



*Soutenance de thèse*

**VINCENT GUÉRIAUX**

**Contribution à l'étude expérimentale et théorique  
des photodétecteurs infrarouge à multipuits  
quantiques couvrant la bande spectrale 3 – 20  $\mu\text{m}$**

Jury composé de :

*M. Vincent Berger  
M. Jean-Michel Gérard  
M. Alain Manissadjian  
M. Alexandru Nedelcu  
M. Gilles Patriarche  
M. Roland Teissier  
M. Børge Vinter*

*Directeur de thèse  
Rapporteur  
Examineur  
Encadrant  
Examineur  
Rapporteur  
Examineur*

## Introduction

Etude structurale et chimique

Transport en régime tunnel

QWIPs large bande

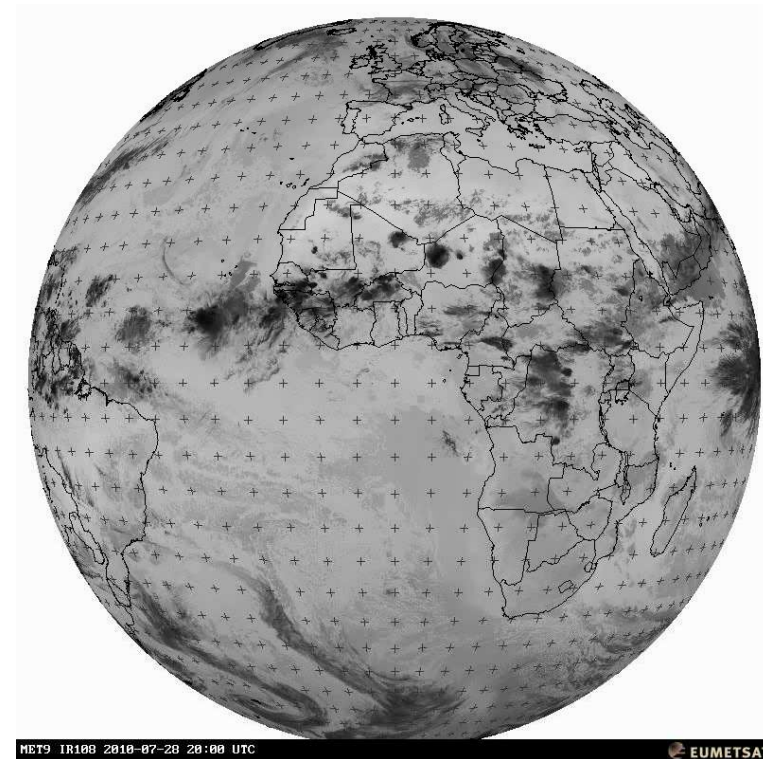
Conclusion

# Imagerie infrarouge

## ► Infrarouge thermique



Camera QWIP



Satellite géostationnaire METEOSAT  
(rotation de la Terre sur 5 jours)

## Introduction

Etude structurale et chimique

Transport en régime tunnel

QWIPs large bande

Conclusion

# Pourquoi 3 – 20 $\mu\text{m}$ ?

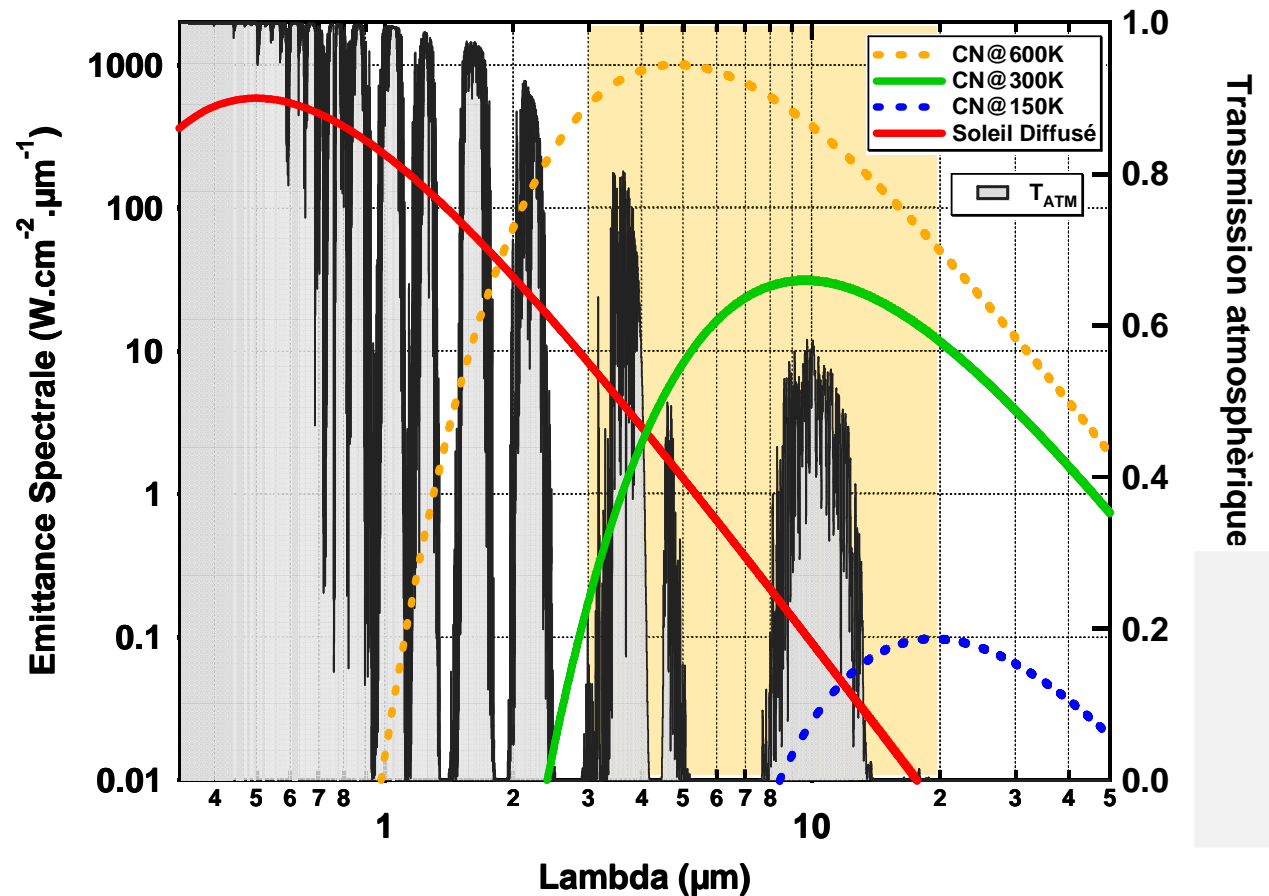
## ► Corps noir

- Objets « chaud » et « froid »
- Réflexion/diffusion solaire

## ► Transmission atmosphérique

- Mid-Wave 3 – 5  $\mu\text{m}$
- Long-Wave 8 – 12  $\mu\text{m}$

## ► Emissivité



## Introduction

Etude structurale et chimique

Transport en régime tunnel

QWIPs large bande

Conclusion

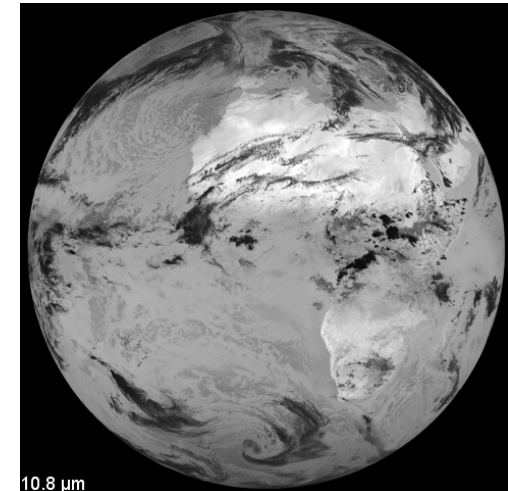
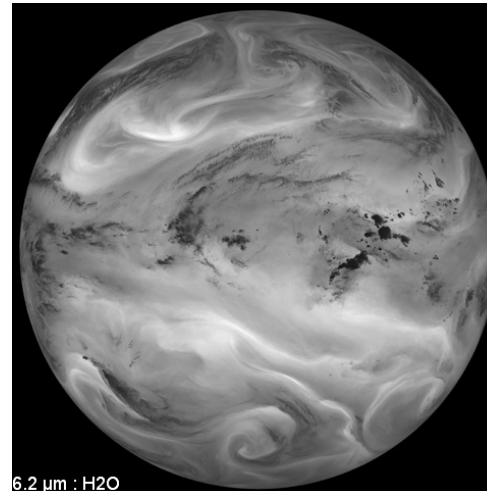
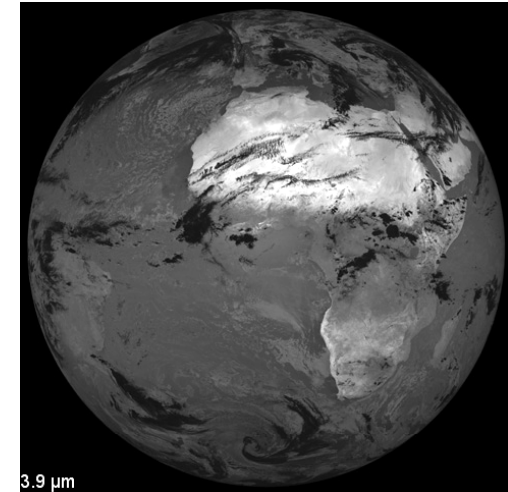
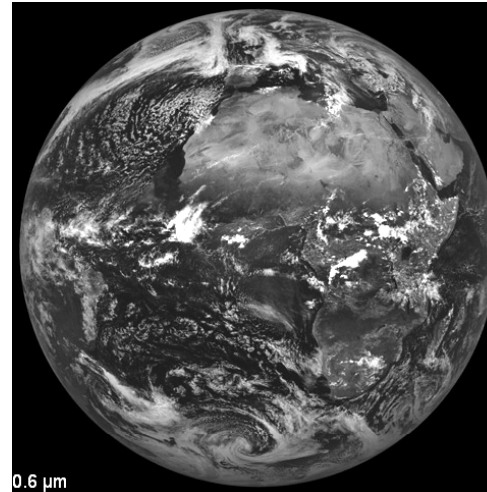
# Contraste et longueur d'onde

## ► Impact de la longueur d'onde sur l'image

0,6 $\mu\text{m}$	3,9 $\mu\text{m}$
6,2 $\mu\text{m}$	10,8 $\mu\text{m}$

## ► Domaines d'application

- Militaire
- Science
- Civil





**Introduction**

Etude structurale et chimique

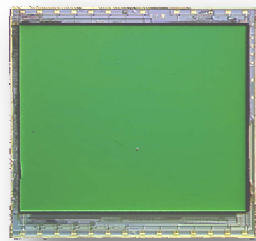
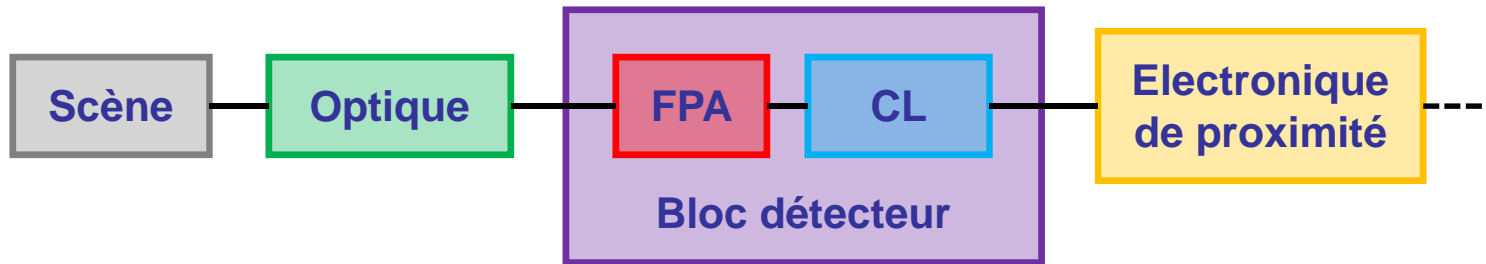
Transport en régime tunnel

QWIPs large bande

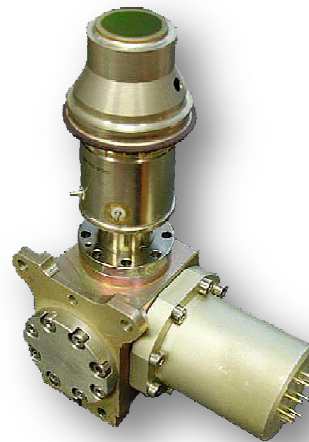
Conclusion

# QWIP : un élément de la chaine image

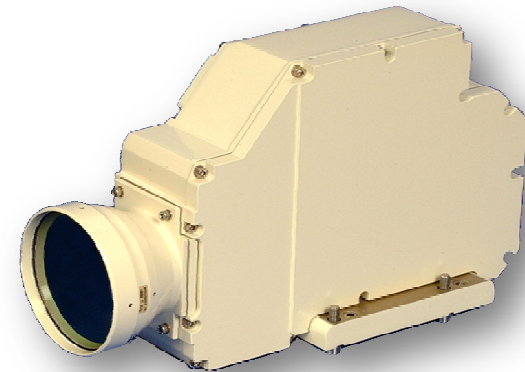
## ► Chaine image



FPA : Focal Plane Array  
CL : Circuit de lecture



Bloc détecteur TRT



Catherine-XP TOSA

## Introduction

Etude structurale et chimique

Transport en régime tunnel

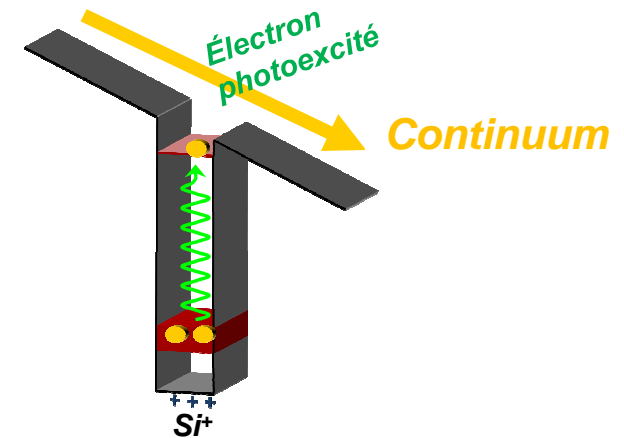
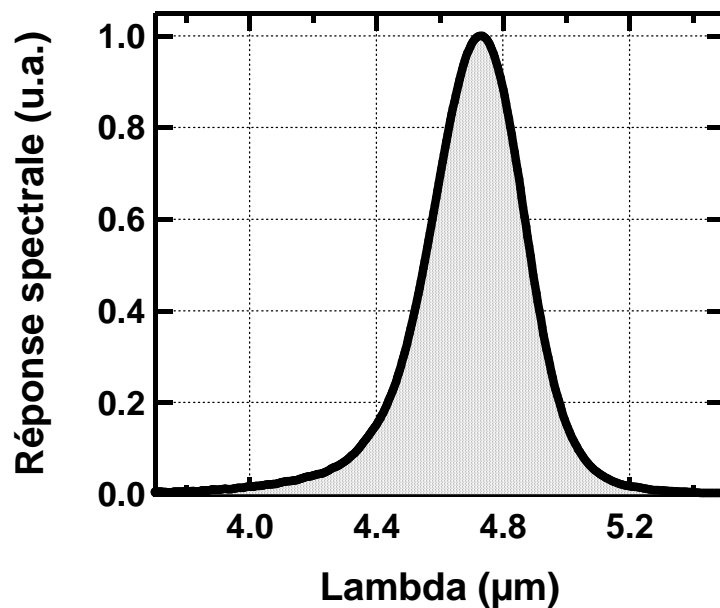
QWIPs large bande

Conclusion

# Absorption intersousbandes

## ► Puits quantique en $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ / GaAs

- Niveaux électroniques
- Dopage silicium



## ► Transition résonante

- Largeur à mi-hauteur de 90  $\text{cm}^{-1}$

## ► Règles de sélection

## Introduction

Etude structurale et chimique

Transport en régime tunnel

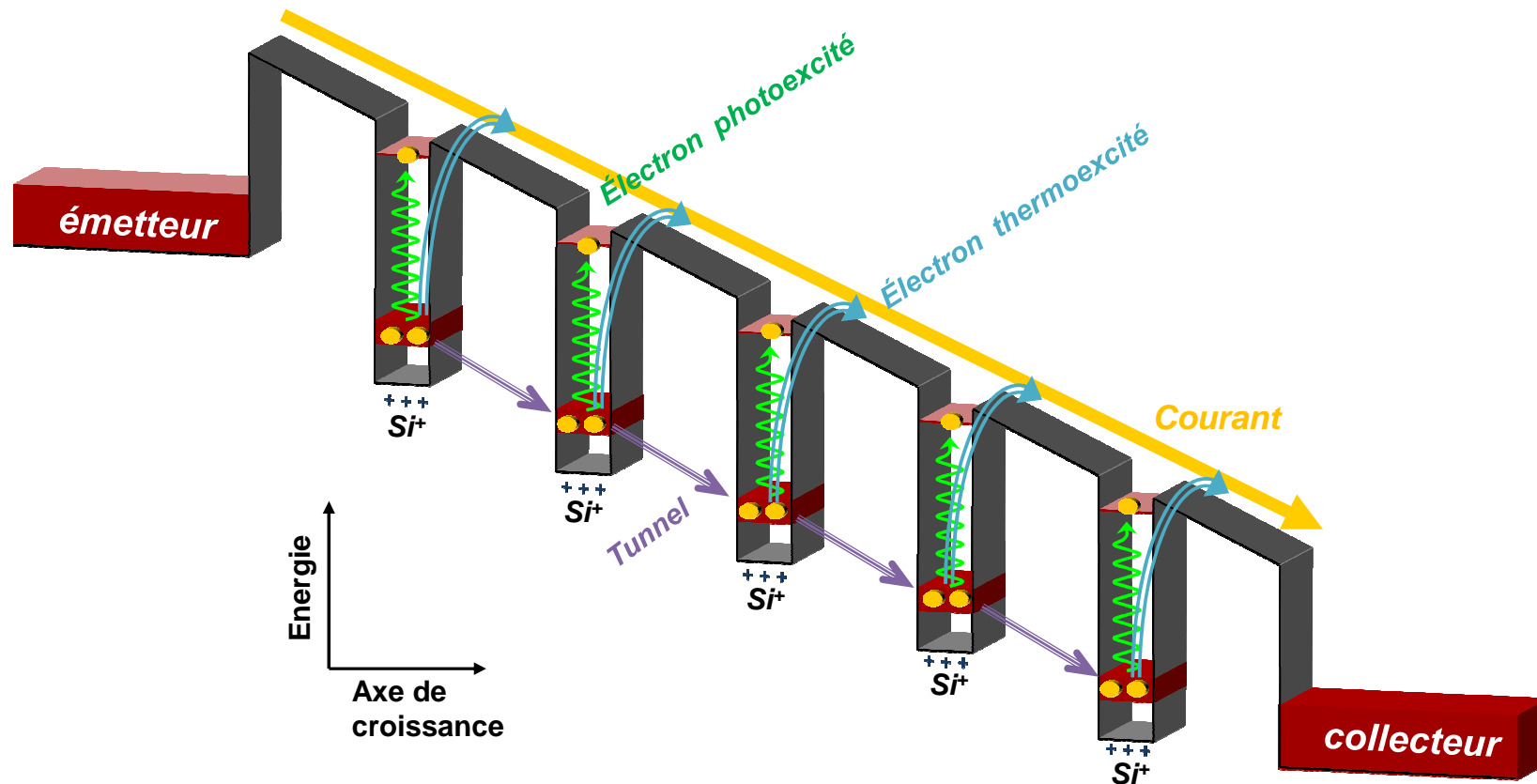
QWIPs large bande

Conclusion

# Multipuits Quantiques

## ► QWIP : Photodétecteur Infrarouge à Multipuits Quantiques

- Transport unipolaire dans un système électronique à 2 et 3 dimensions



## Introduction

Etude structurale et chimique

Transport en régime tunnel

QWIPs large bande

Conclusion

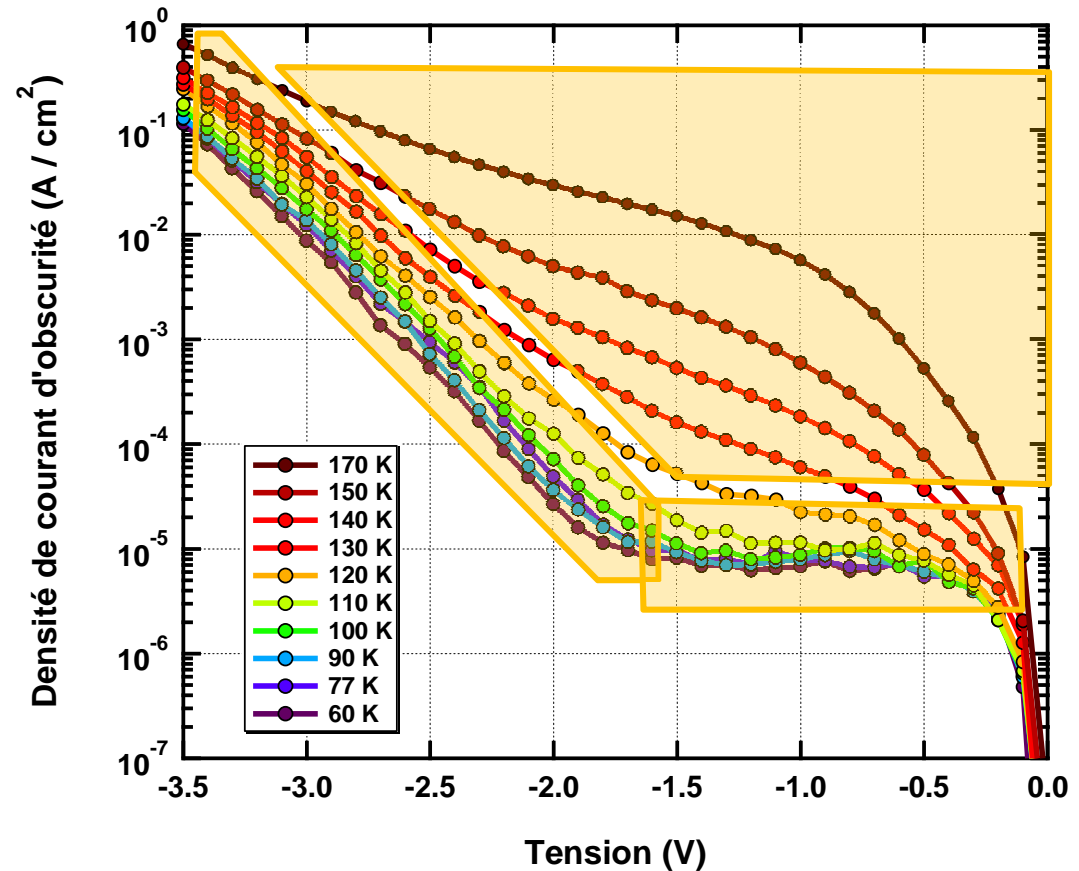
# Régimes de transport électronique

▶ Régime tunnel

▶ Régime de fort champ

▶ Régime thermique

▶ Régime optique  
(non représenté)



## Introduction

Etude structurale et chimique

Transport en régime tunnel

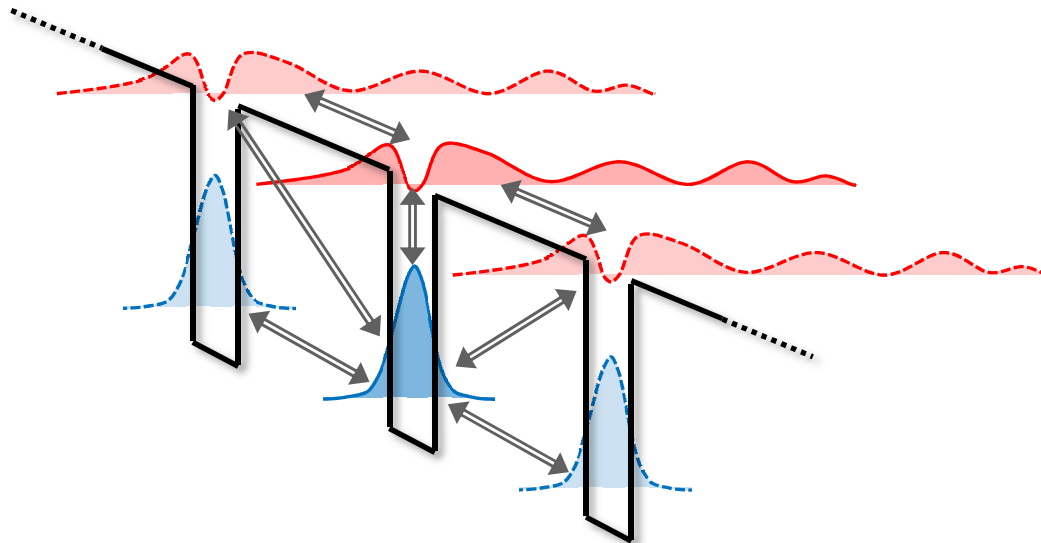
QWIPs large bande

Conclusion

# Modélisation du transport

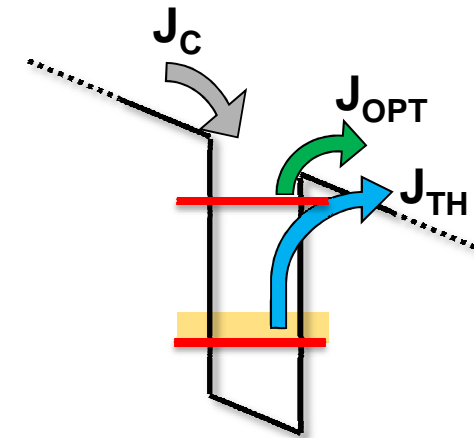
## ► Diffusif (METIS)\*

- Etats 2D
- Microscopique : règle d'or de Fermi
- Structure périodique



## ► Photoemissif\*\*

- Etats 3D
- Empirique : probabilité de capture
- Effets des contacts





## Introduction

Etude structurale et chimique

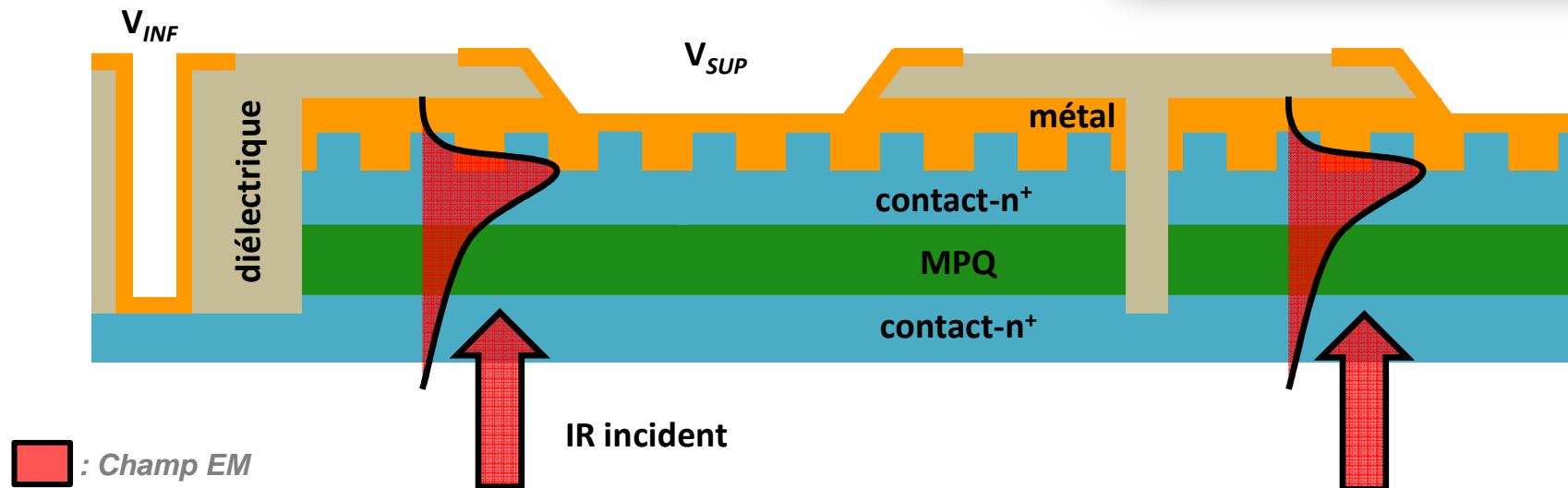
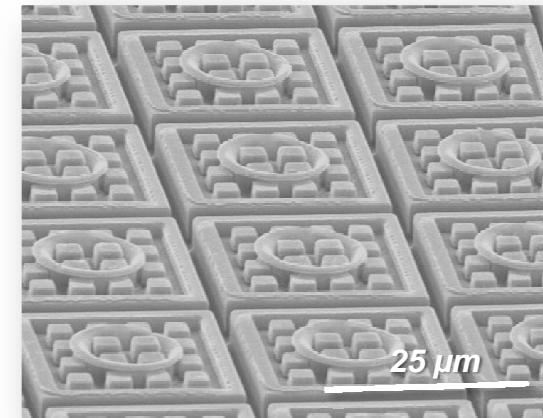
Transport en régime tunnel

QWIPs large bande

Conclusion

# Technologie et couplage optique

- ▶ Epitaxie par jets moléculaires
- ▶ Technologie III-V
- ▶ Mesa-pixel avec une structure de couplage optique



**Introduction**

Etude structurale et chimique

Transport en régime tunnel

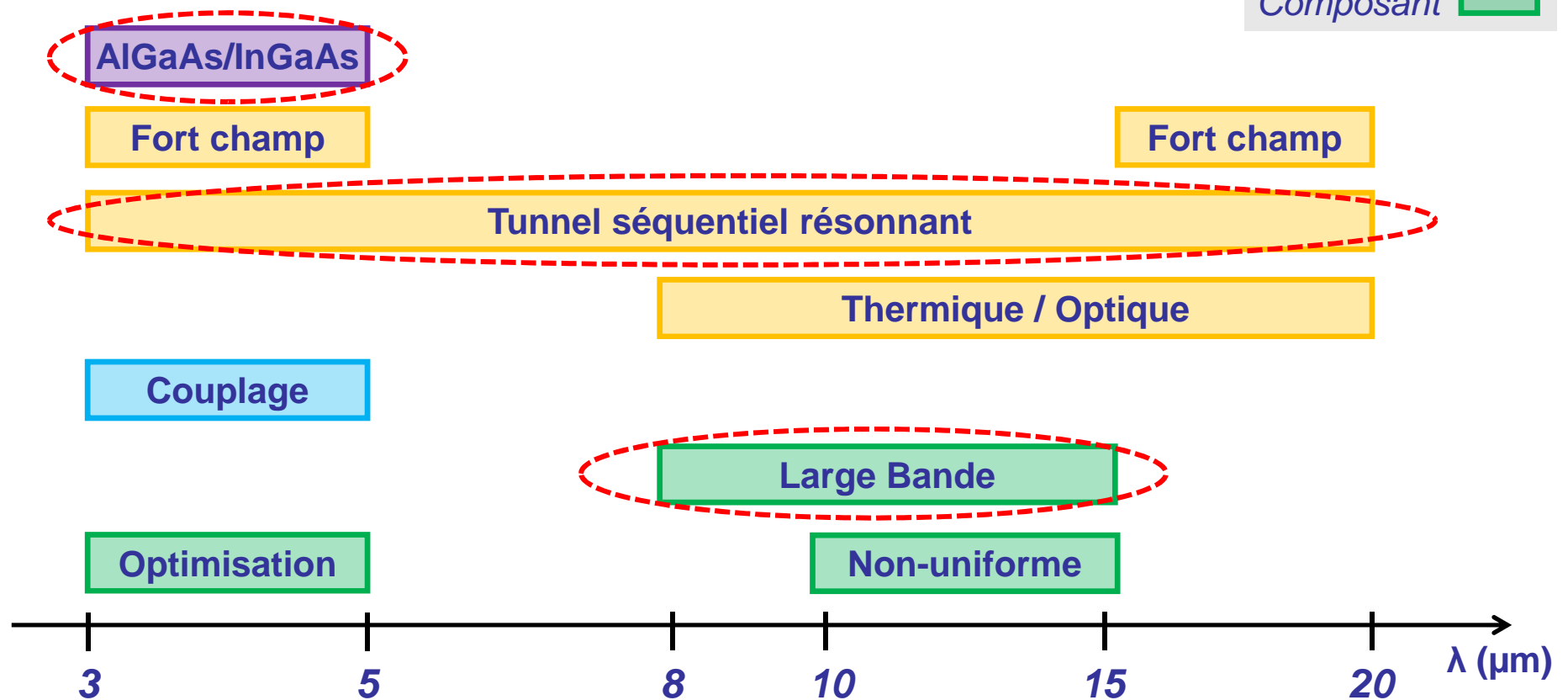
QWIPs large bande

Conclusion

# Domaines étudiés

## ► Extension du domaine spectral d'utilisation des QWIPs

Matériaux	■
Transport	■
Optique	■
Composant	■



▶ **Introduction**

▶ **Etude structurale et chimique des hétérostructures AlGaAs/InGaAs**

- Epitaxie pseudomorphique ; limitation cinétique de la ségrégation ; spectroscopie à l'échelle du puits quantique

▶ **Transport électronique en régime tunnel séquentiel résonant**

▶ **QWIPs large bande**

▶ **Conclusion**

# QWIPs contraints à double barrière

► Besoins opérationnels en bande [3,4 – 4,2  $\mu\text{m}$ ] et [4,3 – 5  $\mu\text{m}$ ]

► QWIP contraint à double barrière\*

■ Puits quantique :

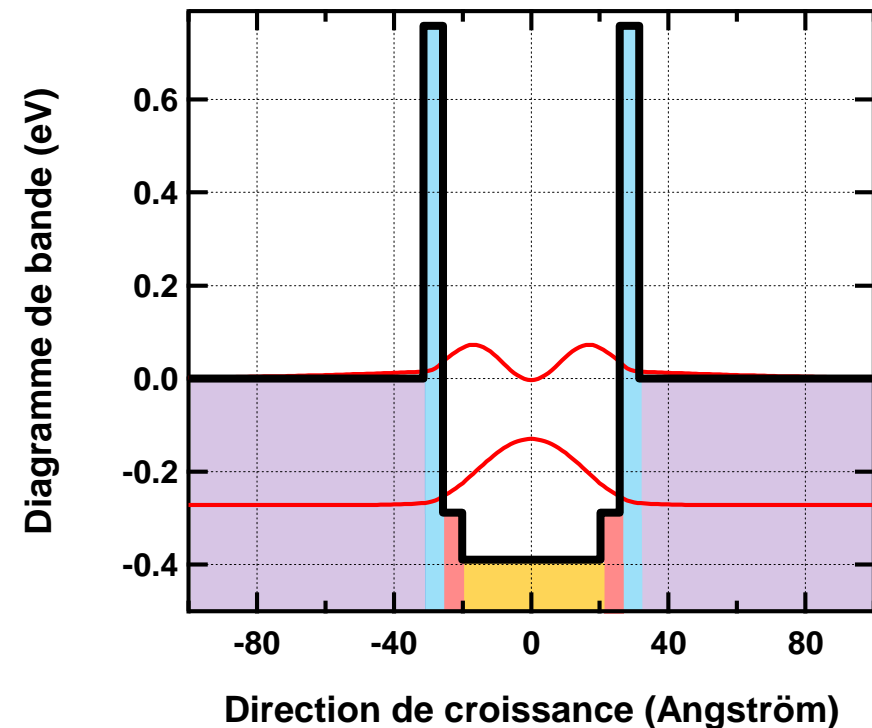


■ Barrière :  $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$

► L'indium permet d'abaisser la longueur d'onde, mais...

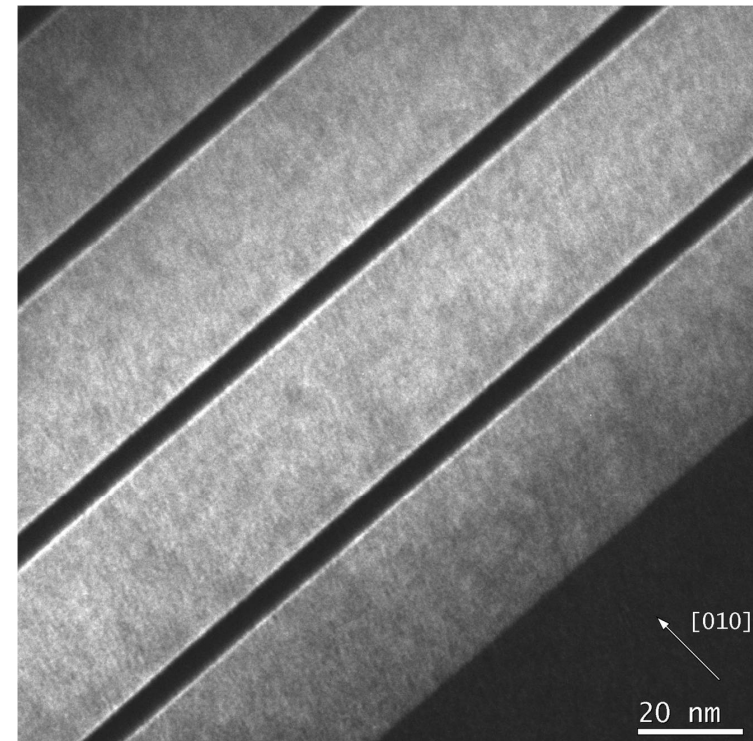
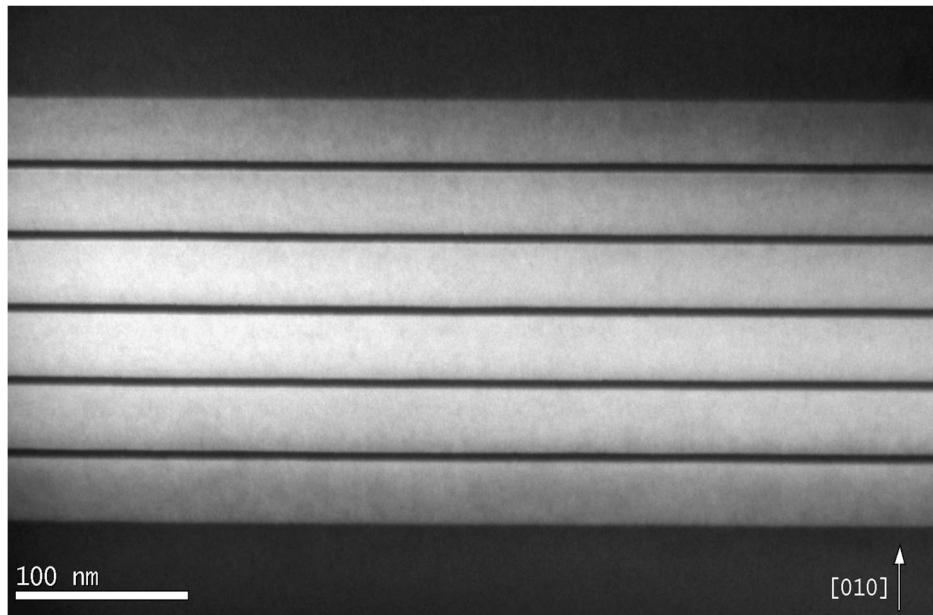
■ Désaccord de maille sur GaAs

■ Désorption et ségrégation



## ► Microscopie électronique en transmission conventionnelle

- Champ sombre  $g=020$  (échelles explorées : 0,01-1  $\mu\text{m}$ )



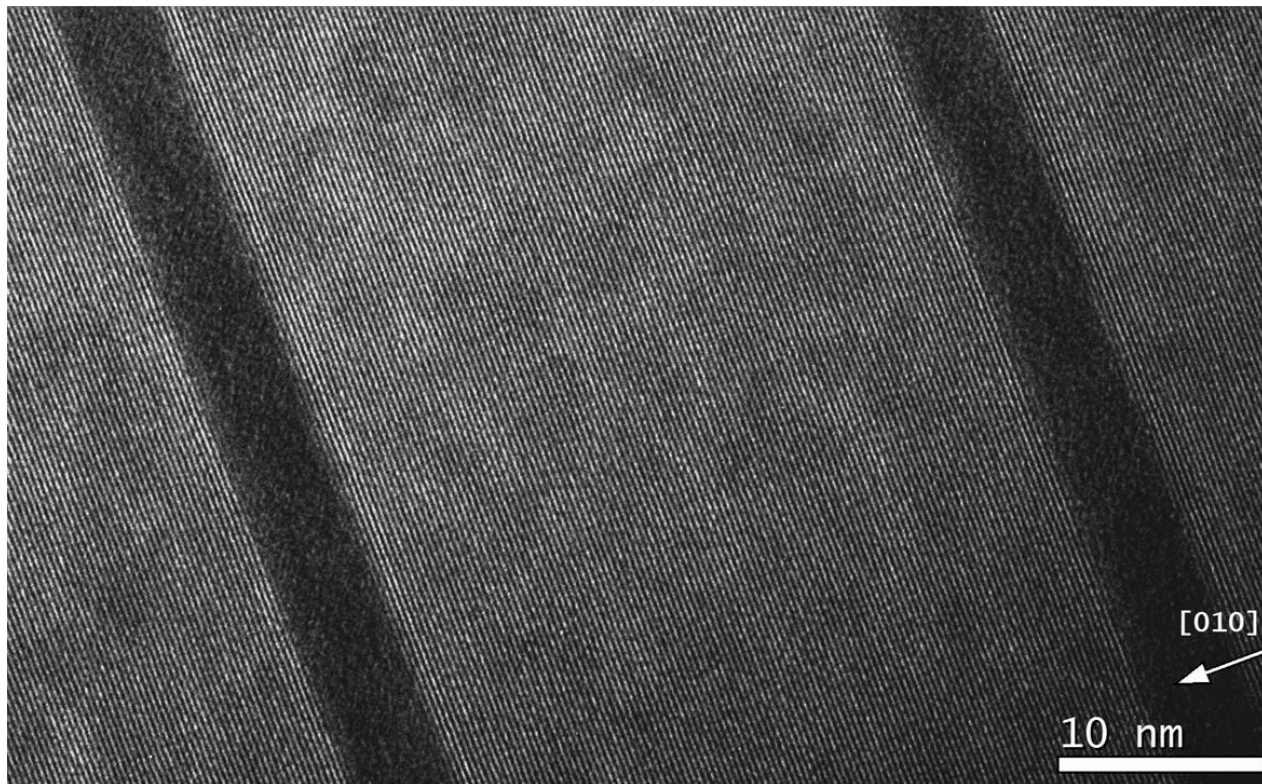
**Absence de dislocations**



# Epitaxie pseudomorphique

## ► Microscopie électronique en transmission conventionnelle

- Deux ondes  $g=000&020$  (échelles explorées : 1-100 nm)



**Analyses sur diverses zones, et sur plusieurs échantillons**

**Aucune observation de défauts ou dislocations**

**Epitaxie sans relaxation de contrainte pour des couches détectant à 4  $\mu\text{m}$**

# Ségrégation des éléments III

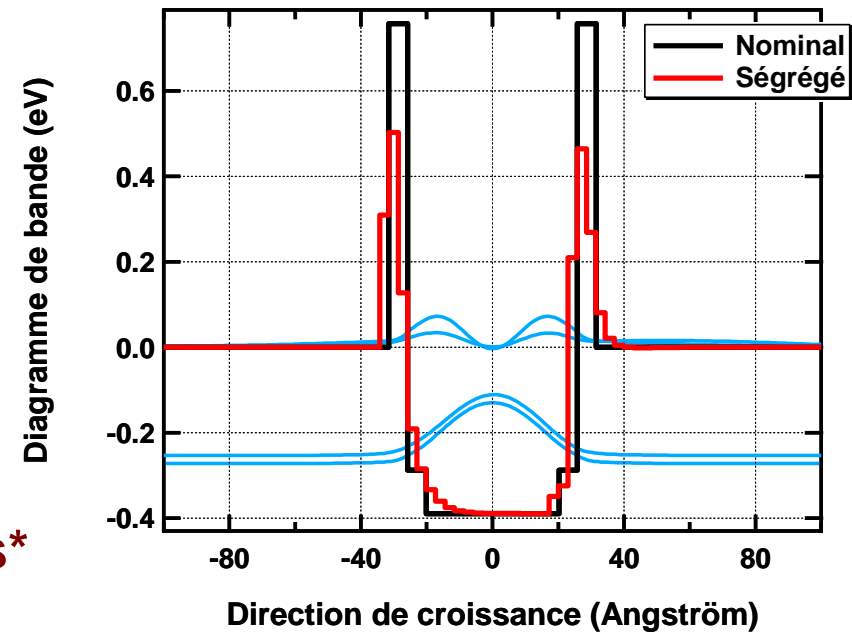
## ► Ségrégation :

- Echange vertical entre les couches de volume et la couche de surface
- Les atomes d'indium « restent » en surface

## ► Modification non désirée des propriétés électro-optiques du puits\*

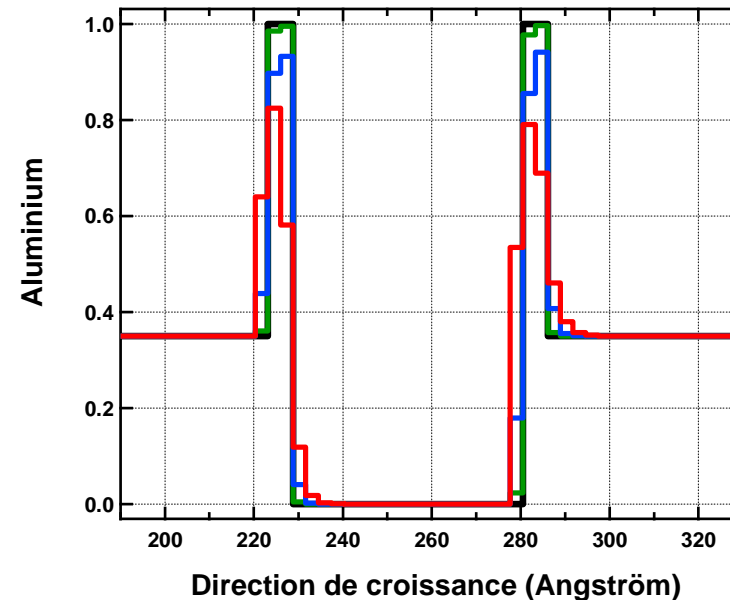
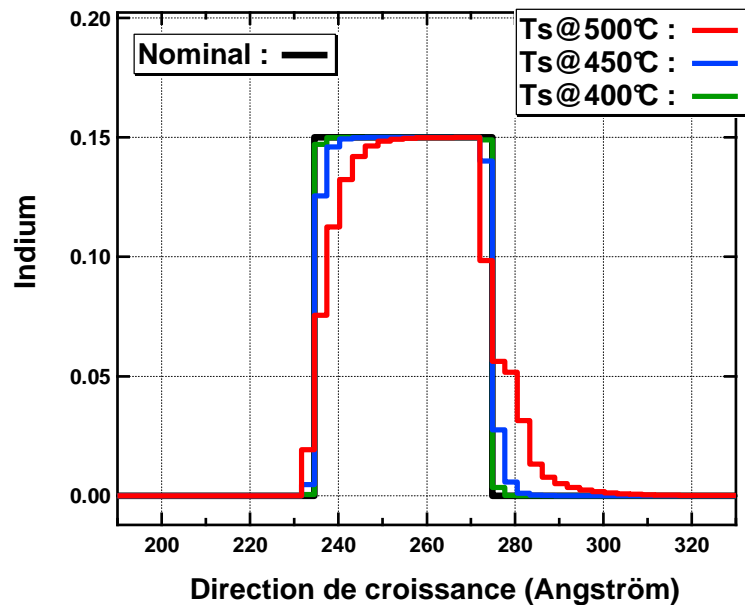
## ► Croissance d'échantillons nominalelement identiques, mais à trois températures de surface ( $T_S$ ) différentes :

- AIAs (5.4 Å) / GaAs (5 Å) /  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  (40 Å) / GaAs (5 Å) / AIAs (5.4 Å)
  - $T_S = 500^\circ\text{C}$  &  $T_S = 450^\circ\text{C}$  &  $T_S = 400^\circ\text{C}$



# Ségrégation dans l' $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{As}$

## ► Modélisation de la ségrégation dans le quaternaire $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{As}$



## ► Comparaison des spectres d'absorption

- Simulés - non-parabolicité et contrainte (E. Ouerghemmi)
- Mesurés - multipassage à 77 K

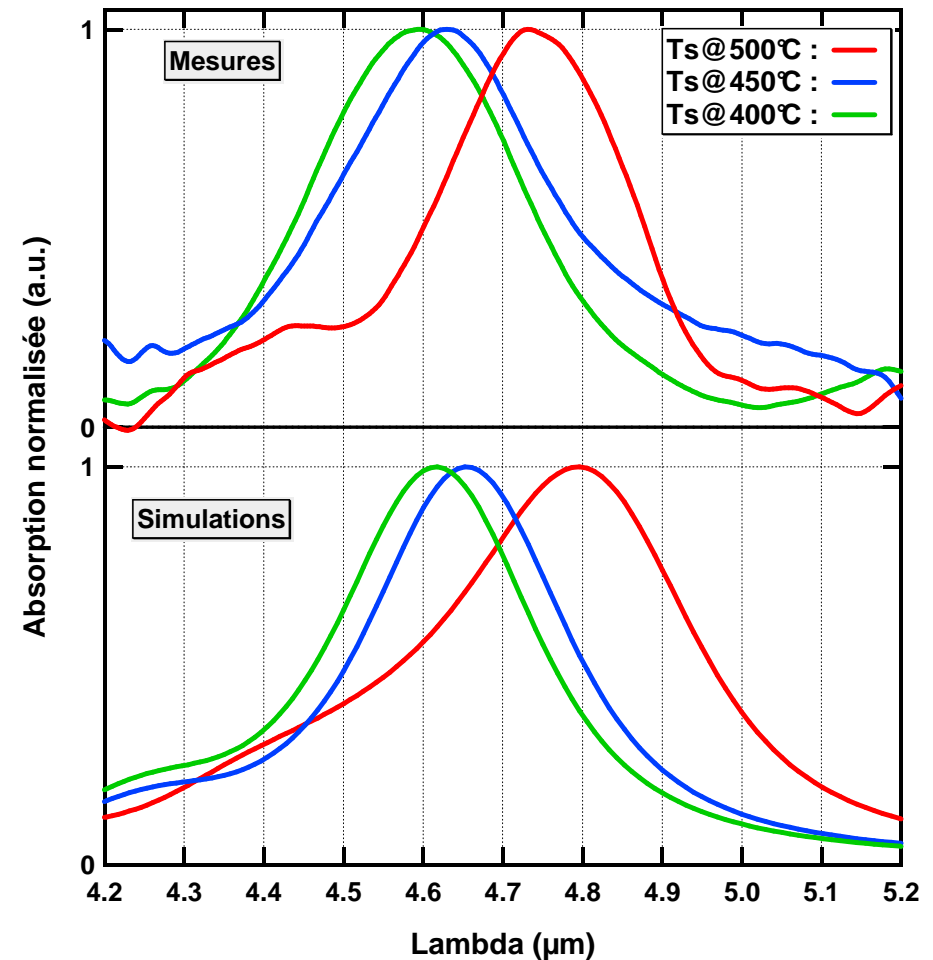
# Déplacement de l'absorption

## ► Blue-shift avec la réduction de la température de croissance

- Correctement pris en compte par la modélisation
- Mesure indirecte

## ► TEM à balayage (LPS/Orsay)

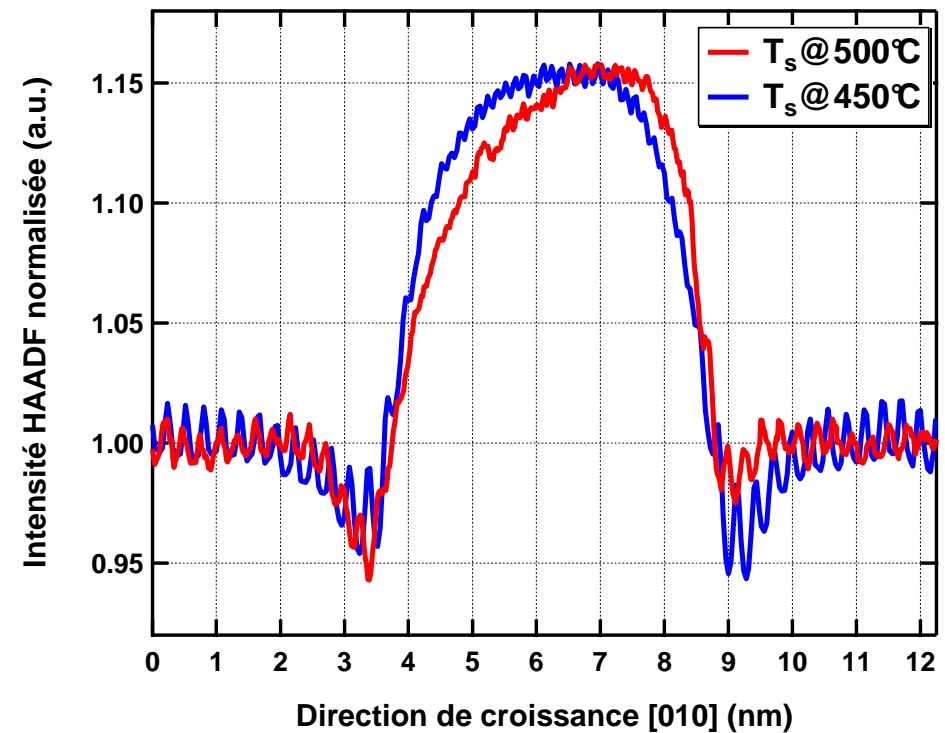
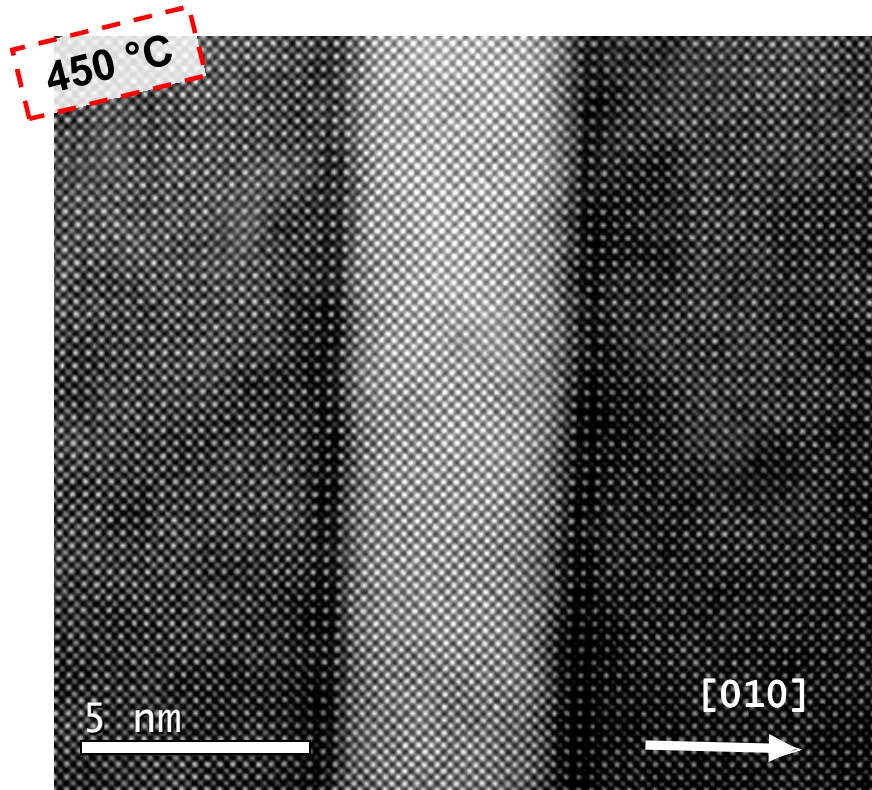
- Imagerie champ sombre annulaire à grand angle (HAADF)
- Spectroscopie de perte d'énergie des électrons (EELS)





## ► Mode d'imagerie HAADF : Z-contrast

■  $Z_{\text{In}}=49$ ,  $Z_{\text{As}}=33$ ,  $Z_{\text{Ga}}=31$ ,  $Z_{\text{Al}}=13$

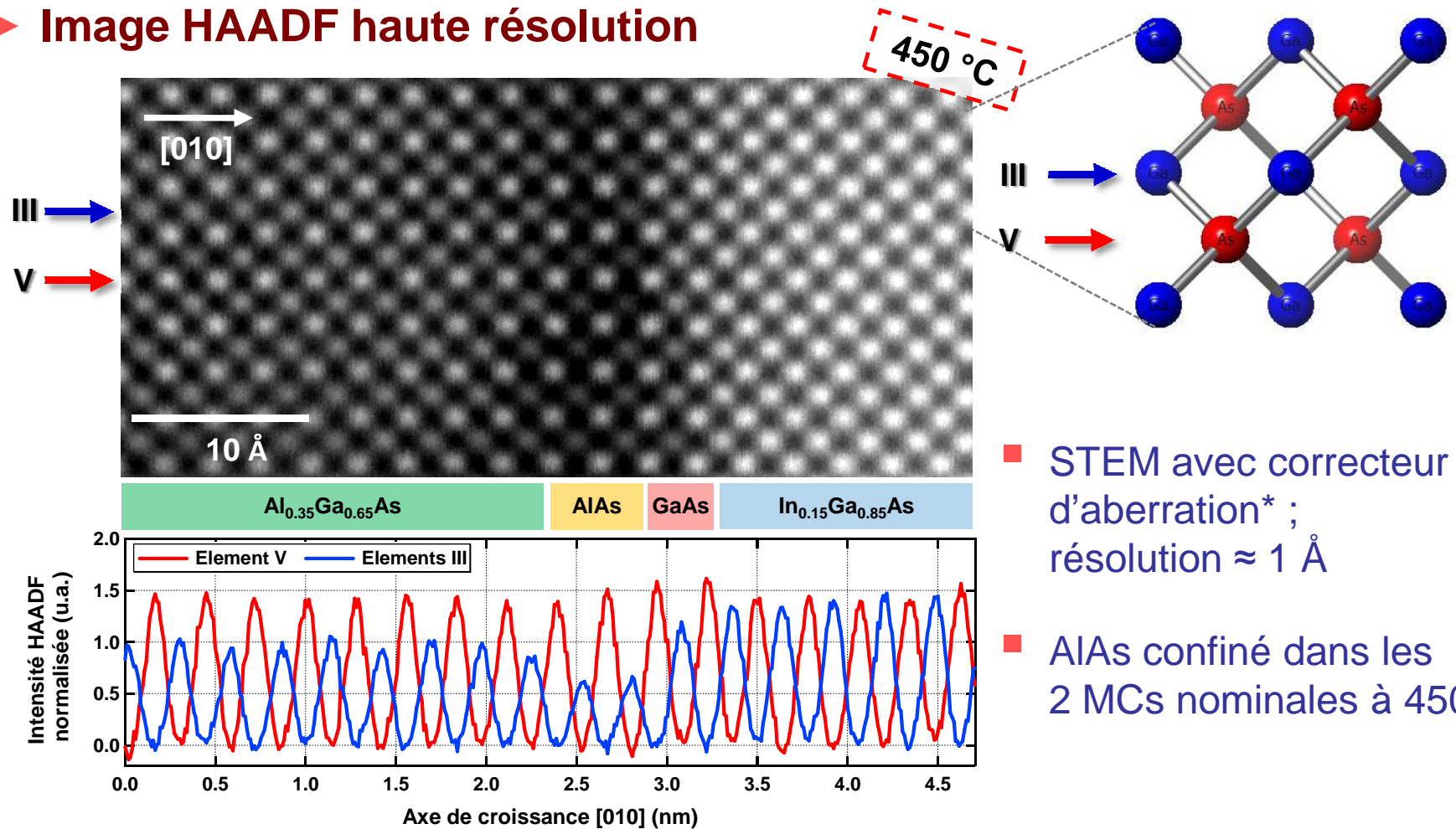


► Profil symétrique pour  $T_s < 450$  °C



# Barrière confinée dans 2 MCs

## ► Image HAADF haute résolution

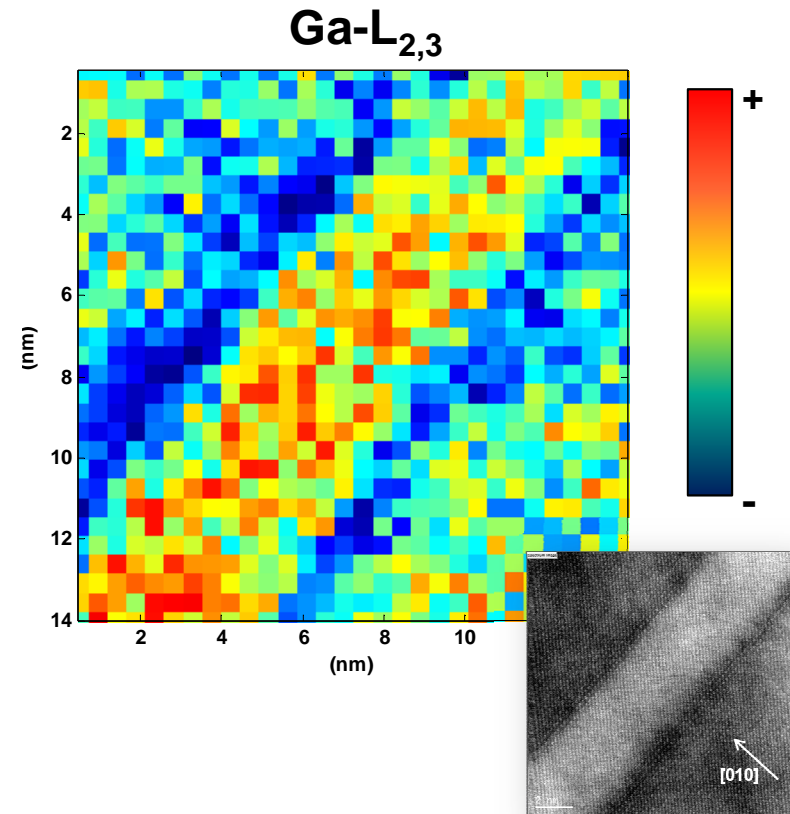
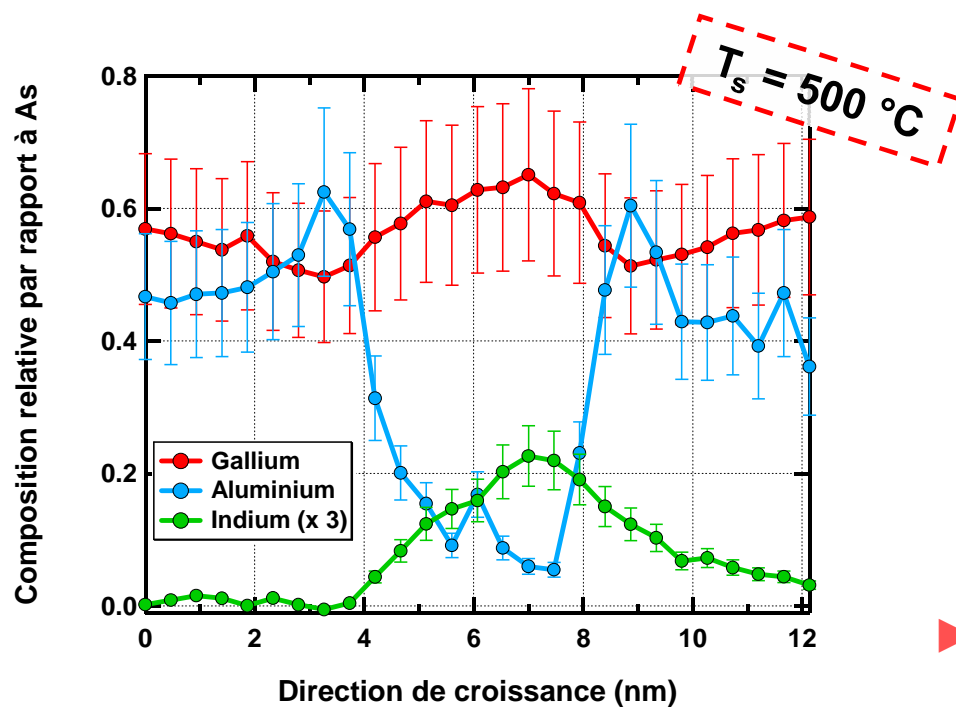


- STEM avec correcteur d'aberration\* ; résolution  $\approx 1 \text{ \AA}$
- AlAs confiné dans les 2 MCs nominales à 450°C

# Mesure quantitative du profil

## ► Spectroscopie de perte d'énergie des électrons : spectre image\*

### ■ Cartographie chimique



## ► Analyse quantitative à poursuivre et à perfectionner sur les QWIPs

- ▶ **Absence de relaxation de la contrainte dans les épitaxies à forte teneur en indium (25 %)**
  - Couches validées pour abaisser la longueur d'onde
  
- ▶ **Confirmation du blocage cinétique de la ségrégation des éléments III en dessous de 450°C**
  - Décalage du spectre d'absorption vers les courtes longueurs d'onde
  
- ▶ **Accroissement des capacités de simulation**
  - Optimisation de l'empilement du puits quantique pour détecter en dessous de 4,1  $\mu\text{m}^*$

▶ **Introduction**

▶ **Etude structurale et chimique des hétérostructures AlGaAs/InGaAs**

▶ **Transport électronique en régime tunnel séquentiel résonant**

- Mise en évidence et interprétation ; outil de prédiction du niveau de courant ; étude expérimentale de la réponse

▶ **QWIPs large bande**



▶ **Conclusion**

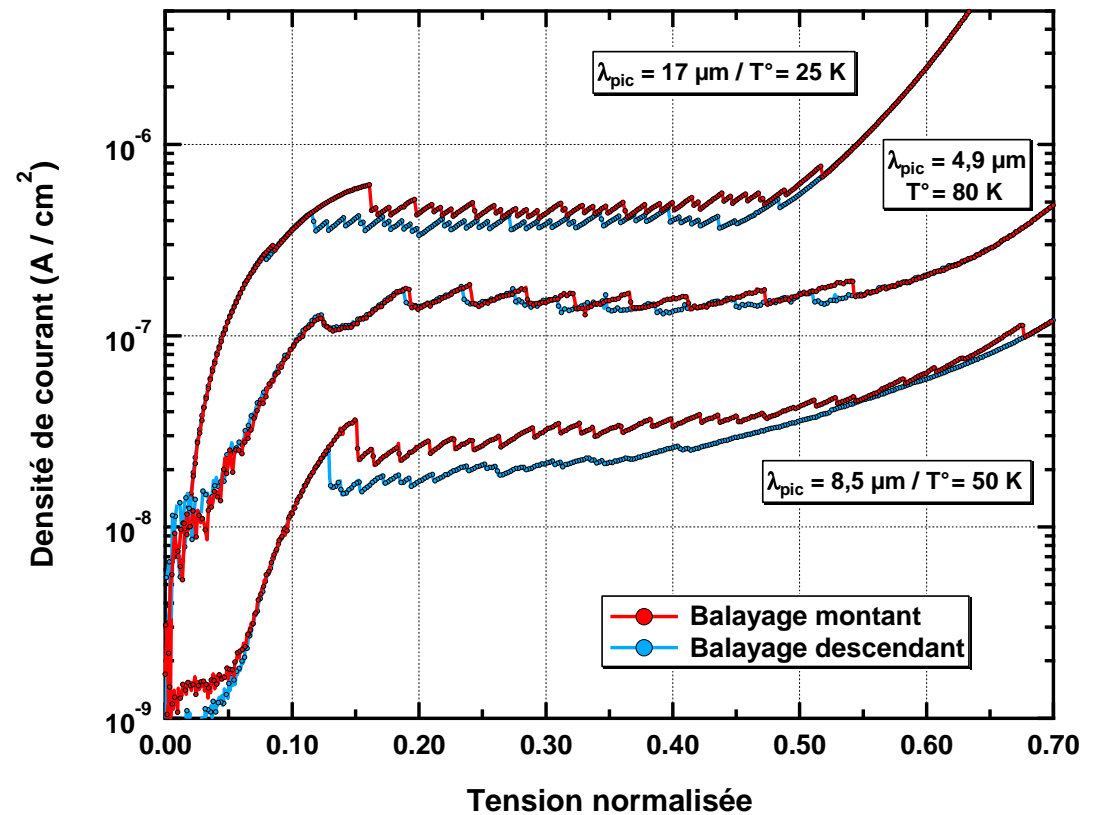
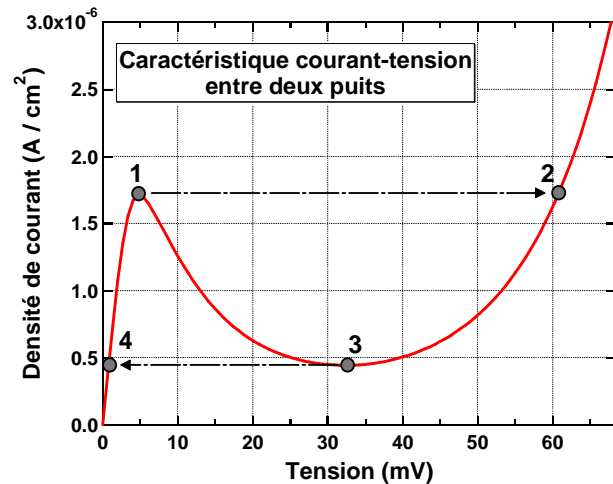


# Régime tunnel séquentiel résonant

## ► Régime de transport à basse température

- Plateau de courant
- Hystérésis
- Dents de scie

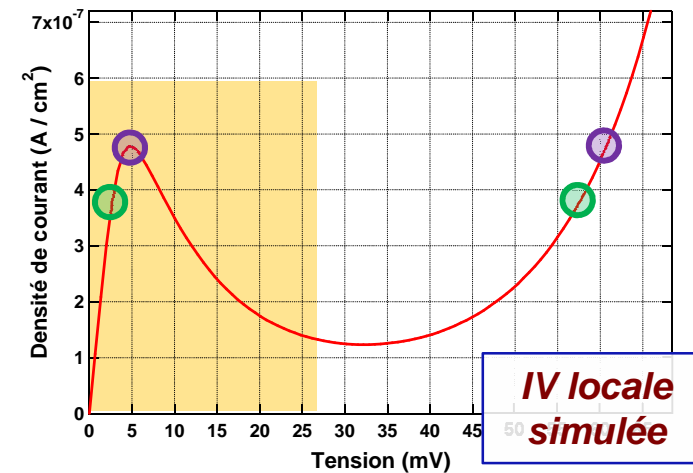
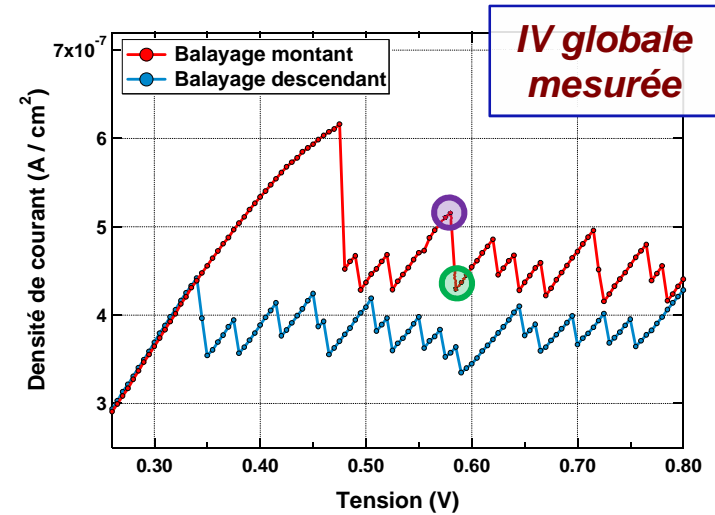
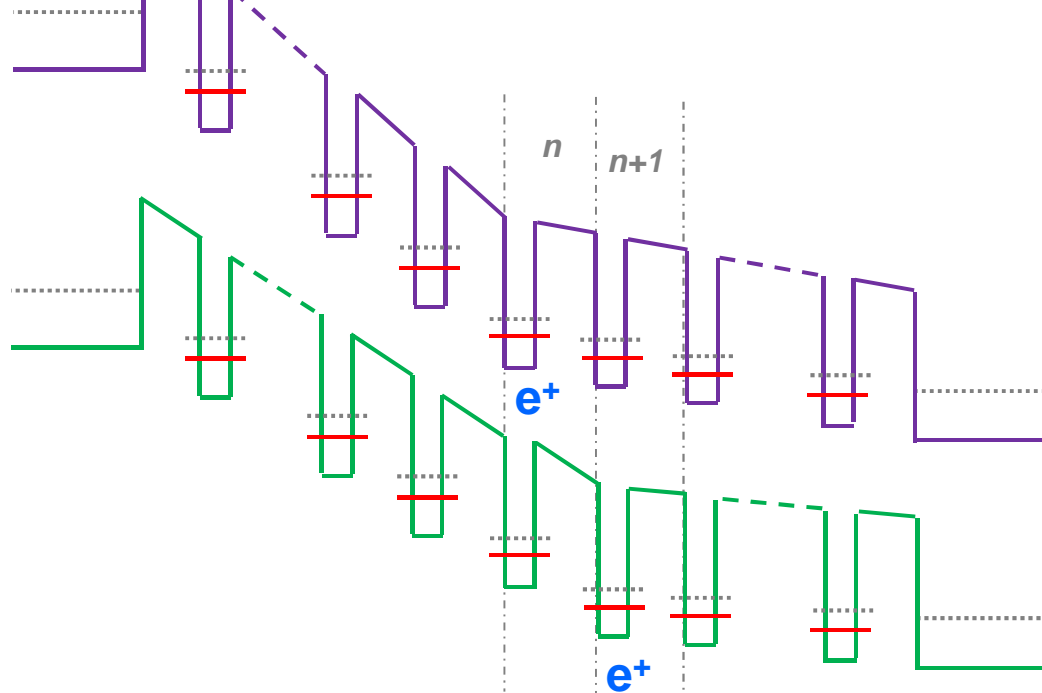
## ► Résistance différentielle négative



# Domaines de champ

## ► Conservation du courant

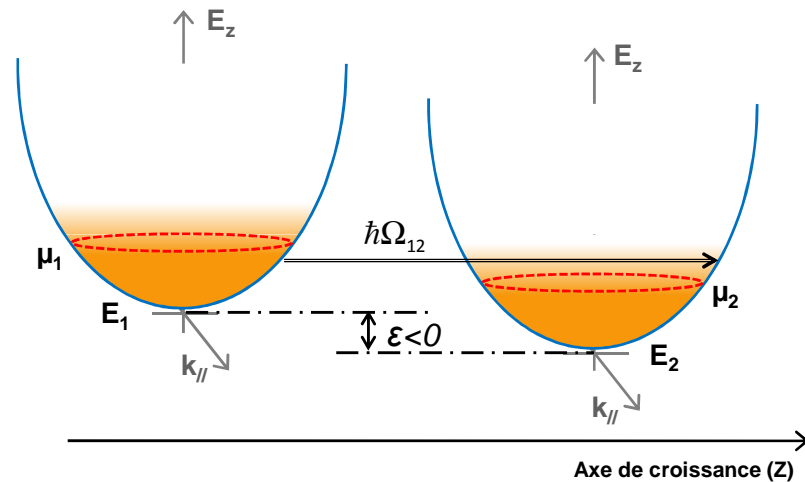
- Courant de pic / vallée
- Zone de déplétion / accumulation
- Plateau tunnel  $\approx$  Max. de l'IV locale



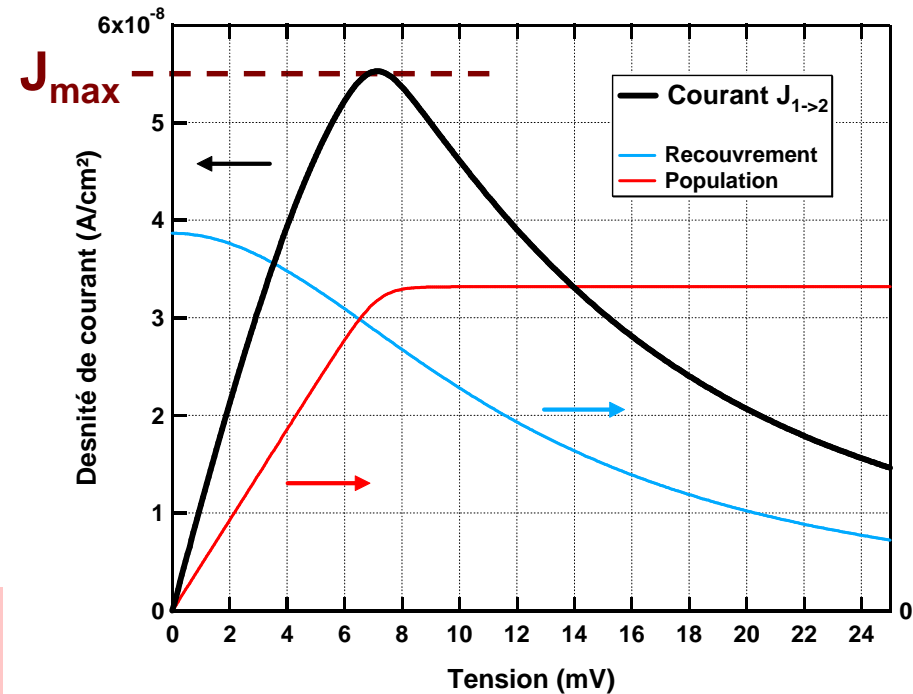
# Modélisation du courant résonant

## ► Approche du type *Kazarinov et Suris\**

### ■ Energie de couplage



$$J_{1 \rightarrow 2} = \frac{2e |\hbar \Omega_{12}|^2}{\hbar} \cdot \rho_0 k_B T \cdot \frac{\gamma}{\epsilon^2 + \gamma^2} \cdot \log \left[ \frac{1 + \exp\left(\frac{\mu_2 - E_1}{k_B T}\right)}{1 + \exp\left(\frac{\mu_1 - E_1}{k_B T}\right)} \right]$$



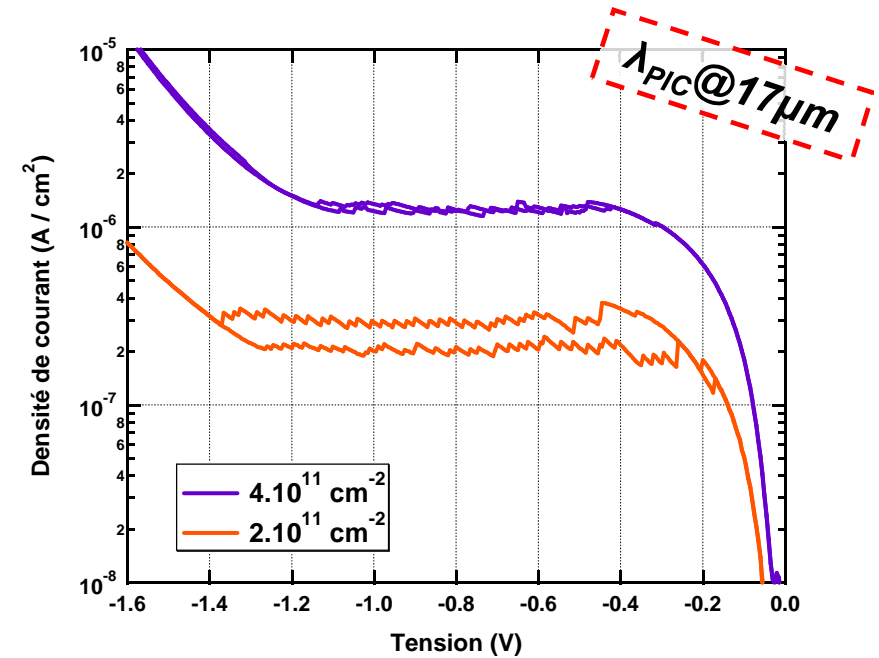
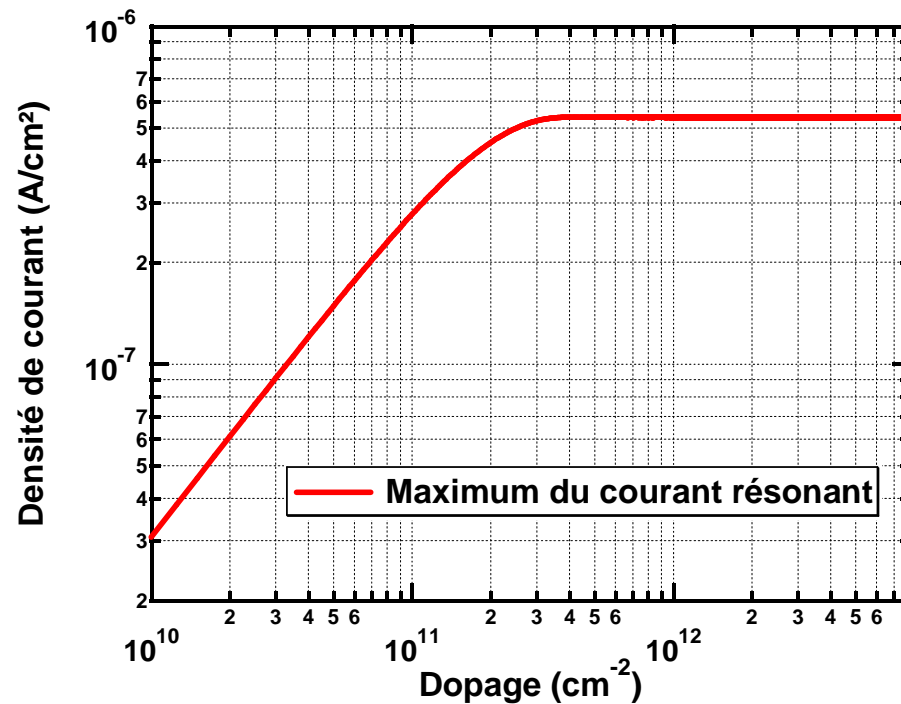
Termes de population et de recouvrement

$\gamma$  : élargissement des niveaux (fixé à 12 meV) /  
 $\rho_0$  : densité d'états /  $\epsilon$  : tension /  $\Omega$  : couplage /  
 $\mu$  : potentiel chimique /  $E$  : énergie des niveaux

# Dépendance en dopage

## ► Evolution de $J_{max}$ avec le dopage

- Linéaire à « faible » dopage
- Indépendant à « fort » dopage



## ► Le courant de vallée est non résonant

- IV locale : disparition de la RDN
- IV globale : disparition des dents de scie

# Evaluation quantitative du plateau

## ▶ Maximum du courant tunnel résonant

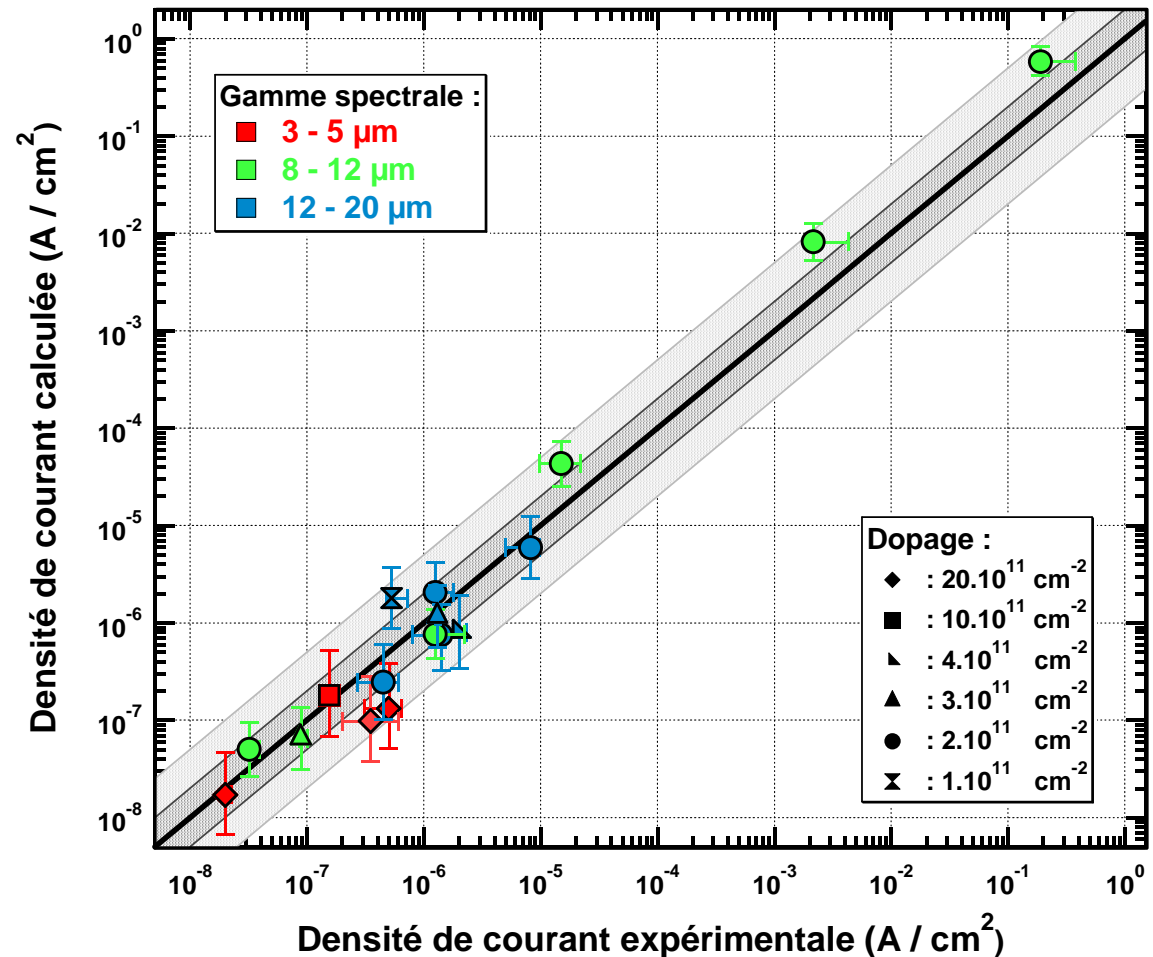
versus

## Plateau tunnel expérimental\*

- Incertitude sur la couche et sur le niveau du plateau

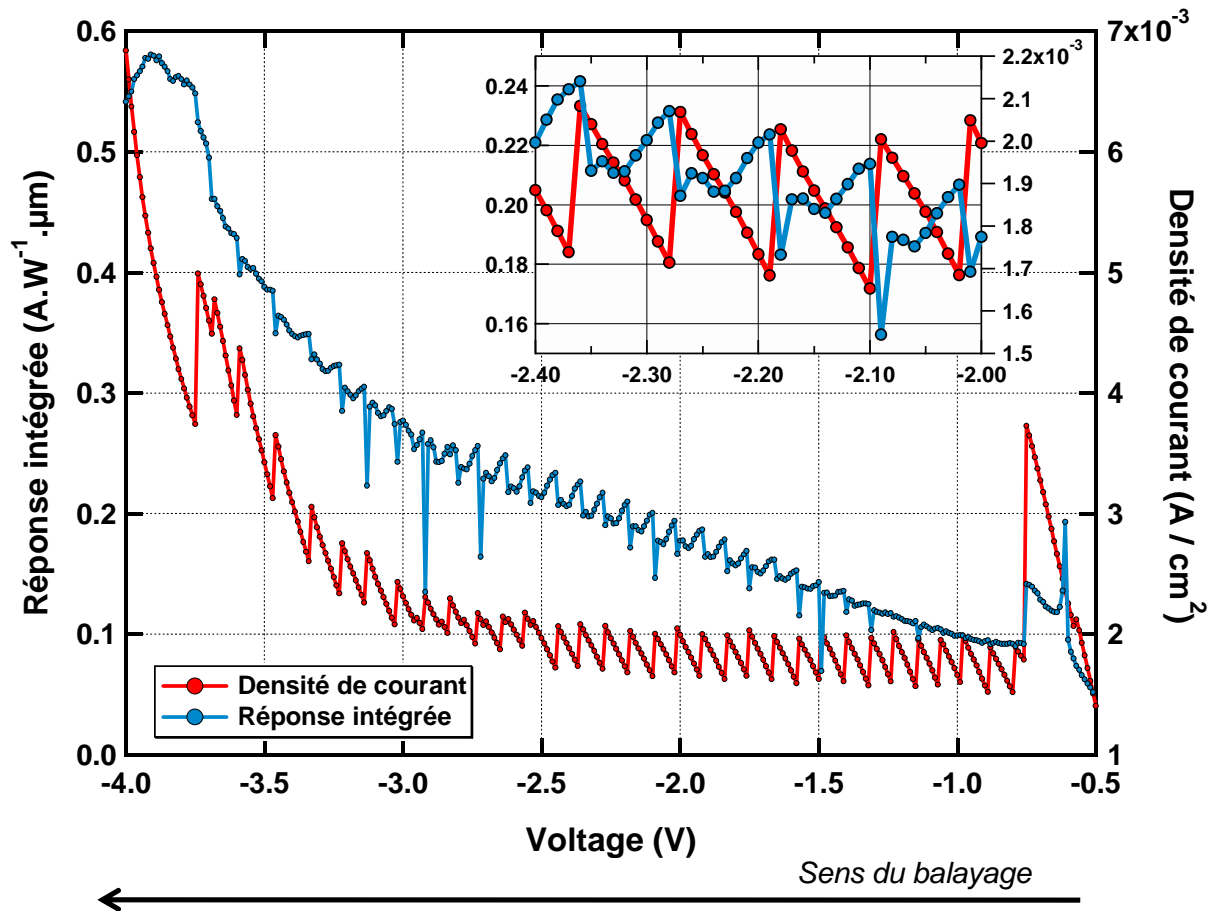
## ▶ 17 échantillons

- Gamme spectrale de 3 à 20  $\mu\text{m}$
- 8 ordres de grandeur en courant
- Facteur 20 en dopage



# Réponse mesurée en régime tunnel

► Courant total dominé par le courant tunnel ( $\lambda = 8,5\mu\text{m}$  ;  $L_B = 20\text{ nm}$ )

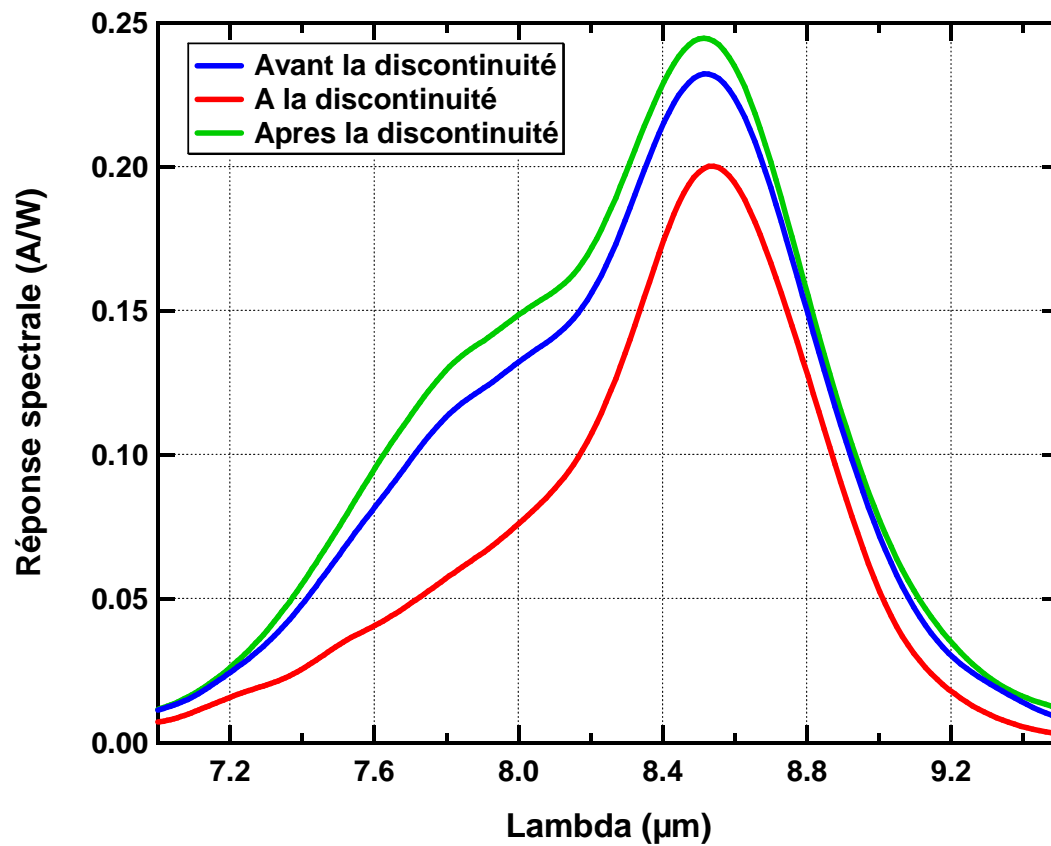


- Augmentation de la réponse après chaque discontinuité
- Baisse de la réponse au sein d'une dent de scie
- « Chute » de réponse à chaque discontinuité

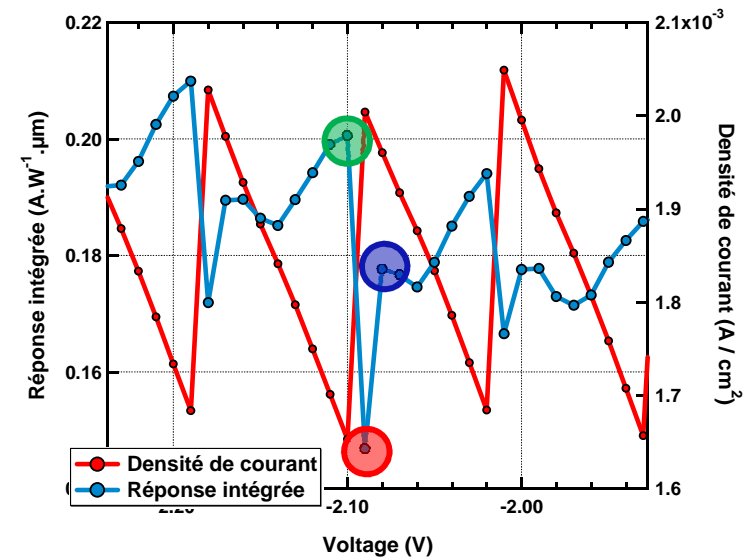


# Comportement atypique de la réponse

## ► Réponse spectrale autour d'une discontinuité



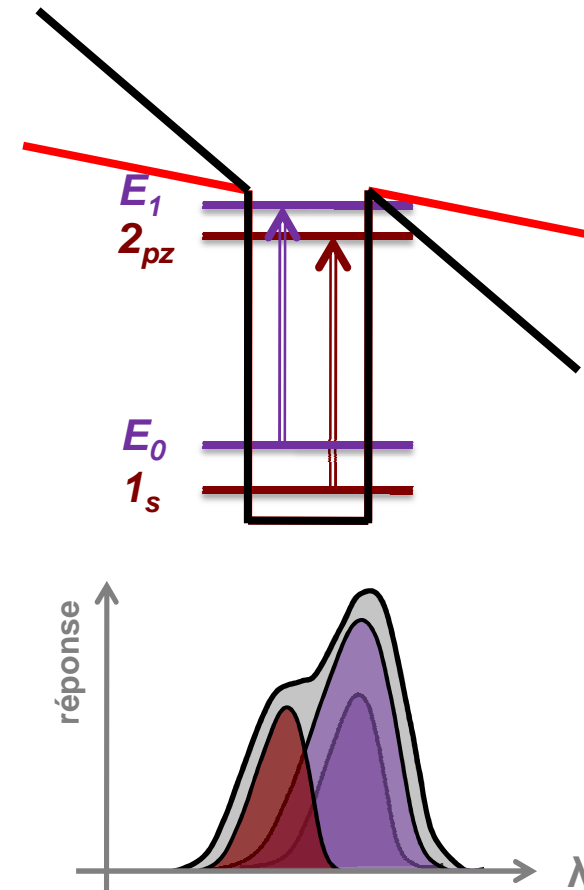
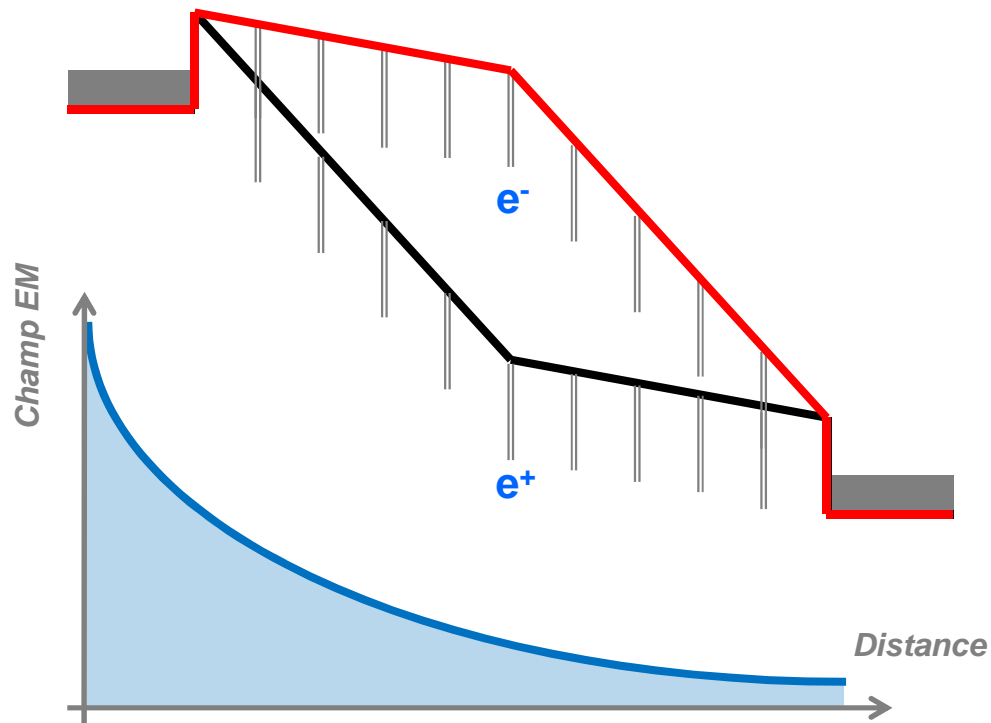
- Baisse de la réponse au pic
- Disparition de l'épaulement



# Inversion des zones de champ

## ► Distribution inhomogène du champ EM et niveaux d'impuretés

- Baisse de la réponse au pic
- Diminution de la FWHM



- ▶ **Etude du transport tunnel séquentiel résonant dans les QWIPs**
  - A basse température, ce transport domine malgré des énergies de couplage ( $\Omega_{12}$ ) de quelques nano-eV
  
- ▶ **Modélisation du courant tunnel résonant**
  - Outil prédictif et quantitatif pour calculer le niveau de courant du plateau
  
- ▶ **Etude expérimentale de l'impact du régime tunnel séquentiel résonant sur la réponse**
  - Mise en évidence de comportements atypiques dans la réponse spectrale

▶ **Introduction**

▶ **Etude structurale et chimique des hétérostructures AlGaAs/InGaAs**

▶ **Transport électronique en régime tunnel séquentiel résonant**



▶ **QWIPs large bande**

- Transfert de charge dans les structures interdigitées ; stratégie de design

▶ **Conclusion**

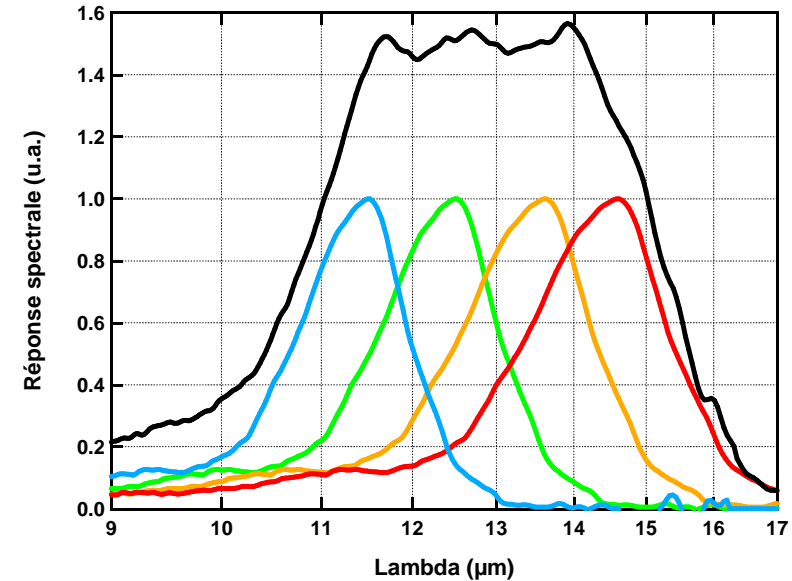
# QWIPs large bande

## ▶ Réponse bande étroite ( $90 \text{ cm}^{-1}$ )

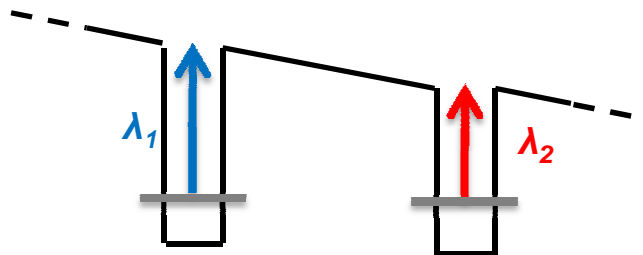
- Augmentation du contraste

## ▶ Réponse large bande

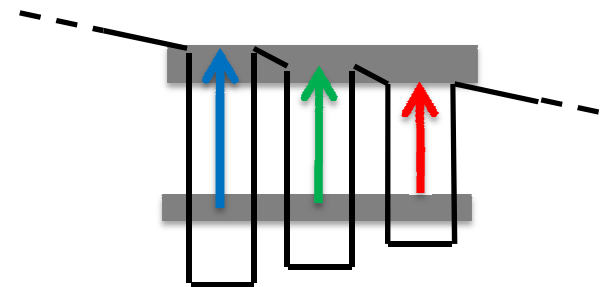
- Spectroscopie
- Détection multispectrale



## ▶ Structure interdigitée



## ▶ Puits couplés



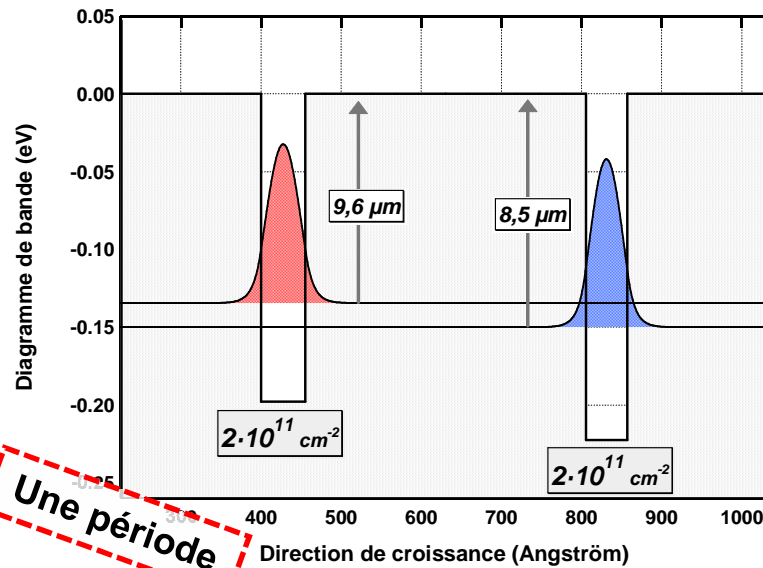
# Effet de la température

▶ **A basse température ( $T < T_{BLIP}$ ) :**

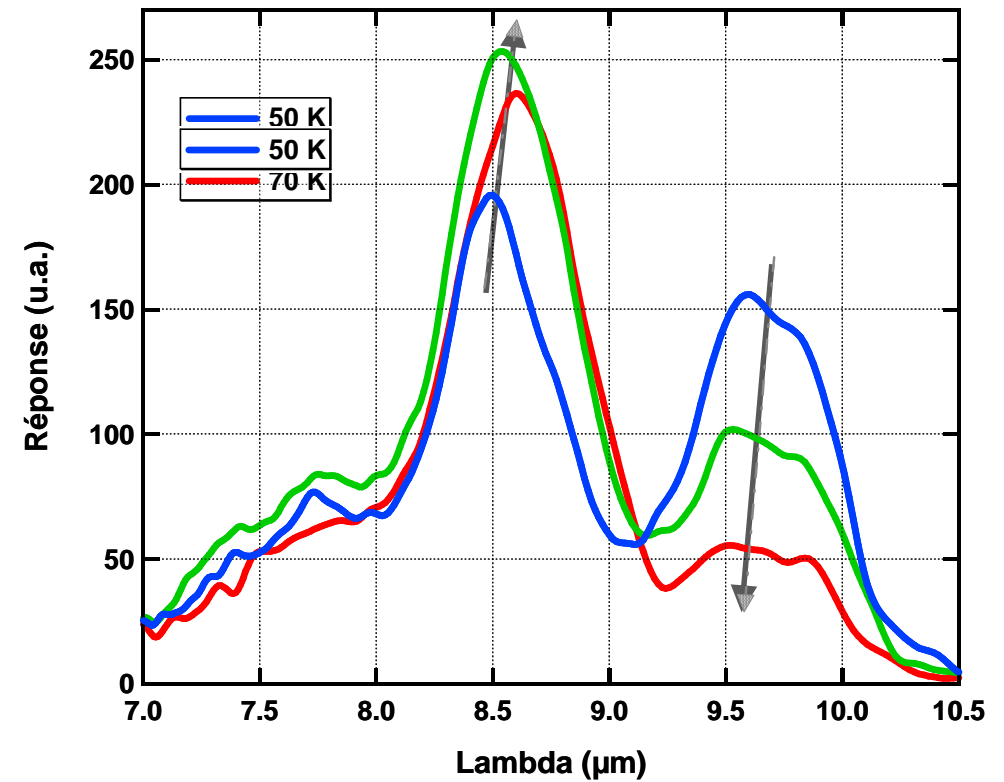
- Double pic

▶ **A haute température ( $T > T_{BLIP}$ ) :**

- Simple pic



Une période



*Redistribution des porteurs à 0V*

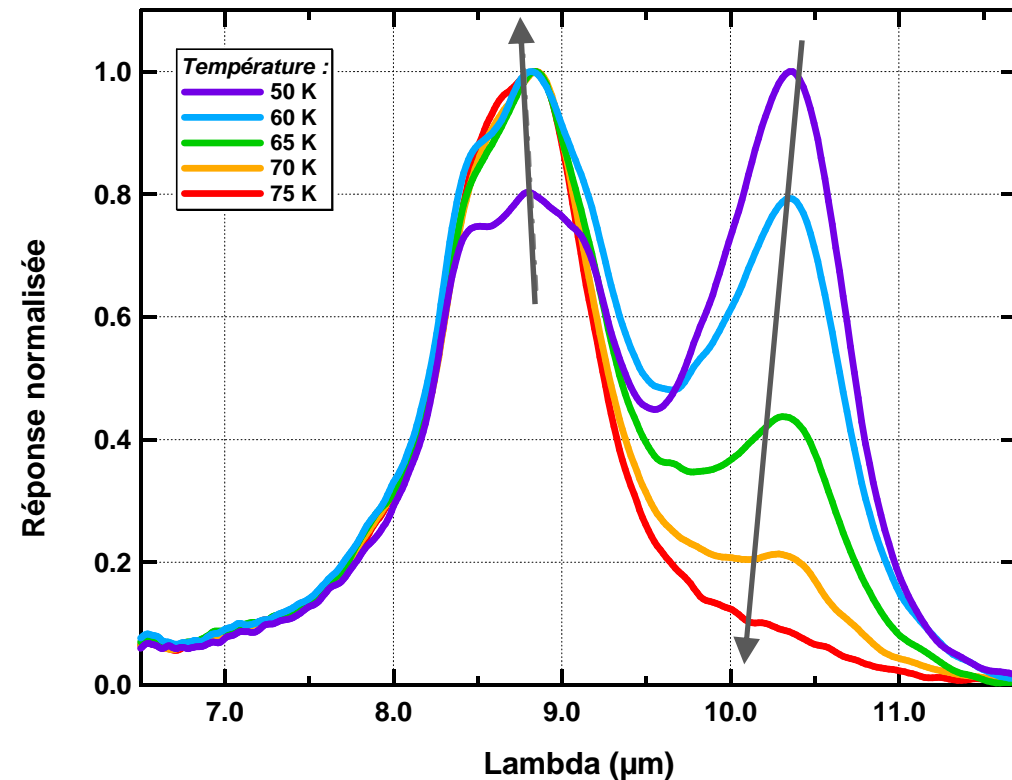
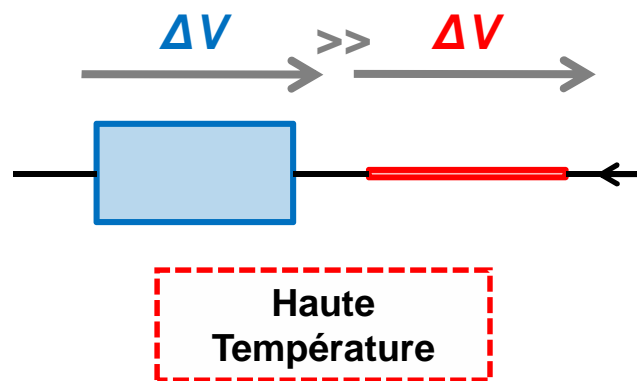


# Conservation du courant

## ► Second design

- Compenser la redistribution des porteurs par un dopage inhomogène
- Effet similaire

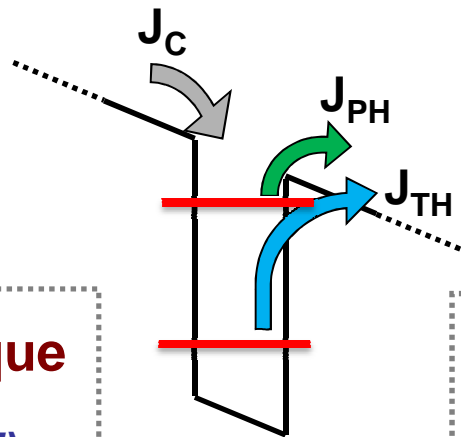
## ► Conséquence de la loi de conservation du courant



# Modification du régime de courant

## ► Modèle photoémisif : conservation du courant

- Equilibre entre les flux entrant et sortant des puits



### Basse T° : régime optique

$$J_{PH} \propto \Phi \cdot f_{0 \rightarrow 1} \cdot \eta_S(F) \cdot p_E(F)$$

$\Phi$ : flux optique

$f_{0 \rightarrow 1}$ : force d'oscillateur

$\eta_S$ : densité de porteurs

$p_E$ : probabilité d'émission

### Haute T° : régime thermique

$$J_{TH} \propto \exp(-E_A/kT)$$

avec  $E_A \approx E_{PEAK} - E_F(n_S) - \varepsilon(F)$

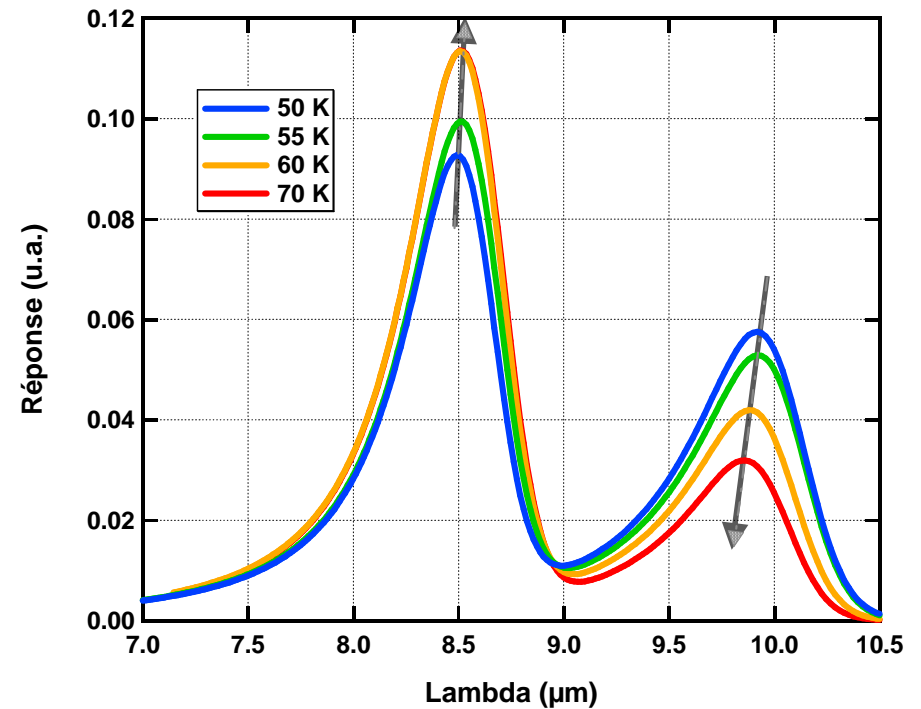
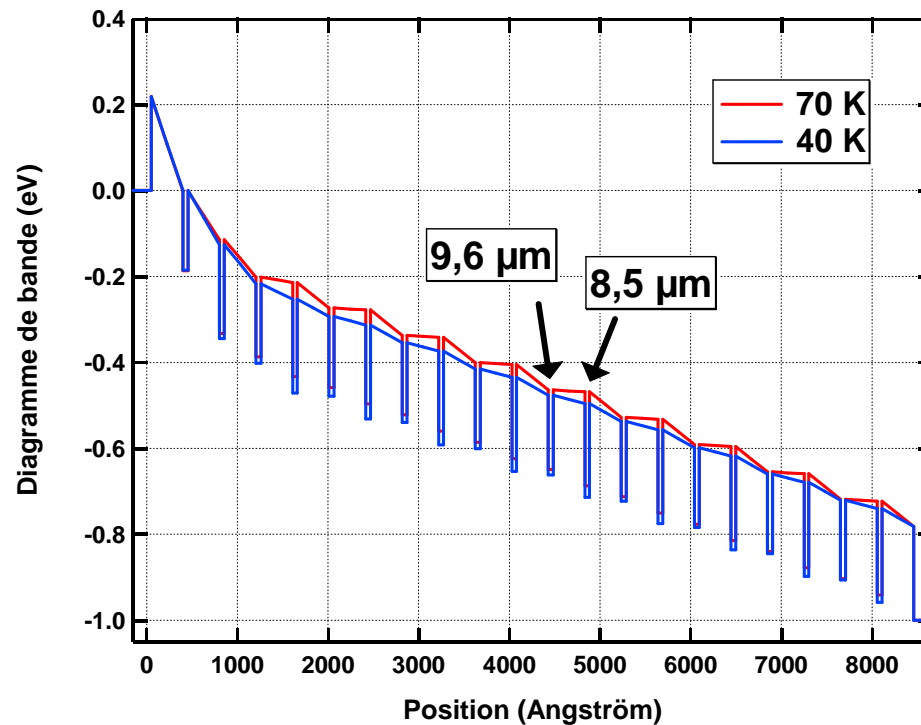
$E_{PEAK}$ : énergie au pic d'absorption

$E_F$ : niveau de Fermi

$\varepsilon$ : abaissement de la barrière avec le champ

# Distribution non uniforme du champ

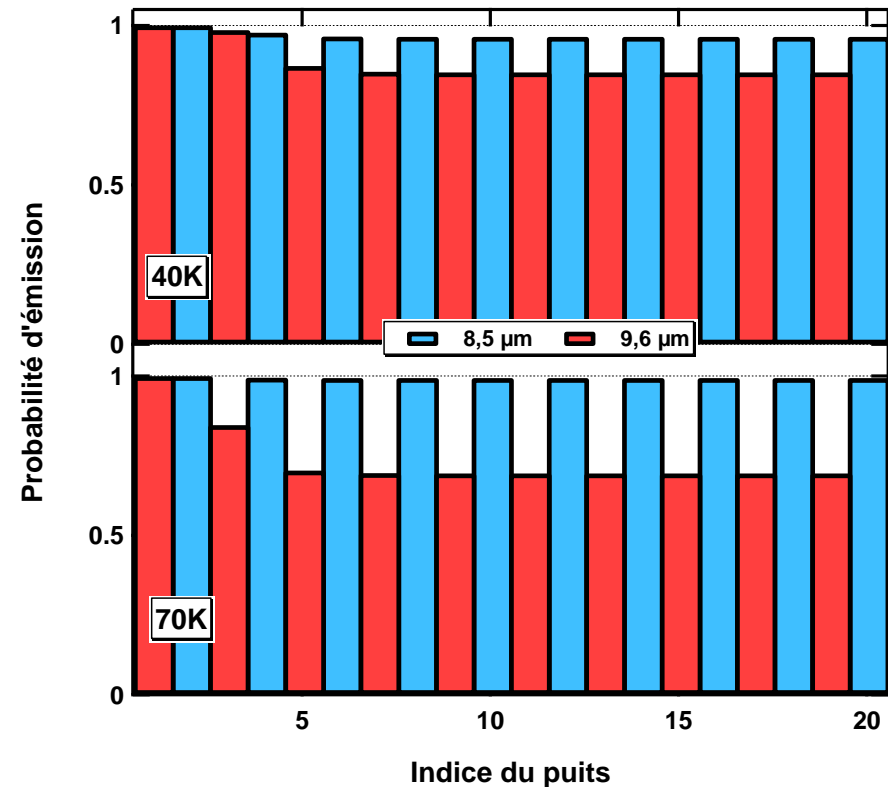
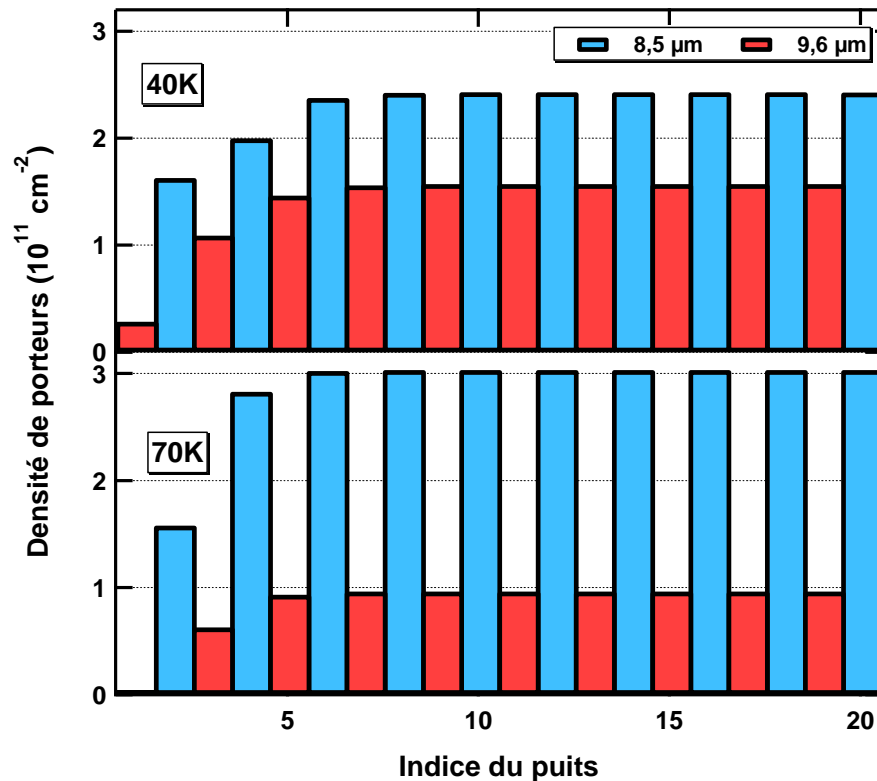
## ► Simulation avec le modèle photoémissif



- $J_{\text{OPTIQUE}}$  semblables pour les deux puits => **Champ uniforme**
- $J_{\text{THERMIQUE}}$  très différents => **Champ non uniforme = Transfert de charge**

# Porteurs et probabilité d'émission

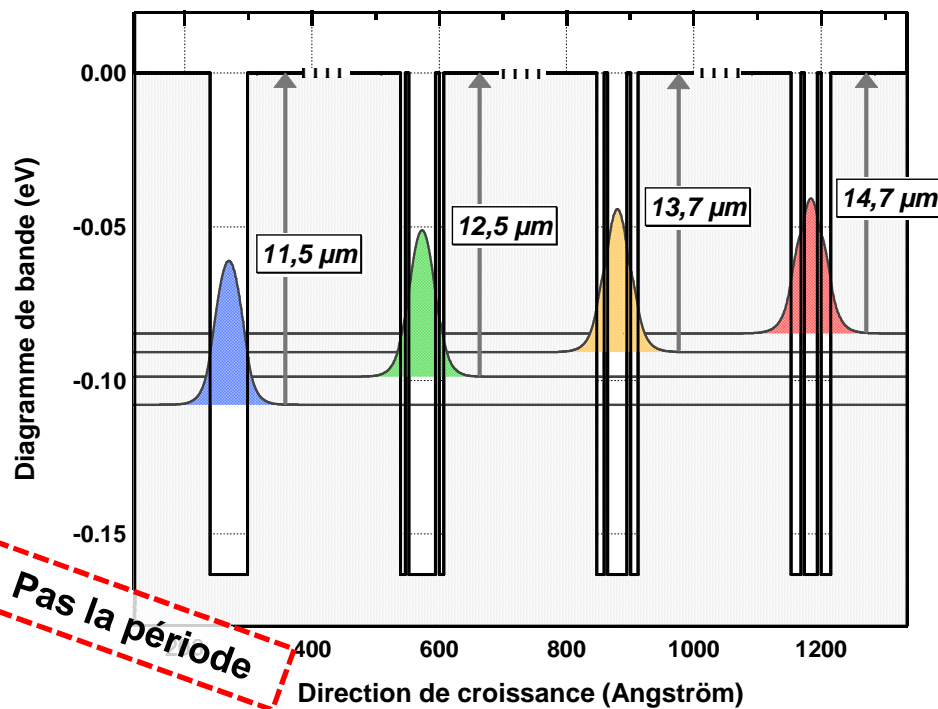
## ► Changements de réponse : porteurs & probabilité d'émission



Dopage de  $2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  pour chaque puits

## ► Spectromètre (Agence Spatiale Européenne)\*

- Bande spectrale : 11 – 15  $\mu\text{m}$  ( $\Delta\sigma \approx 250 \text{ cm}^{-1}$ )
- 4 puits avec des *sur-barrières*



## ► Energie d'activation identique pour tous les puits

- Compenser les différences de niveaux fondamentaux par les niveaux de Fermi

## ► Absorption équivalente à toutes les longueurs d'onde

- Produit *nombre de puits par quantité de dopants constant*

# Réponse spectrale large bande

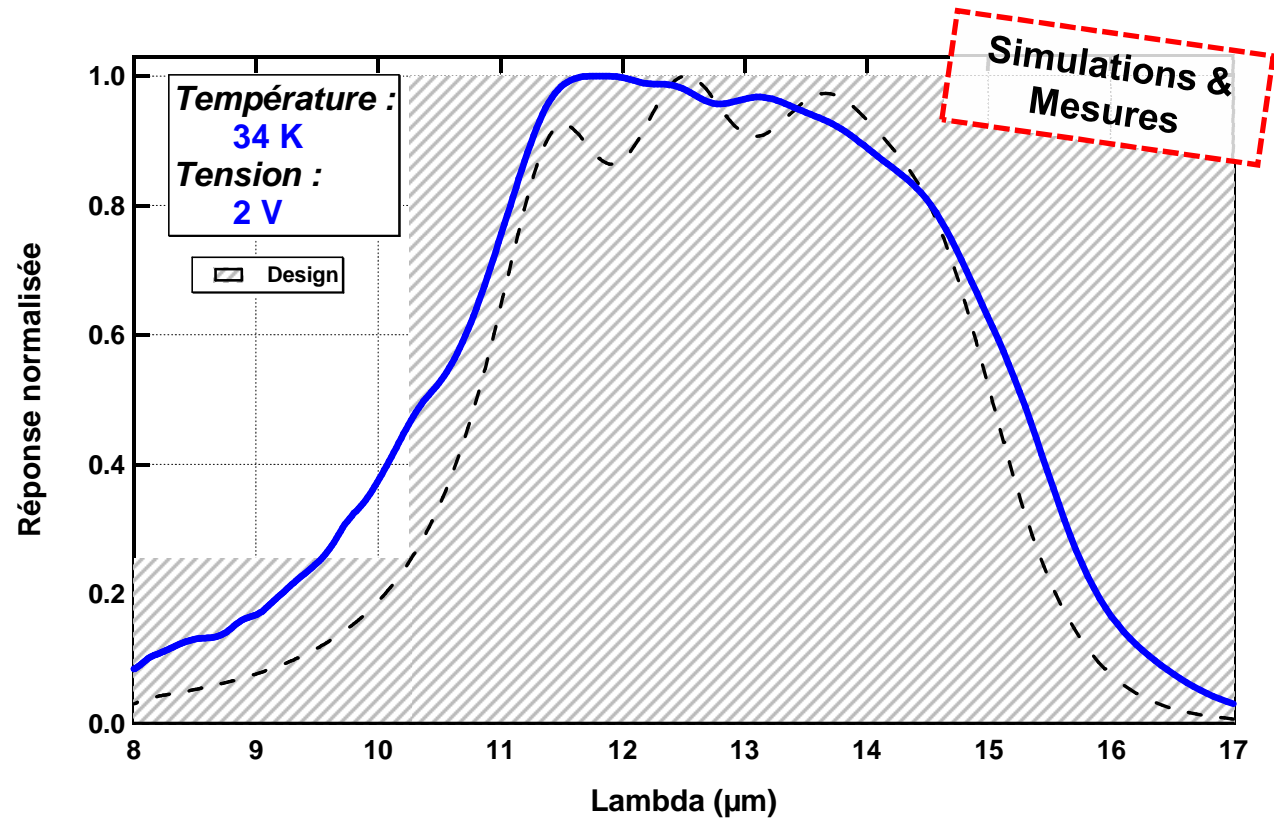
Lambda ( $\mu\text{m}$ )	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	13.7	13.7	13.7	12.5	11.5	11.5	12.5	12.5	13.7	13.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
Doping ( $1.10^{11} \text{ cm}^{-2}$ )	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	3.1	3.1	3.1	6.2	9	9	6.2	6.2	3.1	3.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1

► Super-période

► Design large bande\*

► QWIP large bande

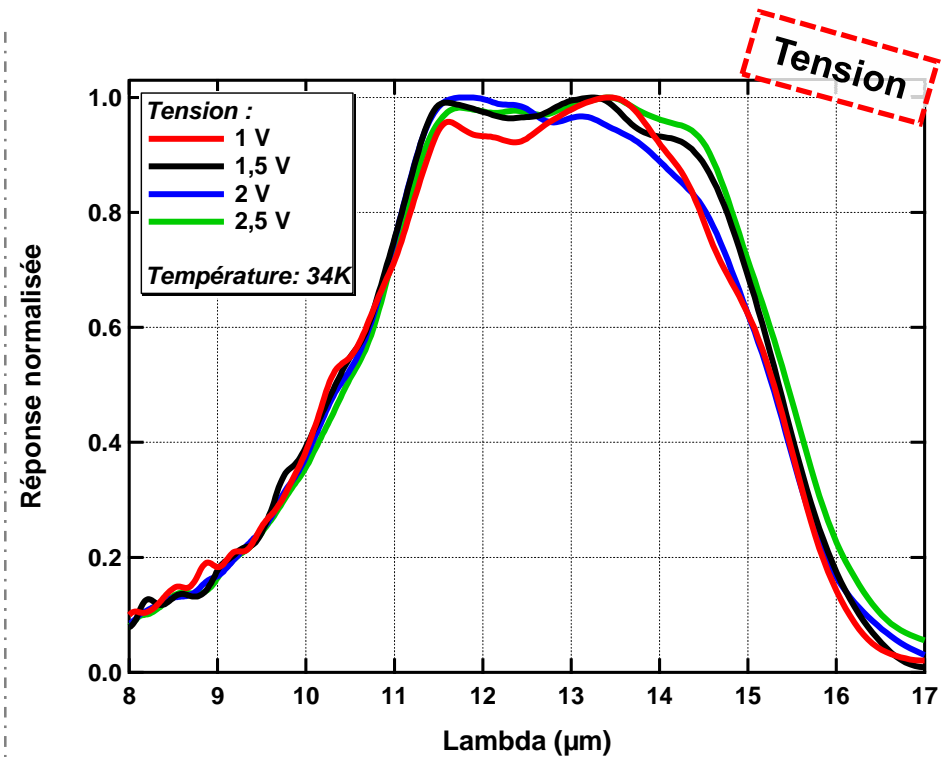
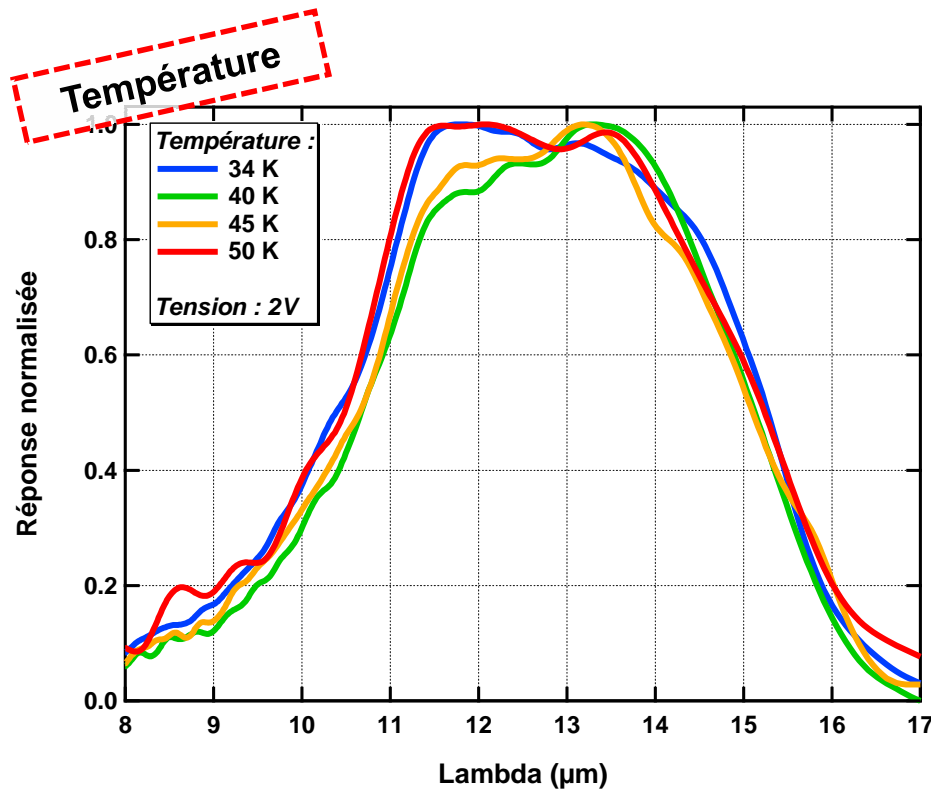
■ 10,5 – 15,3  $\mu\text{m}$   
( $\Delta\sigma \approx 300 \text{ cm}^{-1}$ )





# Gabarit indépendant des conditions

## ► Gabarit quasi-indépendant de la température et de la tension

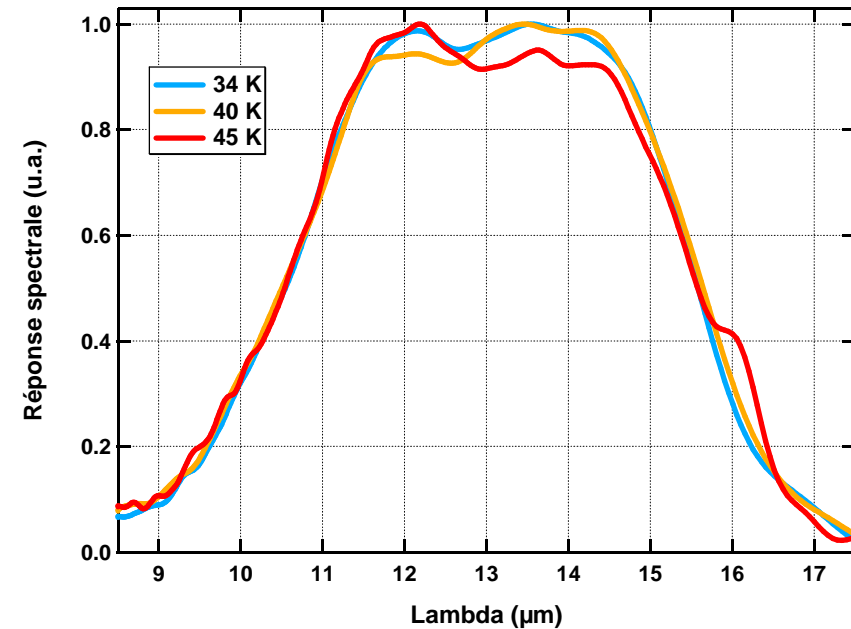
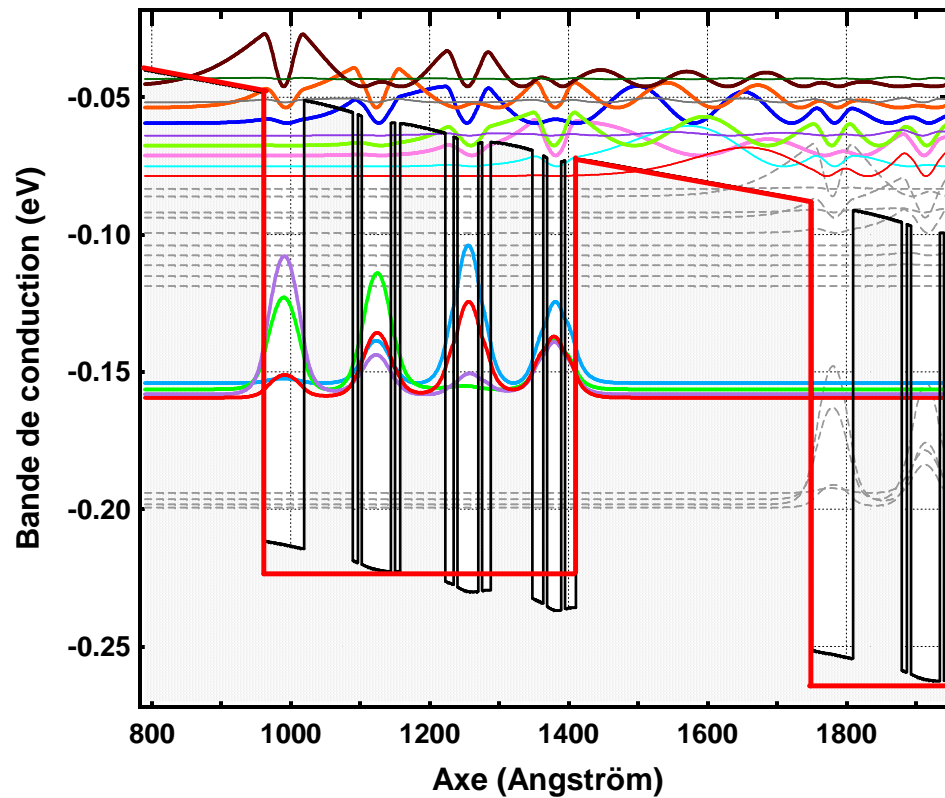


## ► Pixels sans structure de couplage optique (A. Berurier)

# QWIP à puits couplés

- ▶ Simulation avec le modèle diffusif

- ▶ Délocalisation des porteurs

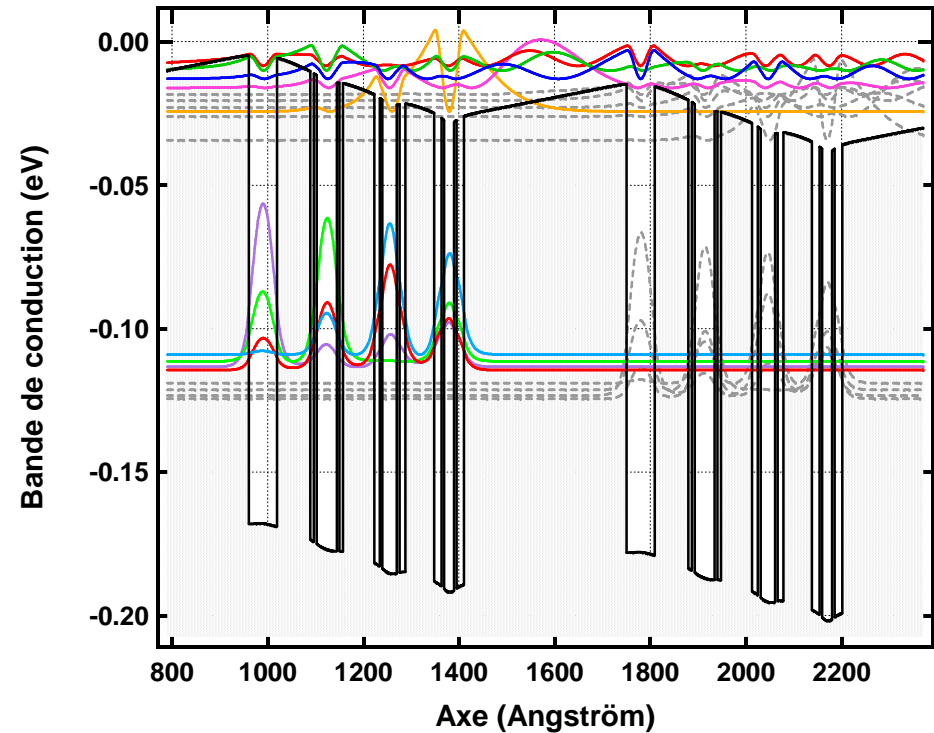
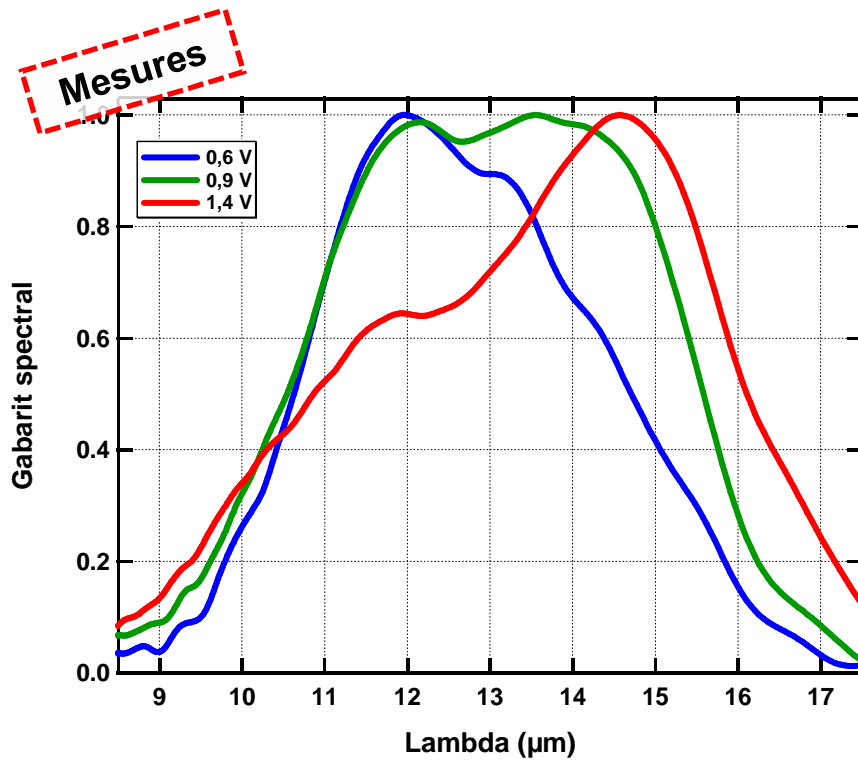


- ▶ Réponse expérimentale large bande [10,5 – 15,5 μm]

- ▶ Indépendante de la température

# Evolution de la probabilité d'émission

## ► Gabarit spectral dépendant de la tension



## ► Maintien des niveaux alignés

- Changement de la barrière d'émission avec la tension

## ▶ Effet de la température sur les QWIPs interdigités standard

- A haute température, la réponse correspondant aux puits de plus faible énergie d'activation disparaît
- Comportement prédictible avec un modèle photoémissif

## ▶ QWIPs interdigités optimisés

- Règles de design (énergie d'activation et absorption identique à toutes les longueurs d'onde)
- Gabarit quasi-indépendant de la température et de la tension

## ▶ QWIPs à puits couplés

- Gabarit indépendant de la température, mais dépendant de la tension
- Comportement simulable avec METIS

- ▶ **Introduction**
  
- ▶ **Etude structurale et chimique des hétérostructures AlGaAs/InGaAs**
  
- ▶ **Transport électronique en régime tunnel séquentiel résonant**
  -
  
- ▶ **QWIPs large bande**
  
- ▶ **Conclusion**

# Conclusion - Perspectives

## ▶ Etude structurale et chimique

- Limitations intrinsèques des puits contraints à double barrière : ségrégation et contrainte
- Prise en compte et validation de ces effets dans nos simulations
  - Optimiser les structures pour abaisser la longueur d'onde
  - Répondre aux besoins de détecteurs bi-spectraux MW / LW

## ▶ Transport en régime tunnel

- Mise en place d'un modèle pour le courant tunnel résonant : accord quantitatif sur l'ensemble de nos échantillons
  - Réduire le niveau de courant tunnel
  - Proposer des imageurs hautes performances pour des applications faibles flux



# Conclusion - Perspectives

## ► QWIP large bande

- Model photoémissif : outil d'optimisation des composants
  - Réduire le courant d'obscurité en utilisant des couches à gradient de dopage et/ou d'épaisseur de barrière
- Conception et réalisation de QWIPs large bande en utilisant des puits couplés
- Etablissement et validation des règles de design pour obtenir une réponse large bande indépendante des conditions opérationnelles avec des structures interdigitées
- Réalisation de QWIPs dans la gamme [10,5 – 12,3  $\mu\text{m}$ ] pour l'agence spatiale américaine (mission LANDSAT) et [10,5 – 15,5  $\mu\text{m}$ ] pour l'agence spatiale européenne
  - Nécessité de développer des structures de couplage large bande

Introduction

Etude structurale et chimique

Transport en régime tunnel

QWIPs large bande

**Conclusion**

# Remerciements

## ► Collaborations extérieures

- Groupe STEM (LPS/Paris 11), Equipe DON (MPQ/Paris 7), E. Lhuillier (ONERA)

## ► Les unités Thales : TR6 et TOSA



**Groupe Imagerie  
et les équipes  
du III-V Lab/TRT**



## VINCENT GUÉRIAUX

Contribution à l'étude expérimentale et théorique des photodétecteurs infrarouge à multipuits quantiques couvrant la bande spectrale 3 – 20  $\mu\text{m}$

