MiniLAS

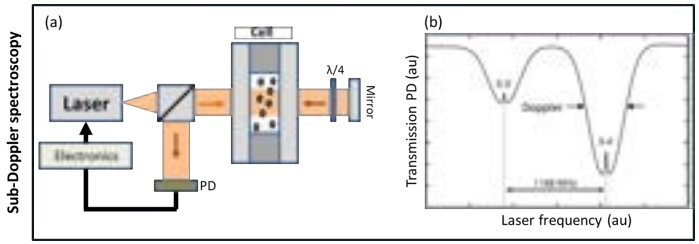
Sources laser miniatures stabilisées pour spectroscopie et références atomiques

Estelle Genthial[1], **Antoine Monmayrant**[1], Olivier Gauthier-Lafaye[1], Olivier LLopis[2], Rodolphe Boudot[3], Emmanuel Klinger[3]

[1]PHOTO, [2]MOST, LAAS-CNRS
[3]OHMS, FEMTO-ST

2026-10-01

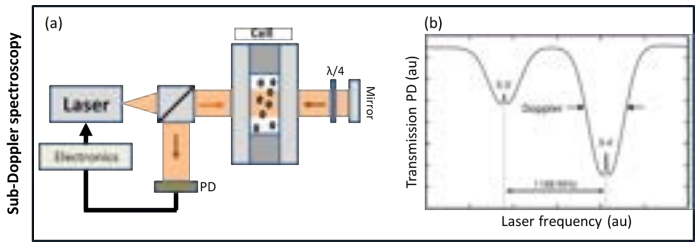
Vers des horloges optiques miniatures à micro-cellules







Vers des horloges optiques miniatures à micro-cellules

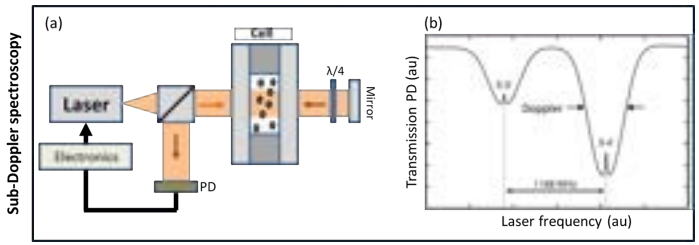


Spectroscopie sub-Doppler





Vers des horloges optiques miniatures à micro-cellules



Spectroscopie sub-Doppler

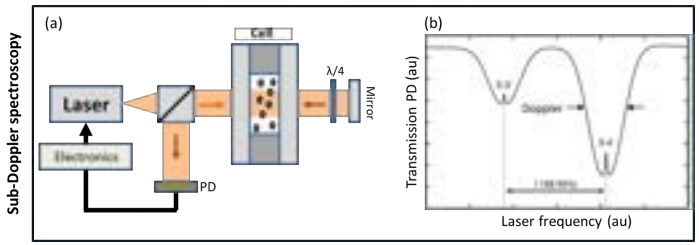
Architecture simple: laser+cellule+photodiode

(~~UHV, refroidissement laser~~)





Vers des horloges optiques miniatures à micro-cellules







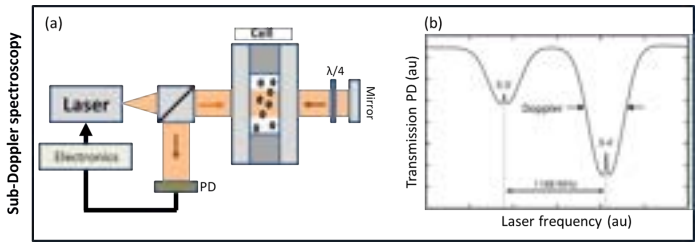
Spectroscopie sub-Doppler

Architecture simple: laser+cellule+photodiode

(~~UHV, refroidissement laser~~)

$$\sigma_y(\tau) = \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \times \frac{1}{S/N} \times (\tau)^{-1/2}$$

Vers des horloges optiques miniatures à micro-cellules







Spectroscopie sub-Doppler

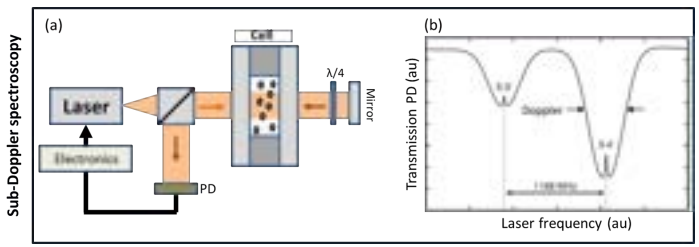
Architecture simple: laser+cellule+photodiode

(~~UHV, refroidissement laser~~)

$$\sigma_y(\tau) = \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \times \frac{1}{S/N} \times (\tau)^{-1/2}$$

$\Delta\nu$ & ν_0 largeur et fréquence de transition

Vers des horloges optiques miniatures à micro-cellules







Spectroscopie sub-Doppler

Architecture simple: laser+cellule+photodiode

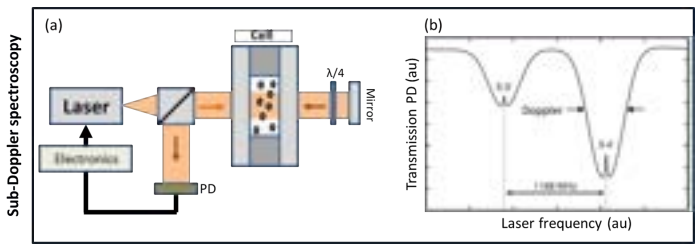
(~~UHV, refroidissement laser~~)

$$\sigma_y(\tau) = \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \times \frac{1}{S/N} \times (\tau)^{-1/2}$$

$\Delta\nu$ & ν_0 largeur et fréquence de transition

S/N dépend directement de la source laser:

Vers des horloges optiques miniatures à micro-cellules







Spectroscopie sub-Doppler

Architecture simple: laser+cellule+photodiode

(~~UHV, refroidissement laser~~)

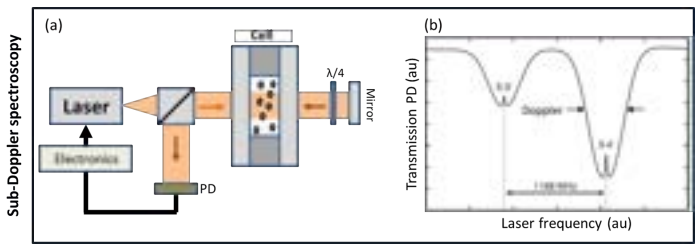
$\sigma_y(\tau) = \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \times \frac{1}{S/N} \times (\tau)^{-1/2}$

$\Delta\nu$ & ν_0 largeur et fréquence de transition

S/N dépend directement de la source laser:

- Bonne pureté spectrale
- Accordable & Modulable en fréquence
- Compacte & Robuste

Vers des horloges optiques miniatures à micro-cellules







Spectroscopie sub-Doppler

Architecture simple: laser+cellule+photodiode

(~~UHV, refroidissement laser~~)

$\sigma_y(\tau) = \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \times \frac{1}{S/N} \times (\tau)^{-1/2}$

$\Delta\nu$ & ν_0 largeur et fréquence de transition

S/N dépend directement de la source laser:

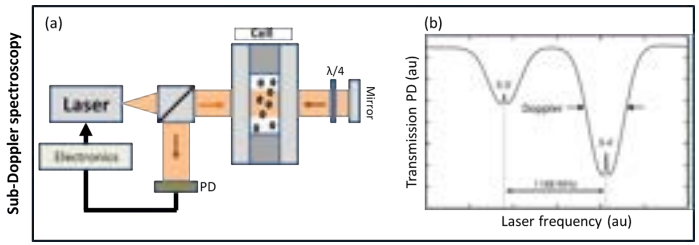
Bonne pureté spectrale

Accordable & Modulable en fréquence

Compacte & Robuste

~~DFB, DBR~~

Vers des horloges optiques miniatures à micro-cellules







Spectroscopie sub-Doppler

Architecture simple: laser+cellule+photodiode

(~~UHV, refroidissement laser~~)

$\sigma_y(\tau) = \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \times \frac{1}{S/N} \times (\tau)^{-1/2}$

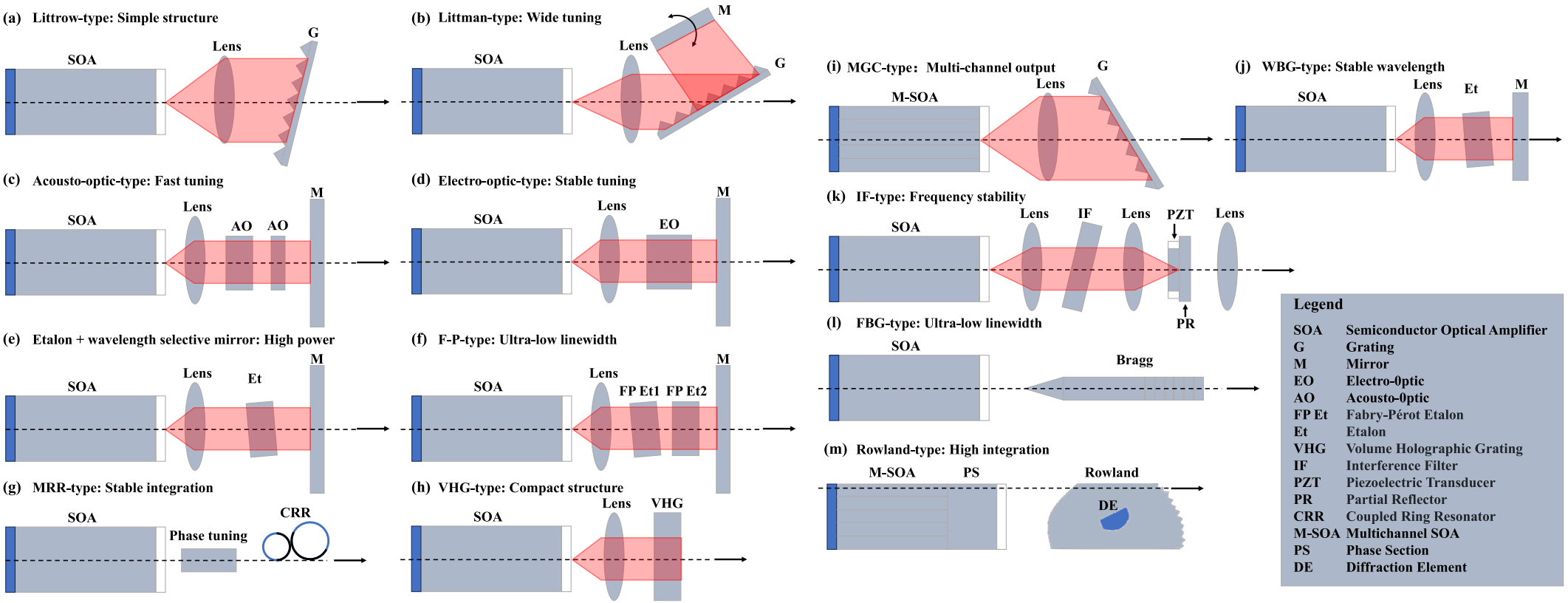
$\Delta\nu$ & ν_0 largeur et fréquence de transition

S/N dépend directement de la source laser:

- **Bonne pureté spectrale**
- **Accordable** & Modulable en fréquence
- Compacte & Robuste

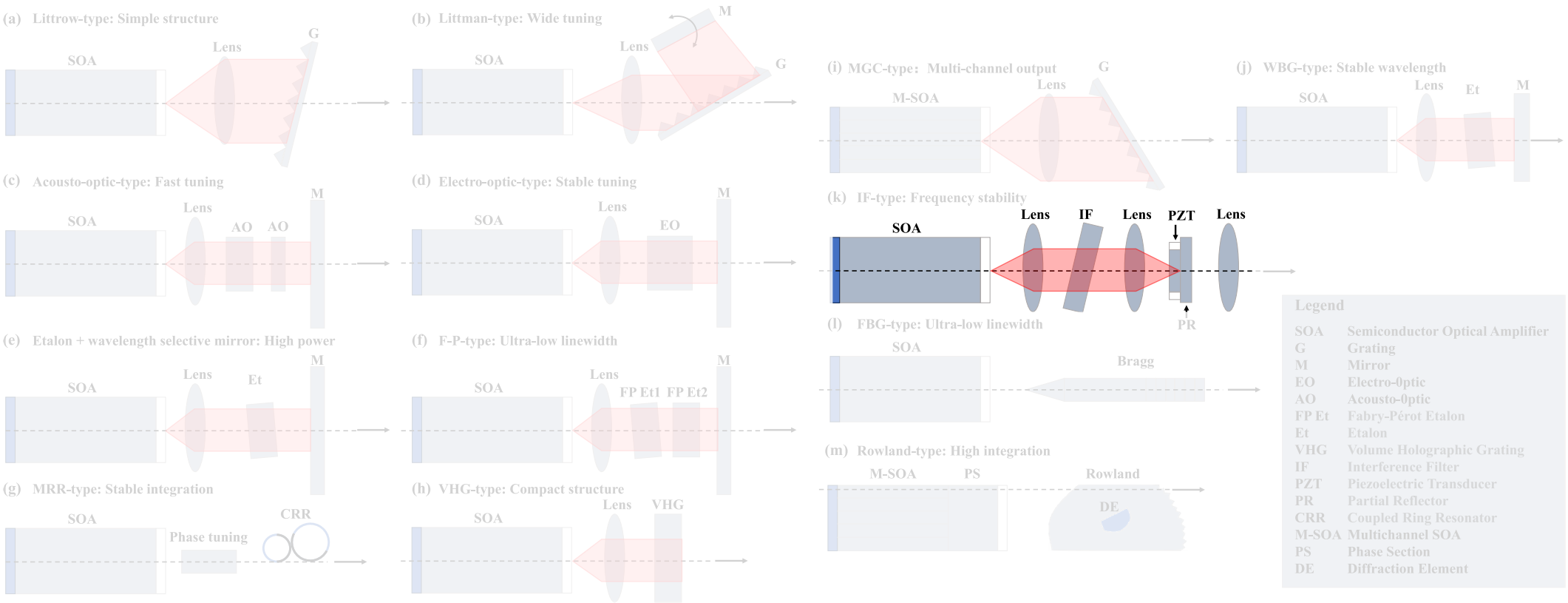
ECDL : **E**xtended **C**avity **D**iode **L**aser

ECDL : bestiaire récent[1]



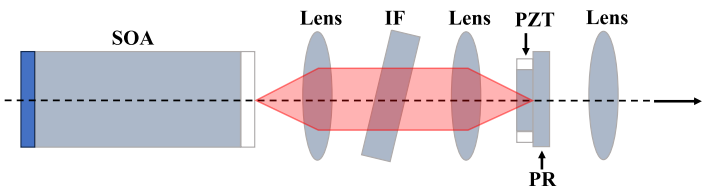
[1]d'après Pan 2025 ; DOI:10.1002/lpor.202502256

ECDL : bestiaire récent[1]

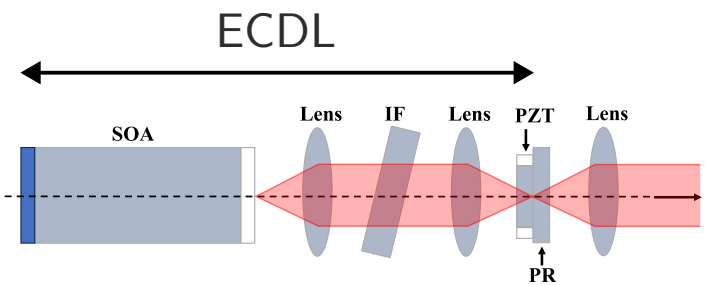


[1]d'après Pan 2025 ; DOI:10.1002/lpor.202502256

ECDL *œil de chat* simplifiée

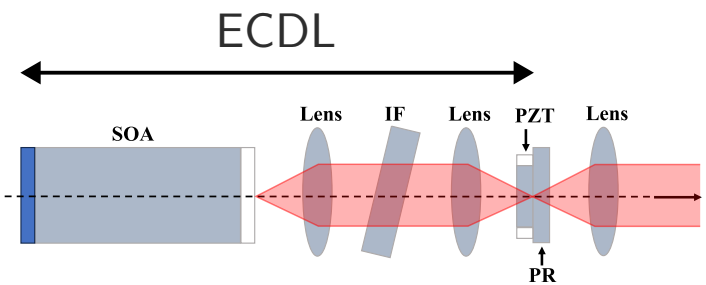


ECDL *œil de chat* simplifiée



Bonne stabilité mécanique (relation objet-image)

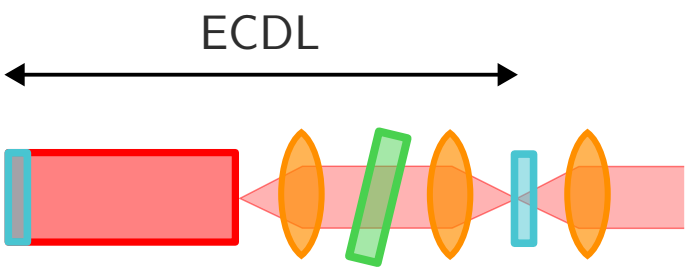
ECDL *œil de chat* simplifiée



Bonne stabilité mécanique (relation objet-image)

Plus simple & plus compacte?

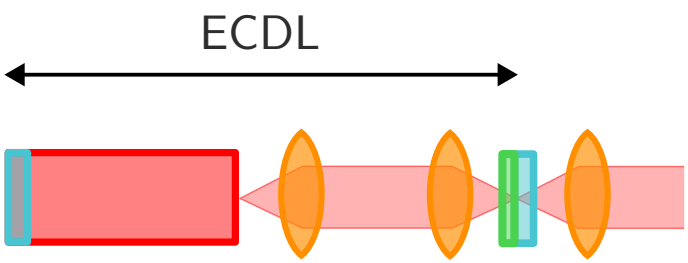
ECDL *œil de chat* simplifiée



Bonne stabilité mécanique (relation objet-image)

Plus simple & plus compacte?

ECDL *œil de chat* simplifiée

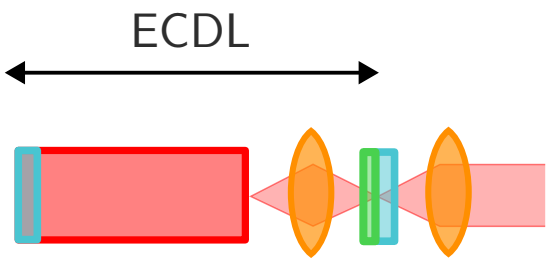


Bonne stabilité mécanique (relation objet-image)

Plus simple & plus compacte?

Intégrer filtre et réflecteur

ECDL *œil de chat* simplifiée



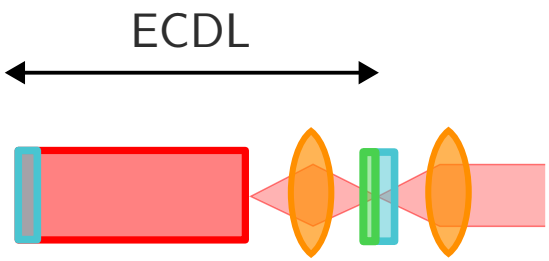
Bonne stabilité mécanique (relation objet-image)

Plus simple & plus compacte?

Intégrer filtre et réflecteur

ECDL : Gain+Lentille+Filtre

ECDL *œil de chat* simplifiée



Bonne stabilité mécanique (relation objet-image)

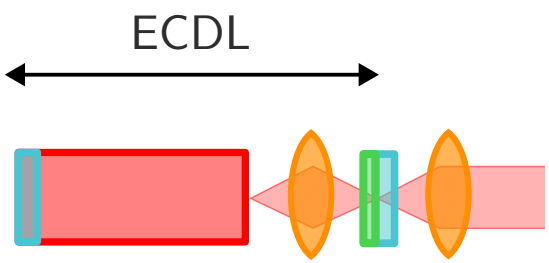
Plus simple & plus compacte?

Intégrer filtre et réflecteur

ECDL : Gain+Lentille+Filtre

Filtre spectral: spectralement fin & angulairement tolérant ?

ECDL *œil de chat* simplifiée



Bonne stabilité mécanique (relation objet-image)

Plus simple & plus compacte?

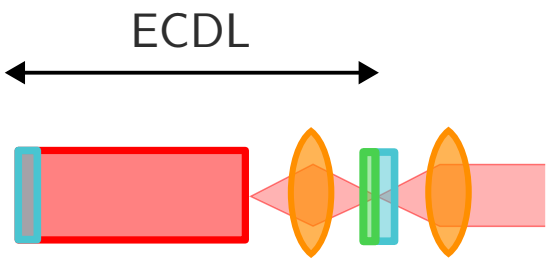
Intégrer filtre et réflecteur

ECDL : Gain+Lentille+Filtre

Filtre spectral: spectralement fin & angulairement tolérant ?

~~réseaux , étalons, VBG, GMRFs, etc ...~~

ECDL *œil de chat* simplifiée



Bonne stabilité mécanique (relation objet-image)

Plus simple & plus compacte?

Intégrer filtre et réflecteur

ECDL : Gain+Lentille+Filtre

Filtre spectral: spectralement fin & angulairement tolérant ?

~~réseaux , étalons, VBG, GMRFs, etc ...~~

Heureusement qu'il y a les **CRIGFs**

CRIGFs: kézako?

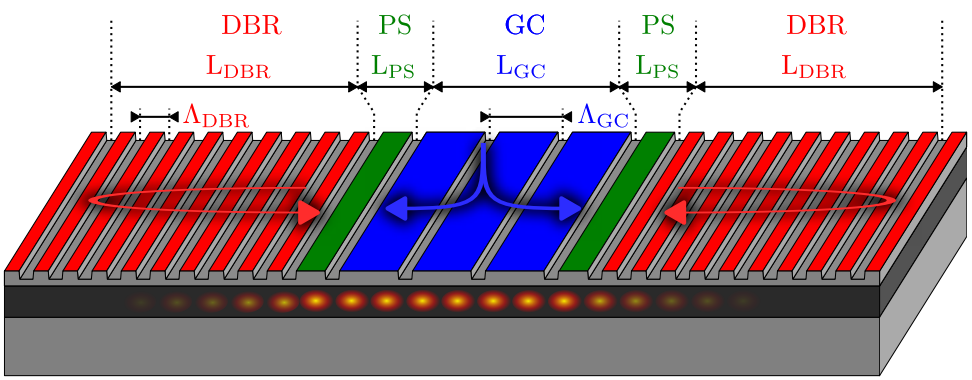
CRIGFs: kézako?

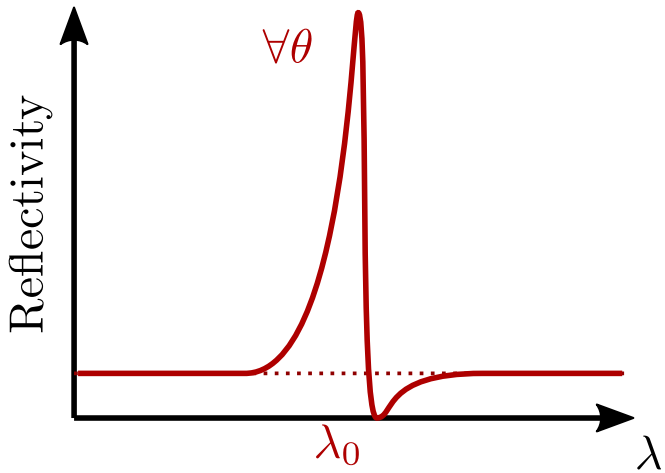
Cavity Resonator Integrated Grating Filters[1]

[1] S. Ura 2012; doi: 10.1364/OE.20.001444

CRIGFs: kézako?

Cavity Resonator Integrated Grating Filters[1]

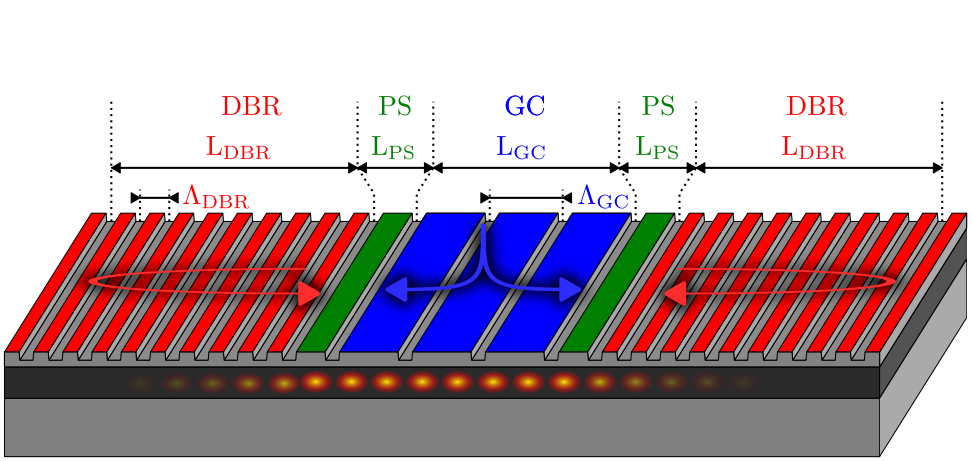


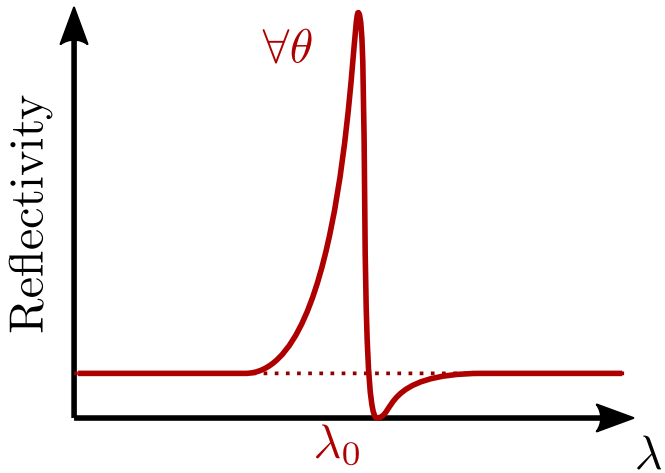


[1] S. Ura 2012; doi: 10.1364/OE.20.001444

CRIGFs: kézako?

Cavity Resonator Integrated Grating Filters[1]



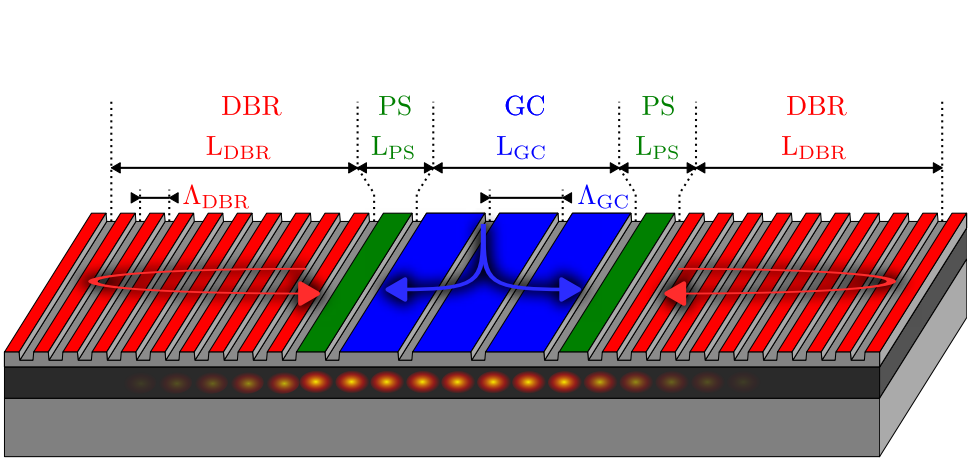


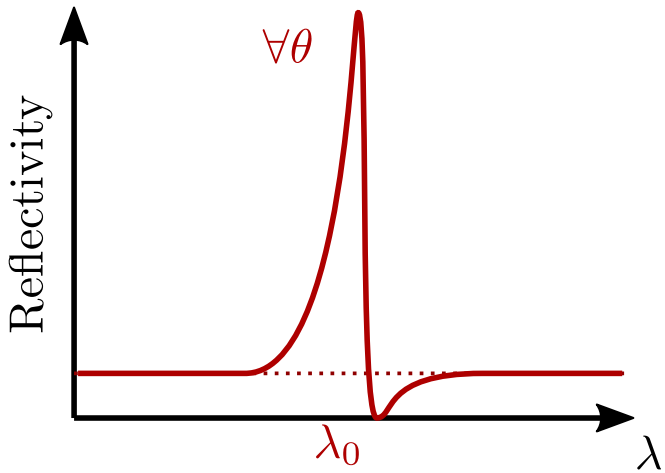
Savant mélange d'optique guidée et d'optique en espace libre

[1] S. Ura 2012; doi: 10.1364/OE.20.001444

CRIGFs: kézako?

Cavity Resonator Integrated Grating Filters[1]



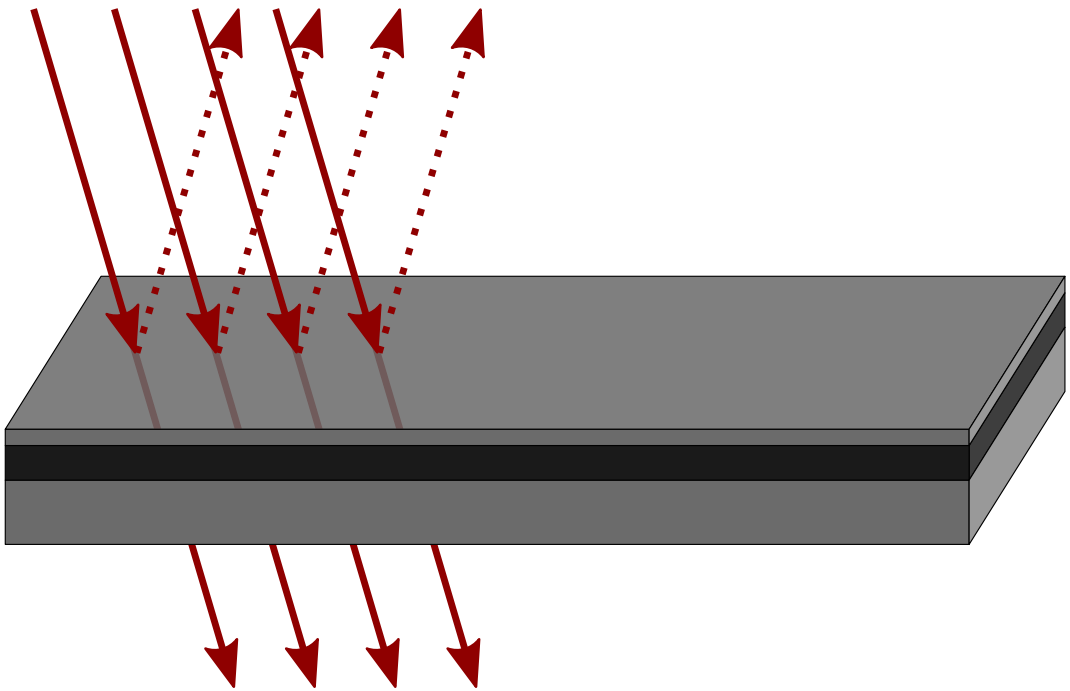


Savant mélange d'optique guidée et d'optique en espace libre

Réseaux résonants (GMRFs : Guided Mode Resonant Filters) en cavité

[1]S. Ura 2012; doi: 10.1364/OE.20.001444

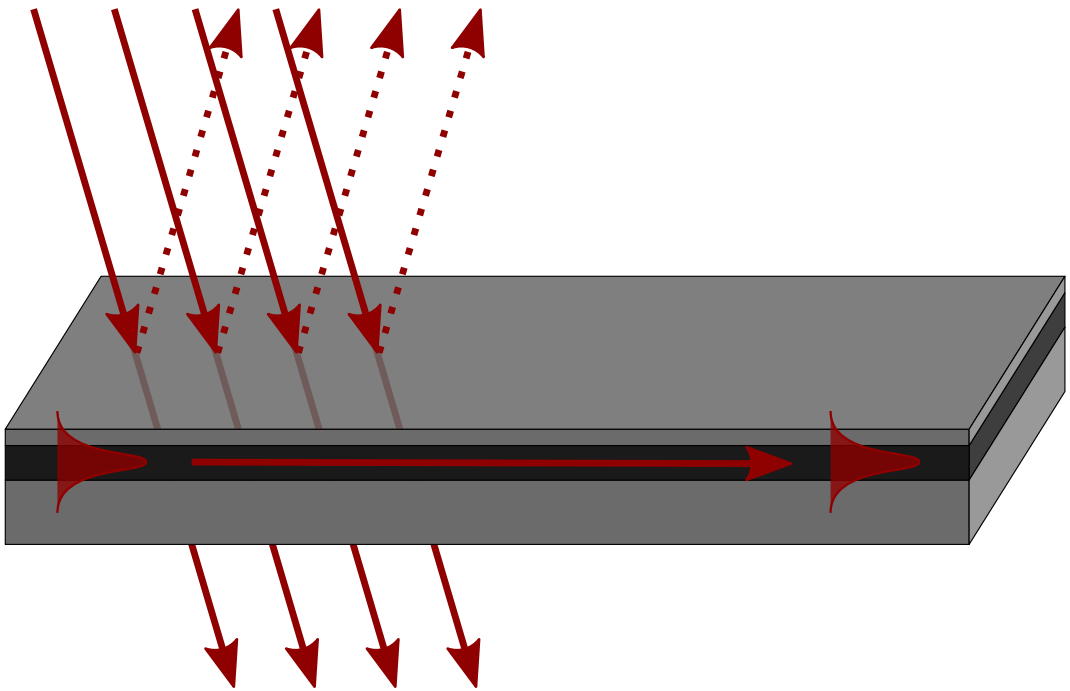
GMRFs : filtres spectraux fins & accordables





Empilement multicouche: antireflet

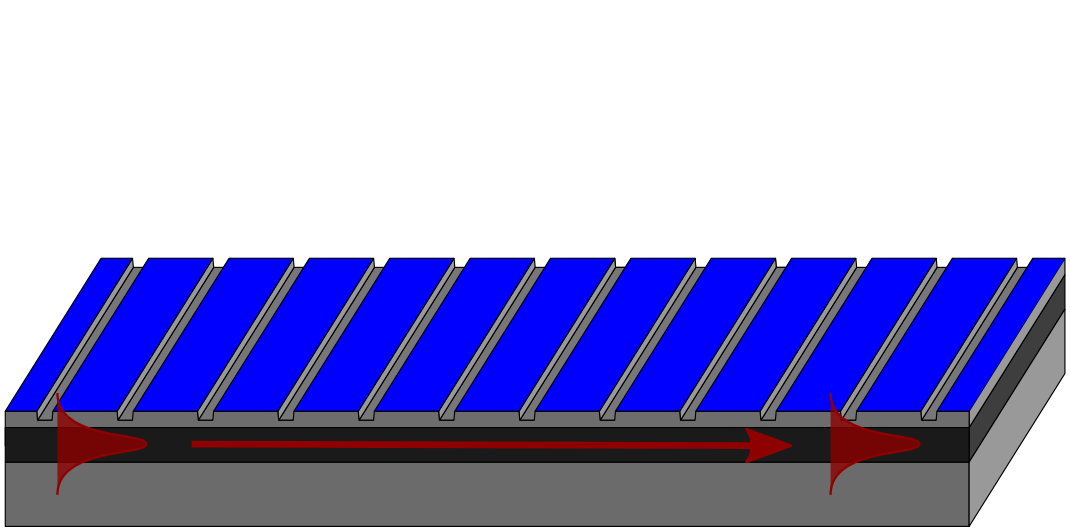
GMRFs : filtres spectraux fins & accordables





Empilement multicouche: antireflet & guide d'onde monomode (n_{eff})

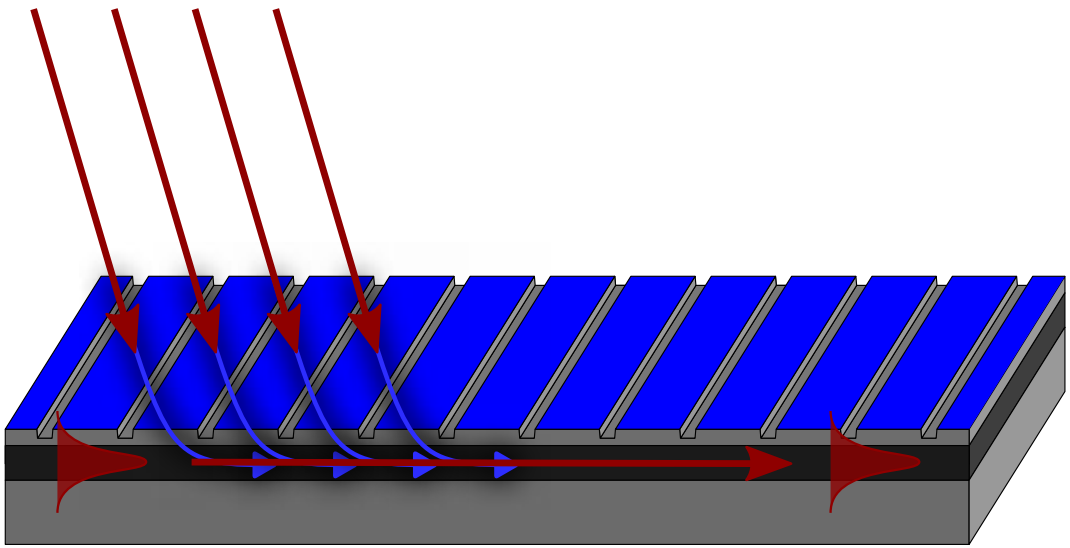
GMRFs : filtres spectraux fins & accordables





Réseau de couplage (Λ_{GC})

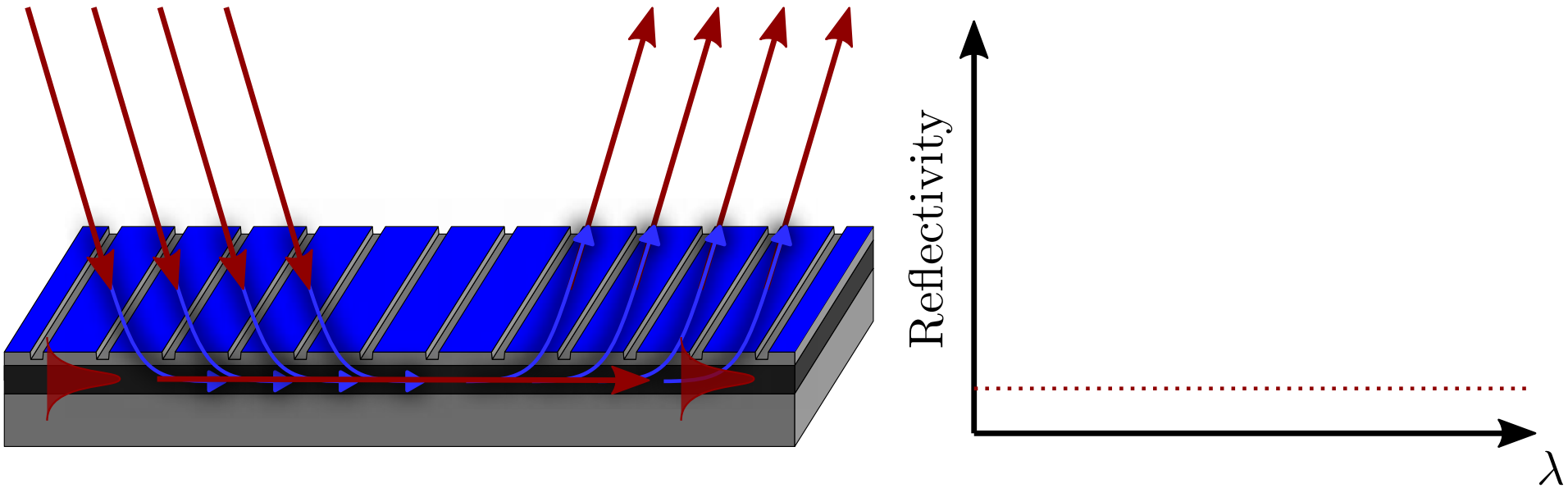
GMRFs : filtres spectraux fins & accordables





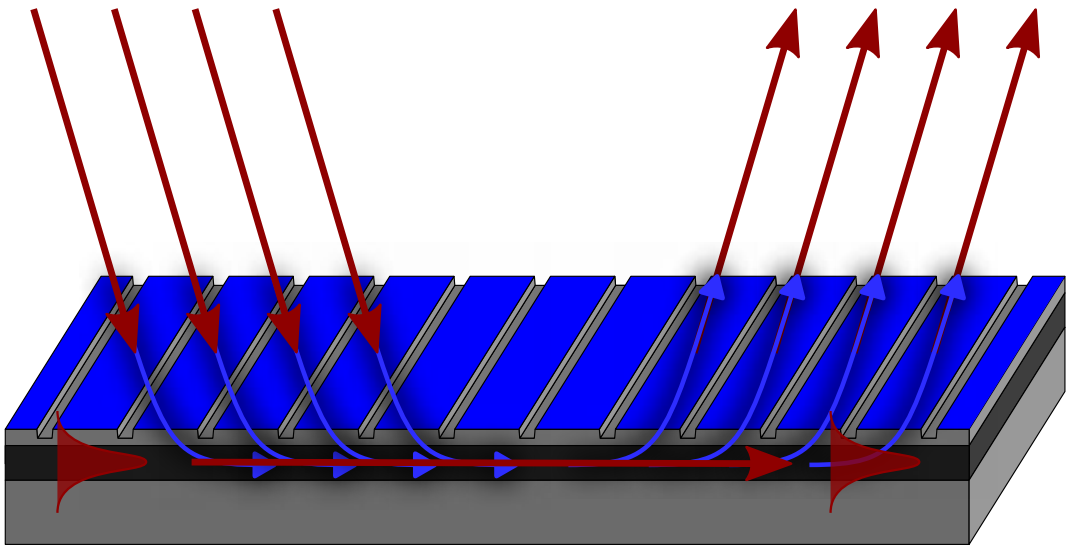
Réseau de couplage de l'incident

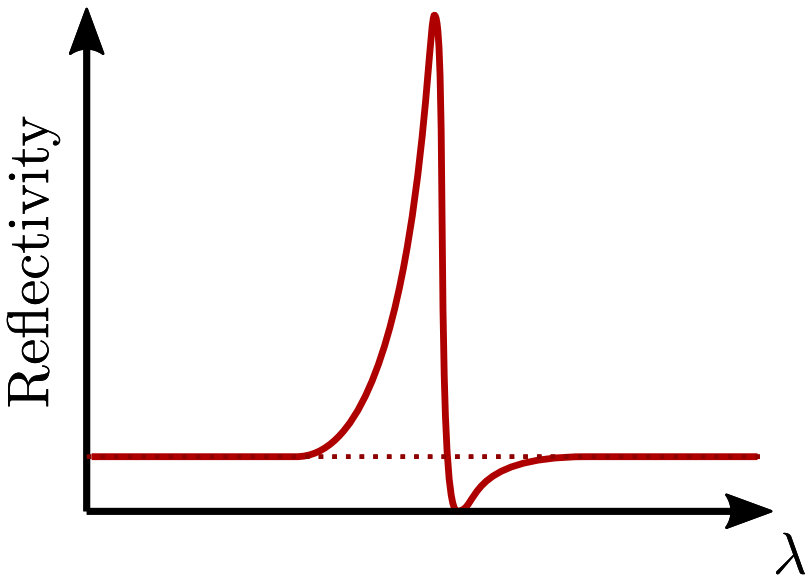
GMRFs : filtres spectraux fins & accordables



Réseau de couplage de l'incident et de découplage vers le spéculaire

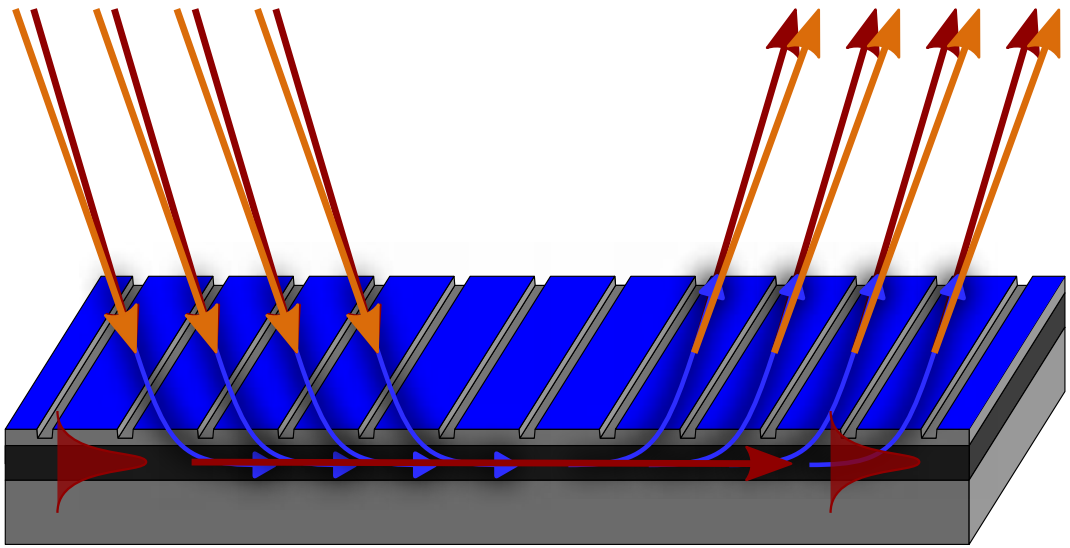
GMRFs : filtres spectraux fins & accordables

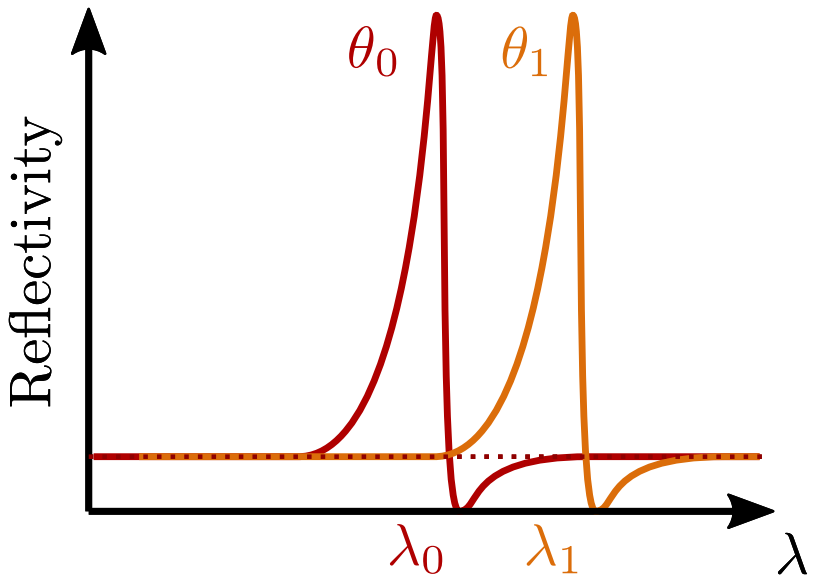




Spectre résonant étroit (résonance de Fano)

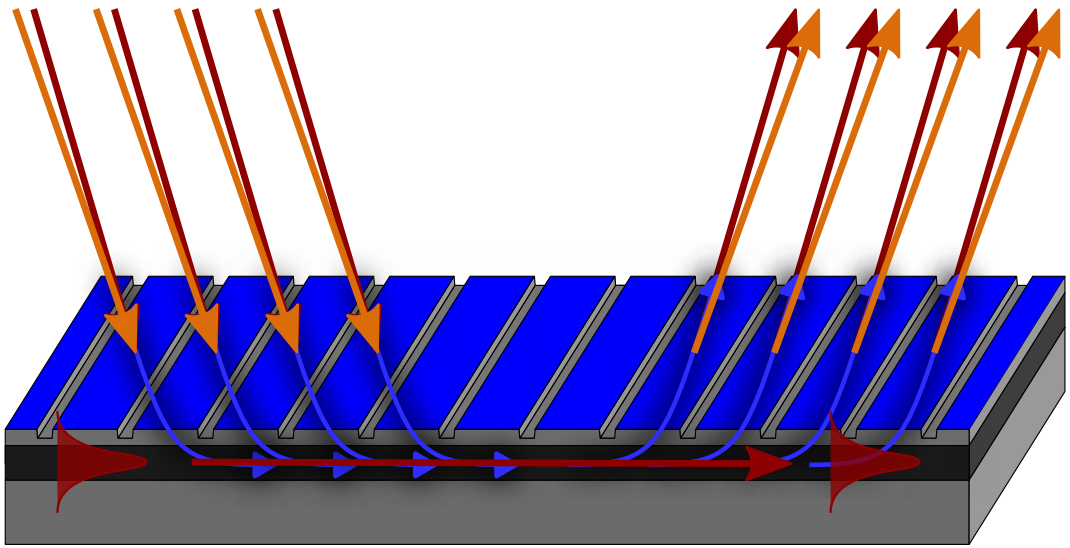
GMRFs : filtres spectraux fins & accordables

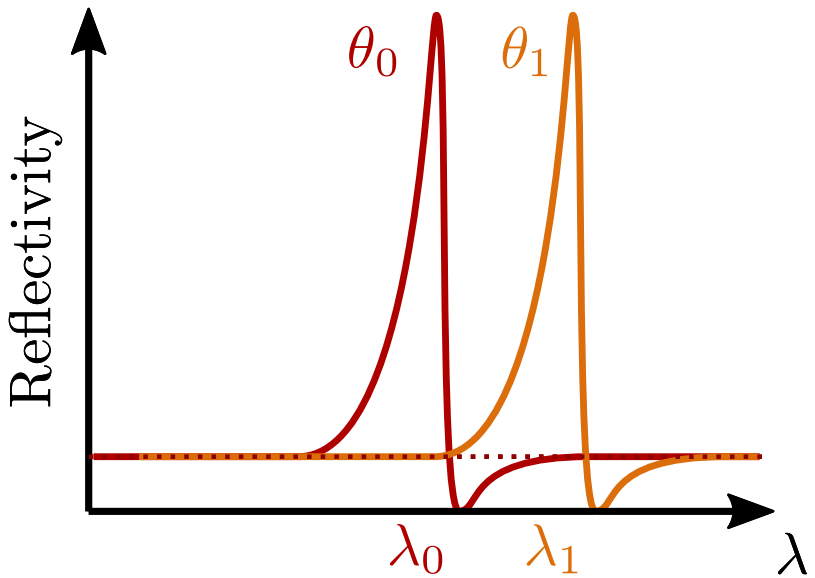




Extrêmement sensible à l'angle d'incidence $\theta(\lambda) = \arcsin\left(n_{\text{eff}}(\lambda) - \frac{\lambda}{\Lambda_{\text{GC}}}\right)$

GMRFs : filtres spectraux fins & accordables

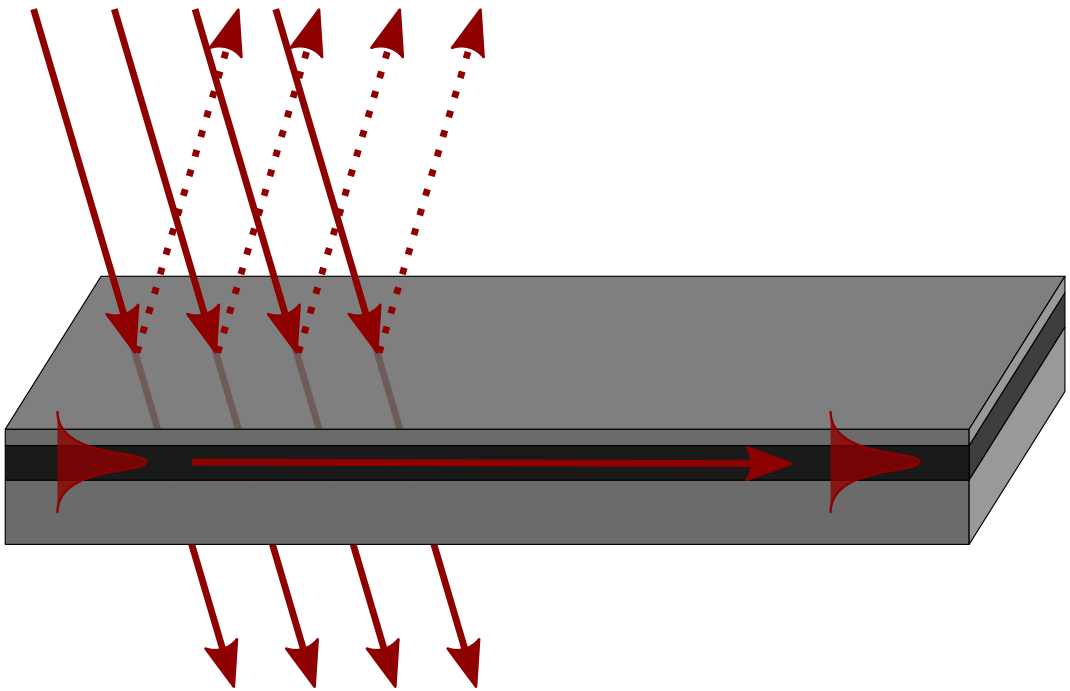




Extrêmement sensible à l'angle d'incidence $\theta(\lambda) = \arcsin\left(n_{\text{eff}}(\lambda) - \frac{\lambda}{\Lambda_{\text{GC}}}\right)$

Nécessite un faisceau incident parfaitement collimaté de grand diamètre

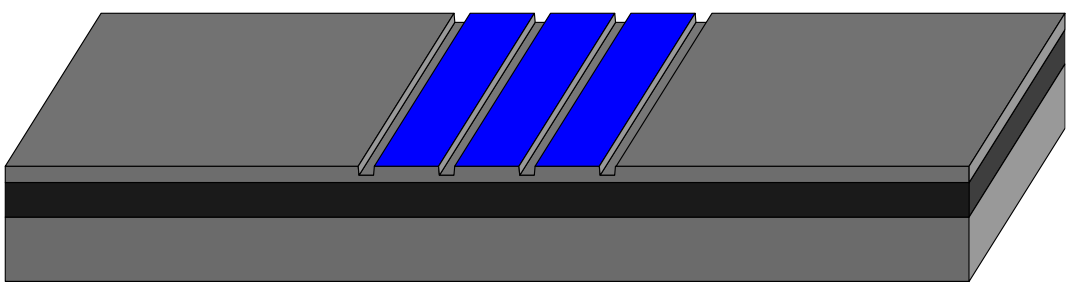
CRIGFs : filtres spectraux fins & miniatures





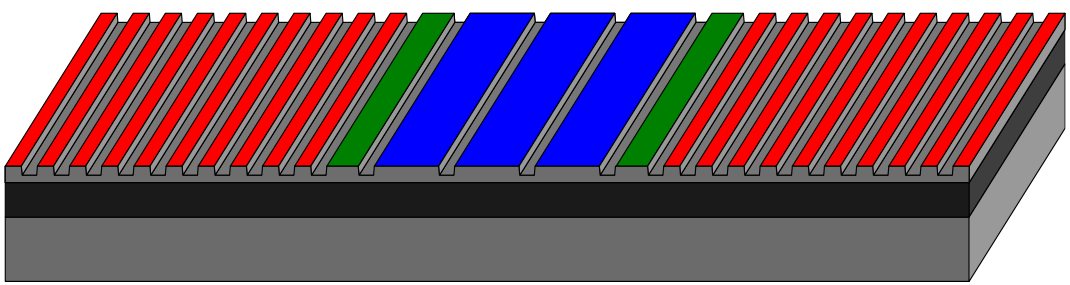
Empilement multicouche: antireflet & guide d'onde monomode

CRIGFs : filtres spectraux fins & miniatures



Petit réseau de couplage localisé (GC, quelques λ)

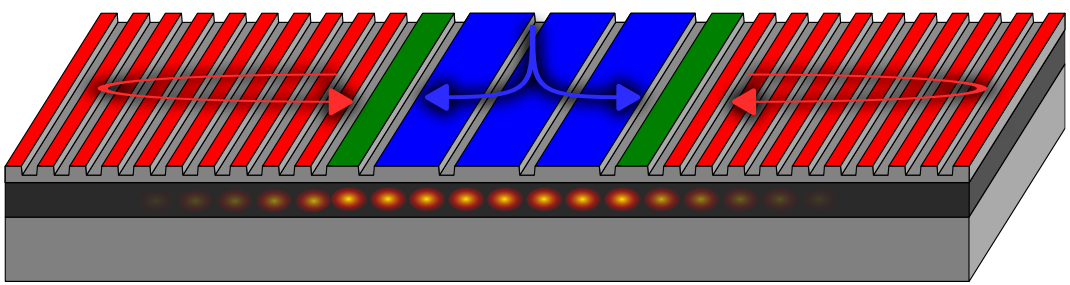
CRIGFs : filtres spectraux fins & miniatures



Petit réseau de couplage localisé (GC, quelques λ)

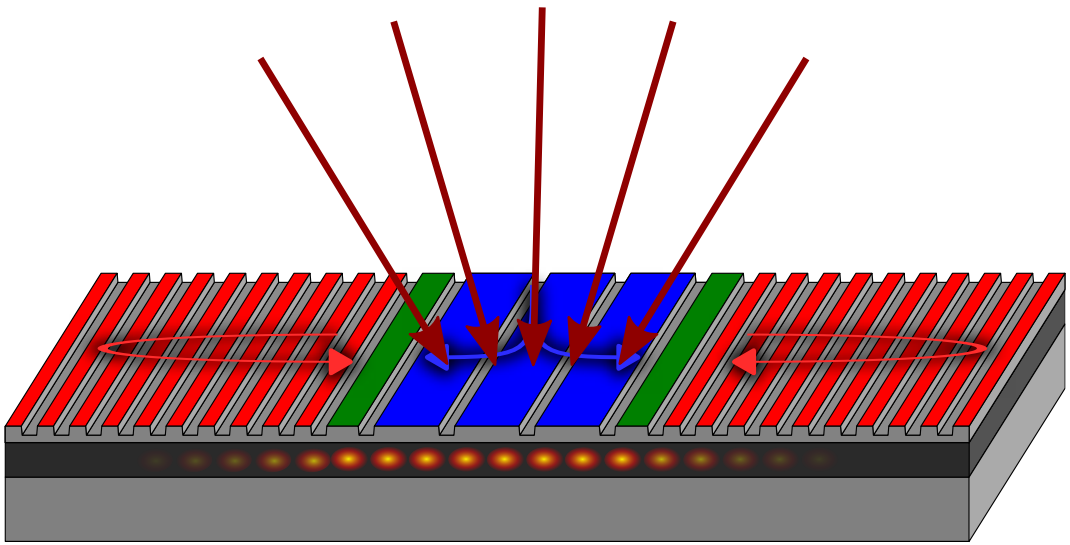
Dans une cavité Fabry-Pérot: miroirs DBR & phase-shift PS

CRIGFs : filtres spectraux fins & miniatures



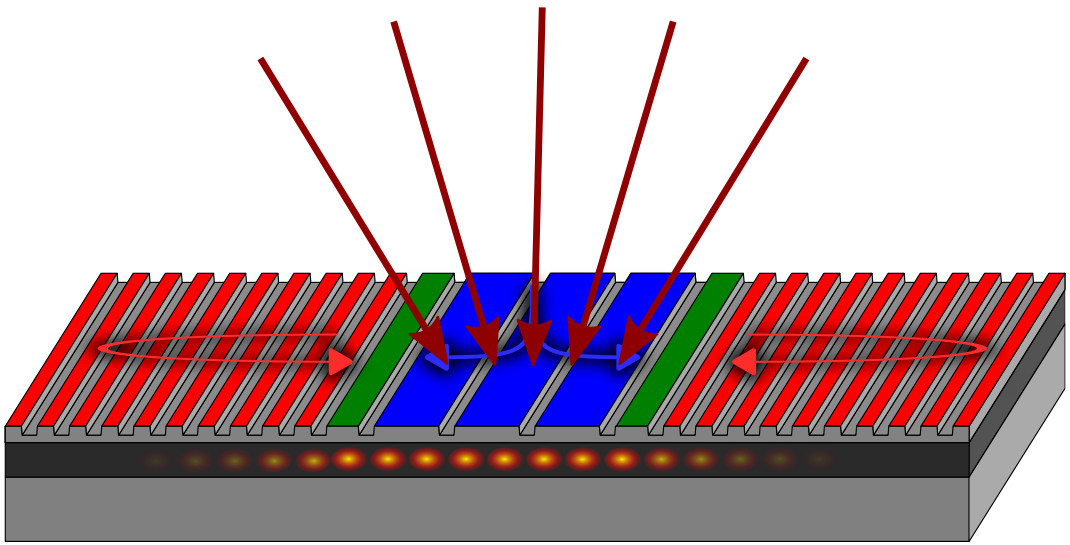
Mode résonant stationnaire, localisé, couplé aux faisceaux incidents

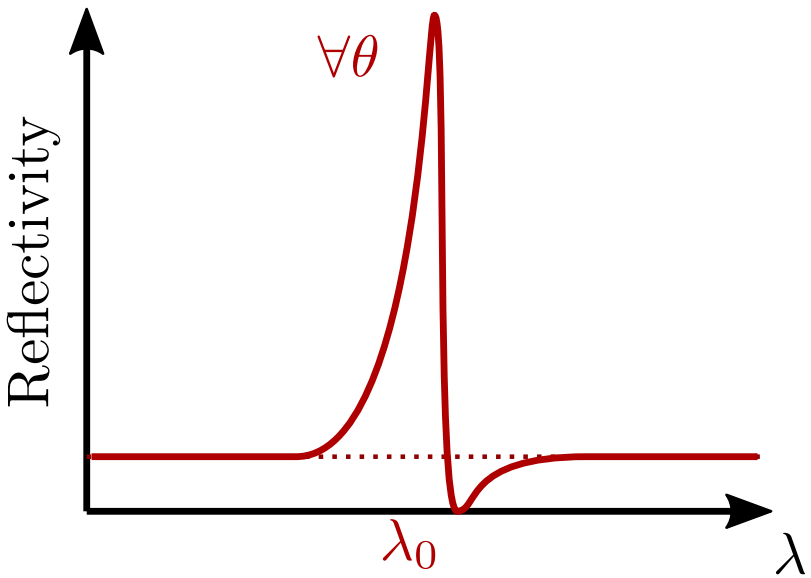
CRIGFs : filtres spectraux fins & miniatures



Faisceau incident focalisé (taille $\simeq$ GC)

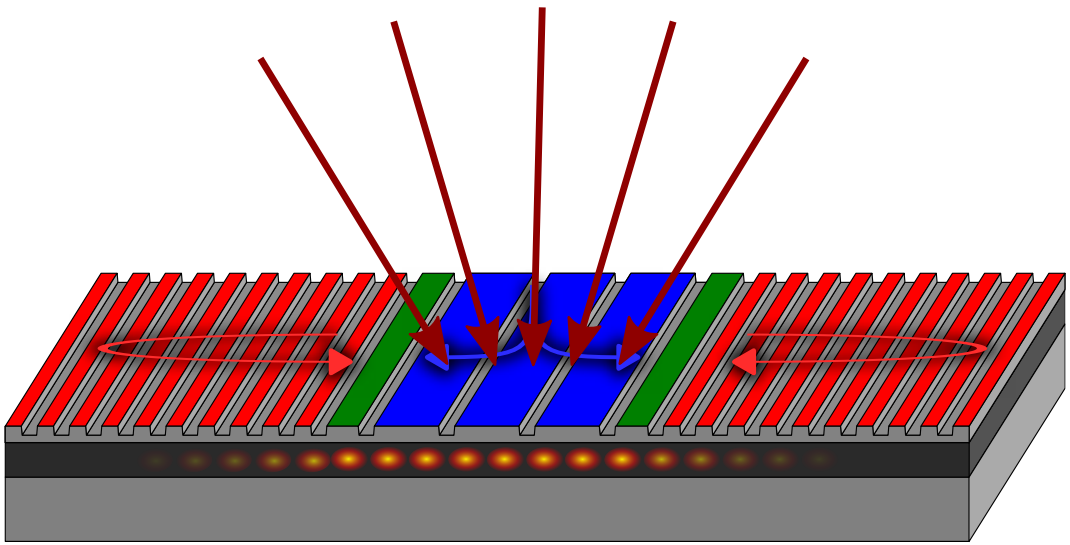
CRIGFs : filtres spectraux fins & miniatures

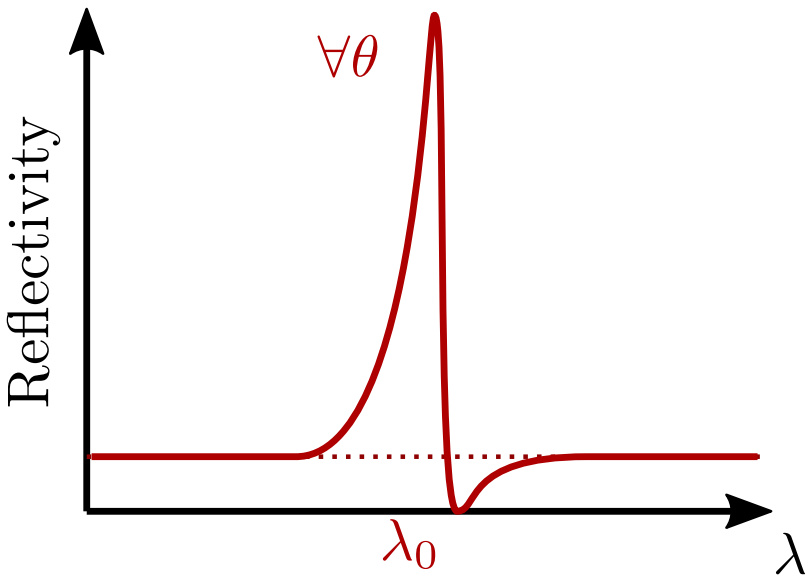




Spectre résonant étroit

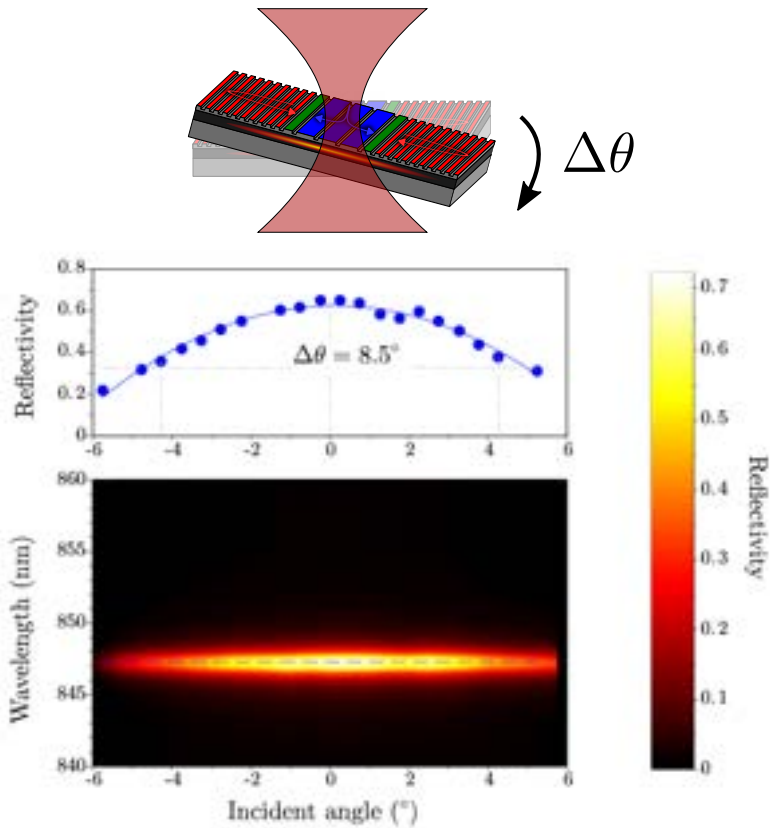
CRIGFs : filtres spectraux fins & miniatures





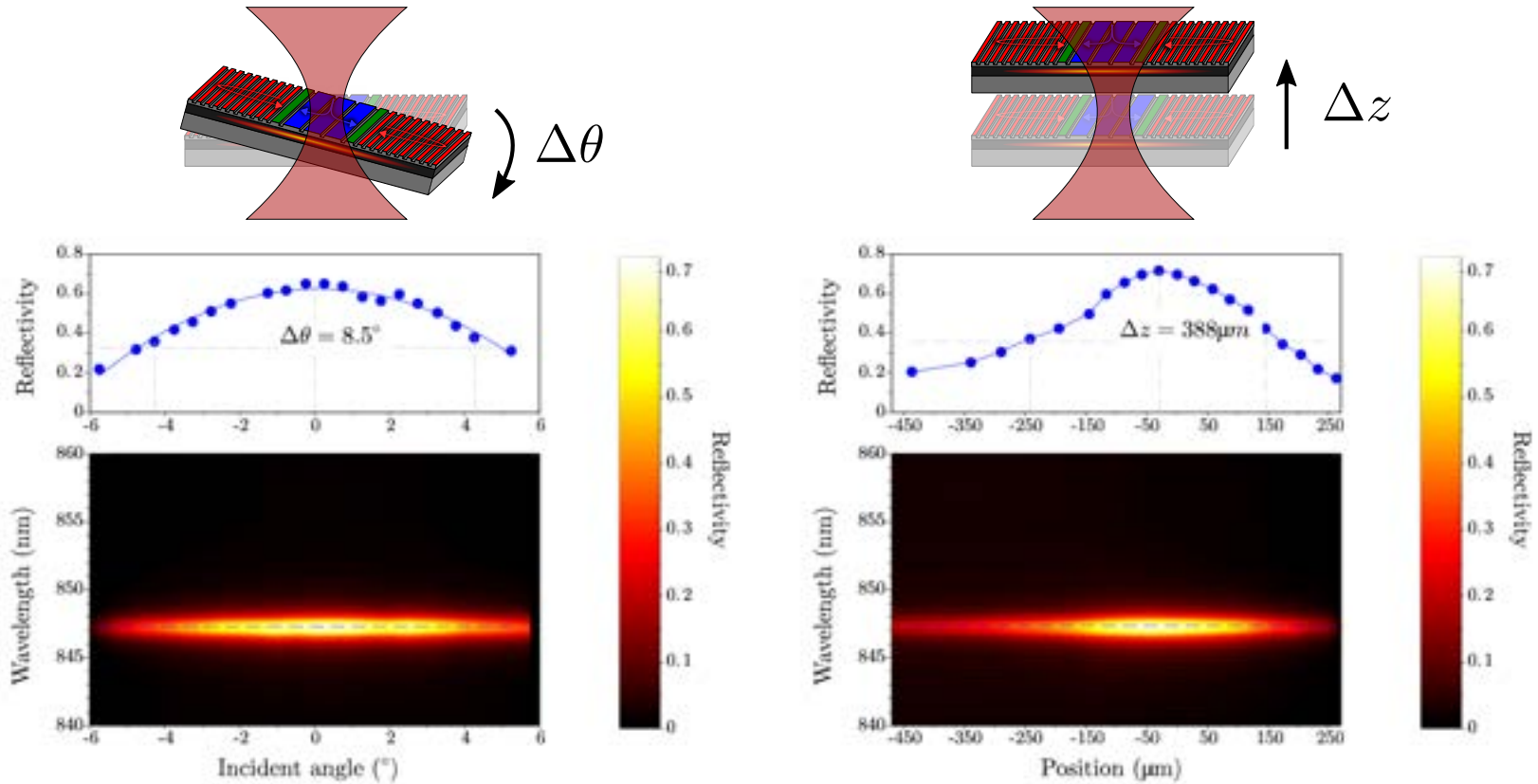
Spectre résonant étroit **insensible à l'angle d'incidence**

CRIGFs : très forte tolérance angulaire et de positionnement[1]



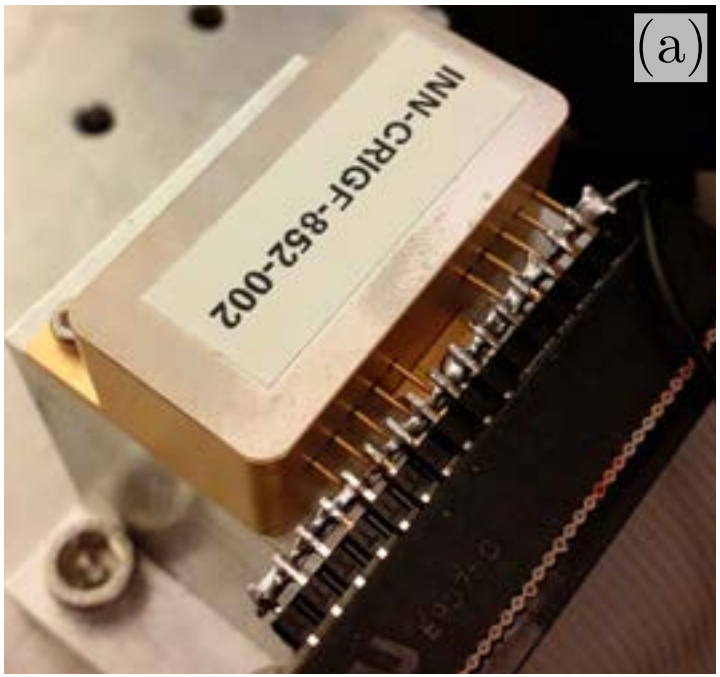
[1]Buet 2012; doi:10.1364/OE.20.009322

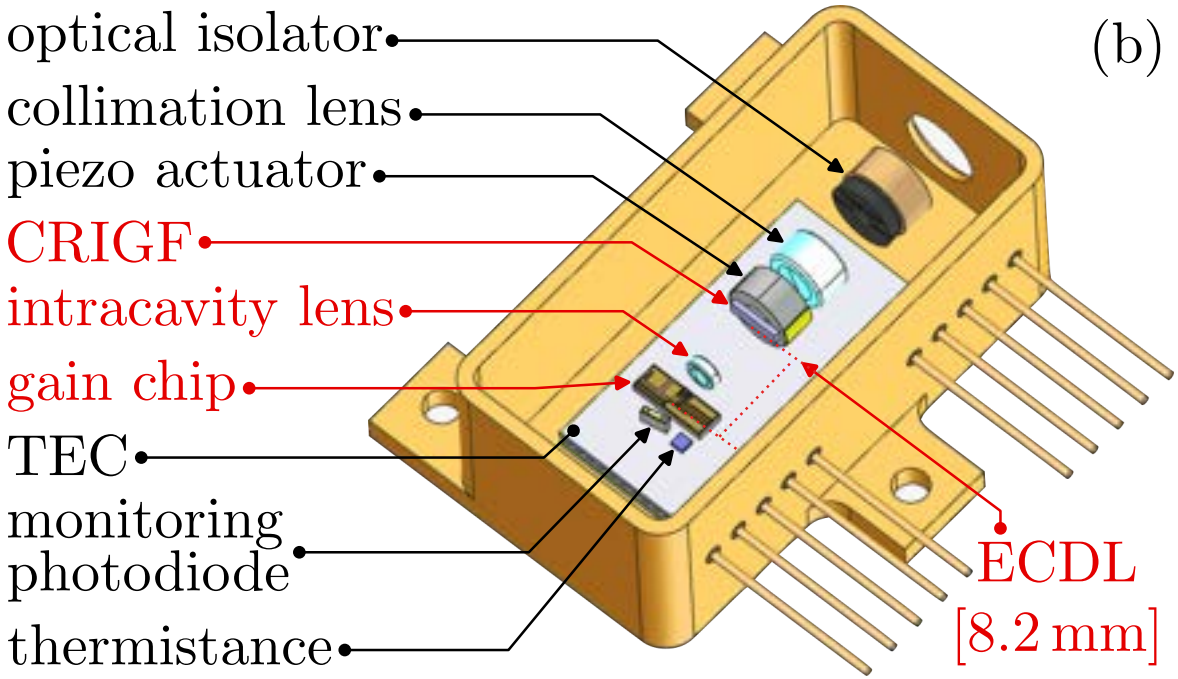
CRIGFs : très forte tolérance angulaire et de positionnement[1]



[1]Buet 2012; doi:10.1364/OE.20.009322

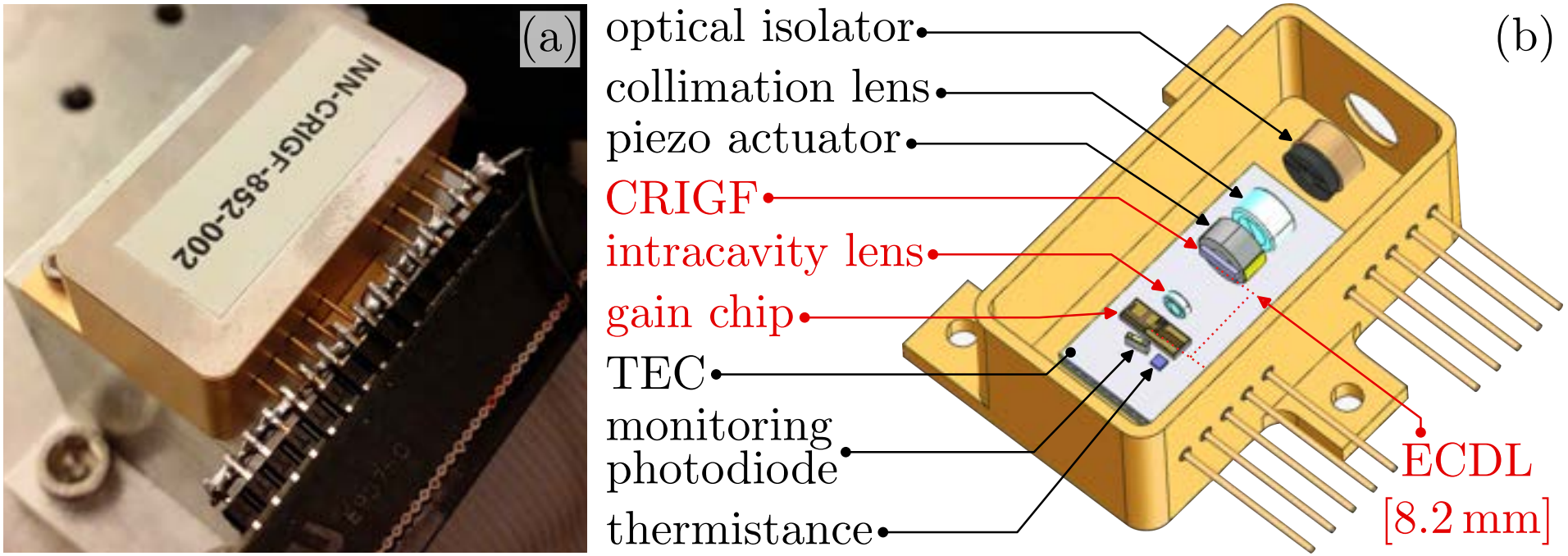
Cavité ECDL simplifiée[1] $15 \times 20 \times 40\,\mathrm{mm}^3$





[1]Projet CNES/Innoptics/LAAS

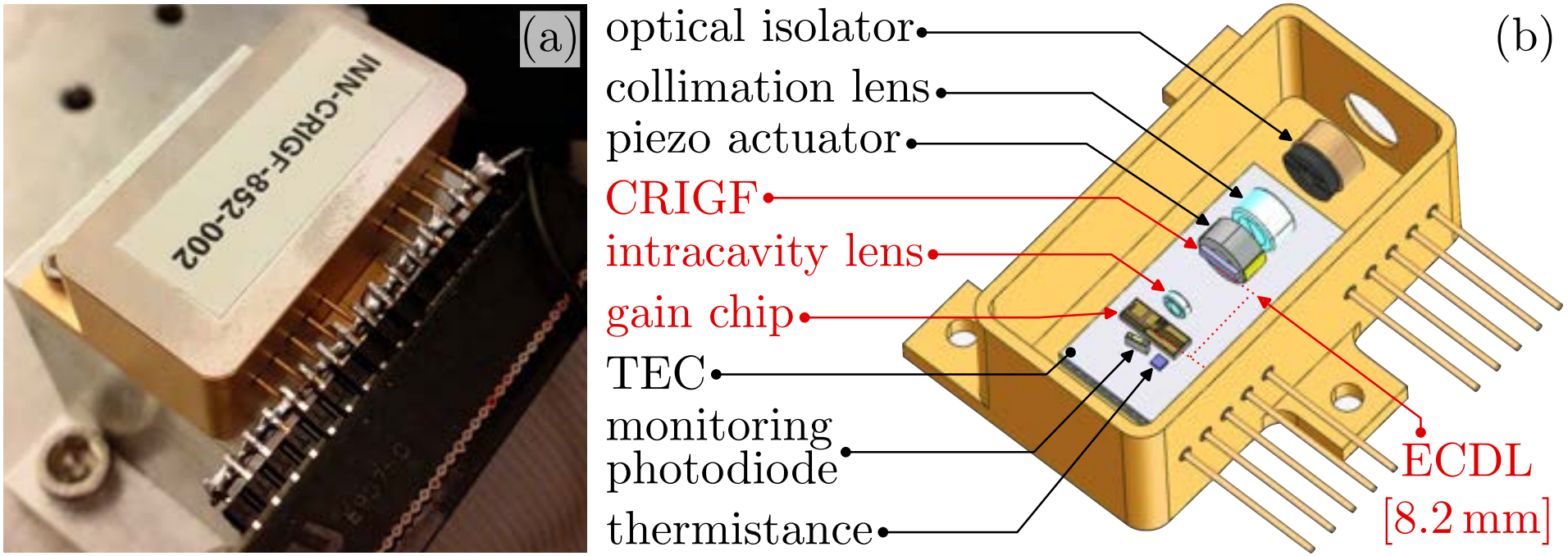
Cavité ECDL simplifiée[1] $15 \times 20 \times 40\,\mathrm{mm}^3$



$\lambda \simeq 852\,\mathrm{nm}$ [raie D2 Cesium]

[1] Projet CNES/Innoptics/LAAS

Cavité ECDL simplifiée[1] $15 \times 20 \times 40\,\mathrm{mm}^3$

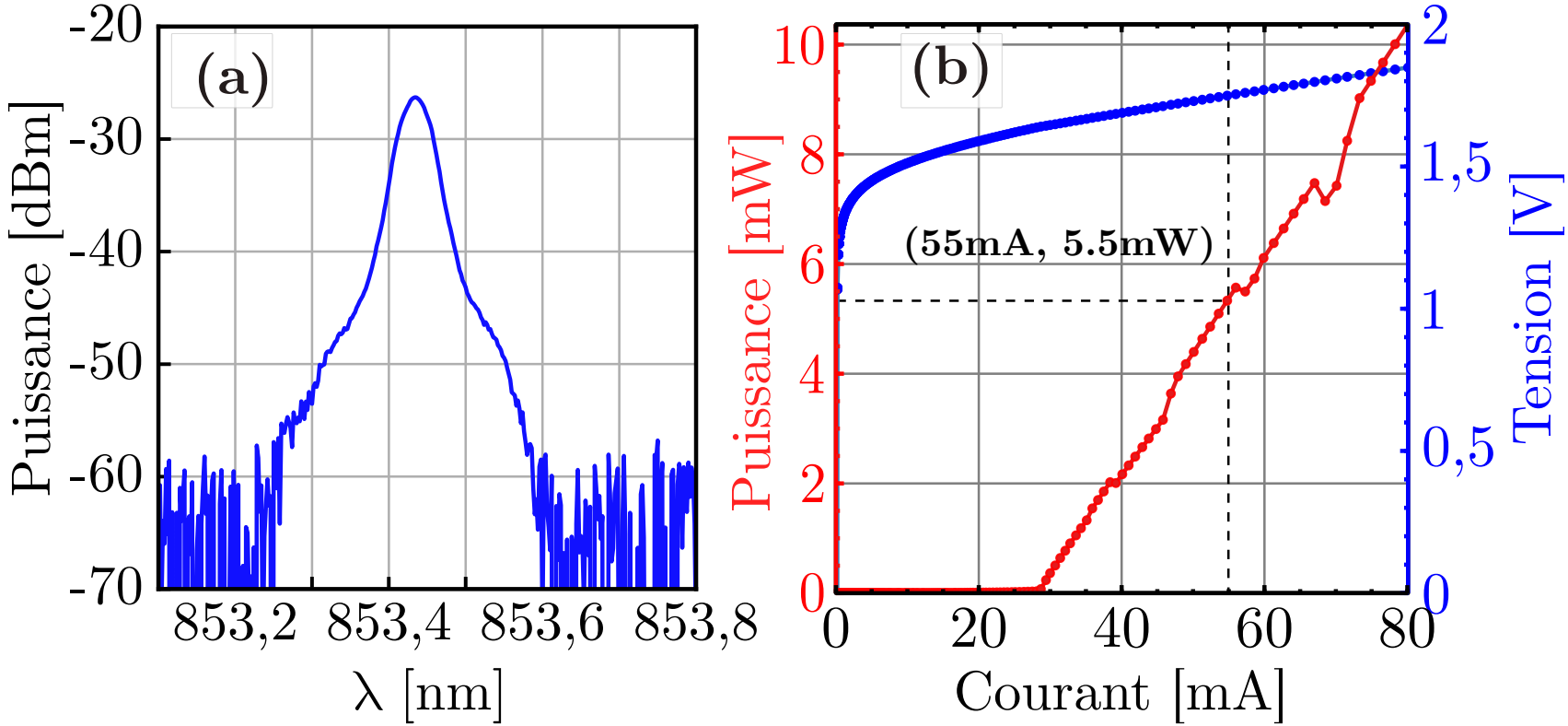


$\lambda \simeq 852\,\mathrm{nm}$ [raie D2 Cesium]

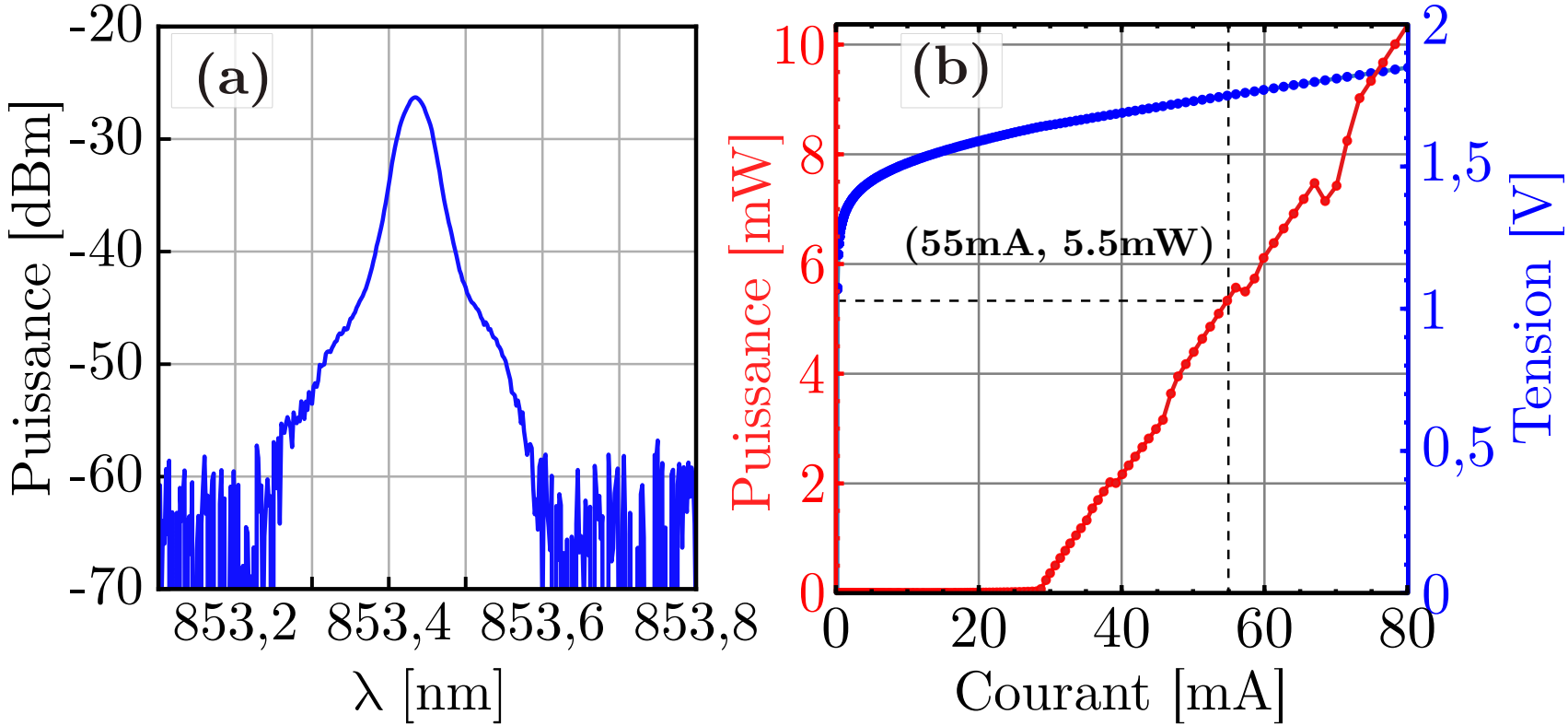
Principale limitation (taille & performance): isolateur intégré

[1] Projet CNES/Innoptics/LAAS

Cavité ECDL simplifiée: performances laser

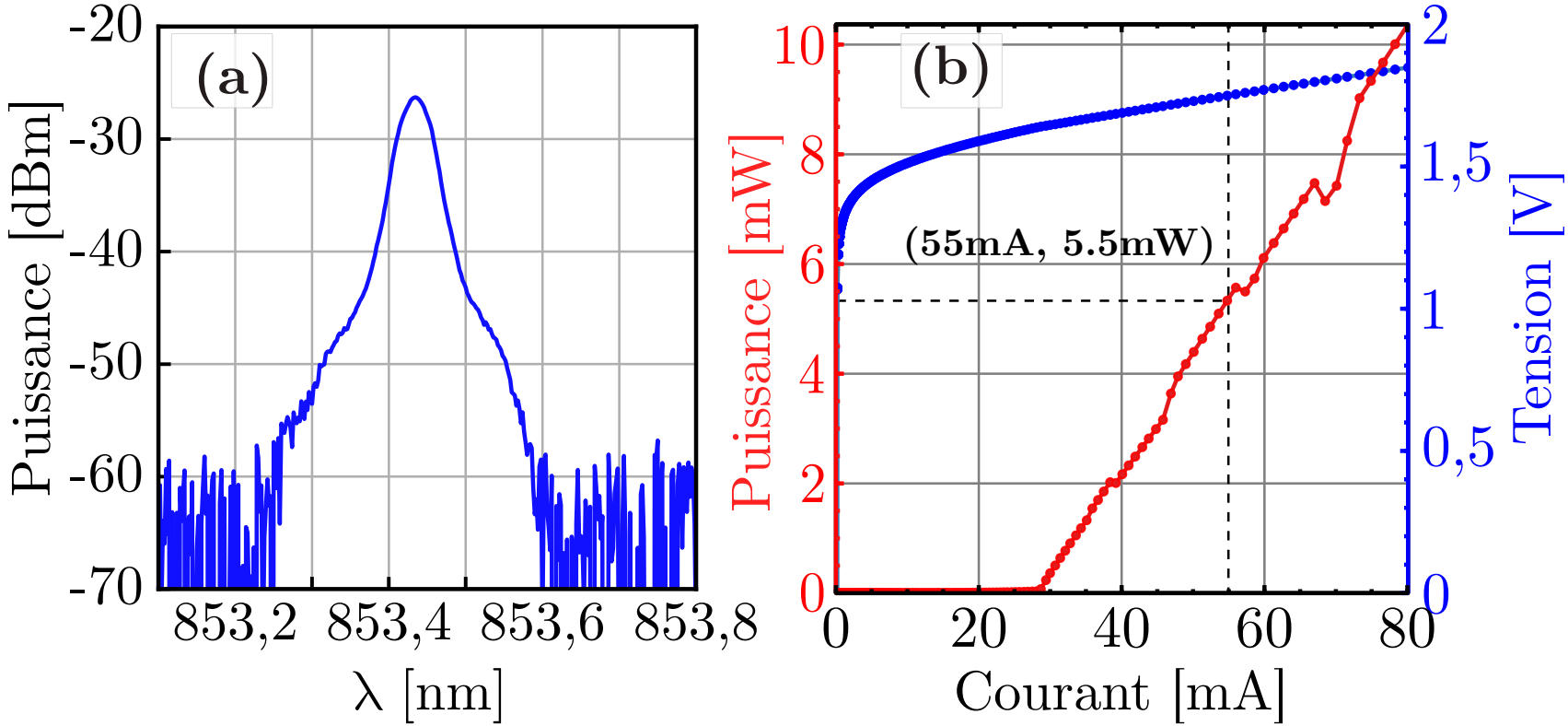


Cavité ECDL simplifiée: performances laser



$$\lambda \simeq 853{,}4 \neq 852\,\text{nm}$$

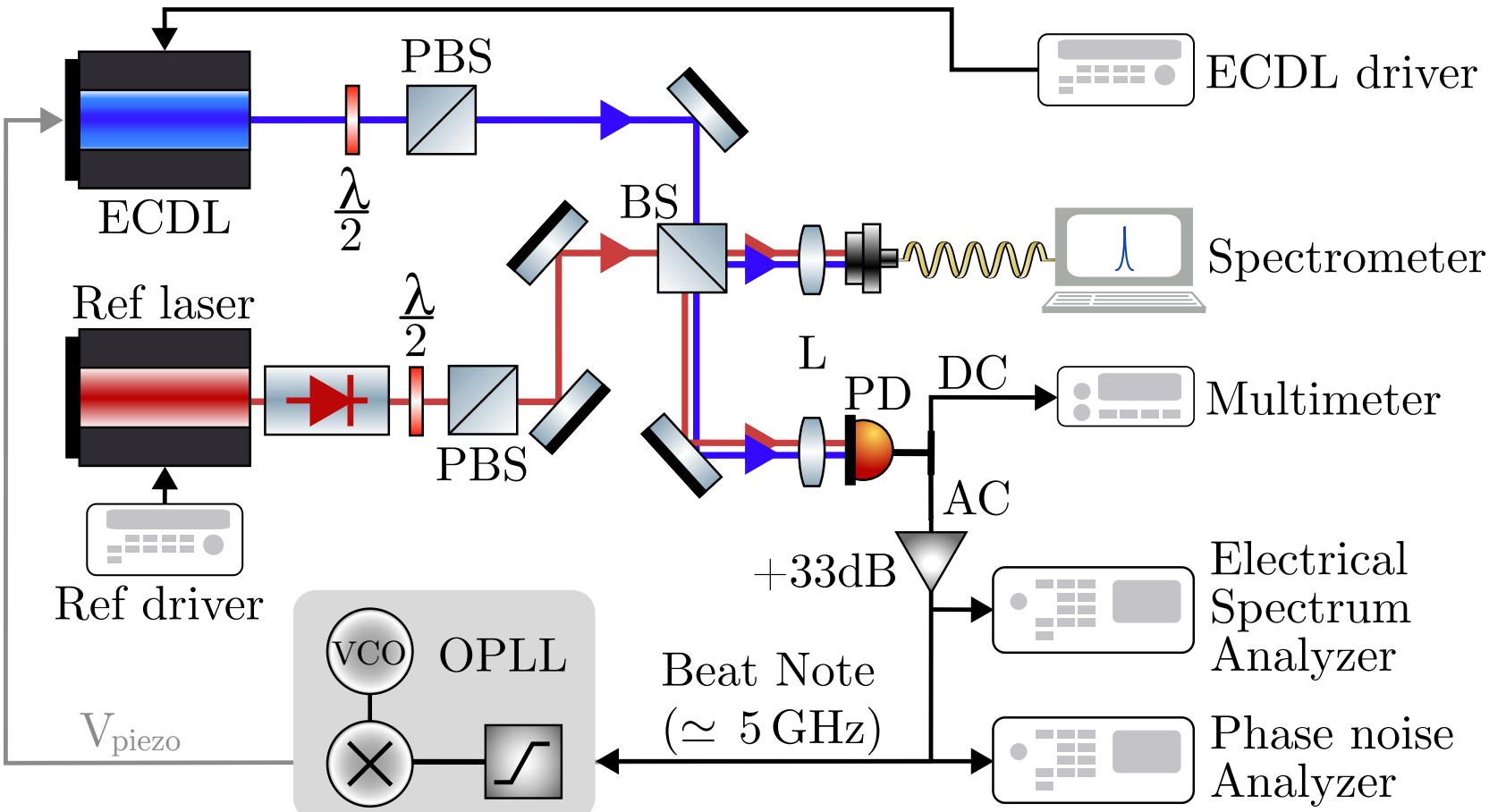
Cavité ECDL simplifiée: performances laser



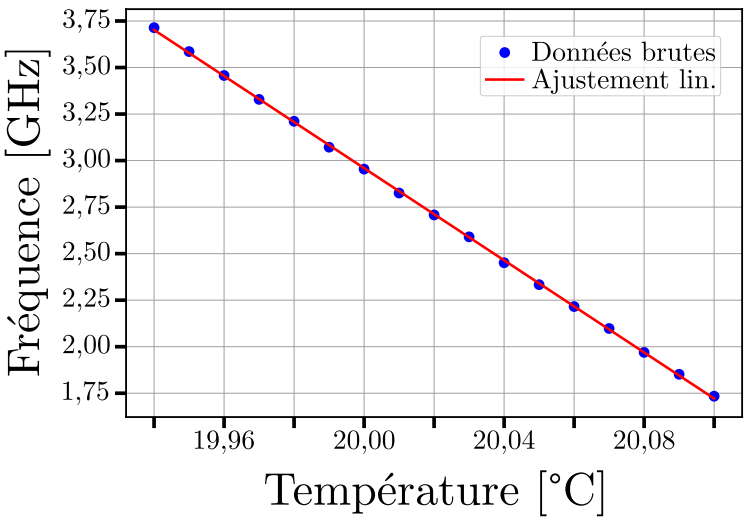
$$\lambda \simeq 853{,}4 \neq 852\,\text{nm}$$

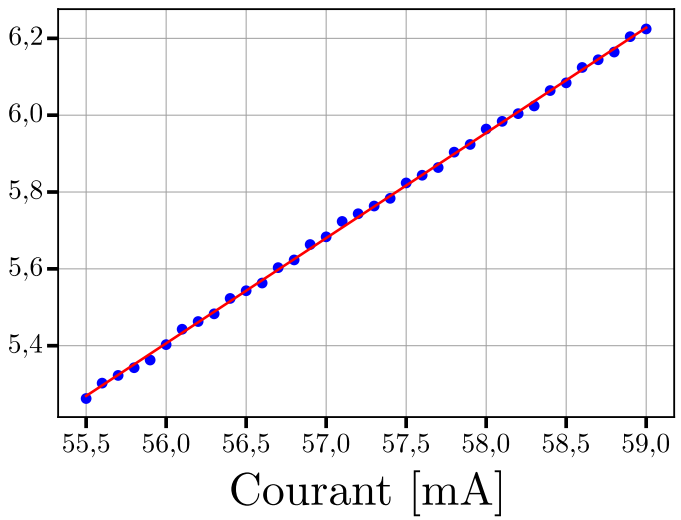
Puissance : l'isolateur miniature limite à $50 \times 0{,}24 = 12\,\text{mW}$

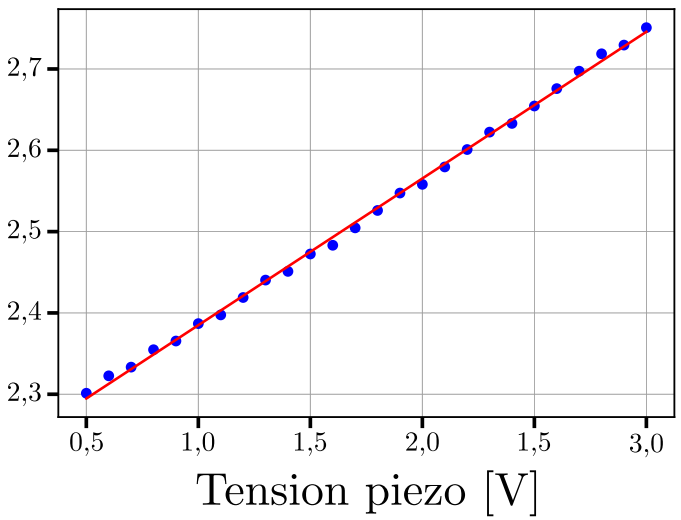
Mesure de fréquence et asservissement sur laser de référence



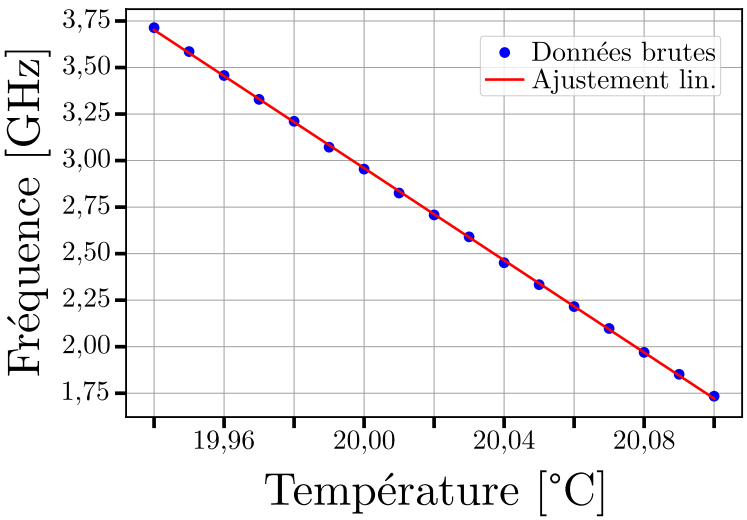
Cavité ECDL simplifiée: accordabilités typiques

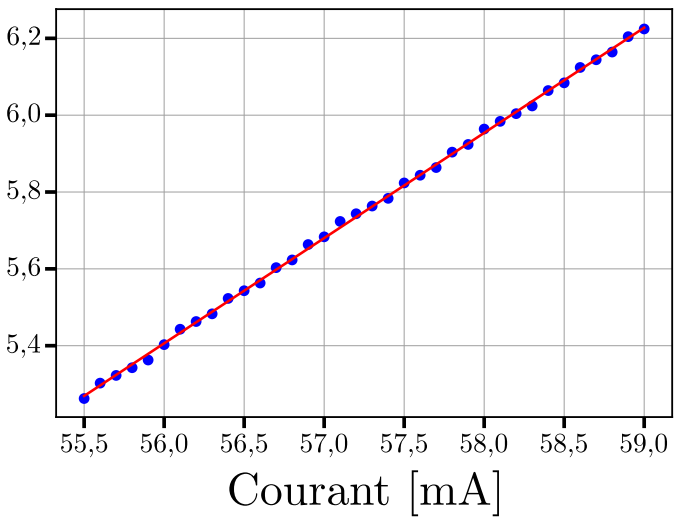


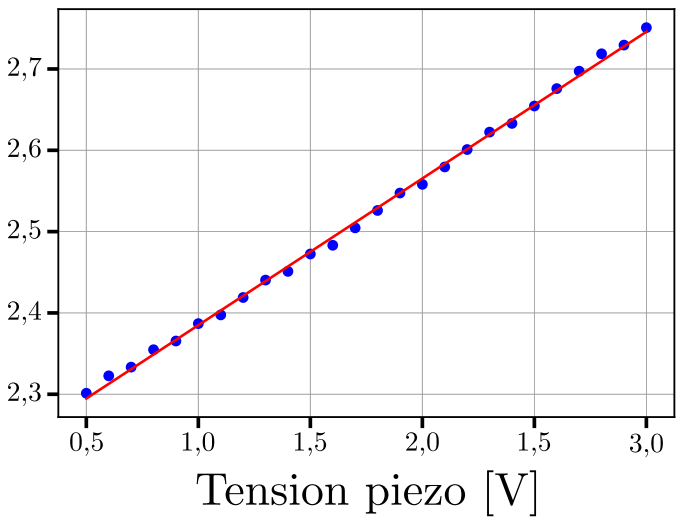




Cavité ECDL simplifiée: accordabilités typiques

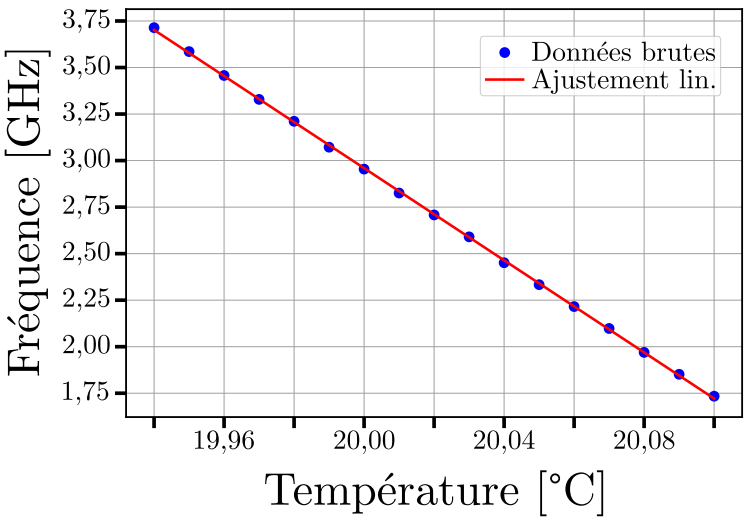


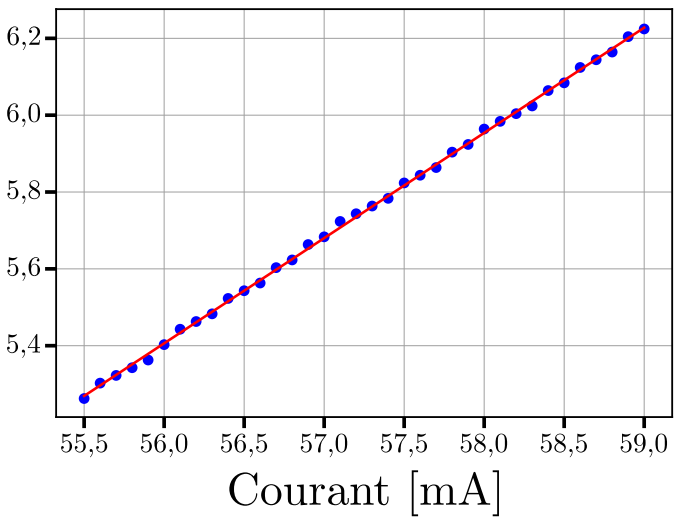


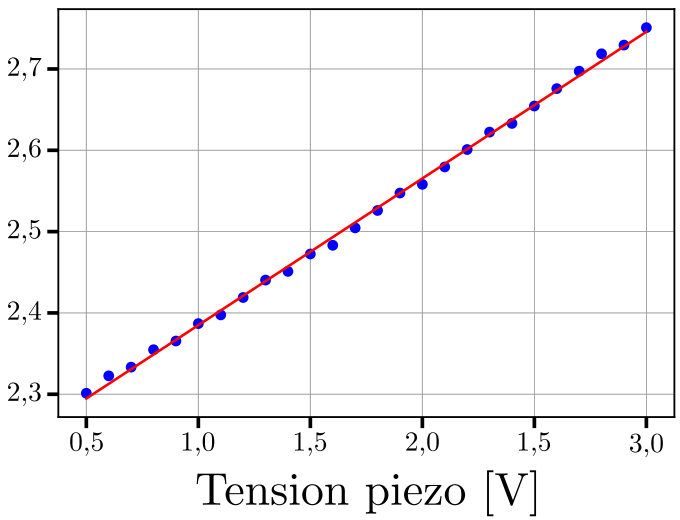


-12.4 GHz/°C

Cavité ECDL simplifiée: accordabilités typiques



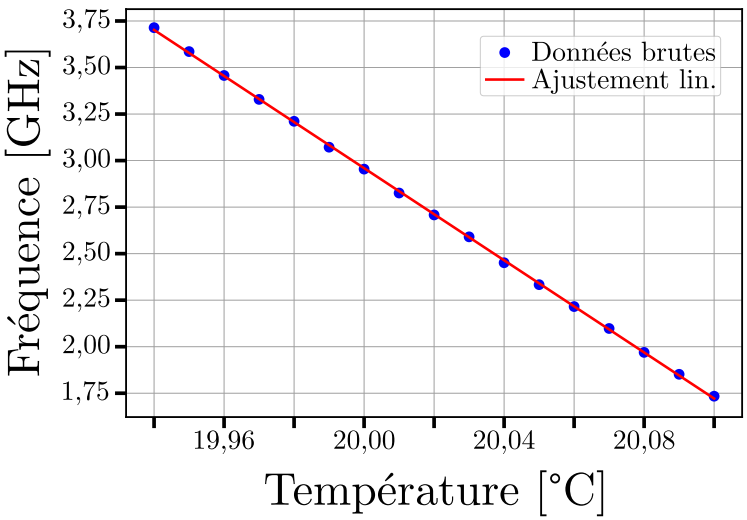


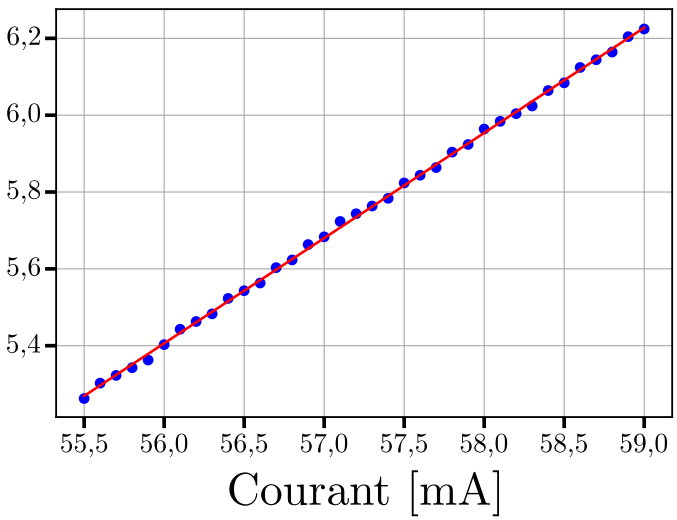


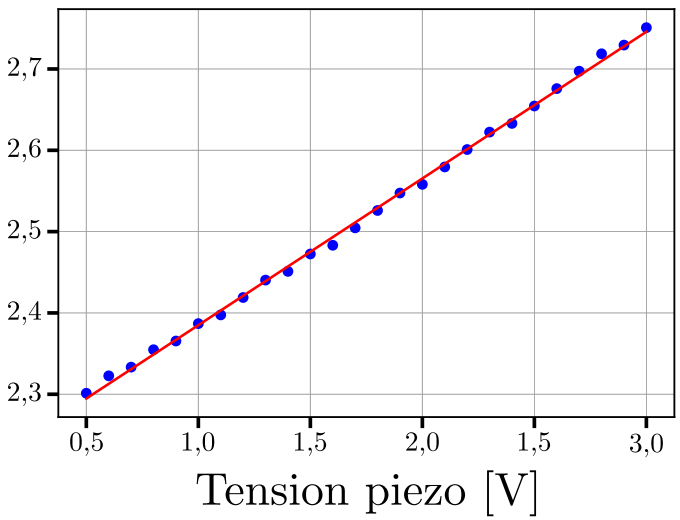
-12.4 GHz/°C

275 MHz/mA

Cavité ECDL simplifiée: accordabilités typiques







−12.4 GHz/°C

275 MHz/mA

180 MHz/V

Cavité ECDL simplifiée: plage d'accord

Contrôle simultané:

$$I_{\text{inj}} = [90 : 30]\,[\text{mA}]$$

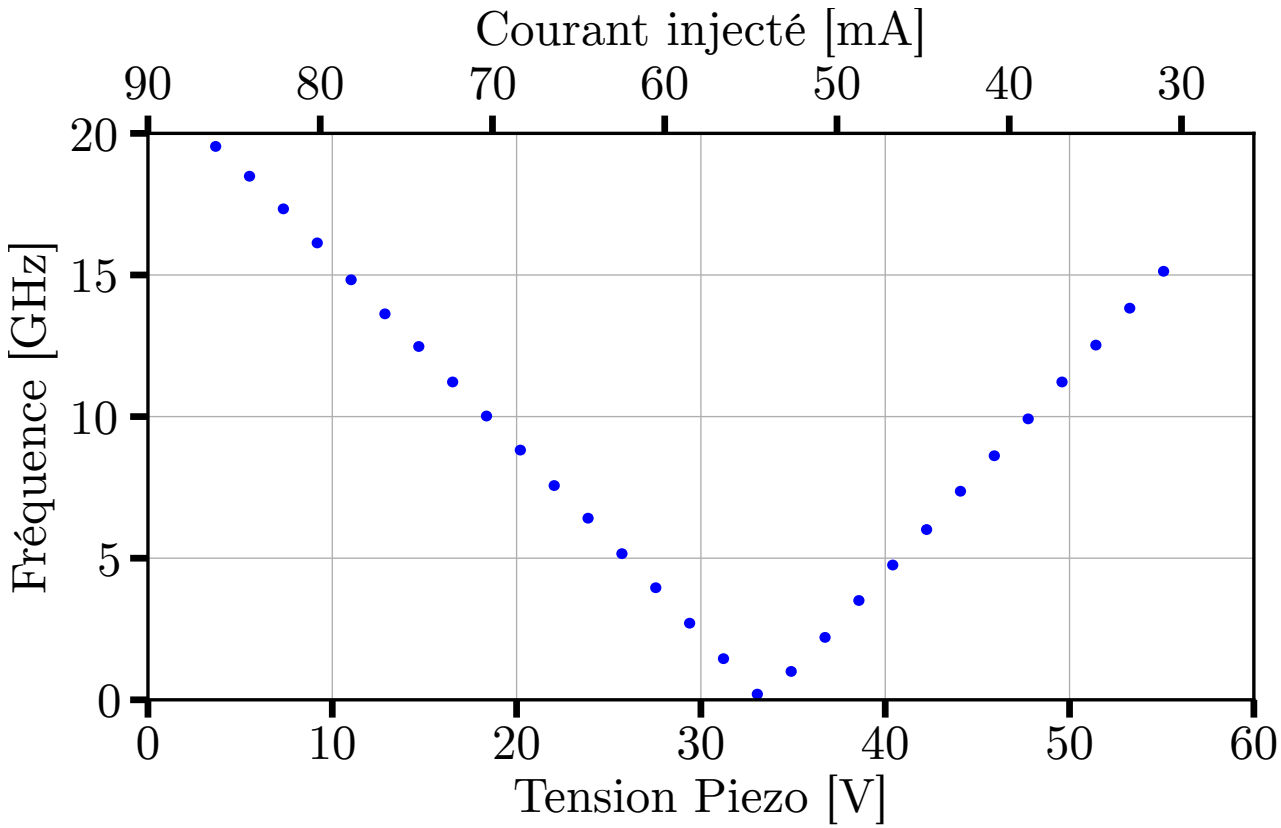
$$V_{\text{piezo}} = [00 : 60]\,[\text{V}]$$

Cavité ECDL simplifiée: plage d'accord

Contrôle simultané:

$$I_{\text{inj}} = [90 : 30]\,[\text{mA}]$$

$$V_{\text{piezo}} = [00 : 60]\,[\text{V}]$$



Cavité ECDL simplifiée: plage d'accord

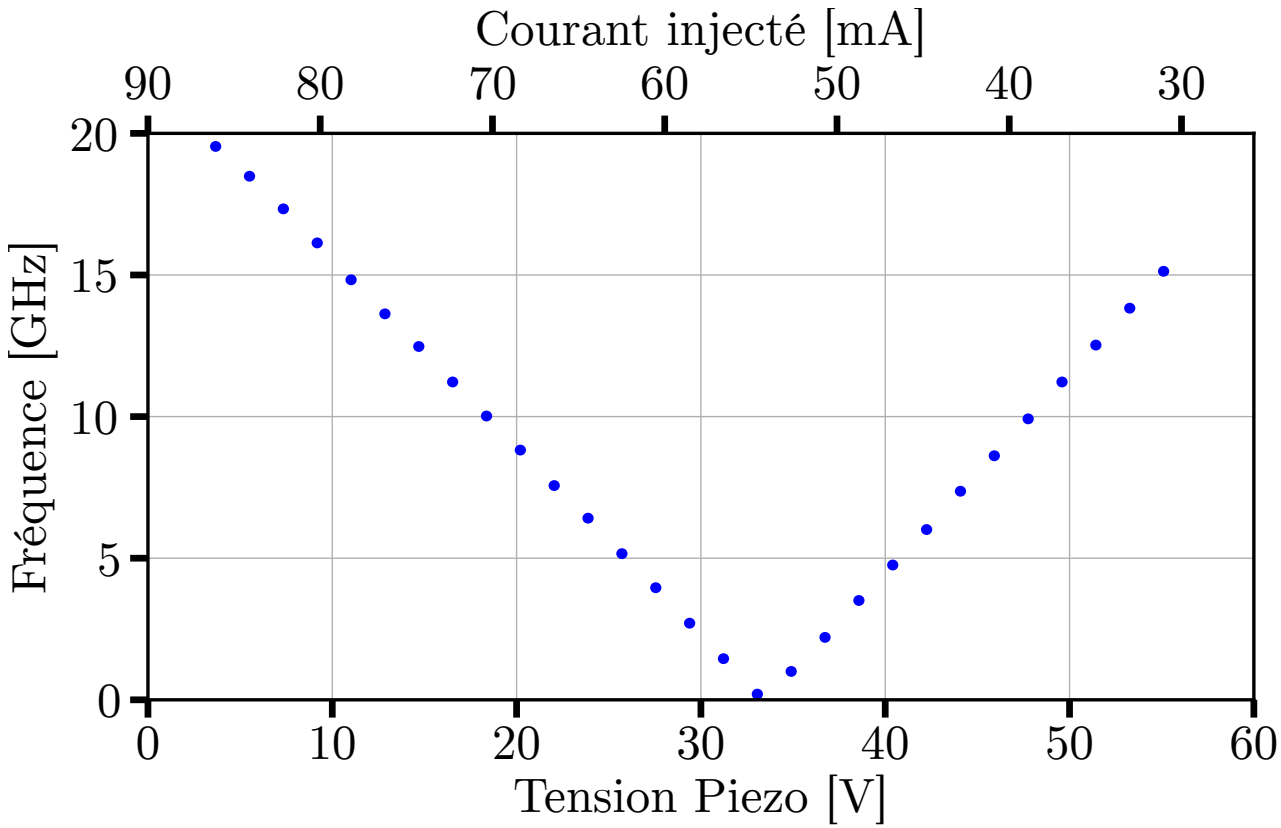
Contrôle simultané:

$$I_{\text{inj}} = [90 : 30]\,[\text{mA}]$$

$$V_{\text{piezo}} = [00 : 60]\,[\text{V}]$$

$\simeq$ **35 GHz**

sans saut de mode



Cavité ECDL simplifiée: plage d'accord

Contrôle simultané:

$$I_{\text{inj}} = [90 : 30]\,[\text{mA}]$$

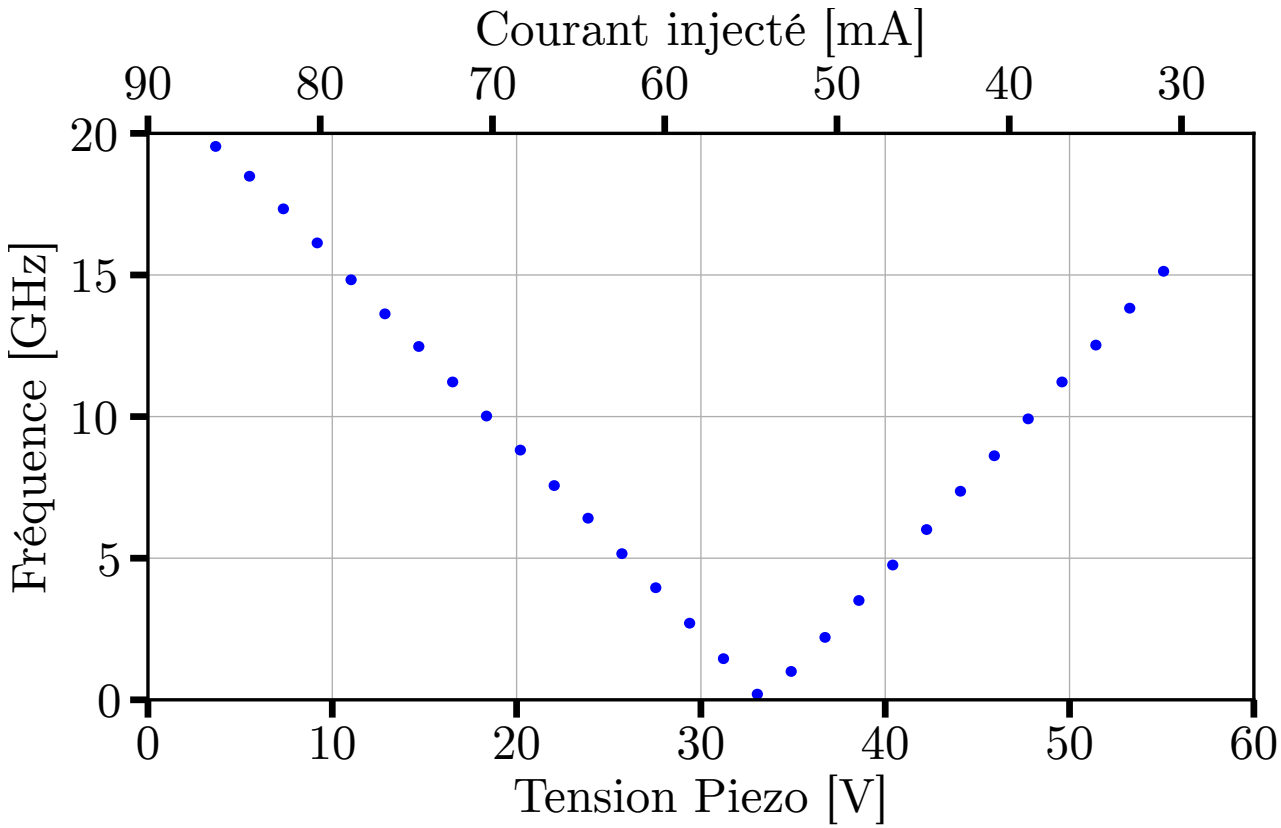
$$V_{\text{piezo}} = [00 : 60]\,[\text{V}]$$

$\simeq$ 35 GHz

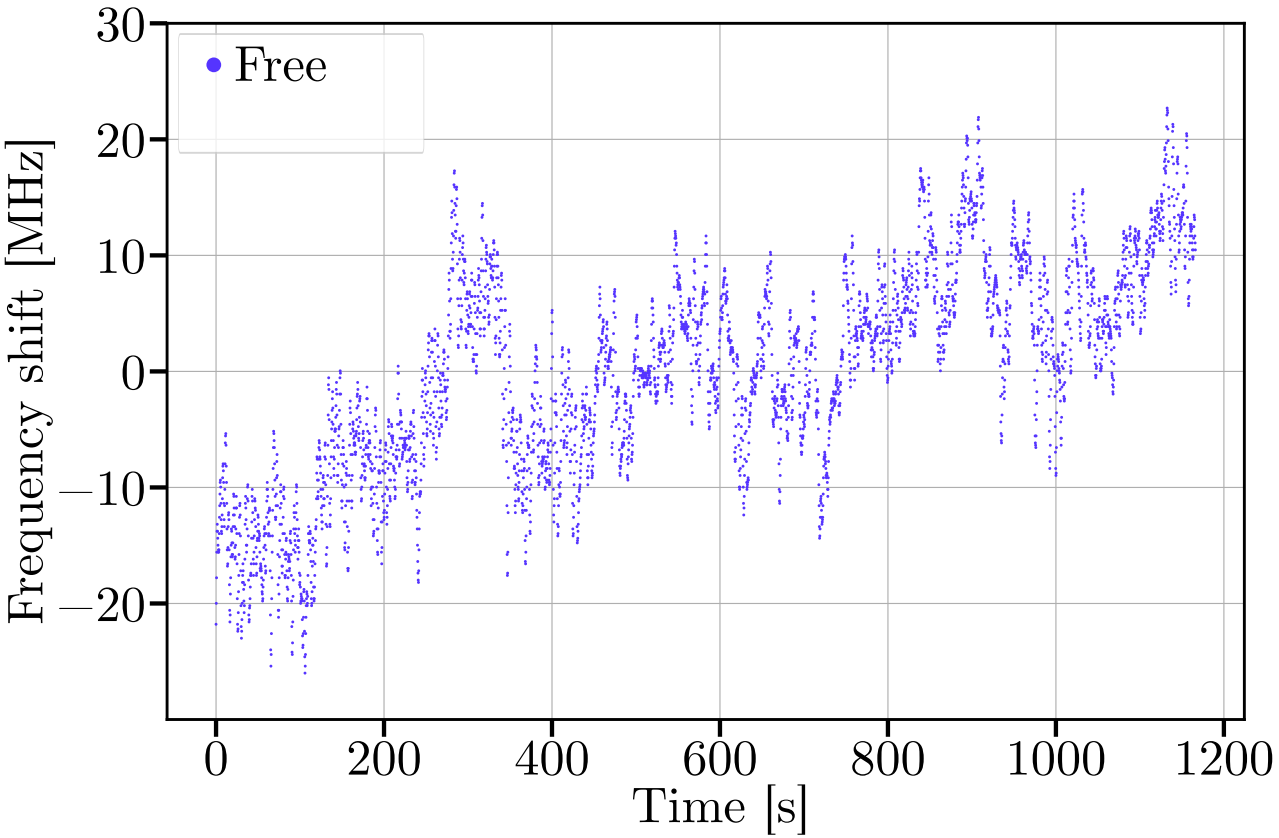
sans saut de mode

$\simeq$ 0,5 nm

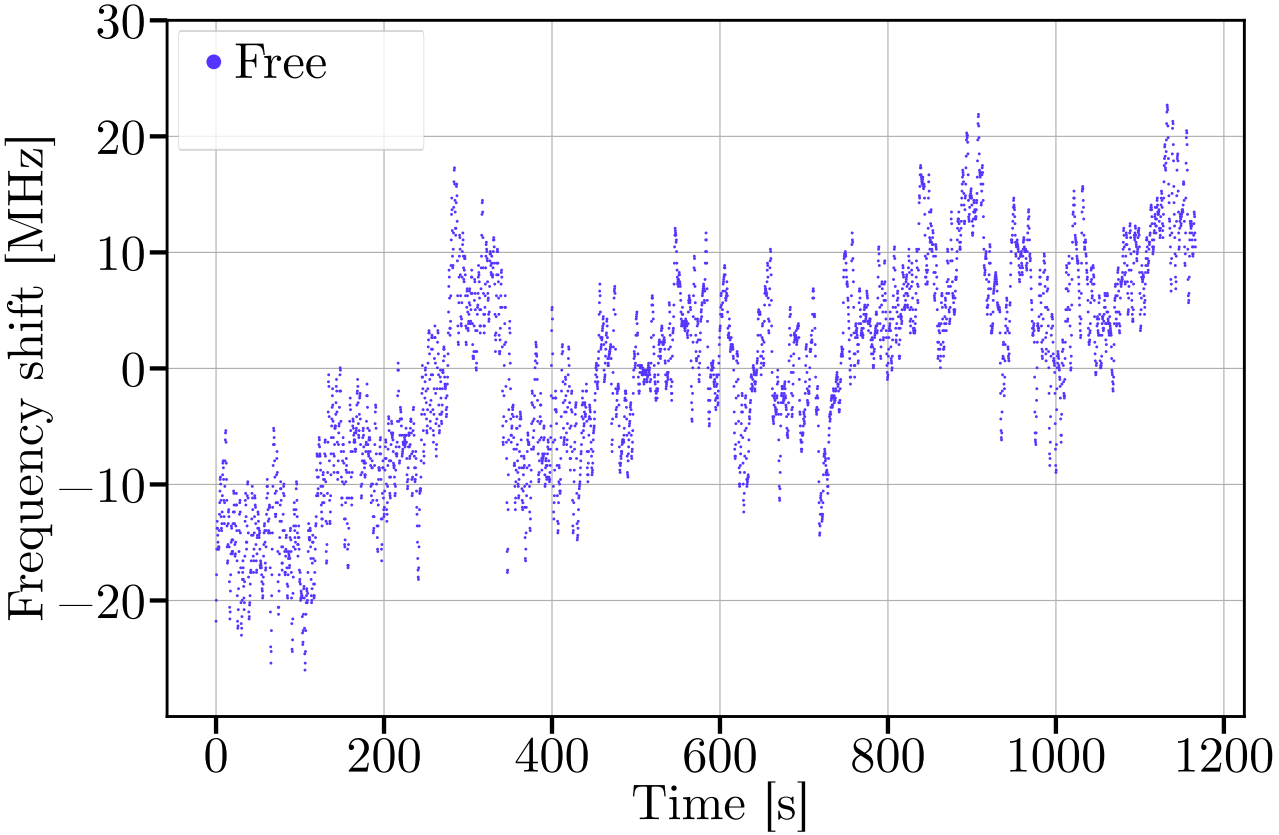
avec saut de mode



Cavité ECDL simplifiée: battement de fréquence

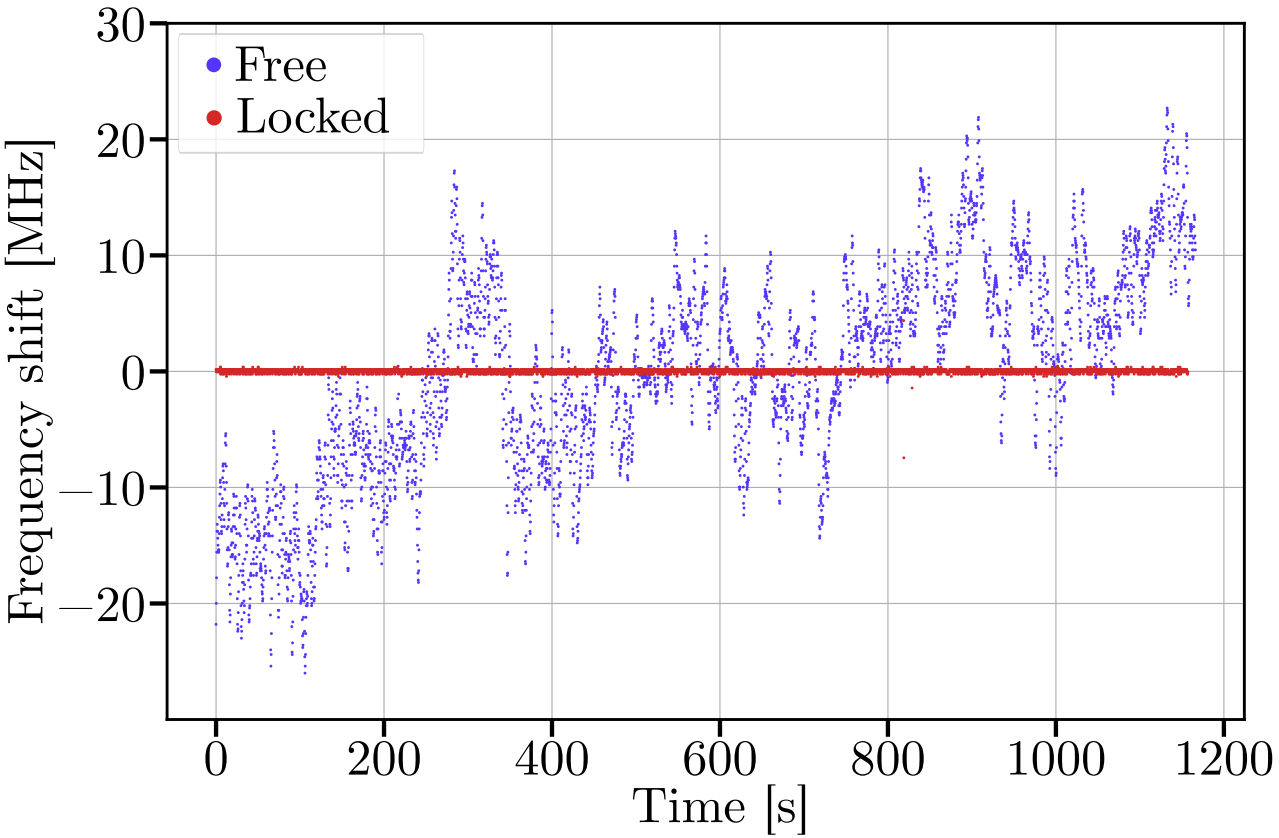


Cavité ECDL simplifiée: battement de fréquence



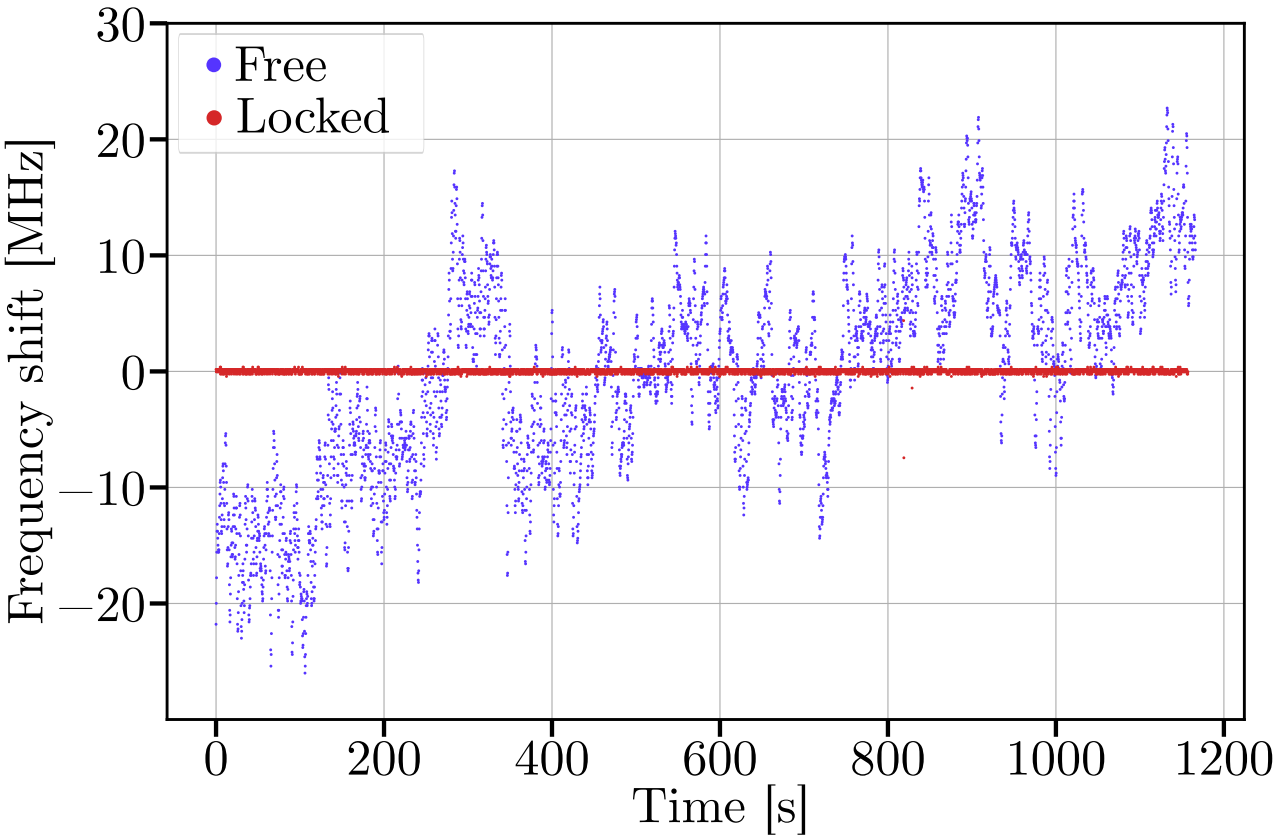
40 MHz/20 minutes

Cavité ECDL simplifiée: battement de fréquence



40 MHz/20 minutes

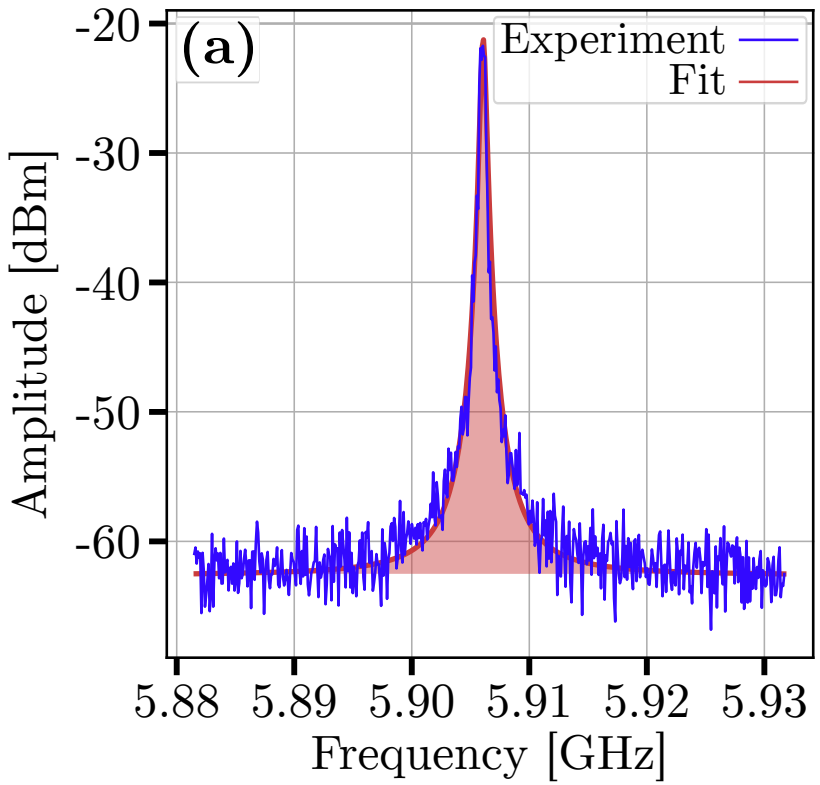
Cavité ECDL simplifiée: battement de fréquence

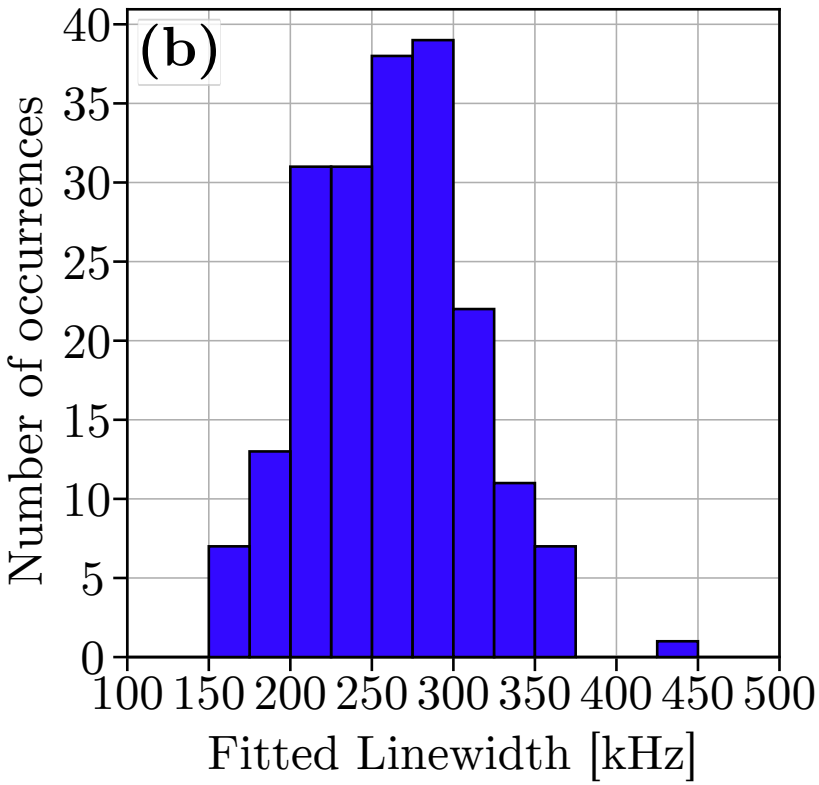


40 MHz/20 minutes

200 kHz/20 minutes
(RBW = 50 kHz)

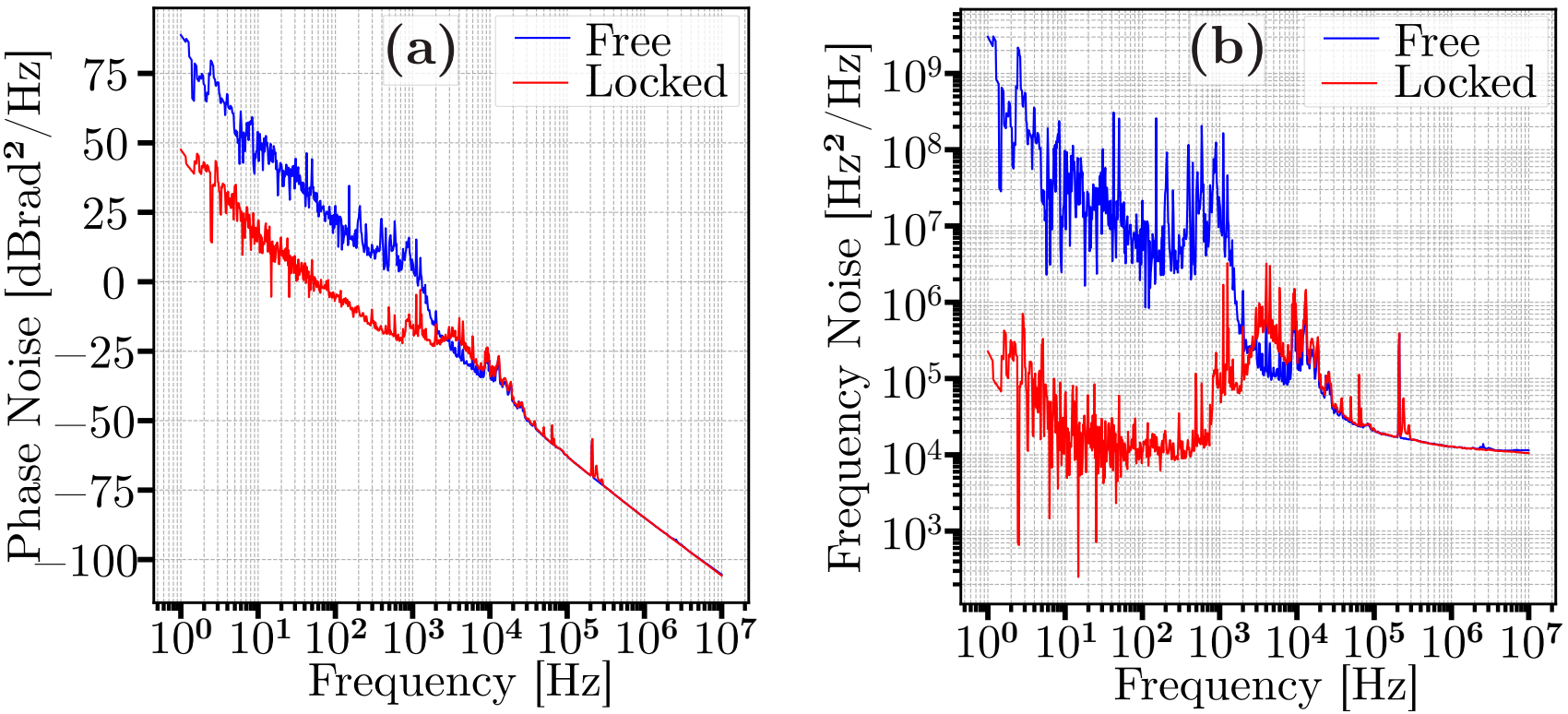
Cavité ECDL simplifiée: spectre du battement de fréquence





$\Delta\nu < 300\,\text{kHz}$ limitée par laser de référence

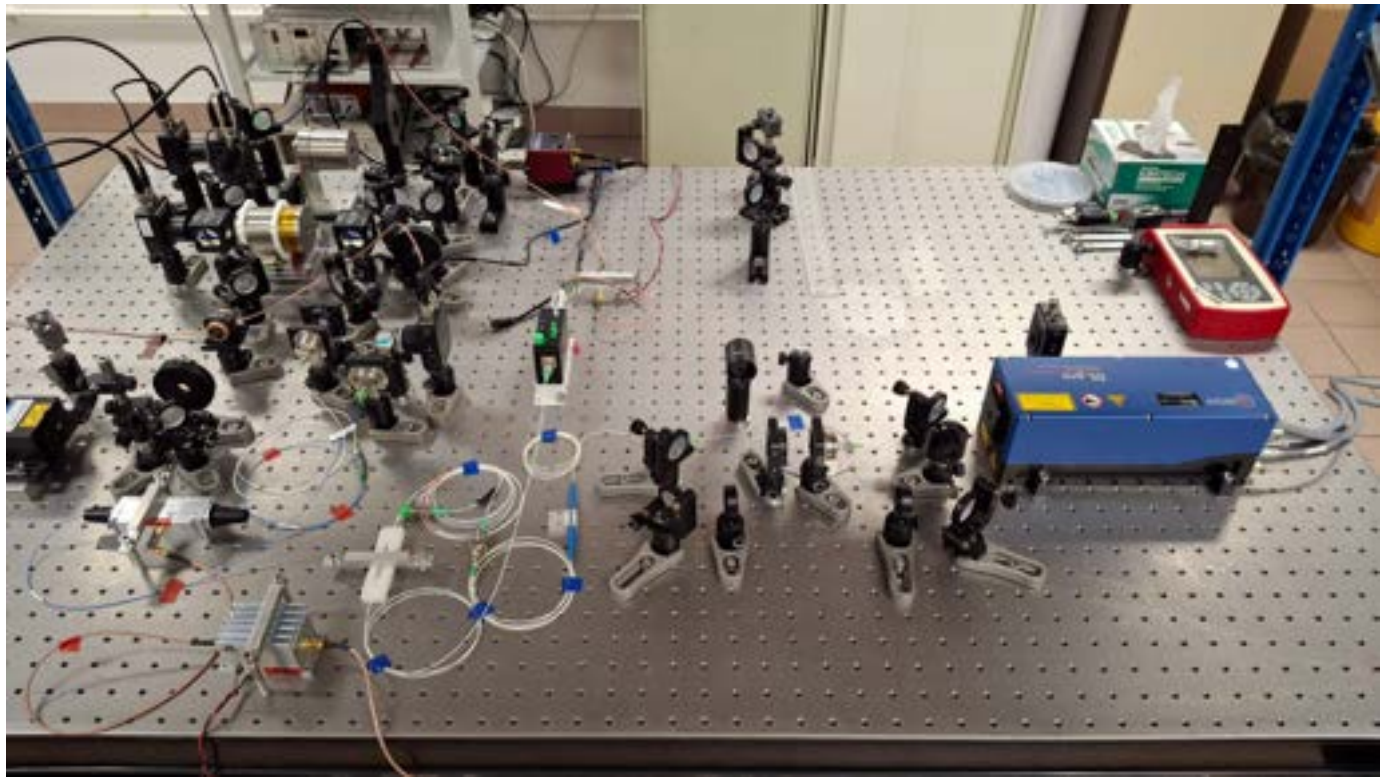
Bruit de phase et de fréquence du battement laser



$\Delta\nu$: 38 kHz (instantanée) 44 kHz (intégrée)

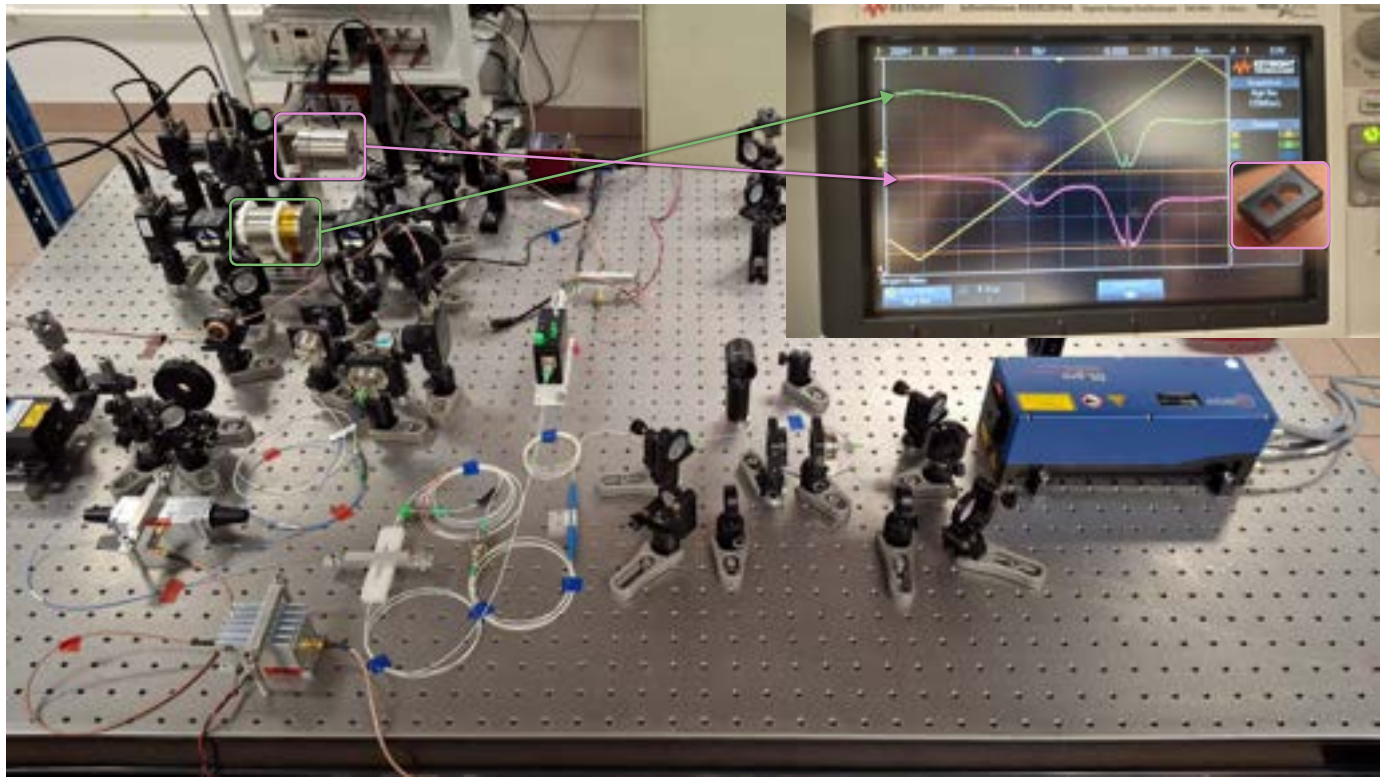
Vers la spectroscopie d'atomes en µcellule

Femto-ST: tout est prêt!



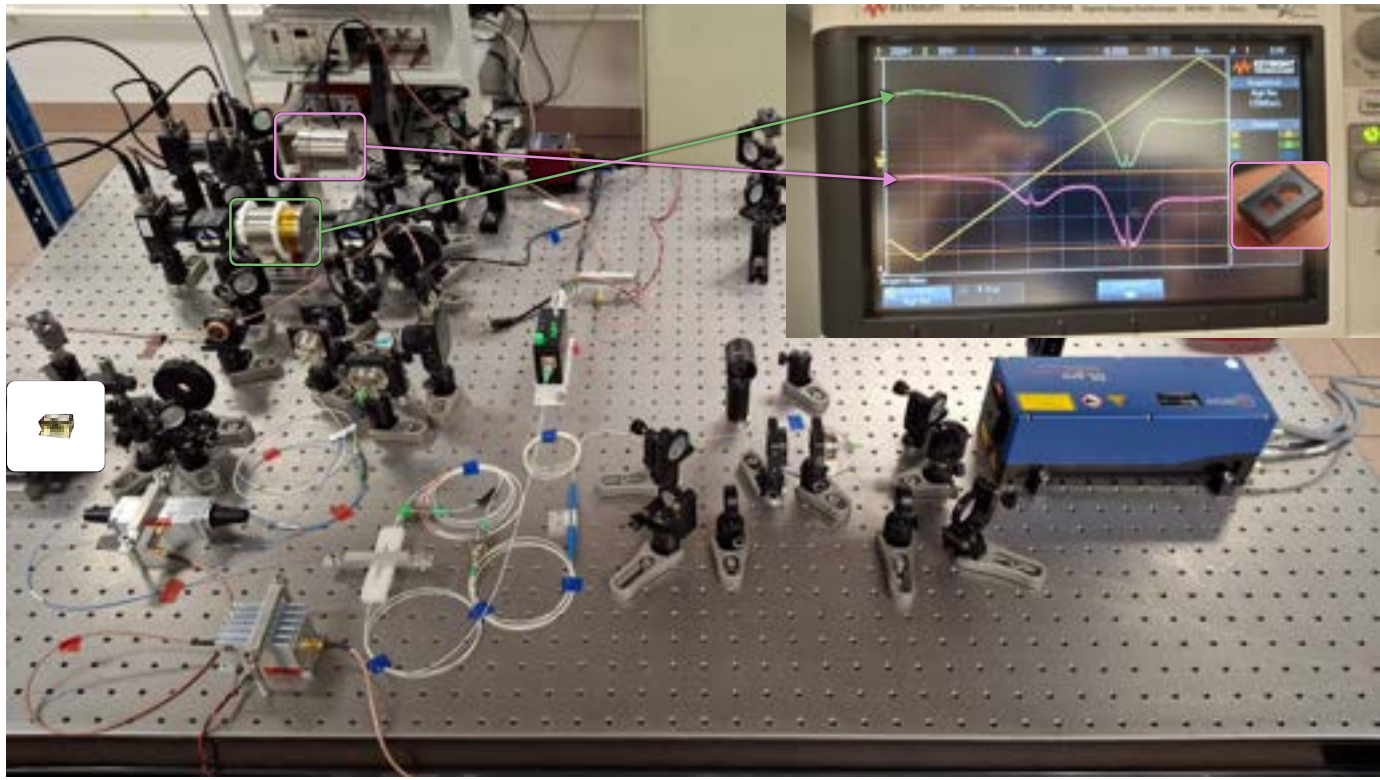
Vers la spectroscopie d'atomes en µcellule

Femto-ST: tout est prêt!



Vers la spectroscopie d'atomes en µcellule

Femto-ST: tout est prêt!

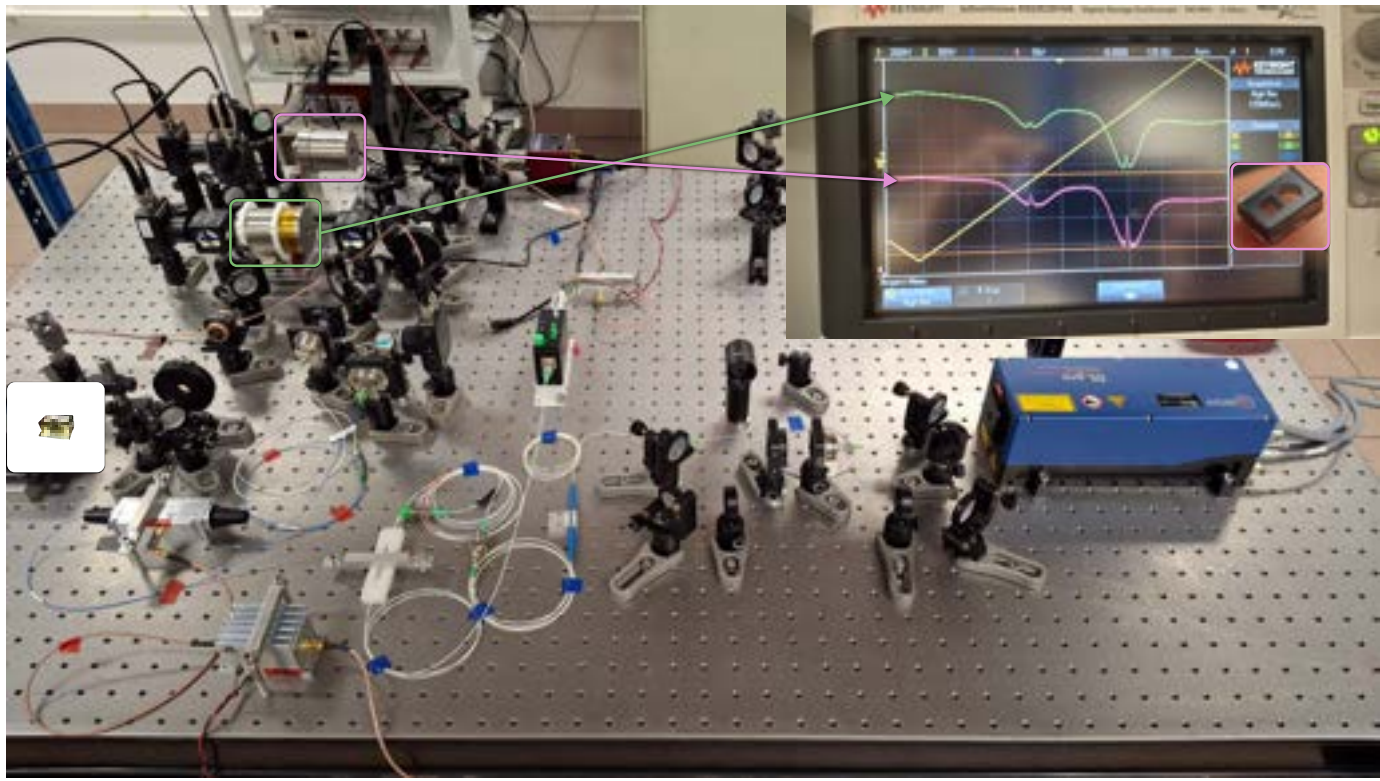


Vers la spectroscopie d'atomes en µcellule

Femto-ST: tout est prêt!

Actuellement:

$$\lambda = 853{,}4 \pm 0{,}5\,\text{nm}$$



Vers la spectroscopie d'atomes en µcellule

Femto-ST: tout est prêt!

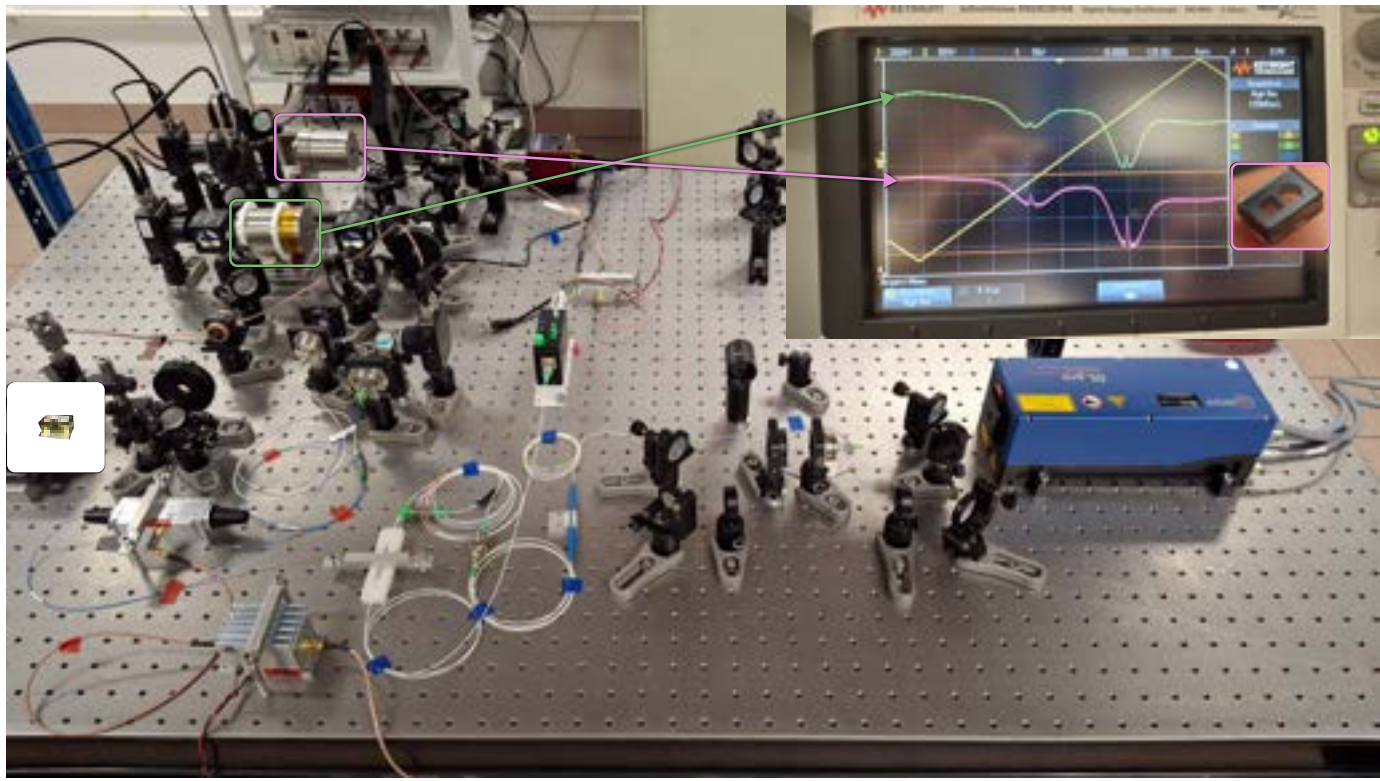
Actuellement:

$$\lambda = 853{,}4 \pm 0{,}5\,\text{nm}$$

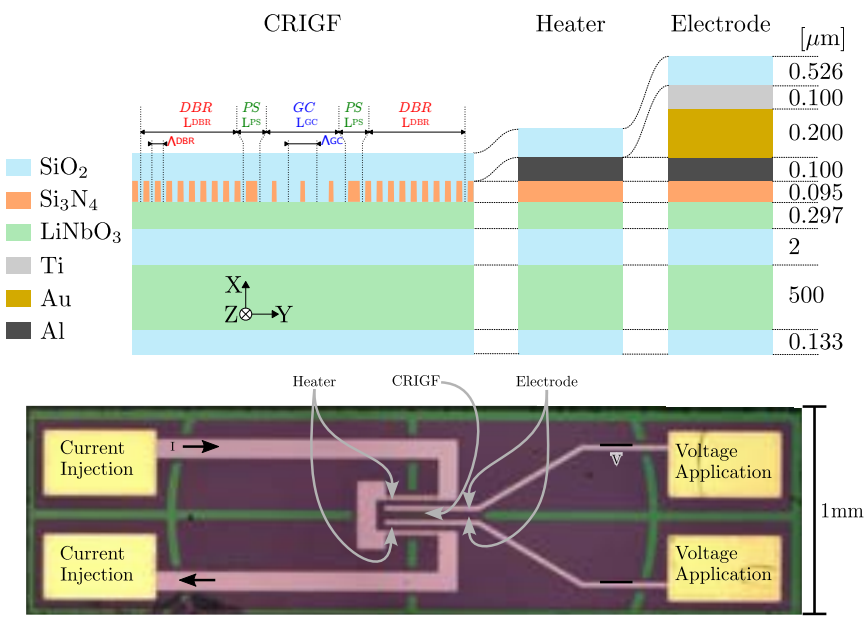
Nécessaire:

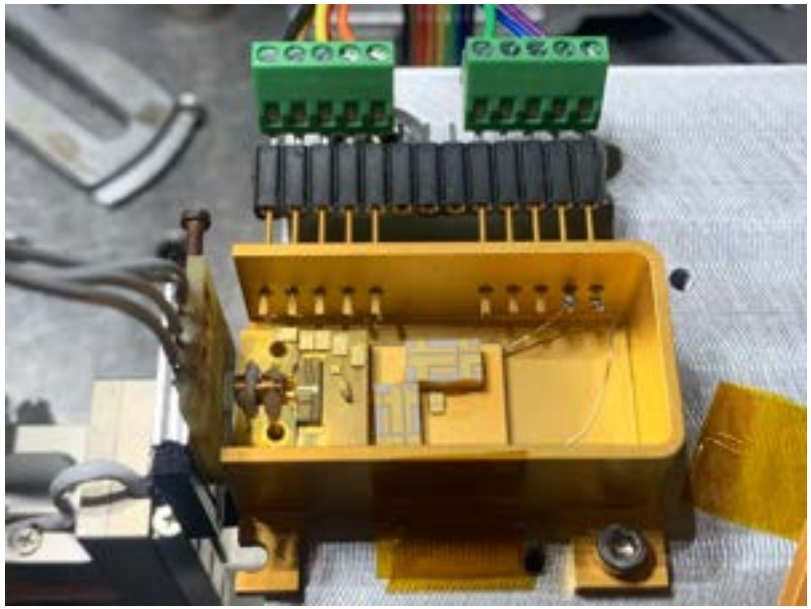
$$\lambda = 852 \pm 2\,\text{nm}$$

λ absolu et accordabilité



Travaux en cours: laser a 780 nm avec CRIGF/LNOI





CRIGF sur niobate de lithium en couche mince[1]

Thermique : $\Delta\lambda = 2\,\text{nm}$ [32 pm/mW] ; Electrique : $0.25\,\text{nm}$ [1.2 pm/V]

[1] Monmayrant, 2022, doi:10.1364/OE.457149

Conclusions & Perspectives

Métrologie fine des ECDLs à CRIGF (papier en cours)

Conclusions & Perspectives

Métrologie fine des ECDLs à CRIGF (papier en cours)

Stabilité court terme $\simeq 2 \times 10^{-13}$

Conclusions & Perspectives

Métrologie fine des ECDLs à CRIGF (papier en cours)

Stabilité court terme $\simeq 2 \times 10^{-13}$

Mesures homodynes de l'ECDL

Conclusions & Perspectives

Métrologie fine des ECDLs à CRIGF (papier en cours)

Stabilité court terme $\simeq 2 \times 10^{-13}$

Mesures homodynes de l'ECDL

Meilleur contrôle absolu de λ_0

Conclusions & Perspectives

Métrologie fine des ECDLs à CRIGF (papier en cours)
Stabilité court terme $\simeq 2 \times 10^{-13}$
Mesures homodynes de l'ECDL

Meilleur contrôle absolu de λ_0
Plus grande accordabilité $\Delta\lambda \geq 2\,\text{nm}$

Conclusions & Perspectives

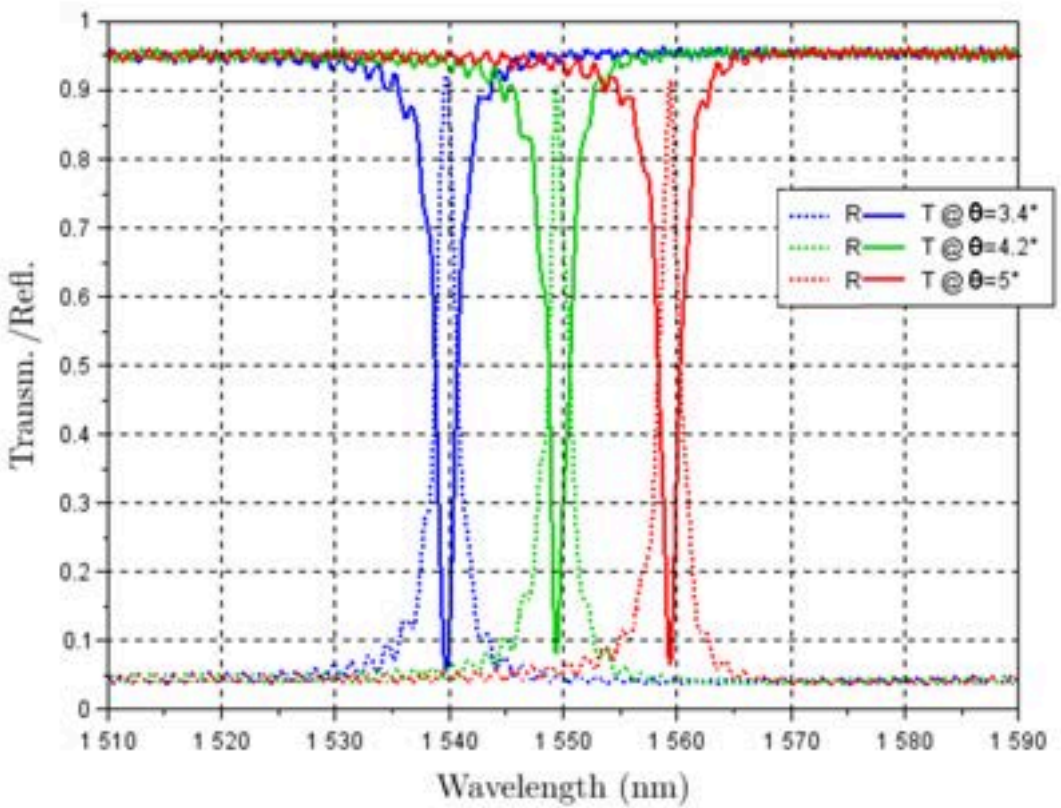
Métrologie fine des ECDLs à CRIGF (papier en cours)
Stabilité court terme $\simeq 2 \times 10^{-13}$
Mesures homodynes de l'ECDL

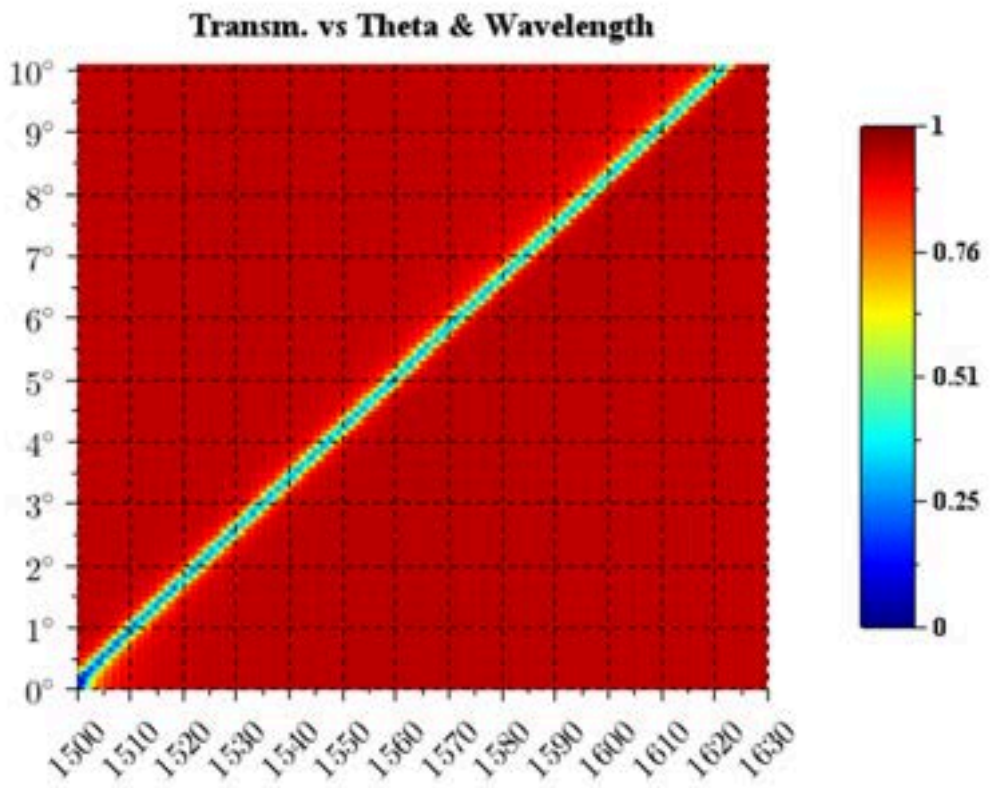
Meilleur contrôle absolu de λ_0
Plus grande accordabilité $\Delta\lambda \geq 2\,\text{nm}$
Passage à $\lambda_0 =$780 nm (et 895 nm)

Merci!

Des questions?

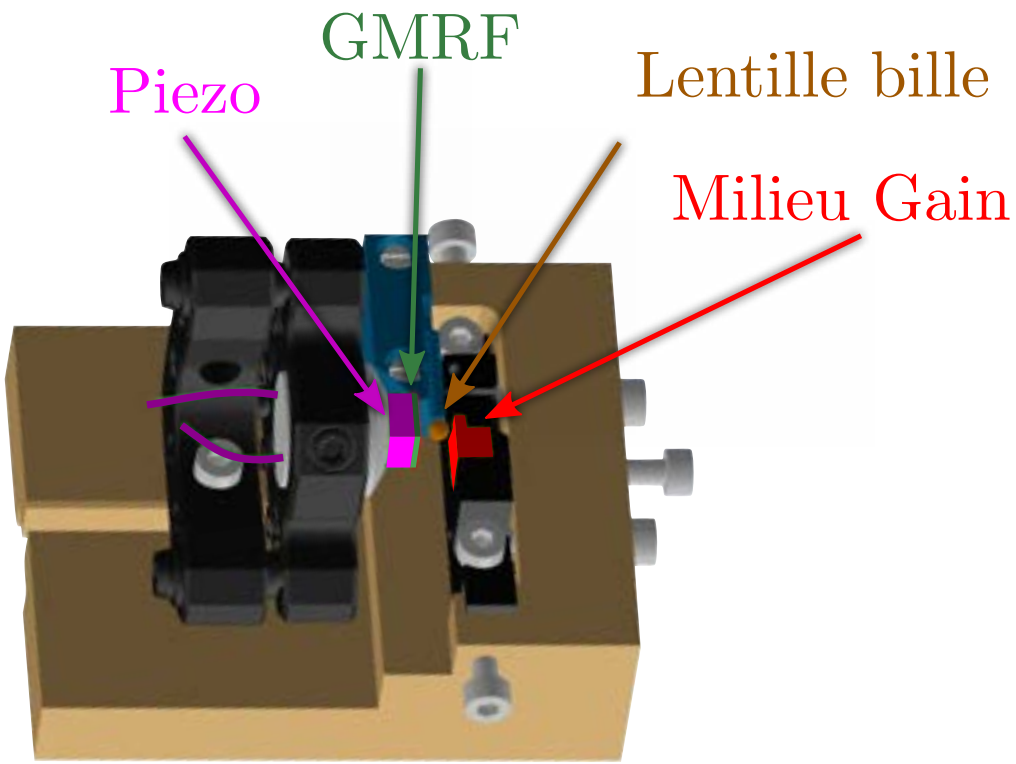
GMRFs : accordabilité spectrale et intolérance angulaire[1]

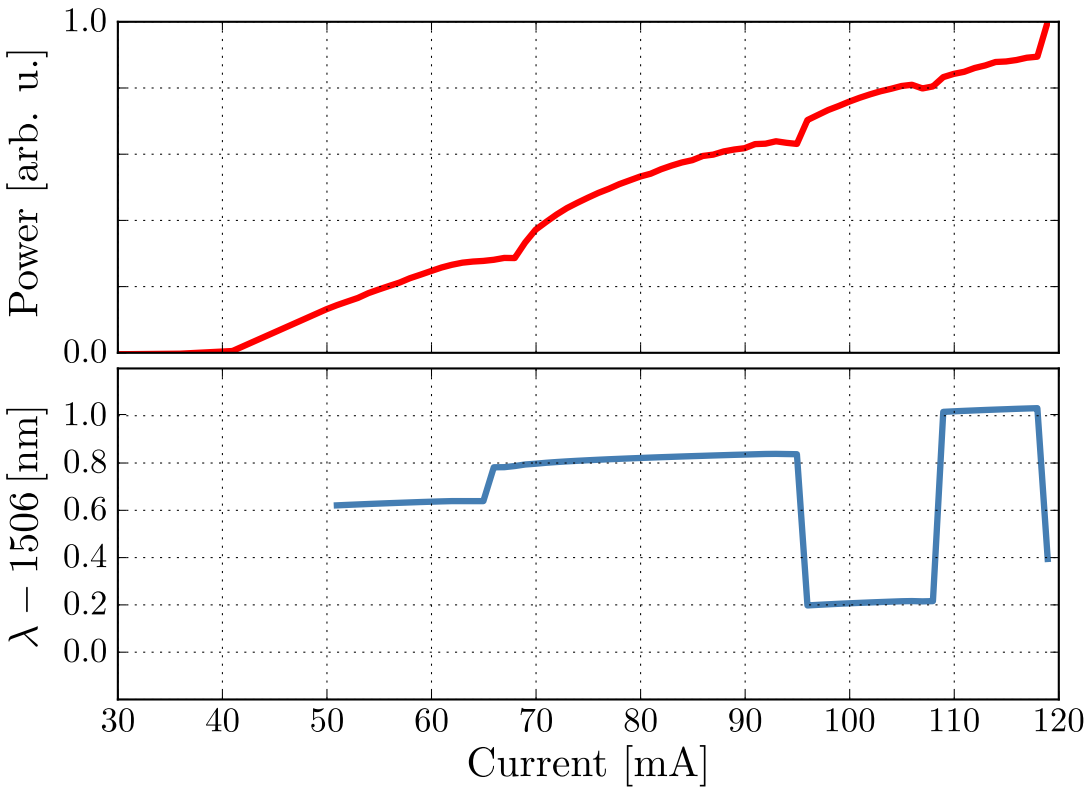




[1]Pelloquin 2018, doi: 10.1007/s00542-018-3740-6

GMRFs & ECDL[1]





[1]Guillemot, 2020, doi: 10.1088/1555-6611/ab7012

CRIGFs : les $\oplus$ les $\ominus$

$\oplus$ A la longueur d'onde que vous voulez:

450, 780, 850, 890, 1500, 4600, 9600 nm ...

$\oplus$ Taille du spot et facteur de qualité presque indépendants

$\oplus$ Non-linéaire, thermo- et électro-accordables

$\oplus$ Peut-être multi-λ, multi-dimensionnel

$\ominus$ Ne me demandez pas $R_{\max} = 99{,}999$!

PAF : Puces à Atomes Froids

