

Un laser fonctionnant à l'énergie solaire basé sur l'effet de serre

Jean-François Bisson

Département de physique et d'astronomie
Université de Moncton, Canada

Le 13 mars 2019

Le Japon



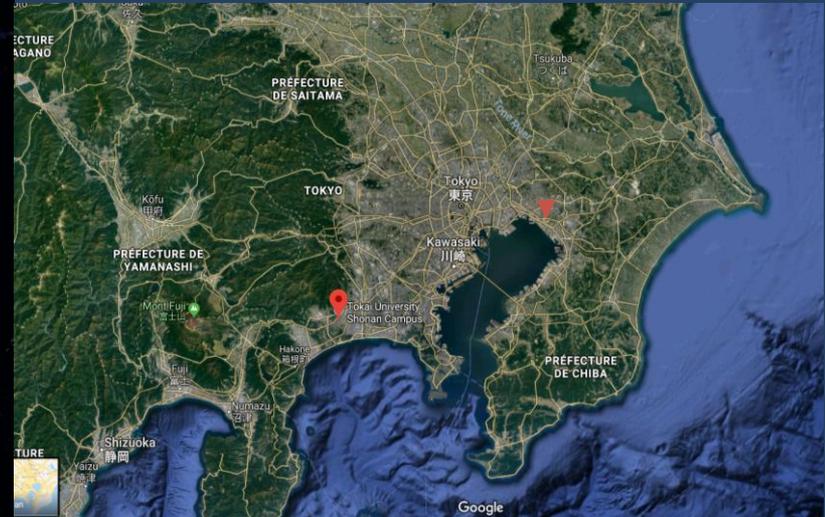
Le Mont Fuji - Les cerisiers



Le Japon traditionnel



Ma sabbatique au Japon

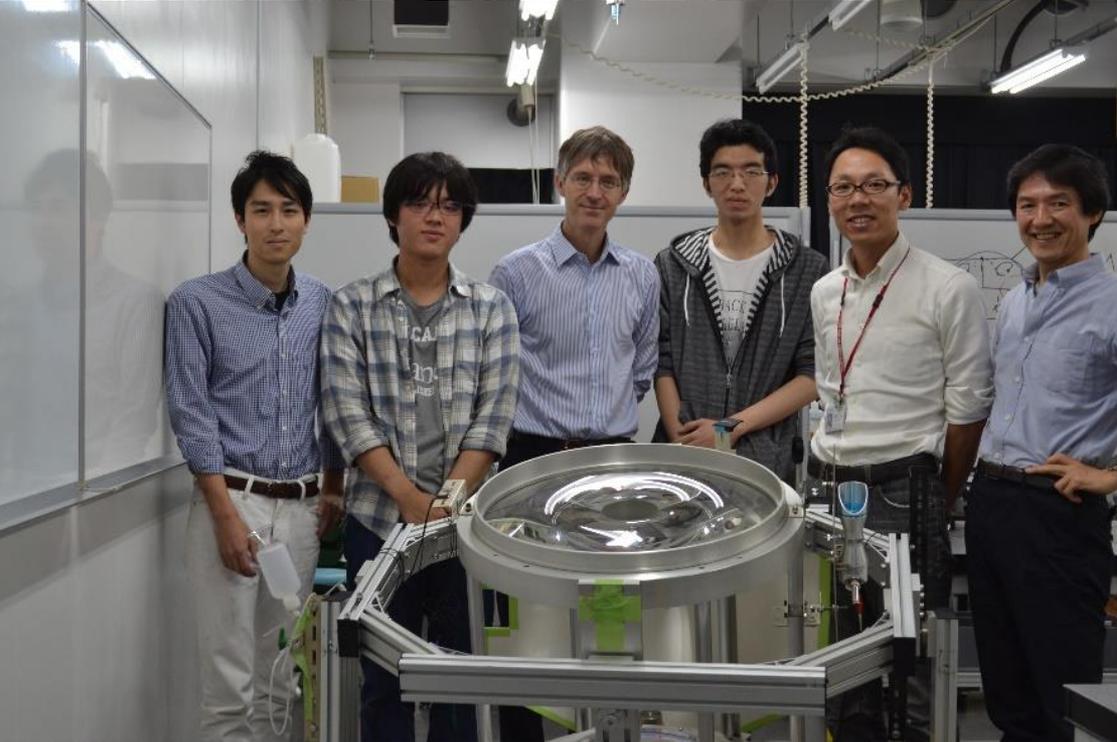


▼ Université Chiba (jan.-avril 2018)



Université Tokai (mai-juil. 2018)

L'université Tokai



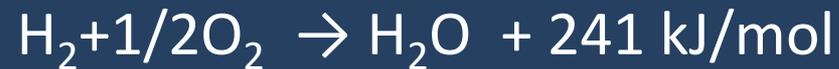
L'énergie solaire pour la production d'électricité

- Facilement accessible et abondante ($>10^{17}$ W)
(consommation mondiale moyenne $< 10^{15}$ W)
- Peu polluante
- Source intermittente : utilisée en combinaison avec d'autres méthodes de génération ou avec une batterie de recharge

Pourquoi un laser pompé directement à l'énergie solaire?

Le cycle du magnésium comme source d'énergie propre

Proposé par Yabe et al., Appl. Phys. Lett. 89, 261107 (2006)



Mg: 43 GJ/m³ Lithium : 1-3 GJ/m³ Essence de véhicule: 34 GJ /m³

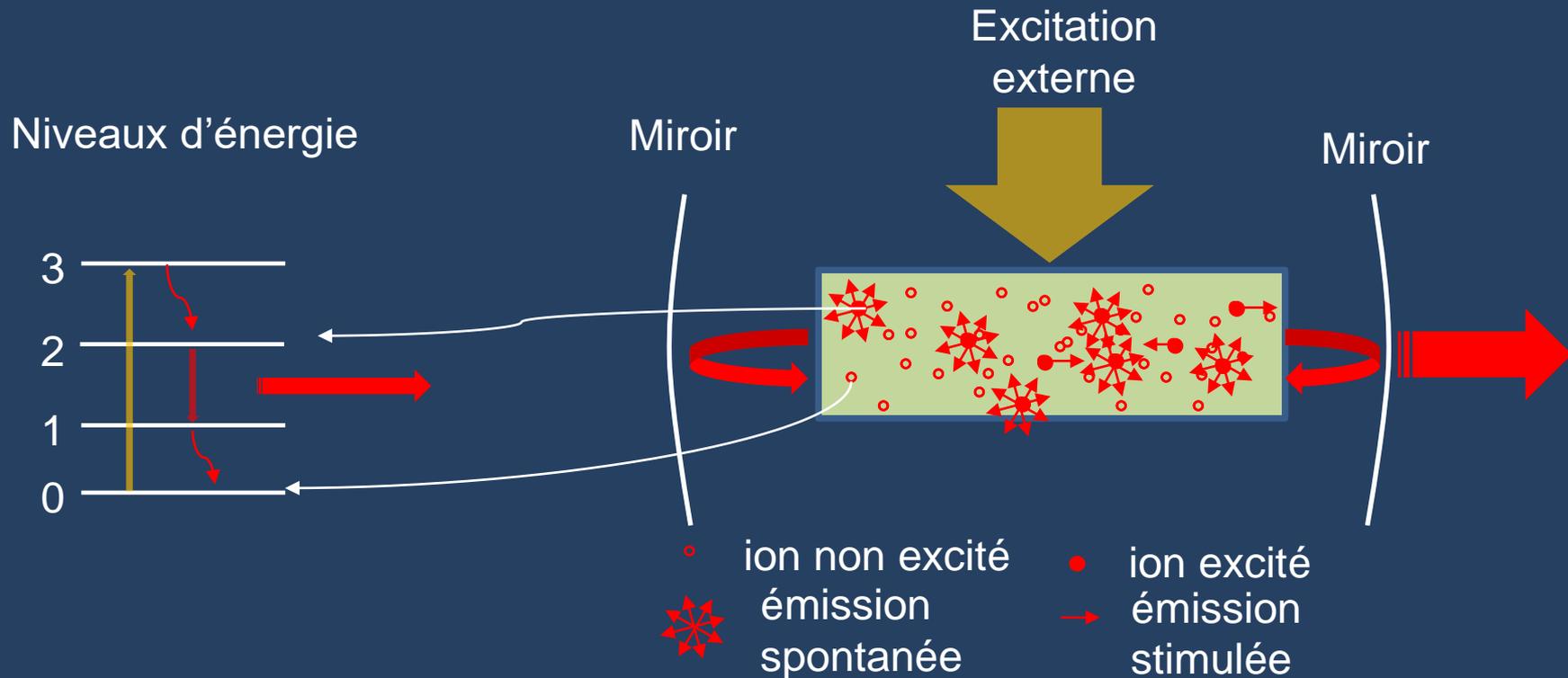


Atteindre une telle température avec le rayonnement solaire requiert une densité d'environ **1 kW/mm²** (c'est 10⁶ fois la densité du rayonnement solaire (**1 kW/m²**))

Or, la concentration maximale théorique avec des concentrateurs est autour de 46000.
Solution: convertir la lumière solaire en lumière cohérente (laser).



Le laser: un oscillateur de lumière

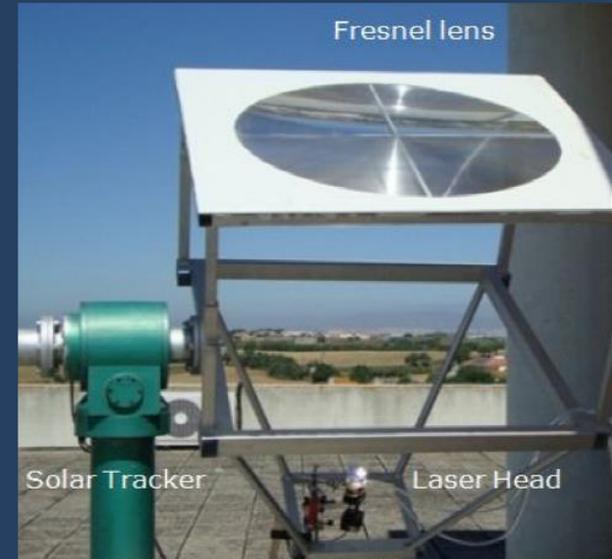


Avec un laser, on peut atteindre 1 kW/m^2 avec une puissance de quelques mW.

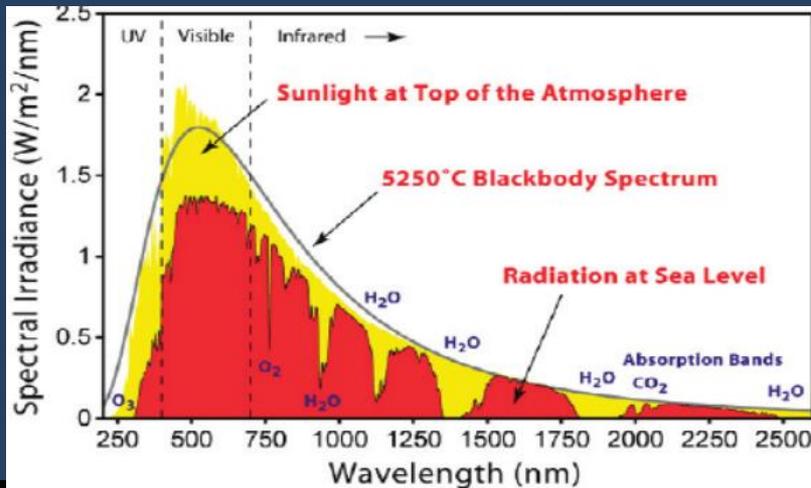
Le laser pompé à l'énergie solaire

Lumière solaire:

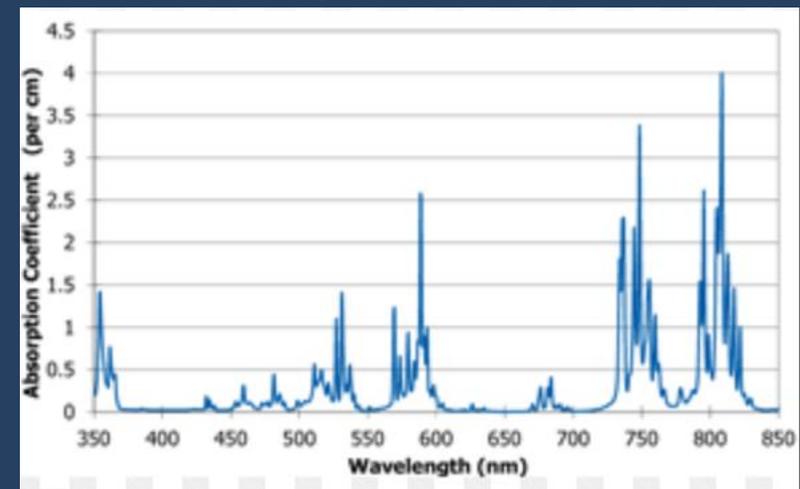
- Source peu cohérente:
 - Faible densité de puissance par unité de surface (environ 1 mW/mm^2)
 - Spectre large (proche de celui d'un corps noir à 6000K)
- Mal adapté à l'excitation d'ions luminescents dont les spectres d'absorption sont étroits.



Liang, Almeida, Opt. Express, 19(27), 2640-2645, 2011



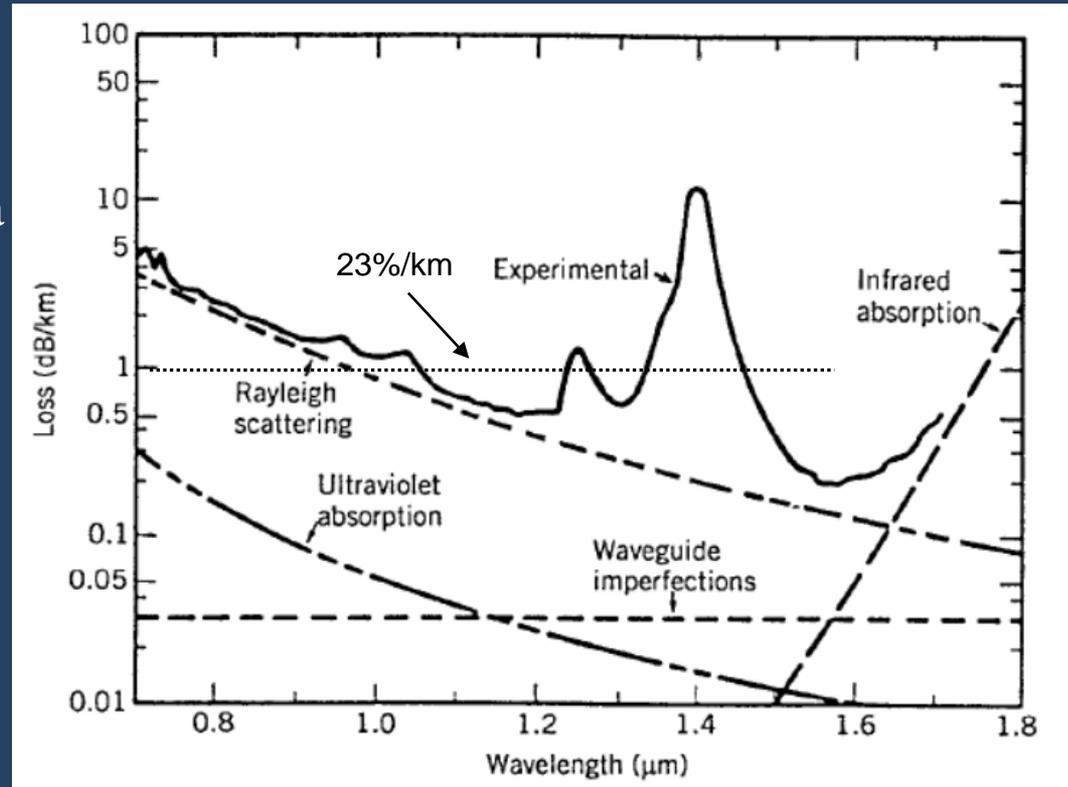
Absorption Nd^{3+} : YAG



L'approche proposée

<https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95052294-optical-fiber-attenuation>

- Plutôt que de concentrer la lumière solaire, on peut choisir un matériau plus transparent : la fibre optique.
- Évident? Non, car il faut être capable d'injecter la lumière dans un tout petit cœur qui fait 10 micromètres de diamètre.

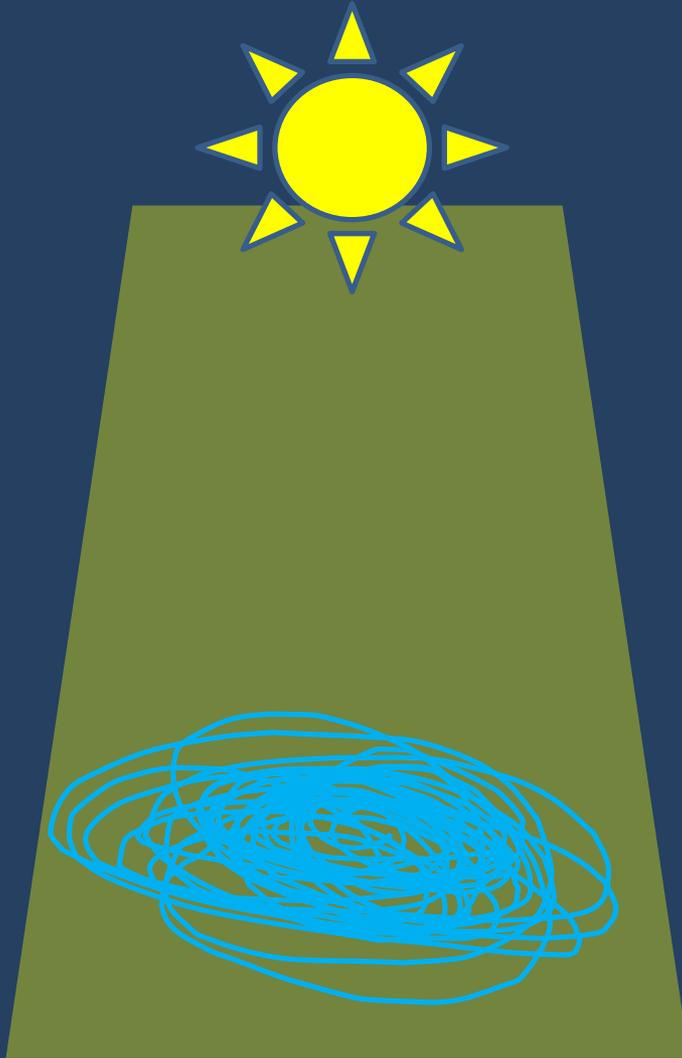


Cœur de 5-10 μm



Longueur en principe illimitée
(> 1 km)

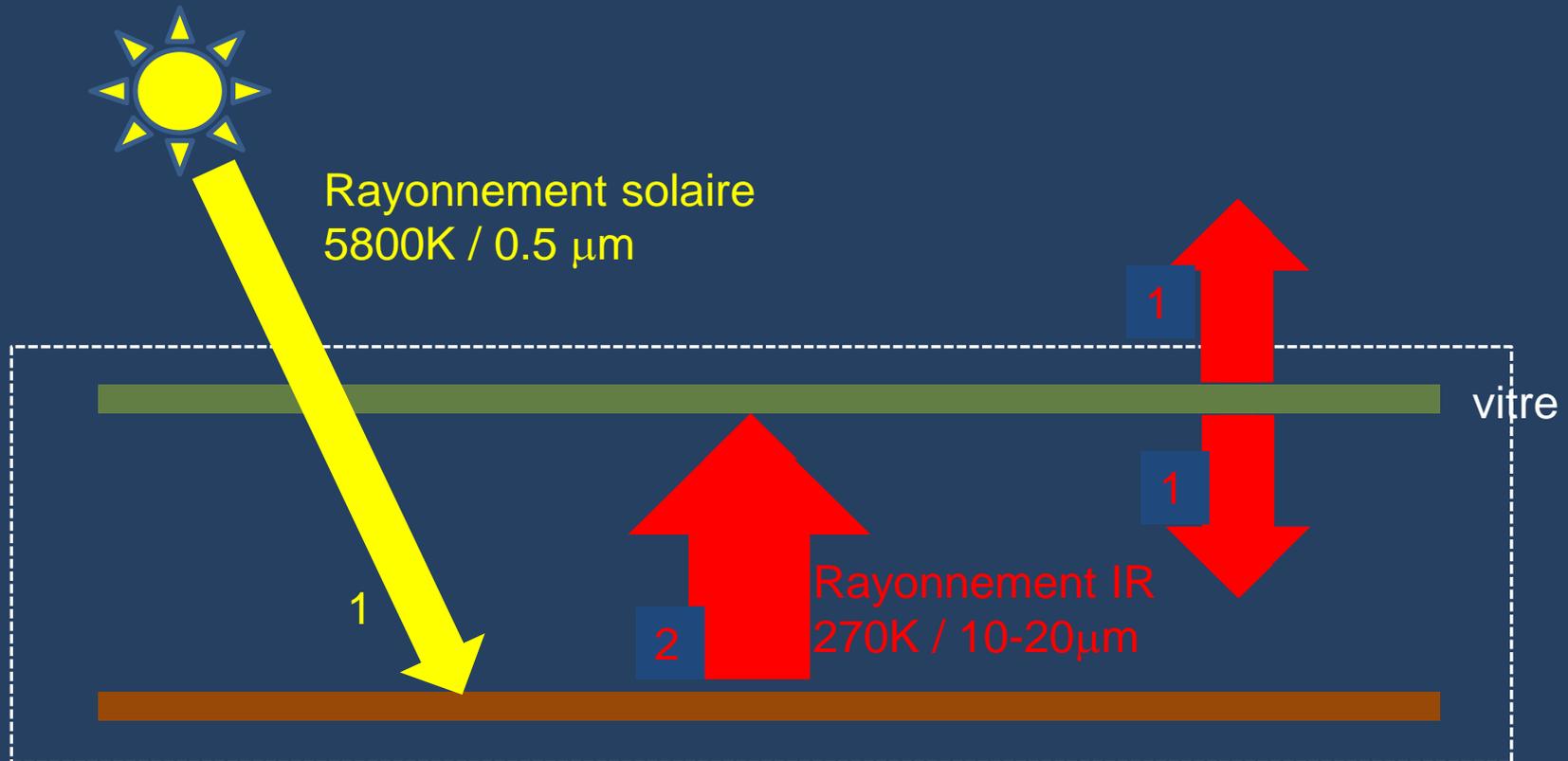
Excitation transverse sans concentrateur



1. Pour une fibre de silice dopée au néodyme, l'exposition directe au soleil sans concentrateur est insuffisante d'un facteur ≈ 30 .
2. Le cœur de la fibre étant très petit, une infime fraction du rayonnement incident qui le traverse y est absorbé.
3. Solution: recirculer le rayonnement solaire dans la fibre un grand nombre de fois pour augmenter l'absorption.

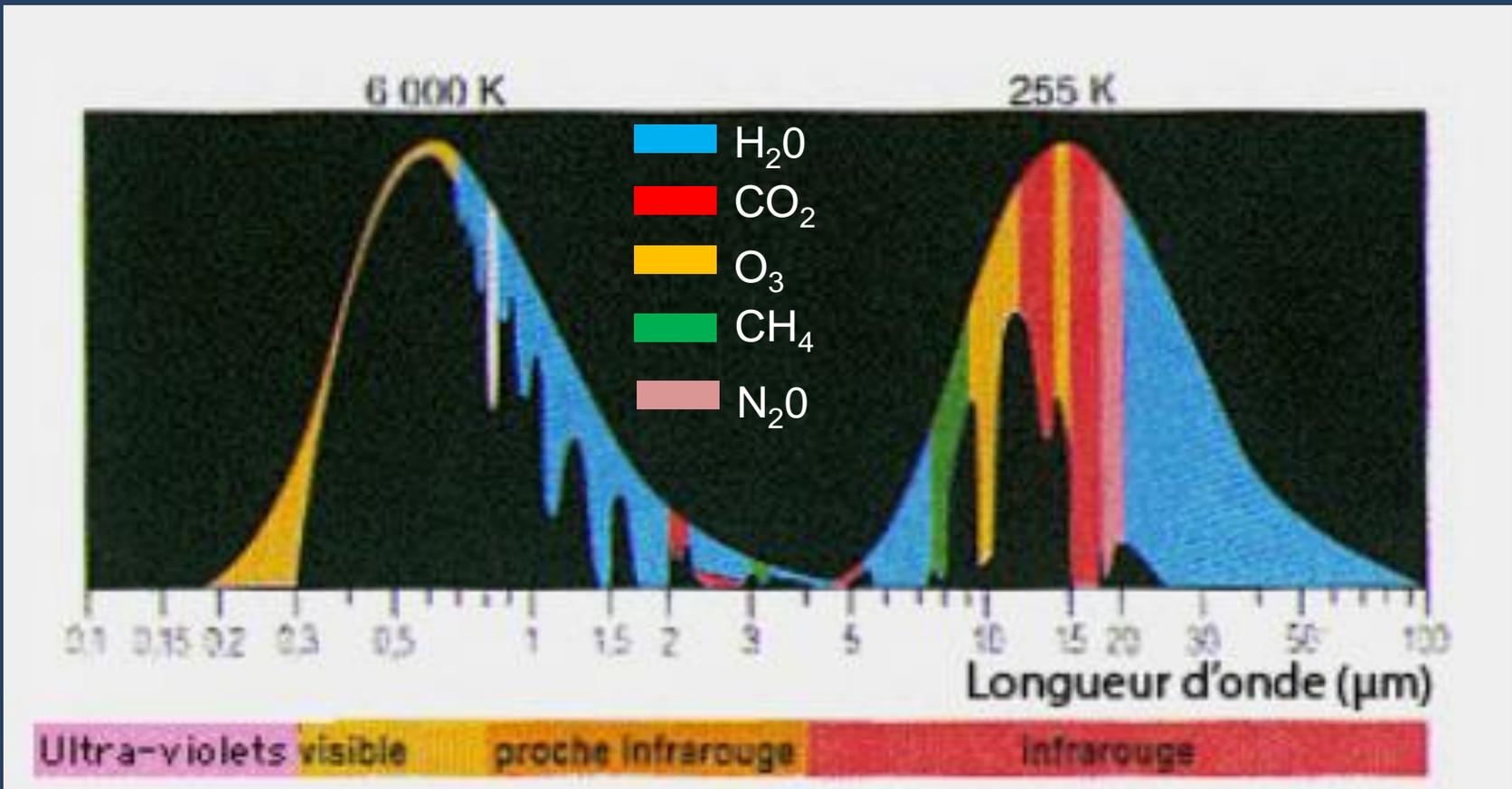
K. Ueda and A. Liu, Laser Phys. 8, 774 (1998).

L'effet de serre



- En réalité, l'échauffement dans une serre est causé davantage par le piégeage de l'air chaud que par l'effet de serre en tant que tel (R. Wood, 1909)

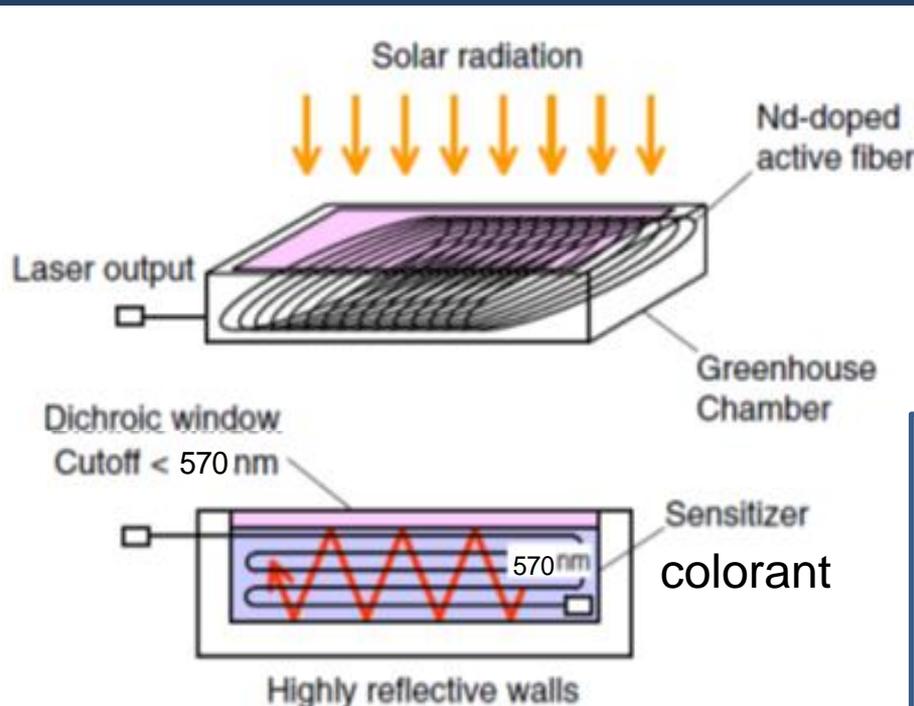
L'effet de serre sur Terre



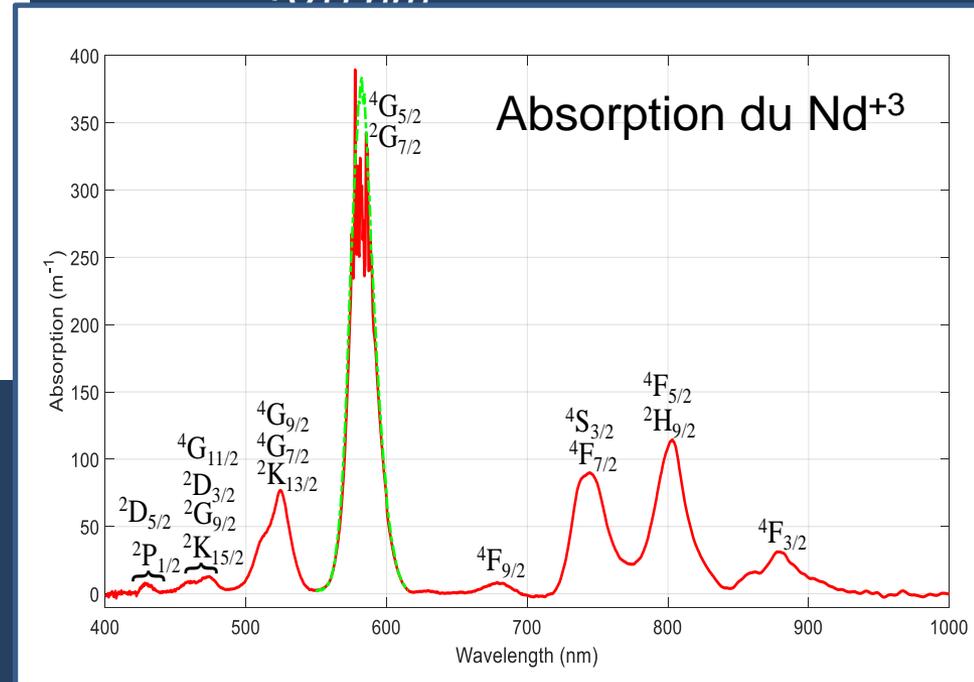
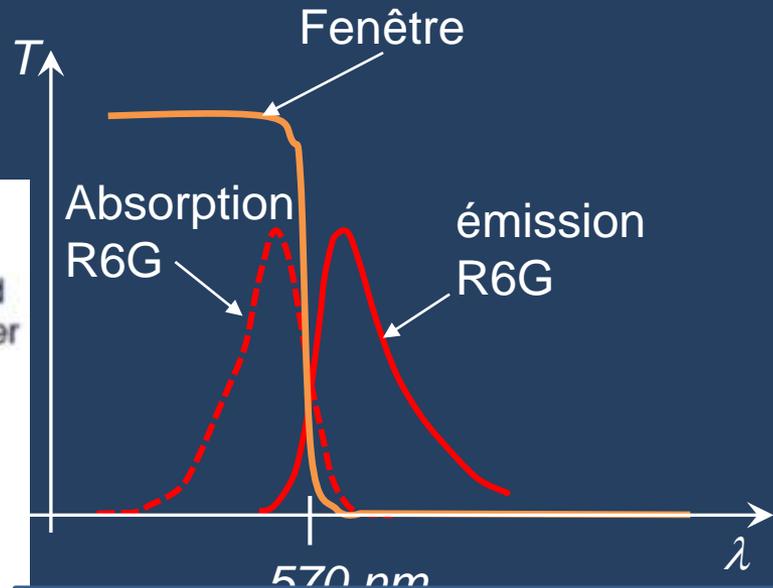
Source : Robert Sadourny, le Climat de la Terre, Flammarion, Collection Domino

- L'effet de serre, aux 2/3 dû à la vapeur d'eau, est bénéfique car il permet de porter la température moyenne du globe à 15°C plutôt que les -18°C s'il était absent.
- L'augmentation rapide de la concentration des gaz à effet de serre cause cependant une augmentation rapide de la température qui détruit notre écosystème.

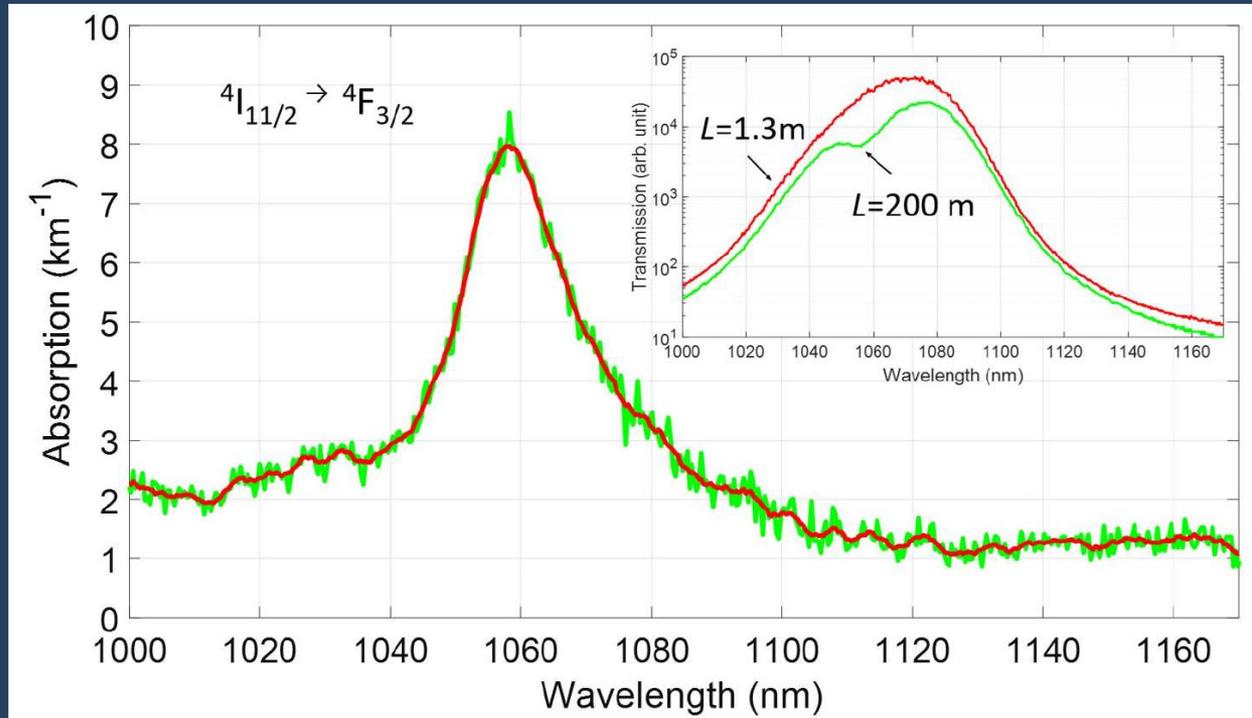
Chambre à effet de serre pour le laser fibré



Bisson, Ueda, APLS 2004, paper TuE-B4
Endo, Bisson, Jpn. J. Appl. Phys. 2012



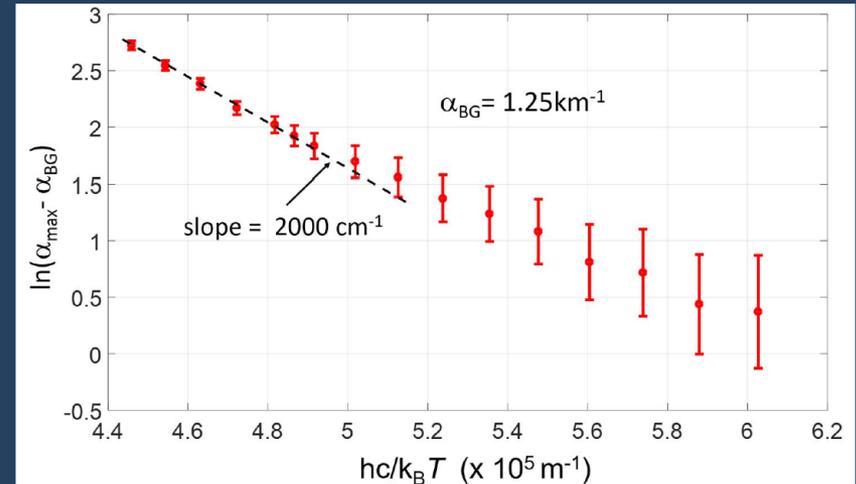
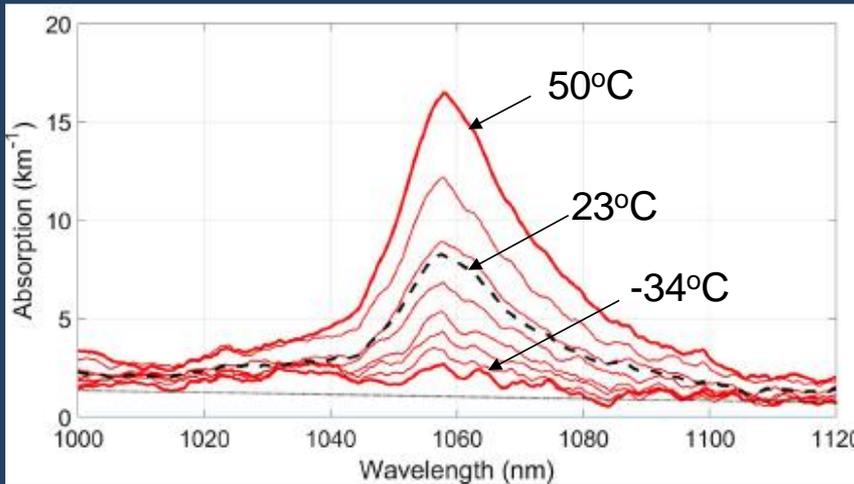
Mesure des pertes à la longueur d'onde d'émission



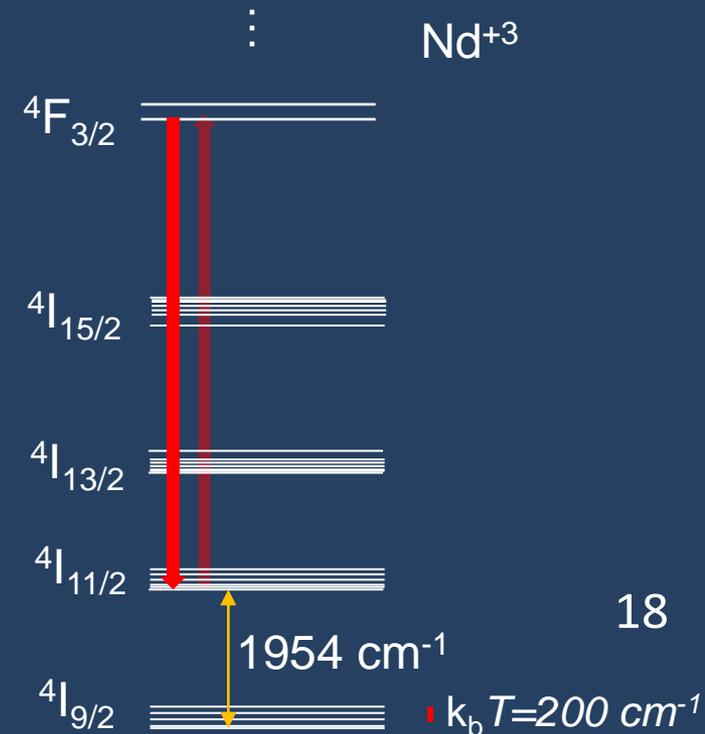
Cette très faible absorption est mesurable parce que la longueur traversée est très grande.

Quelle est l'origine de cette absorption?

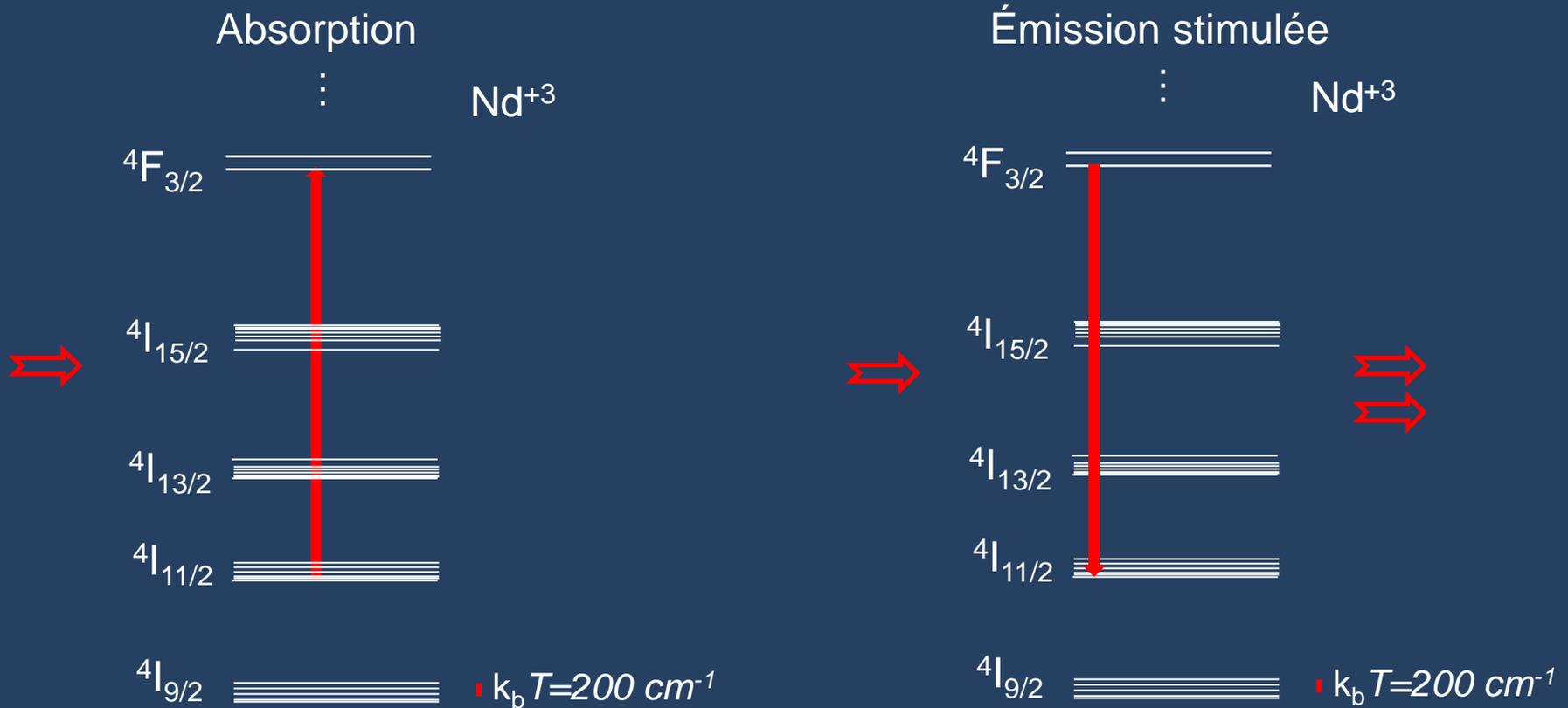
L'absorption en fonction de la température



- L'évolution de l'absorption avec la température suit une loi de Boltzmann, c.-à-d. de la forme: $\exp(-\Delta E/k_b T)$.
- $N_1 = N_{Nd} \exp(-\Delta E/k_b T)$
- Le coefficient d'absorption: $\alpha(\lambda) = N_1(T) \sigma_{\text{abs}}(\lambda)$
- La pente nous donne l'énergie $\Delta E \approx 2000 \text{ cm}^{-1}$.
- Cette valeur correspond à l'écart entre le niveau fondamental et le niveau bas de la transition laser de l'ion.



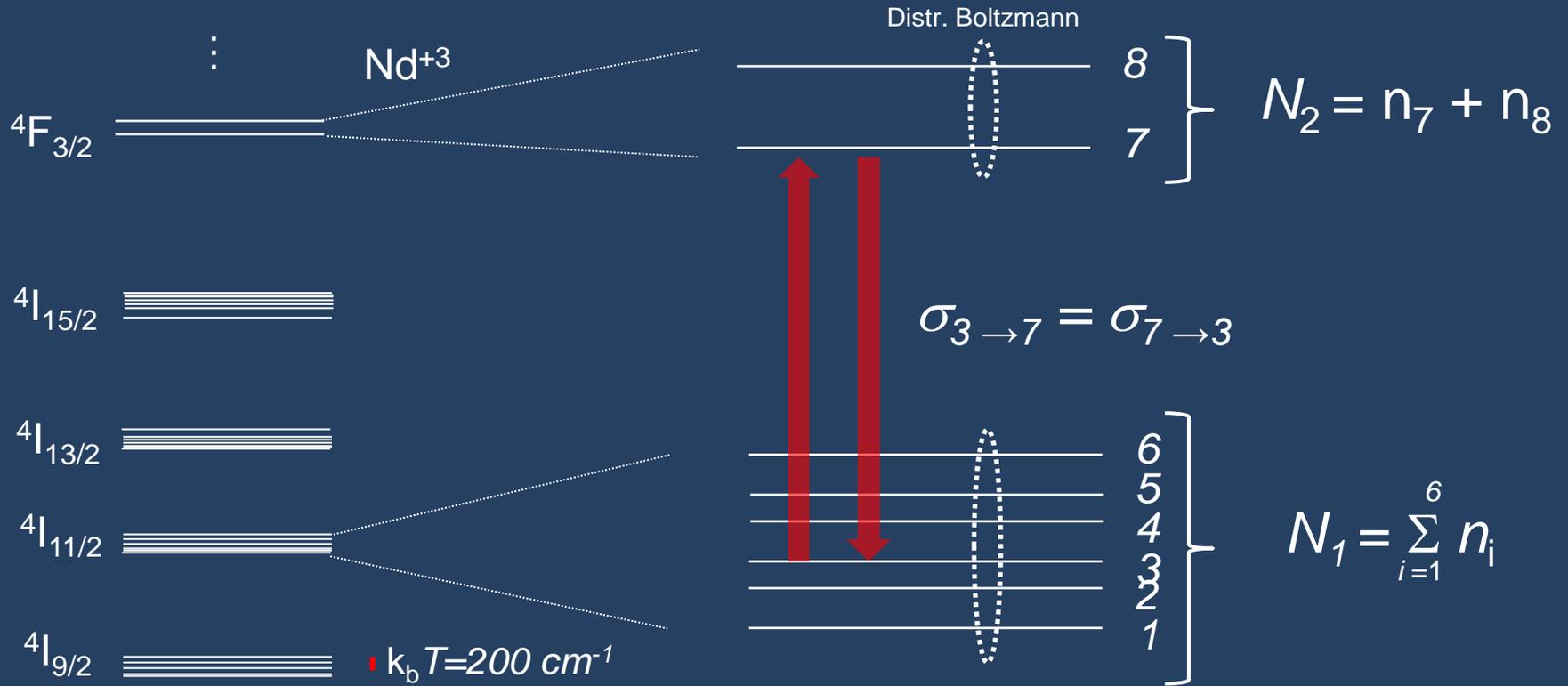
L'amplification de la lumière



L'amplification ou l'atténuation dépend du bilan de l'absorption et de l'émission stimulée

$$\alpha = \sigma_{\text{abs}} N_1 - \sigma_{\text{émis}} N_2$$

Relation entre σ_{abs} et $\sigma_{\text{émis}}$



$$\alpha(\lambda) = \sigma_{\text{abs}}(\lambda) N_1 - \sigma_{\text{émis}}(\lambda) N_2$$

$$\sigma_{i \rightarrow j} = \sigma_{j \rightarrow i}$$

Équilibre thermodynamique à l'intérieur de chaque niveau

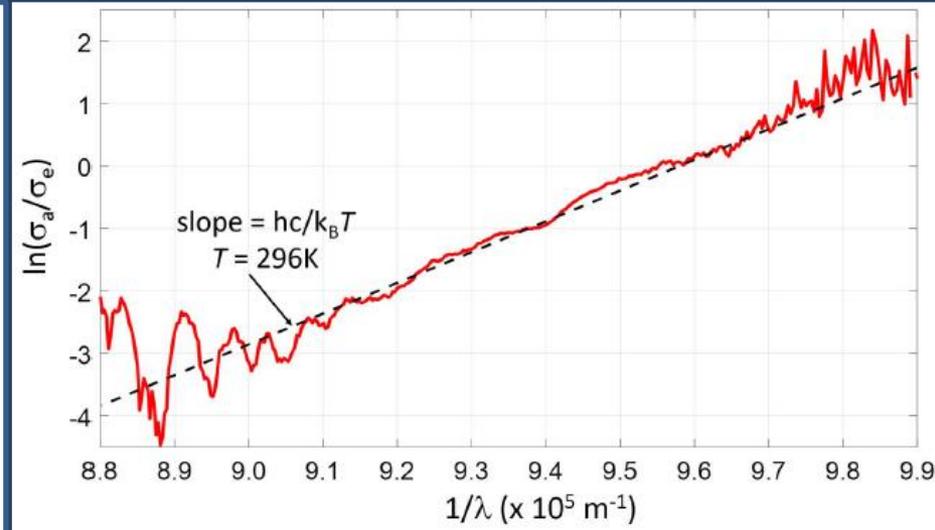
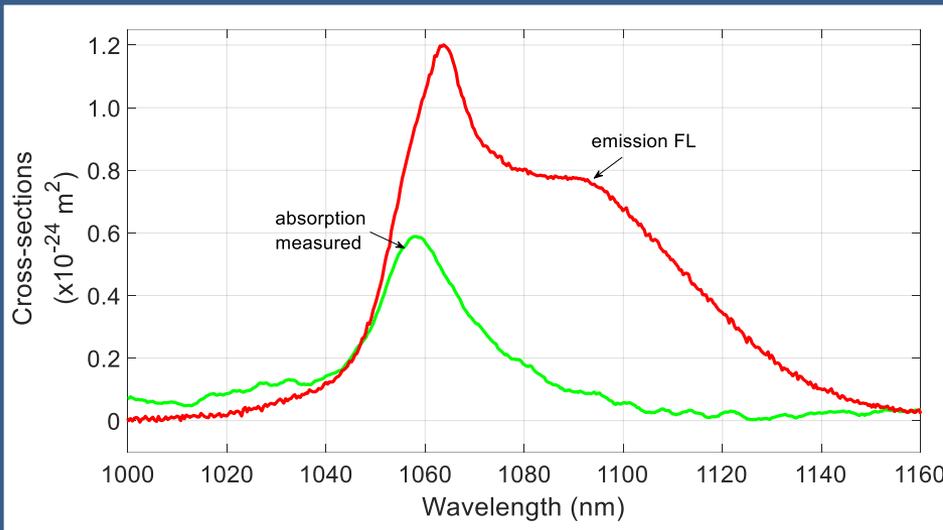
$$\sigma_{\text{émis}}(\lambda) / \sigma_{\text{abs}}(\lambda) = \exp[-(h\nu - E_0)/kT]$$

Principe de réciprocité de McCumber

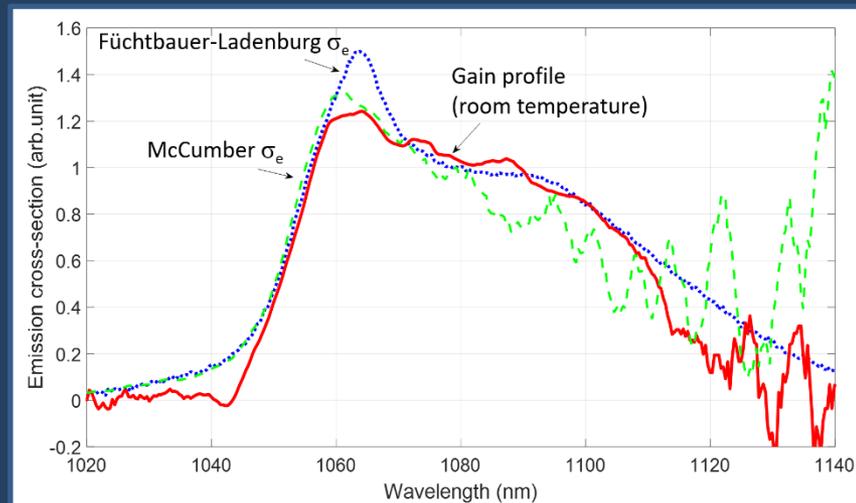


Application du principe de McCumber

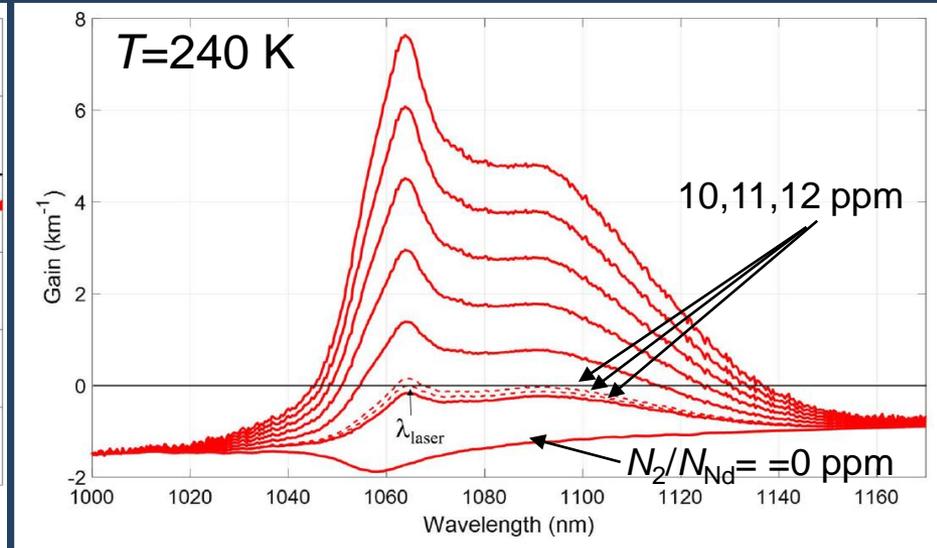
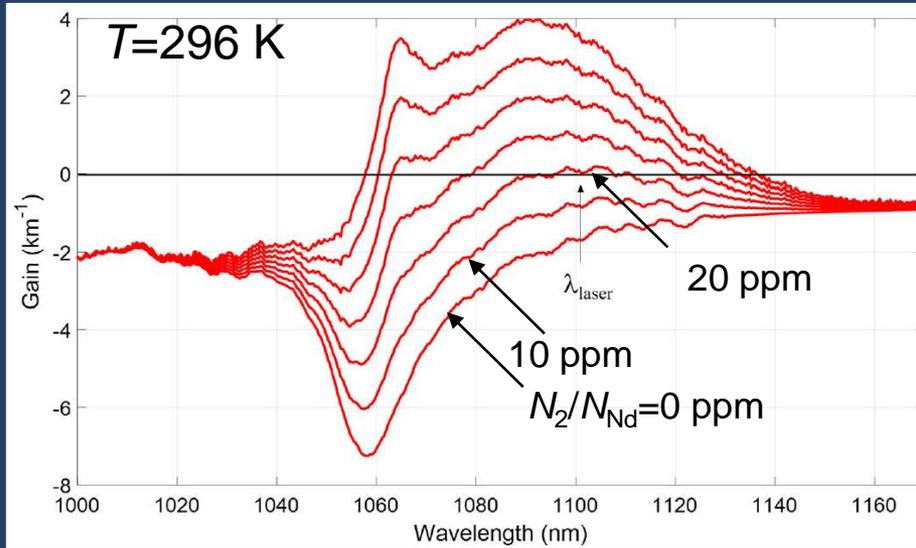
$$\sigma_{\text{émis}}(\lambda) / \sigma_{\text{abs}}(\lambda) = \exp[-(h\nu - E_0)/kT]$$



Coefficient d'amplification mesuré lorsque la fibre est exposée au rayonnement solaire



Courbes de gain



- En réduisant la température, on réduit l'absorption et du même coup la population de l'état excité requise pour obtenir un coefficient d'amplification positif.
- La densité de puissance solaire est aussi réduite

Applications

- Production d'énergie propre (cycle du Mg)
- Applications dans l'aviation
(un environnement froid et ensoleillé)
 - Le gyroscope autonome (détecter les rotations)
 - La fabrication autonome d'hydrogène pour piles à combustible par l'hydrolyse de l'eau par laser
- ...