Lasers à cascade quantique à plasmons de surface et leurs applications aux cristaux photoniques

Michaël Bahriz
Directeur de thèse : Raffaele Colombelli

OptoGaN
Institut d'Électronique Fondamentale
CNRS UMR 8622

Plan

Introduction aux Lasers à Cascade Quantique (LCQ)

Partie 1 :

Les guides à plasmons de surface argent

Partie 2 :

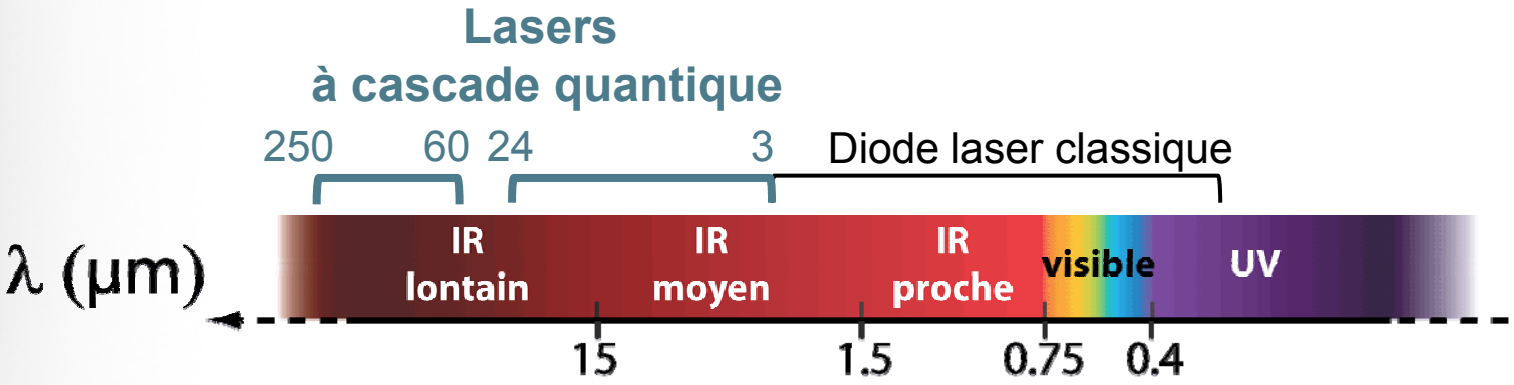
Mesure des pertes des guides à plasmons de surface

Partie 3 :

Les guides à plasmons de surface appliqués aux cristaux photoniques

Conclusions et perspectives

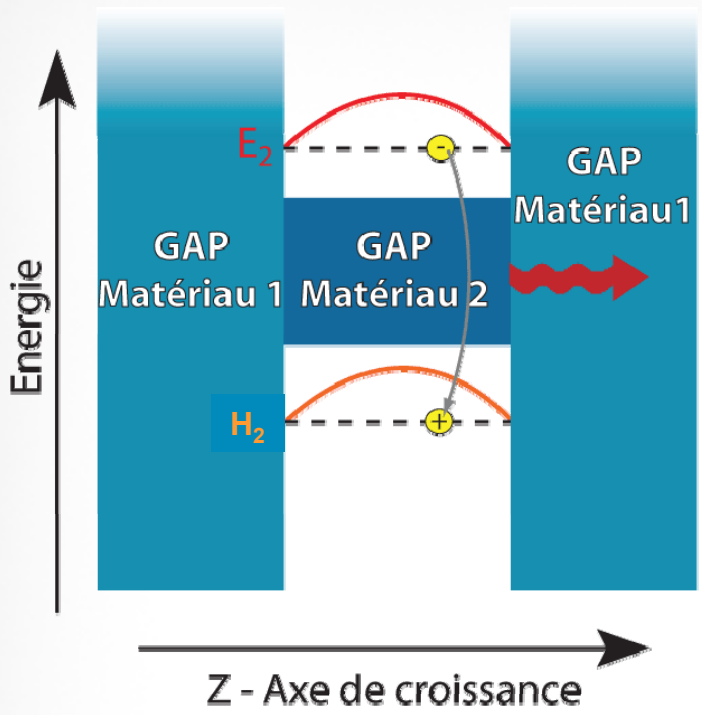
Introduction aux LCQs – *lasers à semiconducteurs*



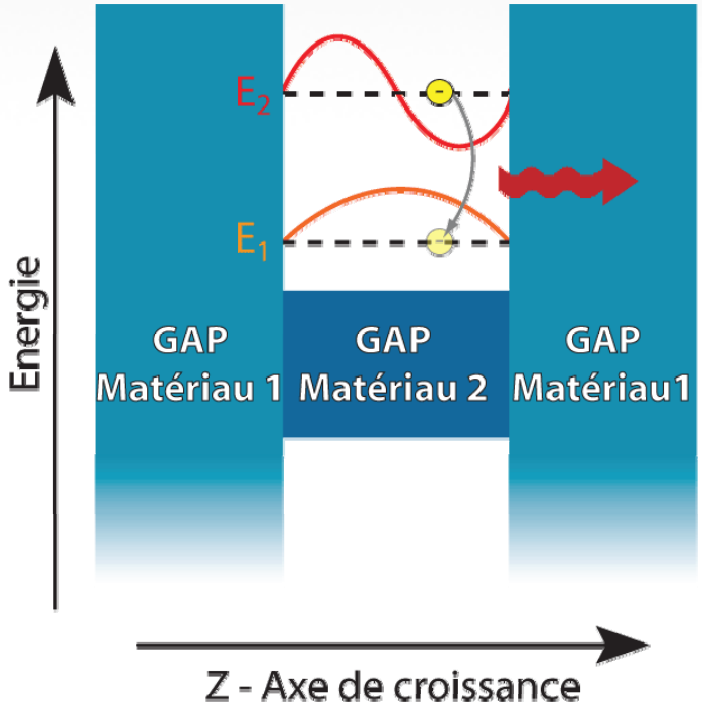
Deux grandes familles de lasers à semiconducteurs :

- **Lasers interbandes (Diode laser)**
- **Lasers intersousbandes (LCQ)**

Introduction aux LCQs – *lasers intersousbandes*



Transition interbande



Transition intersousbande

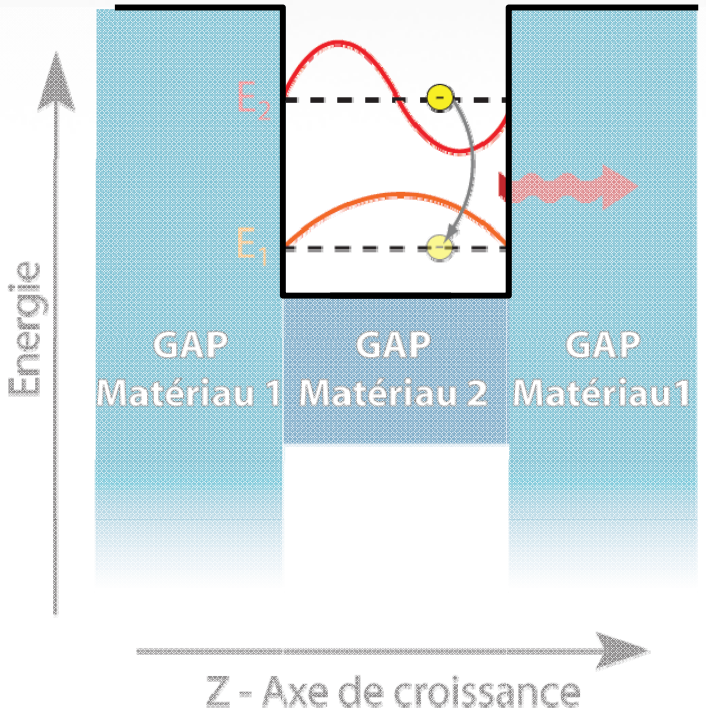
Caractéristiques des transitions intersousbandes

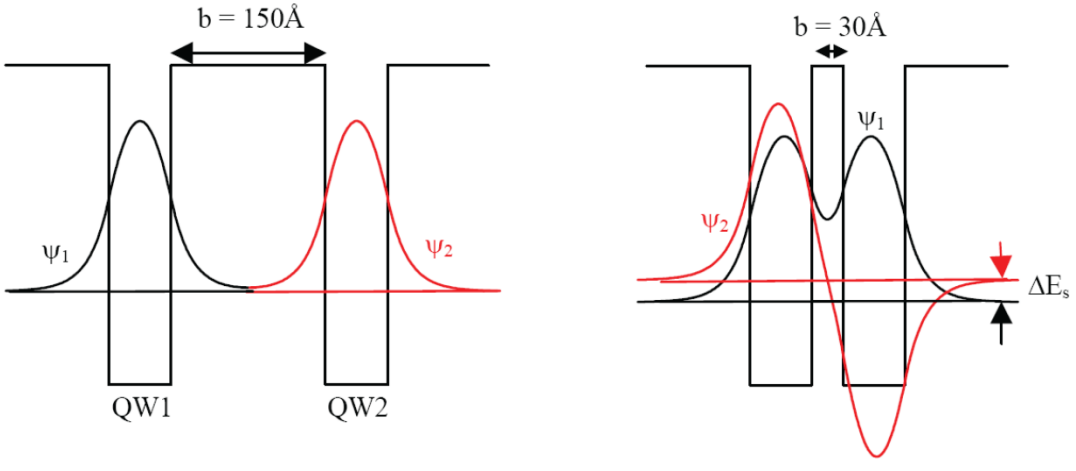
- **Importante force d'oscillateur**
- **Temps de transition ultra rapide (~ps) / transition interbande (~ns)**
- **Transition optique polarisée TM**
- **Liberté dans le choix de la longueur d'onde**

Introduction aux LCQs – *les puits couplés*

Les puits couplés permettent :

- **Une plus grande liberté dans le dessin des niveaux d'énergie**
- **Obtenir de faible différence d'énergie.**



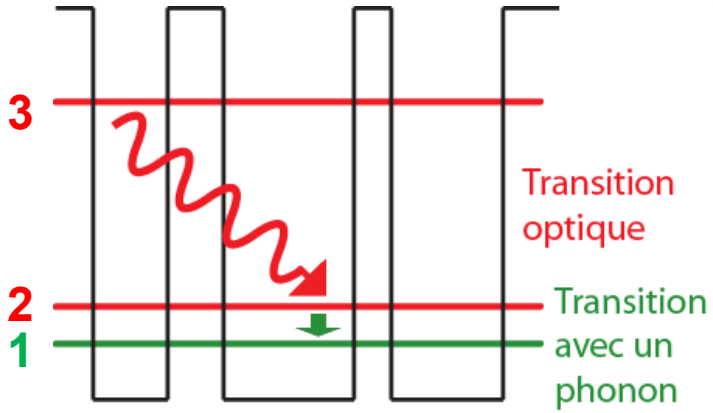


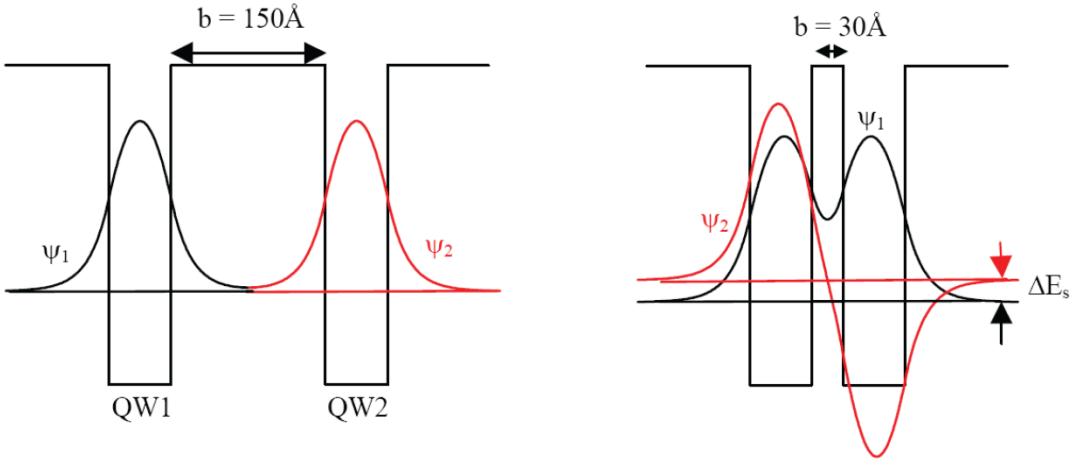
Introduction aux LCQs – *les puits couplés*

Région active d'un LCQ :

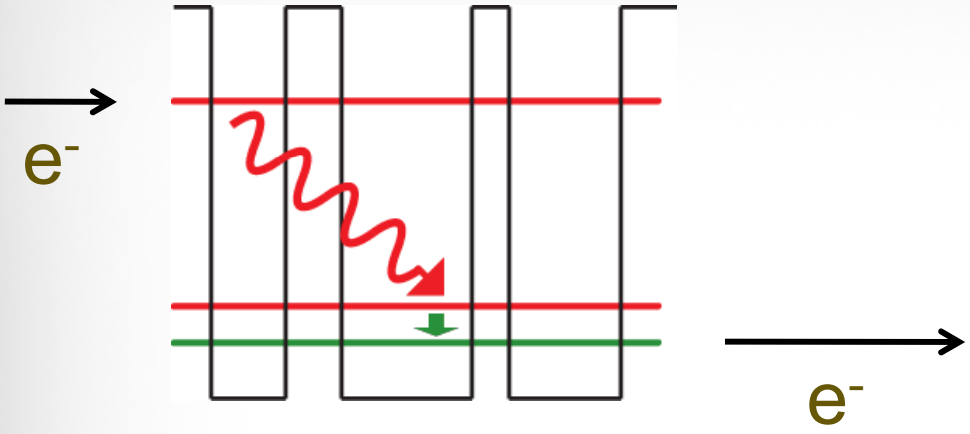
- **3 puits couplés**
- **Système à 3 niveaux**
- **Inversion de population grâce à un phonon optique (τ < ps)**

Région active d'un LCQ

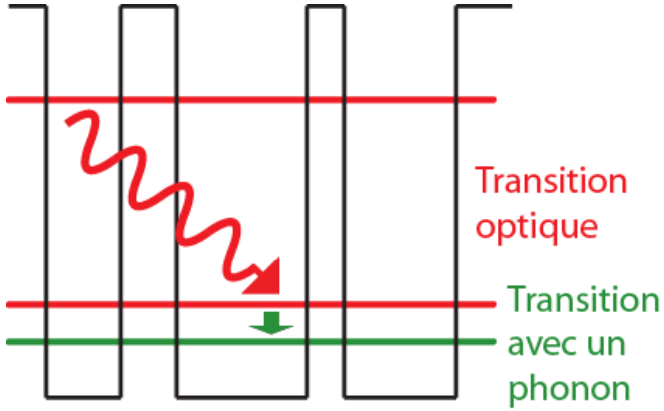




Introduction aux LCQs – *le concept de cascade*



Région active d'un LCQ



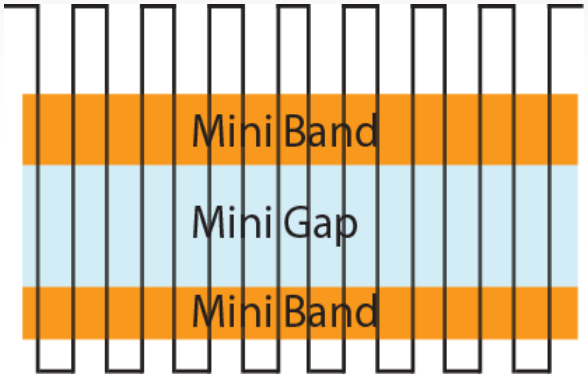
Le concept de cascade :

- **Les lasers à cascade quantique sont constitués d'une section de plusieurs régions actives.**
- **Un électron peut ainsi émettre plusieurs photons.**

Introduction aux LCQs – *l'injecteur*

Pour relier les régions actives entre elles :

- **On utilise une minibande**
- **On applique un champ électrique à l'ensemble de la structure**



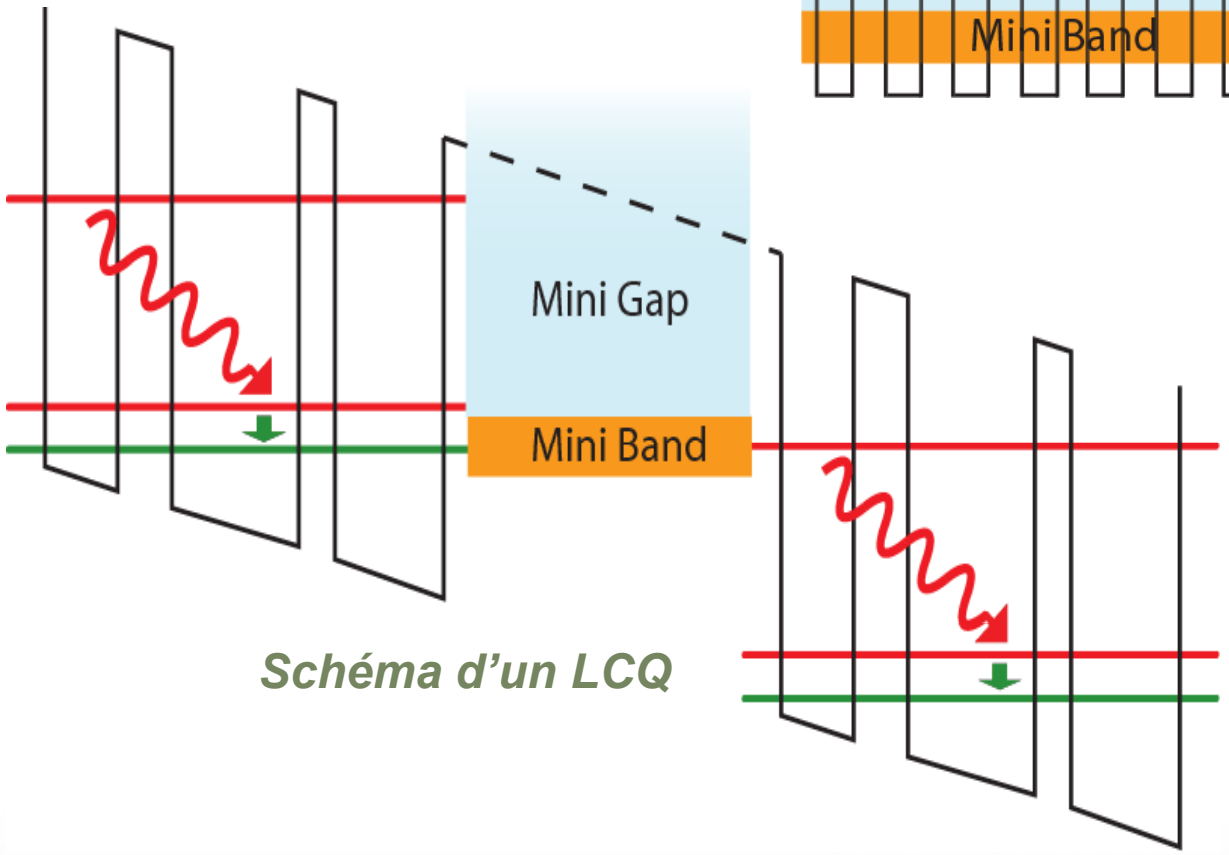


Schéma d'un LCQ

Introduction aux LCQs – *les étapes historiques*

1994 - Bell Labs
LCQ - λ~4,2 µm - **InGaAs/AlInAs/InP**
Fonctionnant en mode pulsé à température cryogénique

1998 - Thomson-CSF
LCQ - λ~9,4 µm - **AlGaAs/GaAs**
Fonctionnant en mode pulsé à température cryogénique

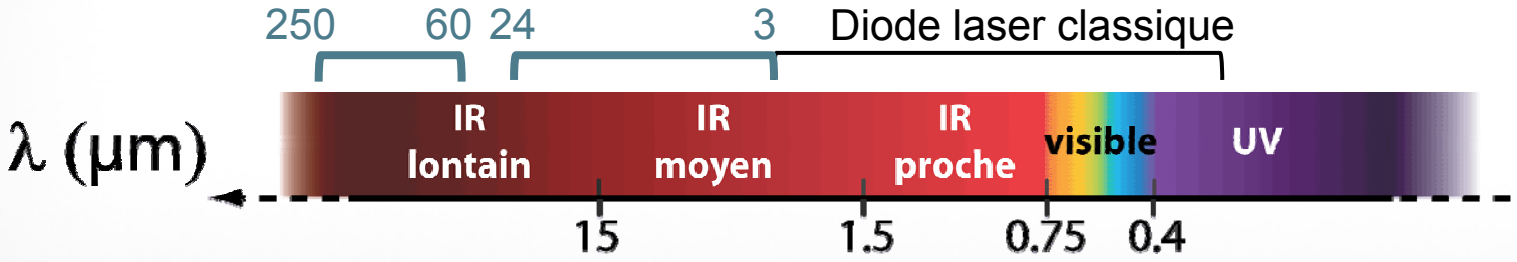
2002 – Université de Neuchâtel
LCQ - λ~9 µm - InGaAs/AlInAs/InP
Fonctionnant en mode **continu** à température **ambiante**

2002 – Scuola Normale Superiore
LCQ – **λ~68 µm** - **THz** - GaAs/ AlAs
Fonctionnant en mode continu à 30 Kelvin

2006 - Université de Montpellier
LCQ – **λ~3,1-3,3 µm** - **InAs/AlSb**
Fonctionnant en mode continu à basse température

2007 - Université de Montpellier
LCQ – **λ<3µm** - **InAs/AlSb**

Lasers
à cascade quantique
GaAs/AlGaAs ; InGaAs/AlInAs/InP ; InAs/AlSb



Introduction aux LCQs – *les étapes historiques*

1994 - Bell Labs
LCQ - λ~4,2 µm - **InGaAs/AlInAs/InP**
Fonctionnant en mode pulsé à température cryogénique

1998 - Thomson-CSF
LCQ - λ~9,4 µm - **AlGaAs/GaAs**
Fonctionnant en mode pulsé à température cryogénique

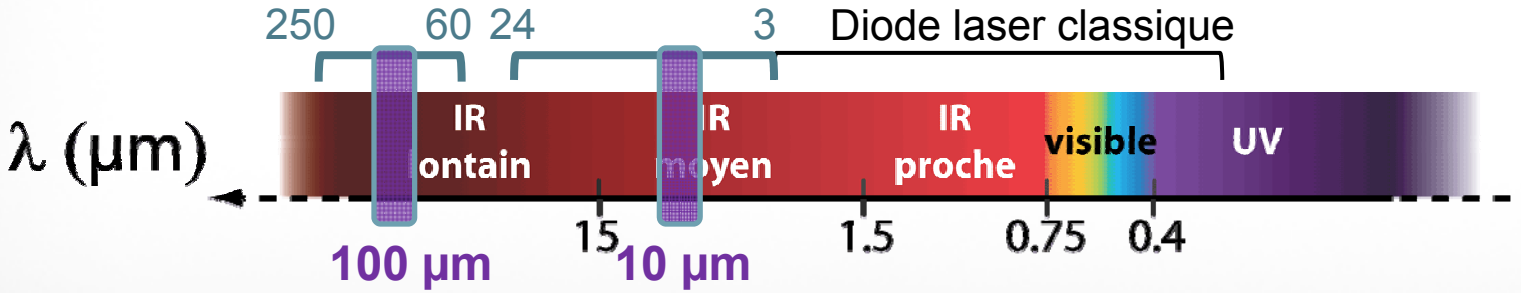
2002 – Université de Neuchâtel
LCQ - λ~9 µm - InGaAs/AlInAs/InP
Fonctionnant en mode **continu** à température **ambiante**

2002 – Scuola Normale Superiore
LCQ – **λ~68 µm** - **THz** - GaAs/ AlAs
Fonctionnant en mode continu à 30 Kelvin

2006 - Université de Montpellier
LCQ – **λ~3,1-3,3 µm** - **InAs/AlSb**
Fonctionnant en mode continu à basse température

2007 - Université de Montpellier
LCQ – **λ<3µm** - **InAs/AlSb**

Lasers
à cascade quantique
GaAs/AlGaAs ; GaInAs/AlInAs/InP ; InAs/AlSb



Plan

Introduction aux Lasers à Cascade Quantique (LCQ)

Partie 1 :

Les guides à plasmons de surface argent

Partie 2 :

Mesure des pertes des guides à plasmons de surface

Partie 3 :

Les guides à plasmons de surface appliqués aux cristaux photoniques

Conclusions et perspectives

Guides à plasmons Ag et Au – *les cavités optiques*

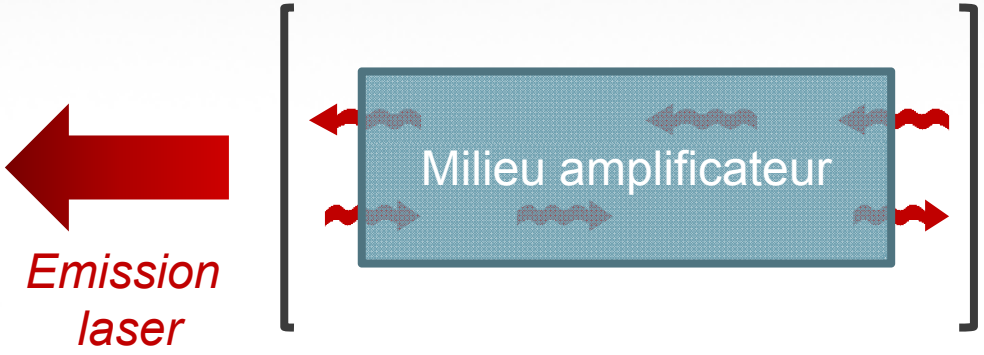


Schéma d'une cavité laser

Émission par la tranche *Diffusion* *Émission par la surface*

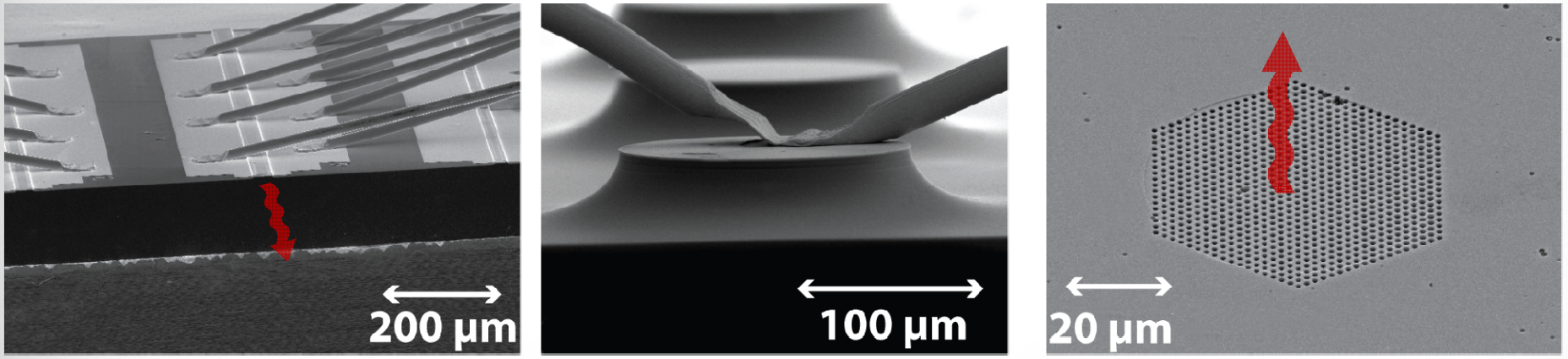
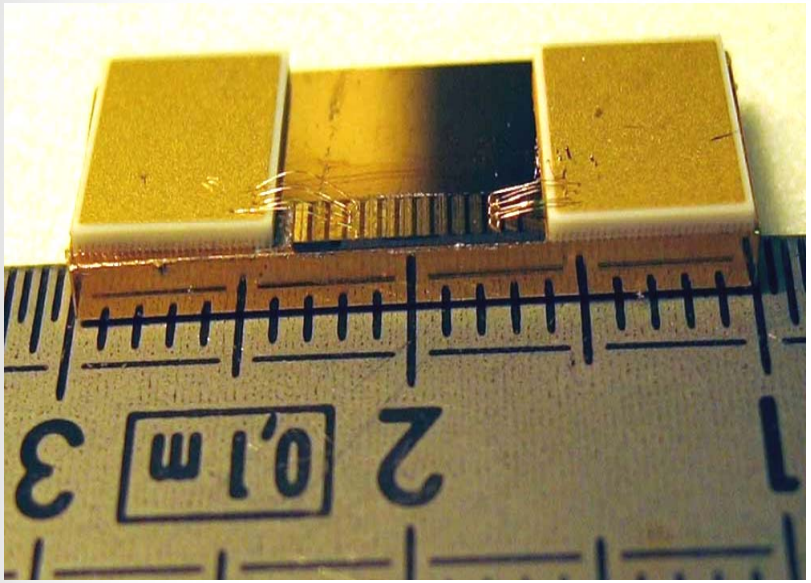


Image MEB de trois cavités laser

Guides à plasmons Ag et Au – *le laser ruban (ridge)*



Embase sur laquelle sont montés plusieurs lasers ruban

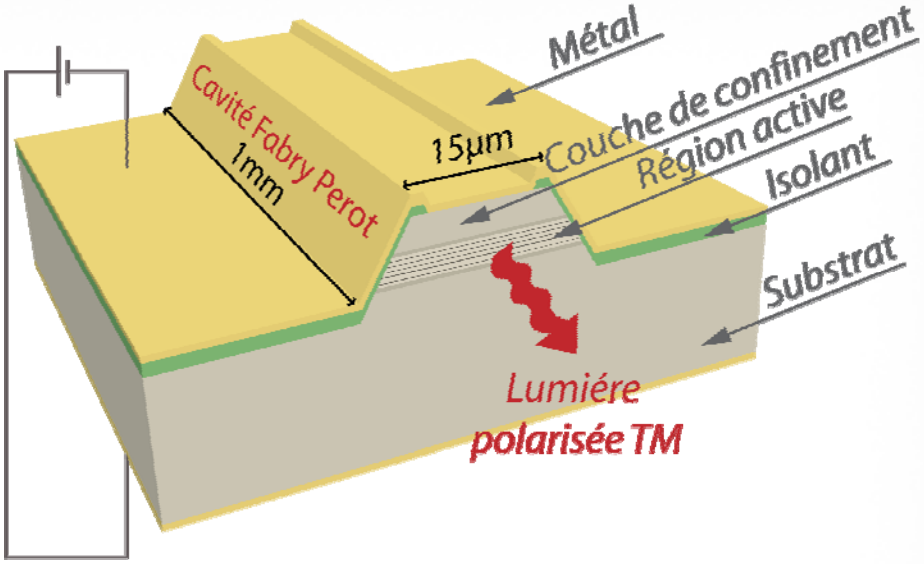
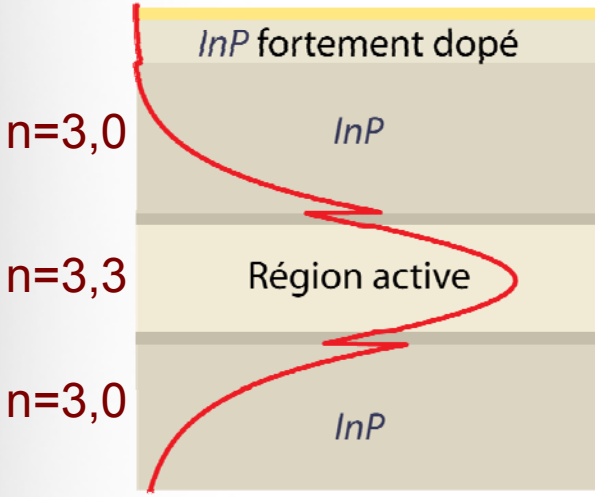


Schéma d'un laser ruban (ridge) moyen-infrarouge

Guides à plasmons Ag et Au – *le guide diélectrique*

α = 8 cm^{-1} (pertes) (λ~7,5 µm)
Γ = 56 % (confinement optique)



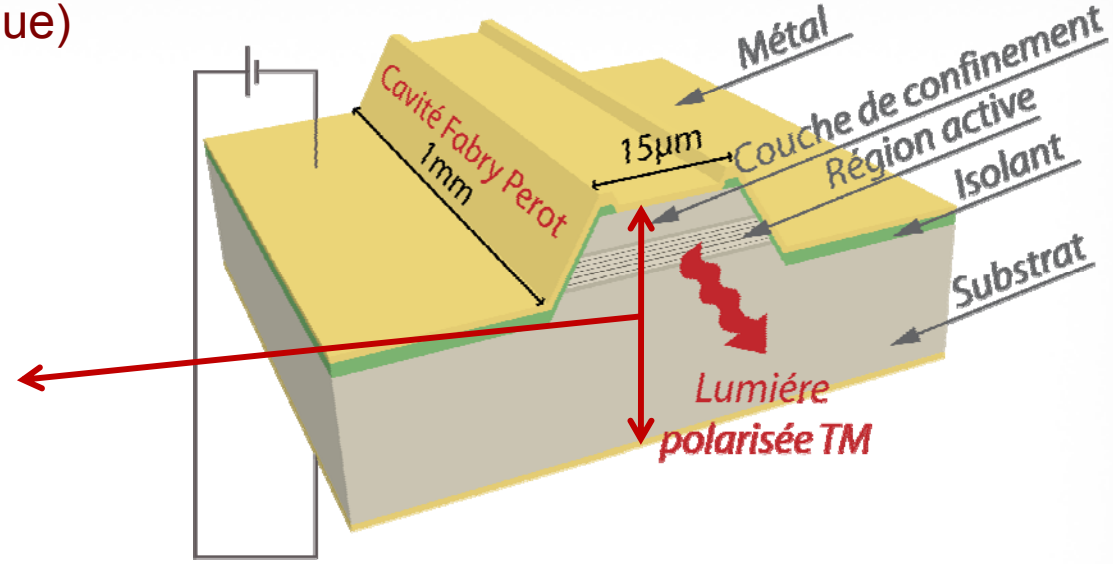


Schéma d'un laser ruban (ridge) moyen-infrarouge

+

- Faibles pertes
- Guide de référence

-

- Faible confinement
- Croissance difficile et pertes importantes pour λ>15 µm

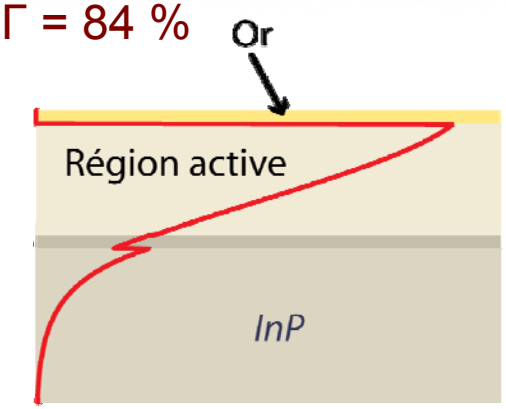
Guides à plasmons Ag et Au – *les plasmons de surface*

$$\mathrm{Re}(\varepsilon_M) < 0 \quad et \quad \mathrm{Re}(\varepsilon_D) > 0$$

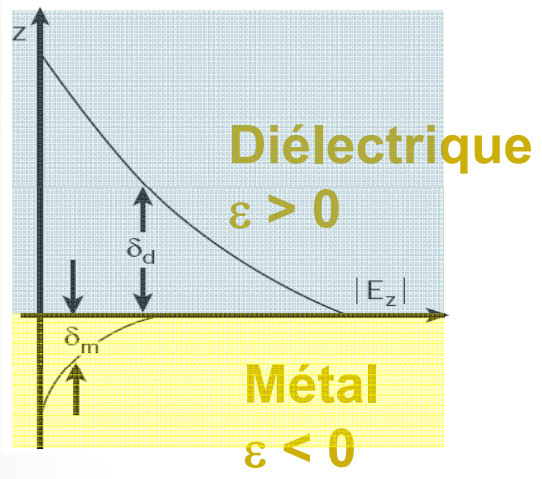
polarisation TM

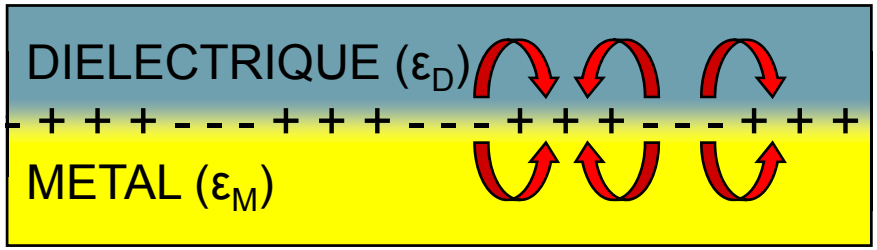
α = 30 cm^{-1} (λ~7,5 µm)

Γ = 84 %



Guide à plasmons de surface

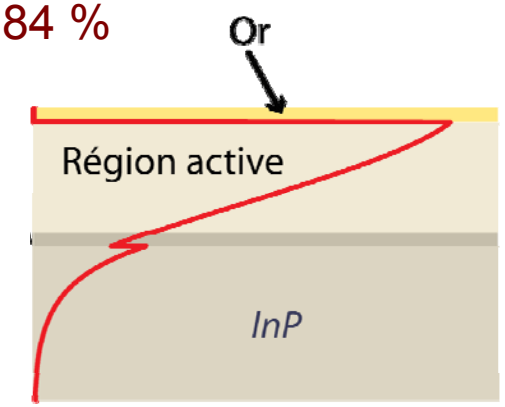




Guides à plasmons Ag et Au – *le guide à plasmons*

	C. Sirtori (1998)		A. Tredicucci (2000)	R. Colombelli (2001)
λ (μm)	8	11,5	19	21,5 et 24
T_{MAX} (K)	90	110	140	140

$\alpha = 30\ cm^{-1}$ (λ~7,5 μm)
$\Gamma = 84\ \%$



$$\text{Pertes } \alpha \propto 1/\lambda$$

+

- Fort confinement
- Idéal pour λ > 15 μm
- Mode optique très proche de la surface

-

- Pertes importantes (surtout à courte λ)
- Ne fonctionne pas à température ambiante

C. Sirtori et al., Long-wavelength semiconductor lasers… , Opt. Lett. 23, 1366 (1998)

A. Tredicucci et al., Surface plasmon QCL at λ ~ 19 μm, Appl. Phys. Lett. 77, 2285 (2000)

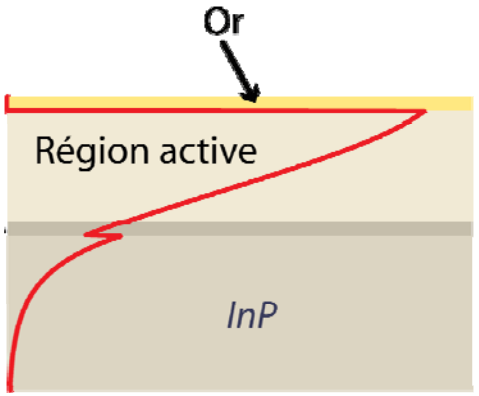
R. Colombelli et al., Far-infrared surface-plasmon quantum-cascade lasers…, Appl. Phys. Lett.,78, 2620, (2001)

Guides à plasmons Ag et Au – *les pertes du guide*

$$\alpha = \frac{4\pi \cdot n_{métal} \cdot n_D^3}{k_{métal}^3 \cdot \lambda}$$

α = pertes (cm^{-1})
$n_{métal}$ = partie réelle de l'indice de réfraction du métal
$k_{métal}$ = partie imaginaire de l'indice de réfraction du métal
n_D = partie réelle de l'indice de réfraction du diélectrique
λ = la longueur d'onde d'émission du laser

Métal	n_m	k_m	n_m/k_m^3	α (cm^{-1})
Titane (Ti)	6.31	14	2.3×10^{-3}	1414
Or (Au)	4.33	54	2.8×10^{-5}	16,72
Argent (Ag)	2.94	54	1.8×10^{-5}	**11,15**

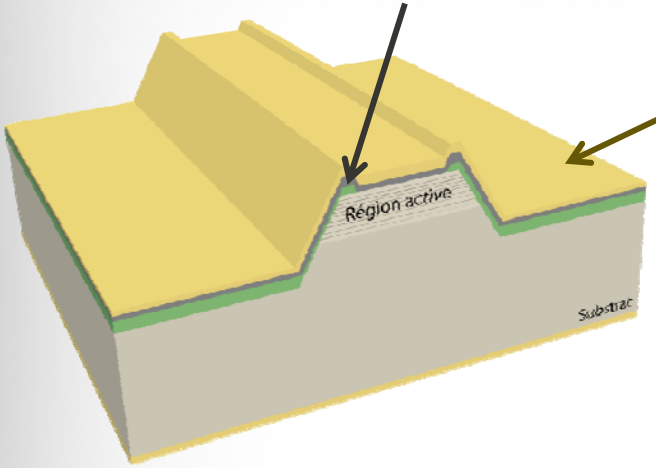


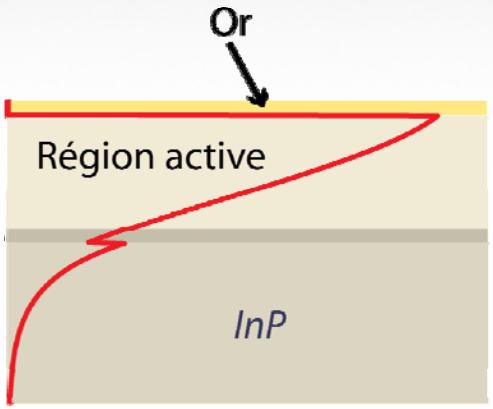
Valeurs n,k @ λ=7.5 microns *

* **M. A. Ordal** and *al., App. Optics 22, 1099 (1983)*

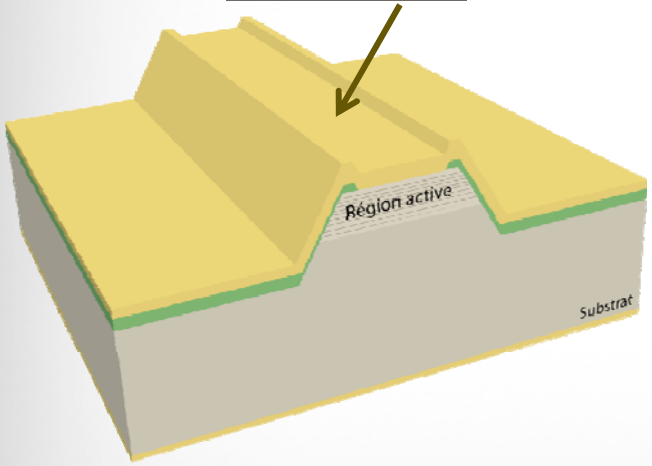
Guides à plasmons Ag et Au – *les dispositifs fabriqués*

Contact argent et or
3 nm Ti / 150 nm Ag / 10 nm Ni / 250 nm Au



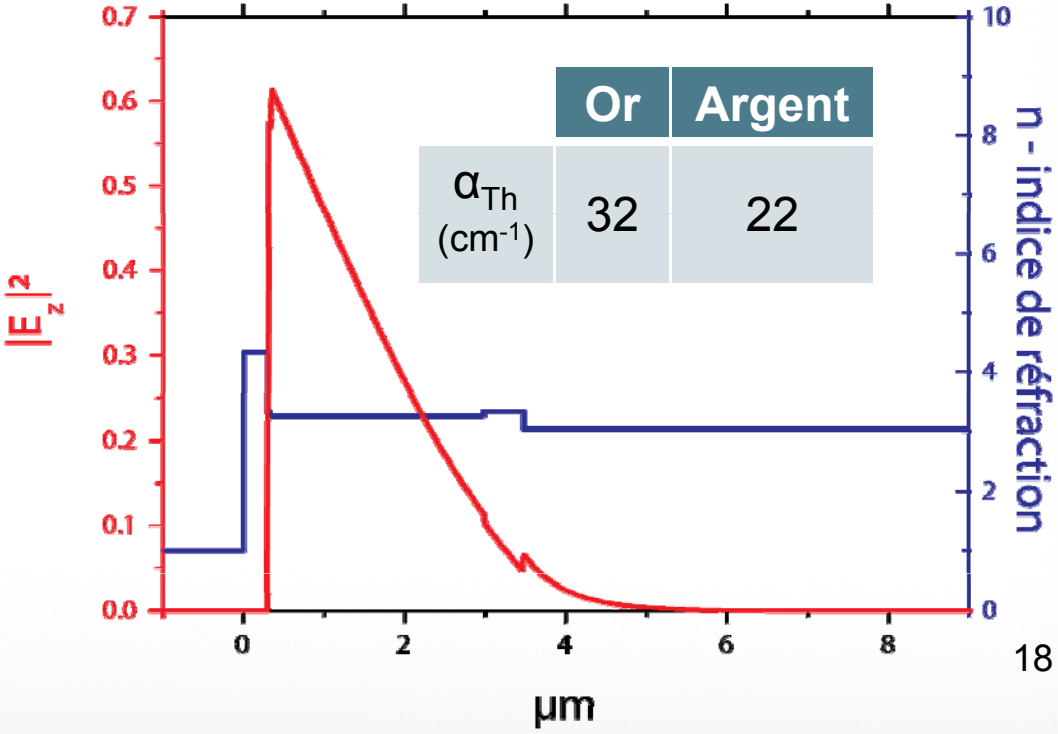


Contact or
3 nm Ti / 300 nm Au



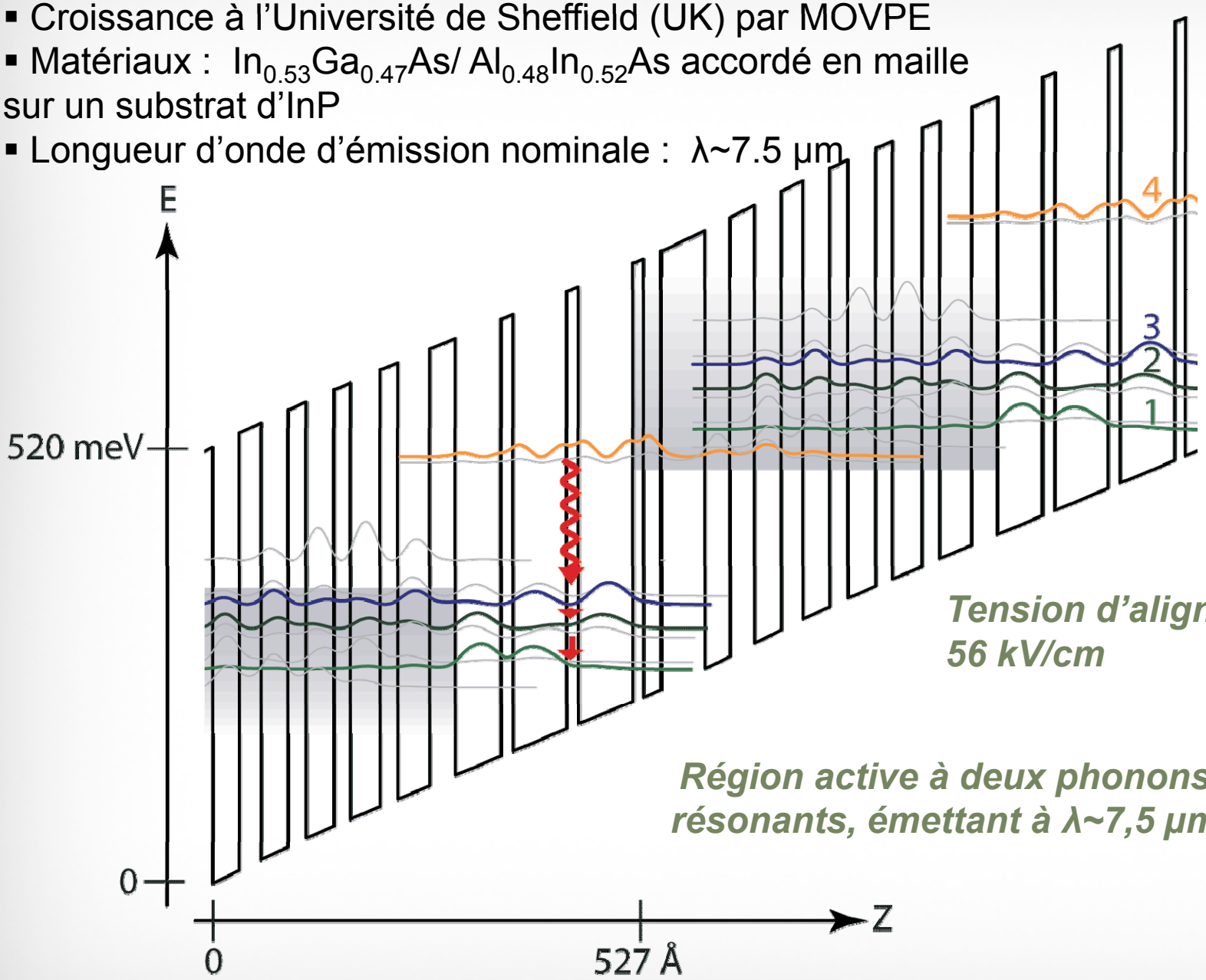
Valeurs des pertes simulées

	Or	Argent
α_{Th} (cm^{-1})	32	22



Guides à plasmons Ag et Au – *la région active*

- Croissance à l'Université de Sheffield (UK) par MOVPE
- Matériaux : $In_{0.53}Ga_{0.47}As$/ $Al_{0.48}In_{0.52}As$ accordé en maille sur un substrat d'InP
- Longueur d'onde d'émission nominale : λ~7.5 µm



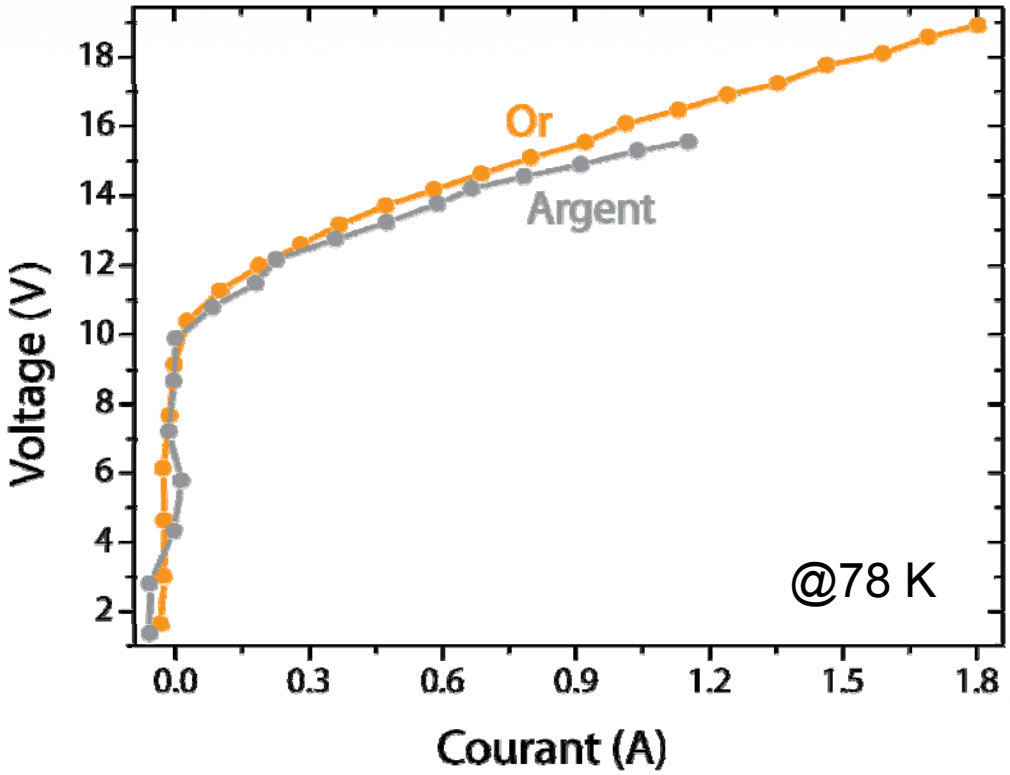
Tension d'alignement 56 kV/cm

Région active à deux phonons résonants, émettant à λ~7,5 µm

Guides à plasmons Ag et Au – *mesures électriques*

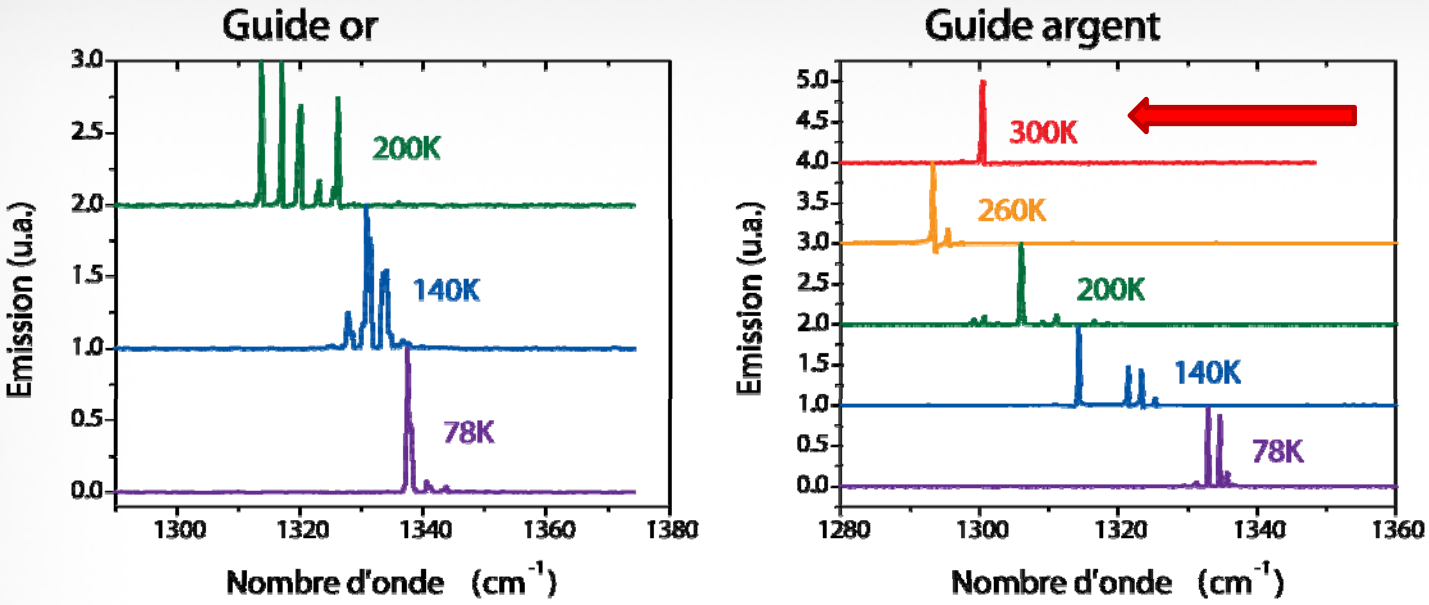
Caractéristique électrique des guides or et argent :

- **Même tension d'alignement**
- **Même caractéristique électrique**

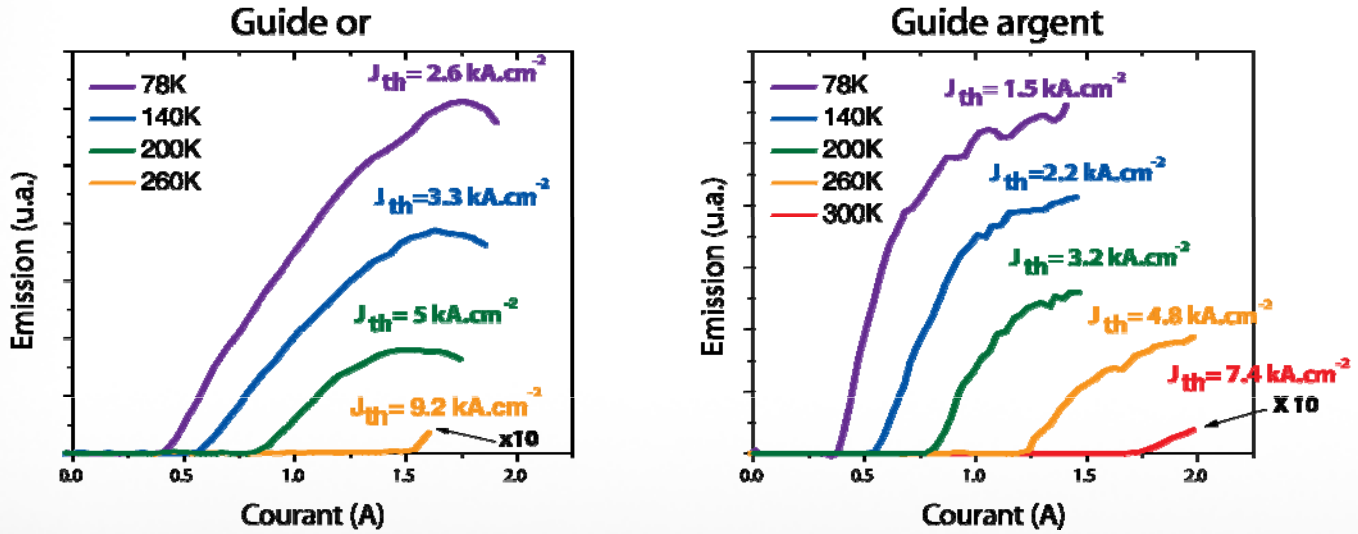


Caractéristique électrique des dispositifs

Guides à plasmons Ag et Au – *mesures optiques*



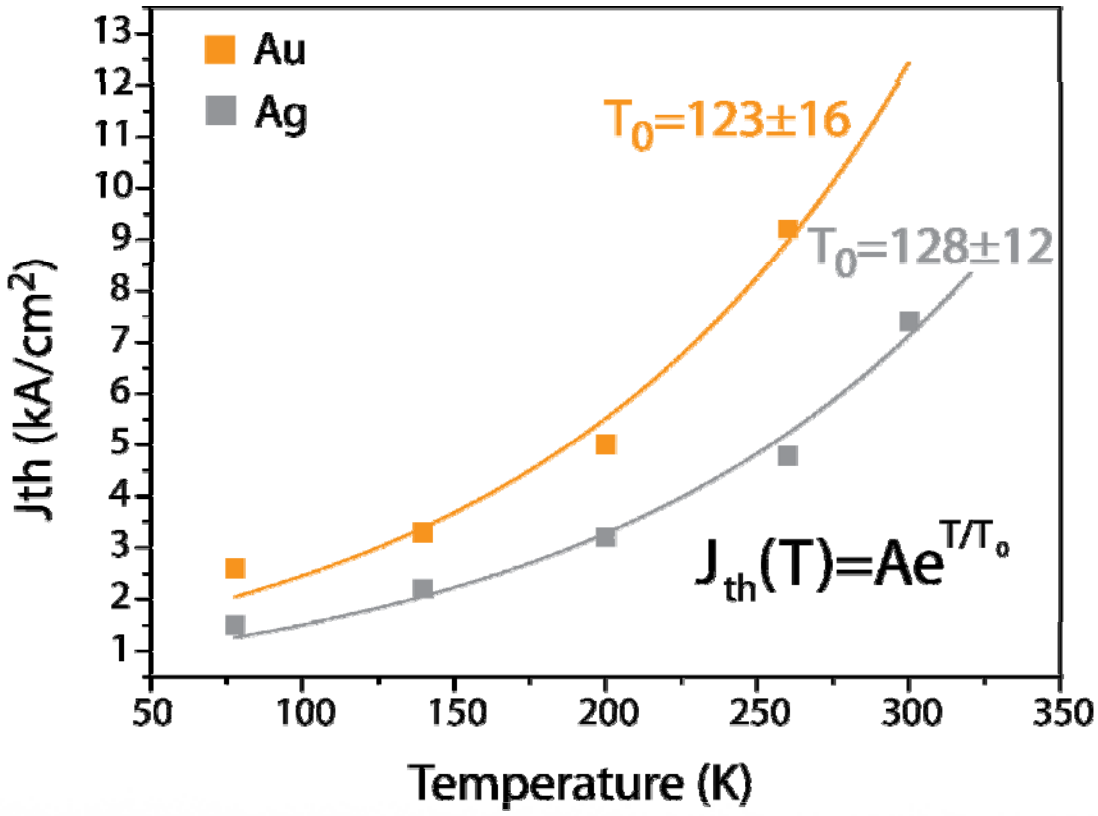
Mesures effectuées en mode pulsé : *84 kHz 50 ns*



Guides à plasmons Ag et Au – *mesures optiques*

Facteur T_0:

- **Caractérise le comportement de la région active lorsque la température augmente**



Guides à plasmons Ag et Au – *conclusion sur les mesures*

Valeurs expérimentales

	Or	Argent
T_{MAX} (K)	260	**300**
J_{th} @ 78K (kA/cm²)	2,9±0,4	1,5±0,2
T_0 (K)	123±16	128±12
Puissance Pic @ 78 K (mW)	70	30

M. Bahriz et al., *Room-temperature operation of 7.5 µm surface-plasmon quantum cascade lasers. Applied Physics Letters, 88 :181103, Februar 2006.*

Plan

Introduction aux Lasers à Cascade Quantique (LCQ)

Partie 1 :

Les guides à plasmons de surface argent

Partie 2 :

Mesure des pertes des guides à plasmons de surface

Partie 3 :

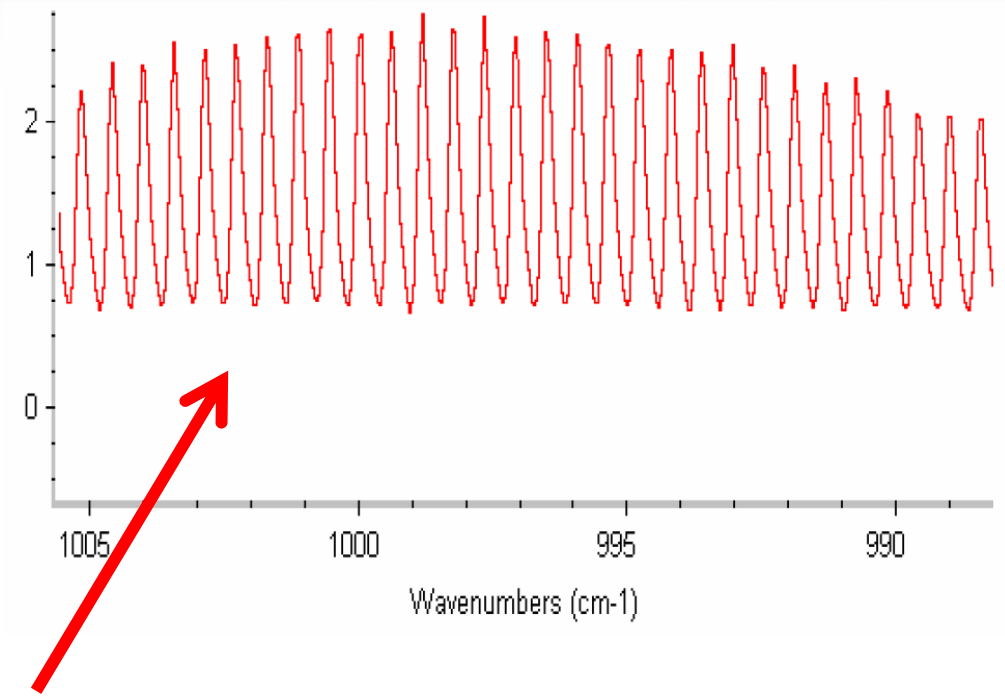
Les guides à plasmons de surface appliqués aux cristaux photoniques

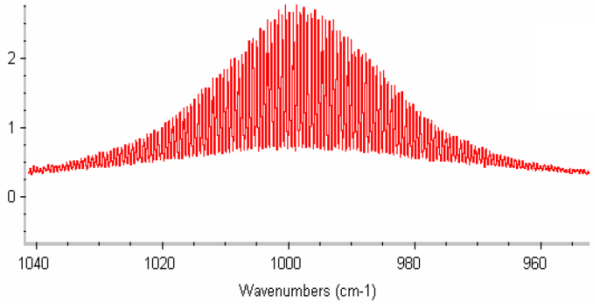
Conclusions et perspectives

Mesure des pertes – *les différentes techniques*

Hakki-Paoli

- Le laser doit pouvoir fonctionner en continu
- Réflectivité des miroirs ?





Pertes sont déduites
de l'amplitude des oscillations

Mesure des pertes – *les différentes techniques*

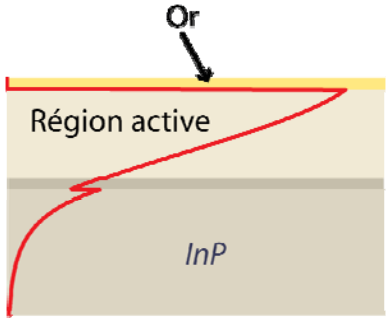
~~Hakki-Paoli~~

~~- Le laser doit pouvoir fonctionner en continu~~
~~- Réflectivité des miroirs ?~~

Injection directe

- Difficulté de couplage avec les guides à plasmons de surface

LASER



Difficulté de couplage
entre le mode à plasmons de surface et un laser extérieur

D. G. Revin et al., Measurements of optical losses in mid-infrared semiconductor lasers using Fabry Perot transmission oscillations. Journal of applied physics, 95 :7584, June 2004.

Mesure des pertes – *les différentes techniques*

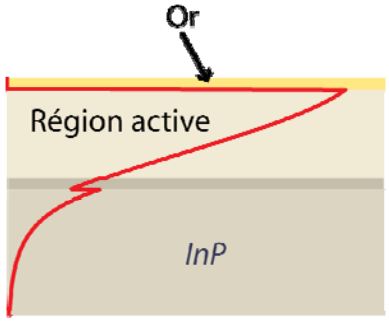
Hakki-Paoli

- Le laser doit pouvoir fonctionner en continu
- Réflectivité des miroirs ?

Injection directe

- Difficulté de couplage avec les guides à plasmons de surface

LASER



Difficulté de couplage
entre le mode à plasmons de surface et un laser extérieur

D. G. Revin et al., Measurements of optical losses in mid-infrared semiconductor lasers using Fabry Perot transmission oscillations. Journal of applied physics, 95 :7584, June 2004.

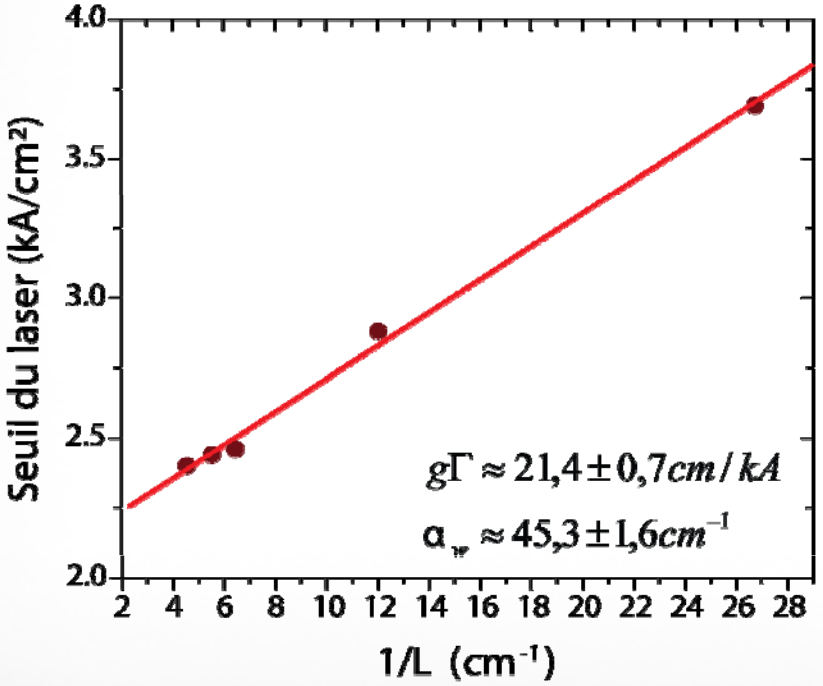
Mesure des pertes – *méthode 1/L*

Méthode du 1/L

- Manque de reproductibilité
- Sous estime les pertes
- Réflectivité des miroirs ?

J_{th} = seuil du laser (kA/cm²)
α = pertes (cm^{-1})
gΓ = gain modal (cm/kA)
L = longueur de la cavité (cm)
R = cœfficient de réflexion des miroirs

$$J_{Th} = \frac{\alpha_w}{g\Gamma} - \frac{1}{L}\frac{\ln(R)}{g\Gamma}$$



Mesure d'un guide à plasmons OR InGaAs λ~7,5 µm

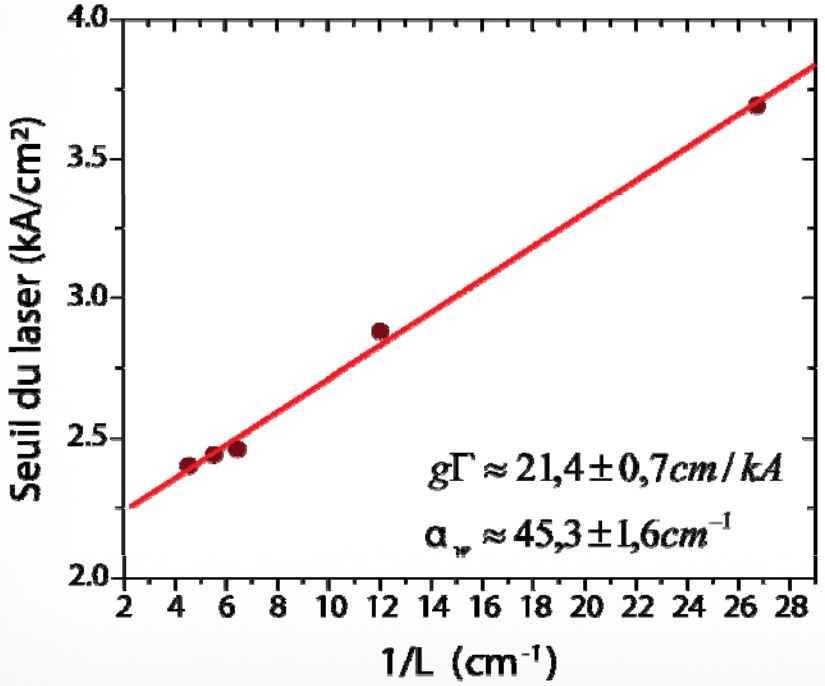
Mesure des pertes – *méthode 1/L*

Méthode du 1/L

- Manque de reproductibilité
- Sous estime les pertes
- Réflectivité des miroirs ?

J_{th} = seuil du laser (kA/cm²)
α = pertes (cm^{-1})
gΓ = gain modal (cm/kA)
L = longueur de la cavité (cm)
R = cœfficient de réflexion des miroirs

$$J_{Th} = \frac{\alpha_w}{g\Gamma} - \frac{1}{L}\frac{\ln(R)}{g\Gamma}$$

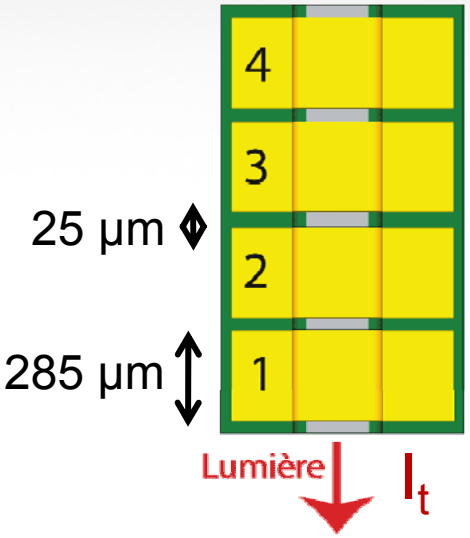


Mesure d'un guide à plasmons OR InGaAs λ~7,5 µm

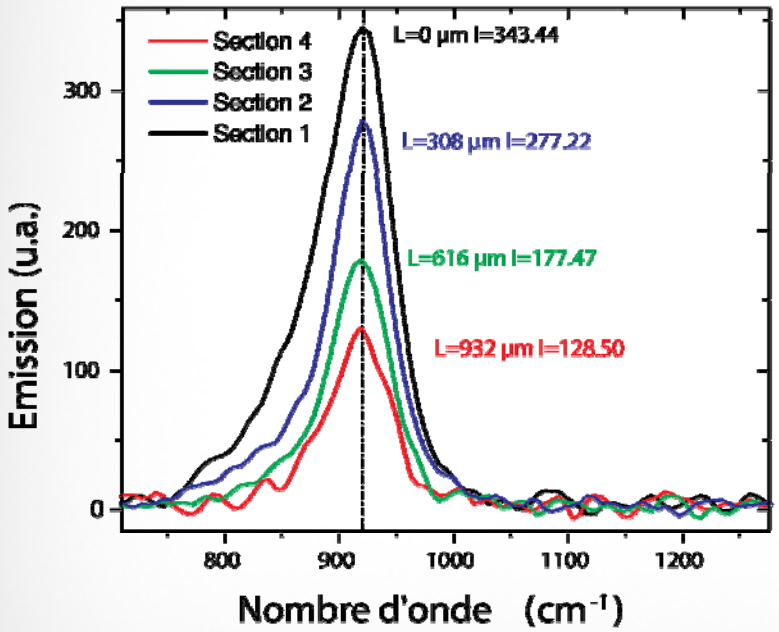
Mesure des pertes – *la méthode des sections*

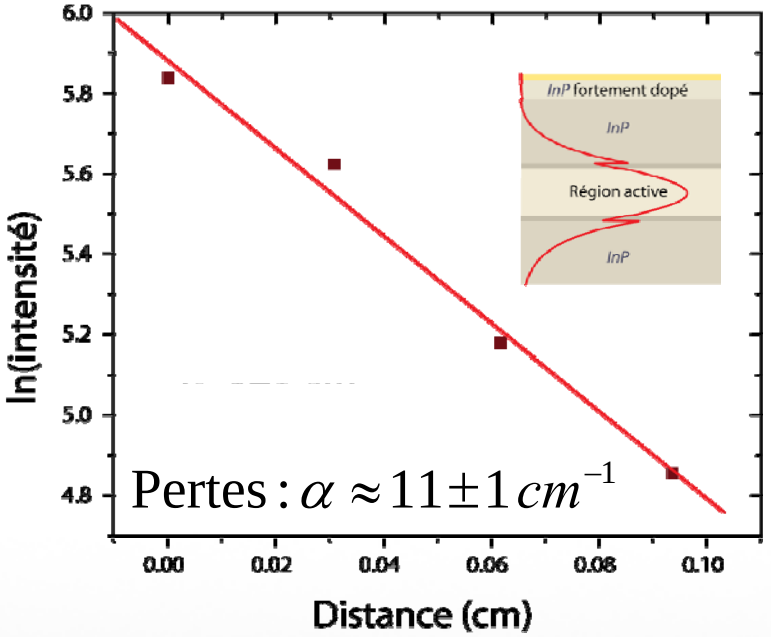
Sur un guide diélectrique

$$I_t = I_0 e^{-\alpha L}$$



Mesure d'un guide diélectrique InGaAs λ ~ 11,7 µm
pour valider la méthode



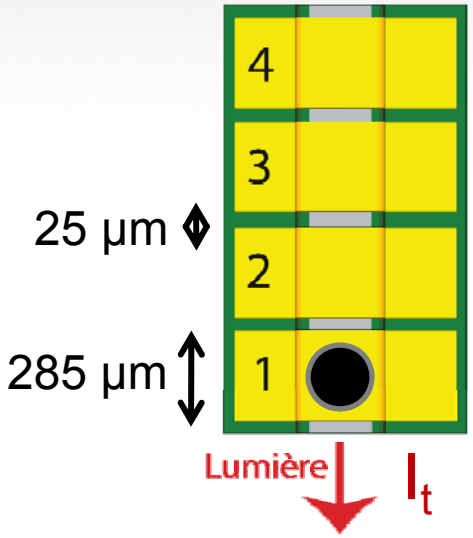


S. Barbieri et al., Gain measurements on GaAs QCL…, IEEE Journal of Quantum Electronics, 36 :736, 2000

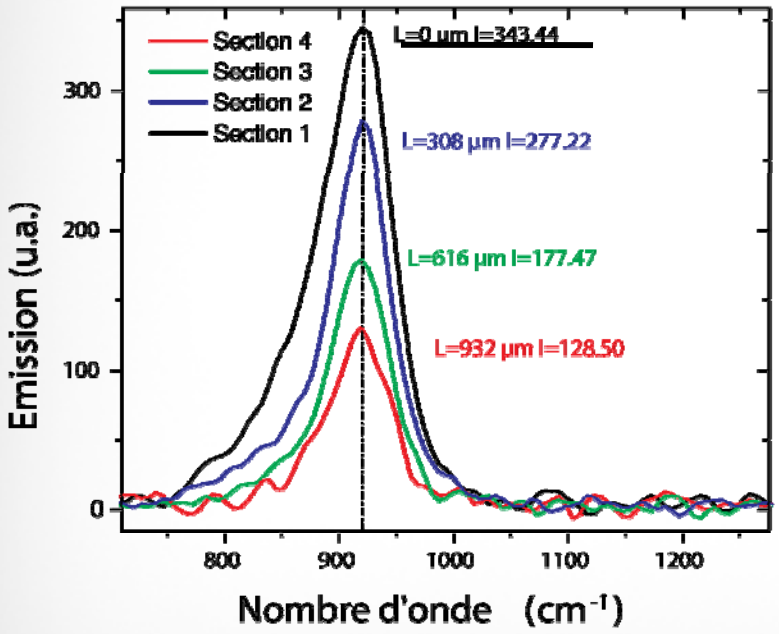
Mesure des pertes – *la méthode des sections*

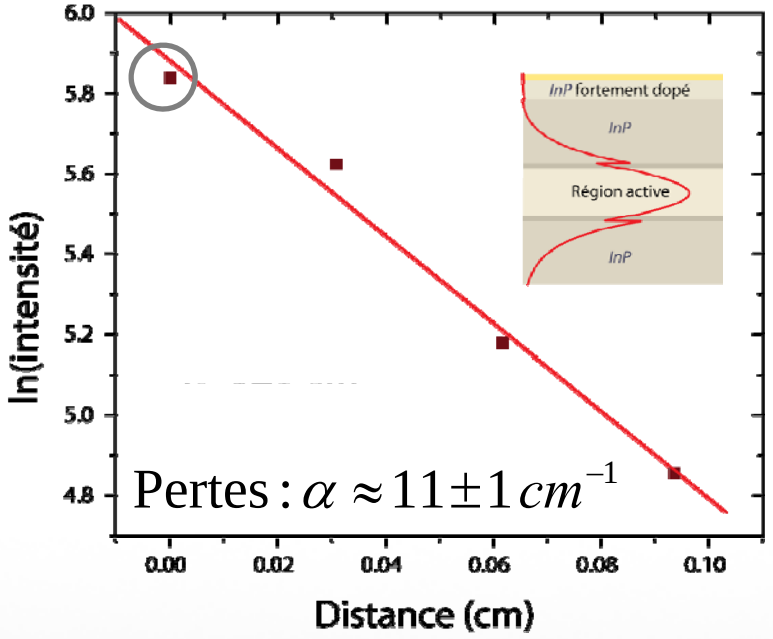
Sur un guide diélectrique

$$I_t = I_0 e^{-\alpha L}$$



Mesure d'un guide diélectrique InGaAs λ ~ 11,7 µm
pour valider la méthode

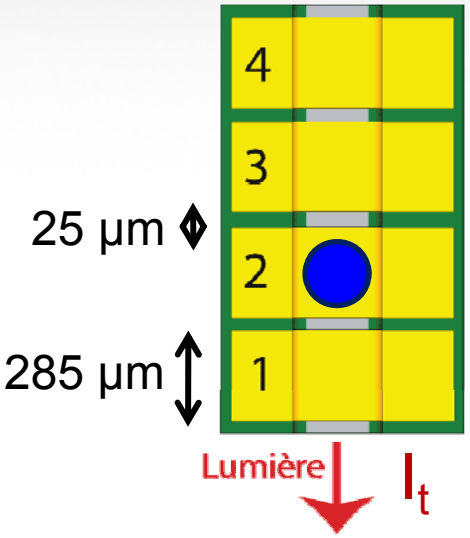




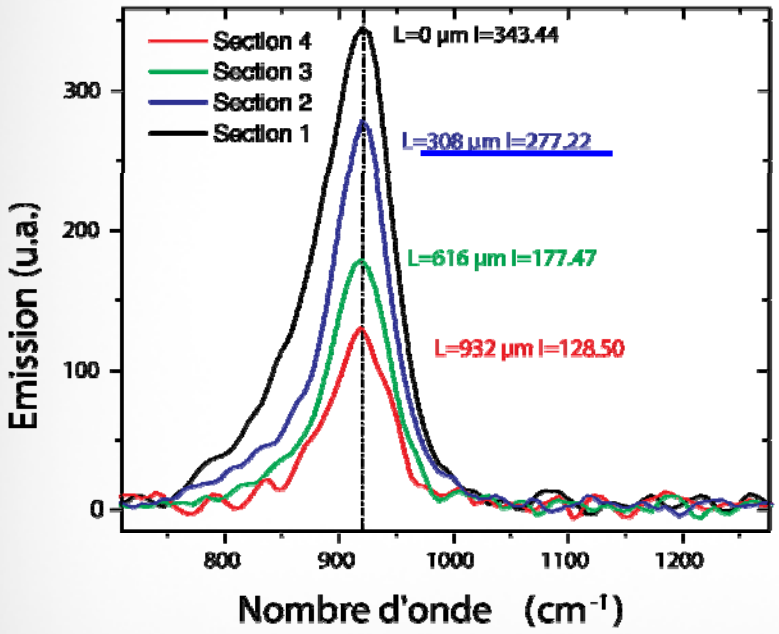
Mesure des pertes – *la méthode des sections*

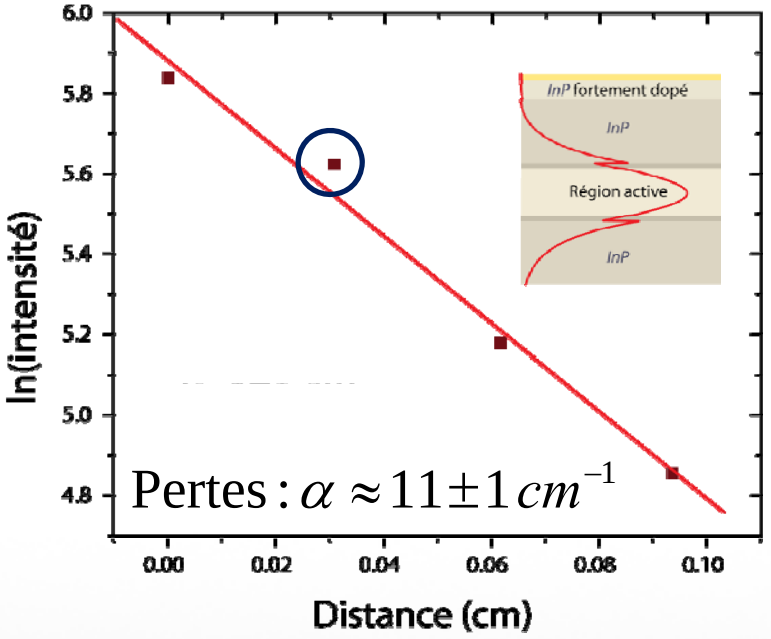
Sur un guide diélectrique

$$I_t = I_0 e^{-\alpha L}$$



Mesure d'un guide diélectrique InGaAs λ ~ 11,7 µm
pour valider la méthode

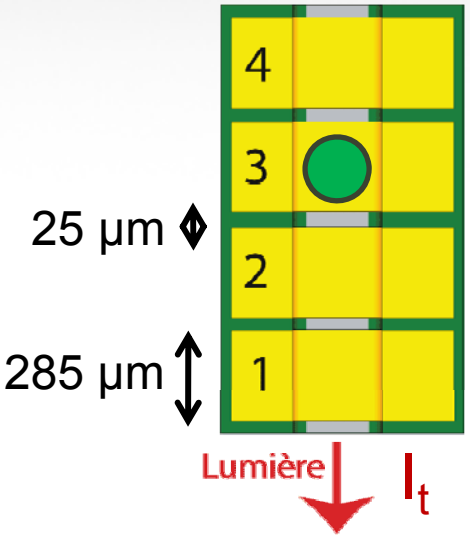




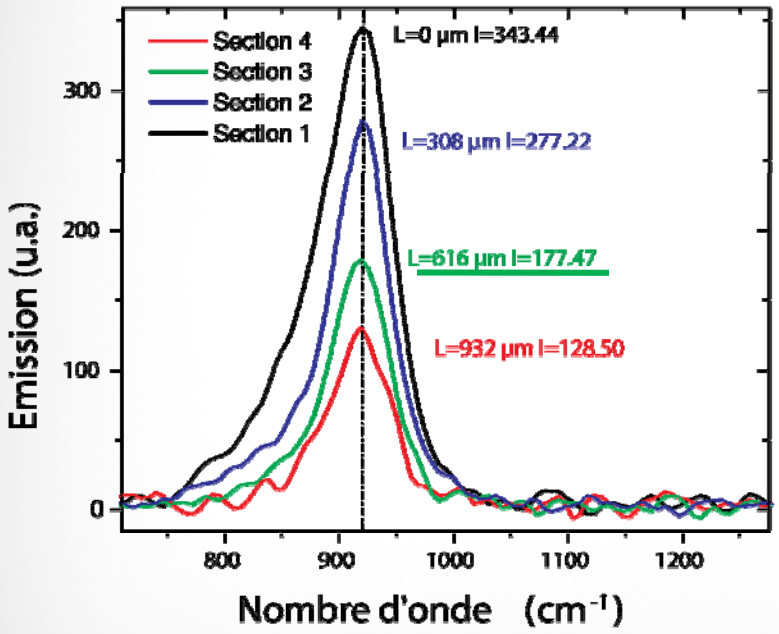
Mesure des pertes – *la méthode des sections*

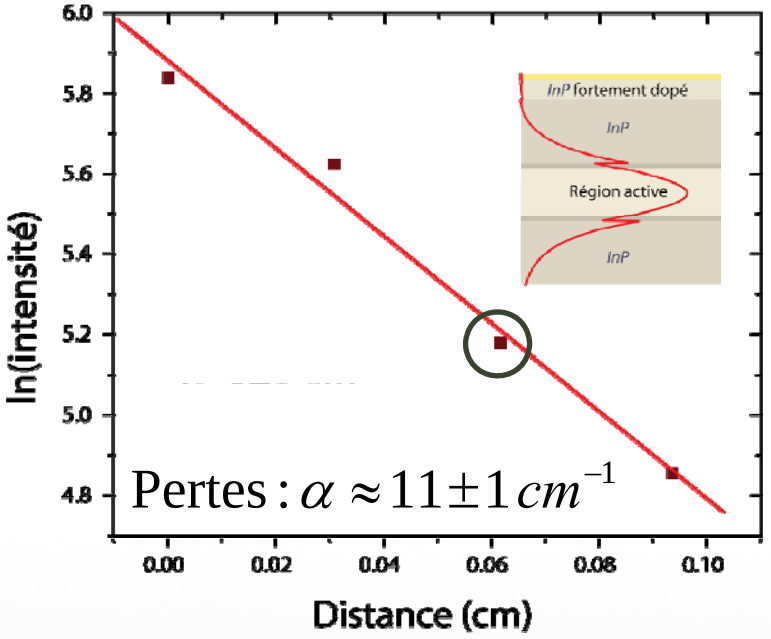
Sur un guide diélectrique

$$I_t = I_0 e^{-\alpha L}$$



Mesure d'un guide diélectrique InGaAs λ ~ 11,7 µm
pour valider la méthode

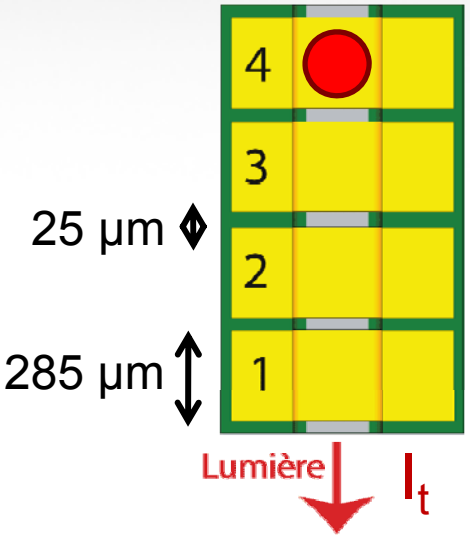




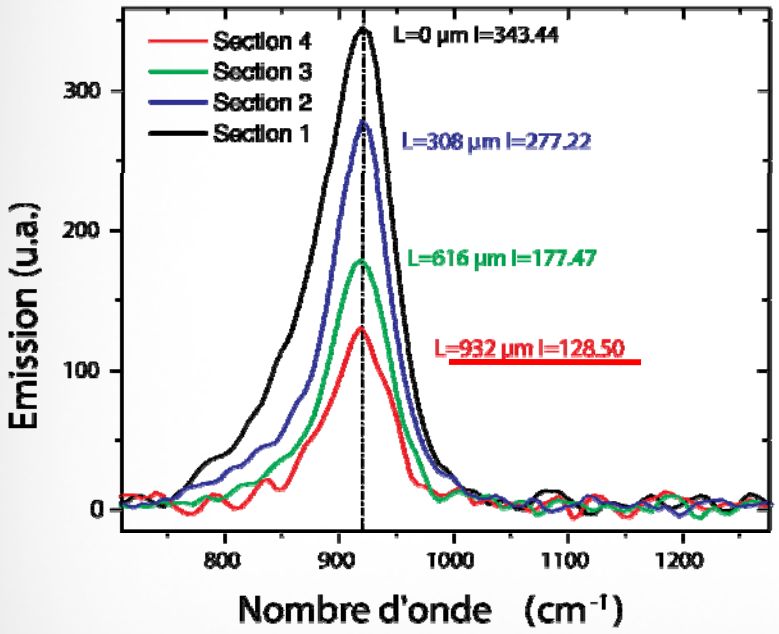
Mesure des pertes – *la méthode des sections*

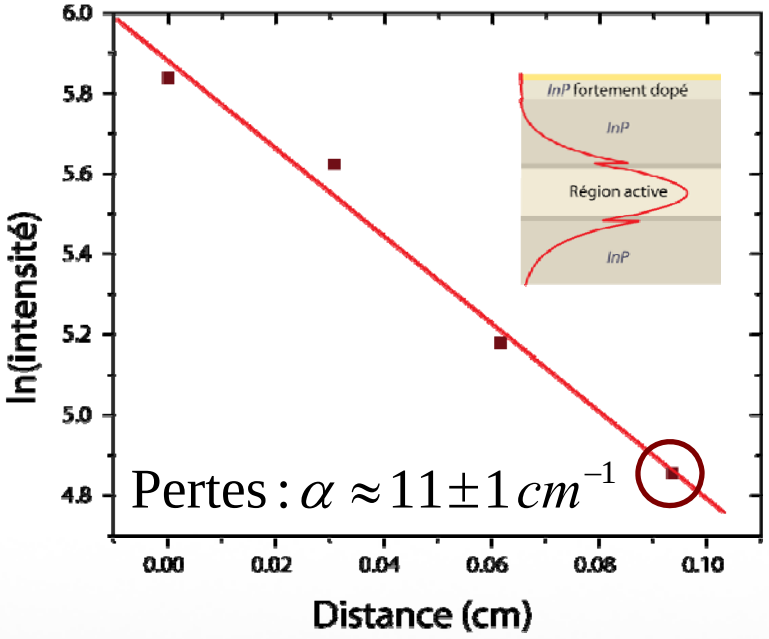
Sur un guide diélectrique

$$I_t = I_0 e^{-\alpha L}$$



Mesure d'un guide diélectrique InGaAs λ ~ 11,7 µm
pour valider la méthode



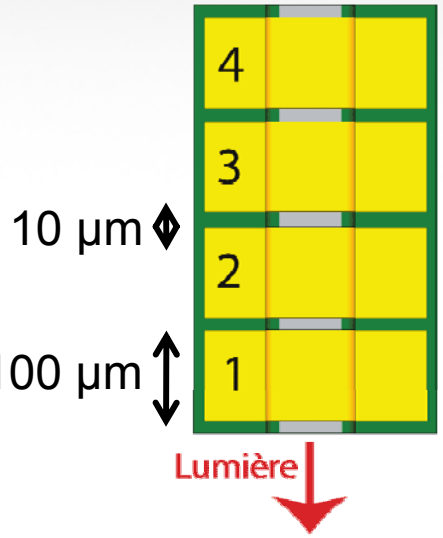


Mesure des pertes – *sur guides à plasmons de surface*

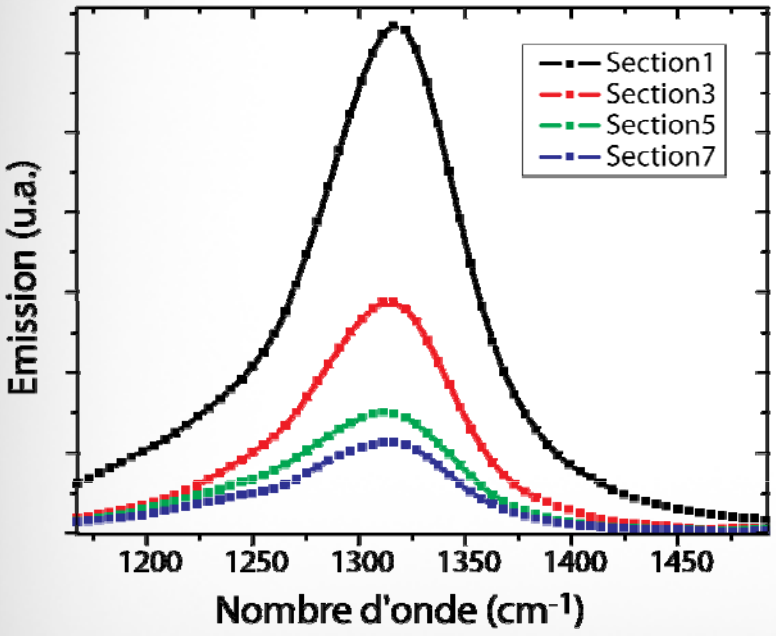
Sur un guide à plasmons

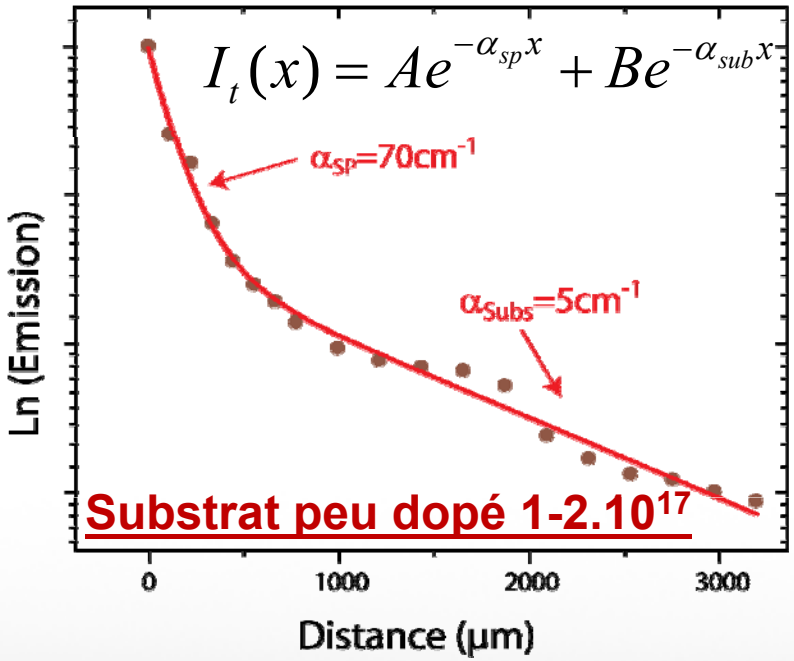
Sur substrat faiblement dopé

Les pertes mesurées ne suivent pas une loi exponentielle.



Mesure d'un guide à plasmons
OR InGaAs λ ~ 7,5 µm
Substrat peu dopé 1-2.10^{17}





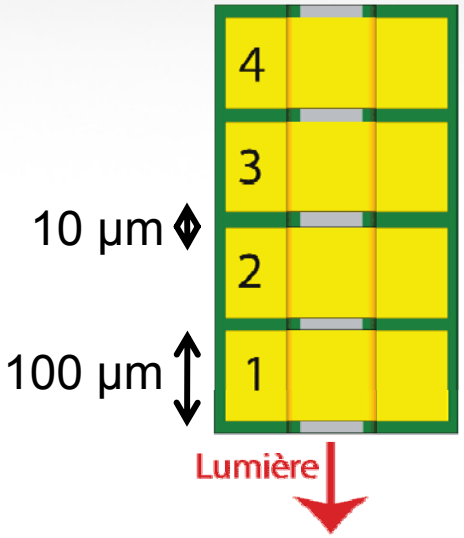
Substrat peu dopé 1-2.10^{17}

Mesure des pertes – *sur guides à plasmons de surface*

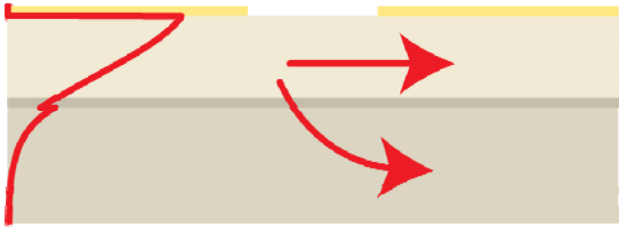
Sur un guide à plasmons

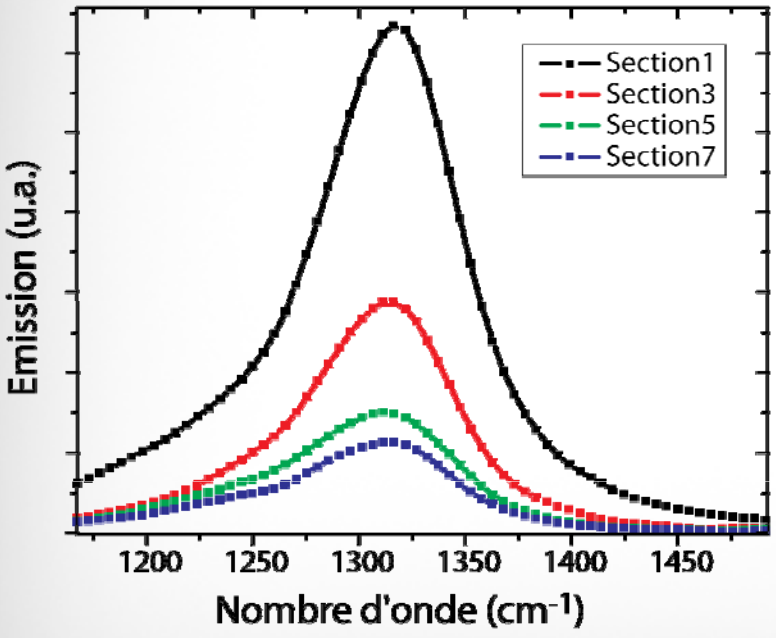
Sur substrat faiblement dopé

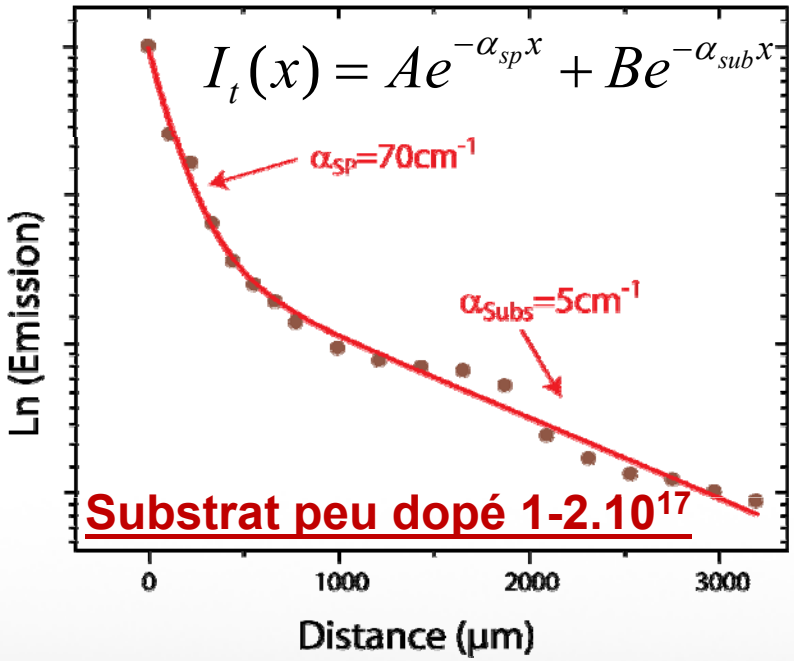
Les pertes mesurées ne suivent pas une loi exponentielle.



Mesure d'un guide à plasmons
OR InGaAs λ ~ 7,5 µm
Substrat peu dopé 1-2.10^{17}

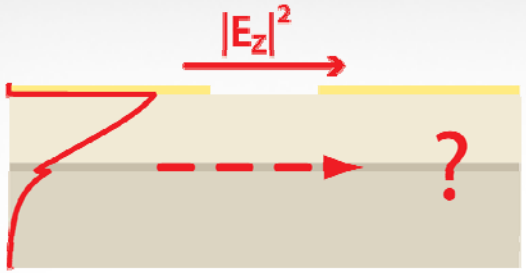




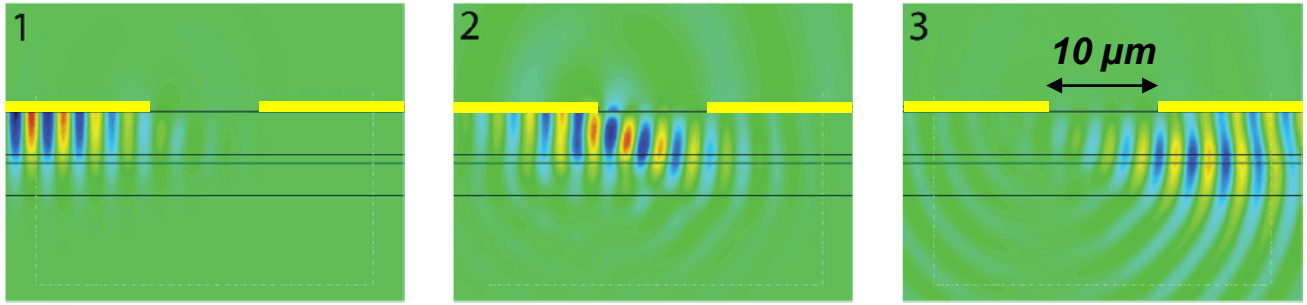


Substrat peu dopé 1-2.10^{17}

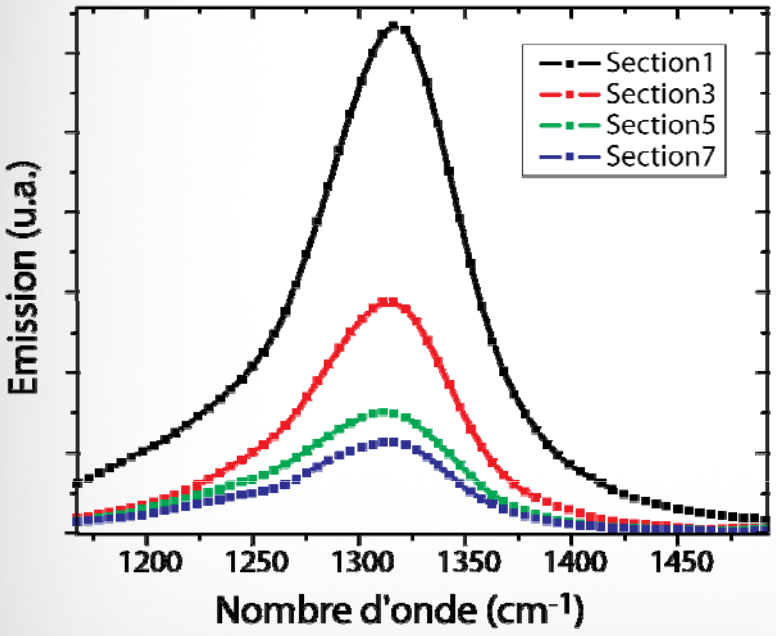
Mesure des pertes – *sur substrat peu dopé (1-2.10^{17})*

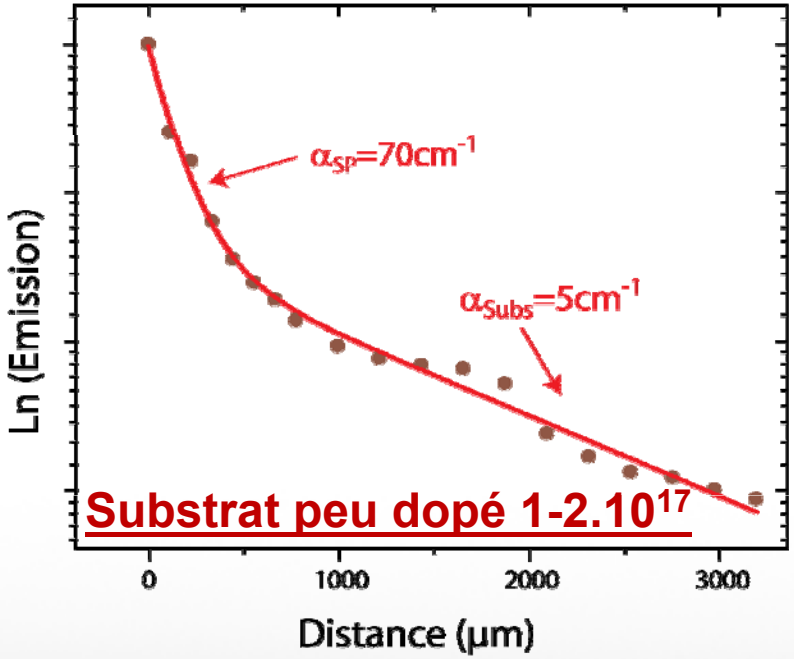


$$I_t(x) = Ae^{-\alpha_{sp}x} + Be^{-\alpha_{sub}x}$$



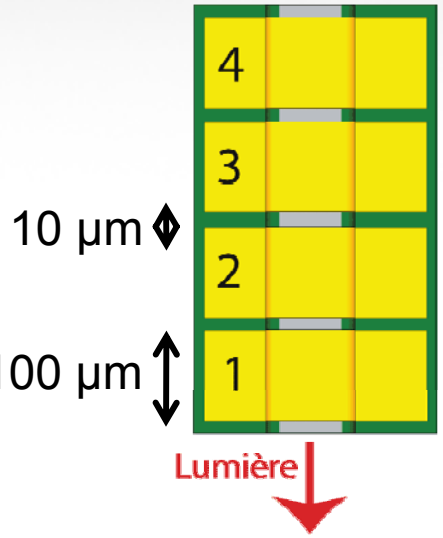
Simulations FDTD d'Alessio Andronico (Université Paris 7)



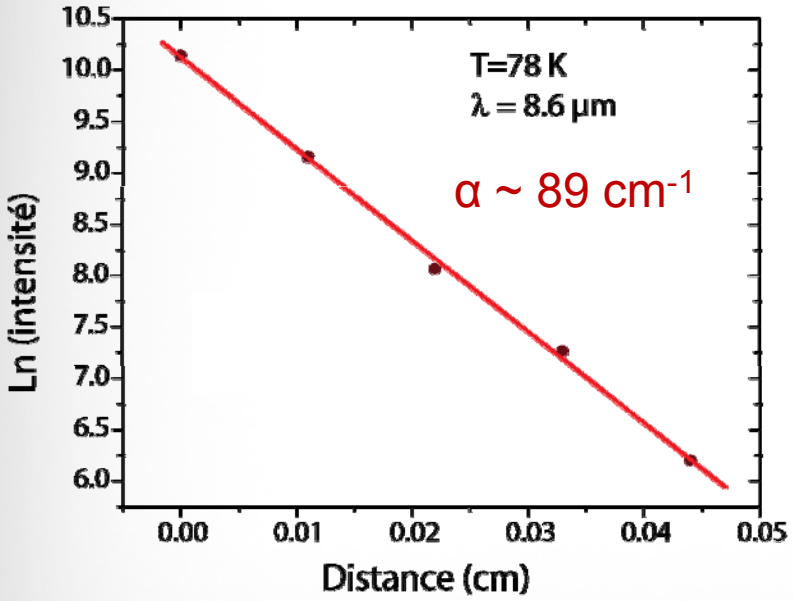


Substrat peu dopé 1-2.10^{17}

Mesure des pertes – *sur substrat très dopé (1-2.10^{18})*

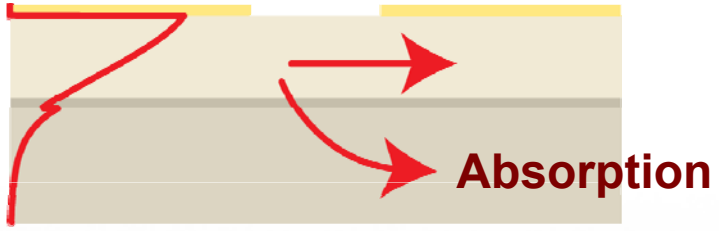


Mesure d'un guide à plasmons
OR AlSb λ ~ 8,6 µm
Substrat très dopé 1-2.10^{18}



Avec un substrat très dopé :

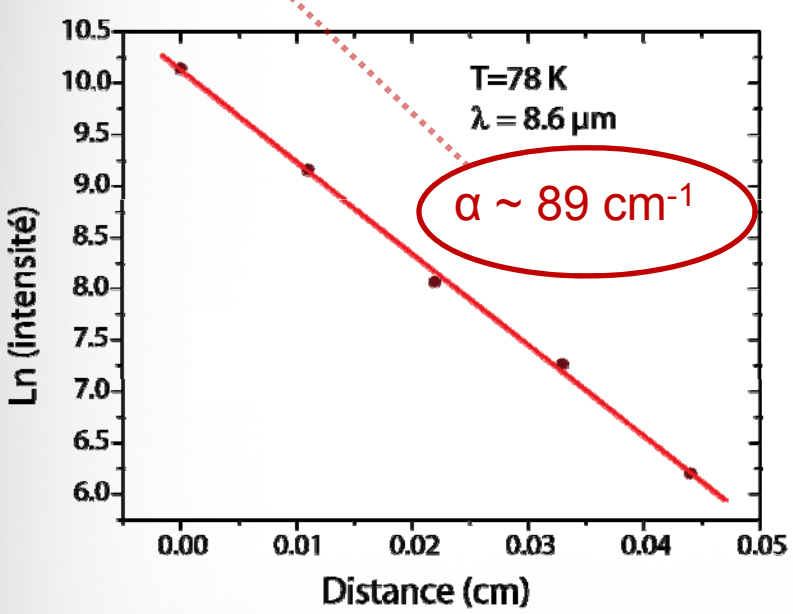
- Le mode ne se propage plus à travers le substrat car il y est totalement absorbé.



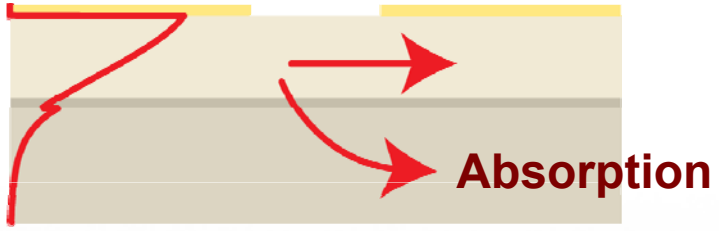
Mesure des pertes – *sur substrat très dopé (1-2.10^{18})*

Mesure d'un guide à plasmons
OR AlSb λ ~ 8,6 µm
Substrat très dopé 1-2.10^{18}

$89 = \alpha_{plasmon} + \alpha_{diffracté}$



Les pertes sont ici surestimées :
- **Diffraction du mode vers le substrat**
- **Absorption à 0 V**

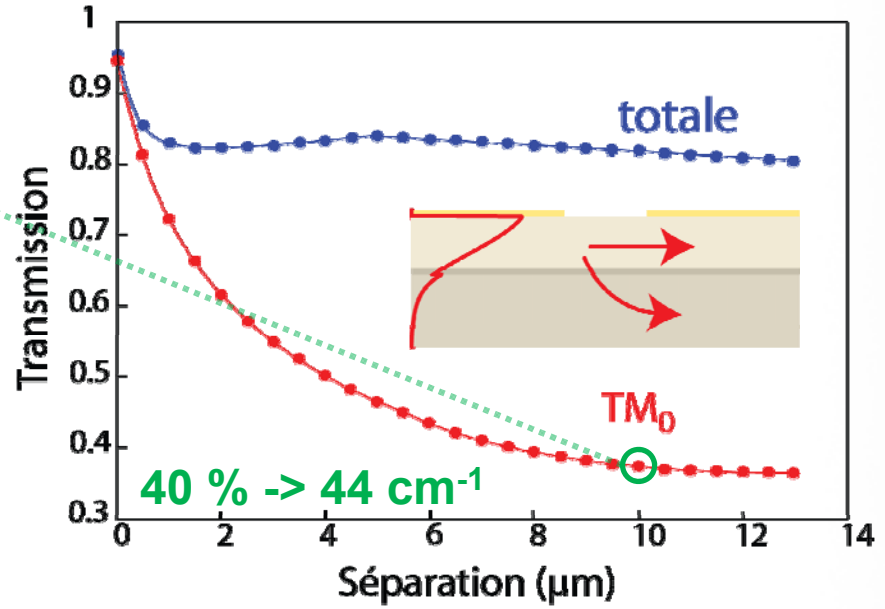


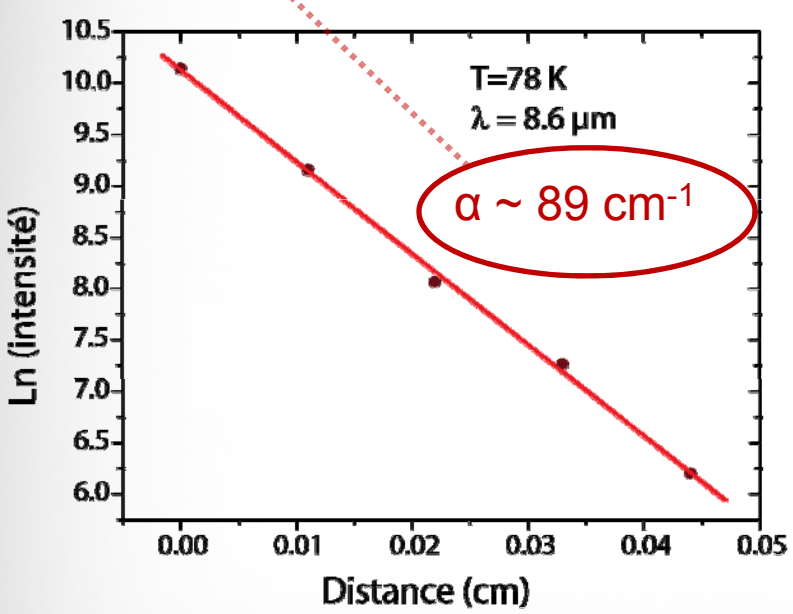
Mesure des pertes – *influence de la taille des séparations*

$\alpha_{plasmon}$ = 45 cm^{-1}
($\alpha_{simulé}$ = 50 cm^{-1})

89 = $\alpha_{plasmon}$ + $\alpha_{diffracté}$

Mesure d'un guide à plasmons
OR AlSb λ ~ 8,6 µm
Substrat très dopé 1-2.10^{18}





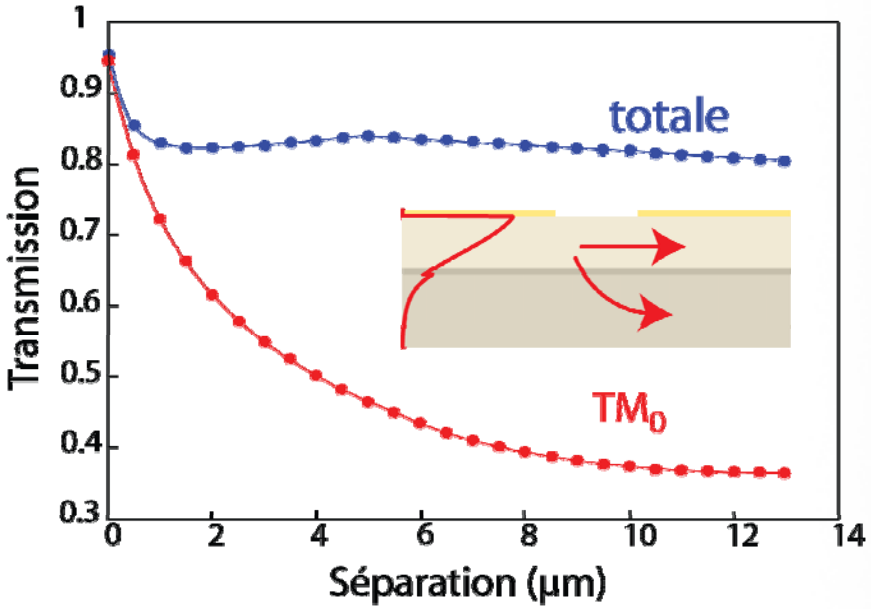
Mesure des pertes – *conclusion*

+

- Très bien adaptée au guide à plasmons de surface
- Précise
- Nécessite qu'un seul dispositif

-

- Mesure indirecte
ou
- Séparation < 1 µm (utilisation de la technologie FIB)



Conclusions – *1e partie et 2e partie*

Conclusions

• Démonstration de guide à plasmons de surface pour les courtes longueurs d'onde (λ~7,5 µm)
• Réalisation du premier LCQ à plasmons de surface fonctionnant à température ambiante
• Mise au point d'une technique efficace de mesure des pertes et du gain dans les guides à plasmons de surface

Perspectives

• Utiliser les avantages des guides à plasmons de surface pour la réalisation de lasers DFB (*Distributed FeedBack*) et à cristal photonique

Plan

Partie 2 :

Mesure des pertes des guides à plasmons de surface

Partie 3 :

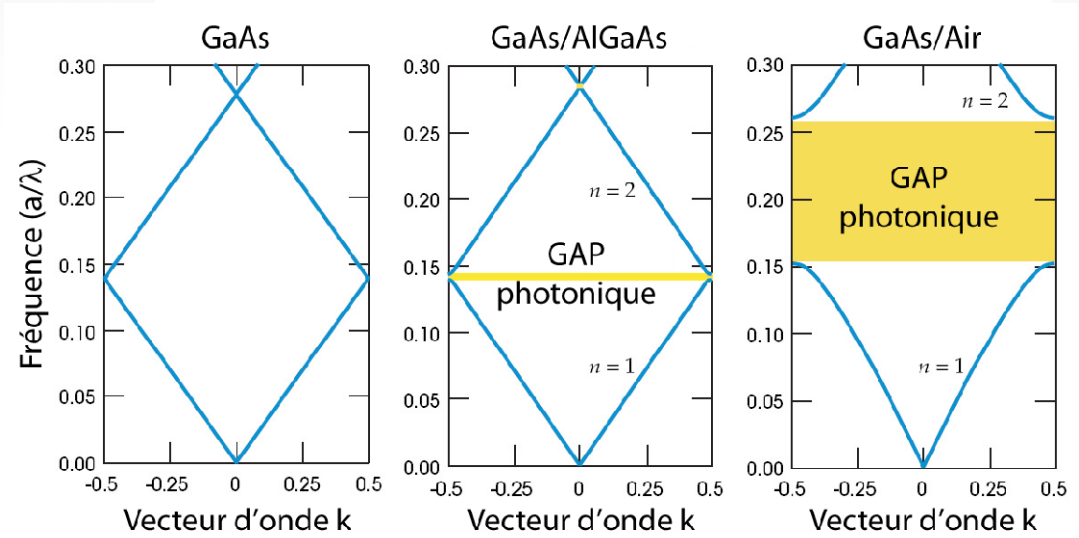
Les guides à plasmons de surface appliqués aux cristaux photoniques

Avantages des cristaux photoniques :

- *Miniaturisation*
- *Émission par la surface*
- *Contrôle de la longueur d'onde*
- *Microcavité*

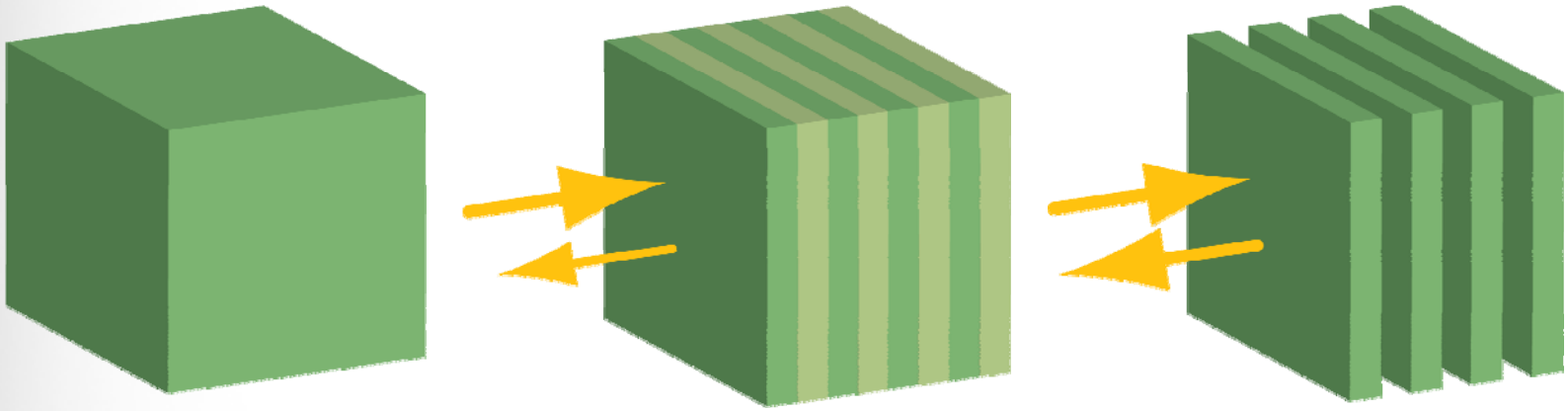
Conclusions et perspectives

Cristal photonique – *miroir de Bragg*



Δn = 0,14

Δn = 2,6

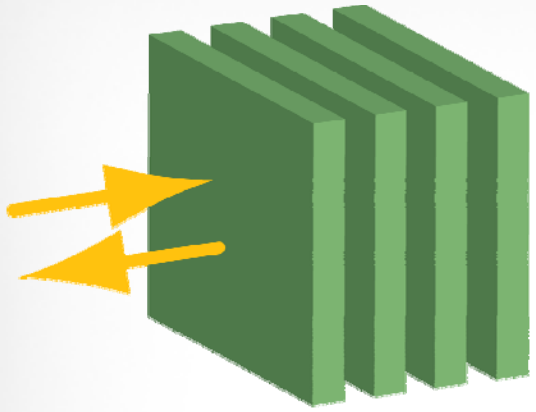


GaAs *(n=3.60)*

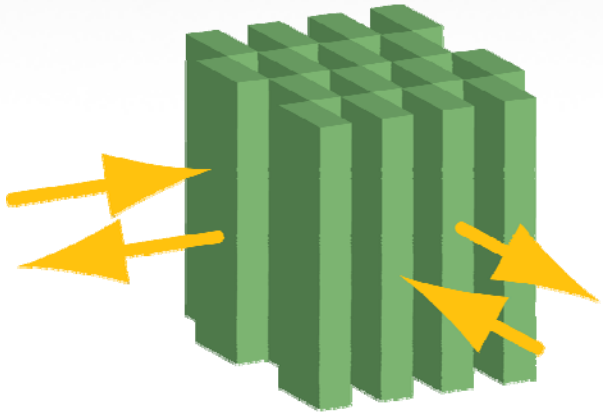
GaAs *(n=3.60)*
AlGaAs *(n=3.46)*

GaAs *(n=3.60)*
Air *(n=1)*

Cristal photonique – *miroir de Bragg 2D*

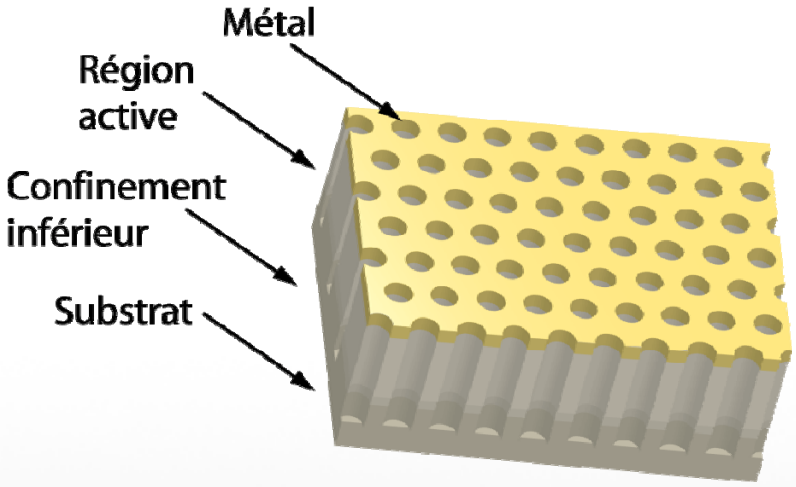


Miroir de Bragg



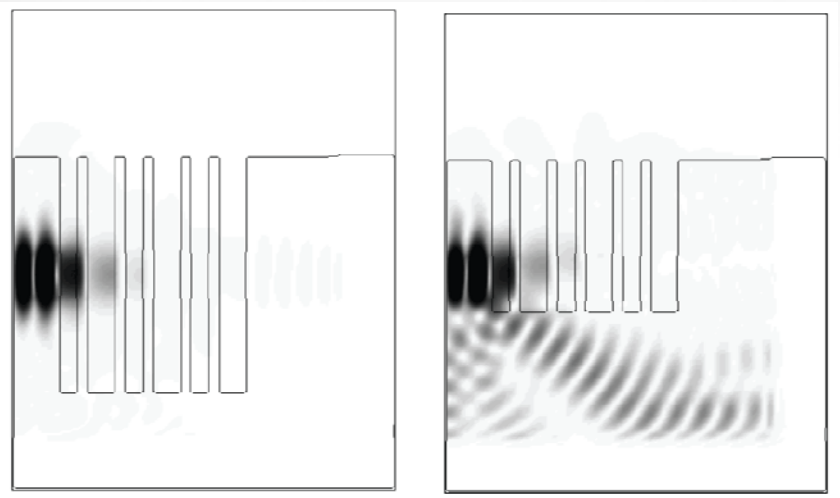
Cristal Photonique

Le cristal photonique
peut être vu comme une extension en 2D du miroir de Bragg



Cristal Photonique pour un LCQ

Cristal photonique – *avantage du guide à plasmons*

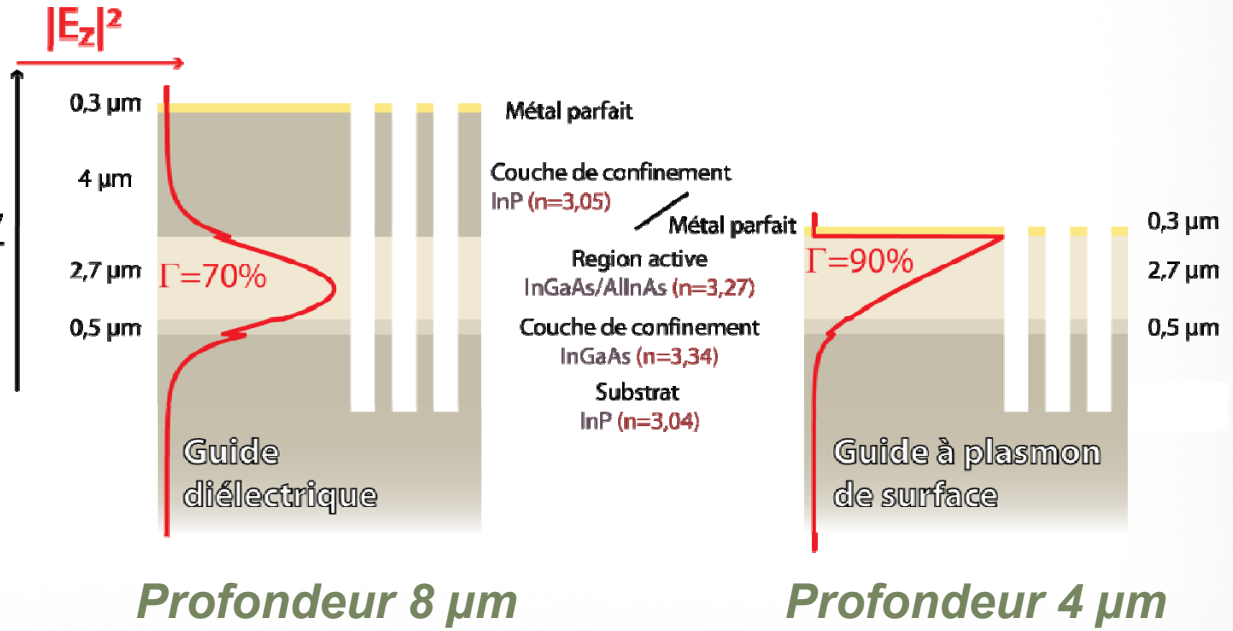


Brian R. d'Urso. Coupled semiconductor cavities with 2-D photonic bandgap crystal mirrors.

PhD thesis, California Institute of Technology, 2002

Avantages des guides à plasmons de surface pour les cristaux photoniques :

- **Mode très proche de la surface**
- **Gravure des trous peu profonde**
- **Meilleur facteur de qualité**

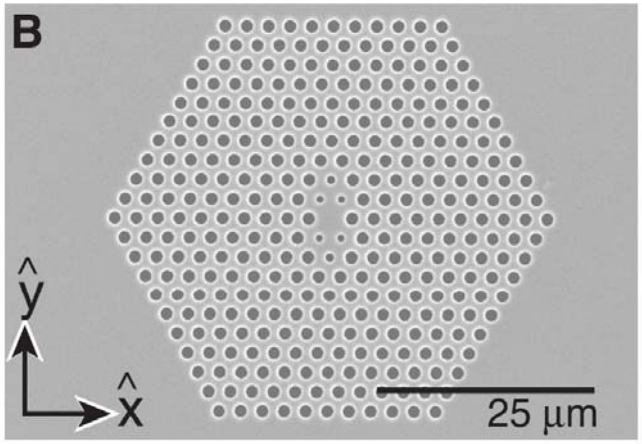


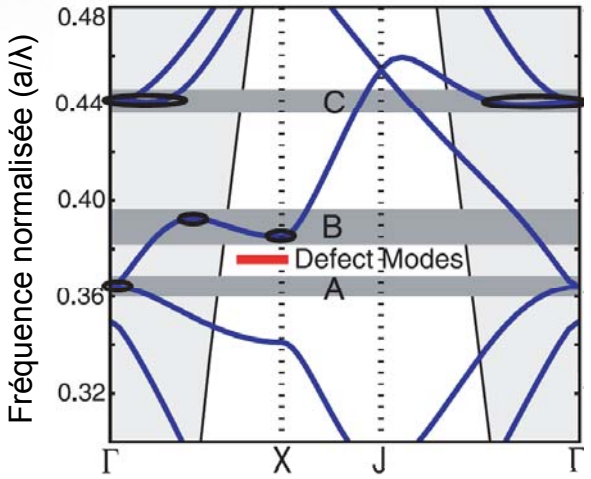
Profondeur 8 µm

Profondeur 4 µm

Cristal photonique – *cristaux photoniques pour les LCQs*

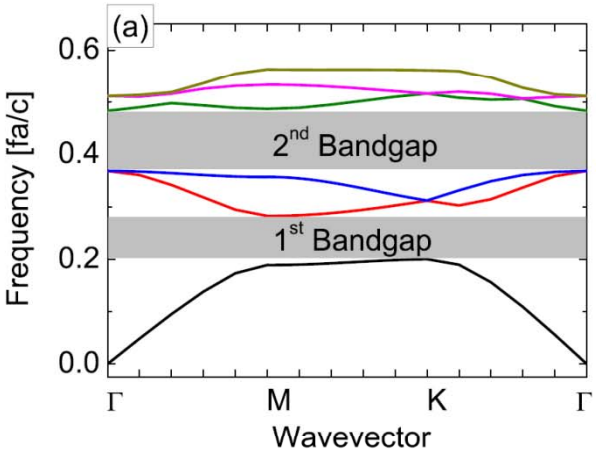
Laser bord de bande

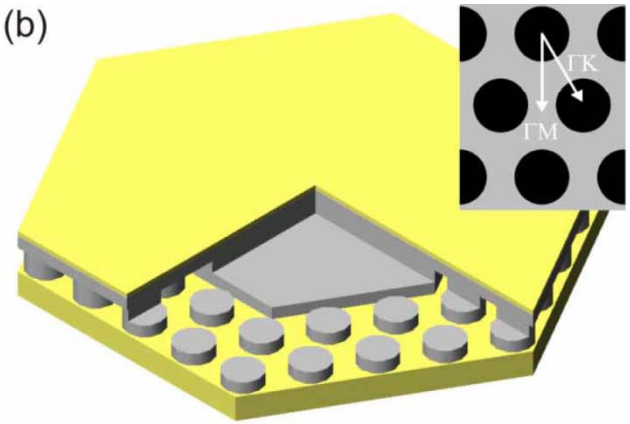




R. Colombelli et al., Quantum cascade photonic-crystal surface-emitting laser. Science, 302 :1374, (2004).

Microcavité





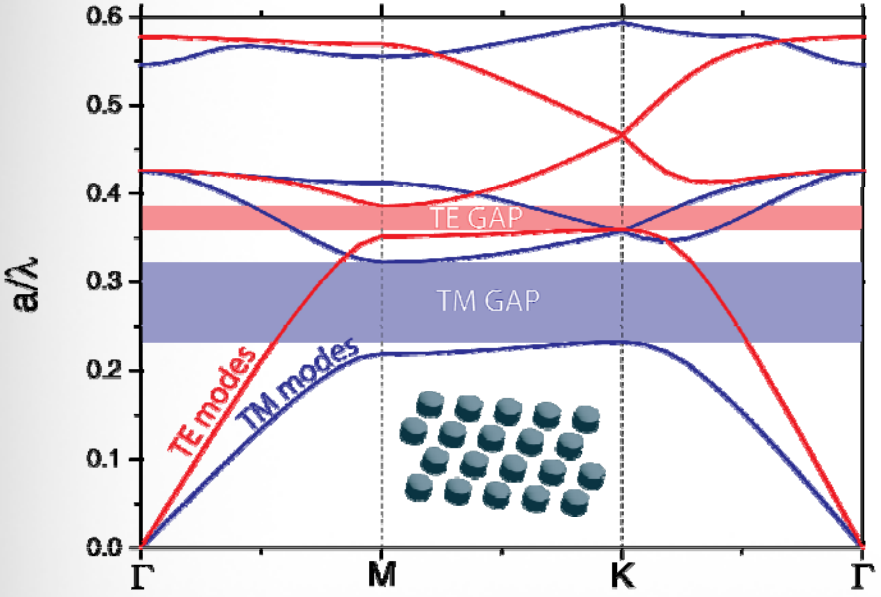
A. Benz et al., *Terahertz photonic crystal resonators in double-metal waveguides,* OPTICS EXPRESS, 15, 12418-12424 (2007)

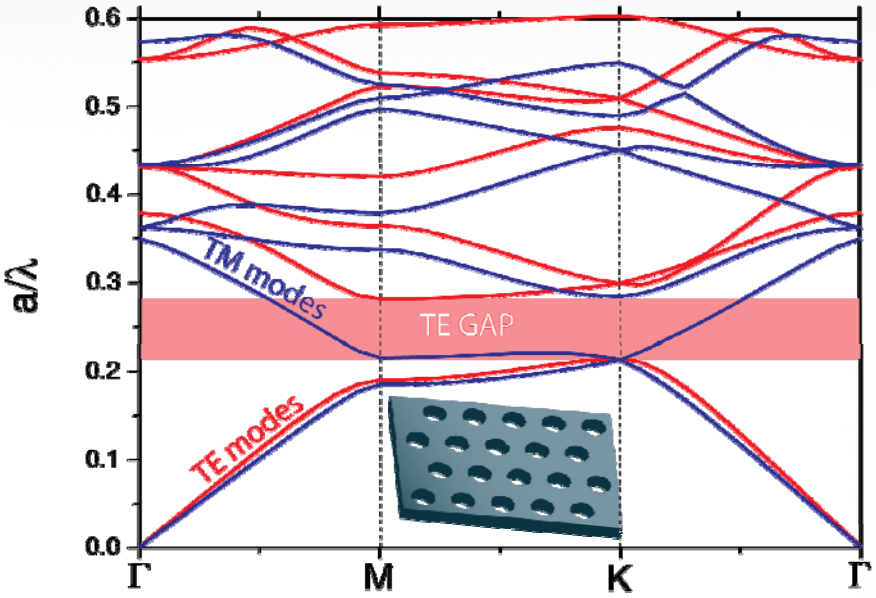
L. Sirigu et al., *Terahertz photonic crystal,* OPTICS EXPRESS, 15, 16822 (2007)

Cristal photonique – *choix du cristal photonique*

Une microcavité pour un LCQ :

- **Un gap TM , car les transitions intersousbandes sont polarisées TM**
- **Une structure connectée pour l'injection électrique**





Structure connectée :

- **Idéale pour l'injection électrique,**
- **Ne comporte pas de gap TM**

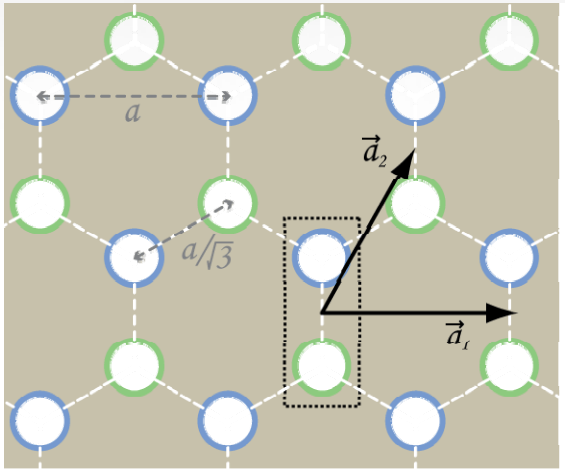
Structure déconnectée:

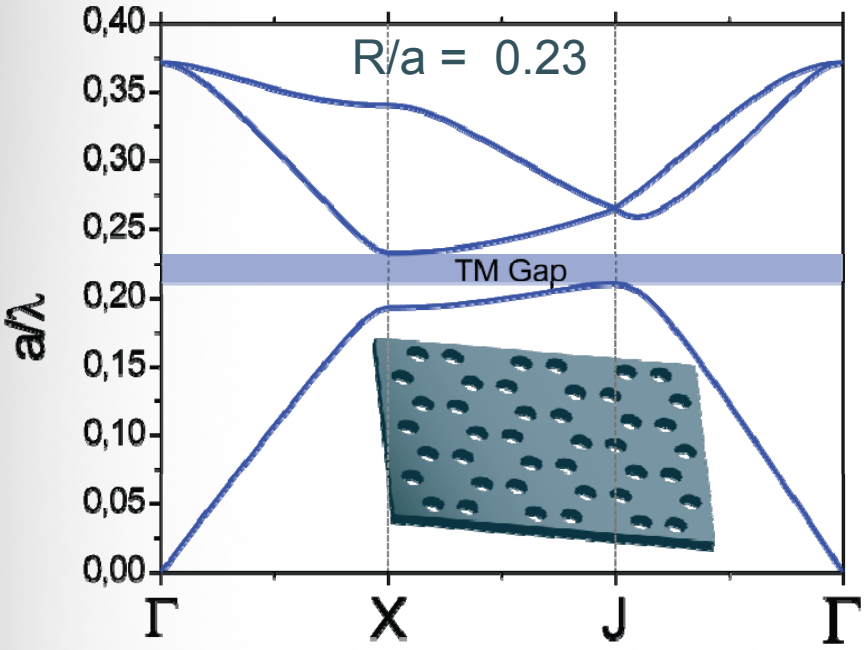
- **Injection électrique très difficile**
- **Présence d'un gap TM**

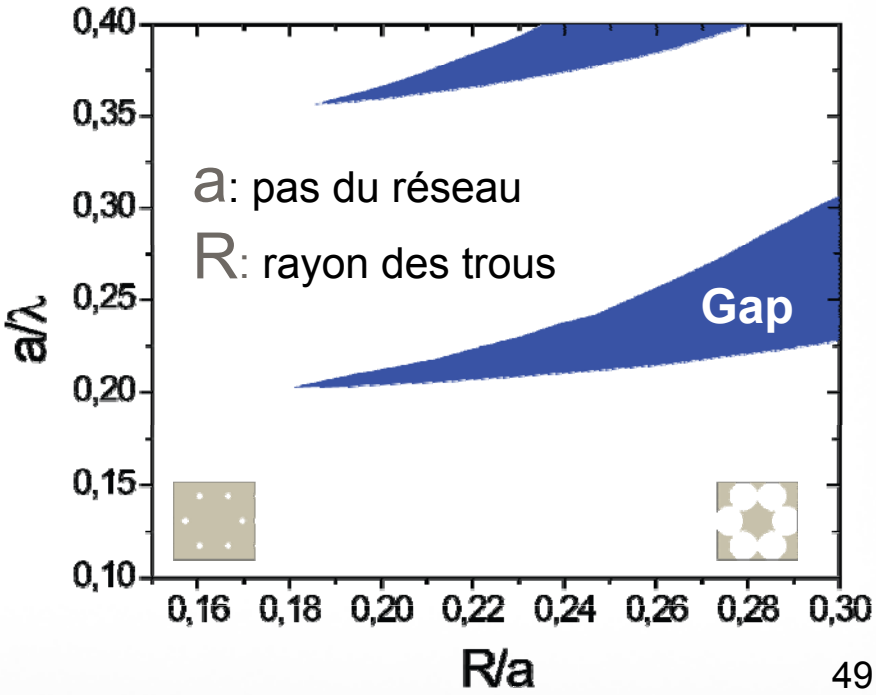
Cristal photonique – *le réseau nid d'abeille 2D*

Simulation du réseau nid d'abeille 2D :

- **Réalisée à partir de la méthode des ondes planes**
- **Pour un indice de réfraction n=3,35**

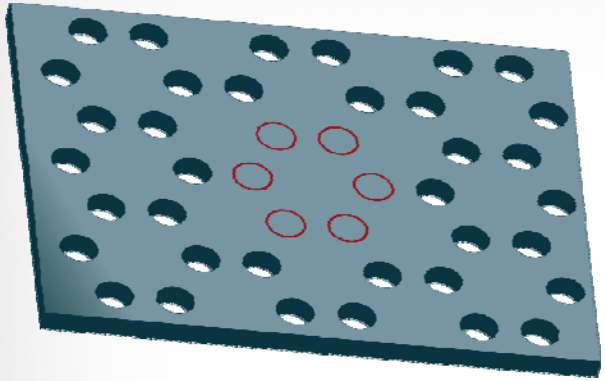


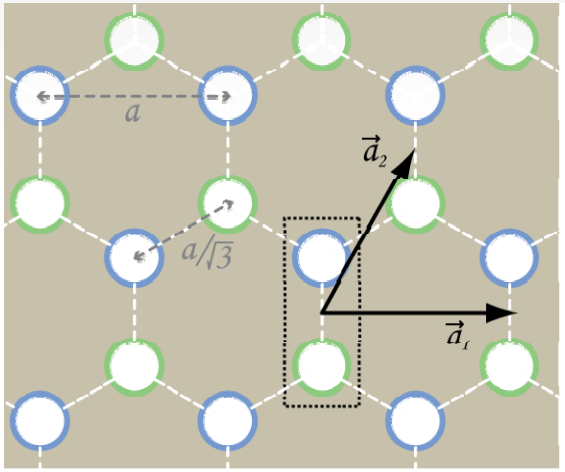




F. Gadot et al. ,*Experimental demonstration of complete photonic band gap in graphite structure*. Applied Physics Letters, 71 :1780, July 1997.

Cristal photonique – *microcavité*



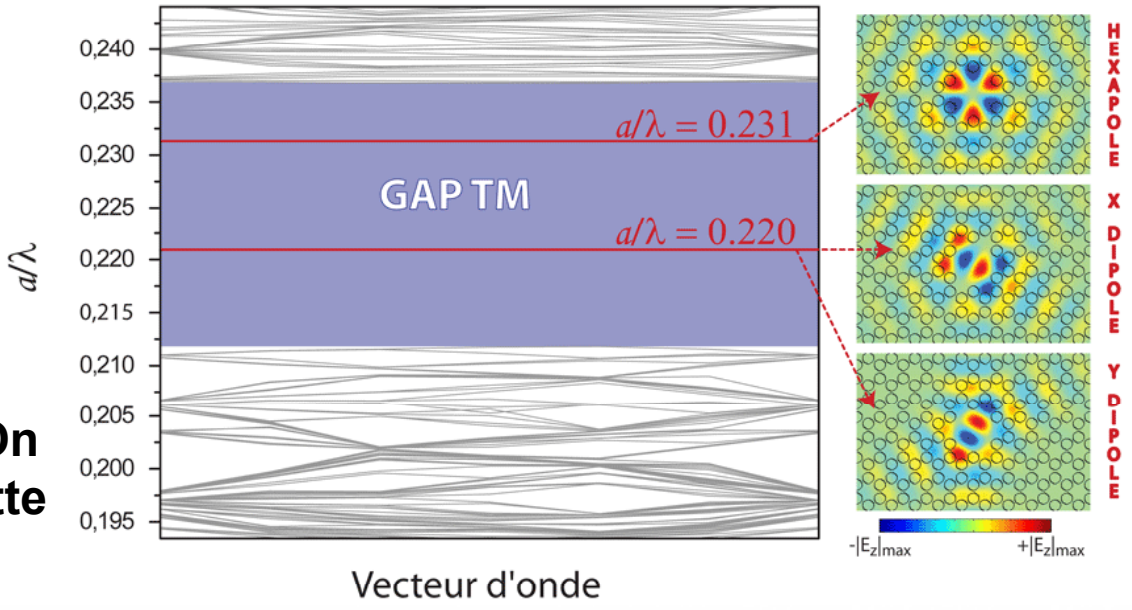


Microcavité:

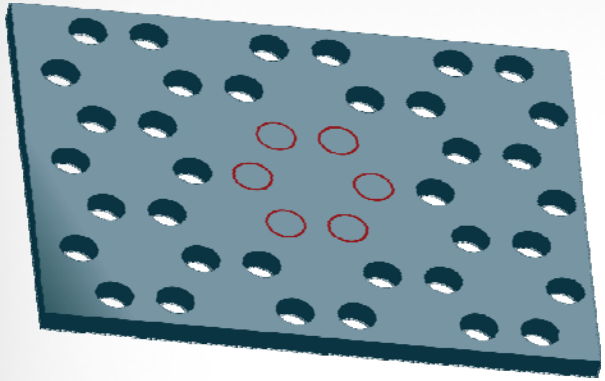
Pour créer la microcavité, on retire six trous d'air au centre du cristal

Méthode supercell :

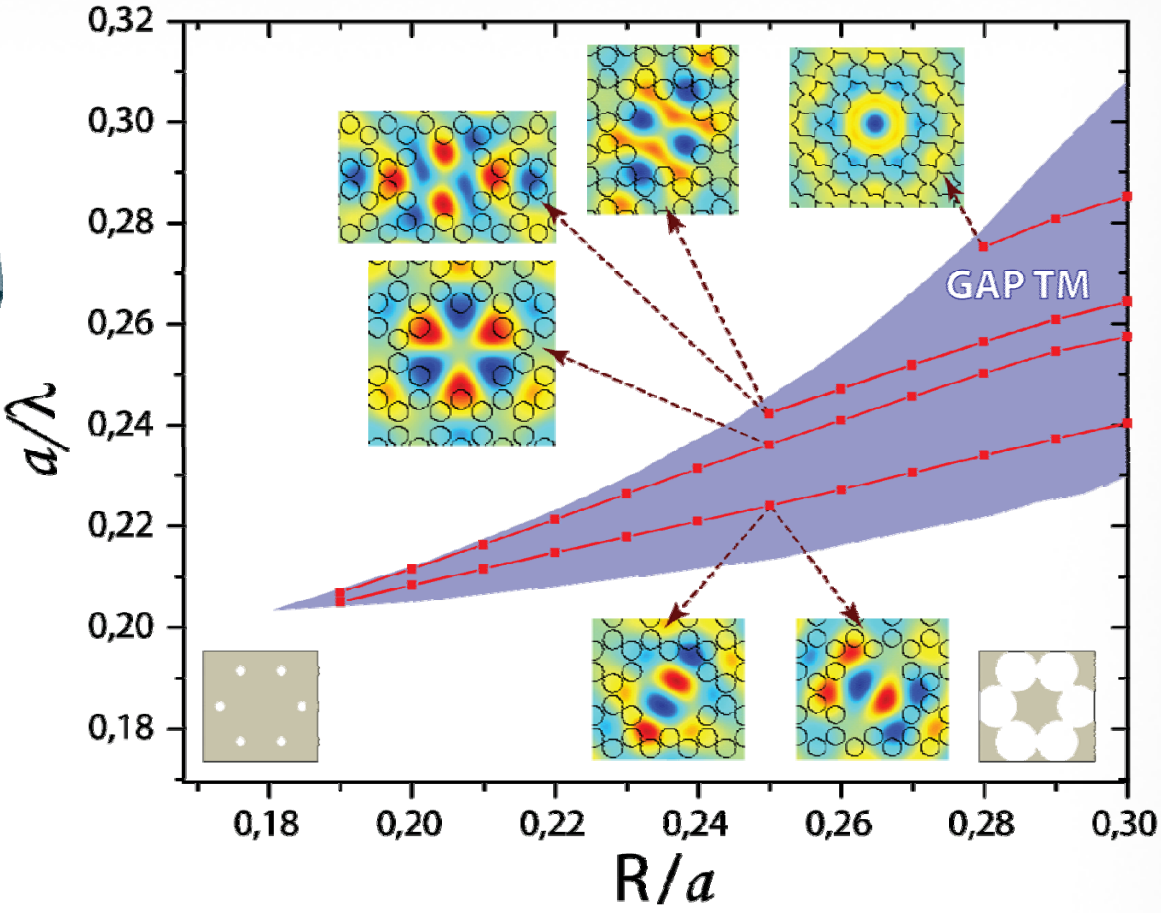
Le défaut brise la périodicité du système. On recrée artificiellement cette périodicité grâce à une approche supercell



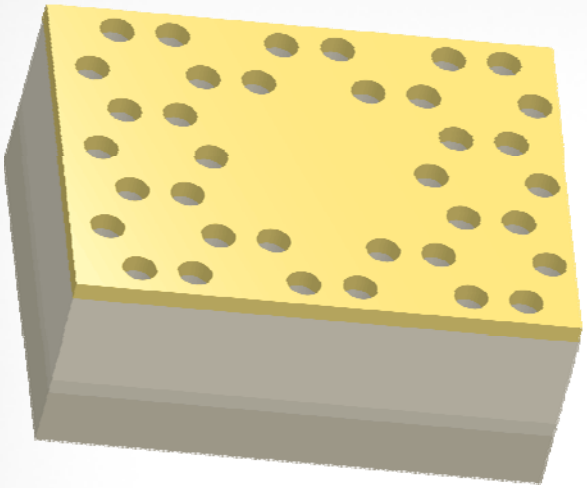
Cristal photonique – *modes de défaut*



Variation en énergie des modes de défaut :
permet de fixer les paramètres *a* et *R* que l'on utilise pour les structures réelles

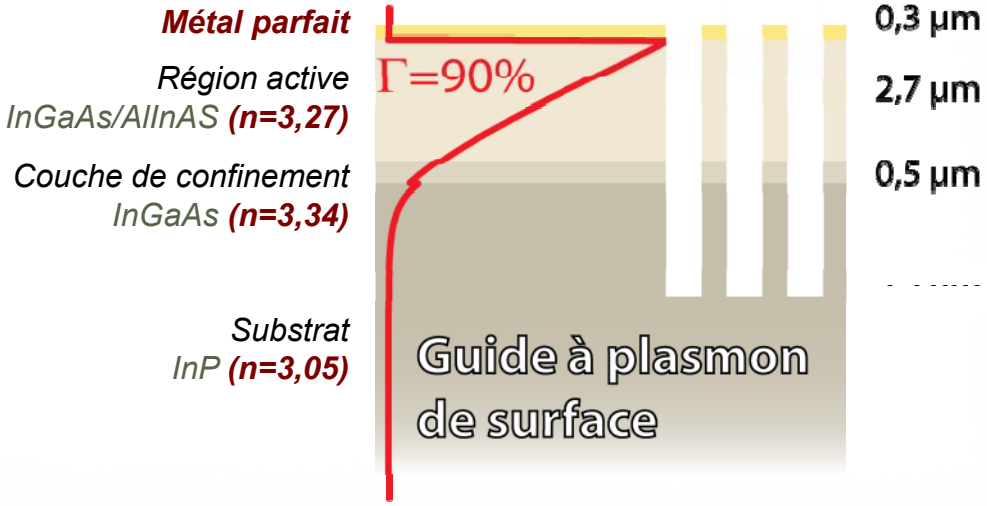


Cristal photonique – *simulation 3D pour le moyen-IR*

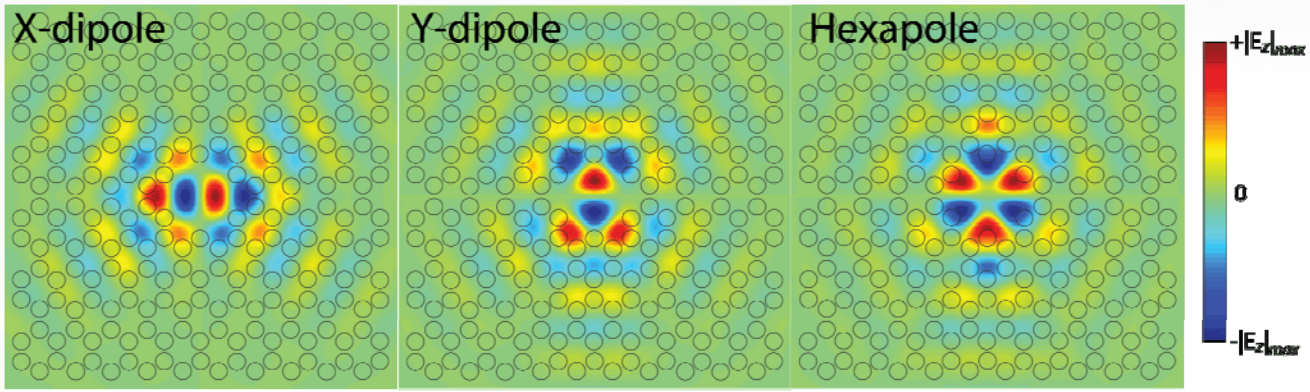


Laser moyen-IR:
Le dispositif simulé est la réplique d'une structure réelle à plasmons de surface.

Simulations FDTD :
-Pour modéliser en 3D les dispositifs.
- Pour calculer le facteur de qualité des cristaux photoniques.

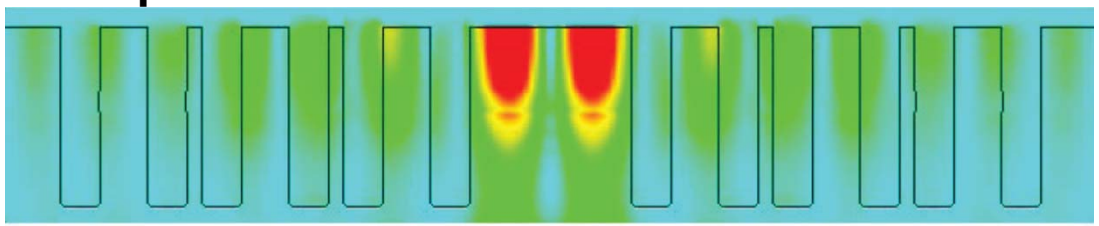


Cristal photonique – *résultats 3D pour le moyen-IR*



Mode de défaut dans le plan (E_z):

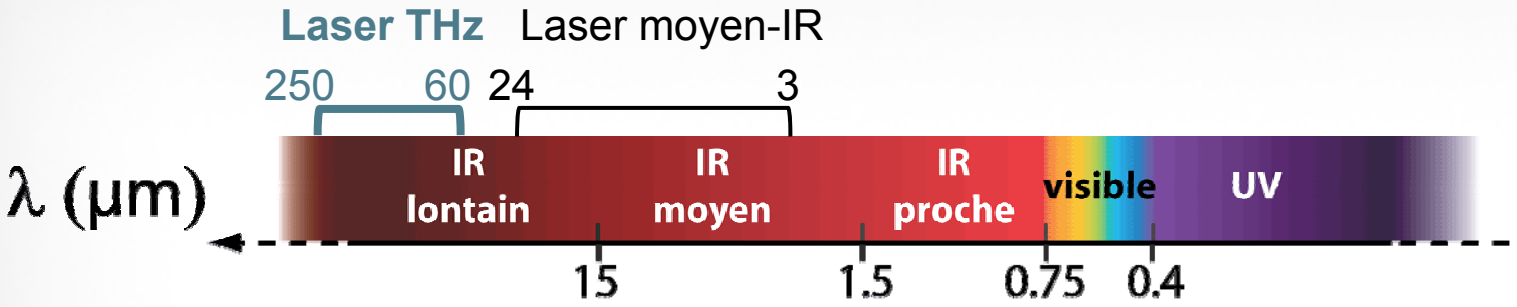
Le facteur de Qualité = 300 pour une structure de 7x4 périodes, ce qui équivaut à des pertes de 70 cm^{-1}.



Coupe du mode de défaut Y-dipôle ($|E_z|^2$):

Grâce au guide à plasmons de surface le mode optique est très proche de la surface.

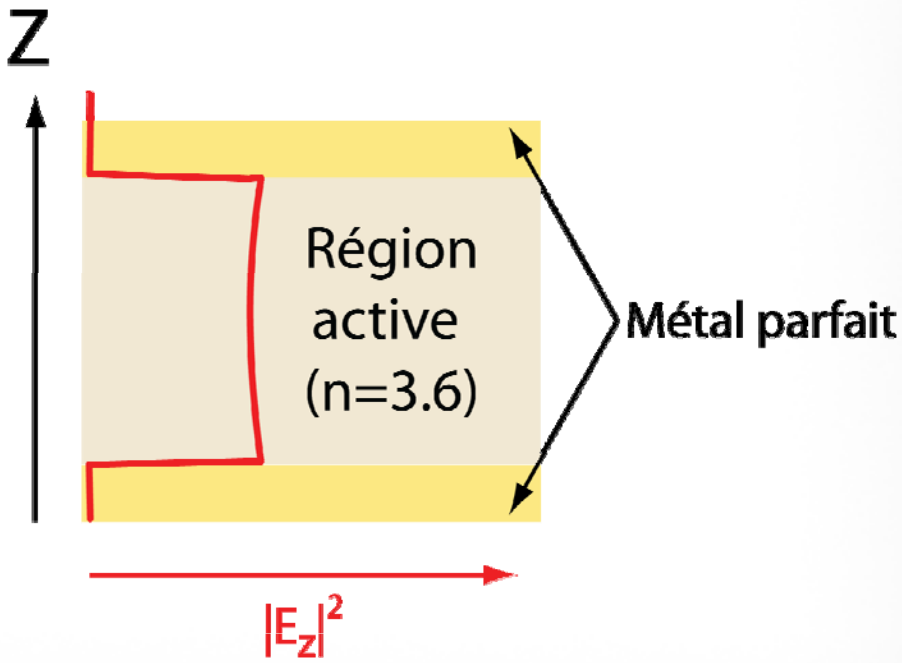
Cristal photonique – *simulations 3D pour le THz*



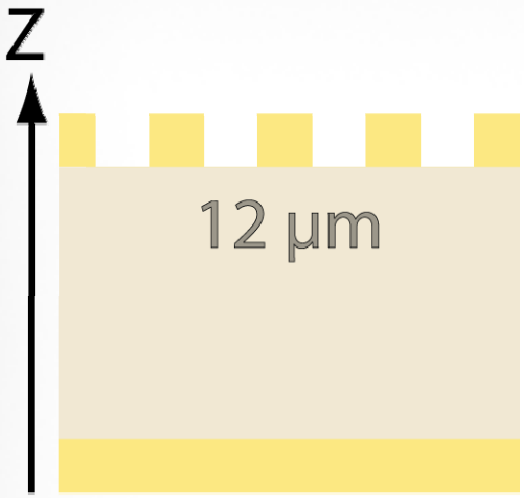
Guide métal-métal pour les lasers THz

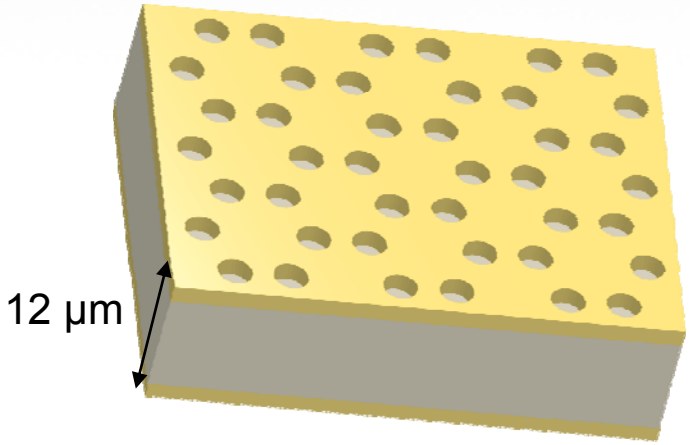
Permet d'obtenir un confinement optique très proche de l'unité avec de faibles pertes.

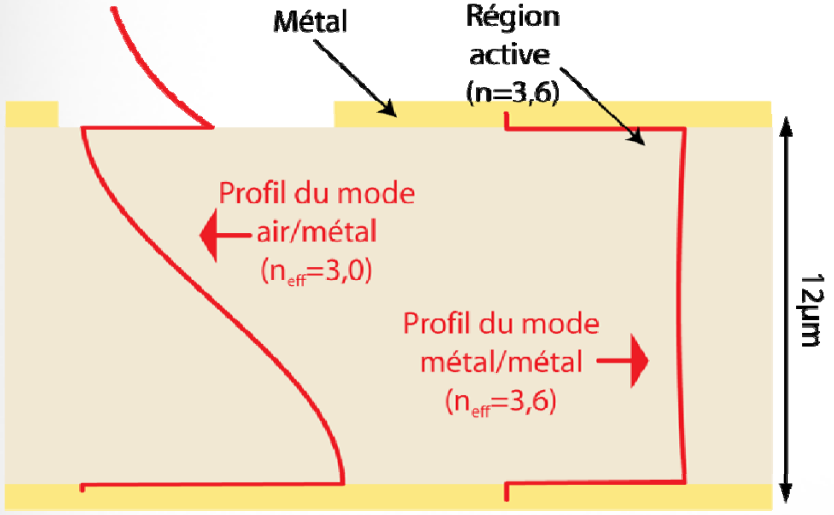
$$\alpha = \frac{4\pi \cdot n_{metal} \cdot n_D^3}{k_{metal}^3 \cdot \lambda}$$



Cristal photonique – *structuration du métal*





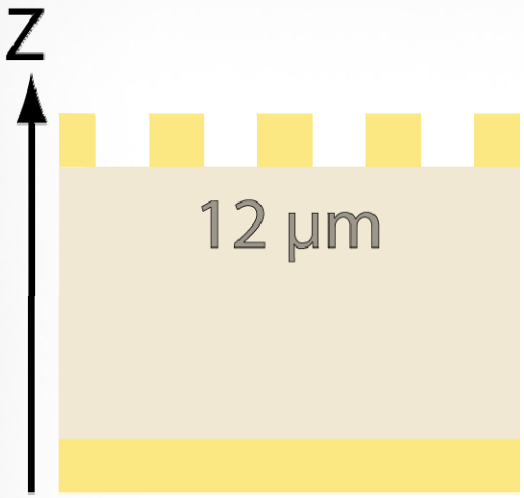


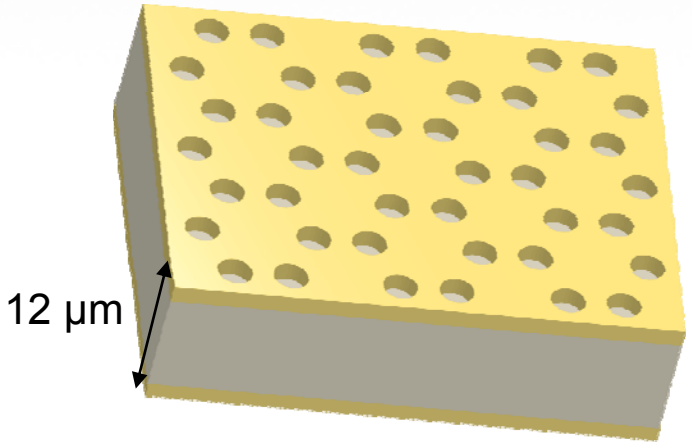
Δn = 0,6

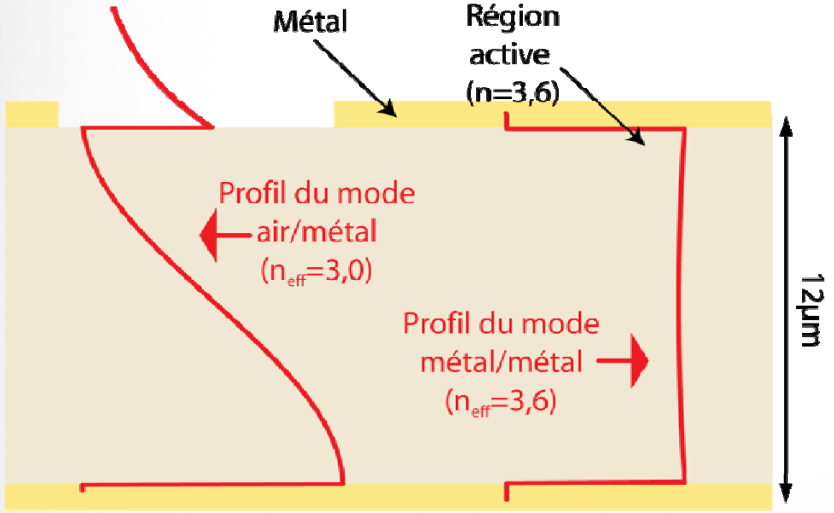
Hypothèse :

La simple structuration du métal supérieur suffit à obtenir un contraste d'indice suffisamment important pour implémenter un cristal photonique.

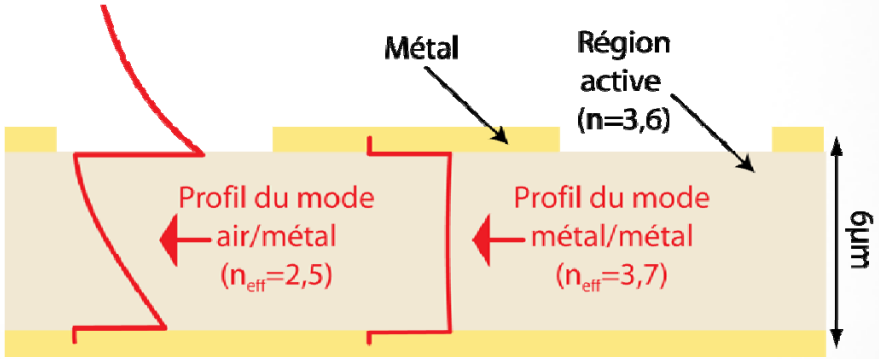
Cristal photonique – *structuration du métal*





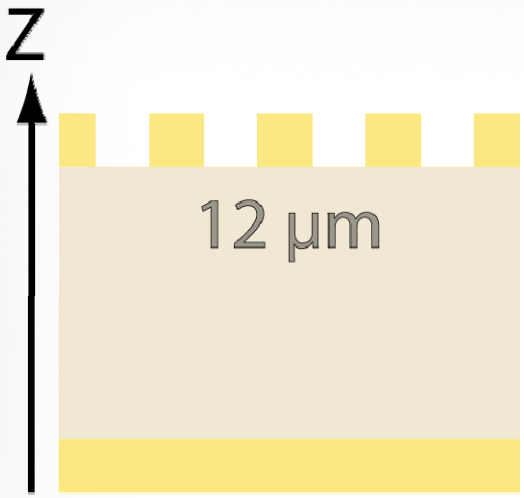


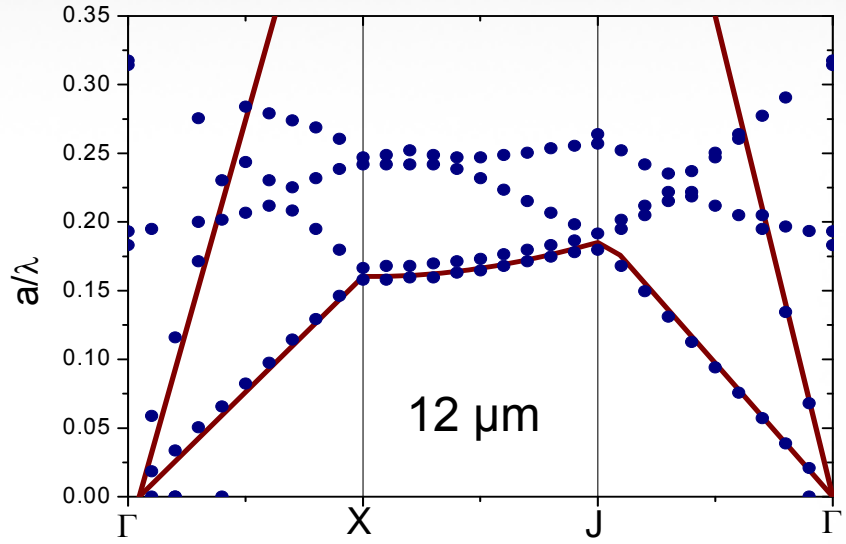
Δn = 0,6

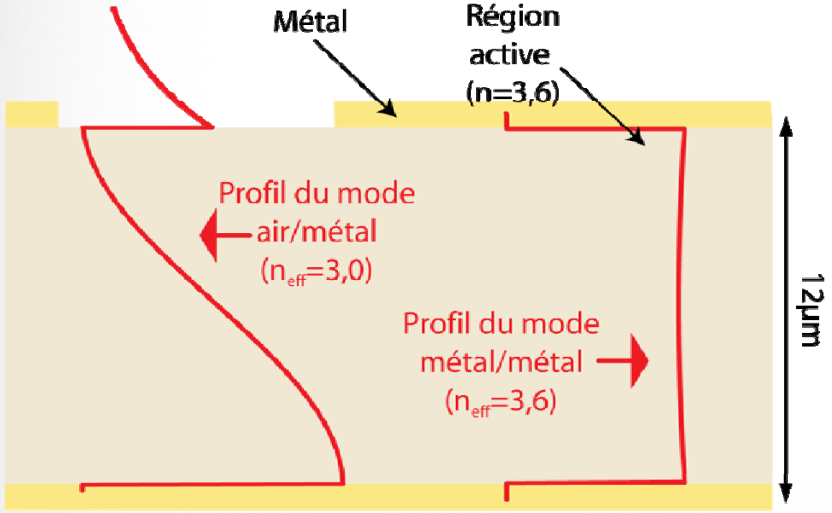


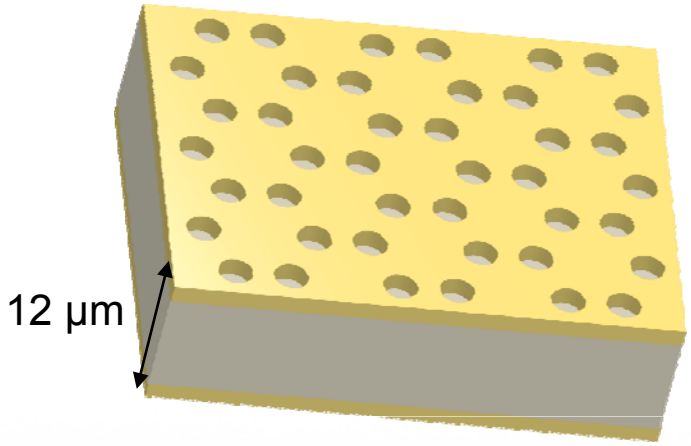
Δn = 1,2

Cristal photonique – *structuration du métal*



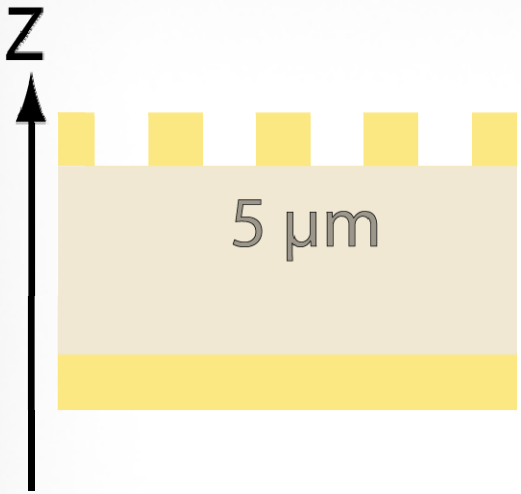


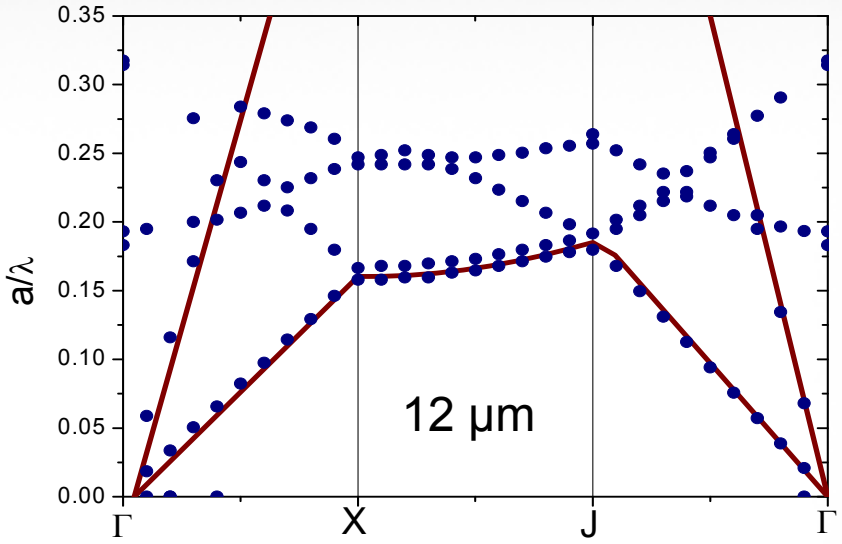


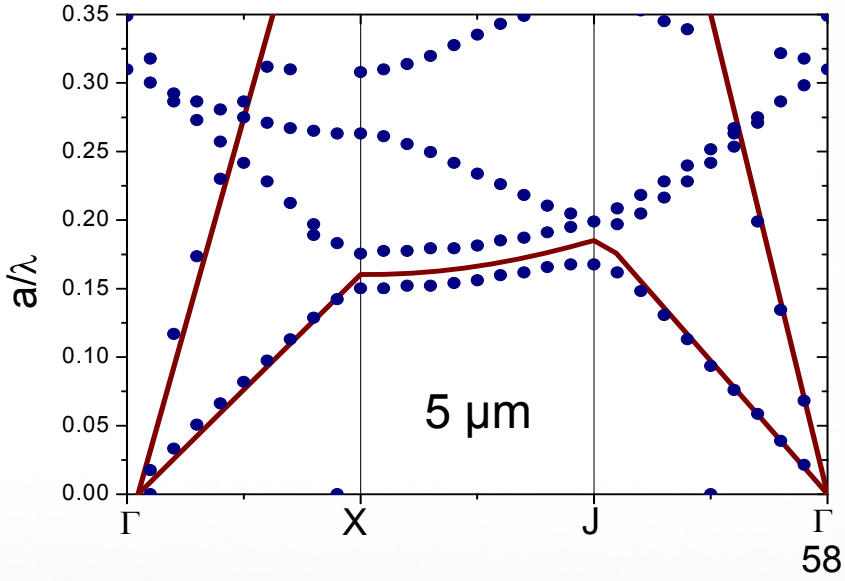


Δn = 0,6

Cristal photonique – *structuration du métal*

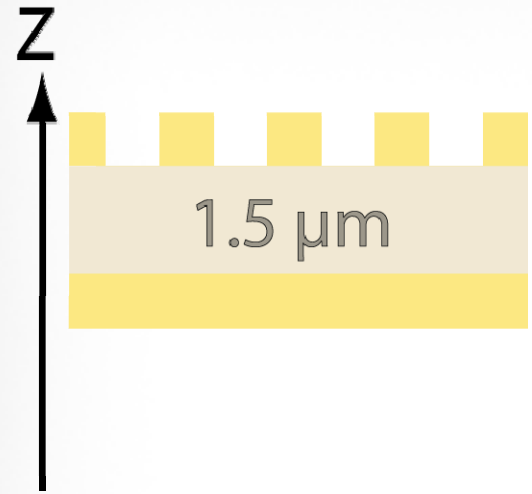


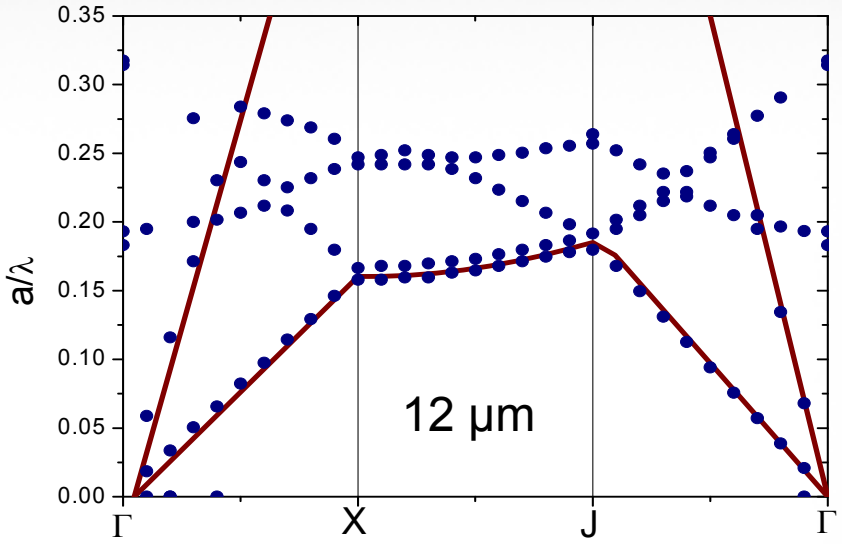


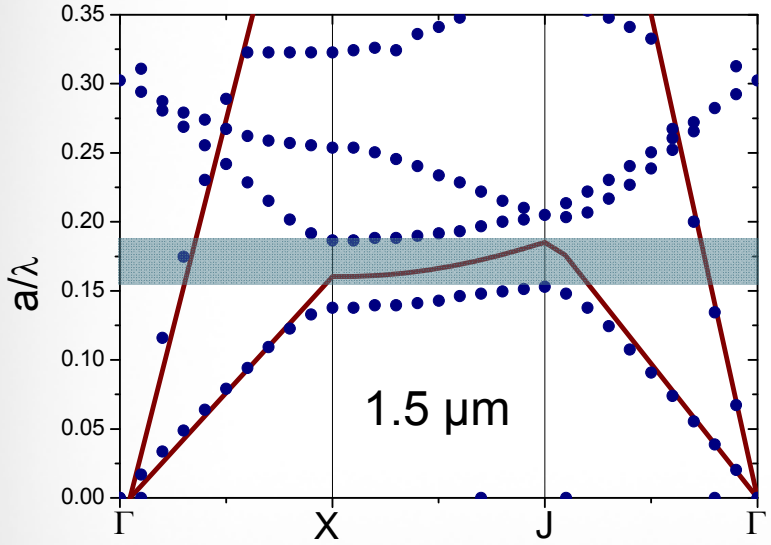


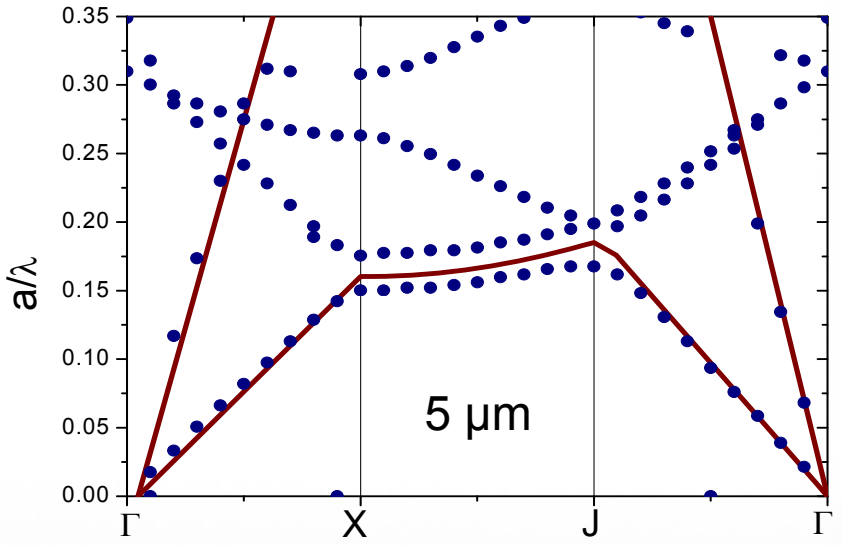
En diminuant l'épaisseur de la région active,
on augmente l'efficacité du cristal photonique.

Cristal photonique – *structuration du métal*

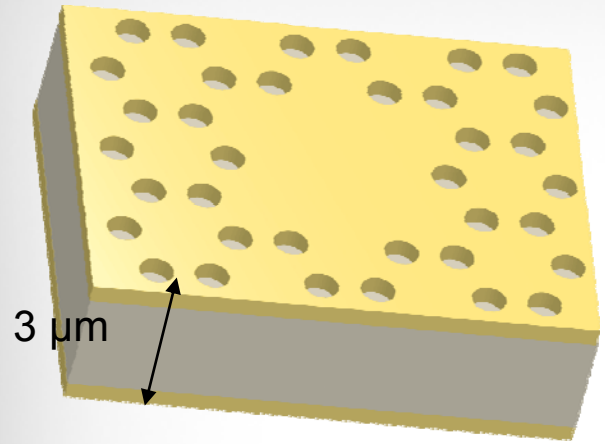






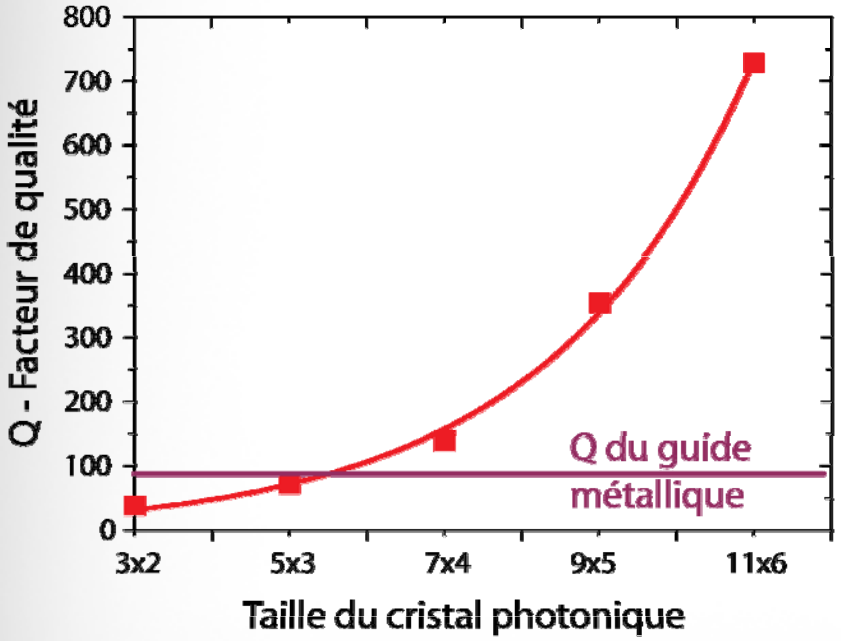


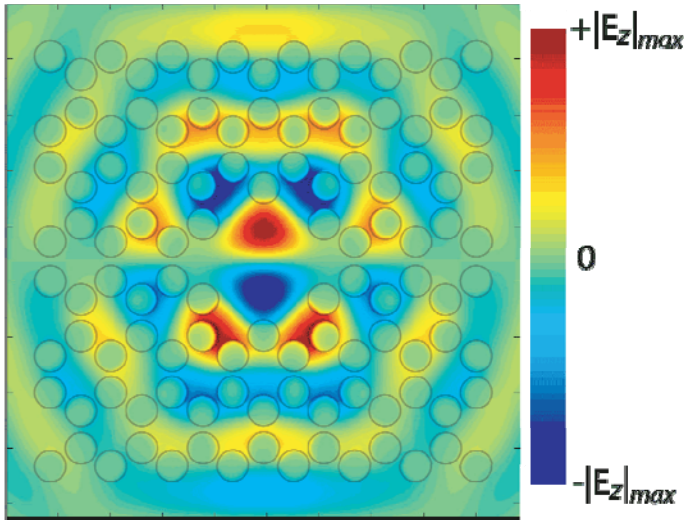
Cristal photonique – *mode de défaut de la µ-cavité THz*



Simulations de microcavité THz

Pour des cristaux photoniques possédant un grand nombre de périodes, il est possible d'obtenir des facteurs de qualité > 1000





M. Bahriz et al., Design of mid-ir and thz quantum cascade laser cavities with complete tm photonic bandgap. Optics Express, 15 :5948–5965, May 2007.

Conclusions

Conclusions 1e et 2e partie

• Démonstration de guide à plasmons de surface pour les courtes longueurs d'onde (λ~7,5 µm)
• Réalisation du premier LCQ à plasmons de surface fonctionnant à température ambiante.
• Mise au point d'une technique efficace de mesure des pertes et du gain dans les guides à plasmons de surface

Conclusions 3e partie

• Démonstration à partir d'un CP à structure connectée de micro-cavité pour LCQ moyen-IR et THz.
• Mise en évidence d'un phénomène nouveau permettant d'obtenir un cristal photonique en gravant uniquement le métal supérieur

Conclusions – *perspectives*

Moyen-IR

- Laser DFB à plasmons de surface
- Cristaux photoniques à µ-cavité en utilisant les guides à plasmons de surface

THz

- Structures fines (régions actives)
- Cristaux photoniques bord de bande
- Cristaux photoniques à µ-cavité

Merci pour votre attention.

Je remercie l'ensemble de l'équipe OptoGaN (par ordre alphabétique) :

Adel BOUSSEKSOU
Yannick CHASSAGNEUX
Raffaele COLOMBELLI
Jean-René COUDEVYLLE
Laetitia DOYENNETTE
Nasrin ESSNER
François JULIEN
Houssaine MACHHADANI
Adrien MICHON
Virginie MOREAU
Laurent NEVOU
Maria TCHERNYCHEVA
Elias WARDE
Gangyi XU

et de la CTU :

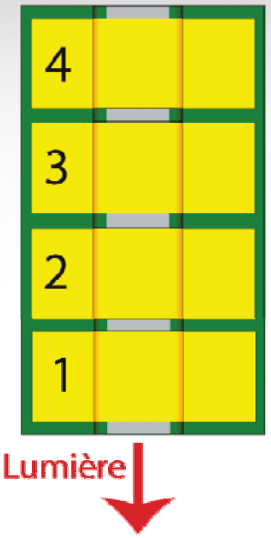
Sylvain DAVID
José PALOMO

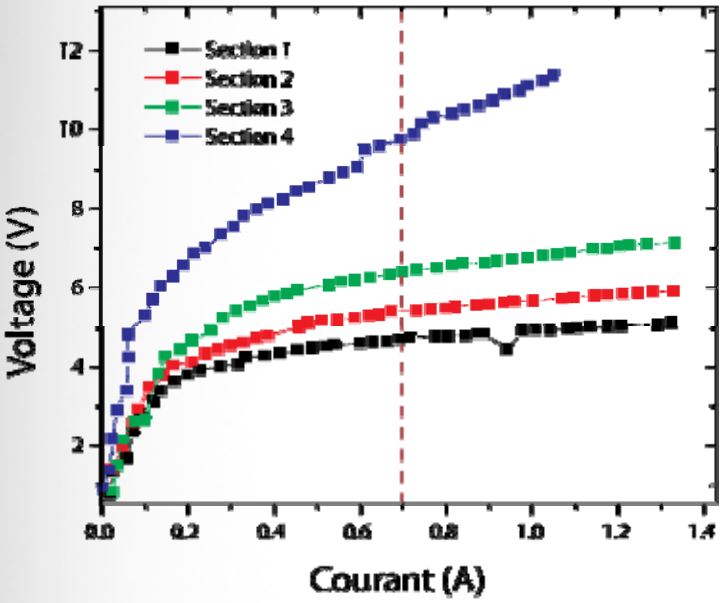
Indices

Métaux	n_m	k_m	n_m/k_m^3	$\alpha\ (cm^{-1})$
Ag	$2,94$	$54,13$	$1,85.10^{-5}$	$11,15$
Or	$4,33$	$53,84$	$2,78.10^{-5}$	$16,72$
Al	$18,96$	$82,50$	$3,38.10^{-5}$	$20,33$
Ni	$4,84$	$27,70$	$2,27.10^{-4}$	$137,1$
Pd	$4,40$	$16,25$	$1,10.10^{-3}$	$617,4$
Ti	$6,31$	$13,90$	$2,30.10^{-3}$	1414

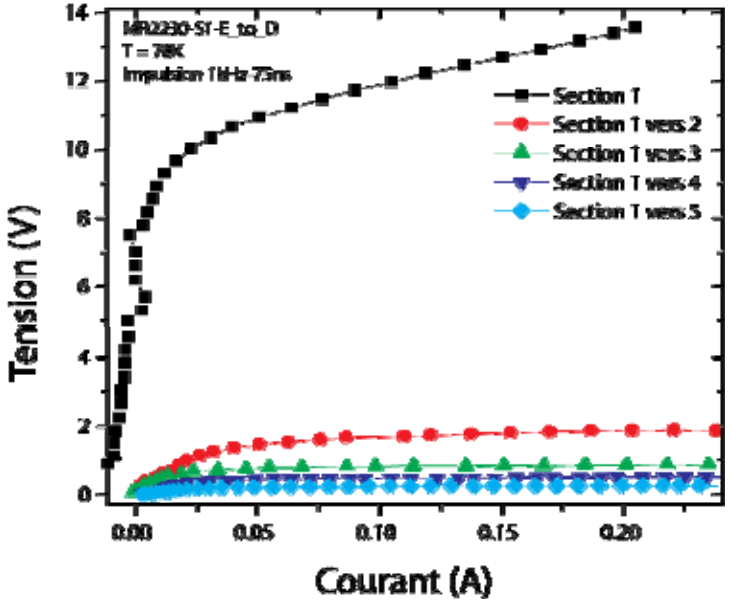
Matériaux	Masse effective (m_0)	τ (ps)	n (à $10\mu m$)	n (à $8,5\mu m$)	n (à $7,5\mu m$)
GaAs	0,067	0,15	3,273	3,281	3,2864
$Al_{0,45}Ga_{0,55}As$	0,1046	0,15	3,0647	3,0751	3,0821
$In_{0,53}Ga_{0,47}As$ (sur InP)	0,0427	0,15	3,3414	3,3473	3,3540
$Al_{0,48}In_{0,52}As$ (sur InP)	0,076	0,15	3,1178	3,1264	3,1349
InP	0,08	0,15	3,038	3,0575	3,0655
InAs	0,027	0,15	3,402	3.406	3.414
AlSb	0,12	0,15	3.157	3.170	3.180
AlAs	0,15	0,15	2.81	2.8235	2.8325

Dispersion du courant



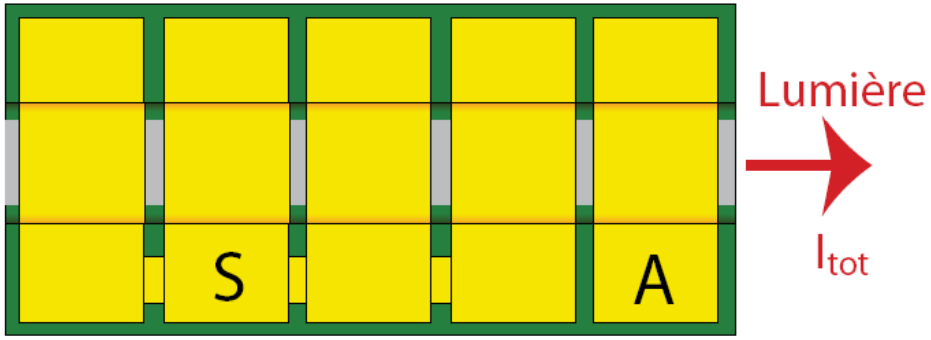


Guide diélectrique



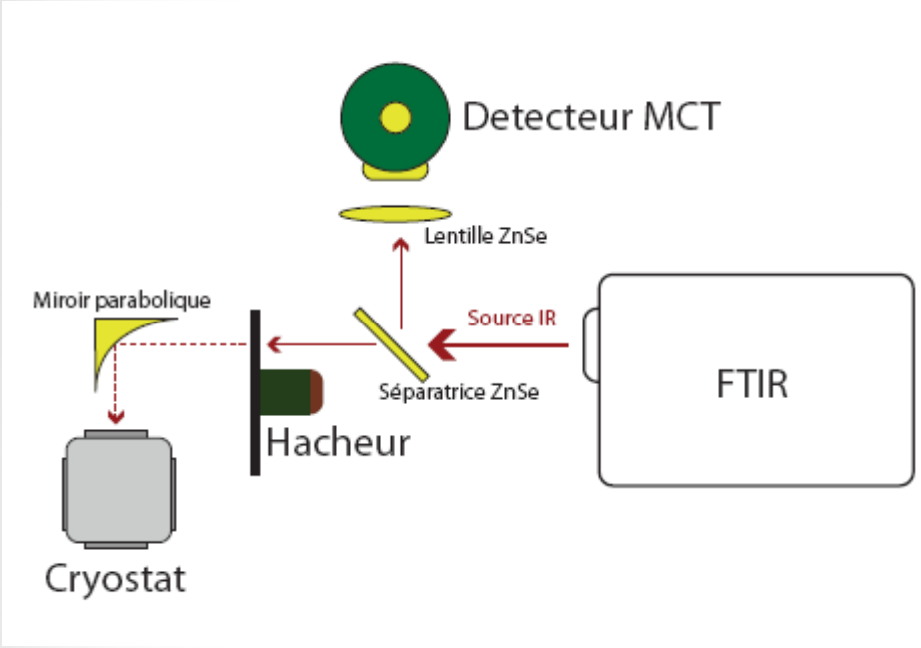
Guide à plasmons de surface

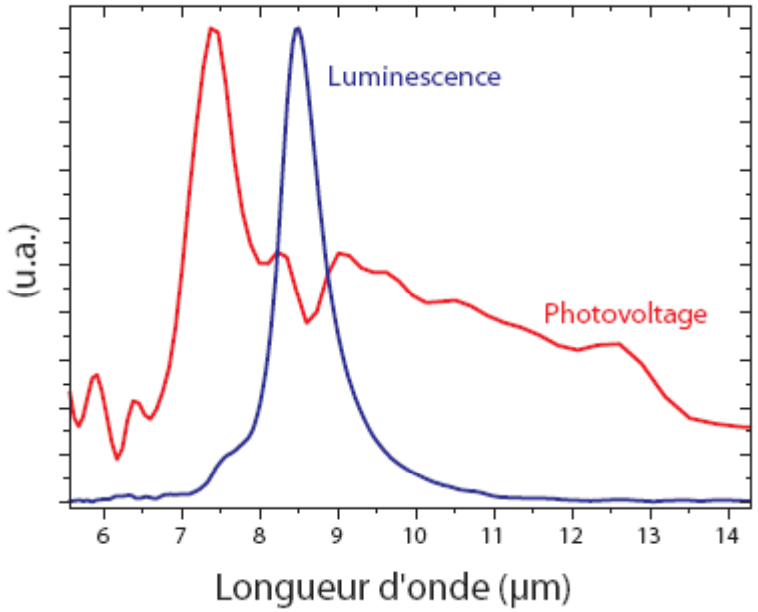
Gain



$$
\begin{aligned}
G(J_A,\lambda) &= \frac{1}{L_A}\, ln\left(\frac{I_{tot}(J_S,J_A,\lambda)-I_{tot}(J_S=0,J_A,\lambda)}{I_{tot}(J_S,J_A=0,\lambda)}\right)\\
I_{tot}(J_S=0,J_A,\lambda) &= I_A(J_A,\lambda)(1-R)\\
I_{tot}(J_S,J_A=0,\lambda) &= I_S(J_S,\lambda)\, exp(-\alpha_w\, L_A)(1-R)
\end{aligned}
$$

Self-absorption





Facteur de qualité

$$Q_{//} = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_0 \alpha_{cp}} \Leftrightarrow \alpha_{cp} = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_0 Q_{//}}$$

Épaisseur (μm)	1.5	3	3.5	5	7
Contraste d'indice $\frac{\triangle n_{eff}}{n_{eff}}$ (%)	38,3	37,2	37,0	36,7	36,4
Pertes α_m (cm^{-1})	50,6	25,8	22,2	15,5	10,5
Facteur de qualité Q_m	45	88	102	146	215

Périodes	3×2	5×3	7×4	9×5	11×6
$Q_{//}$	38	72	139	354	729