

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

Jean-François Bisson

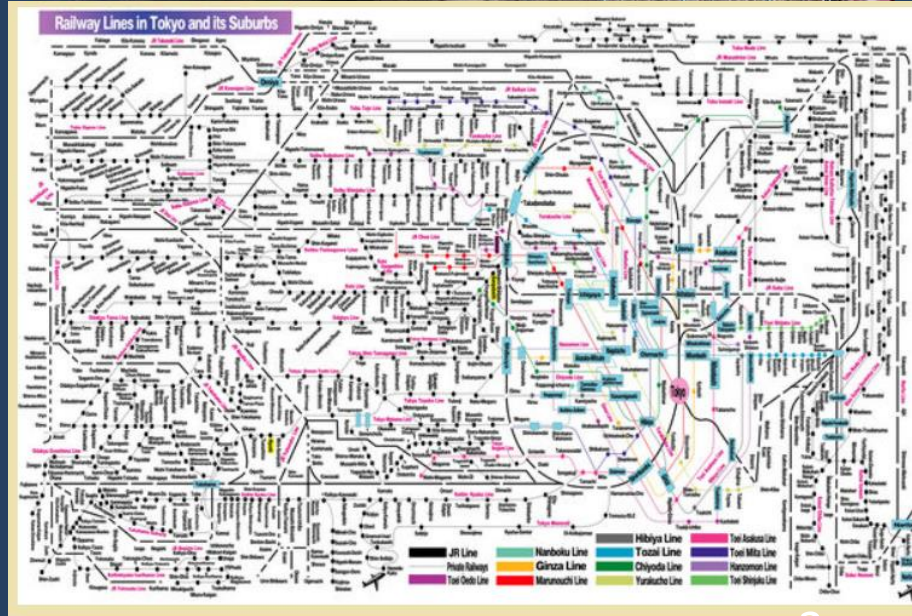
Département de physique et d'astronomie  
Université de Moncton, Canada

Le 13 mars 2019

# Le Japon



# La capitale



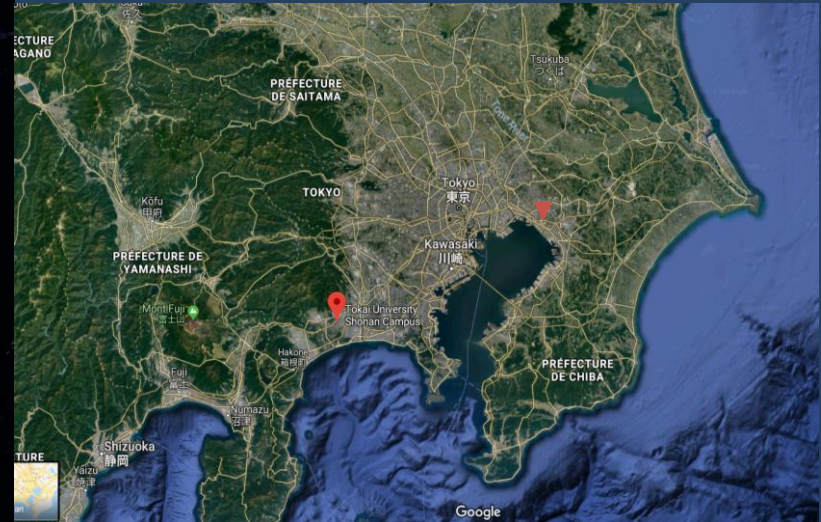
# Le Mont Fuji - Les cerisiers



# Le Japon traditionnel



# Ma sabbatique au Japon

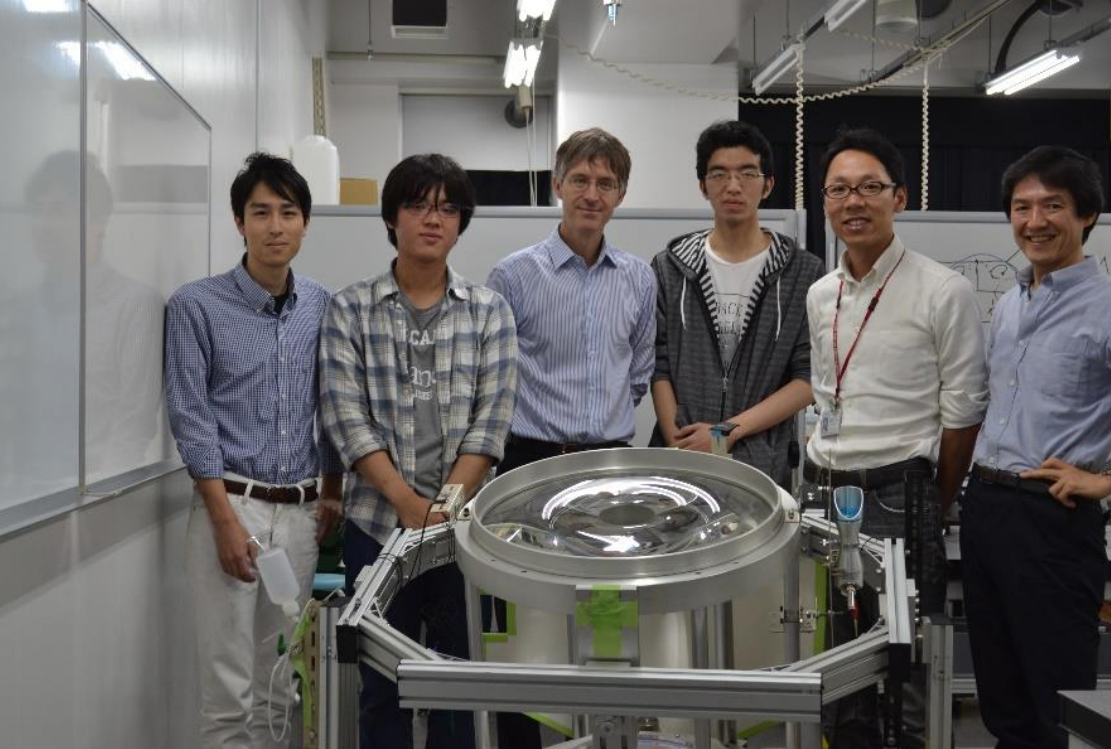


▼ Université Chiba (jan.-avril 2018)



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/m<sup>3</sup> Lithium : 1-3 GJ/m<sup>3</sup> Essence de véhicule: 34 GJ /m<sup>3</sup>

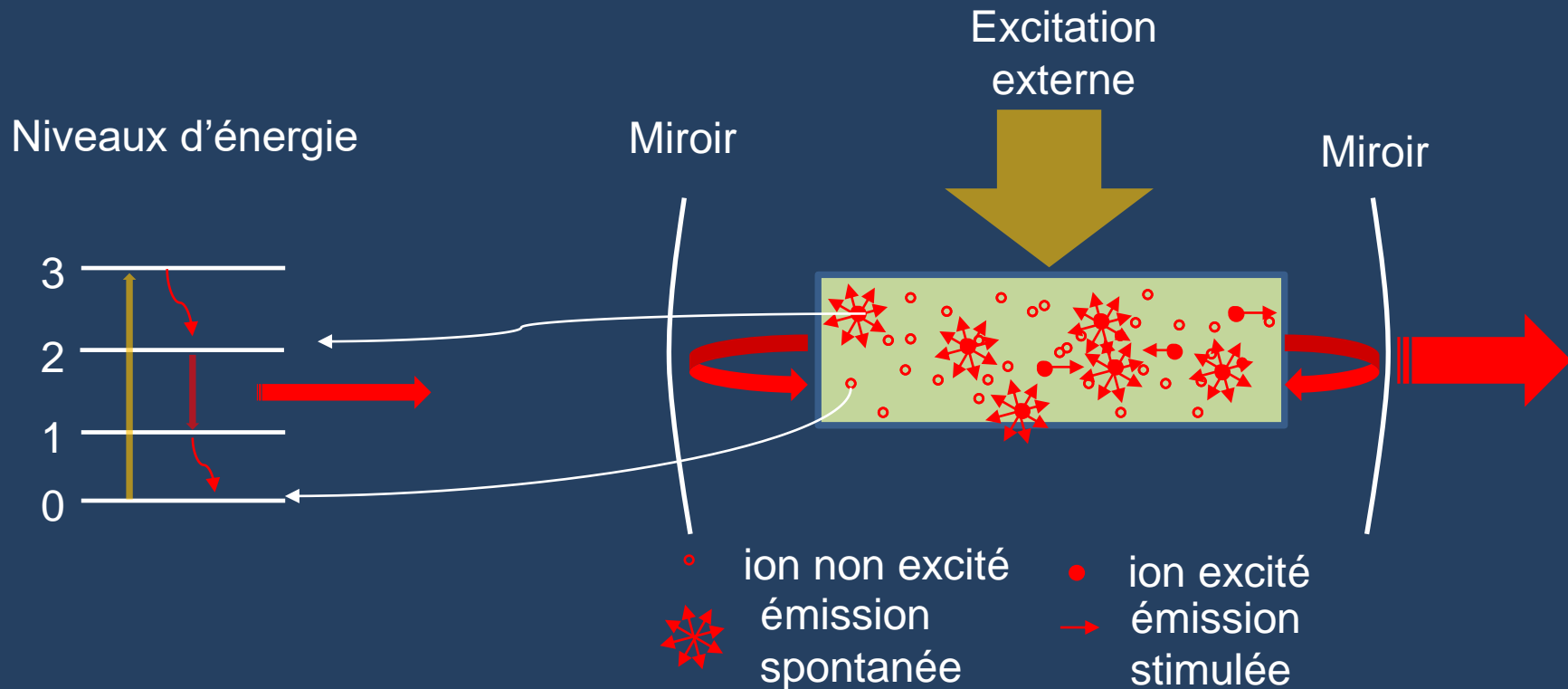


Atteindre une telle température avec le rayonnement solaire requiert une densité d'environ **1 kW/mm<sup>2</sup>** (c'est 10<sup>6</sup> fois la densité du rayonnement solaire (**1 kW/m<sup>2</sup>**))

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

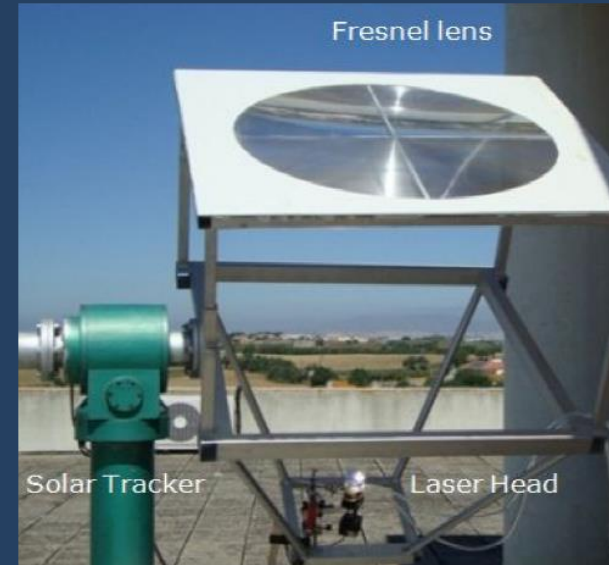


Avec un laser, on peut atteindre  $1\text{ kW/m}^2$  avec une puissance de quelques mW.

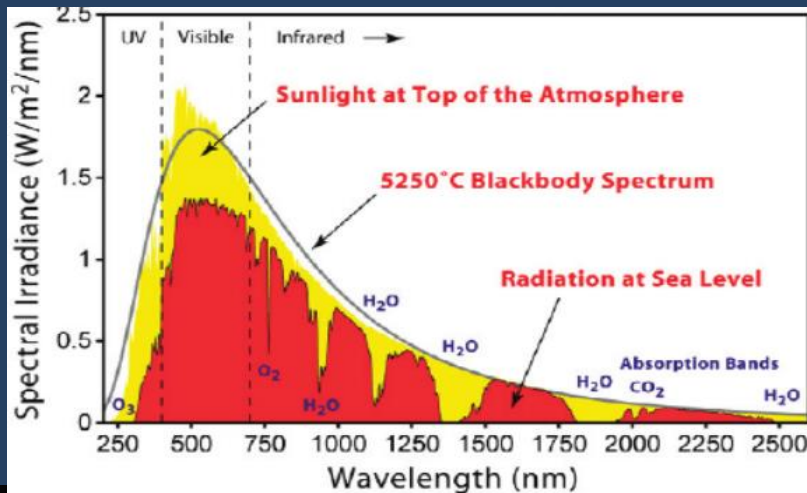
# Le laser pompé à l'énergie solaire

## Lumière solaire:

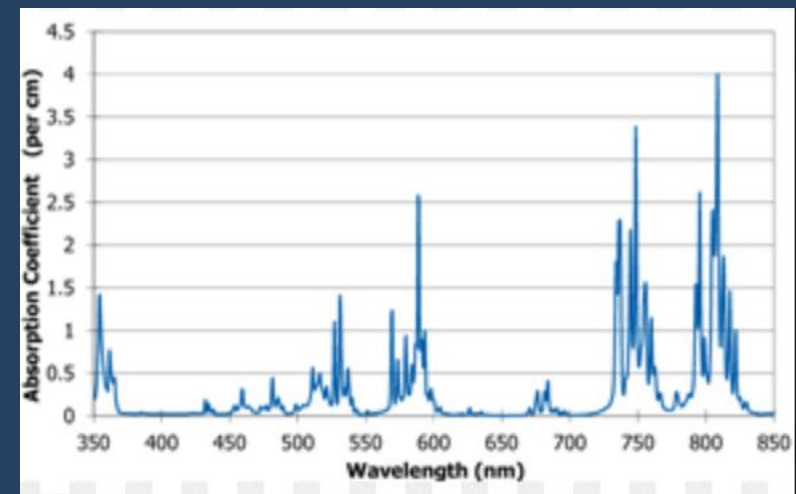
- Source peu cohérente:
  - Faible densité de puissance par unité de surface (environ  $1 \text{ mW/mm}^2$ )
  - Spectre large (proche de celui d'un corps noir à 6000K)
- Mal adapté à l'excitation d'ions luminescents dont les spectres d'absorption sont étroits.



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



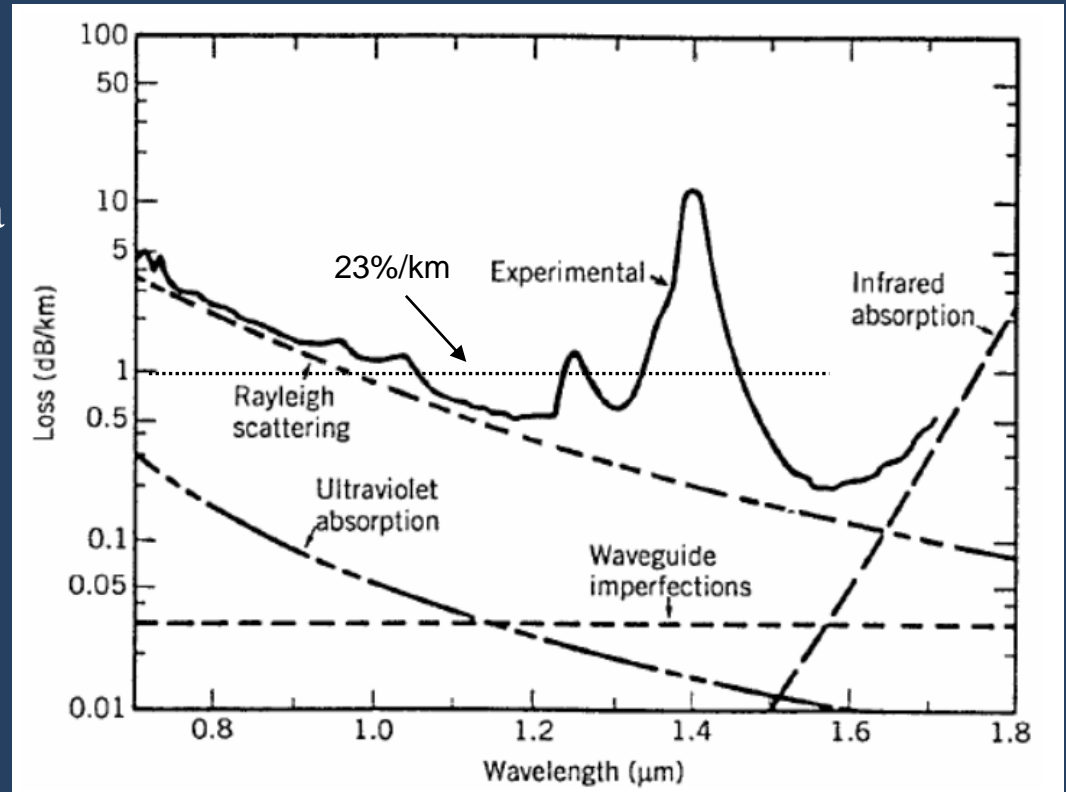
## Absorption $\text{Nd}^{3+}$ : YAG



# 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.

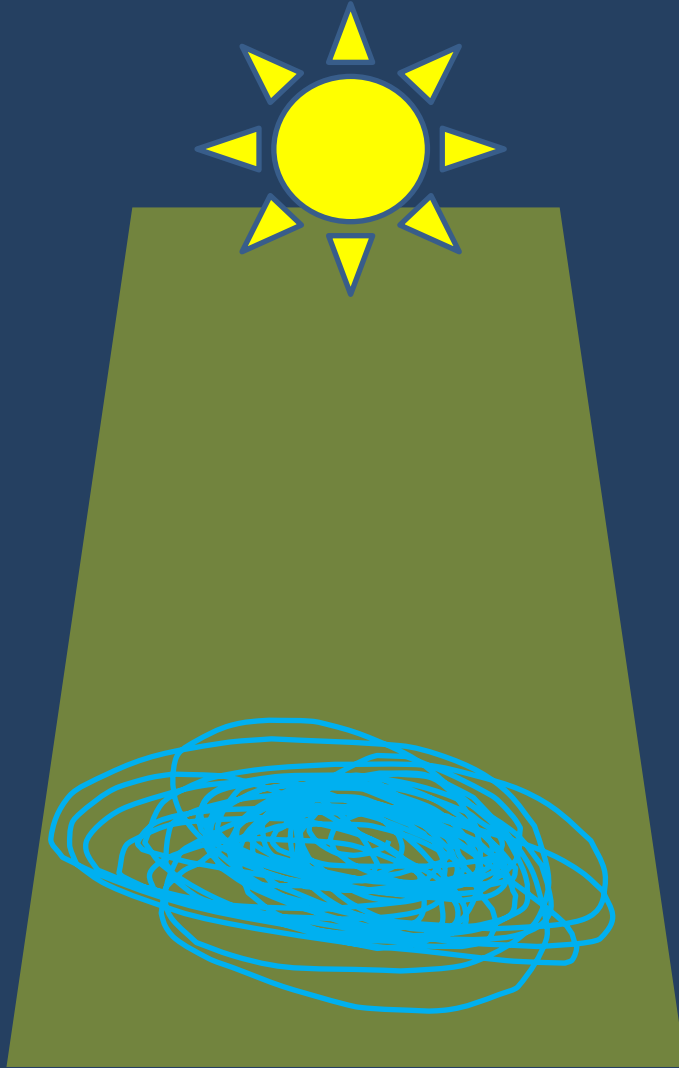


Cœur de 5-10 μm



Longueur en principe illimitée  
(> 1 km)

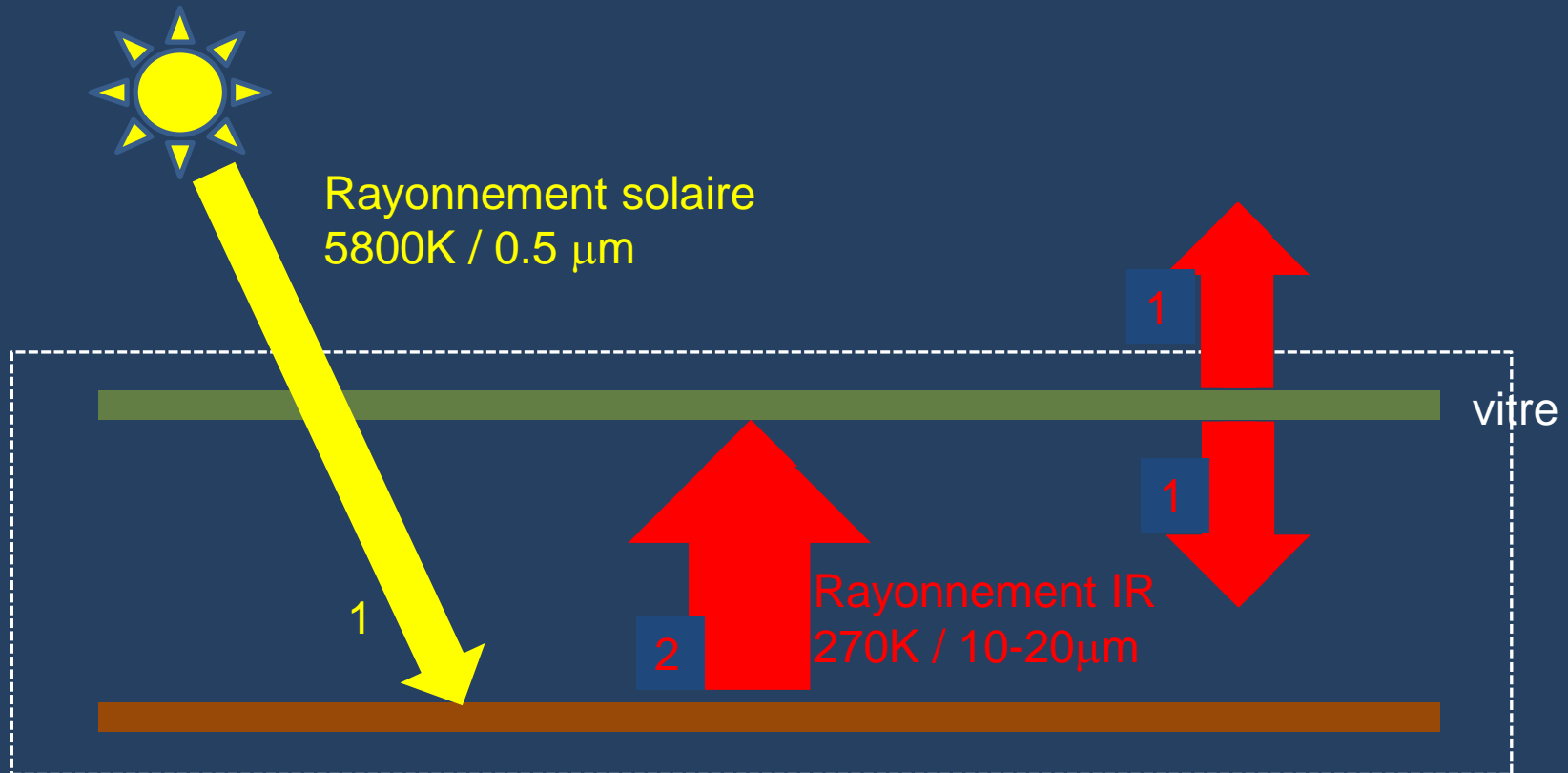
# Excitation transverse sans concentrateur



1. Pour une fibre de silice dopée au néodyme, l'exposition directe au soleil sans concentrateur est insuffisante d'un facteur  $\approx 30$ .
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.

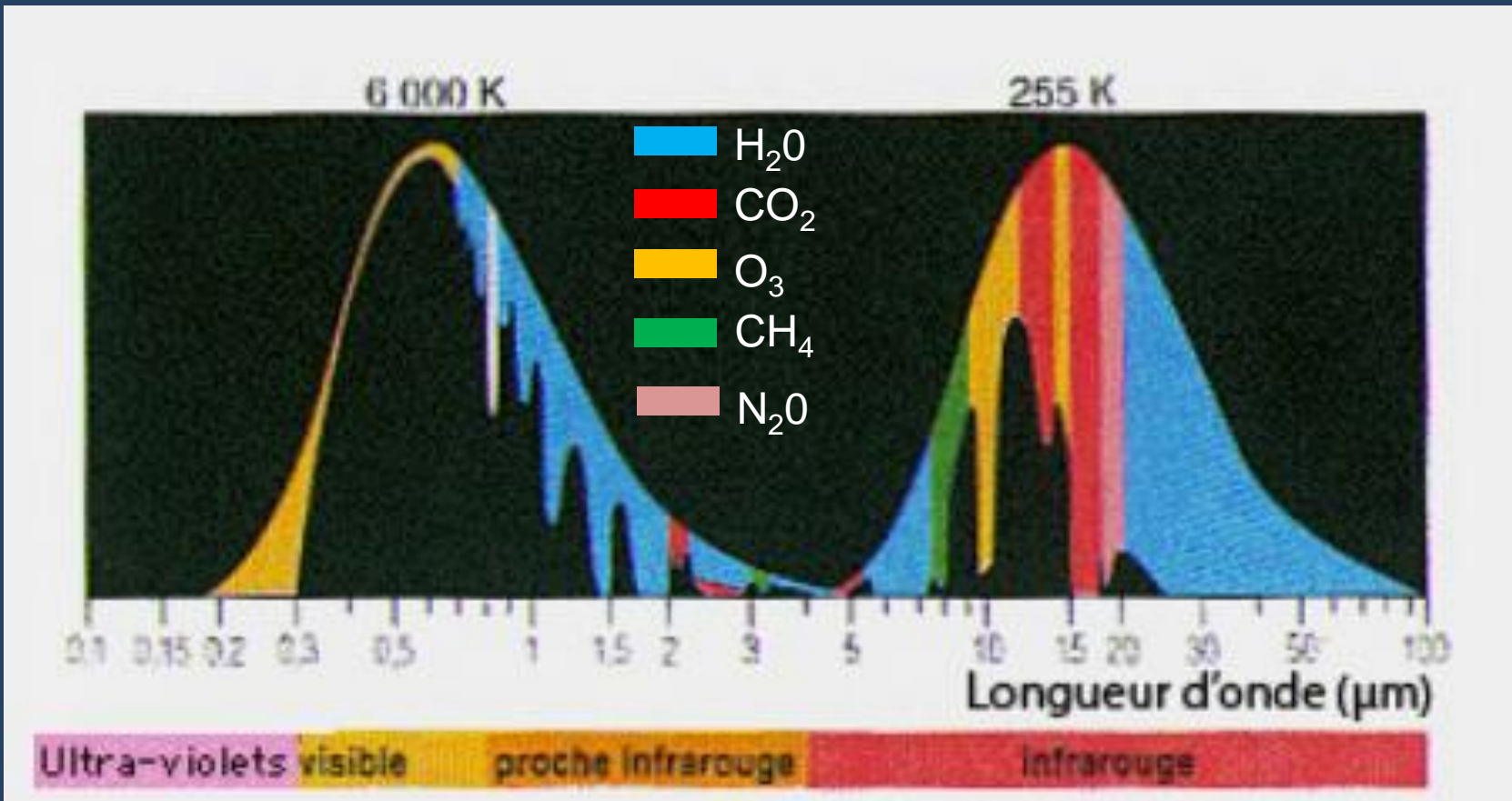
K. Ueda and A. Liu, Laser Phys. 8, 774 (1998).

# 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)

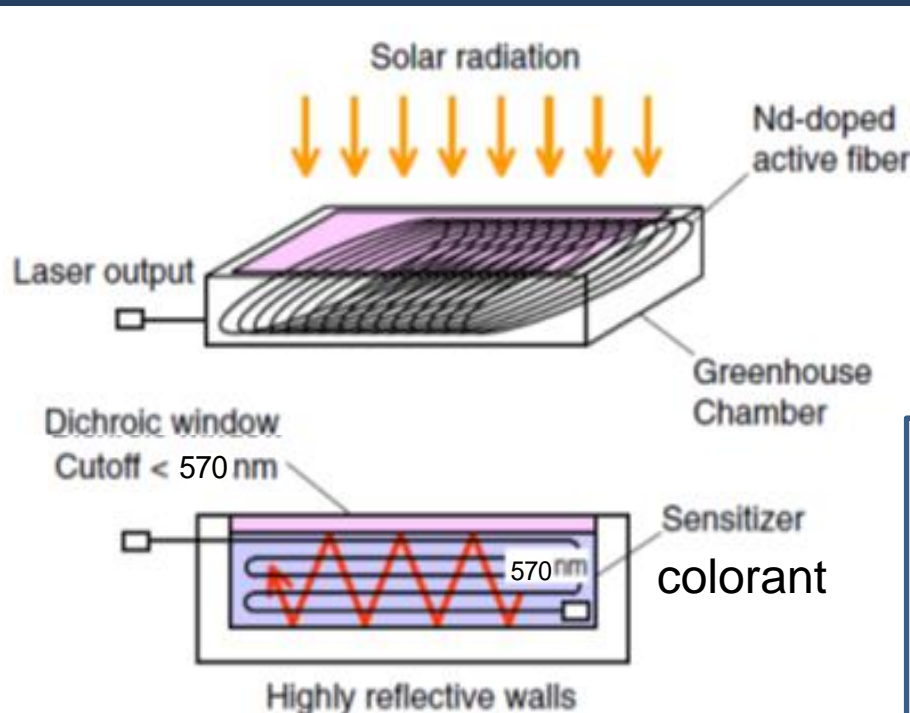
# L'effet de serre sur Terre



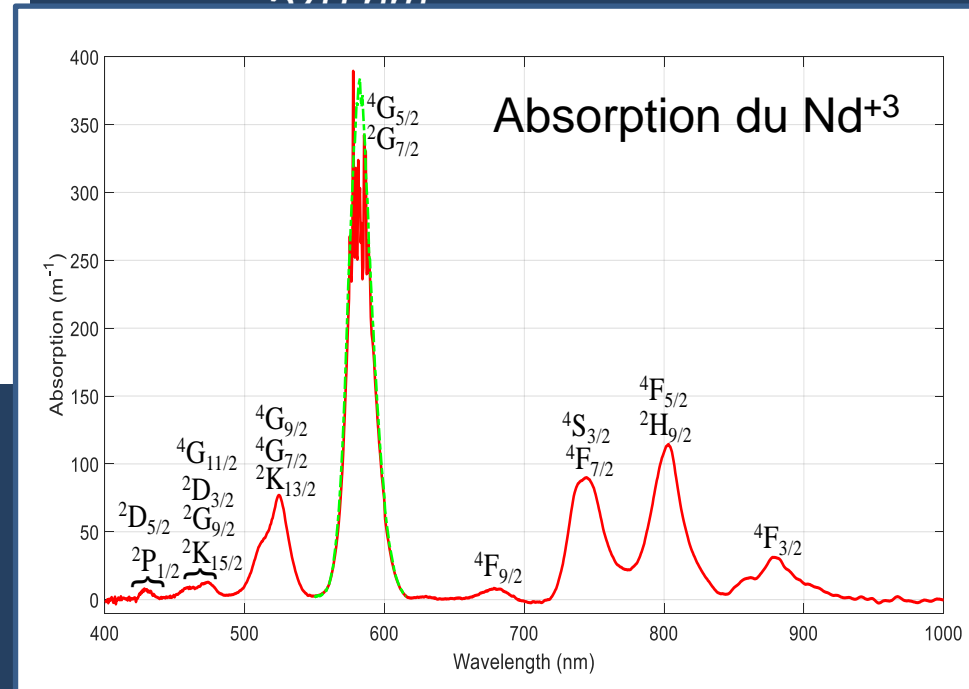
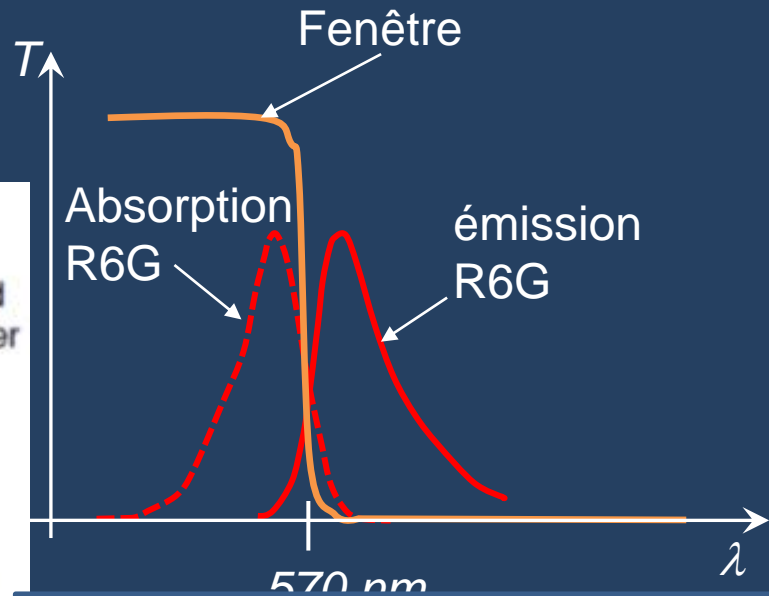
Source : Robert Sadourny, le Climat de la Terre, Flammarion, Collection Domino

- 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

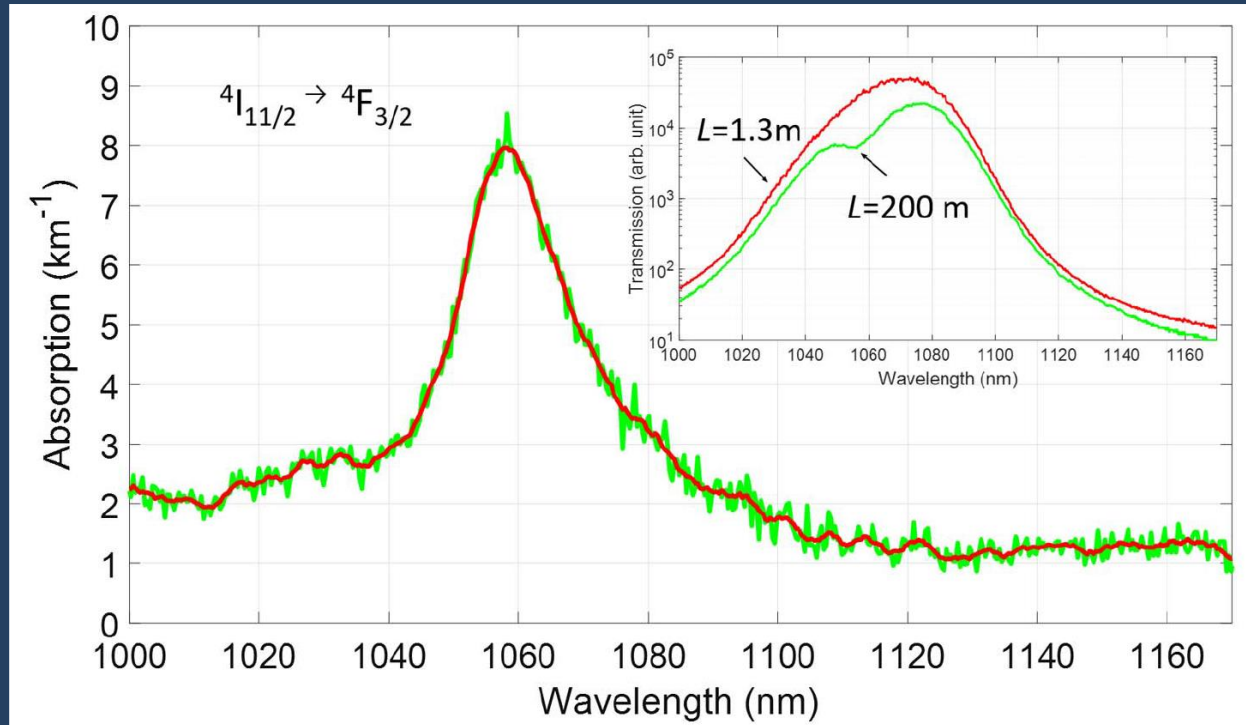


Bisson, Ueda, APLS 2004, paper TuE-B4  
Endo, Bisson, Jpn. J. Appl. Phys. 2012





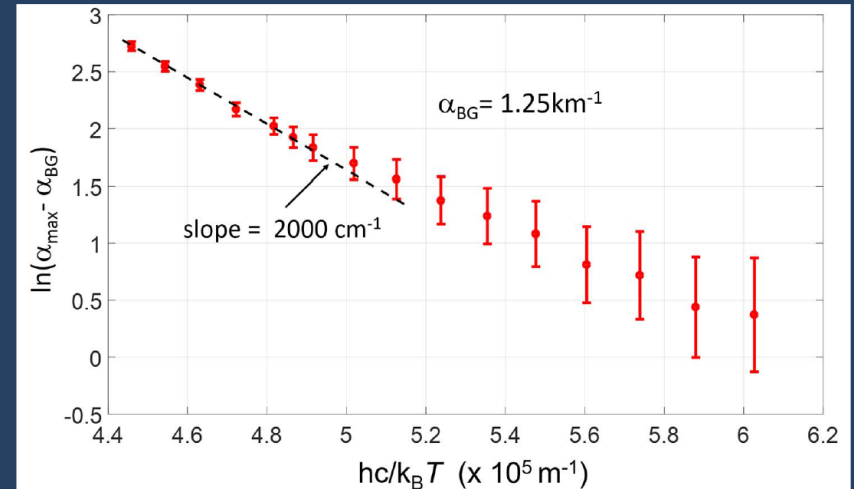
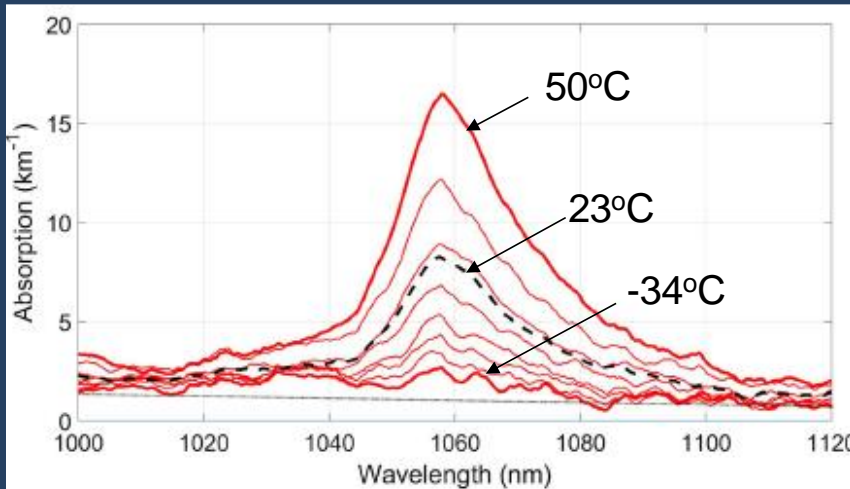
# Mesure des pertes à la longueur d'onde d'émission



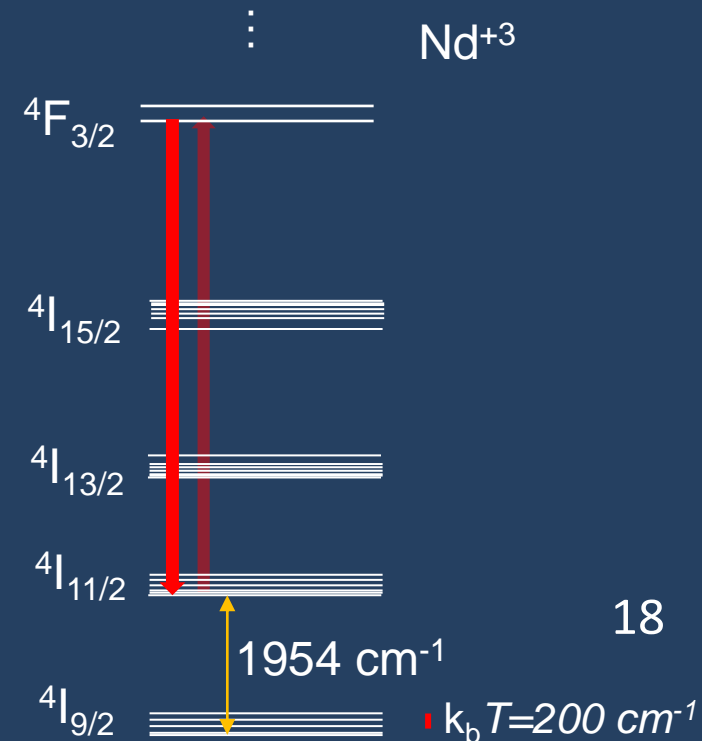
Cette très faible absorption est mesurable parce que la longueur traversée est très grande.

Quelle est l'origine de cette absorption?

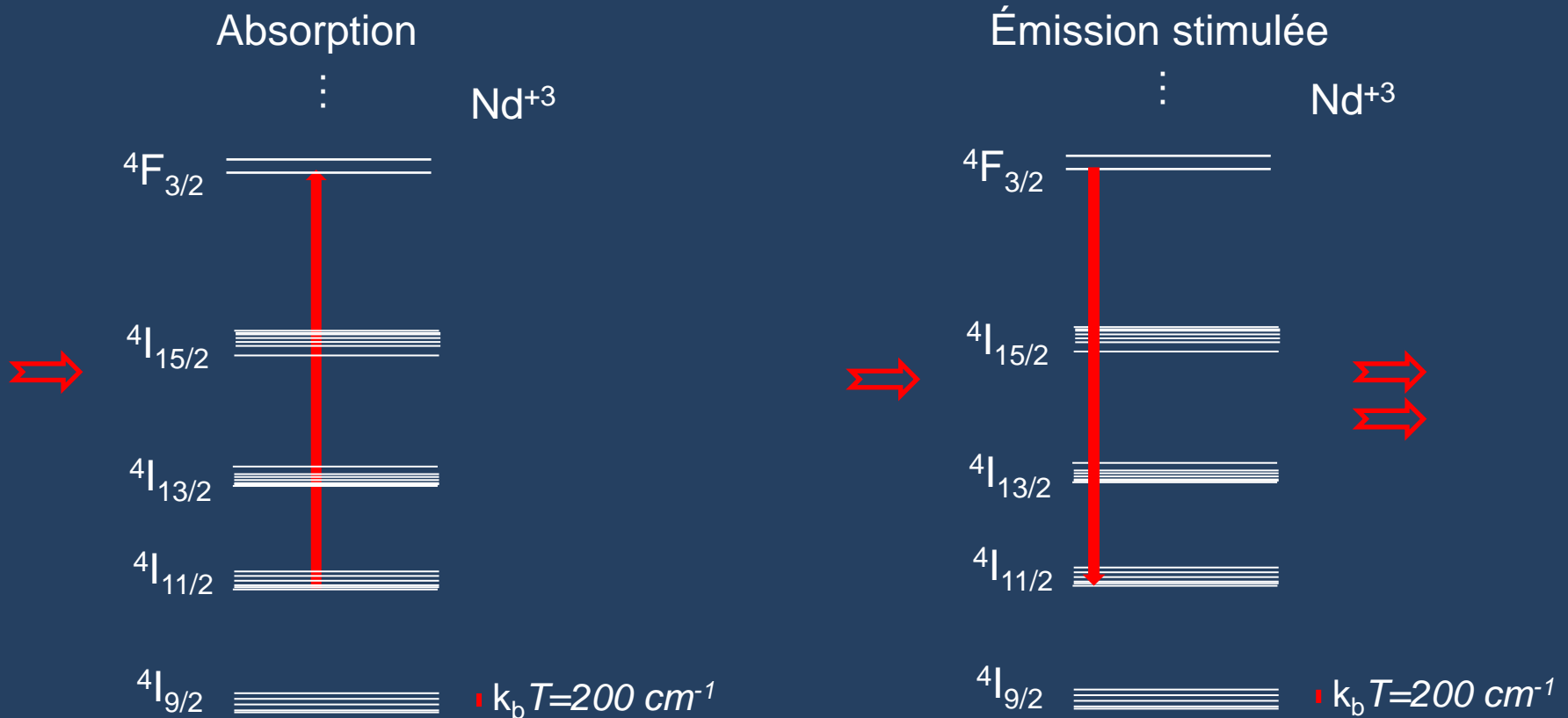
# L'absorption en fonction de la température



- 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.



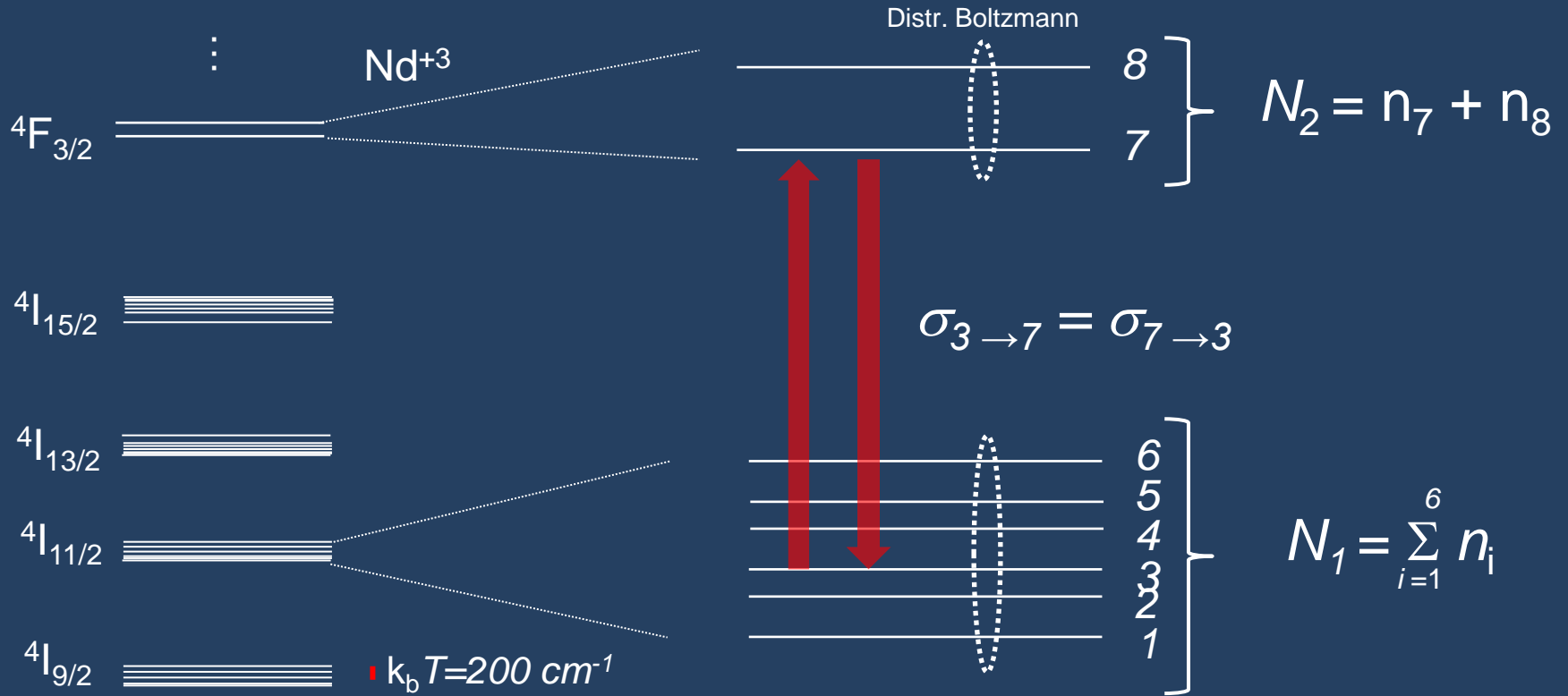
# L'amplification de la lumière



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 $\sigma_{\text{abs}}$ 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

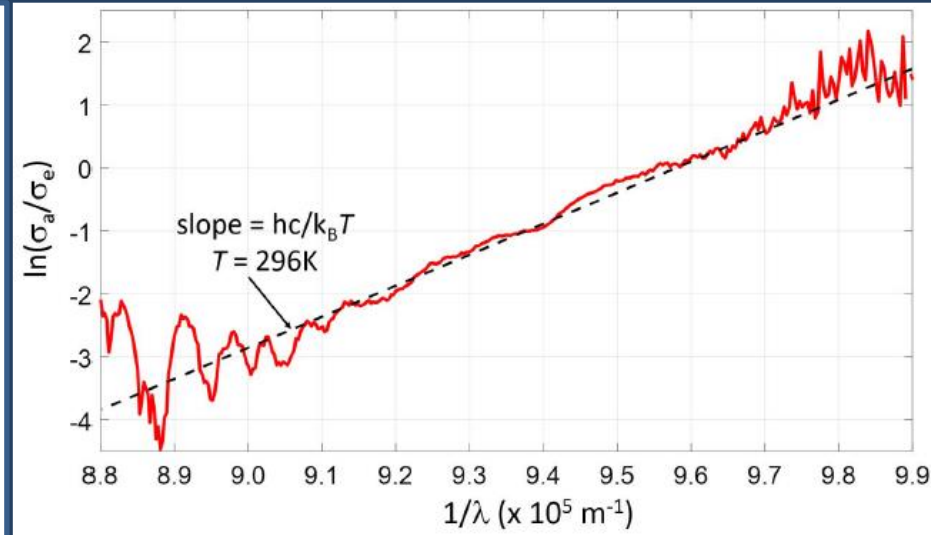
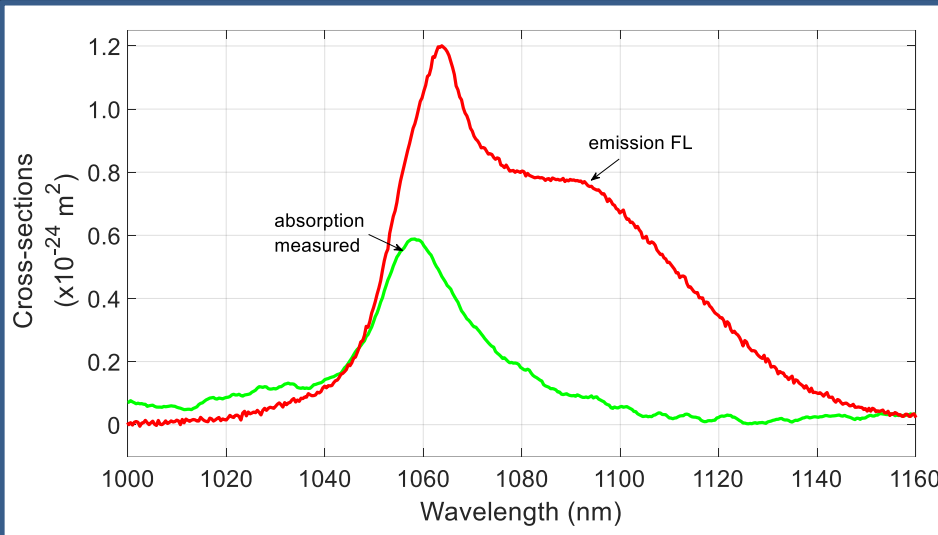
$$\sigma_{\text{émis}}(\lambda) / \sigma_{\text{abs}}(\lambda) = \exp[-(h\nu - E_0)/kT]$$

Principe de réciprocité de McCumber

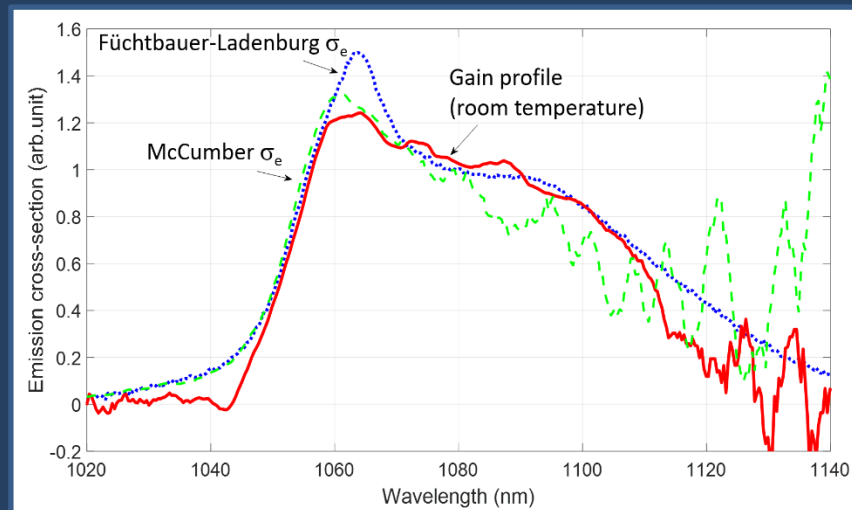


# Application du principe de McCumber

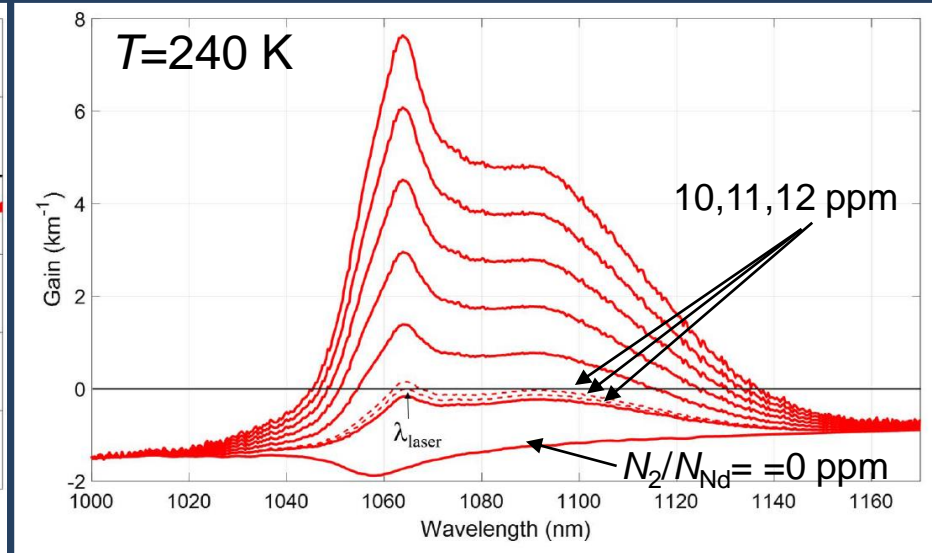
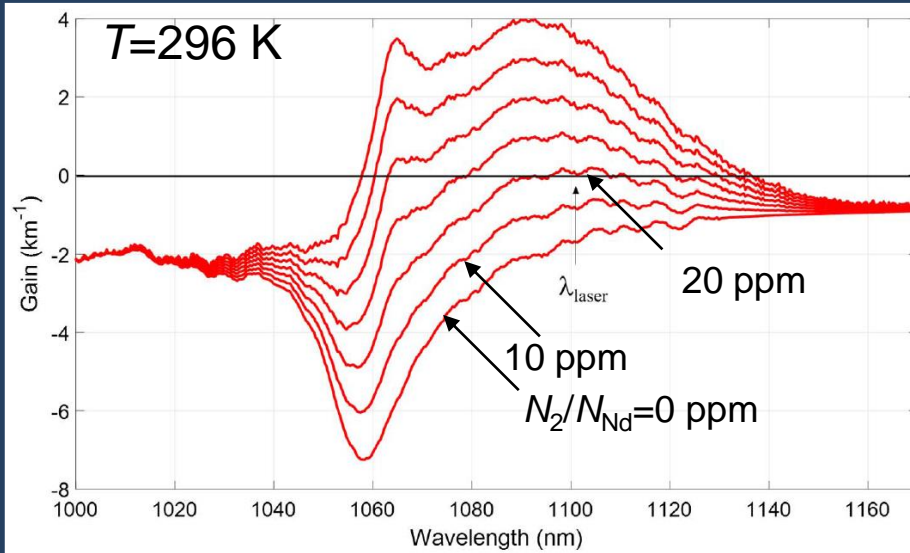
$$\sigma_{\text{émis}}(\lambda) / \sigma_{\text{abs}}(\lambda) = \exp[-(h\nu - E_0)/kT]$$



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
- ...