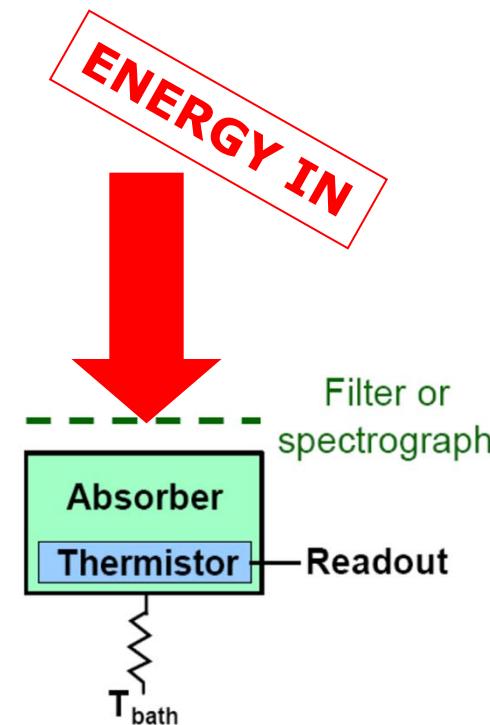
- **Bolomètres micro-bolomètres (bolometer,  $\mu$ -bolometer):**
  - Il convertit l'énergie du rayonnement électromagnétique incident en chaleur au sein de d'un absorbeur.
- **Thermocouples, Thermopiles (thermocouple, thermopile)**
  - Des couples de matériaux dont l'effet Seebeck est utilisé pour la mesure de la température. Ils sont bon marché et permettent la mesure dans une grande gamme de températures.
- **Cellule de Golay (Golay cell)**
  - DéTECTEUR opto-acoustique. Expansion thermique dans un gaz sur une membrane.
- **DéTECTEUR pyroélectriques (pyroelectrical detector)**
  - Un changement de température entraîne une variation de polarisation électrique.
  - Exemple:Triglycine sulfate (TGS and DTGS), On les trouve dans le FTIR.

## III-2-1 Bolometers

Un bolomètre : Détection directe de l'énergie (thermique) reçue

$$V = R(T) \times I$$

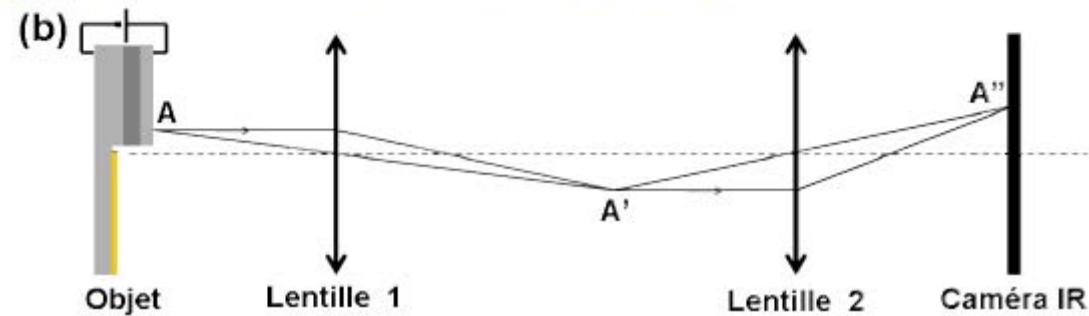
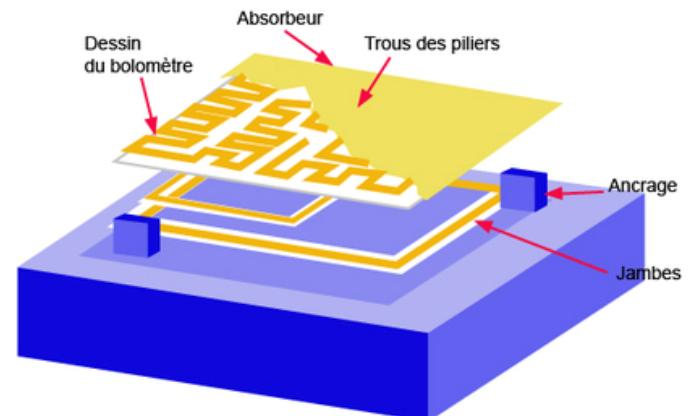
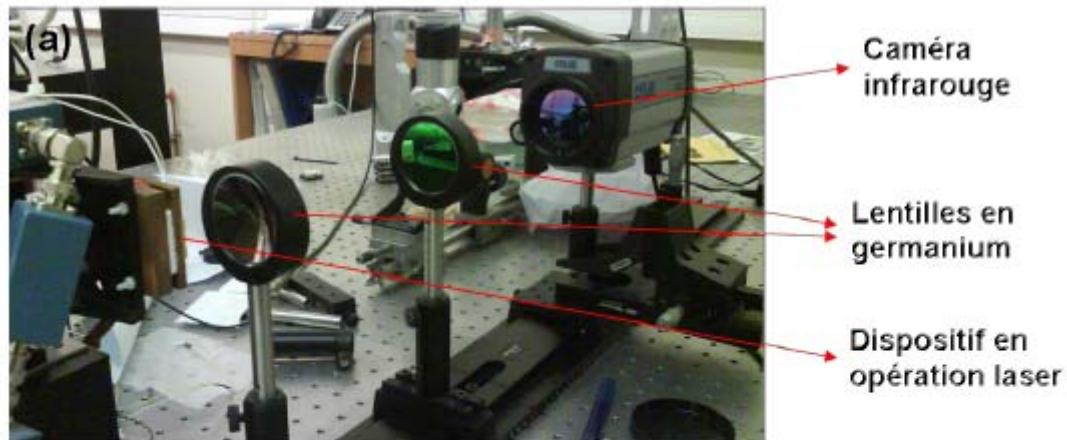
$$R(T) \propto P_s$$



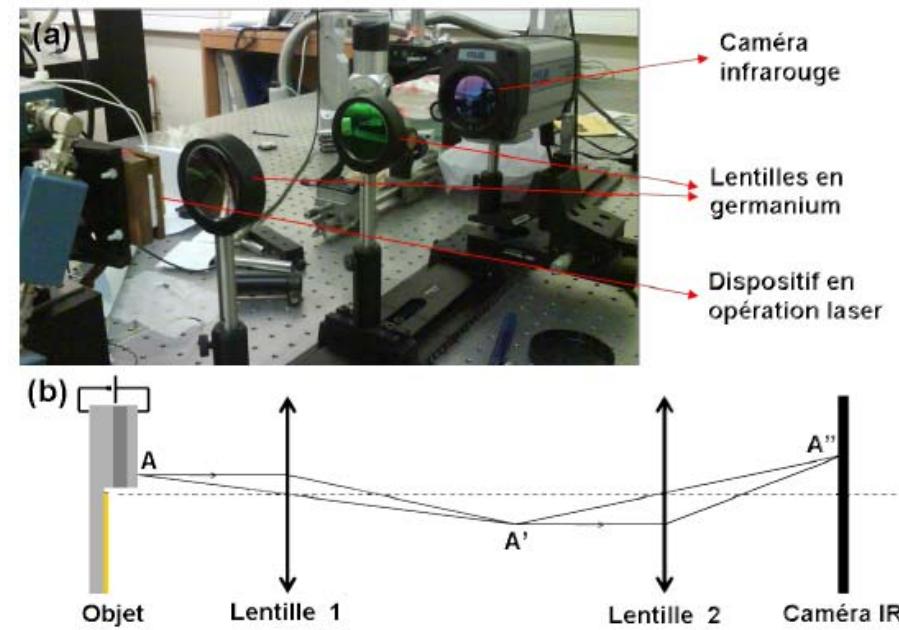
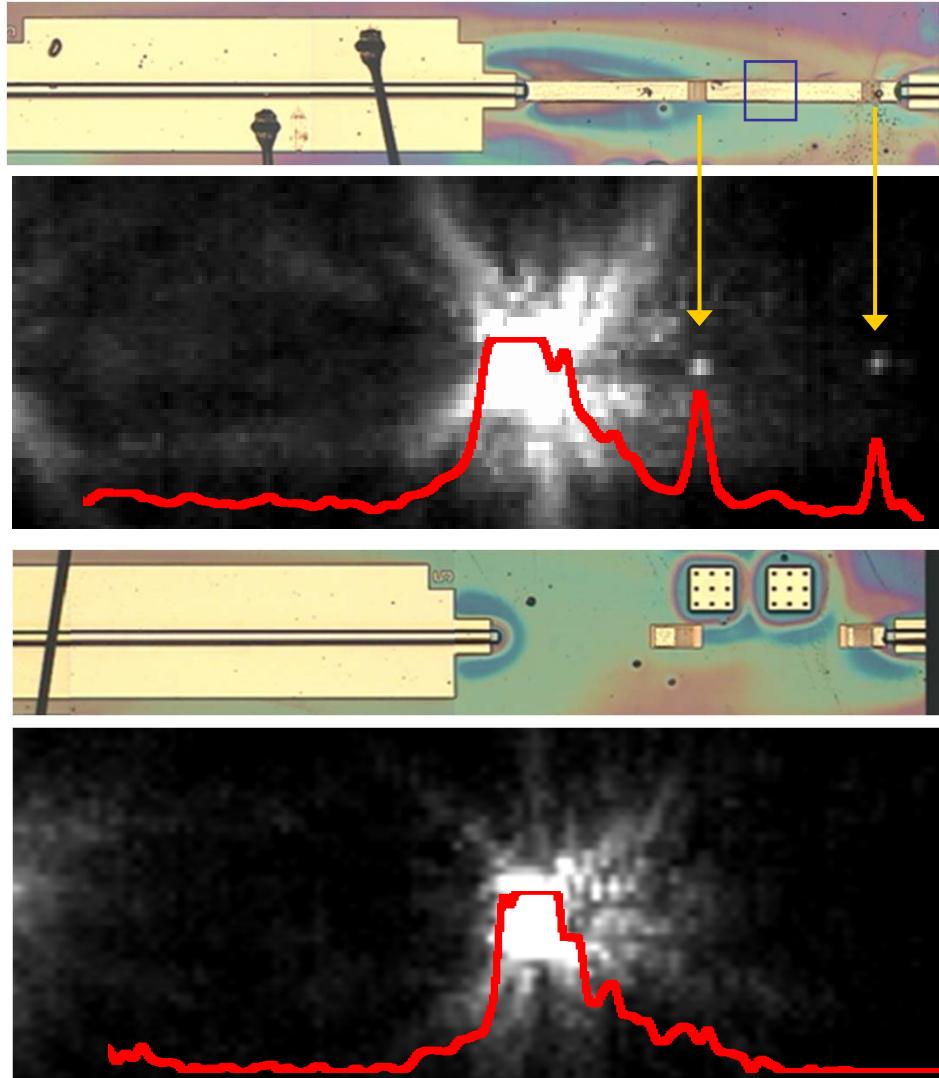
Le photo-voltage est proportionnel à la puissance incidente

## III-2-1 Bolometers

Dans le moyen-infrarouge. Il existe des caméras avec une matrice de  $\mu$ -bolomètres (non refroidis) qui permettent de faire de l'imagerie.

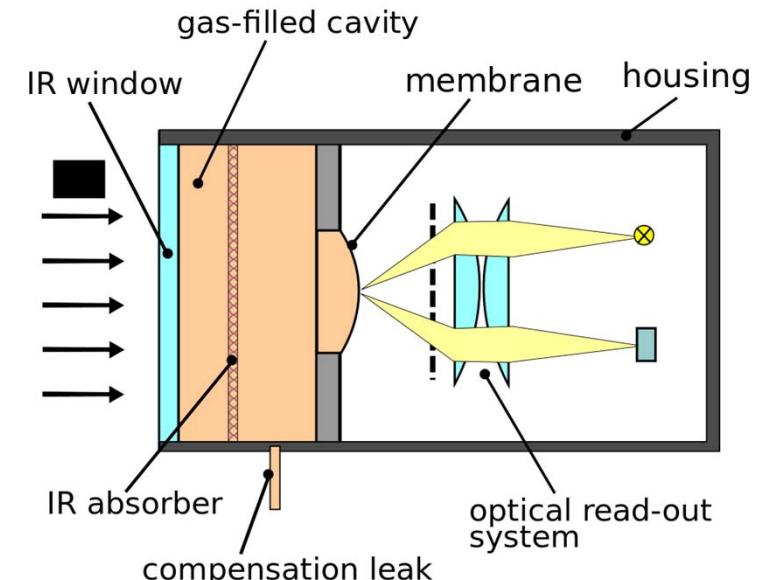


# III-2-1 Bolometers



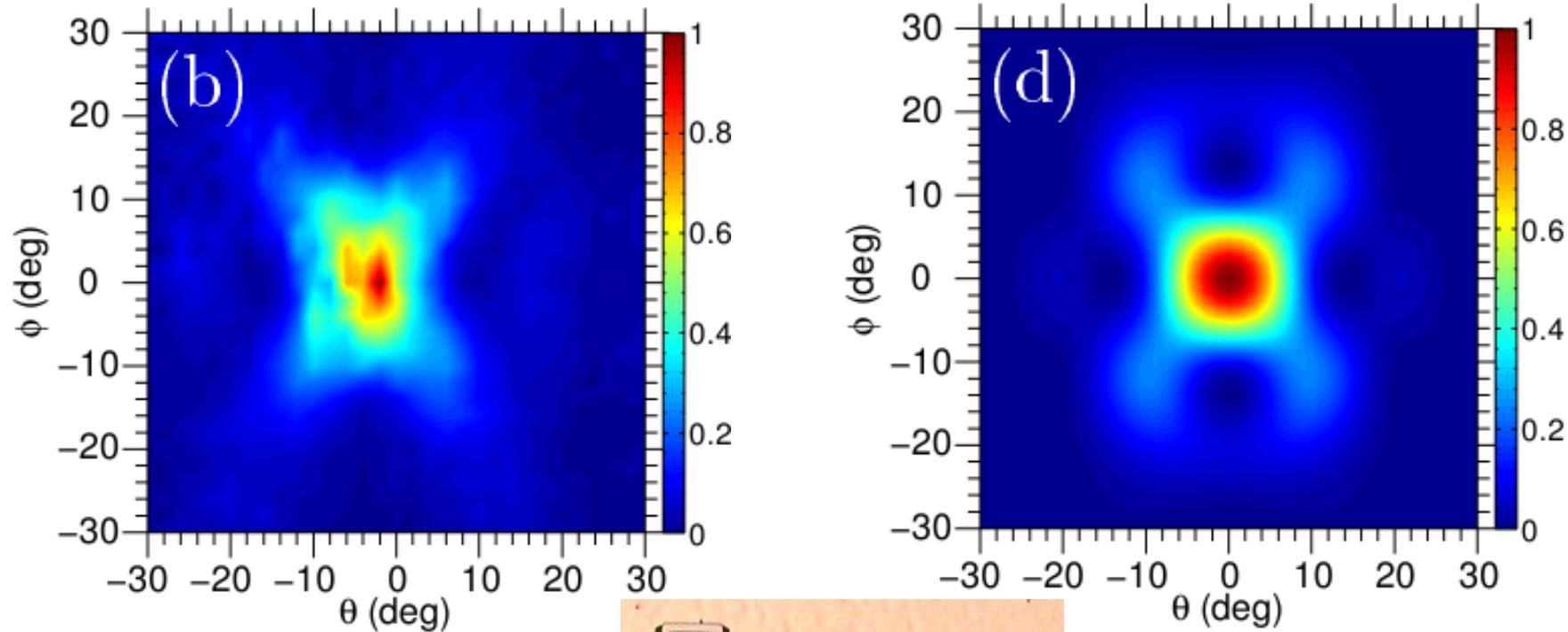
# III-2-1 Golay cell

- Une enceinte remplie de gaz avec un matériau absorbant dans l'infrarouge ainsi que d'un diaphragme flexible ou d'une membrane.
- Lorsqu'un rayonnement est absorbé, le gaz est chauffé causant son expansion => une pression qui déforme la membrane => Détection de la déformation optiquement.
- Grande sensibilité et une réponse plate sur une gamme de fréquence très large.
- Le temps de réponse de l'ordre de 10 ms (pas très rapide).
- Les performances sont dégradées en présence de vibrations mécaniques.



# III-2-1 Golay cell: Far-field measurements

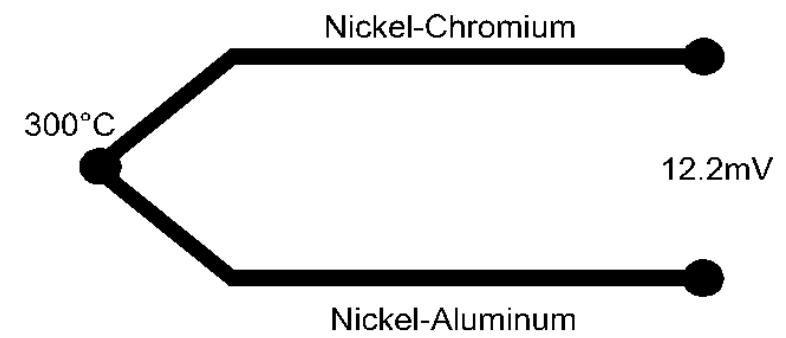
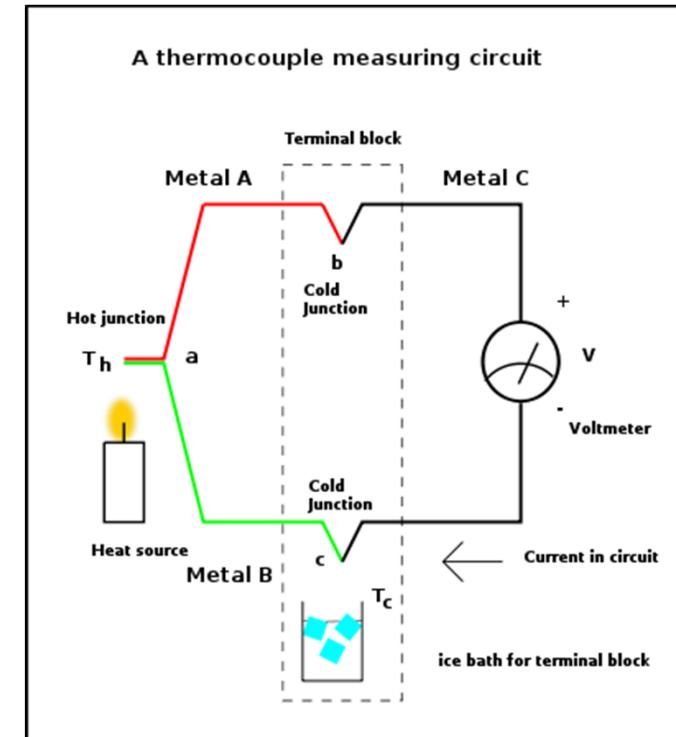
---



Divergence  $\sim 12^\circ \times 8^\circ$  (FWHM)

# III-2-1 Thermocouple - Thermopile

- Basé sur l'effet Seebeck: Une différence de température entre deux matériaux induit une différence de potentiel.
- Ils sont bon marché et permettent la mesure dans une grande gamme de températures.
- Leur principal défaut est leur imprécision : il est relativement difficile d'obtenir des mesures avec une précision inférieure à 0,1 °C - 0,2 °C.
- Une thermopile est composée de thermocouples connectés en parallèle ou en série.
- Les thermopiles génèrent une tension de sortie proportionnelle à une différence ou un gradient de température.



## III-2-2 Photonic detectors

---

- **DéTECTEURS photoniques:** C'est des détecteurs quantiques. Ils sont sensibles directement aux photons incidents.
  - Les temps de réponse et la sensibilité est plus grande que les détecteurs thermiques.
  - Les détecteurs sont en général refroidis pour limiter les bruits thermiques.
  - Les matériaux utilisés sont des semi-conducteurs (en général).
  - Détection Inter-bande (petit « band-gap ») ou inter-sous-bande
- Il existe deux types de détection:
  - **Détecteurs Photoconducteurs:** Changement de la résistance lors d'une illumination => nécessité d'une polarisation électrique.
  - **Détecteurs Photovoltaïques:** Apparition d'un photo courant lors de l'illumination => pas forcément besoin de polarisation.

## III-2-2 Mid-IR detectors

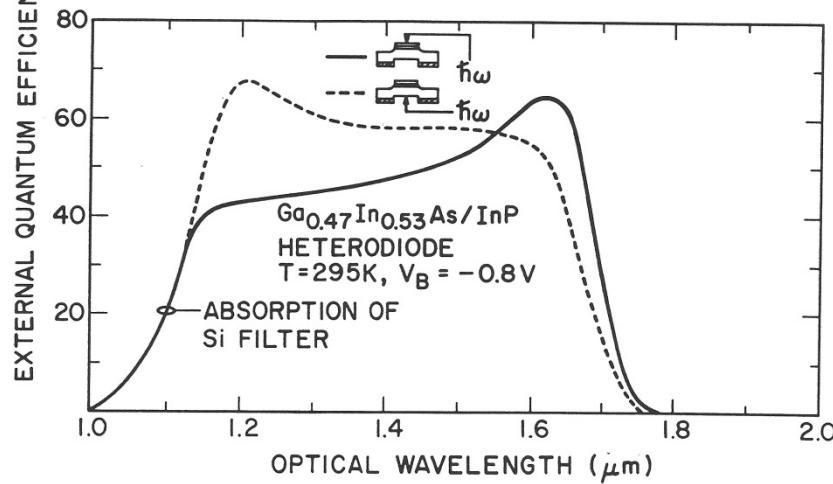
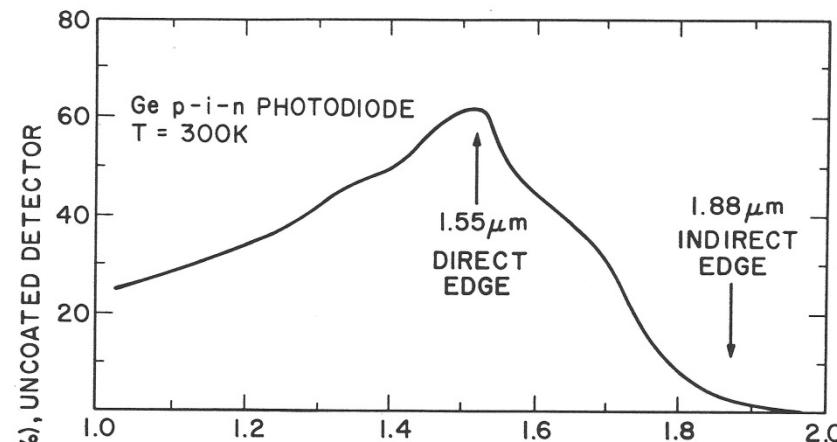
---

### Les détecteurs Inter-bandes

	type	Spectral range(μm)	Wavenumber(cm-1)
Indium gallium arsenide (InGaAs)	photodiode	0.7–2.6	14300–3800
Germanium	photodiode	0.8–1.7	12500–5900
Lead sulfide (PbS)	photoconductive	1–3.2	10000–3200
Lead selenide (PbSe)	photoconductive	1.5–5.2	6700–1900
Indium antimonide (InSb)	photoconductive	1–6.7	10000–1500
Indium arsenide (InAs)	photovoltaic	1–3.8	10000–2600
Platinum silicide (PtSi)	photovoltaic	1–5	10000–2000
Indium antimonide (InSb)	photodiode	1–5.5	10000–1800
Mercury cadmium telluride (MCT, HgCdTe)	photoconductive	0.8–25	12500–400
Lithium tantalate (LiTaO <sub>3</sub> )	pyroelectric		
Triglycine sulfate (TGS and DTGS)	pyroelectric		

## III-2-2 Mid-IR detectors

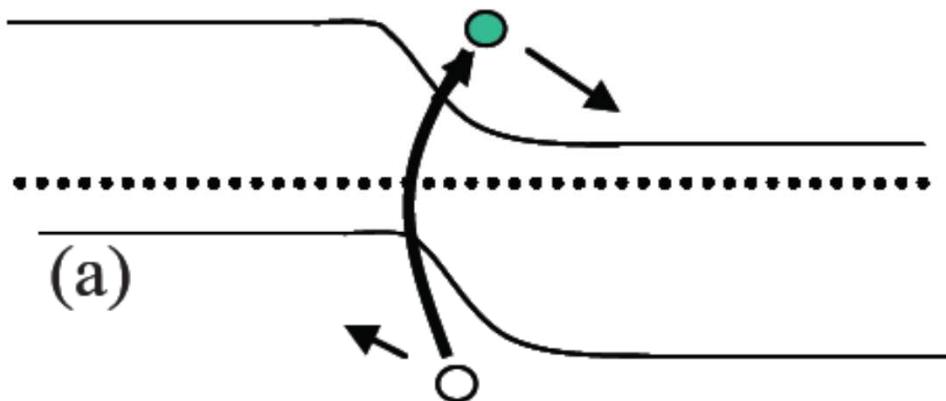
### Courbes de réponse dans le proche IR



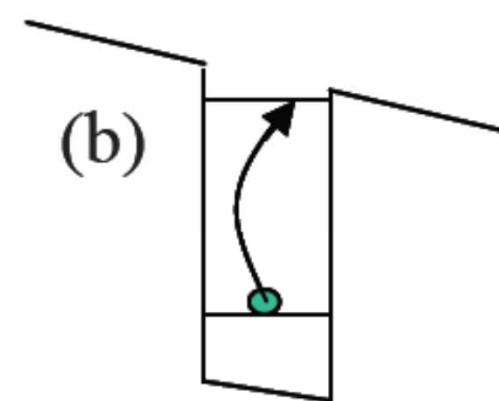
## III-2-2 Mid-IR detectors

---

Detection inter-bande: Les photons incidents font transiter les électrons entre la bande de valence et la bande de conduction.



Détection inter-sous-bande: Les photons incidents font transiter les électrons entre sous niveaux de la bande de conduction (en général)

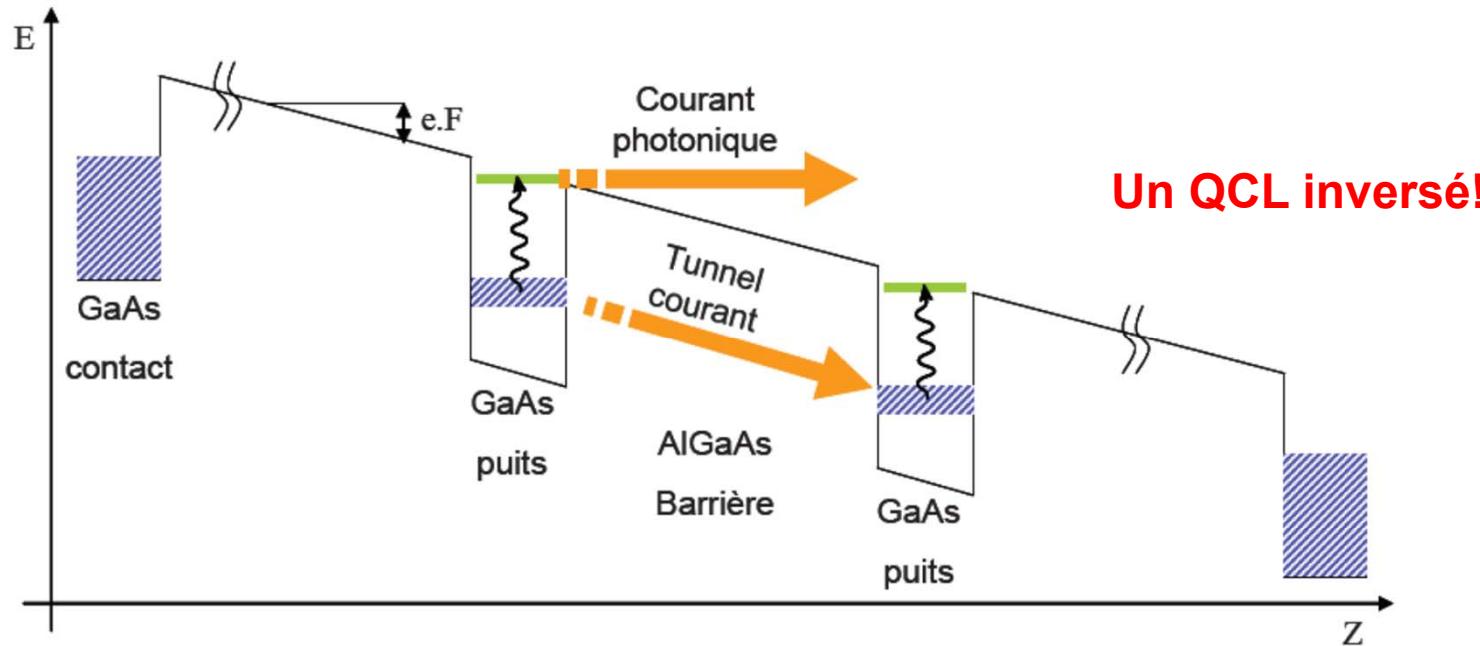


## III-3 Inter-sub-band detector

---

- **QWIP: (Quantum Well Infrared Photodetector)**
  - Les détecteurs QWIP sont de type unipolaire (le plus souvent n) et reposent sur des transitions entre niveaux discrets de la bande de conduction L'électron dérive ensuite jusqu'à l'électrode, au sein du continuum. Cette filière profite de la maturité technologique III-V
  - Reposent sur les mêmes phénomènes physiques que les laser à cascade quantiques (QCL).
  - Technologie en production industrielles depuis une dizaine d'années.
- **Dérivés des QWIPs**
  - QCD: Quantum Cascade Detector
  - QDIP: Quantum Dot Infrared Photodetector

## III-3-1 QWIP: How it works



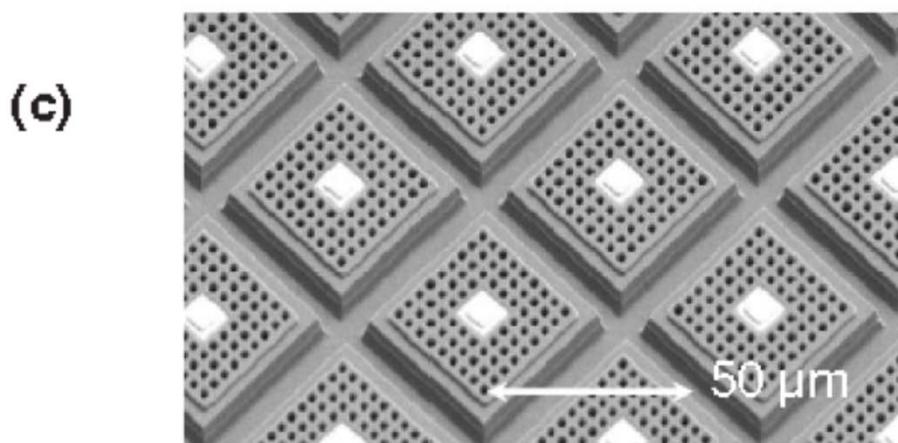
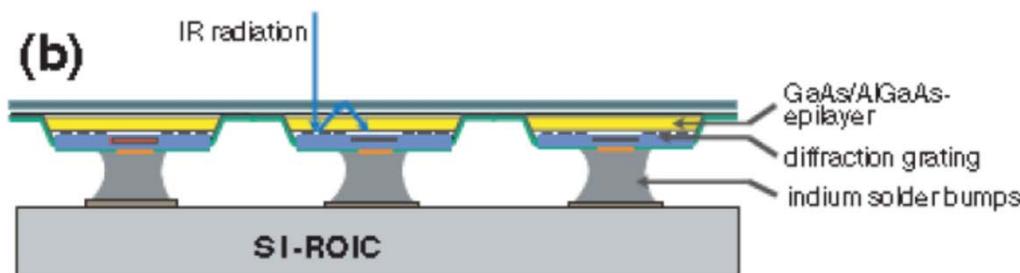
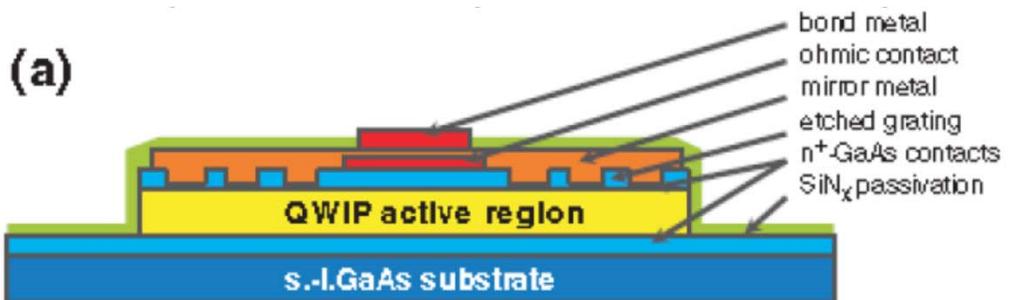
- Les QWIPs permettent de détecter des longueurs d'onde entre  $3\mu\text{m}$  et le THz ( $>30\mu\text{m}$ ).
- C'est un empilement de plusieurs dizaines de périodes de puits et de barrières (ex:GaAs/AlGaAs), prises en sandwich entre deux contacts dopés en GaAs.
- Le QWIP est un photoconducteur, il nécessite donc d'être polarisé pour fonctionner.
- Première démonstration en 1986 (Bell Labs).

## III-3-1 QWIPs over the world

---

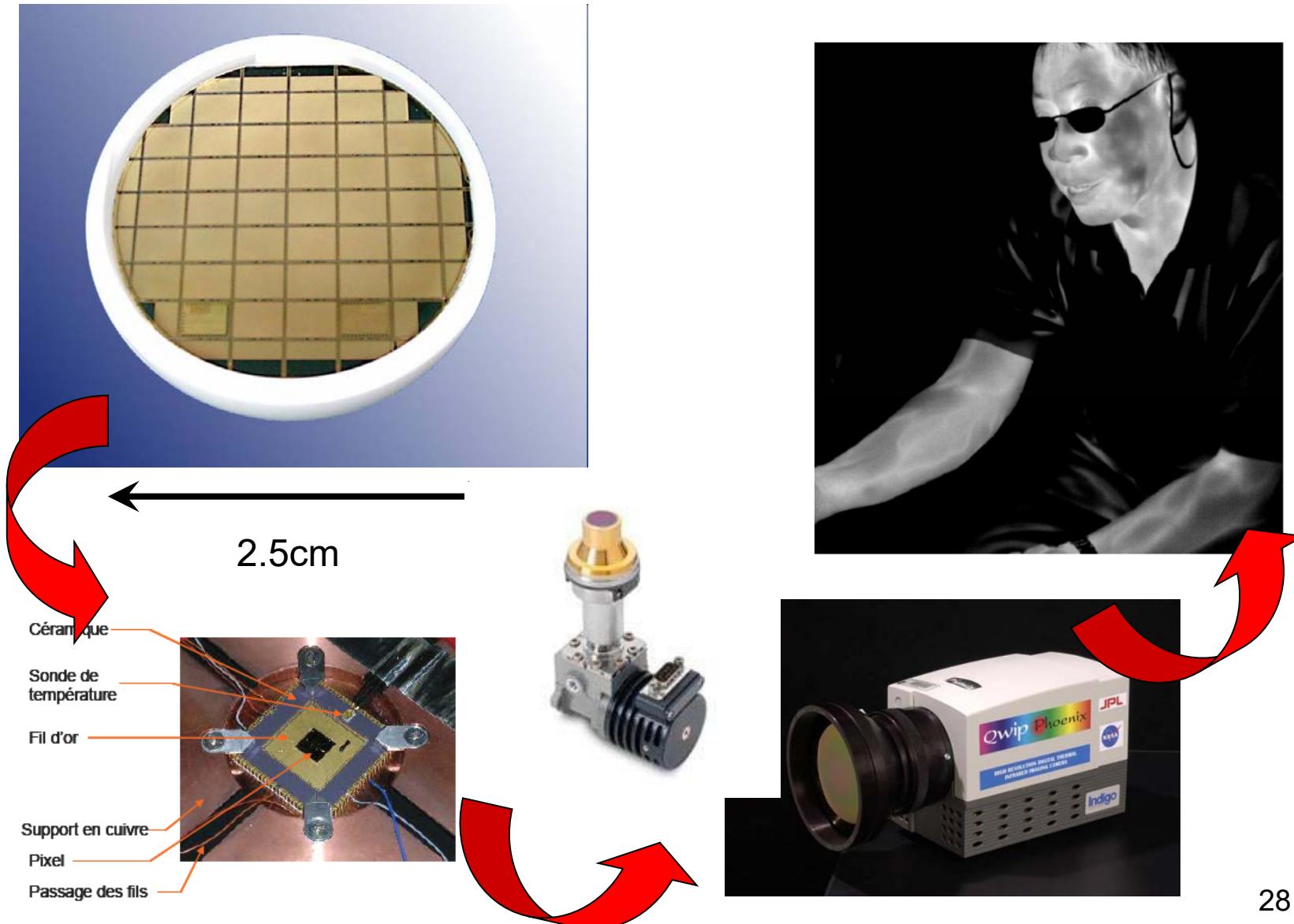


# III-3-1 QWIP: Fully developed technology



- **Plan focal:**
  - Matrice de composants QWIPs qui permet de faire une image 2D d'une scène.
- **Fabrication en deux parties:**
  - Partie traitement du signal électronique technologie Si.
  - Partie capteur photonique, technologie III-V.
- **Couplage efficace de la lumière incidente:** Réseau de diffraction.

# III-3-1 QWIP: Fully developed technology



# III-3-1 Paris by night!

---



# III-3-1 QWIP: Fully developed technology

## CATHERINE-XP FLIR by Thales Optonique (TOSA)

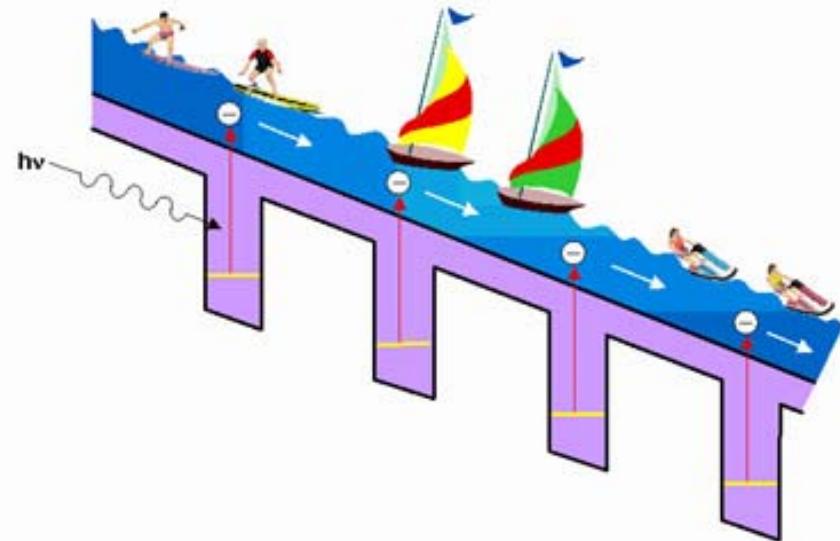
Full production since 2006  
>>2500 arrays delivered



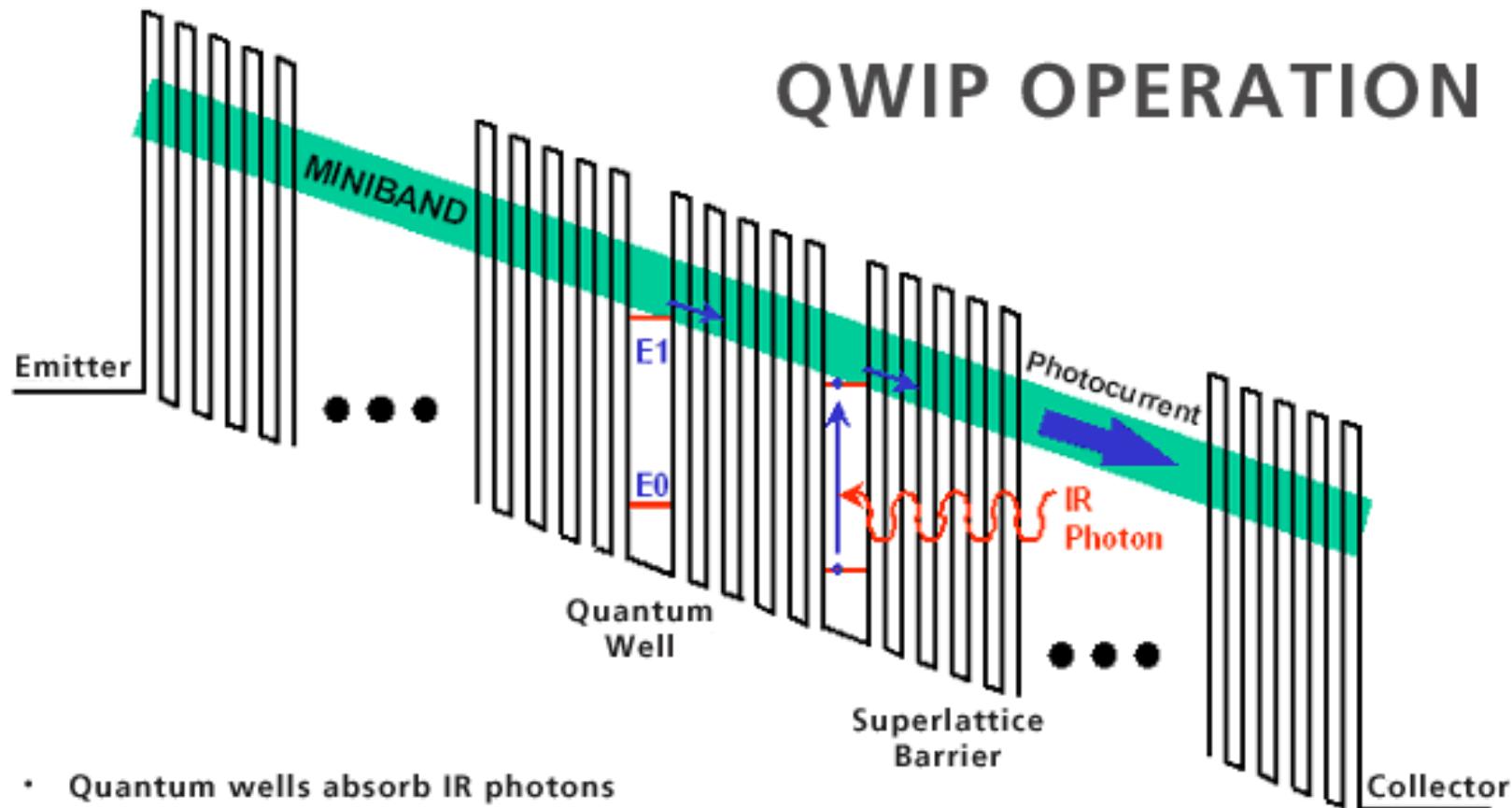
## III-3-2 QWIP: How it works

---

- Dark current
- Photo current
- Noise
- Performances and figure of merit



## III-3-2 QWIP: How it works



- Quantum wells absorb IR photons
- Photoelectrons are excited from E<sub>0</sub> to E<sub>1</sub>
- Electric field sweeps out photoelectrons
- Miniband/continuum provides transport channel
- E<sub>0</sub>, E<sub>1</sub>, and miniband controlled by material design

## III-3-2 QWIP: factor of merit

Grandeur	Formule	Définition	Valeur typique
R	$R = \frac{\eta g e}{h\nu}$	Traduit la capacité du détecteur à transformer un flux d'énergie lumineuse en courant.	$1\text{mA}\cdot\text{W}^{-1} \rightarrow \text{qq A}\cdot\text{W}^{-1}$
D*	$D^* = \frac{R\sqrt{A}}{DSB}$	Inverse du flux pour lequel le rapport signal sur bruit vaut 1, multiplié par la racine de la surface de détection et la racine de la bande passante.	$10^9 \rightarrow 10^{13} \text{jones}$ ( $\text{W}^{-1}\cdot\text{cm}\cdot\sqrt{\text{Hz}}$ )
NETD		Contraste thermique d'une scène pour laquelle le rapport signal à bruit vaut 1.	$10\text{mK} \rightarrow 300\text{mK}$

tab. 1-2 Fonction de mérite des QWIP.  $\eta g$  est le rendement quantique externe,  $h\nu$  l'énergie de la transition, DSB la densité spectrale de bruit et A l'air d'un pixel.

[Source: Thèse E. LHUILLIER]

R: réponse (A/W)

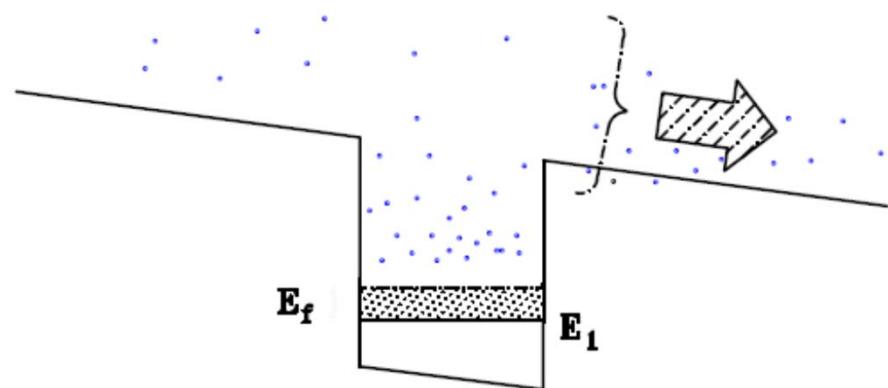
D\*: déTECTIVITé (Jones)

NETD: Noise Equivalent Temperature Difference (K)

## III-3-2 QWIP: Dark current

---

Le courant d'obscurité (Dark Current) est le courant électrique résiduel d'un photo détecteur en l'absence d'éclairement lumineux => courant non-utile pour la détection.

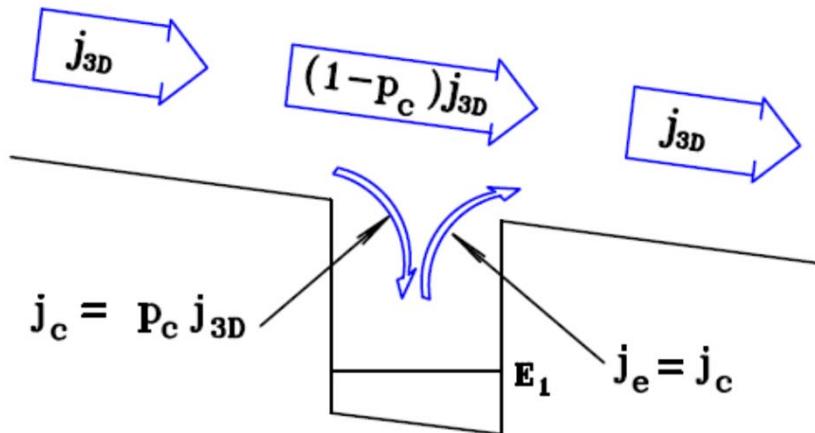


### Origines:

- Thermiques: L'agitation thermique (phonons), fait passer les électrons de l'état fondamental au continuum => Si  $T^\circ$  augmente le bruit augmente.
- Transport tunnel: les électrons passent par effet tunnel les barrières (comme dans les QCL).

## III-3-2 QWIP: Dark current

Un modèle physique simple



$$J_{Dark} = J_{3D}$$

$$J_e = J_c = p_c J_{3D}$$

Où

- $J_e$  est le courant lié à l'émissivité des électrons provenant des trous.
- $J_c$  est le courant lié au capture des électrons dans les trous.
- $p_c$  est la probabilité de capture des électrons dans les trous.
- $J_{3D}$  est le courant global qui traverse la structure.

## III-3-2 QWIP: Dark current

---

### Courant d'obscurité: Un modèle un peu plus précis

$$J_{Dark} = eN_{3D}\nu(F)$$

$$\nu(F) = \frac{\mu F}{\left[1 + (\mu F / v_{eat})^2\right]^{1/2}}$$

$$N_{3D} \approx 2 \left( m_b k_B T / 2\pi \hbar^2 \right)^{3/2} \exp\left(-E_{act}/k_B T\right)$$

$$E_{act} = V_b - (E_1 + E_f)$$

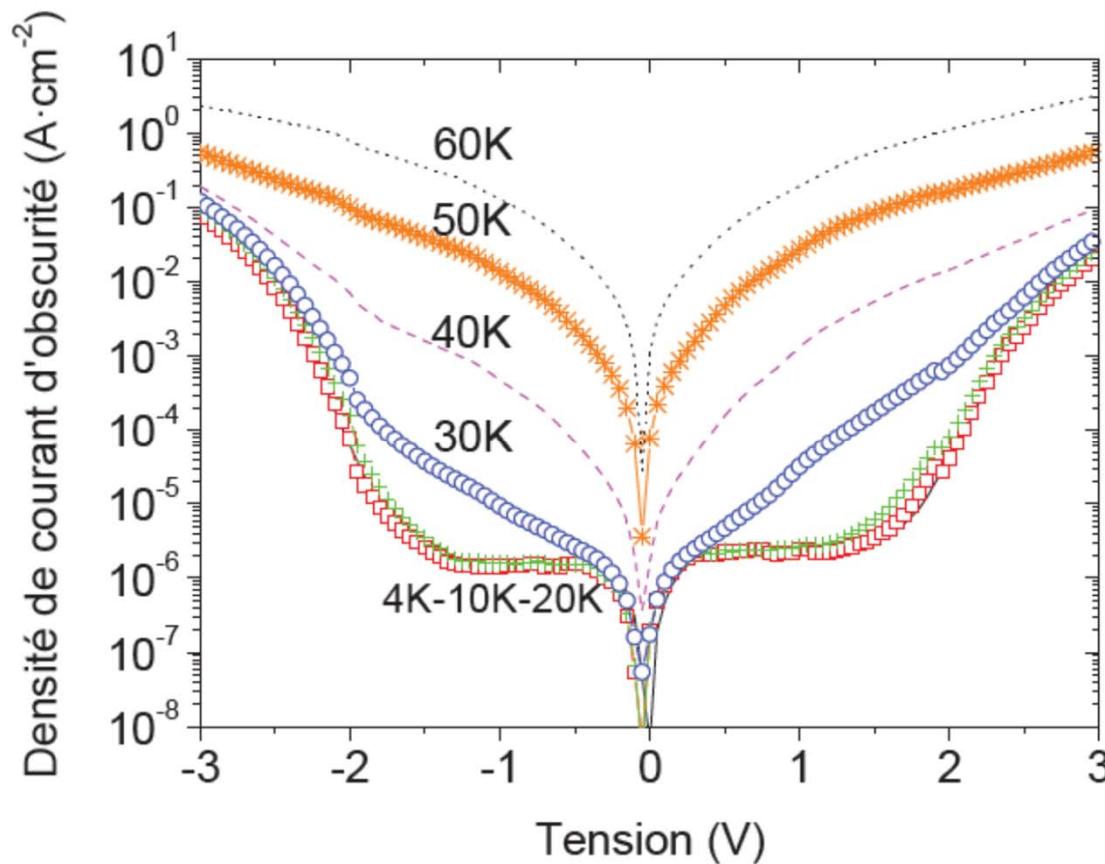
Où:

- $F$  est le champ électrique moyen
- $\mu$  est la mobilité des porteurs
- $v_{eat}$  vitesse moyenne des porteur de charge

$$J_{Dark} \propto \exp\left(-E_f/k_B T\right)$$

## III-3-2 QWIP: Dark current

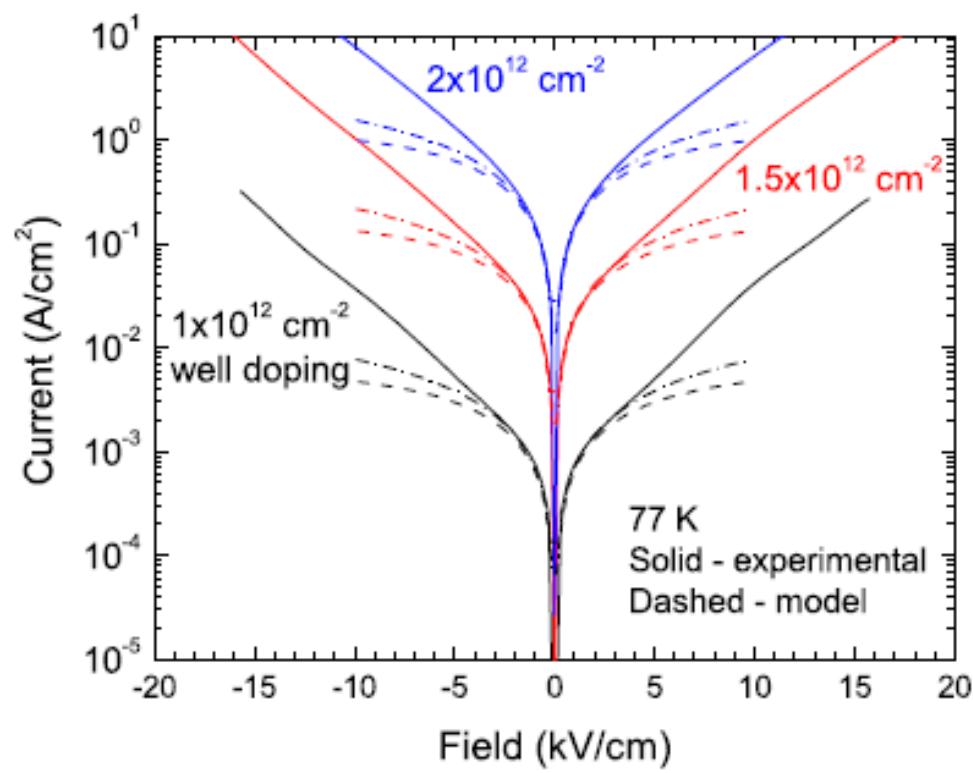
Exemple de mesure du courant d'obscurité en fonction de la température



Source Thèse  
Emmanuel LHUILLIER

## III-3-2 QWIP: Dark current

$N_D$ ( $\text{cm}^{-2}$ )	$x$	$L_w$ (nm)	$L_b$ (nm)	$V_b$ (eV)	$E_0$ (eV)	$E_{ex}$ (eV)
$1 \times 10^{12}$	0.200	6.6	25.0	0.18	0.049	0.015
$1.5 \times 10^{12}$	0.192	6.6	25.0	0.17	0.048	0.017
$2 \times 10^{12}$	0.197	5.9	24.0	0.18	0.056	0.020

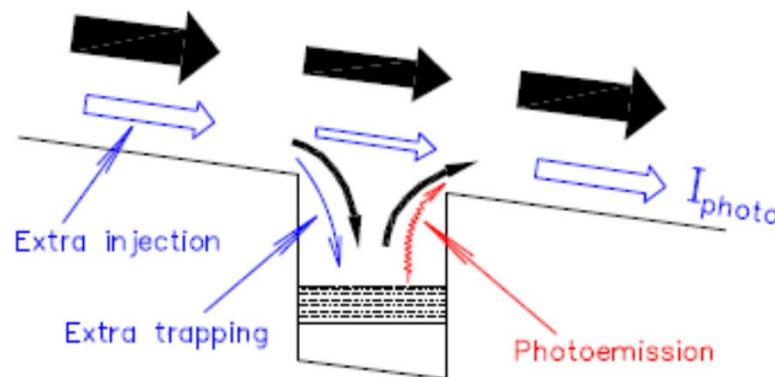
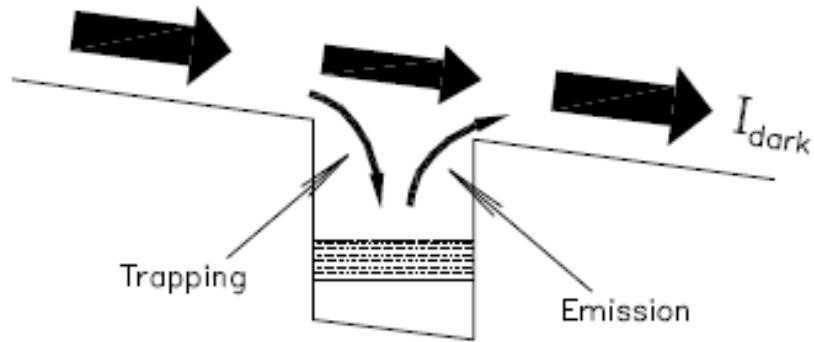


Solid – experiment and dashed - model

Exemple de mesure du courant d'obscurité en fonction du dopage

Source H. C. Lui book

## III-3-2 QWIP: Photo current



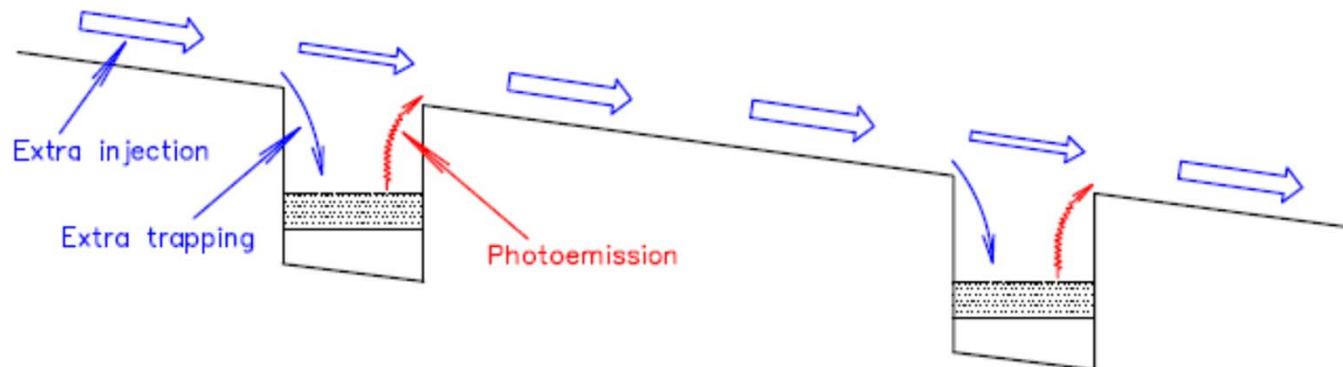
### Photocurrent:

- Partie du courant induite par l'absorption d'un photon dans la transition inter-sous-bande.
- On parle aussi de gain de photoconduction, il peut être positif ou négatif.
- Gain photo-conductif positif: la résistance du dispositif diminue quand les photons sont absorbés.

**C'est le courant utile pour la détection.**

## III-3-2 QWIP: Photoconductif gain

---



Photocurrent value independent of number of wells

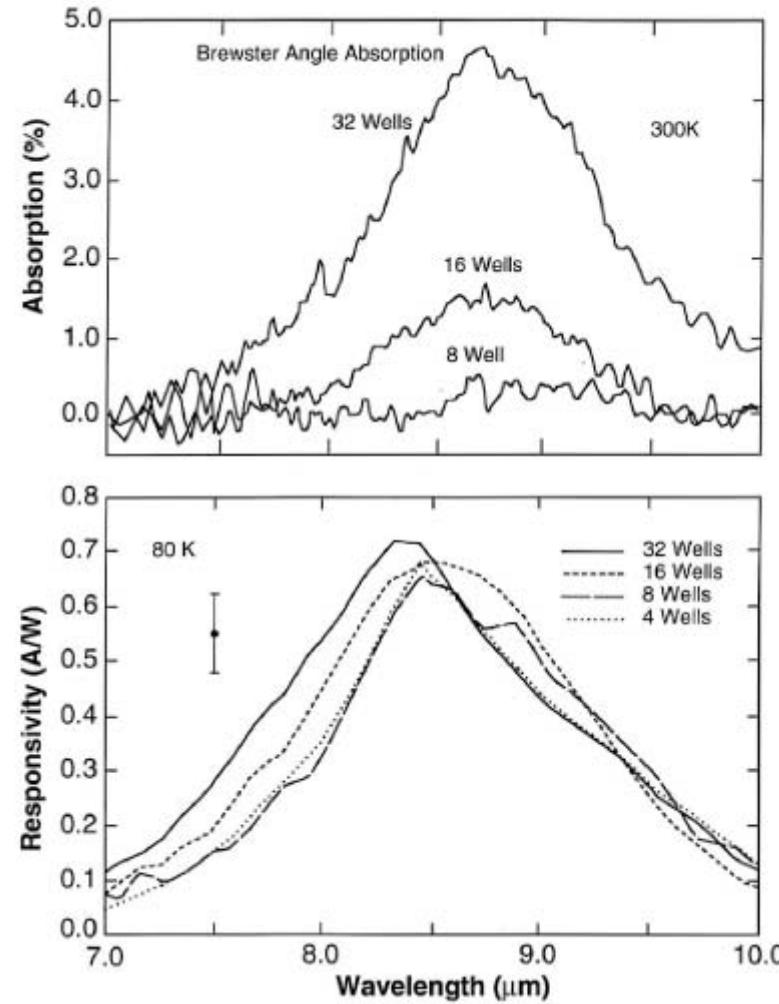
**Responsivity:**

$$R_i = (e/h\nu) g_{photo} \eta_{abs}$$

where  $g_{photo} = 1/Np_c$

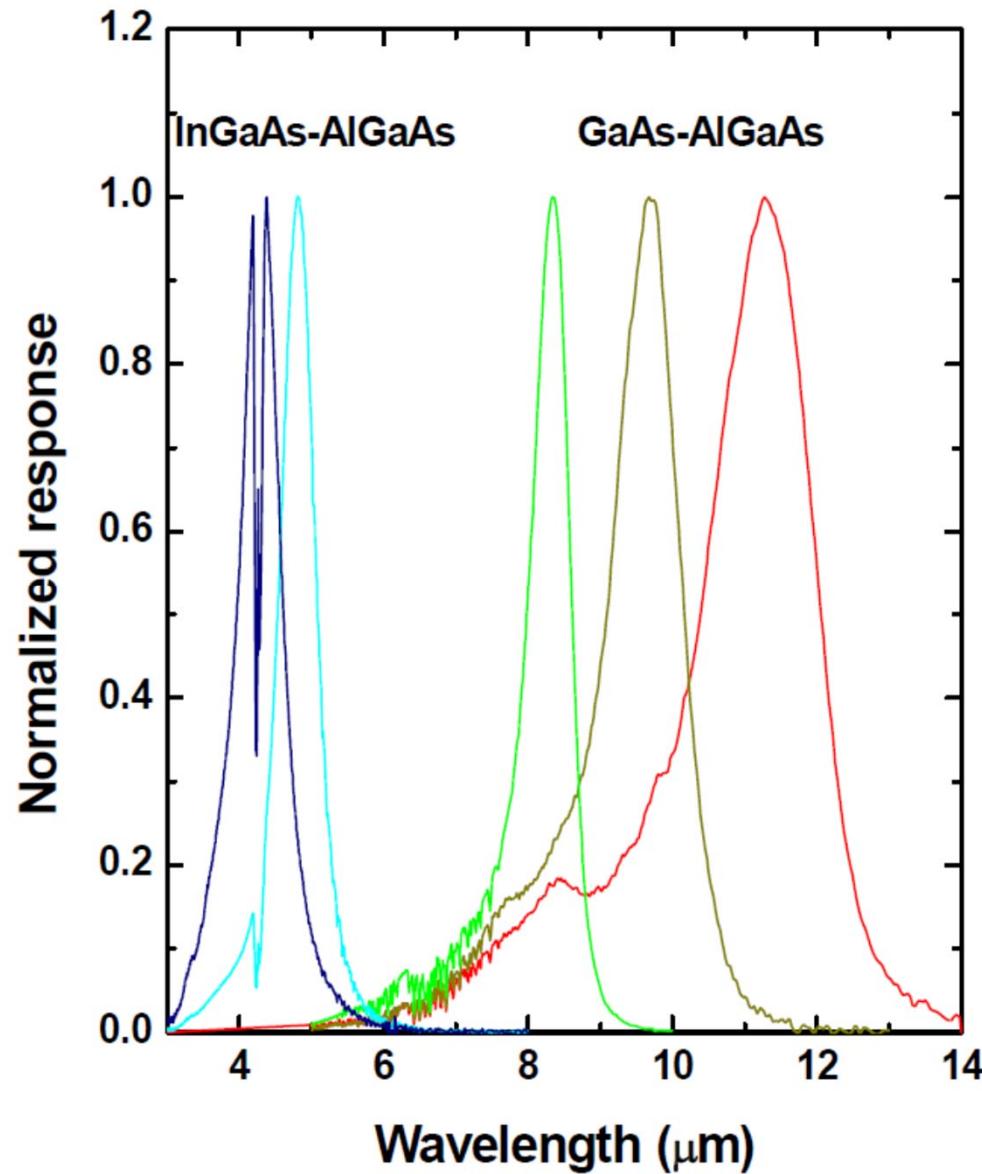
## III-3-2 QWIP: Photo current

Absorption increases with number of wells, whereas responsivity is constant



H. C. Liu book

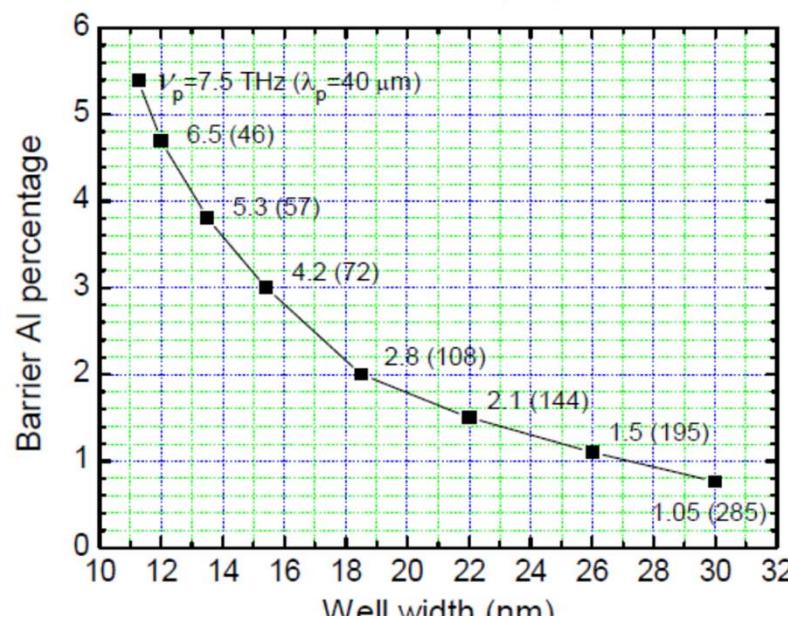
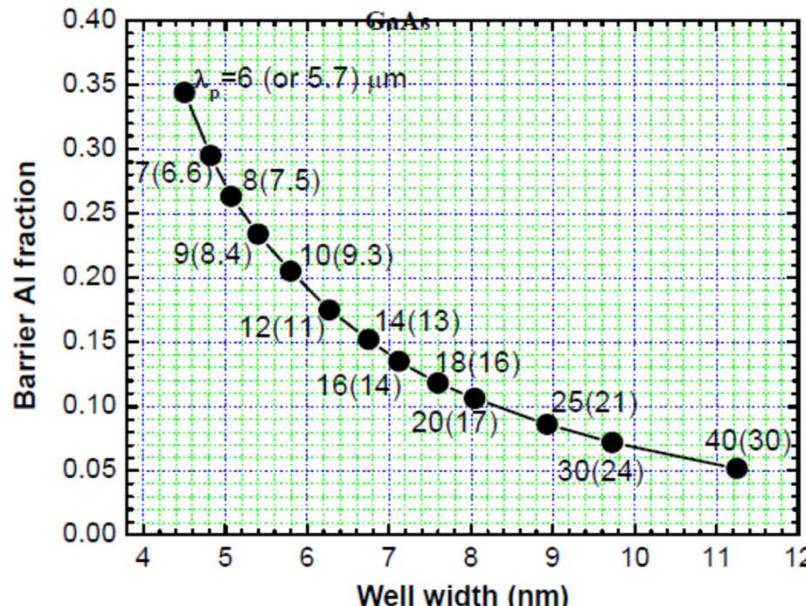
## III-3-2 QWIP: Tunable $\lambda$



- Dans un QWIP standard, un dessin optimum est celui qui a le premier état excité en résonance avec le niveau de la barrière.
- Cette configuration donne à la fois une large absorption et une extraction rapide des électrons (photo-courant).
- Le band-offset entre les puits et les barrières ajuste la longueur d'onde de fonctionnement.

H. C. Liu book

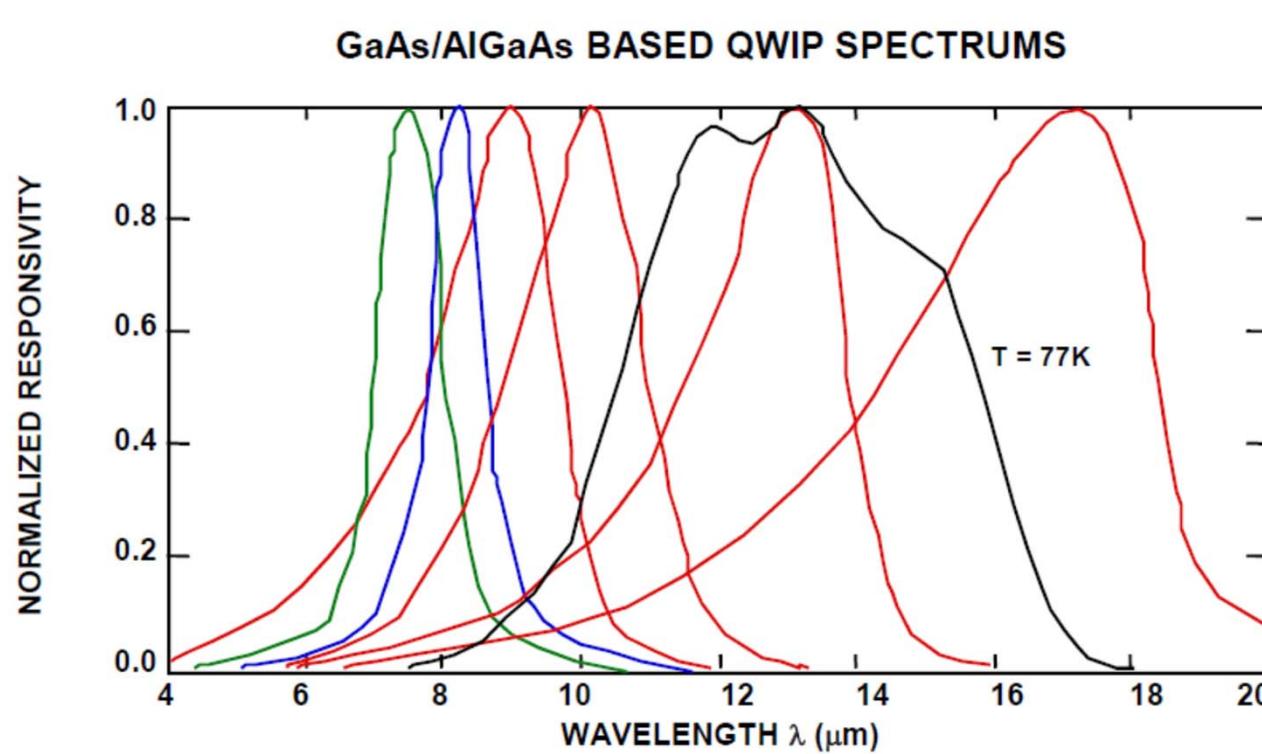
## III-3-2 QWIP: Tunable $\lambda$



- Dans un QWIP standard, un dessin optimum est celui qui a le premier état excité en résonance avec le niveau de la barrière.
- Cette configuration donne à la fois une large absorption et une extraction rapide des électrons (photo-courant).
- Le band-offset entre les puits et les barrières ajuste la longueur d'onde de fonctionnement.

H. C. Liu book

## III-3-2 QWIP: Tunable $\lambda$

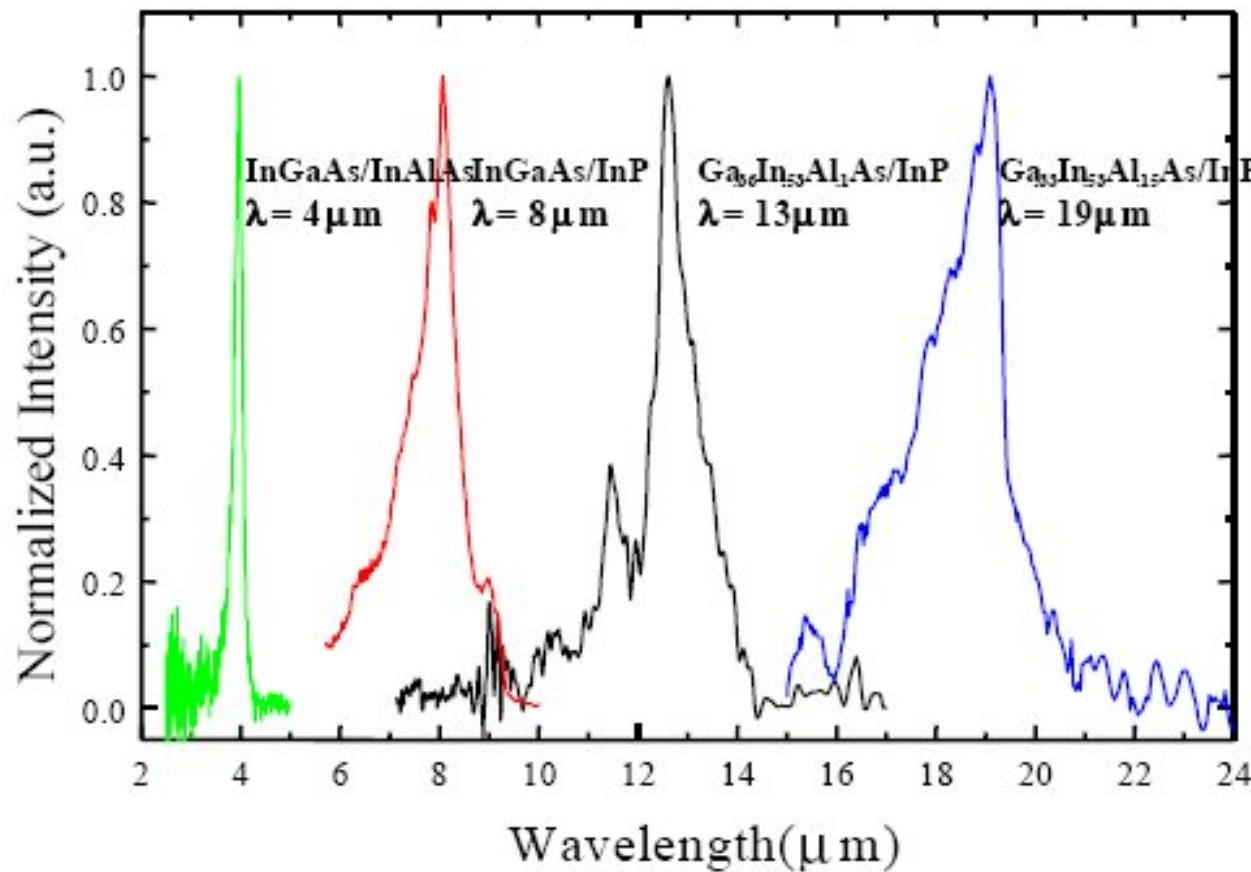


H. C. Liu book

### Exemple: Système GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As

- Couvre la gamme du moyen infrarouge  $\lambda > 6 \mu\text{m}$  (et même au delà)
- Ajuster l'alliange dans la barrière pour ajuster la réponse spectrale.
- Absorption naturellement étroite  $\Delta\lambda/\lambda \sim 10\%$
- Possibilité de faire une détection large bande ou multi spectrale.
- Technologie sur substrat 4 et 6 puces, fabrication maîtrisée à une échelle industrielle.

## III-3-2 QWIP: Tunable $\lambda$



Il existe d'autres systèmes de matériaux pour les QWIPs:

- InGaAs/InP.
- InGaAs/InAlAs.
- AlGaNAs/InP.
- etc...



## III-3-2 QWIP: DéTECTIVITÉ et condition BLIP

---

### **BLIP:** Background Limited IR Performance

Les paramètres importants pour les caractéristiques du détecteur sont:

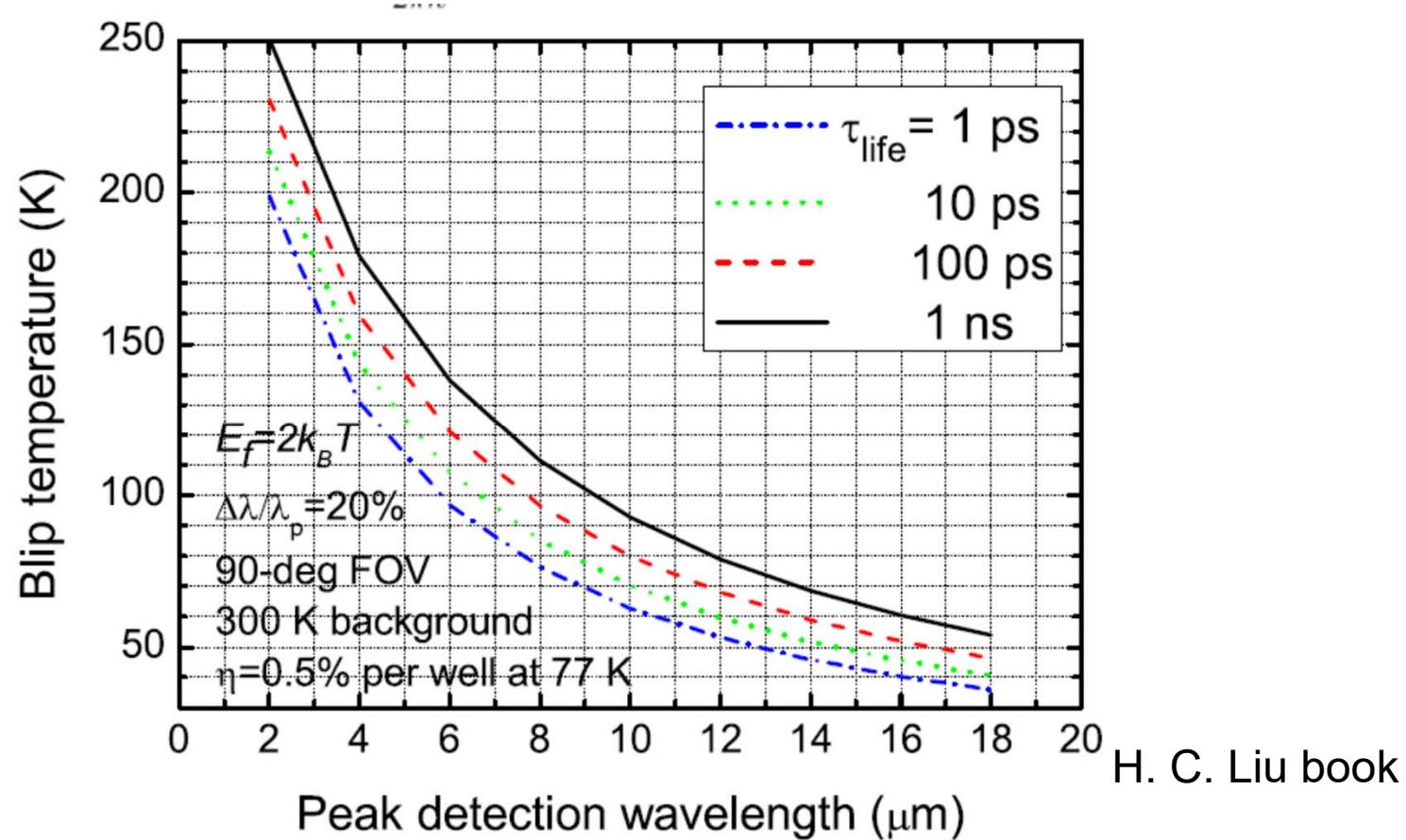
- **La déTECTIVITÉ (Detectivity) ( $D^*$ ):**

$$D^* = \frac{R\sqrt{A}}{DSB}$$

- **La température BLIP ( $T_{BLIP}$ ):** Le régime BLIP est défini comme étant le régime où le bruit thermique est prédominant dans le photo-courant. Pour avoir une sensibilité maximale il est préférable de faire fonctionner le détecteur en dessous de  $T_{BLIP}$ .

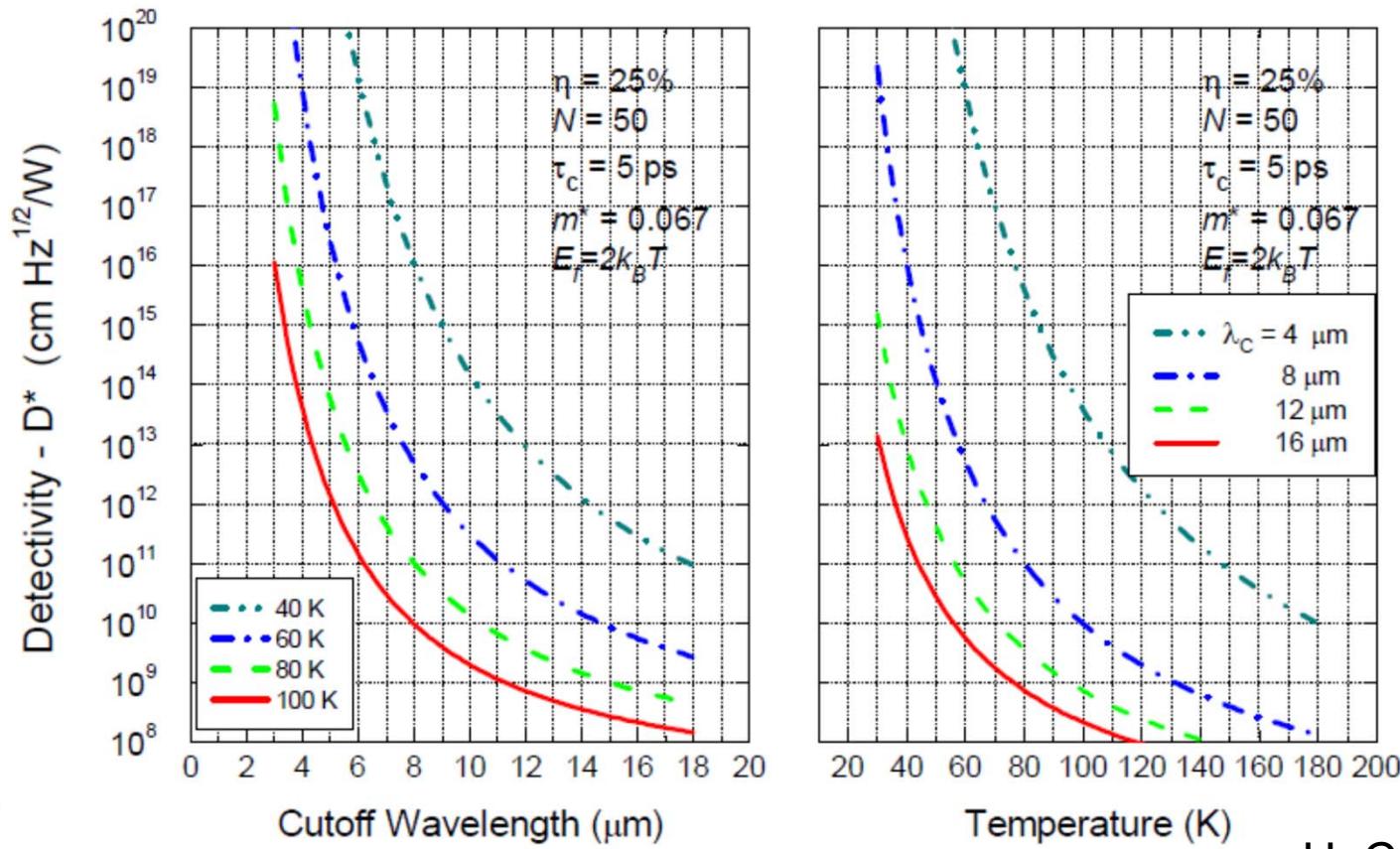
## III-3-2 QWIP: Detectivity and BLIP condition

$T_{BLIP}$  en fonction de la longueur d'onde (GaAs/AlGaAs)



## III-3-2 QWIP: DéTECTIVITé et condition BLIP

D\* en fonction de la longueur d'onde et de la température  
(GaAs-AlGaAs)

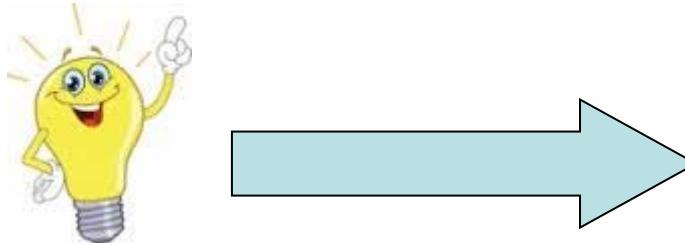


H. C. Liu book

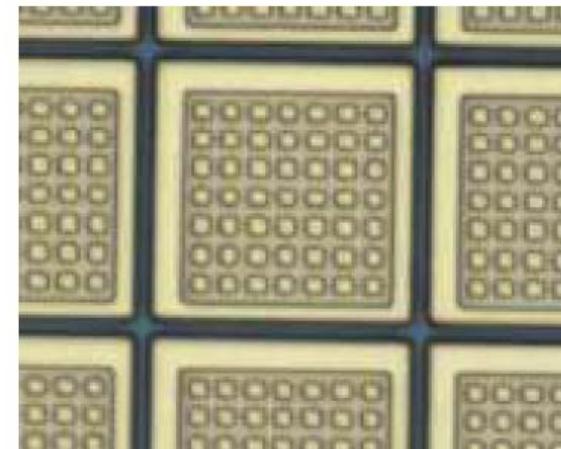
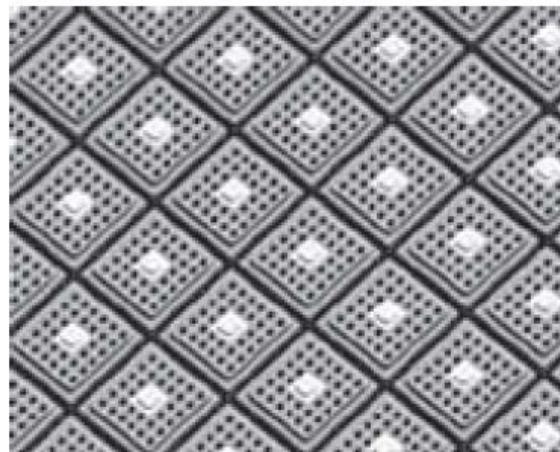
## III-3-2 QWIP: Selection low

---

**Règle de sélection d'une transition inter-sous-bande:** n'autorise pas l'absorption du champ électromagnétique en incidence normale!



Utilisation d'un réseau de couplage gravé à la surface



**Réseau de Bragg : condition de résonance au second ordre**

# III-3-3 QWIP: Steps of fabrication

---

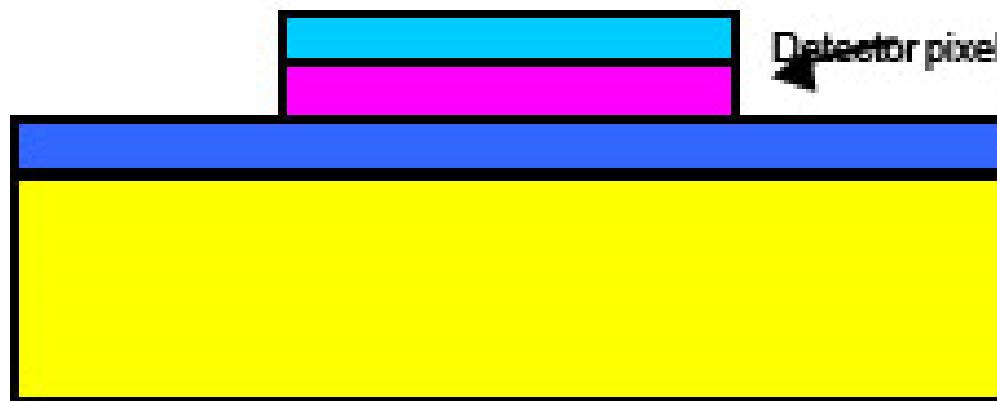
1.



# III-3-3 QWIP: Steps of fabrication

---

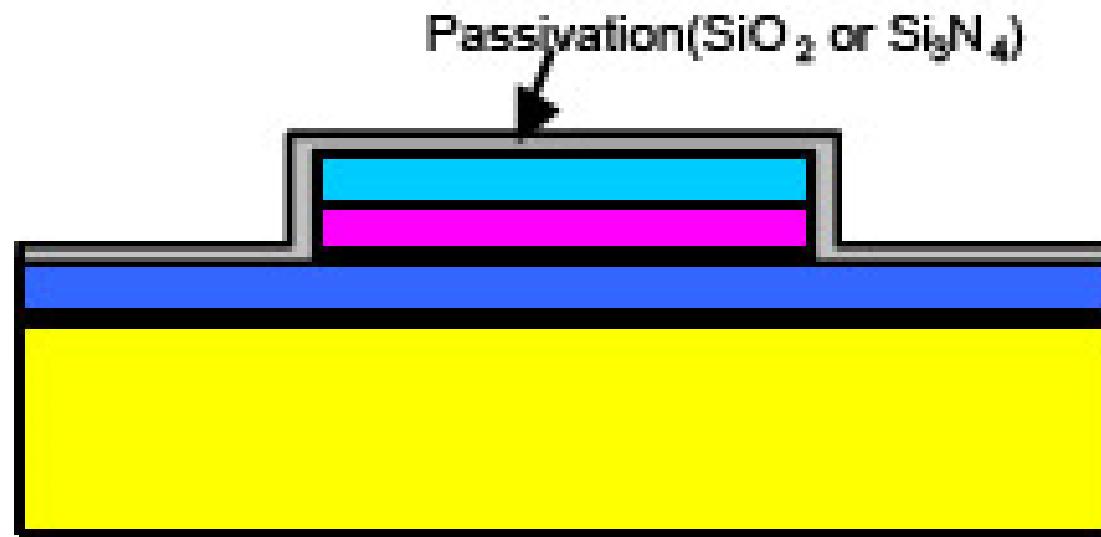
2.



### III-3-3 QWIP: Steps of fabrication

---

3.



# III-3-3 QWIP: Steps of fabrication

---

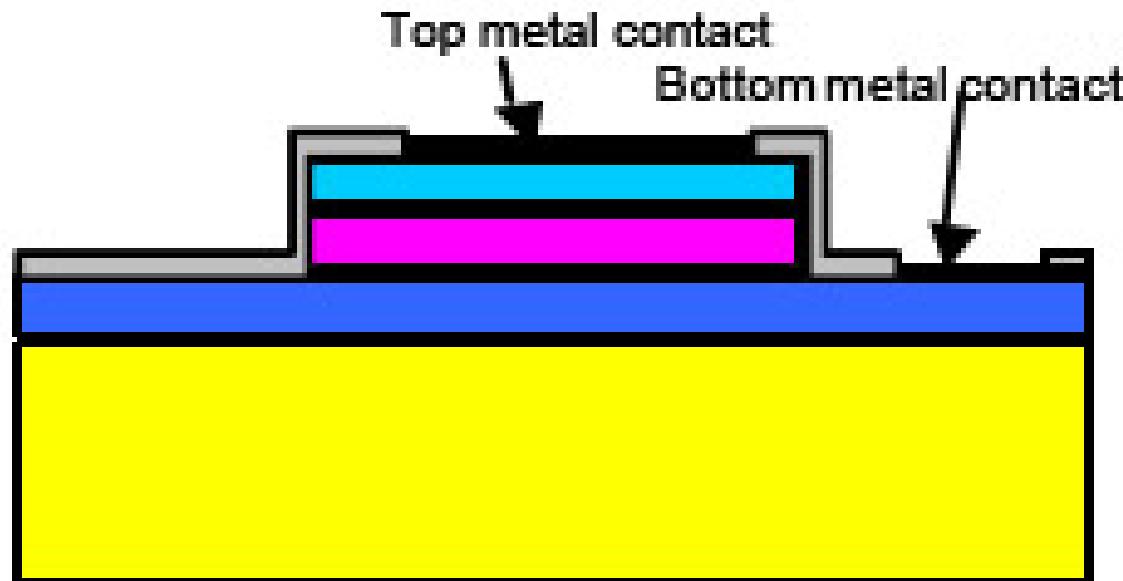
4.



## III-3-3 QWIP: étapes de fabrication

---

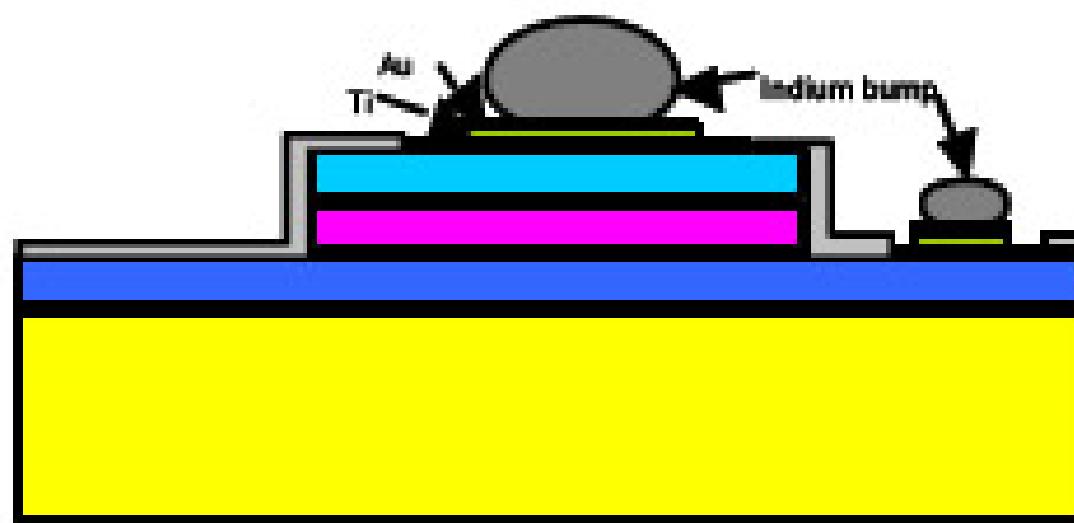
5.



# III-3-3 QWIP: Steps of fabrication

---

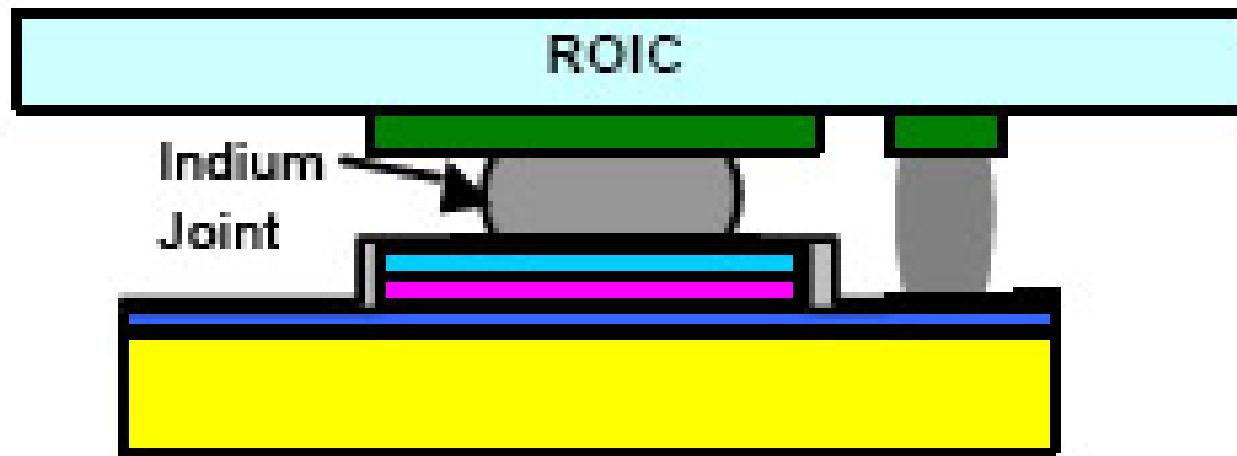
6.



# III-3-3 QWIP: Steps of fabrication

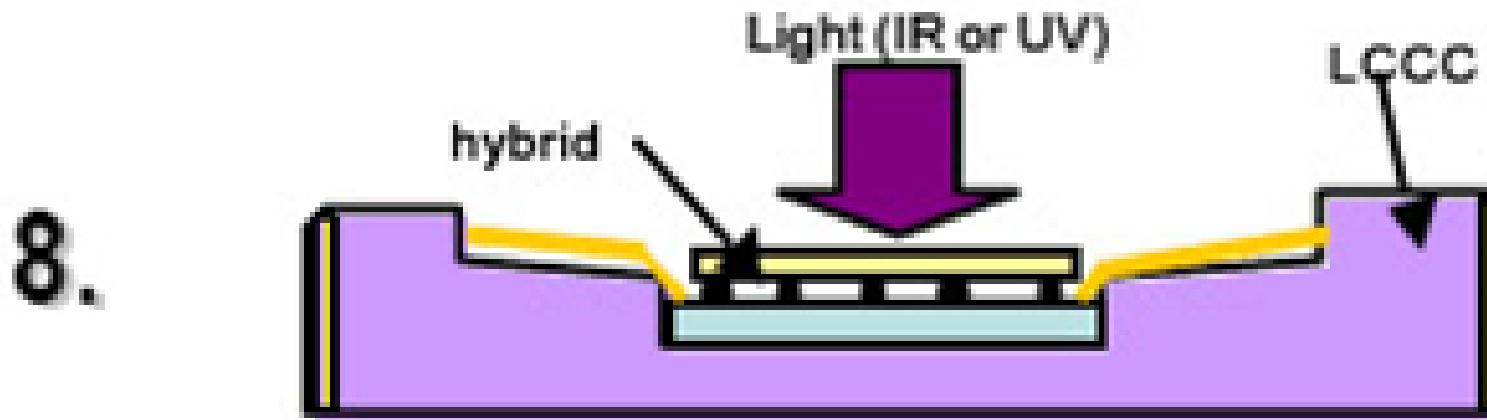
---

7.

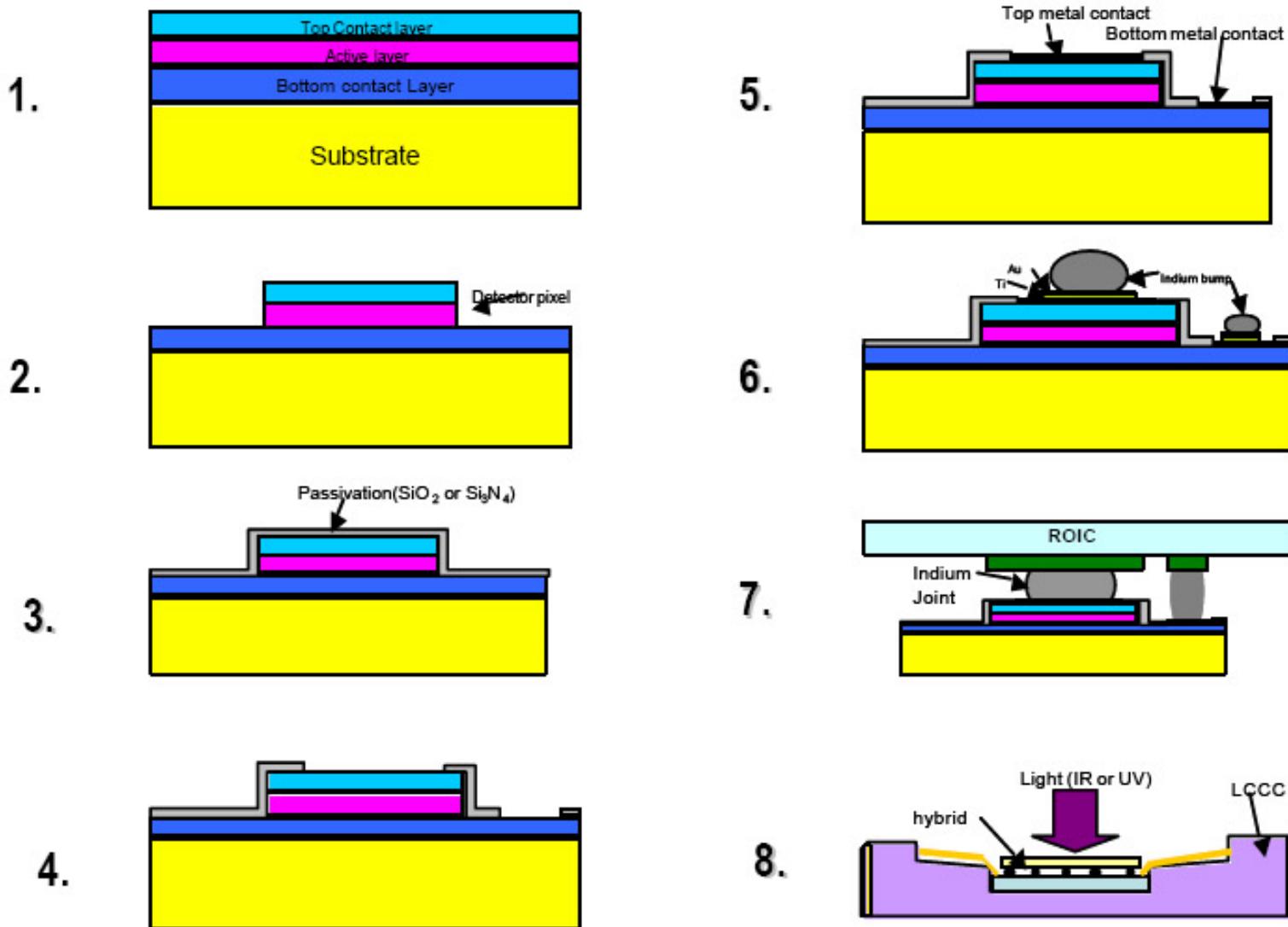


## III-3-3 QWIP: Steps of fabrication

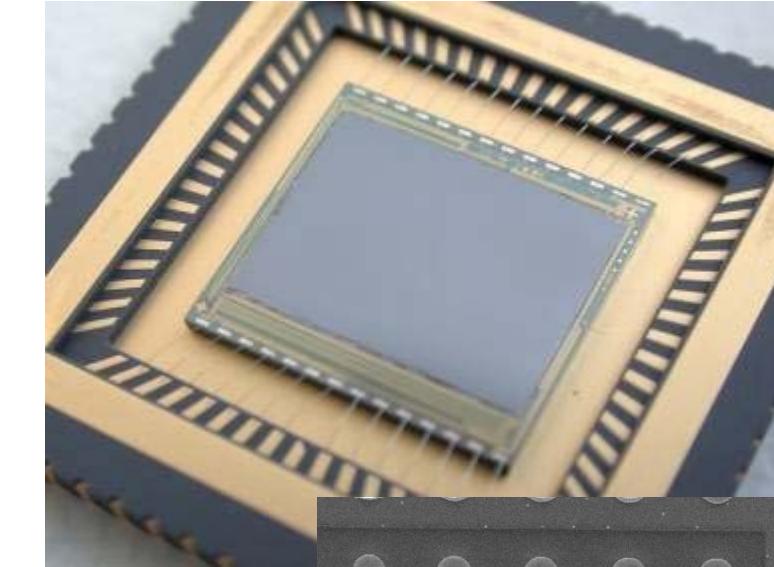
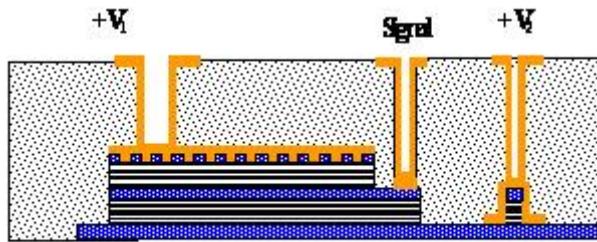
---



# III-3-3 QWIP: Steps of fabrication

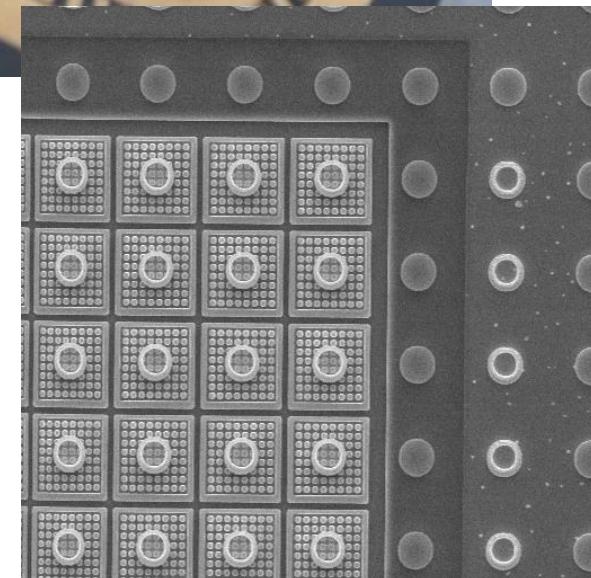


### III-3-3 QWIP in matrix



- Exemple: Thales vend des matrices de QWIP

- Pitch :  $25\mu\text{m}$
- Pixels number:  $640 \times 512$
- NETD:  $< 50 \text{ mK}$
- Integration time:  $< 5 \text{ ms}$
- Operating temperature:  $> 73 \text{ K}$



# III-3-3 QWIP: Packaging

## STANDARD CONFIGURATIONS

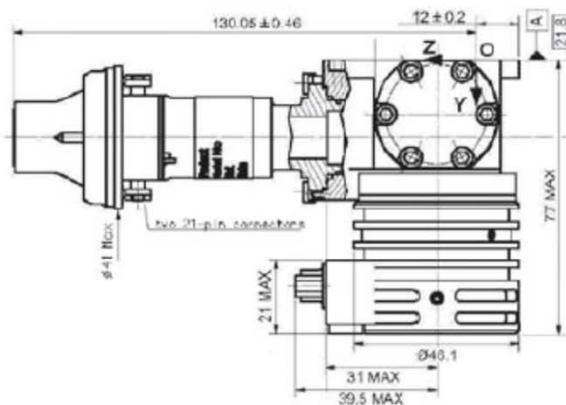
### K548 microcooler

Integrated cooler driving electronics  
Central FOV : f/2  
Operating Temperatures : -40°C / + 71°C  
Weight : < 0.66 kg (1.45 lb)

Typical characteristics :

Minimum FPA temperature	< 70K
Power supply	24 V
Cooldown input power (20°C, 73K)	< 27 W <sub>dc</sub> (*)
Regulated input power (20°C, 73K)	< 12 W <sub>dc</sub>
Cooldown time (20°C, 73K)	< 3 min 30 s

(\*) W<sub>dc</sub> = at cooler C&CE DC input

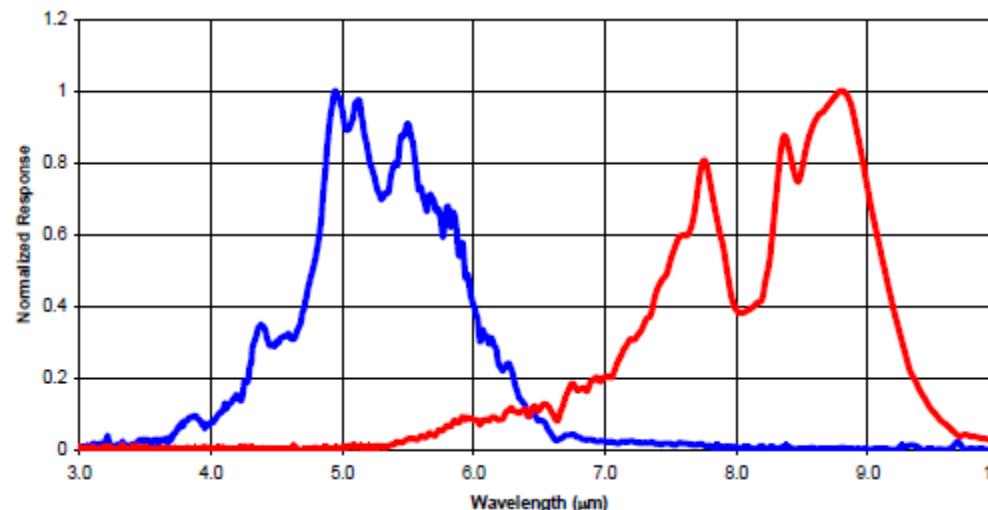
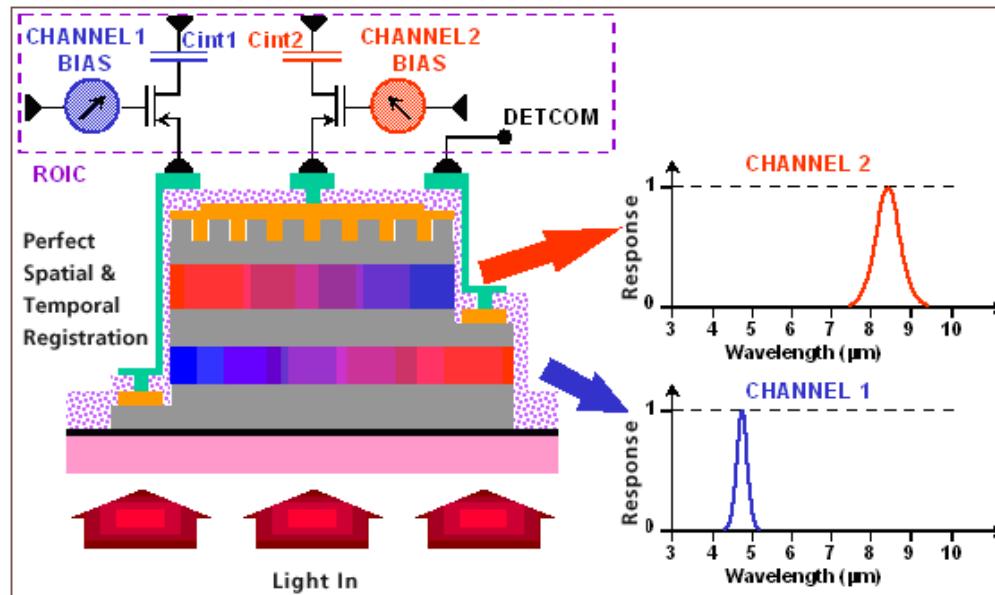


Mini Cryostat



# III-3-3 QWIP: Multi $\lambda$ detection

2 Color FPAs



## III-3-3 QWIP: Applications

---

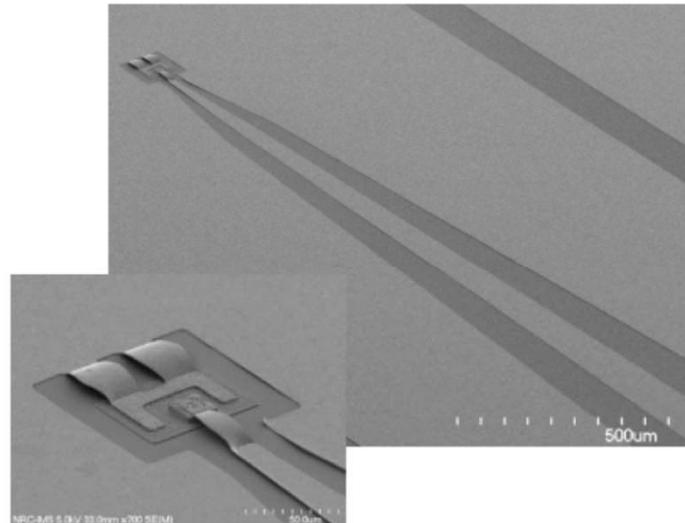
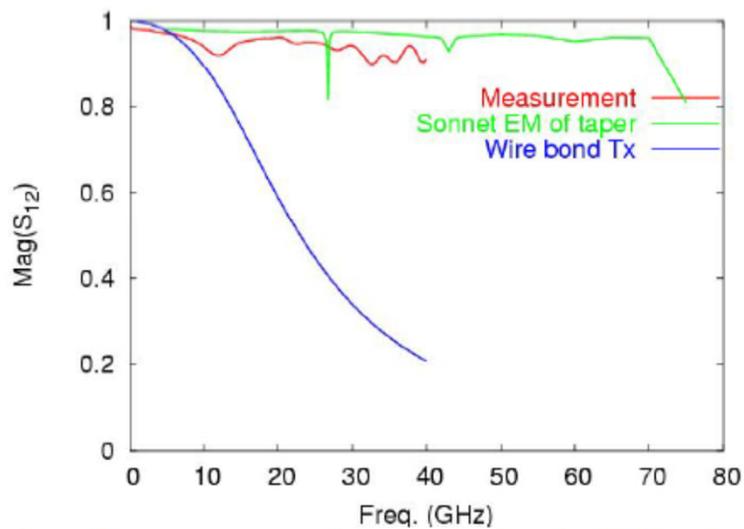
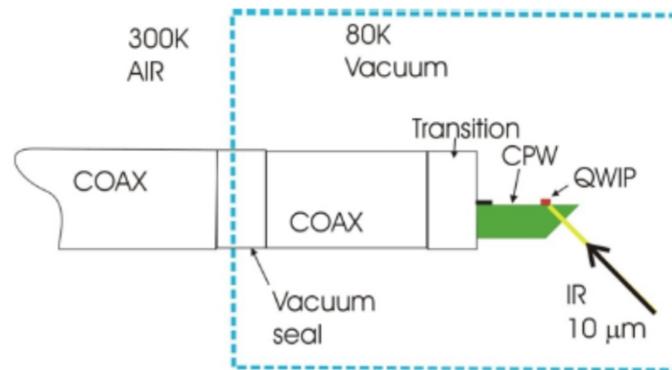
**L'imagerie infrarouge QWIP trouve des application dans plusieurs domaine,**

- Lutte contre les incendie
- La volcanologie
- La médecine
- La défense
- L'astronomie

# III-3-3 QWIP: Applications

## Détection hétérodyne très rapide

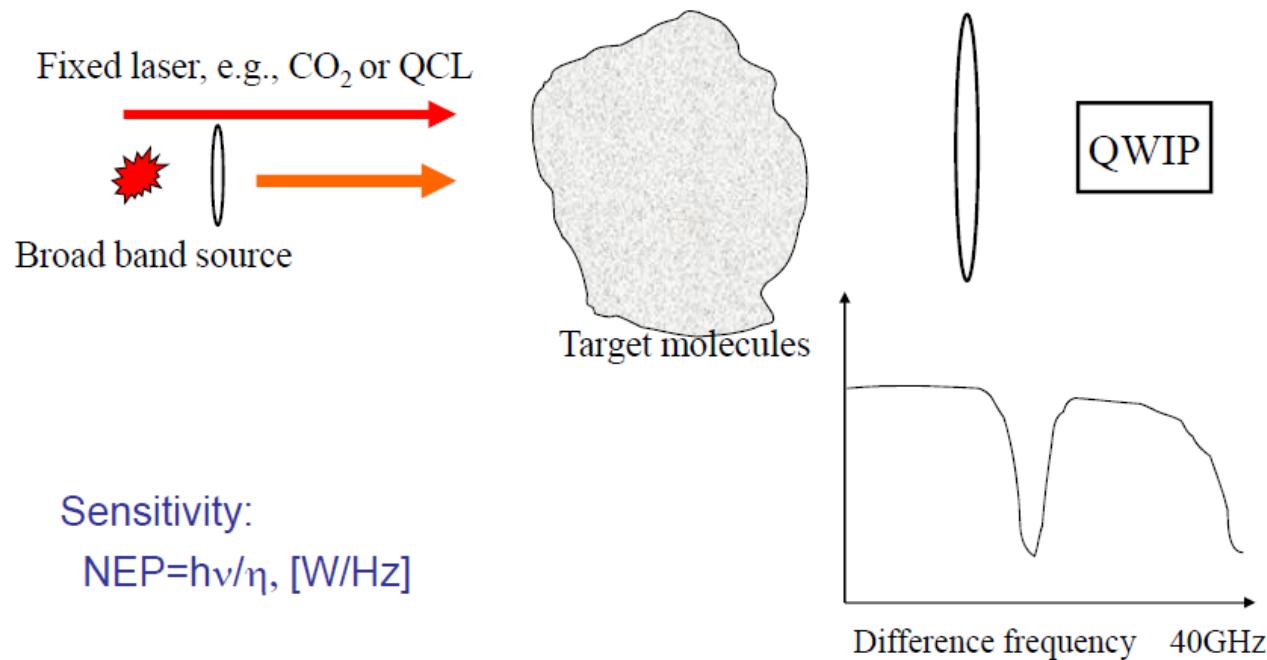
- Monolithic CPW, air bridge, QWIP
- Tapered CPW transition designed
- Packaged with a V-bead (65 GHz)
- Result: An ultra fast QWIP



IEEE Photon. Technol. Lett. **18**, 2218 (2006); Electron. Lett. **41**, 69 (2005) - featured in Laser Focus World Magazine June 2005 issue (News Breaks).

# III-3-3 QWIP: Applications

Application: Heterodyne detection for environmental /gas sensing



Sensitivity:

$$\text{NEP} = h\nu/\eta, [\text{W}/\text{Hz}]$$

# III-3- 4 Quantum Cascade Detector (QCD)

---

## Quantum cascade photodetector

L. Gendron,<sup>a)</sup> M. Carras, A. Huynh, and V. Ortiz

*Thales Research and Technology, Domaine de Corbeville, 91404 Orsay, France*

C. Koeniguer and V. Berger

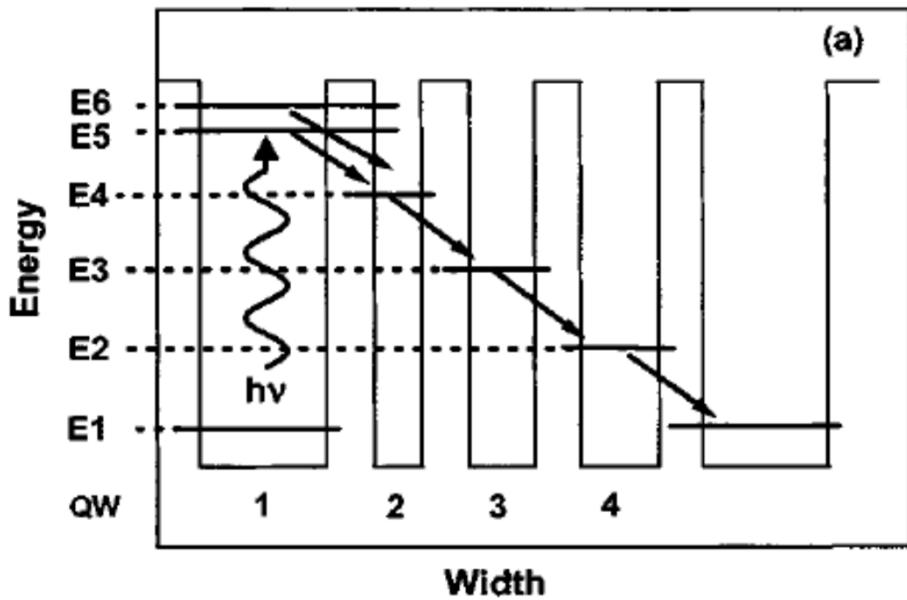
*Matériaux et Phénomènes Quantiques, Univ. Paris 7, Case 7021, 2 Pl Jussieu, 75251 Paris, France*

(Received 12 February 2004; accepted 22 June 2004)

A photovoltaic intersubband detector based on electron transfer on a cascade of quantum levels is presented: A quantum cascade detector (QCD). The highest photoresponse of intersubband transition-based photovoltaic detectors is demonstrated: 35 mA/W at null bias. The deduced absorption is of the same order of magnitude as that of a classical quantum-well infrared photodetector, i.e., 20%. Because they work with no dark current, QCDs are very promising for small-pixel large focal plane array applications. © 2004 American Institute of Physics.

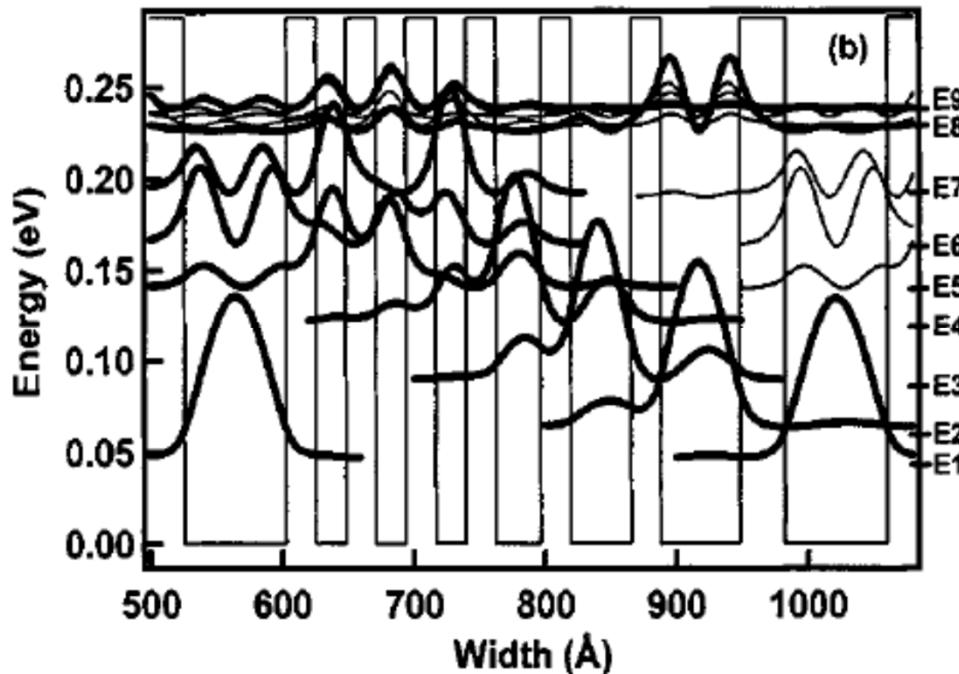
[DOI: 10.1063/1.1781731]

# III-3-4 QCD: Working principle



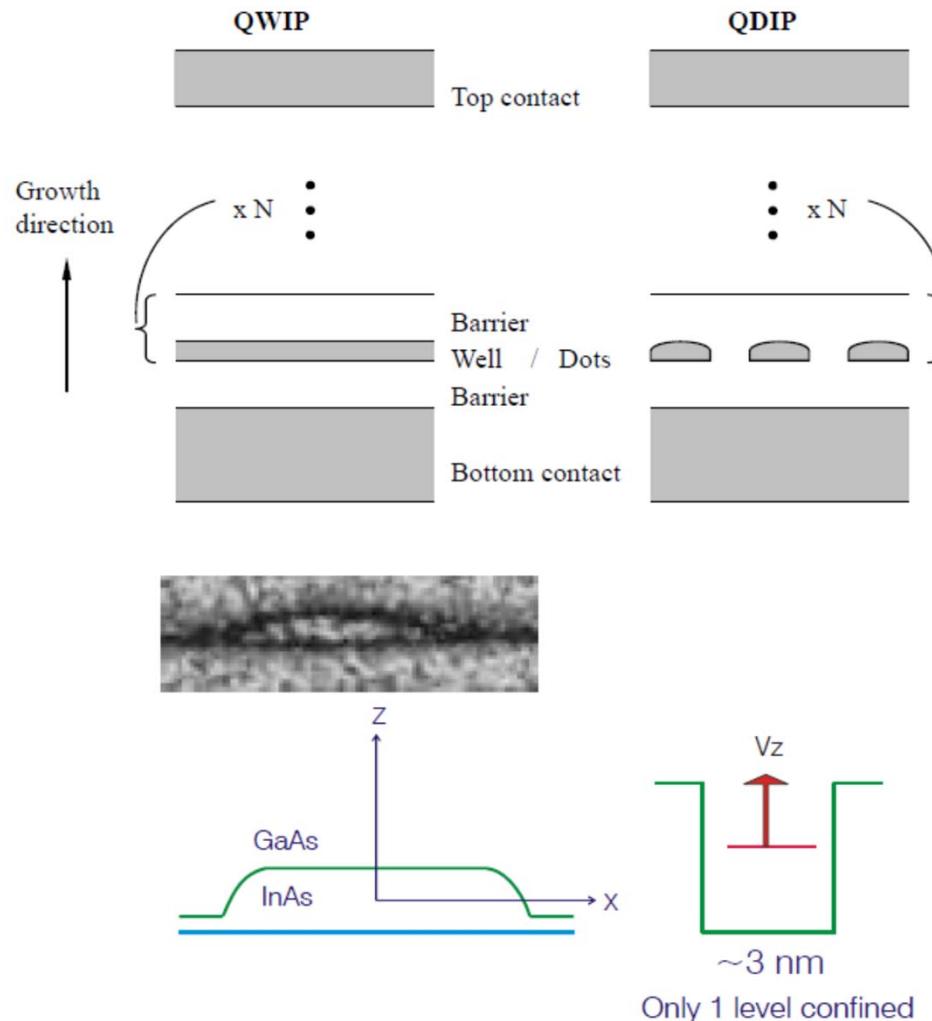
- Le premier puits est dopé pour peupler son premier niveau d'énergie ( $E_1$ ).
- La transition optique du premier puits quantique correspond à la longueur d'onde de fonctionnement.
- Les électrons passent la première barrière par effet tunnel et sont ensuite délocalisés vers les niveaux suivants des autres puits quantiques via l'émission de phonons jusqu'à revenir à l'état d'énergie initiale ( $E_1$ ).
- Le même processus se répète ensuite pour la prochaine période du QCD .

## III-3-4 QCD: Working principle



- Un QCD en comparaison aux QWIPs a l'avantage de fonctionner à un voltage externe nul.
- Il en résulte un courant d'obscurité nul et donc un comportement vis à vis au bruit plus avantageux.
- Les travaux existants sur les QCDs sont relativement récents.

# III-3-4 QDIP: Working principle



- Utilisation de boîte quantique à la place de puits quantiques.
- Avantage: Pas de règle de sélection, l'onde incidente est absorbée.
- Inconvénient: Absorption réduite par rapport aux QWIP (surface effective réduite) => nécessité de faire plus de périodes de région active.