

Réalisation d'un laser à 532 nm par génération de seconde harmonique

Alexandre Fouquet

21 août 2023

- groupe Gaz quantiques
- Laboratoire Kastler Brossel
- Collège de France
- équipe Rubidium
- maître de stage : Jérôme Beugnon



Travail de l'équipe

Condensats 2D de gaz de rubidium soumis à un potentiel contrôlé

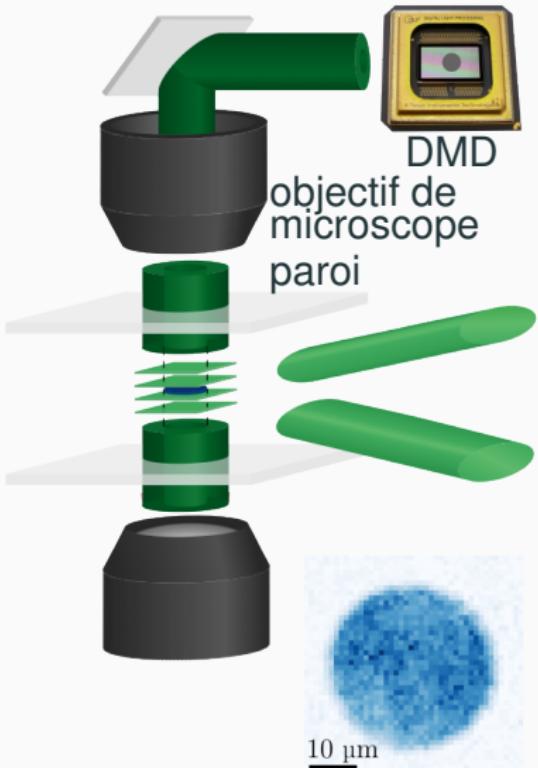
Exemples :

- Fraction superfluide dans un condensat de Bose-Einstein en interaction modulé spatialement
- Soliton de Townes dans un gaz de Bose à deux composantes

Obtention d'un gaz dégénéré à 2 dimensions

Piégeage dans les zones sombres par un laser à 532 nm :

- DMD (*digital micromirror device*) : “boîte”
- faisceaux cohérents : “accordéon”
→ piéger dans un plan



Objectif du stage

- Lasers verts coûteux et fragiles
 - Fabriquer le laser dans le labo à partir d'un laser à 1064 nm par doublage de fréquence
- Il suffit d'avoir des cristaux de remplacement

Objectif : réalisation du laser à 532 nm par génération de seconde harmonique et étude de la puissance générée et de la stabilité

Principe de la génération

Présentation du stage

Principe de la génération

Mise en œuvre

Discussion de l'efficacité de doublage à basse puissance

Recherche d'un régime exploitable à haute puissance

Conclusion

Milieu non linéaire

Équation d'onde dans un milieu non magnétique non linéaire :

$$\nabla^2 \mathcal{E}_q + \frac{\omega_q^2}{c^2} \underline{\epsilon}^{(1)}(\omega_q) \cdot \mathcal{E}_q(\mathbf{r}) = -\frac{\omega_q^2}{\epsilon_0 c^2} \underline{\mathcal{P}_q^{\text{NL}}(\mathbf{r})}$$

avec

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \Re \left\{ \sum_{q \in \mathbb{N}} \mathcal{E}_q(\mathbf{r}) e^{-i\omega_q t} \right\}$$

$$\mathbf{P}^{\text{NL}}(\mathbf{r}, t) = \Re \left\{ \sum_{q \in \mathbb{N}} \mathcal{P}_q^{\text{NL}}(\mathbf{r}) e^{-i\omega_q t} \right\}$$

$\underline{\epsilon}^{(1)}$ le tenseur de permittivité diélectrique relative (linéaire)

$\mathcal{P}_q^{\text{NL}}$ la partie non-linéaire de la polarisation

Génération de seconde harmonique

Polarisation quadratique pour une onde incidente à la pulsation ω

$$\mathbf{E} = \Re \{ \mathcal{E}_1 e^{-i\omega t} \}$$

$\mathbf{P}^{(2)} = \epsilon_0 \underline{\chi}^{(2)} \mathbf{E}^2$ avec $\underline{\chi}^{(2)}$ la susceptibilité d'ordre 2

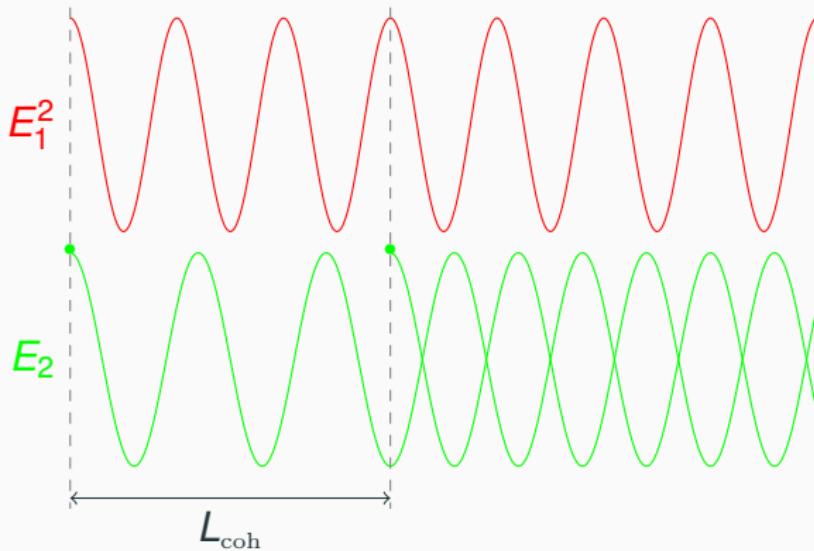
$$= \frac{\epsilon_0 \underline{\chi}^{(2)}}{4} \left\{ \mathcal{E}_1 e^{-i\omega t} + \mathcal{E}_1^* e^{i\omega t} \right\}^2$$

$$= \frac{\epsilon_0 \underline{\chi}^{(2)}}{4} \left\{ \underbrace{\mathcal{E}_1^2 e^{-2i\omega t} + \mathcal{E}_1^{*2} e^{2i\omega t}}_{\text{seconde harmonique}} + 2|\mathcal{E}_1|^2 + \mathcal{O}(\mathcal{E}_2^2) \right\}$$

La polarisation quadratique conduit à un terme source à 2ω , quadratique en l'amplitude incidente !

Accord de phase (onde plane)

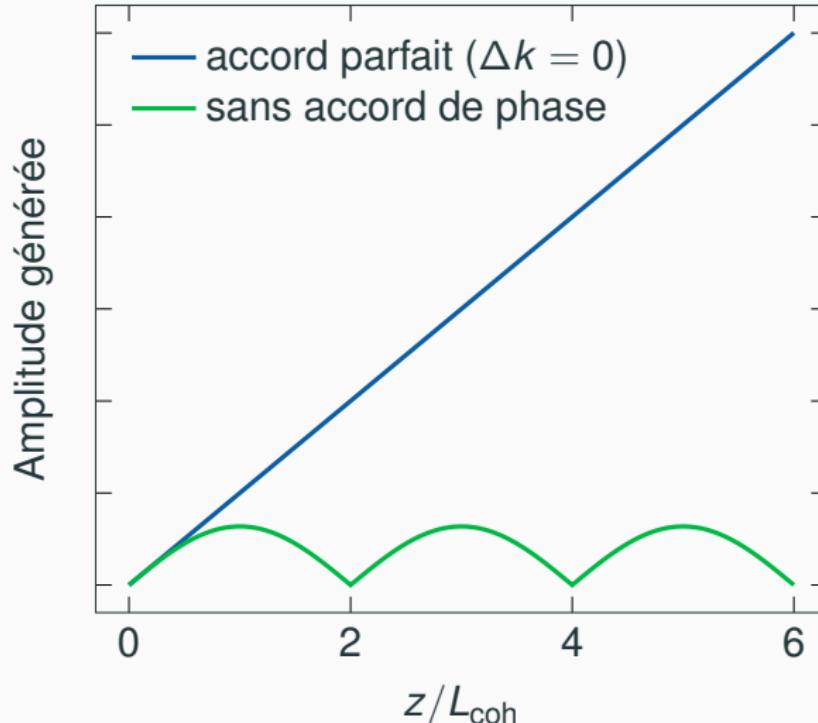
Cependant, le rayonnement généré n'est pas en phase :



Interférence destructive du rayonnement émis en z et en

$$z + L_{coh} := z + \frac{\pi}{\Delta k}, \Delta k = k_2 - 2k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_2} (n_2 - n_1)$$

Accord de phase (onde plane)



$n_1 \neq n_2$, $L_{\text{coh}} \approx 3 \mu\text{m} \ll L = 2 \text{ cm}$: on perd 4 ordres de grandeur sur l'amplitude !

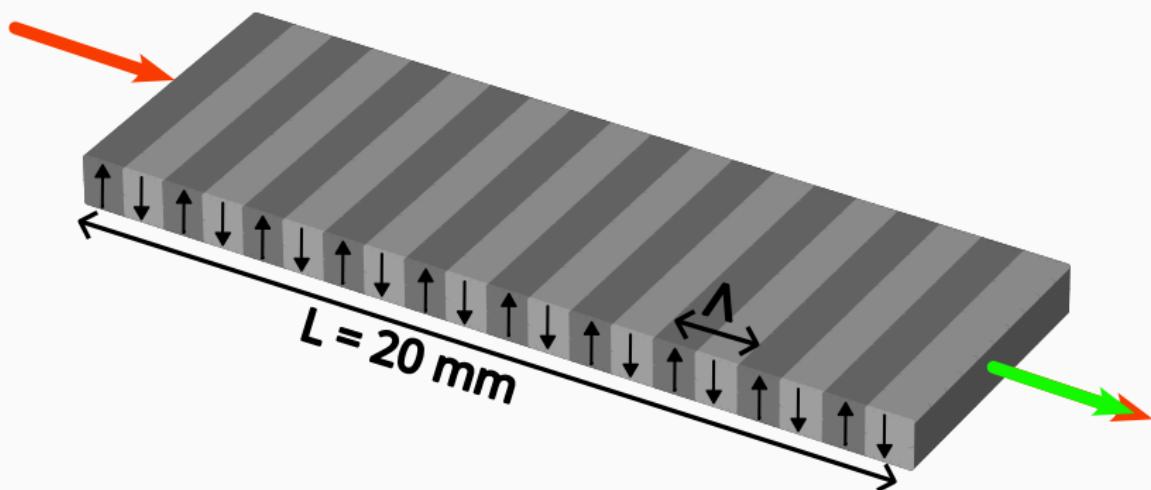
Quasi-accord de phase

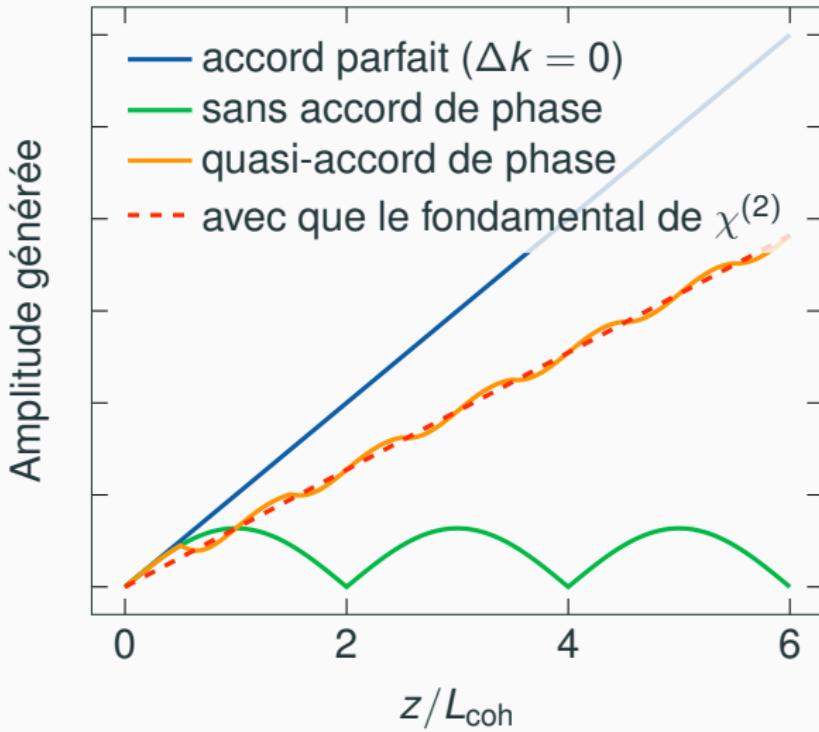
Solution : $\chi^{(2)}(z)$ variant spatialement avec un nombre d'onde $k_\chi = \Delta k$: remplace Δk par $\Delta k_{\text{eff}} := \Delta k - k_\chi = 0$.

Quasi-accord de phase

Solution : $\chi^{(2)}(z)$ variant spatialement avec un nombre d'onde $k_x = \Delta k$: remplace Δk par $\Delta k_{\text{eff}} := \Delta k - k_x = 0$.

En pratique, $\chi^{(2)}(z) = \chi_0^{(2)} \text{sign}[\cos(2\pi z/\Lambda)]$ avec un fondamental à $k_x = \frac{2\pi}{\Lambda}$ d'amplitude $\chi_{\text{eff}} := \frac{2}{\pi}\chi^{(2)}$.





On retrouve la croissance linéaire de l'amplitude !

Influence du profil transverse — faisceaux gaussiens

Faisceau incident gaussien de longueur de Rayleigh $z_R = \frac{n_1 \pi w_0^2}{\lambda}$

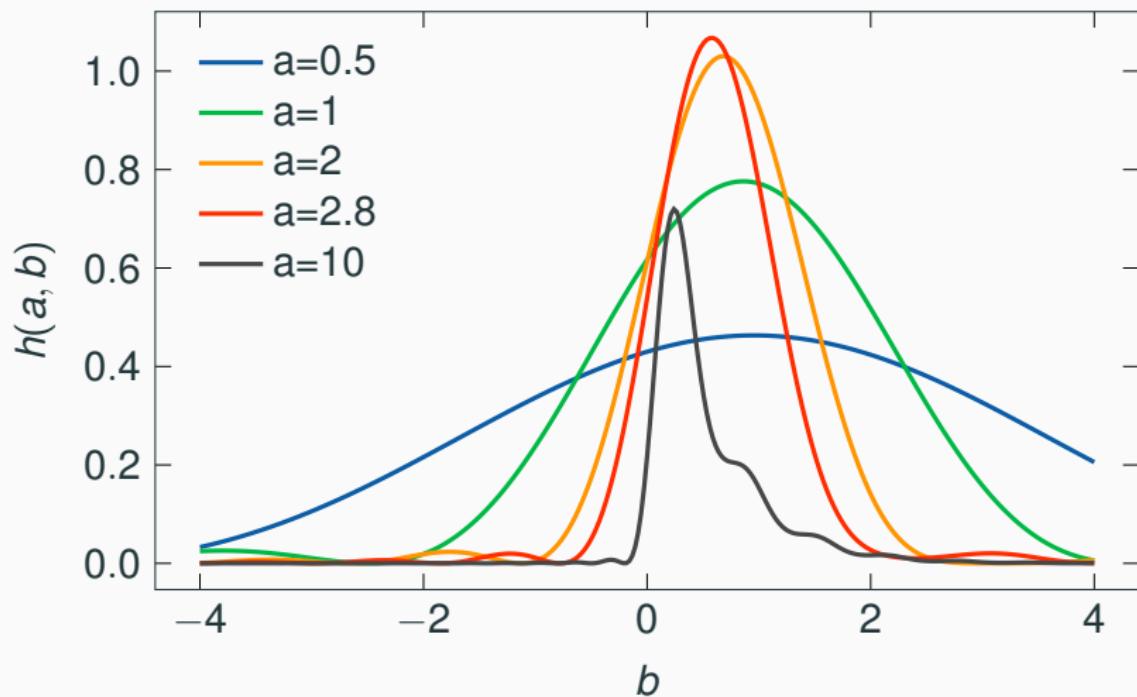
Théorie de Boyd-Kleinman : efficacité de conversion $\alpha = \frac{\mathcal{P}_2}{\mathcal{P}_1^2}$

$$\alpha = \frac{\omega^3 \chi_{\text{eff}}^2 L}{2\varepsilon_0 c^4 \pi n_1 n_2} h(a, b)$$

avec $a = \frac{L}{2z_R}$ (focalisation), $b = -\Delta k_{\text{eff}} z_R$ (déphasage)

$$\text{et } h(a, b) = \frac{1}{4a} \left| \int_{-a}^a \frac{e^{ib\zeta}}{1 + i\zeta} d\zeta \right|^2$$

Optimum de conversion : $h(2.8, 0.58) = 1.068$



Mise en œuvre

Présentation du stage

Principe de la génération

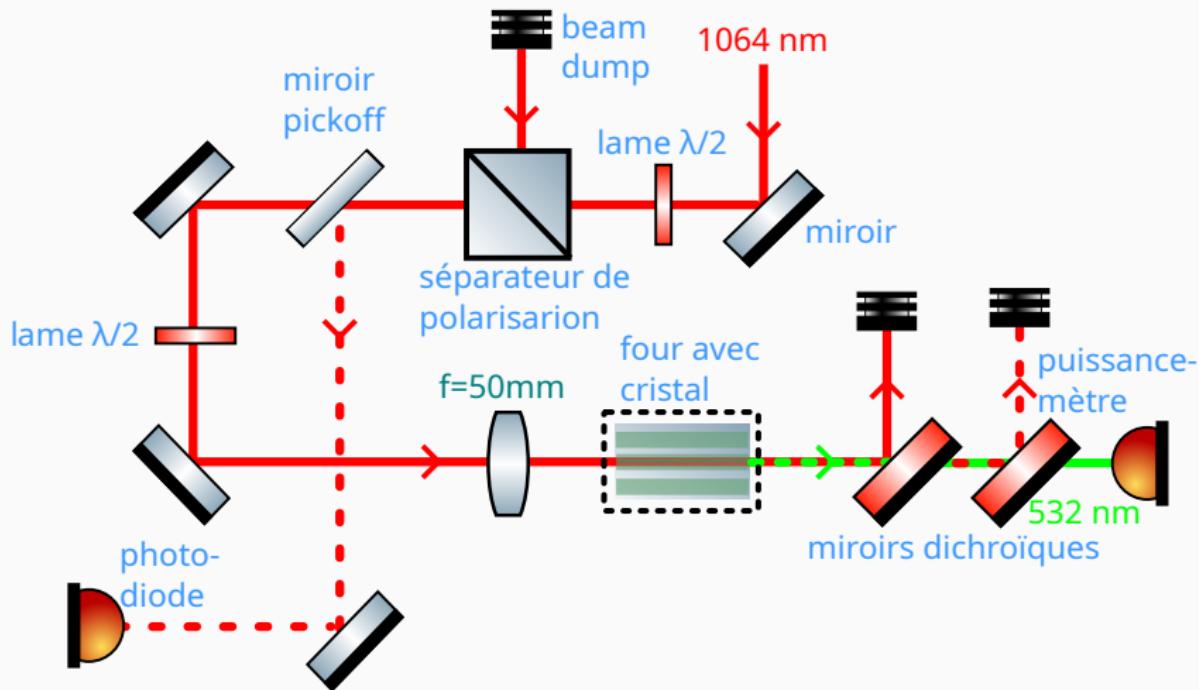
Mise en œuvre

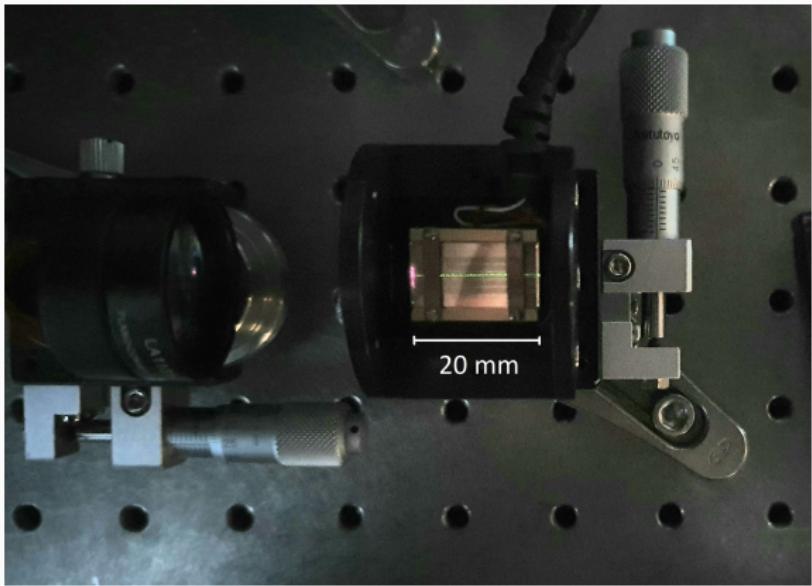
Discussion de l'efficacité de doublage à basse puissance

Recherche d'un régime exploitable à haute puissance

Conclusion

Montage





Discussion de l'efficacité de doublage à basse puissance

Présentation du stage

Principe de la génération

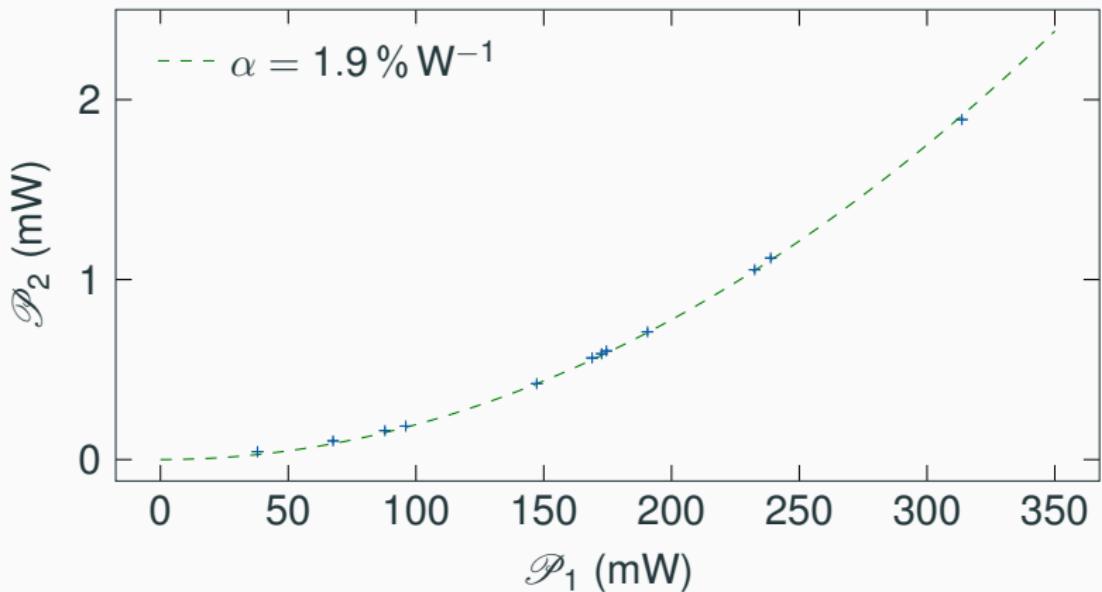
Mise en œuvre

Discussion de l'efficacité de doublage à basse puissance

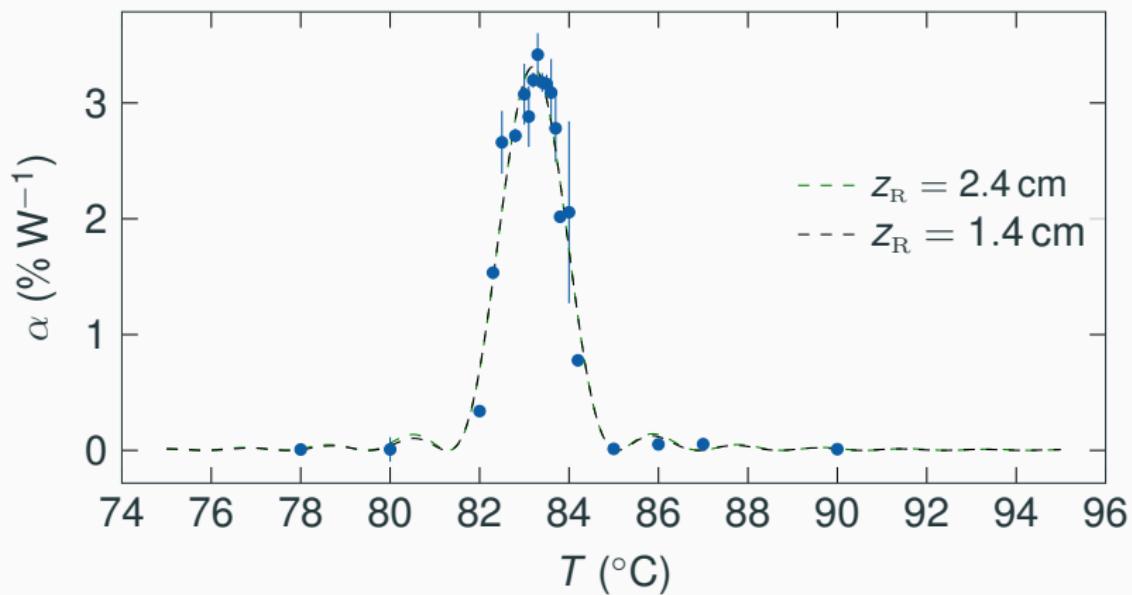
Recherche d'un régime exploitable à haute puissance

Conclusion

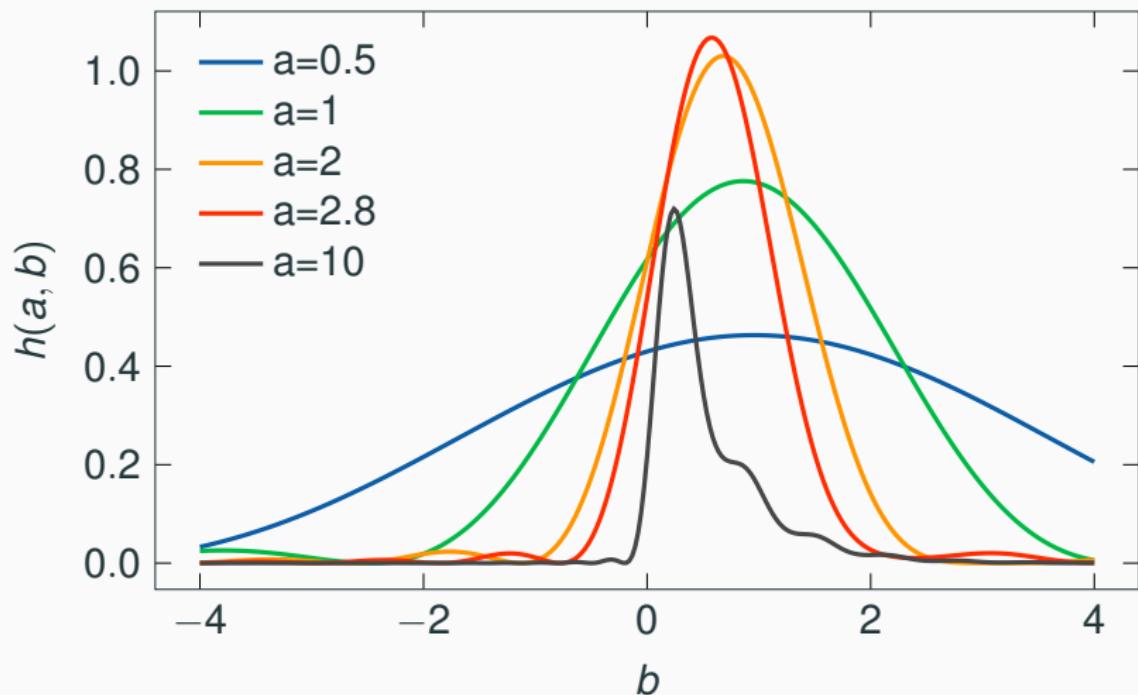
Vérification de la relation $\mathcal{P}_2 = \alpha \mathcal{P}_1^2$ ($\Lambda = 6.9 \mu\text{m}$, $T = 82.5^\circ\text{C}$)



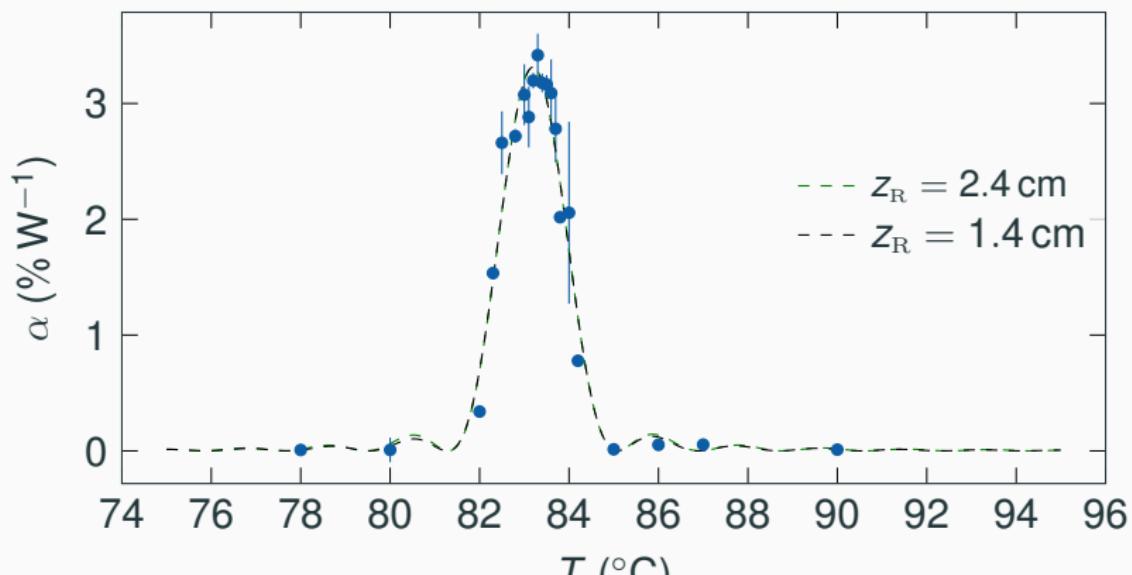
Dépendance en température de l'efficacité de conversion



Dépendance en température de l'efficacité de conversion



Dépendance en température de l'efficacité de conversion



ajustement de $\frac{\partial(\Delta k_{\text{eff}})}{\partial T} : 1.7 \text{ cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$

raisonnable selon la précision du dopage, mais α trop grand pour $z_R = 2.4 \text{ cm}$

Recherche d'un régime exploitable à haute puissance

Présentation du stage

Principe de la génération

Mise en œuvre

Discussion de l'efficacité de doublage à basse puissance

Recherche d'un régime exploitable à haute puissance

Conclusion

Conversion à haute puissance

- Effets parasites à haute intensité réduisent l'efficacité de conversion

Conversion à haute puissance

- Effets parasites à haute intensité réduisent l'efficacité de conversion
- Doublage extrêmement instable

Conversion à haute puissance

- Effets parasites à haute intensité réduisent l'efficacité de conversion
- Doublage extrêmement instable
- Des configurations moins instables que d'autres

Recherche d'un régime stable

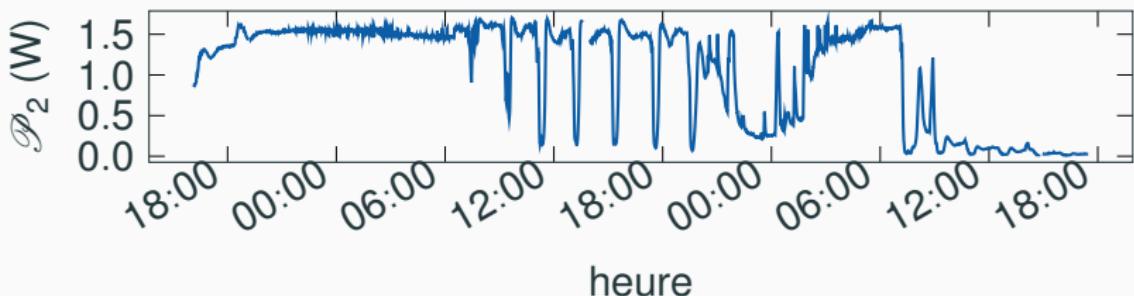
- Plus stable à haute température ?

Recherche d'un régime stable

- Plus stable à haute température ?
- Essai avec $\Lambda = 6.83 \mu\text{m}$: $T = 127^\circ\text{C} \rightarrow 129^\circ\text{C}$

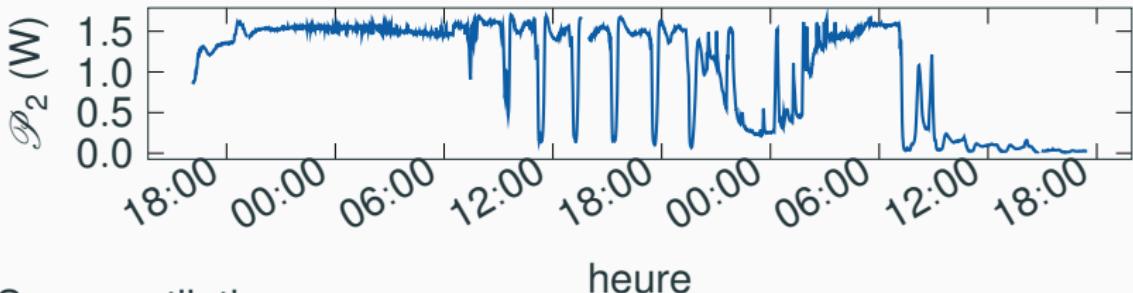
Recherche d'un régime stable

- Plus stable à haute température ?
- Essai avec $\Lambda = 6.83 \mu\text{m}$: $T = 127^\circ\text{C} \rightarrow 129^\circ\text{C}$
- Avec ventilation :

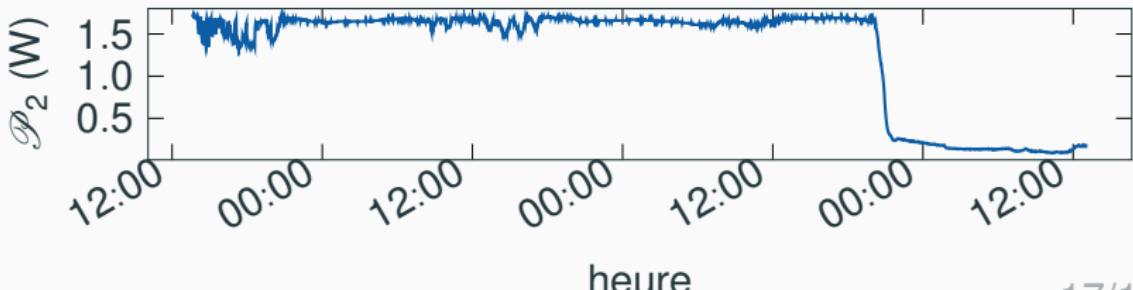


Recherche d'un régime stable

- Plus stable à haute température ?
- Essai avec $\Lambda = 6.83 \mu\text{m}$: $T = 127^\circ\text{C} \rightarrow 129^\circ\text{C}$
- Avec ventilation :



- Sans ventilation :



Conclusion

Présentation du stage

Principe de la génération

Mise en œuvre

Discussion de l'efficacité de doublage à basse puissance

Recherche d'un régime exploitable à haute puissance

Conclusion

Conclusion

- Doublage réussi

Conclusion

- Doublage réussi
- Résultat sans ventilation probant

Conclusion

- Doublage réussi
- Résultat sans ventilation probant
- Mise en évidence d'un manque de stabilité

Conclusion

- Doublage réussi
- Résultat sans ventilation probant
- Mise en évidence d'un manque de stabilité
- Rentabilité incertaine

Conclusion

- Doublage réussi
- Résultat sans ventilation probant
- Mise en évidence d'un manque de stabilité
- Rentabilité incertaine
- Pistes d'approfondissement :

Conclusion

- Doublage réussi
- Résultat sans ventilation probant
- Mise en évidence d'un manque de stabilité
- Rentabilité incertaine
- Pistes d'approfondissement :
 - Répétabilité avec plusieurs cristaux

Conclusion

- Doublage réussi
- Résultat sans ventilation probant
- Mise en évidence d'un manque de stabilité
- Rentabilité incertaine
- Pistes d'approfondissement :
 - Répétabilité avec plusieurs cristaux
 - Faisceau pulsé pour s'affranchir des effets thermiques

Annexes

Annexes

Équation d'évolution

Hypothèses simplificatrices :

- polarisation linéaire selon l'un des axes principaux

$$\rightarrow \mathcal{E}_q \text{ scalaires, } n_q = \sqrt{\varepsilon^{(1)}(\omega_q)}$$

- $\mathcal{E}_q = \mathcal{A}_q(x, y, z) e^{ik_q z}$ avec $k_q = \frac{n_q \omega_q}{c}$ et $\frac{\partial^2 \mathcal{A}_q}{\partial z^2} \ll k_q \frac{\partial \mathcal{A}_q}{\partial z}$

\rightarrow équation d'onde paraxiale avec terme source quadratique en \mathcal{A}_1

$$\left\{ \nabla_{\perp} + 2ik_2 \frac{\partial}{\partial z} \right\} \mathcal{A}_2 = -\frac{2\chi^{(2)}\omega^2}{c^2} \mathcal{A}_1^2 e^{-i(k_2 - 2k_1)z}$$

Accord de phase

Pour des ondes planes $\mathcal{A}_q = \mathcal{A}_q(z)$,

$$\frac{d\mathcal{A}_2}{dz} = i \frac{\chi^{(2)} \omega}{2cn_2} \mathcal{A}_1^2 e^{-i\Delta kz} \text{ avec } \Delta k = k_2 - 2k_1$$

$$\text{soit } \mathcal{A}_2(L) = i \frac{\chi^{(2)} \omega}{2cn_2} \mathcal{A}_1^2 L \underbrace{\text{sinc}\left(\frac{\Delta k L}{2}\right)}_{\text{en sortie du cristal}} e^{-i\frac{\Delta k L}{2}}$$

en sortie du cristal en $z = L$ avec $\mathcal{A}_2(0) = 0$ à l'entrée.

$$|\mathcal{A}_2(L)| \approx \frac{\chi_{\text{eff}} \omega}{2cn_2} \mathcal{A}_1^2 L \left| \text{sinc}\left(\frac{\Delta k_{\text{eff}} L}{2}\right) \right|$$

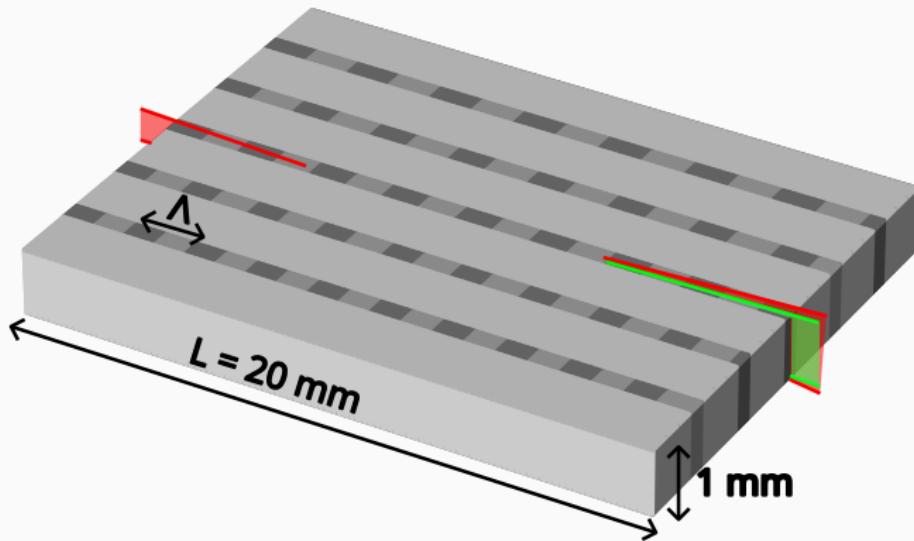
Choix du cristal doubleur

Cristal de niobate de lithium polarisé périodiquement dopé au magnésium (MgO:PPLN) :

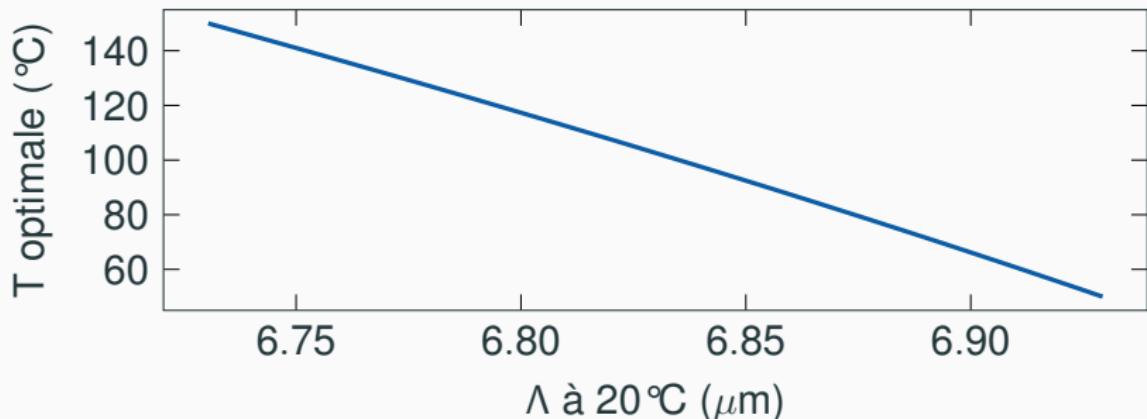
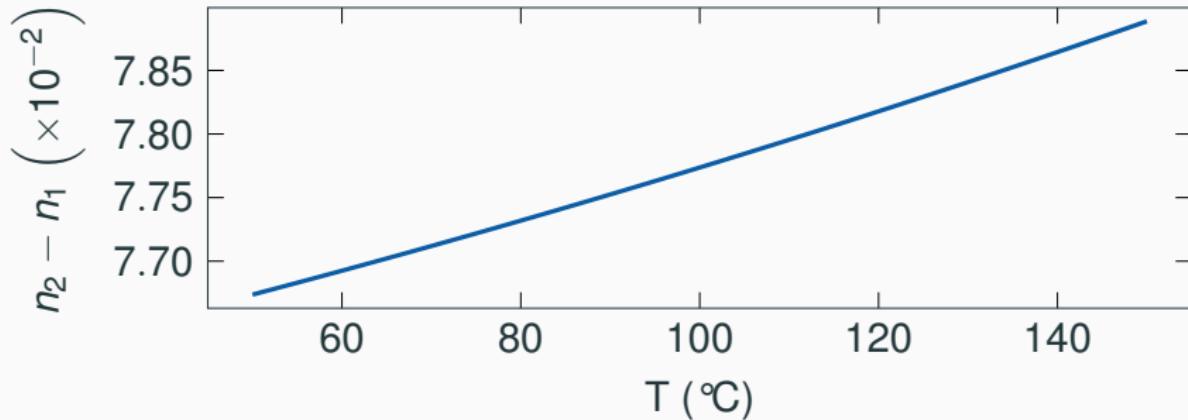
- $\chi^{(2)}$ important selon l'axe extraordinaire
- bonne efficacité de conversion
- effets non-linéaires parasites à haute intensité :
 - inhomogénéités d'indice optique et couplage entre les faisceaux (effet photoréfractif)
 - absorption de l'infrarouge induite par le vert (*green-induced infrared absorption—GRIIRA*)
- avantageux pour produire jusqu'à 2–3 watts de lumière verte

Choix du cristal doubleur

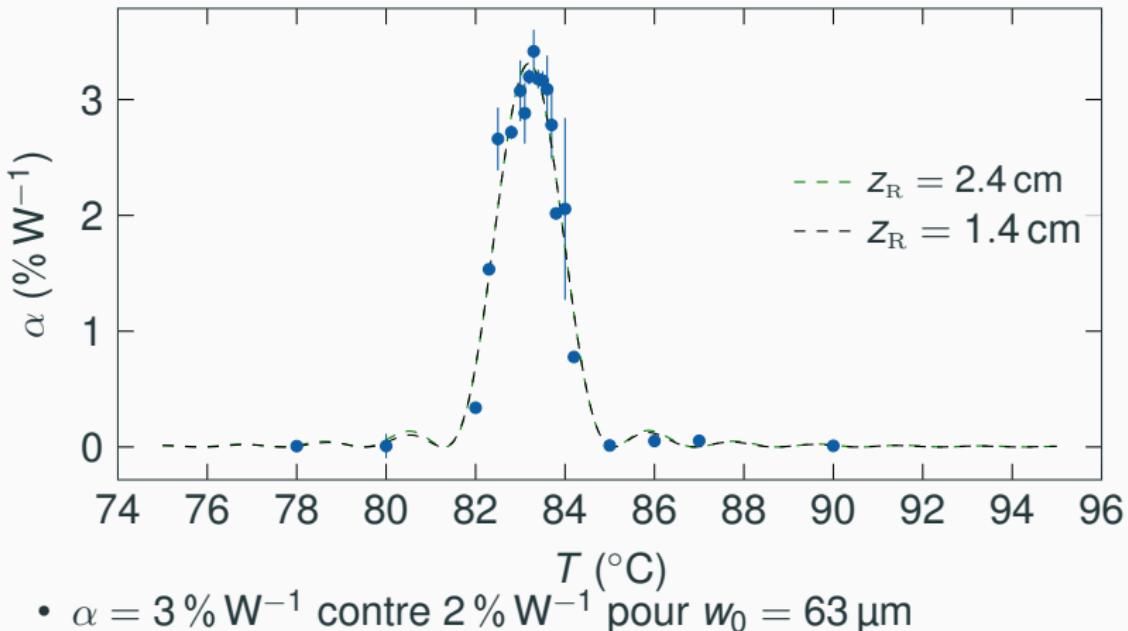
Cristal Coversion de longueur $L = 20 \text{ mm}$
 $\Lambda = 6.83, 6.86, 6.90, 6.93 \text{ et } 6.96 \mu\text{m}$



Estimation de la température optimale



Dépendance en température de l'efficacité de conversion

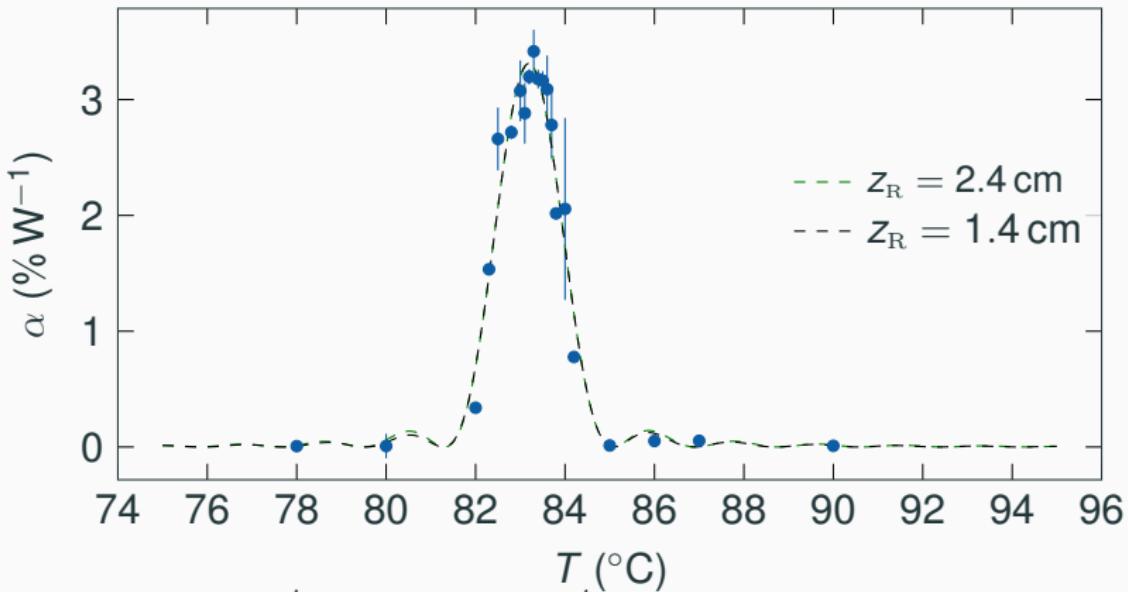


Dépendance en température de l'efficacité de conversion

w_0 (μm)	z_R (cm)	$a = \frac{L}{2z_R}$	α théorique ($\% \text{W}^{-1}$)	α mesuré ($\% \text{W}^{-1}$)
63	2.5	0.4	1.6	3.5
30	0.6	1.7	4.2	2.8
38	0.9	1.1	3.4	3.1
64	2.6	0.4	1.6	1.2

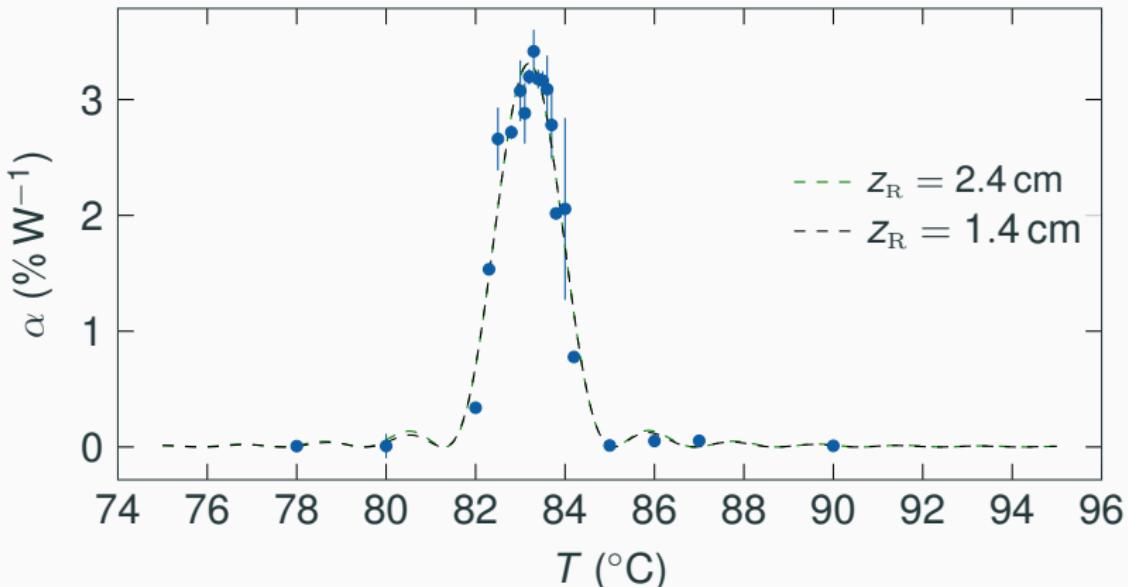
- $\alpha = 3 \% \text{W}^{-1}$ contre $2 \% \text{W}^{-1}$ pour $w_0 = 63 \mu\text{m}$

Dépendance en température de l'efficacité de conversion



- $\alpha = 3 \text{ \% W}^{-1}$ contre 2 \% W^{-1} pour $w_0 = 63 \mu\text{m}$
- $\delta T \text{ FWHM} \approx 1.6^\circ\text{C}$ contre 1.2°C

Dépendance en température de l'efficacité de conversion



- $\alpha = 3 \text{ \% W}^{-1}$ contre 2 \% W^{-1} pour $w_0 = 63 \mu\text{m}$
- $\delta T \text{ FWHM} \approx 1.6^\circ\text{C}$ contre 1.2°C
- ajustement de $\frac{\partial(\Delta k_{\text{eff}})}{\partial T}$: $1.7 \text{ cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$
raisonnable selon la précision du dopage

Efficacité de conversion à haute puissance

Λ (μm)	z_R (cm)	théorique		basse puissance		haute puissance	
		T ($^{\circ}\text{C}$)	α ($\% \text{W}^{-1}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	α ($\% \text{W}^{-1}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	α ($\% \text{W}^{-1}$)
6.9	0.6	66.0	4.2	84.0	2.8	77.0	2.3
6.9	0.9	66.0	3.4	84.2	3.1	75.0	2.2
6.9	2.6	66.2	1.6	84.0	1.2	75.0	2.7

- Effets parasites à haute intensité réduisent l'efficacité de conversion

Efficacité de conversion à haute puissance

Λ (μm)	z_R (cm)	théorique		basse puissance		haute puissance	
		T ($^{\circ}\text{C}$)	α ($\% \text{W}^{-1}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	α ($\% \text{W}^{-1}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	α ($\% \text{W}^{-1}$)
6.9	0.6	66.0	4.2	84.0	2.8	77.0	2.3
6.9	0.9	66.0	3.4	84.2	3.1	75.0	2.2
6.9	2.6	66.2	1.6	84.0	1.2	75.0	2.7

- Effets parasites à haute intensité réduisent l'efficacité de conversion
- Augmenter le waist pour diminuer l'intensité et donc les effets parasites

Efficacité de conversion à haute puissance

Λ (μm)	z_R (cm)	théorique		basse puissance		haute puissance	
		T ($^{\circ}\text{C}$)	α ($\% \text{W}^{-1}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	α ($\% \text{W}^{-1}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	α ($\% \text{W}^{-1}$)
6.9	0.6	66.0	4.2	84.0	2.8	77.0	2.3
6.9	0.9	66.0	3.4	84.2	3.1	75.0	2.2
6.9	2.6	66.2	1.6	84.0	1.2	75.0	2.7

- Effets parasites à haute intensité réduisent l'efficacité de conversion
- Augmenter le waist pour diminuer l'intensité et donc les effets parasites
- Doublage extrêmement instable