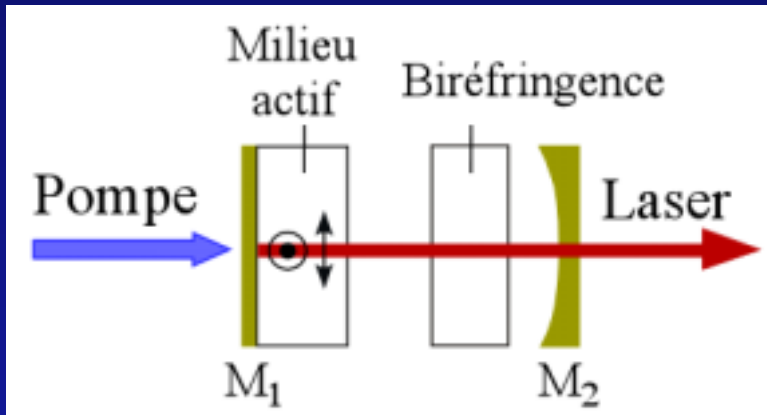

**Étude théorique et expérimentale
des lasers solides bi-fréquences
dans les domaines GHz à THz,
en régime continu ou impulsionnel.
Applications opto-microondes.**

NGOC DIEP LAI

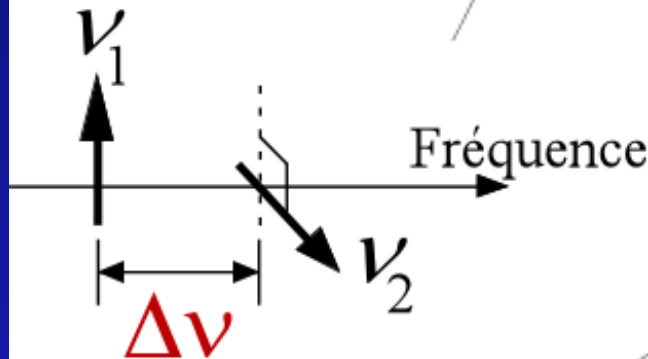
Laboratoire d'Electronique Quantique et Physique des Lasers

Introduction

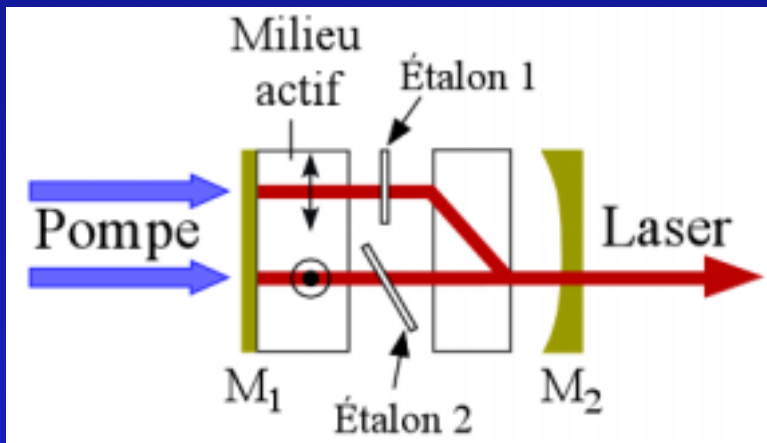
→ Lasers solides bi-fréquences continûment accordables :



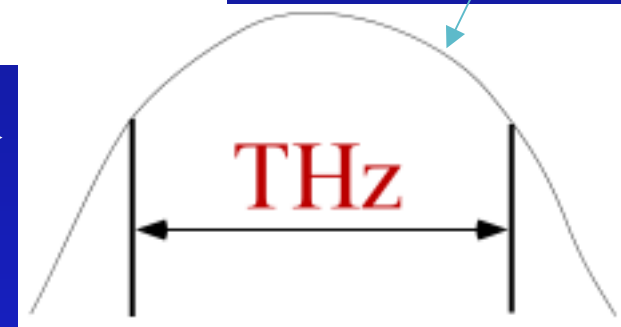
$$\Delta\nu \leq c/4L$$



Courbe de gain

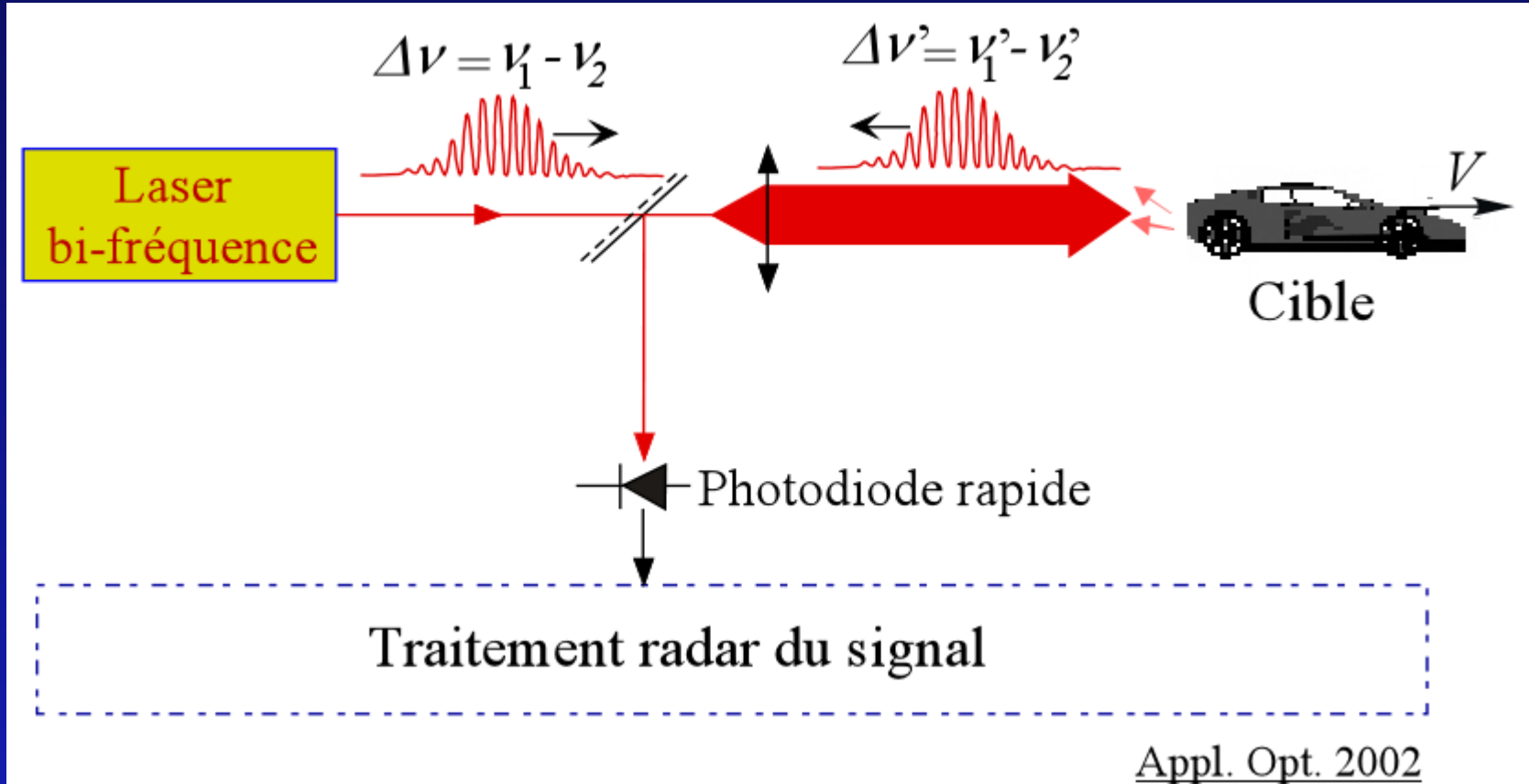


$$\Delta\nu \leq \text{largeur de gain}$$



→ Beaucoup d'applications potentielles...

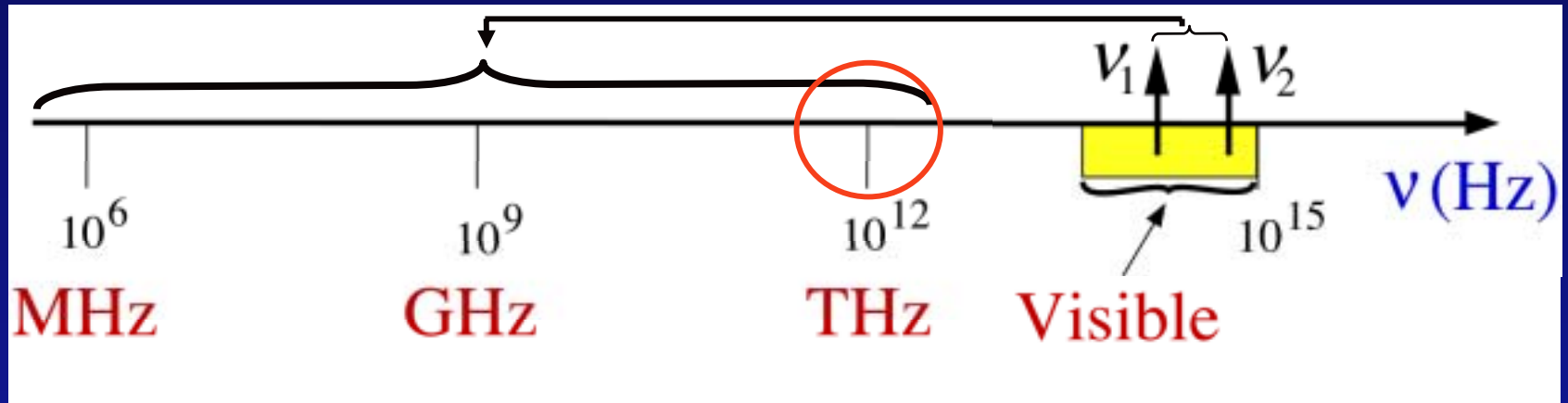
Lidar-radar Doppler



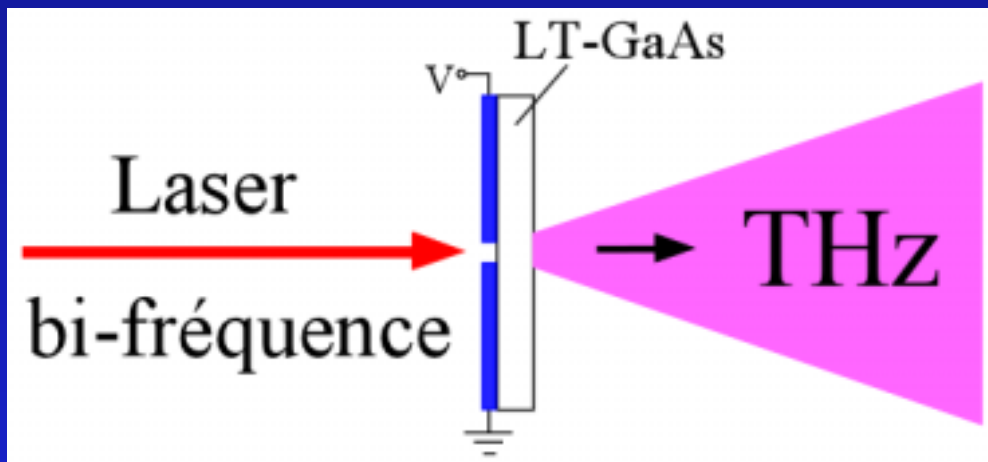
Besoins :

- Propagation dans l'atmosphère : 1,55 μm
- Propagation sous-marine : 532 nm
- Durée contrôlable : centaines de ns
- Battement cohérent d'impulsion à impulsion

Génération d'ondes sub-millimétriques



→ Photo-commutation



→ **Avantages :**

- Compact.
- Accordable.
- Pureté spectrale.

→ **Besoin :**

- Longueur d'onde visible !

Questions

- Optimisation des caractéristiques des lasers solides impulsionnels ?
- Impulsions à $1,55 \mu\text{m}$ et dans le visible ?
- Battement cohérent d'impulsion à impulsion ?
- Source bi-fréquence THz dans le visible ?

Plan d'exposé

I. Lasers solides impulsionnels

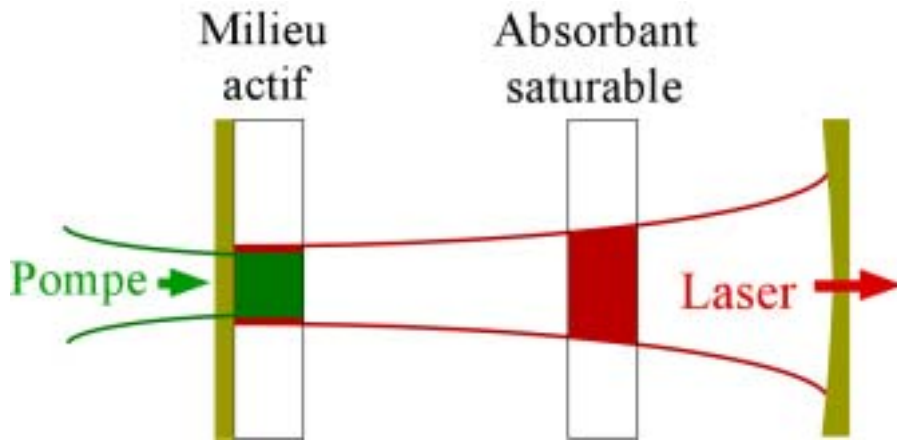
- 1/ Contrôle de la durée des impulsions.
- 2/ Laser impulsif bi-fréquence.
- 3/ Cohérence du battement.

II. Conversion de fréquence

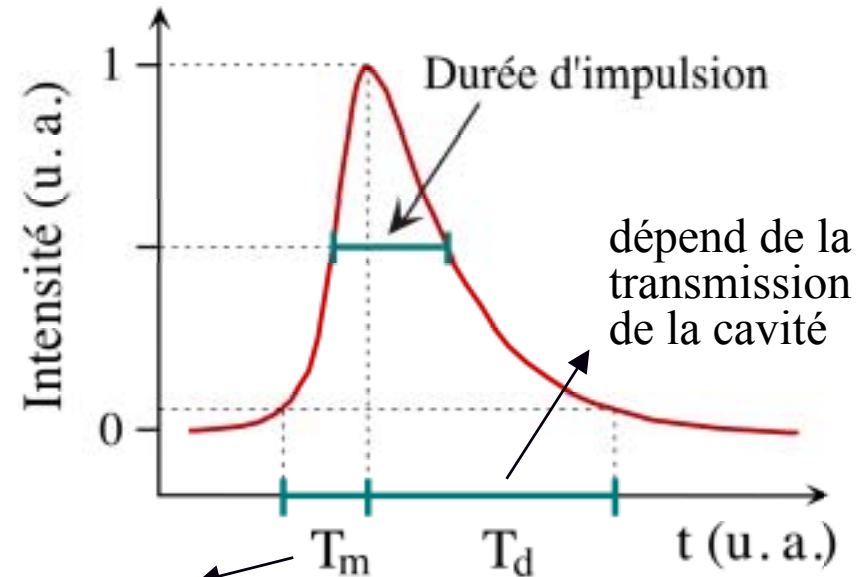
- 1/ Laser impulsif vert.
- 2/ Laser continu THz rouge.

Contrôle de la durée des impulsions

➤ Laser déclenché passivement



➤ Impulsion



dépend de:

$$R = \frac{\text{Puissance de saturation du m.a.}}{\text{Puissance de saturation de l'a.s.}}$$

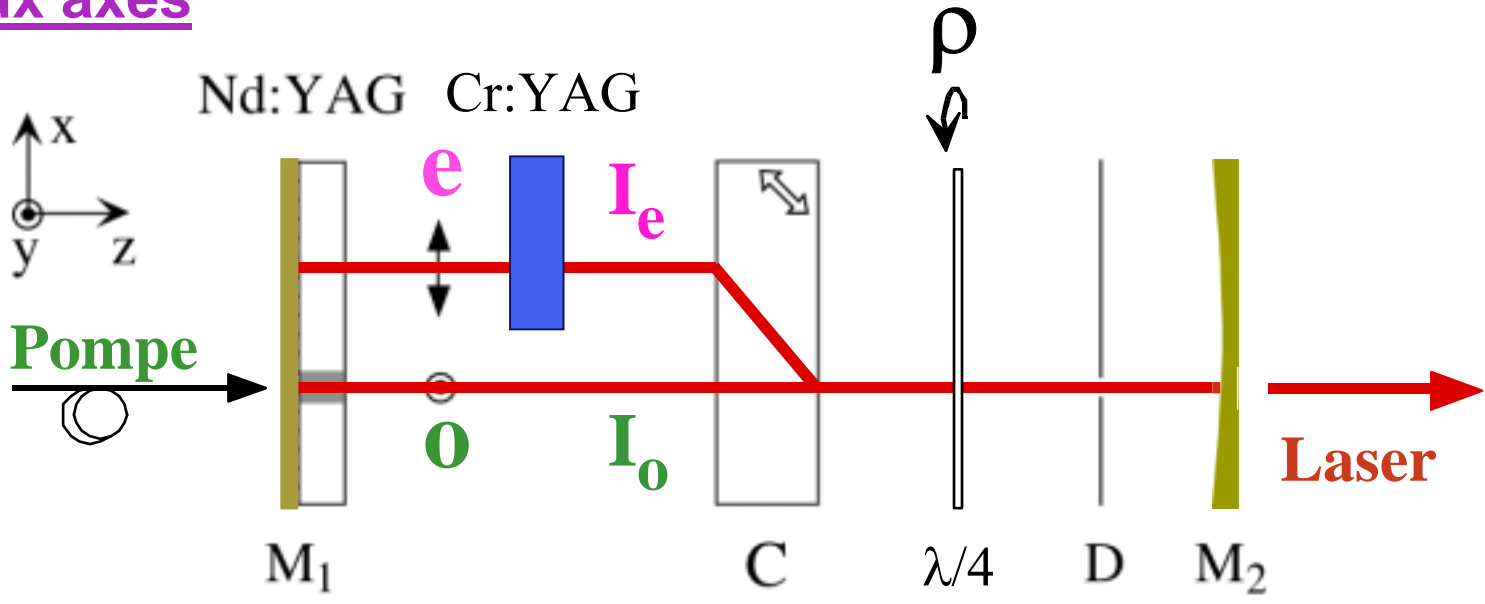
Question:

Comment contrôler la durée d'impulsion ?

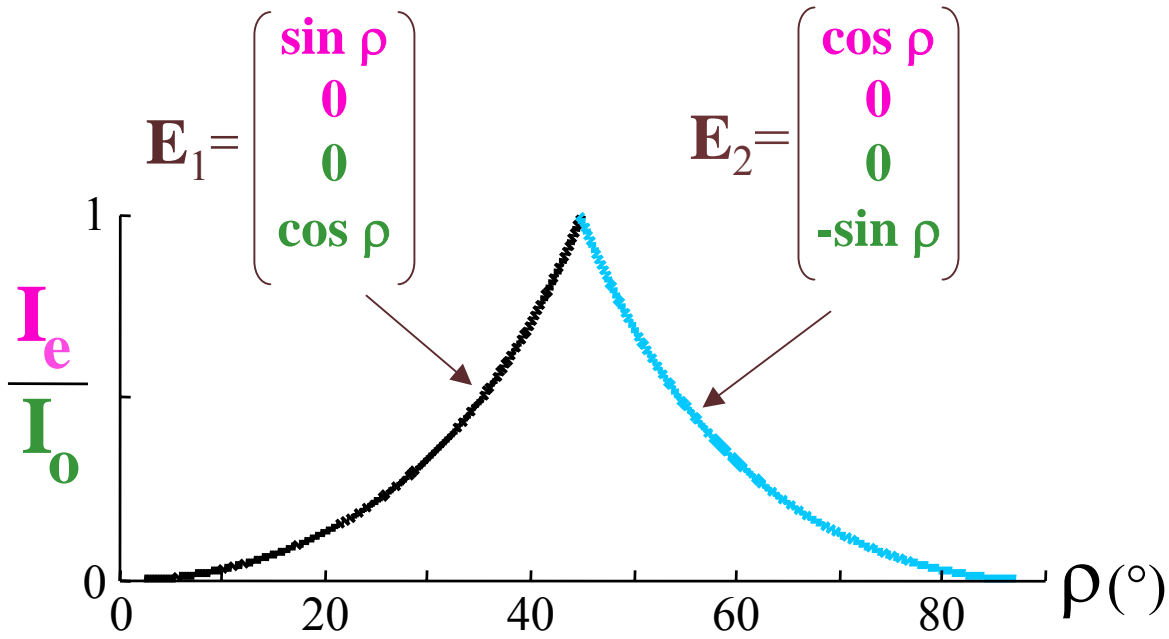
⇔ Comment ajuster R ?

➤ Contrôlée par les états fourchus du laser à 2 axes

➤ Laser à deux axes

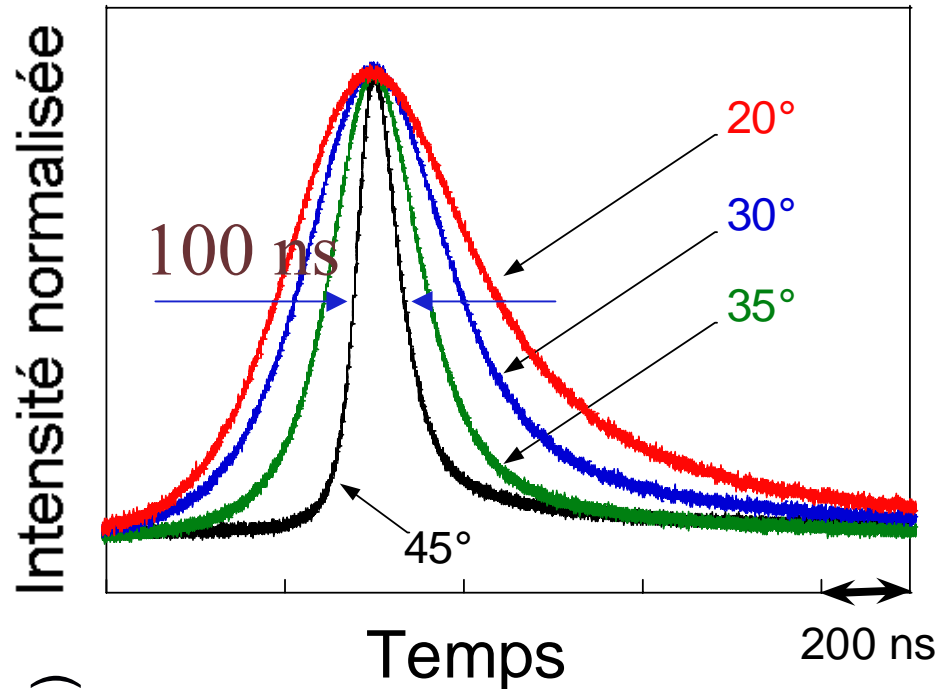


➤ Théorie : Matrices de Jones 4x4 \Rightarrow 2 états propres fourchus

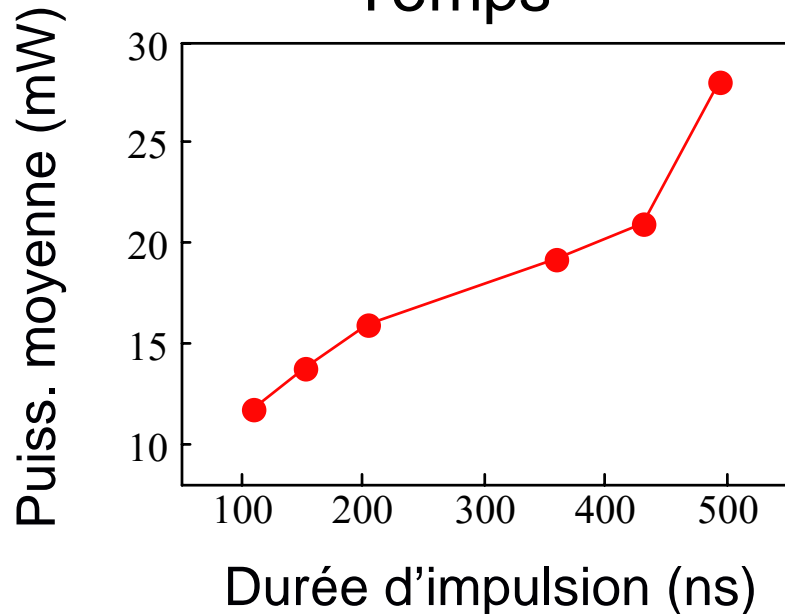


$R \propto I_e / I_o$
 dépend de ρ

Résultats expérimentaux



⇒ Continûment ajustable
100 ns → 500 ns



⇒ Puissance moyenne augmente

⇒ Bon accord
théorie-expérience

Contrôle de la durée des impulsions

Conclusion :

- Etats fourchus → durée des impulsions ajustable : **100 ns → 500 ns**
- Bon accord entre théorie-expérience.
- Etats fourchus → addition cohérente d'impulsions.
- Autres méthodes :
 - Translation de l'absorbant saturable : **30 ns → 350 ns**
 - Translation de la lentille de focalisation : **20 ns → 250 ns**

⇒ **Application au laser impulsif bi-fréquence.**

Plan d'exposé

I. Lasers solides impulsionnels

1/ Contrôle de la durée des impulsions.

→ 2/ Laser impulsif bi-fréquence.

3/ Cohérence du battement.

II. Conversion de fréquence

1/ Laser impulsif vert.

2/ Laser continu THz rouge.

Laser impulsif bi-fréquence à 1,55 μm

- 1,55 μm → bande de 'sécurité oculaire',
→ domaine de télécommunication.

➤ Questions :

→ Impulsions bi-fréquences à 1,55 μm ?

- Absorbant saturable à 1,55 μm ?
- Fréquence de battement ?

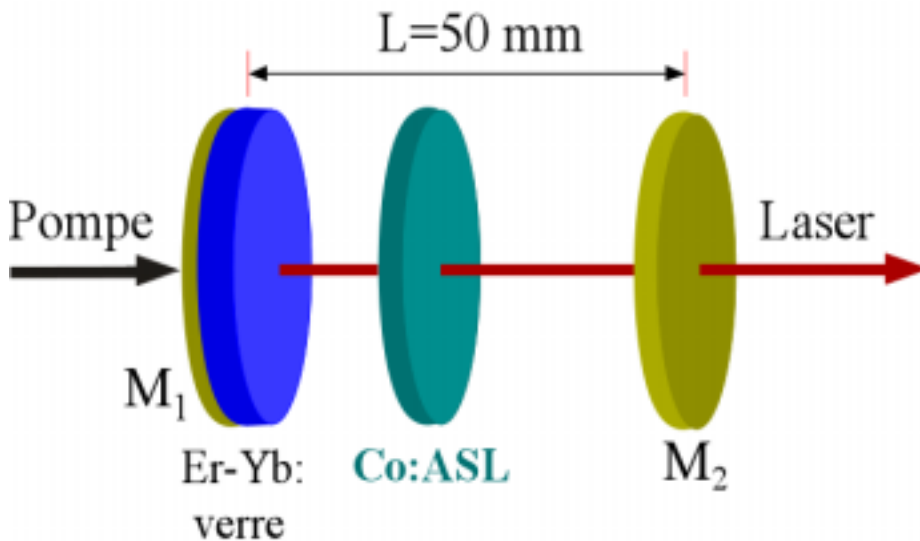
➤ Absorbant saturable

Co:ASL taillé c

(CEA/LETI-Grenoble)

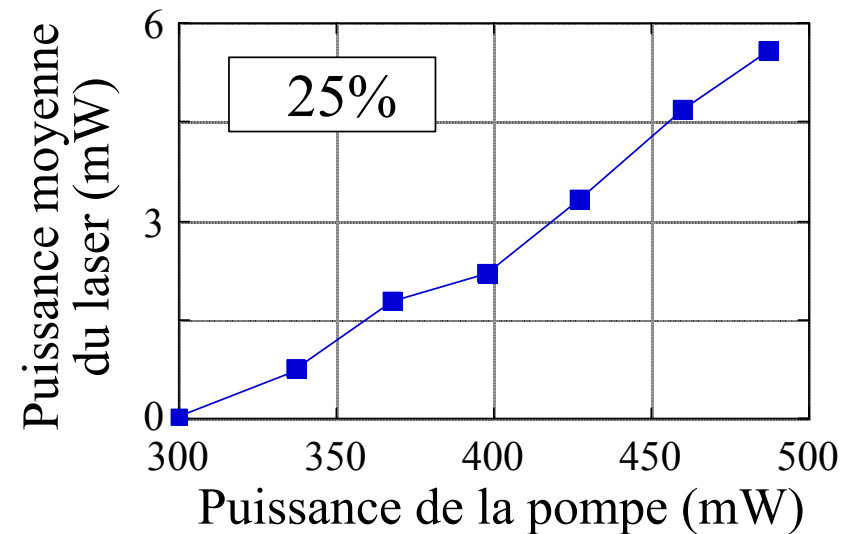
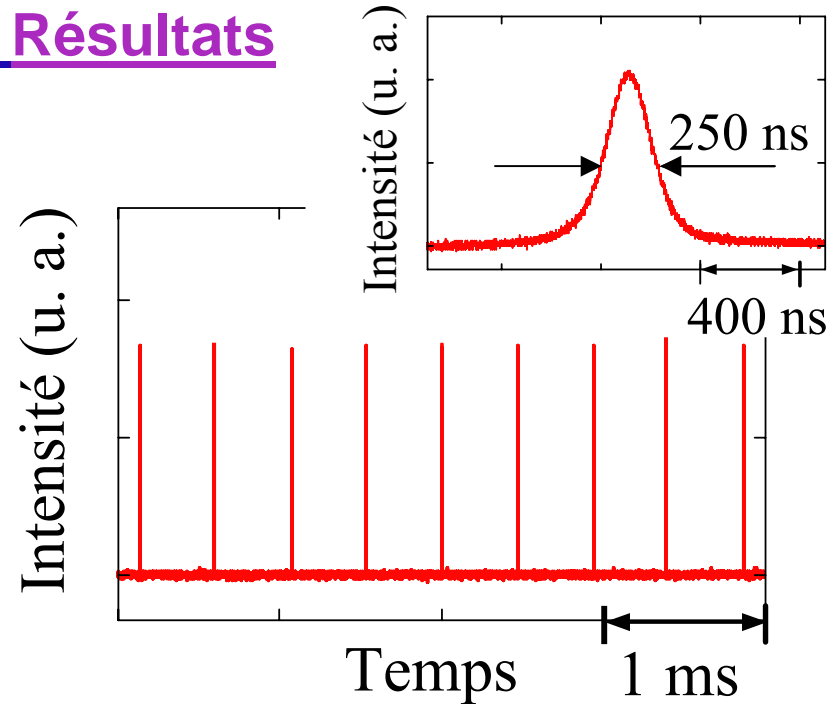
- Efficacité ?
- Abs. saturable isotrope ?
→ régime bi-fréquence !

➤ Expérience : régime monomode



→ **Bon absorbant saturable**

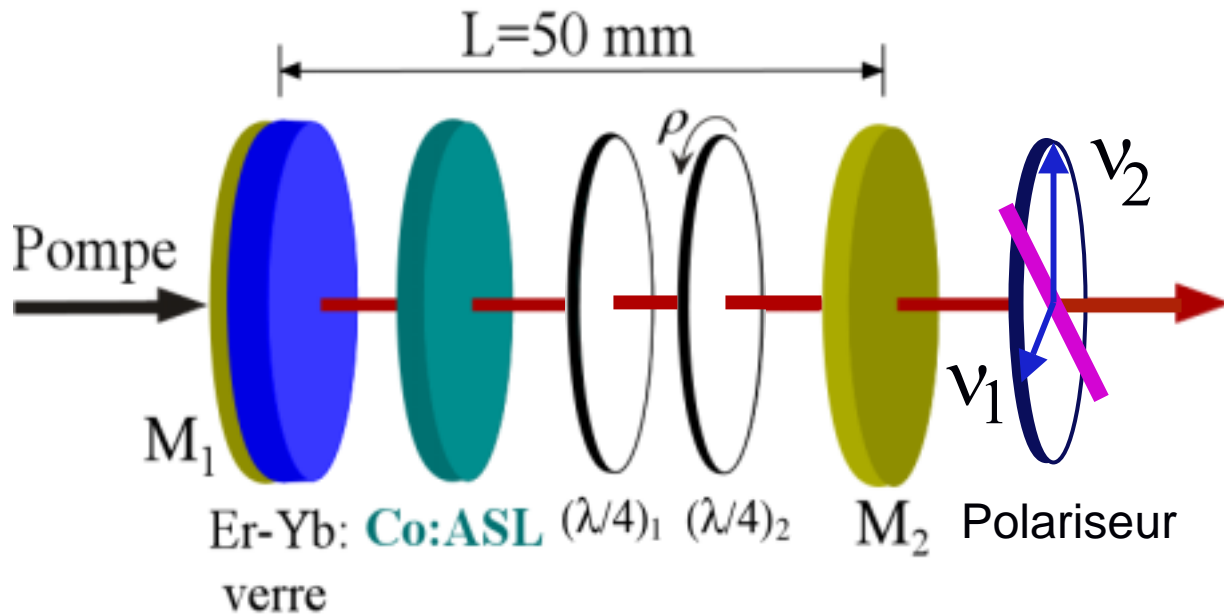
➤ Résultats



→ **Absorption isotrope**

➤ Régime bi-fréquence : Principe

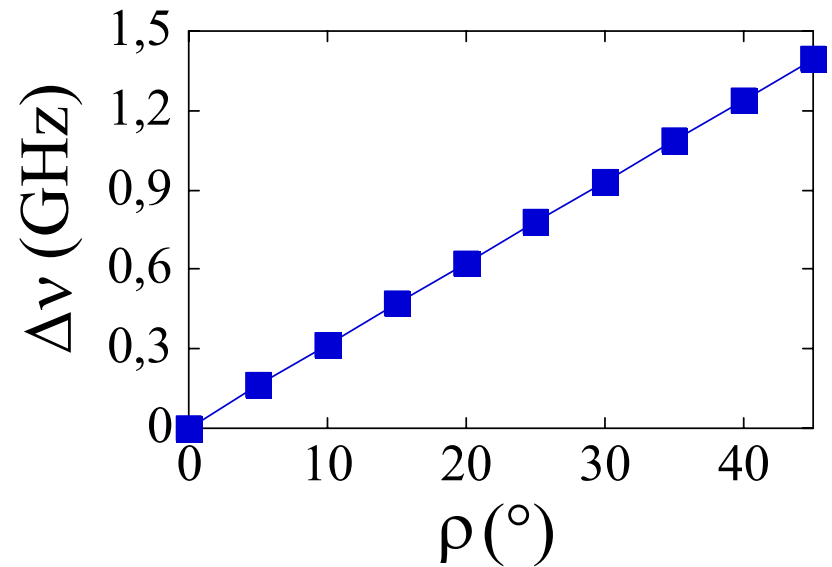
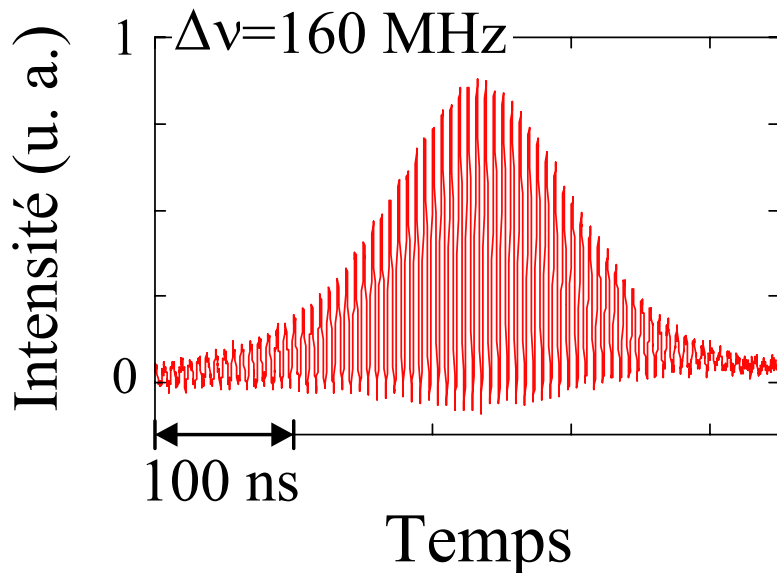
➤ Fréquence de battement



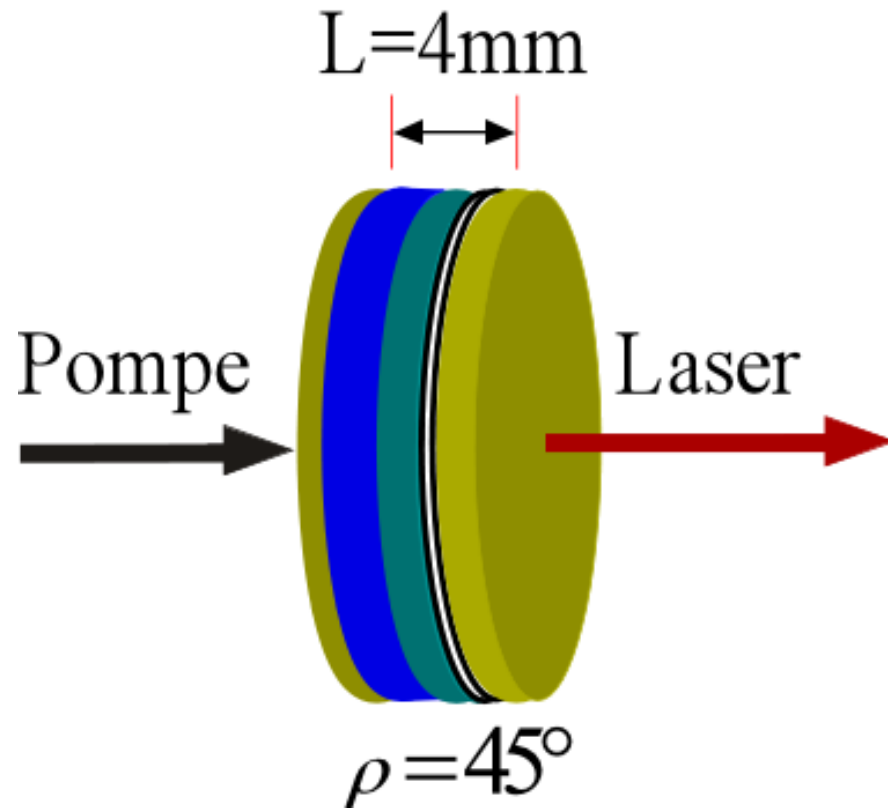
→ Matrice de Jones

$$\Delta \nu = \frac{c}{2L} \frac{2\rho}{\pi}$$

➤ Résultats → Impulsions bi-fréquences accordables à $1,55\ \mu\text{m}$



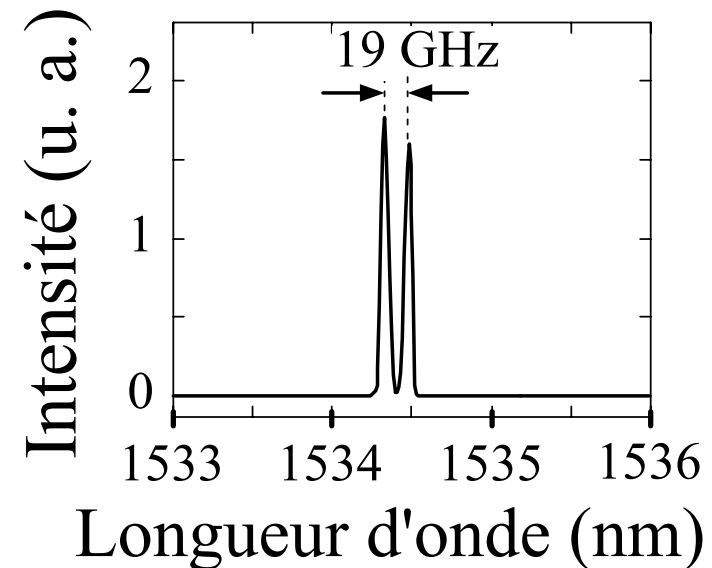
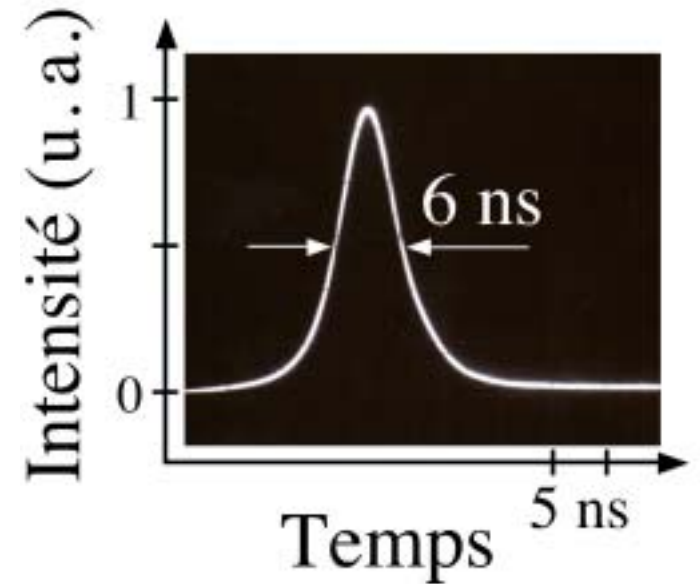
➤ Microlaser impulsionnel bi-fréquence :



→ Grande puissance crête : 470 W

→ Fréquence de battement élevée :
 $c/4L = 19\text{ GHz}$

➤ Résultats



Laser impulsionnel bi-fréquence à 1,55 μm

Conclusion :

- Nouvel absorbant saturable : **Co:ASL**
- Impulsions bi-fréquences accordables à 1,55 μm .
 - Cavité étendue : $c/4L = 1,4 \text{ GHz}$
 - Microcavité : $c/4L = 19 \text{ GHz}$
- Nombreuses applications : télémétrie, lidar-radar.

→ **Battement cohérent ?**

Plan d'exposé

I. Lasers solides impulsionnels

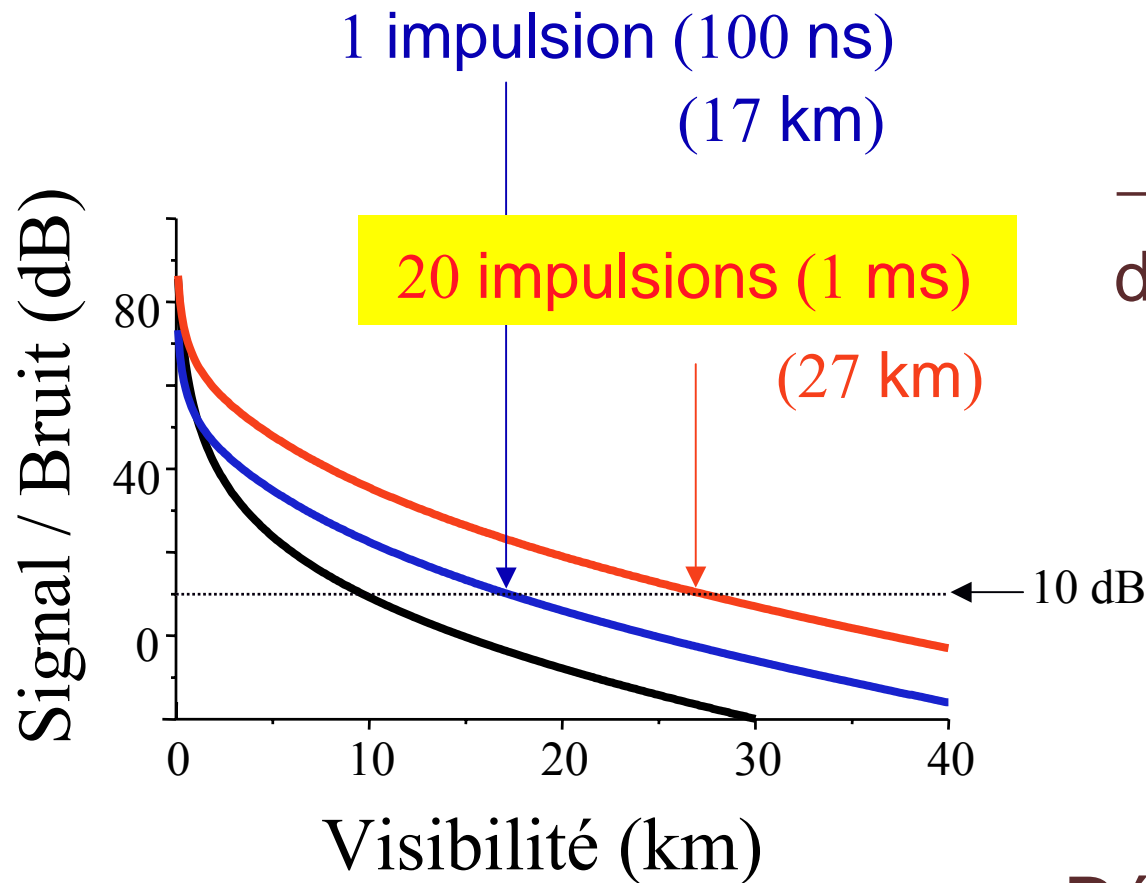
- 1/ Contrôle de la durée des impulsions.
- 2/ Laser impulsif bi-fréquence.

→ 3/ Cohérence du battement.

II. Conversion de fréquence

- 1/ Laser impulsif vert.
- 2/ Laser continu THz rouge.

Cohérence du battement en régime impulsif



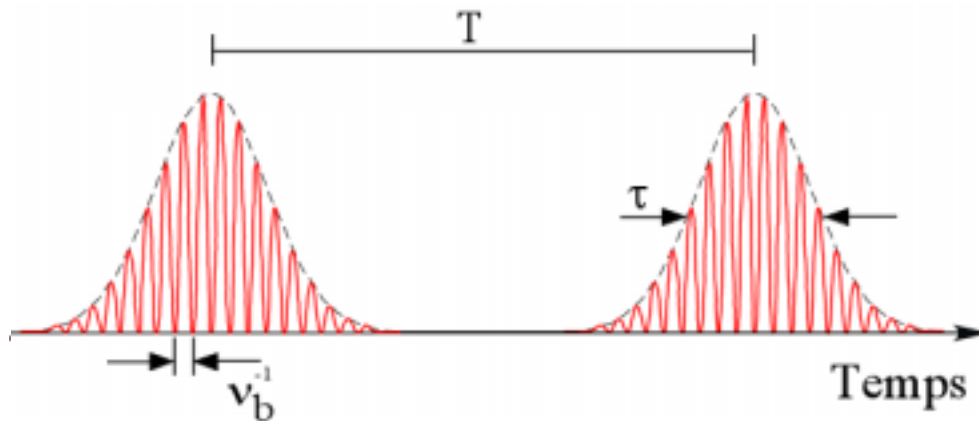
➤ Besoin :

→ Battement cohérent d'impulsion à impulsion.



- Déclenchement passif : cohérence ?

Calcul théorique de la transformée de Fourier

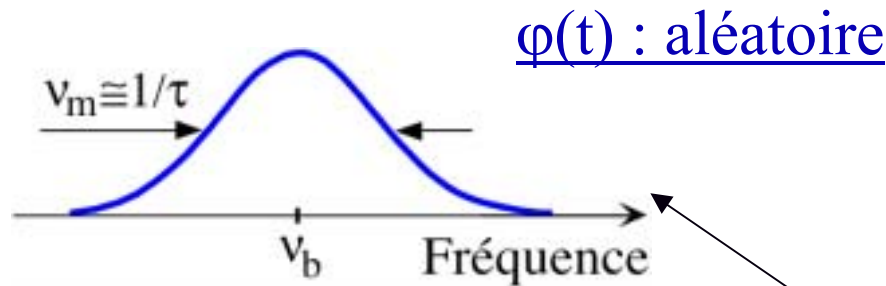


Train d'impulsions

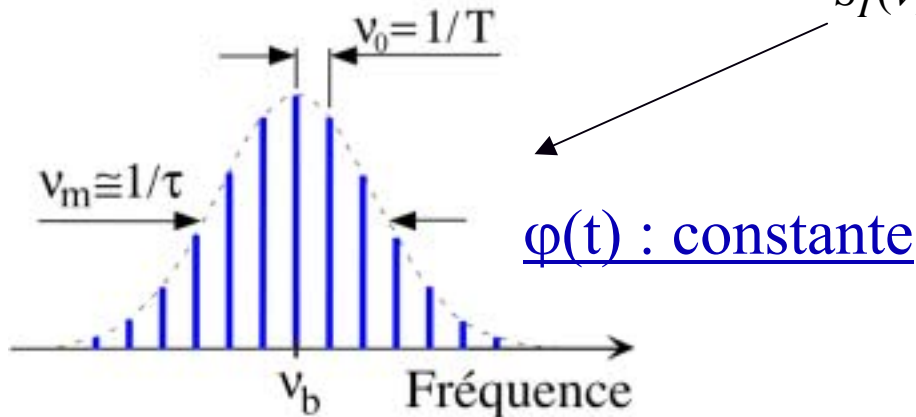
$$I(t) = \left\{ I_0 \exp\left(\frac{-t^2}{\left(\tau/2\sqrt{\ln 2}\right)^2} \right) \otimes \sum_n \delta(nT - t) \right\} \times \cos(2\pi\nu_b t + \varphi(t))$$



Transformée de Fourier

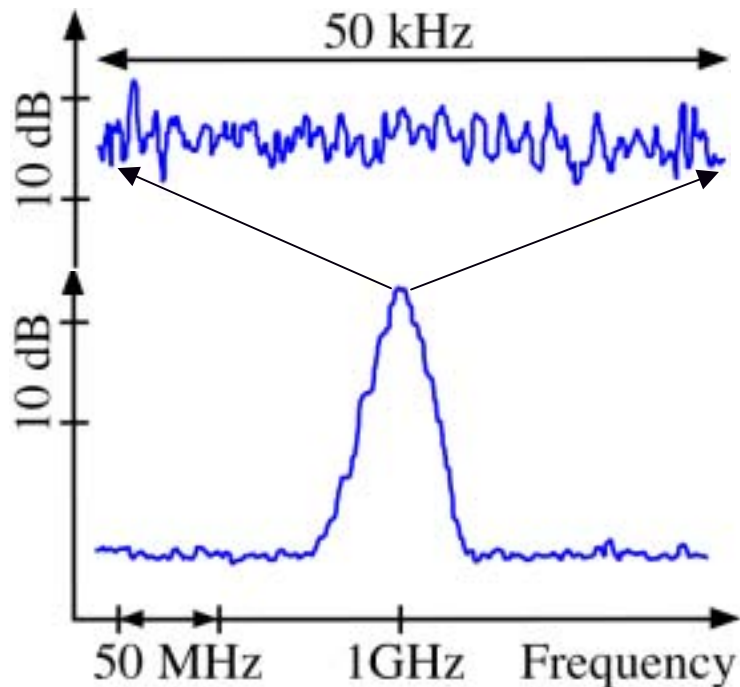
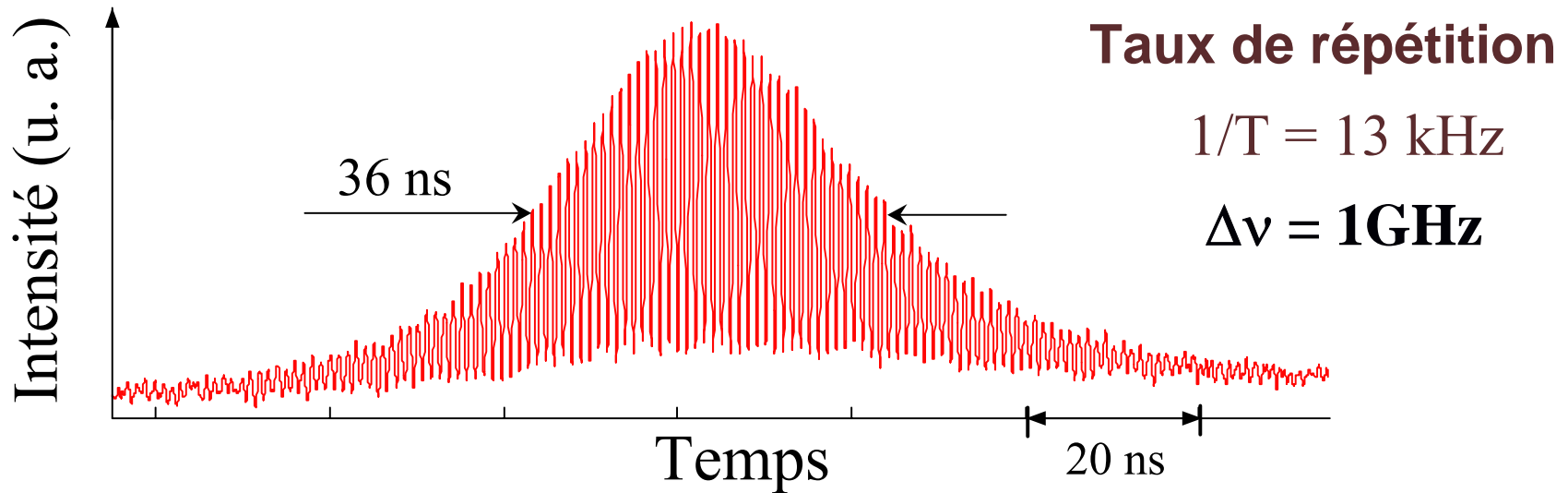


$$S_I(\nu) = \left\{ S_0 \exp\left(\frac{-\nu^2}{\left(\nu_m/2\sqrt{\ln 2}\right)^2} \right) \times \sum_n \delta(n\nu_0 - \nu) \right\} \otimes S_\varphi(\nu - \nu_b)$$



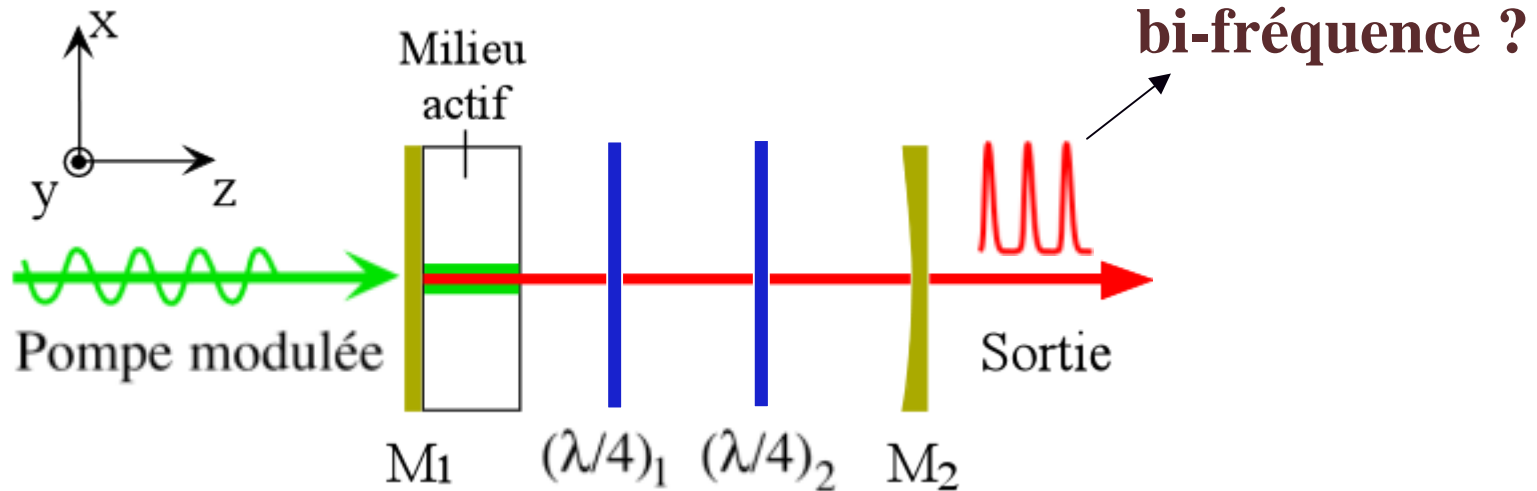
"Cohérence \Leftrightarrow peigne de Dirac"

Cas du laser à déclenchement passif



- Intensity nulle entre les impulsions
- φ varie aléatoirement
- Quelle méthode pour conserver $\varphi(t)$ d'une impulsion à l'autre ?

Modulation de la puissance de pompe



$f_{\text{modulation}} \approx f_{\text{relaxation}}$

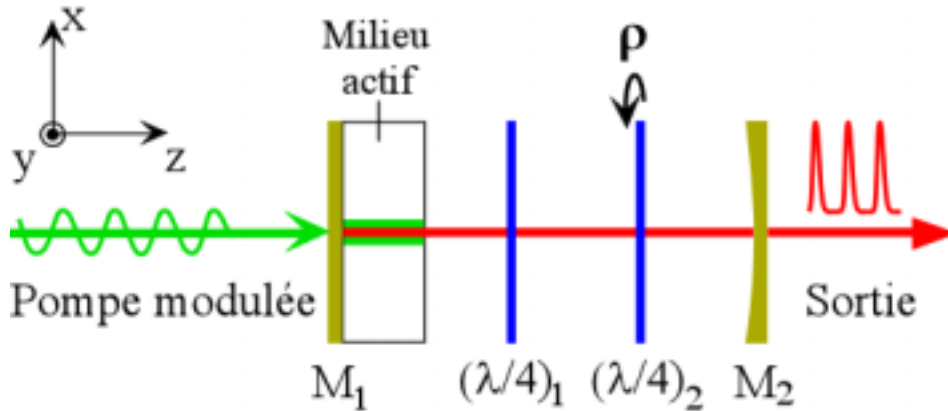
- Faible amplitude : “**AM**”
- Forte amplitude : “**Spiking**”

→ Application au régime bi-fréquence ?

→ “**AM**” ⇔ Intensité non nulle → Battement cohérent ?

Laser Nd:YAG bi-fréquence : Expérience

Schéma expérimental

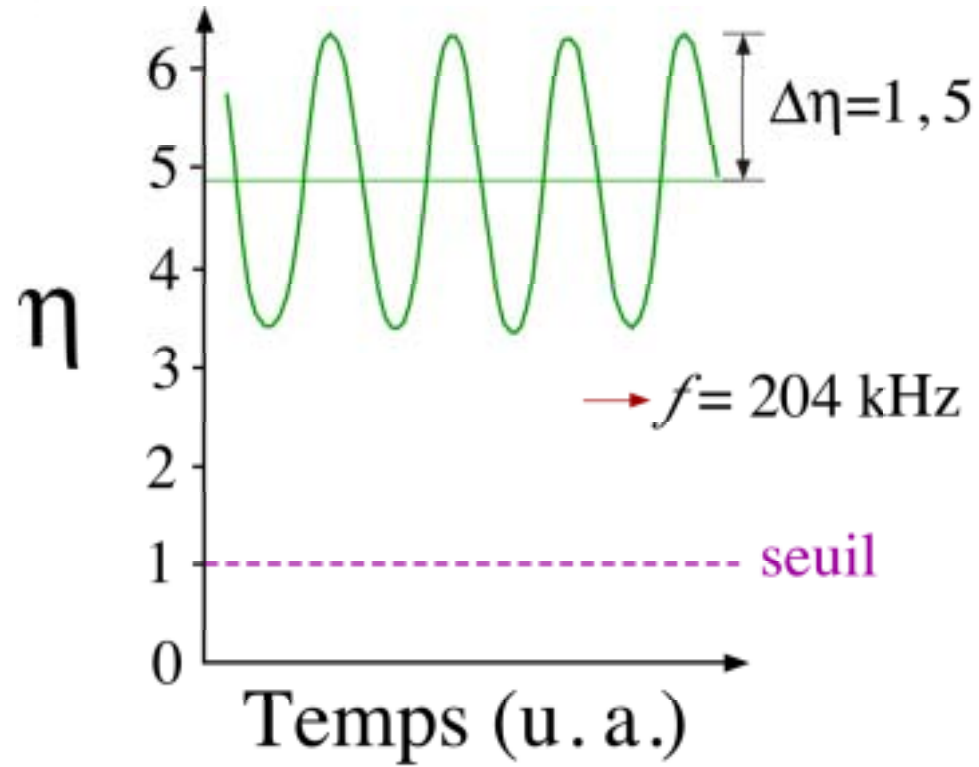


- $P_s = 130 \text{ mW}$

- $\eta = P/P_s = 4,95$

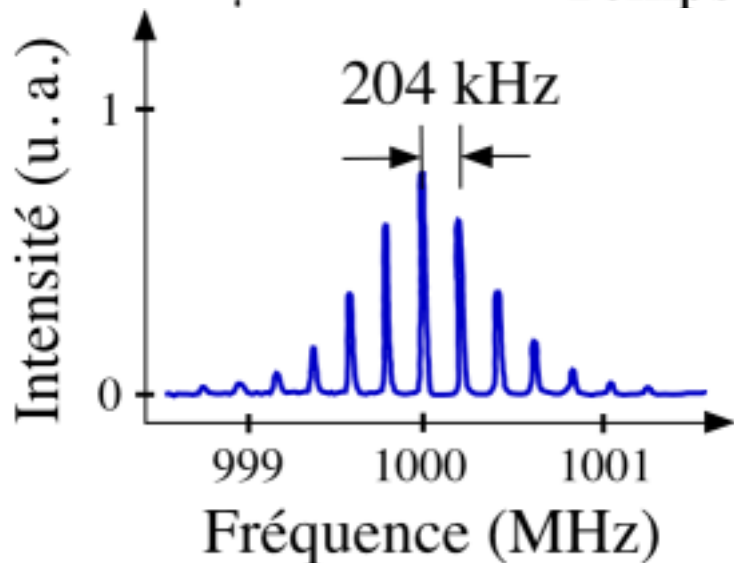
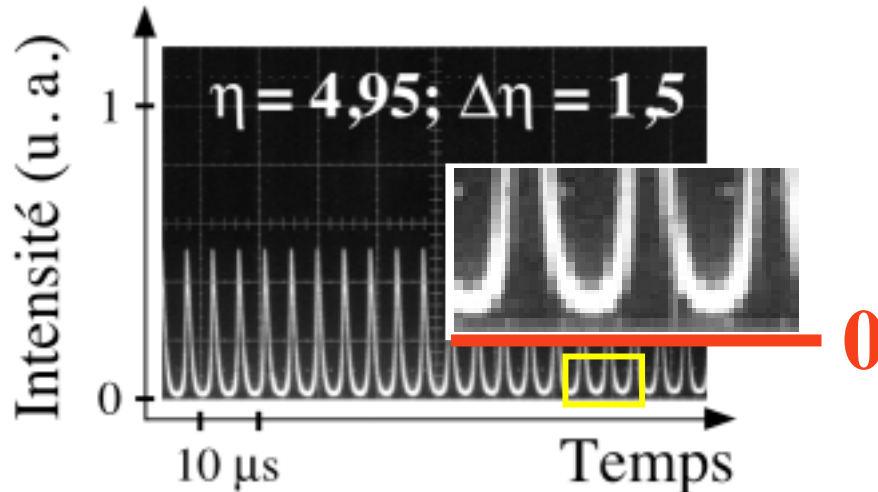
($f_{\text{relaxation}} = 204 \text{ kHz}$)

Régime 'AM'
→ Cohérent ?

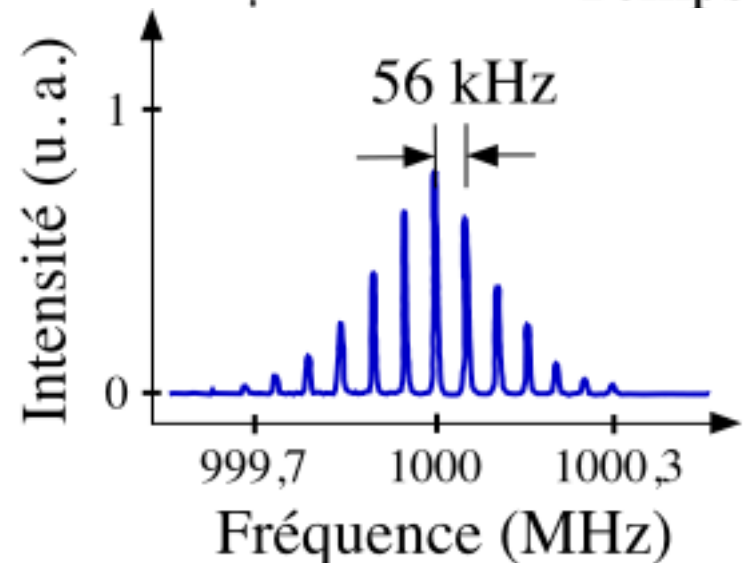
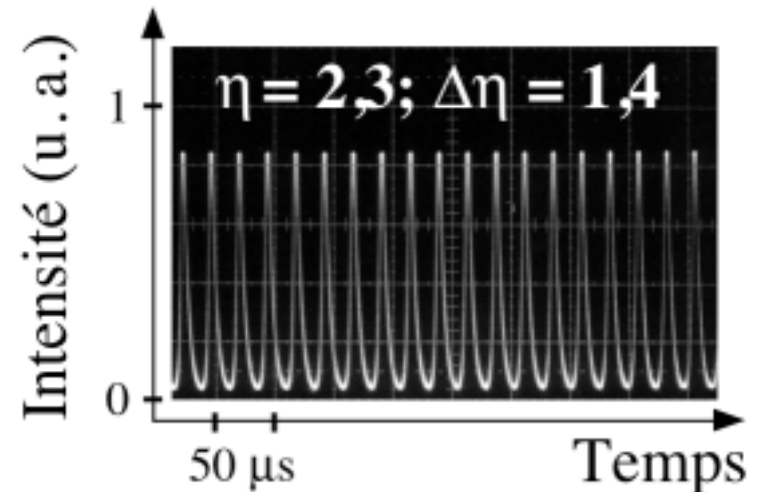


Régime "AM" résonant : Expérience

Nd:YAG



Er-Yb:verre



→ **Battement cohérent**

→ **Résultat général**

Cohérence du battement en régime impulsif

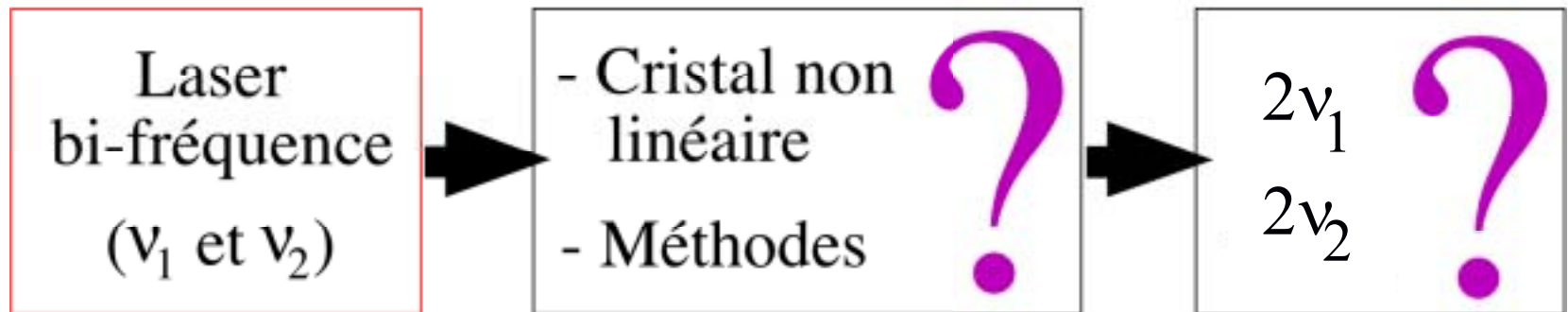
Conclusion

- Laser bi-fréquence à déclenchement passif :
 - Battement **incohérent** d'impulsion à impulsion
- Laser bi-fréquence modulé en amplitude :
 - “**AM**” : Battement **cohérent** d'impulsion à impulsion
 - 1,064 μm et 1,55 μm
 - Durée des impulsions : $\approx 1 \mu\text{s}$
 - Taux de répétition : $\approx 100 \text{ kHz}$
 - Puissance crête : ≈ 5 puissance moyenne
 - “**Spiking**” : Battement **incohérent**

➤ Mais

- * Détection sous-marine
- * Génération d'ondes sub-millimétriques

Peut-on obtenir des sources bi-fréquences dans le visible ?



Plan d'exposé

I. Lasers solides impulsionnels.

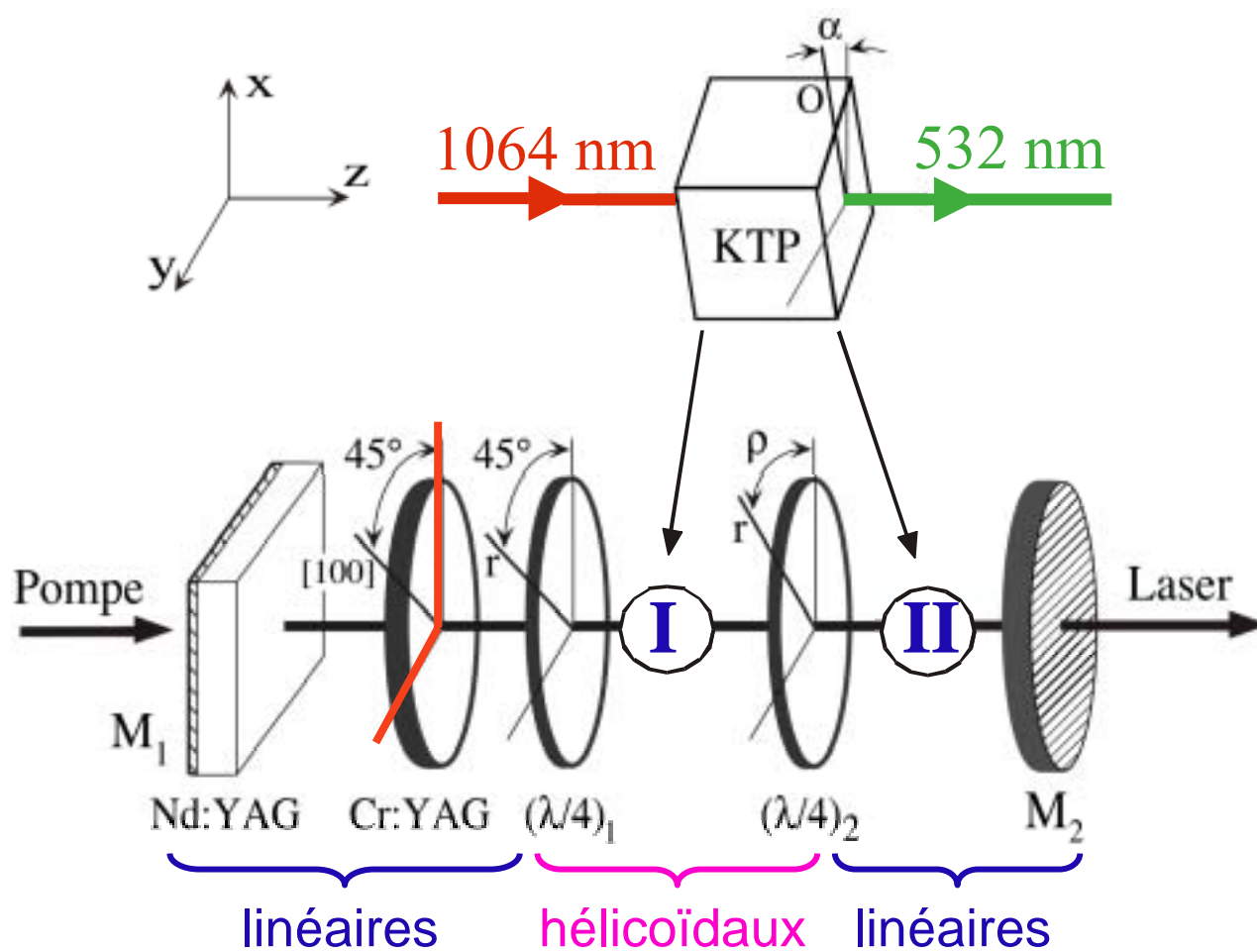
- 1/ Contrôle de la durée des impulsions.
- 2/ Laser impulsionnel bi-fréquence.
- 3/ Cohérence du battement.

II. Conversion de fréquence.

- 1/ Laser impulsionnel vert.
- 2/ Laser continu THz rouge.

Doublage intracavité d'un laser Nd,Cr:YAG bi-fréquence

Cavité



Questions

- $\delta \rightarrow$ Conditions pour obtenir le régime bi-fréquence ?
- Battement continûment accordable ?
- Spectre dans le visible ?

Matrices de Jones $(\rho, \alpha \text{ et } \delta)$

Cas I

Cas II

KTP entre deux $\lambda/4$

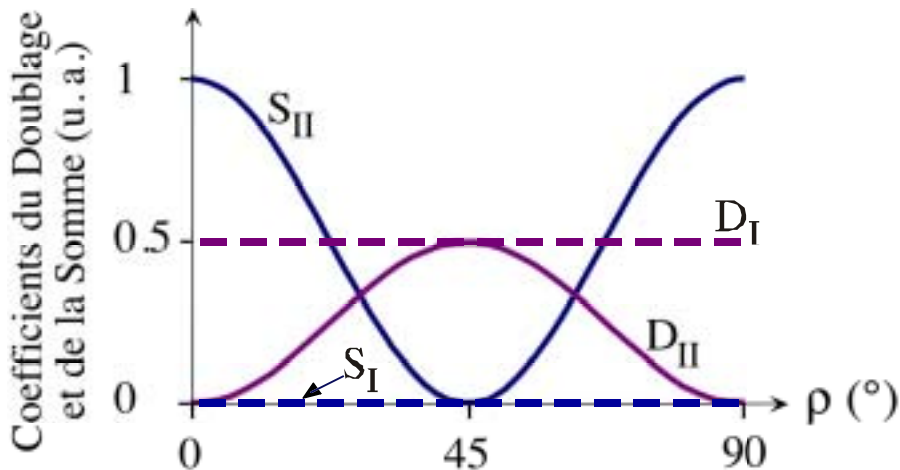
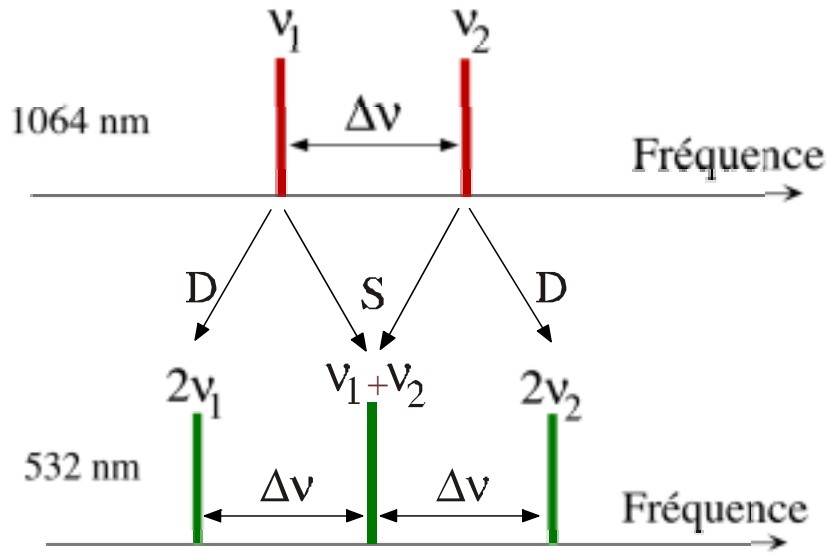
KTP hors de deux $\lambda/4$

Régime bi-fréquence ?

Etats propres suivant x et y

$$\delta = n\pi$$

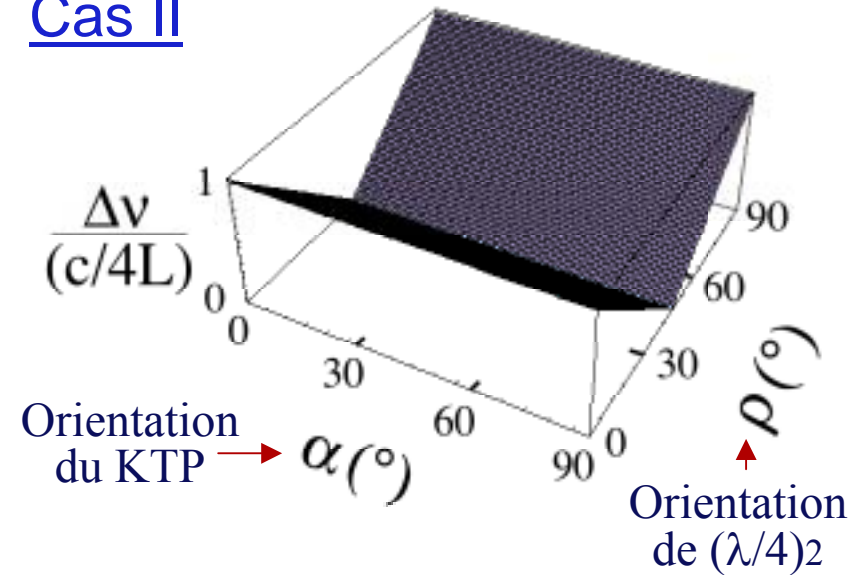
Coefficients de 'D' et 'S'



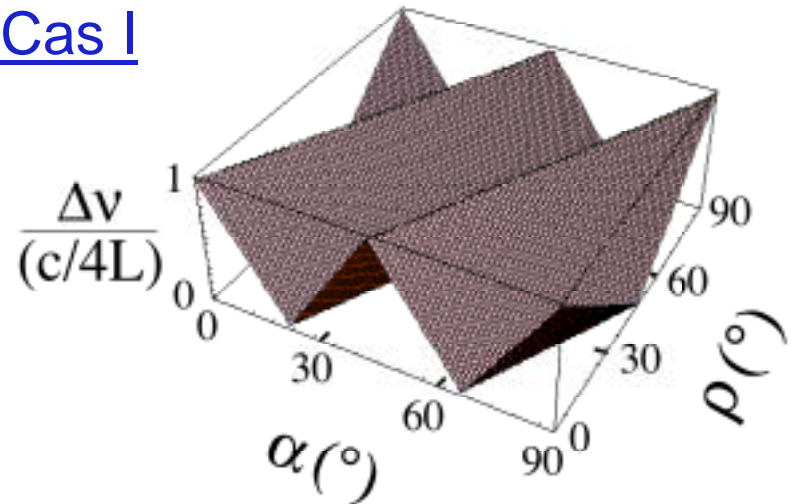
- Cas II : Doublage et Somme
- Cas I : Doublage uniquement

Fréquence de battement

Cas II



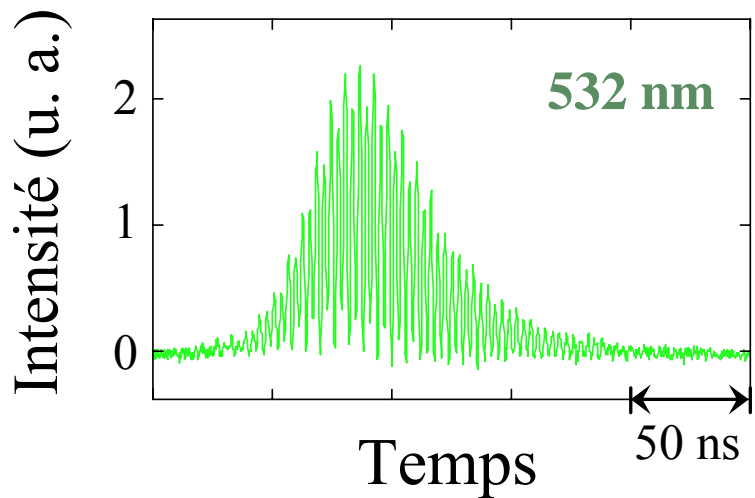
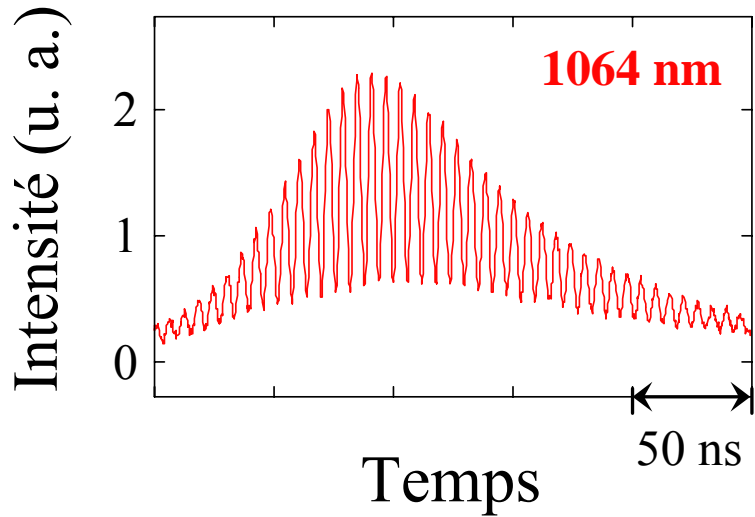
Cas I



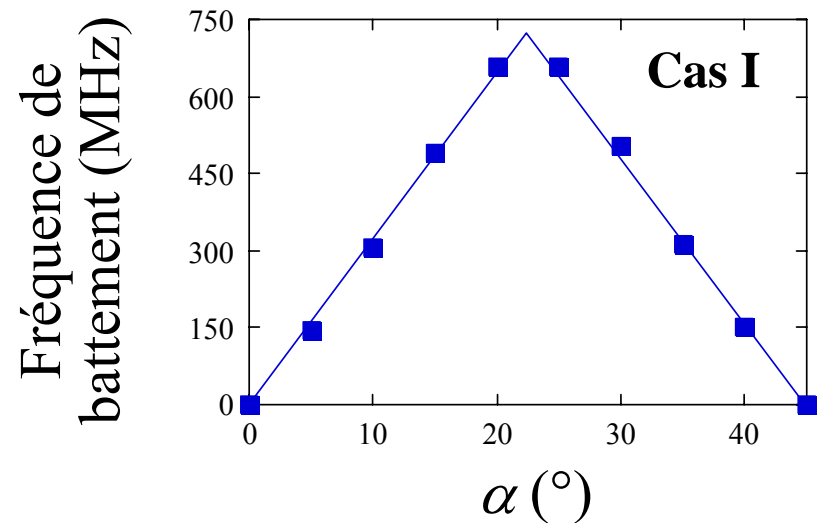
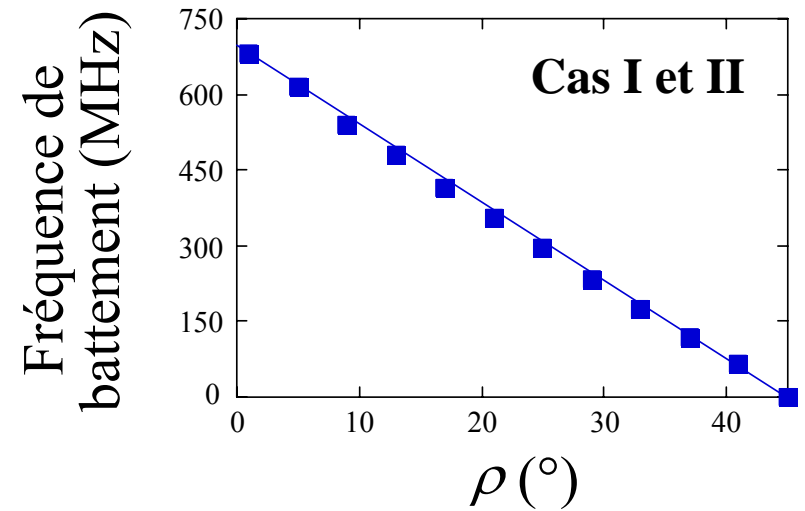
- Continûment accordable en fonction de ρ et α

Résultats expérimentaux : avec $\delta = n\pi$

Les impulsions bi-fréquences



Fréquence de battement



→ Impulsions bi-fréquences dans le visible

→ Continûment accordable

Doublage intracavité d'un laser Nd,Cr:YAG bi-fréquence

➤ Conclusion :

- Impulsions bi-fréquences dans le visible
- En bon accord entre expérience et théorie
- 1550 nm → 775 nm
- Boucle d'asservissement: $\delta = n\pi$

➤ **Au-delà du GHz ...**

➤ **Source THz dans le visible ?**

Plan d'exposé

I. Lasers solides impulsions.

- 1/ Contrôle de la durée des impulsions.
- 2/ Laser impulsional bi-fréquence.
- 3/ Cohérence du battement.

II. Conversion de fréquence.

- 1/ Laser impulsional vert.
- 2/ Laser continu THz rouge.

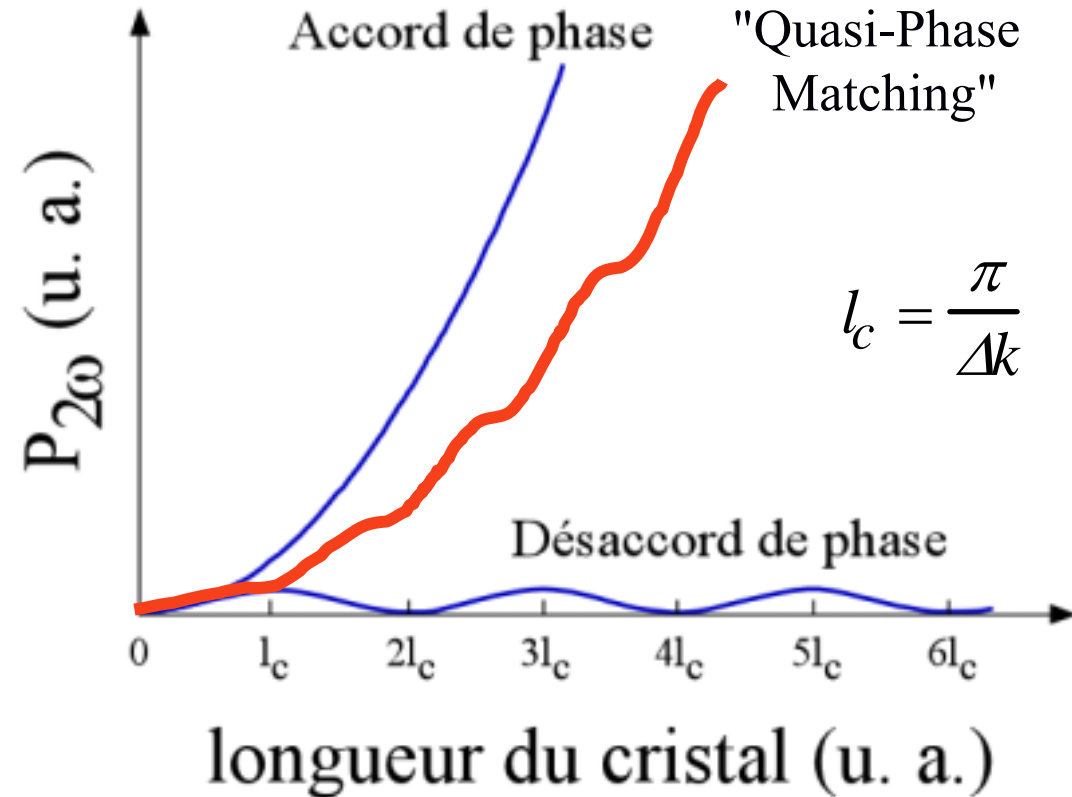
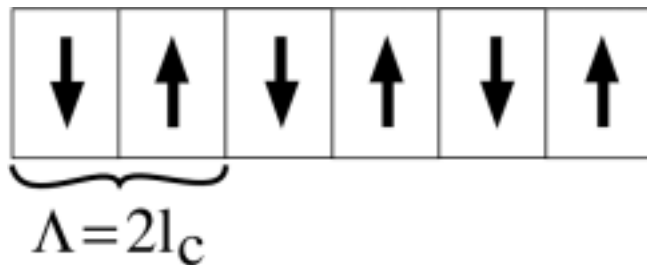
Rappel sur les cristaux non linéaires

→ Cristal massif :

$$\Delta k = \frac{4}{\lambda} (n_{2\omega} - n_{1\omega})$$

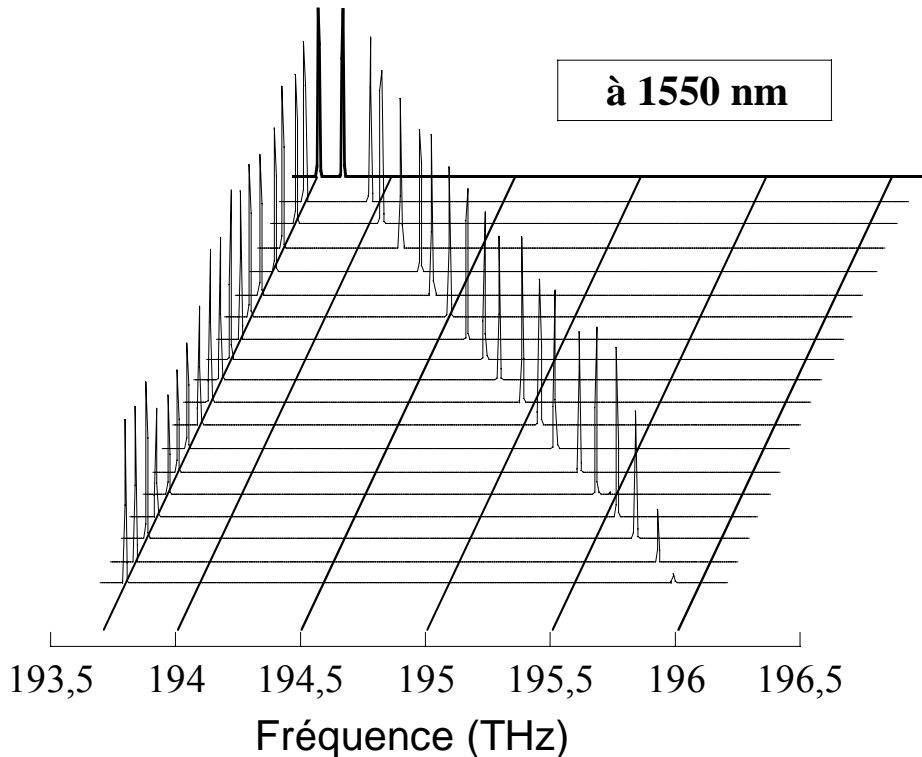
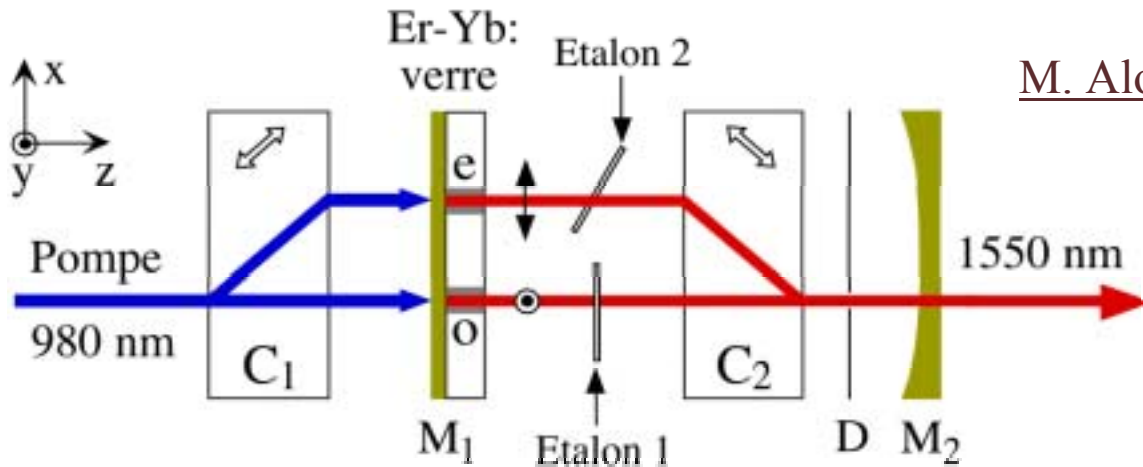
→ Cristal à "QPM"

Bloembergen 1962



➤ Quel type de cristal non linéaire ?

Rappel sur le laser bi-fréquence THz

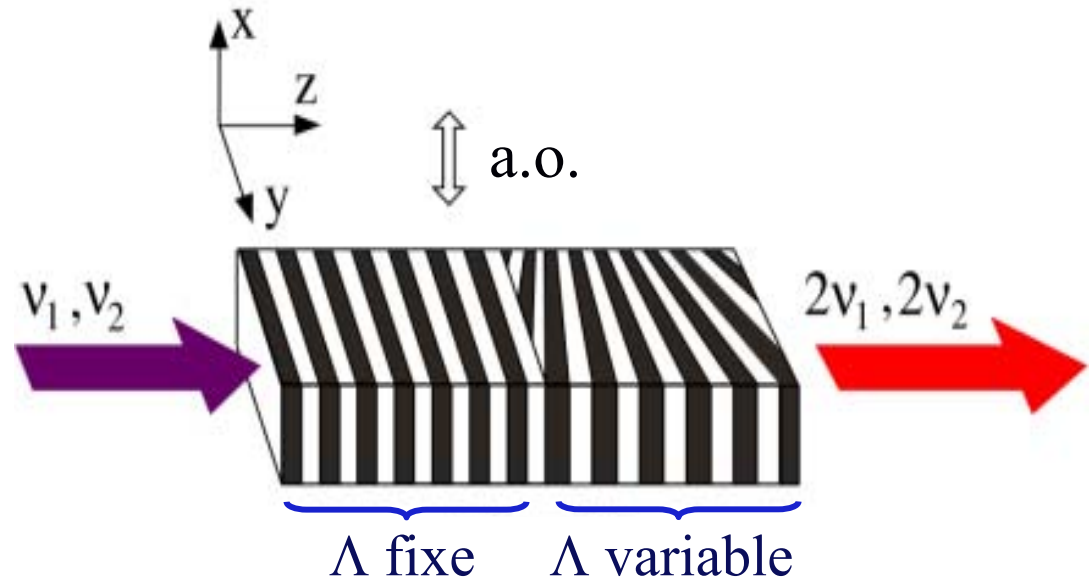


➤ **Cristal à double accord de phase accordable !**

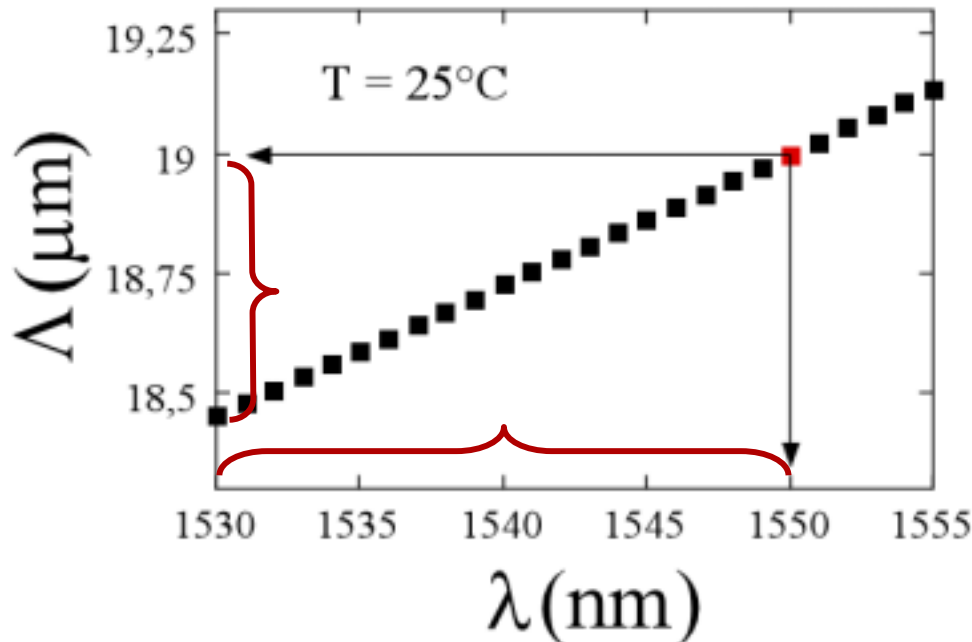
- **Cristal massif : NON**
- **Cristal à "QPM" spécifique : OUI**

Modèle du cristal de PPLN à "QPM"

- Cristal mixte en éventail de PPLN

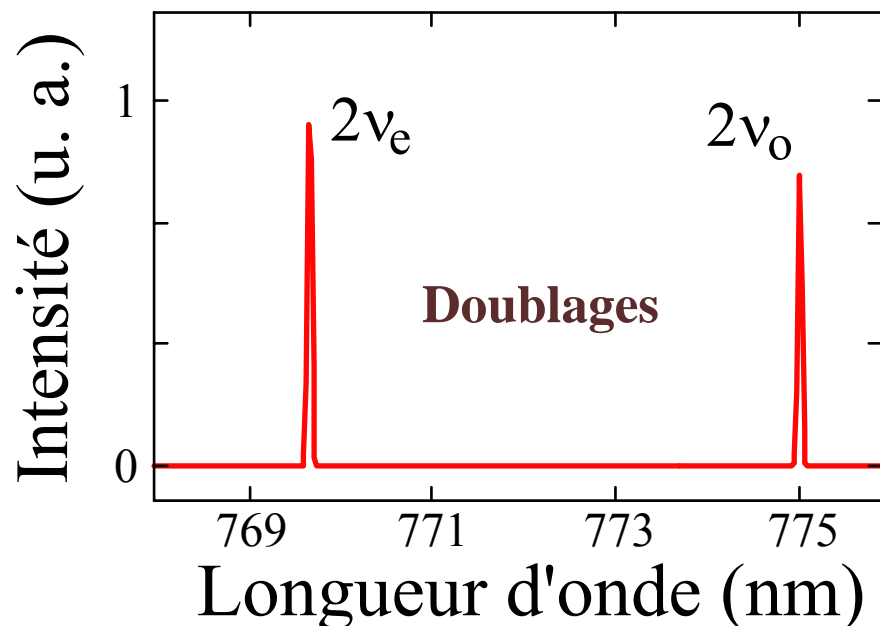
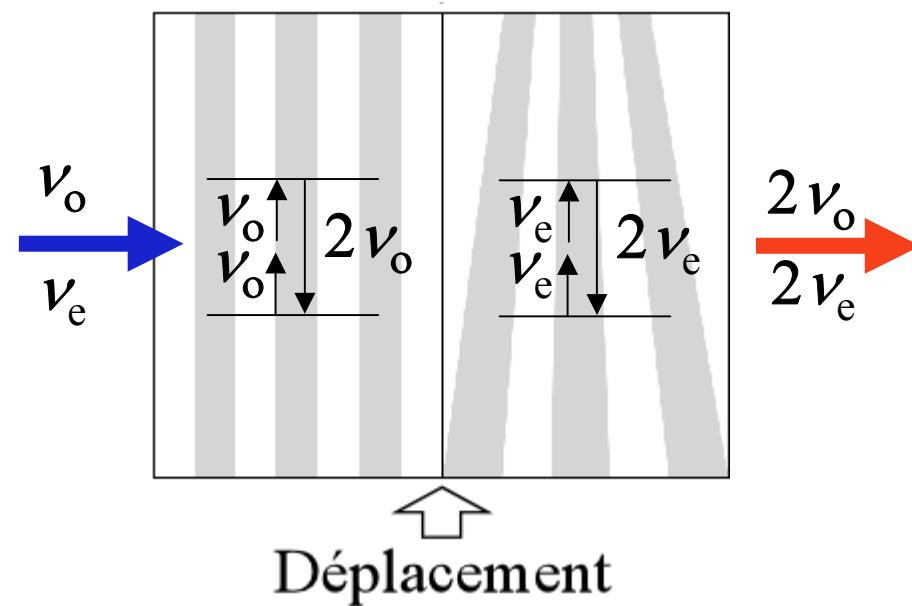
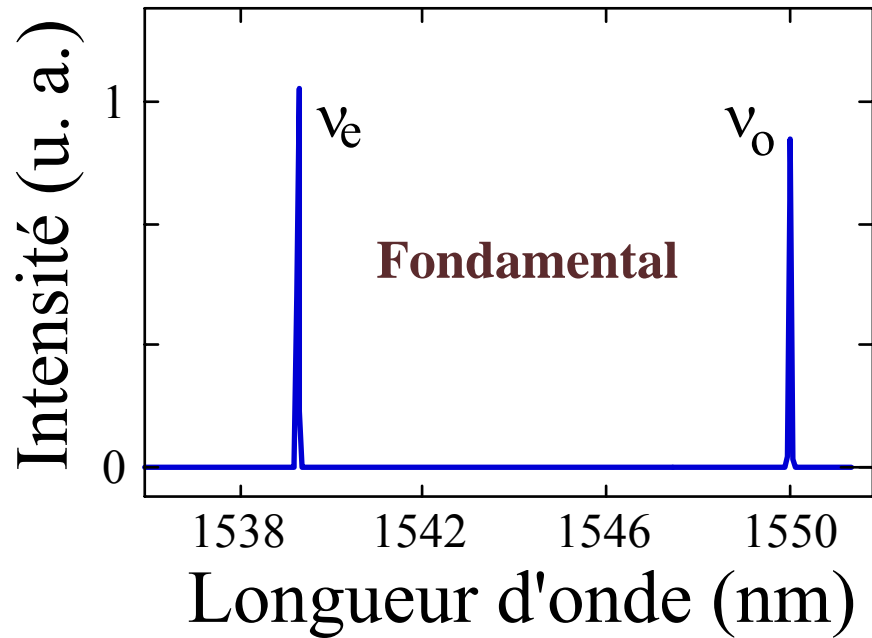


- Périodes d'inversion



- Déplacement de PPLN
- ↕
- Double accord de phase accordable

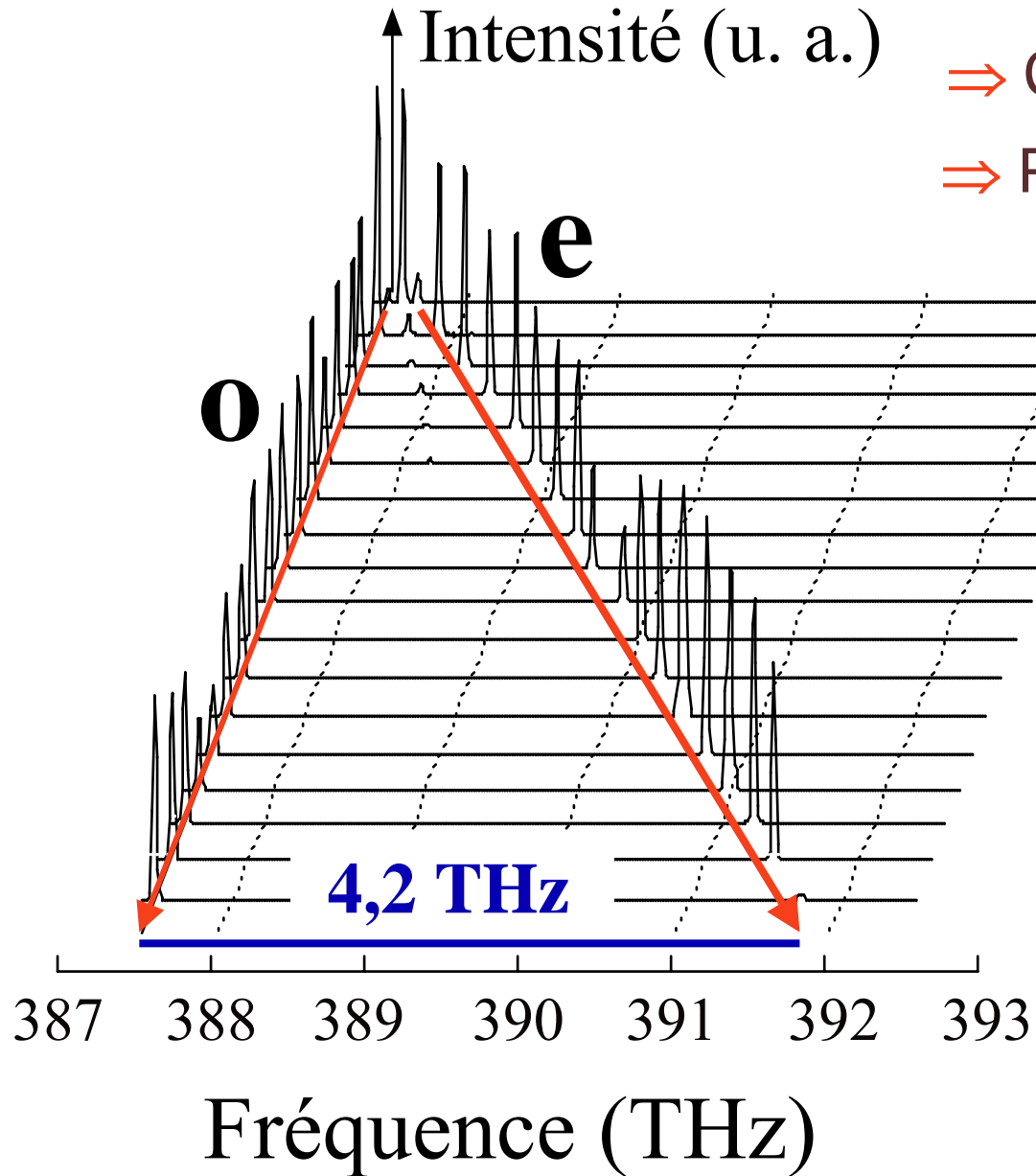
Résultats expérimentaux



→ **Bi-fréquence THz dans le visible !**

→ **Fixer : ν_o**
Varier : ν_e

Source bi-fréquence THz ajustable dans le ROUGE

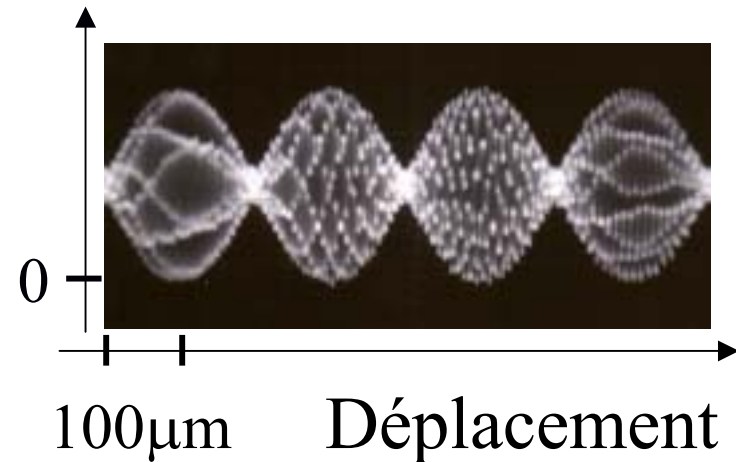


⇒ Continûment accordable

⇒ Puissance totale : 1 → 8 mW

Interférogramme

Battement (1,4 THz)



⇒ Modulation : 100 %

Doublage de fréquence du laser bi-fréquence THz

➤ Conclusion :

- Cristal spécifique mixte en éventail de PPLN
- Bon accord expérience-théorie
 - **Source bi-fréquence THz dans le visible**
 - **Battement continûment accordable de 0 à 4,2 THz**
 - **Grande qualité de battement, 100% de modulation**
- Augmenter la puissance du fondamental → 50 mW du rouge
- *Application* : génération d'ondes sub-millimétriques,...

Conclusion générale

➤ Optimisation des lasers solides impulsions

- Stabilisation du taux de répétition : 10^{-6}
 - Appl. Phys. Lett. 2001
- Contrôle de la durée des impulsions : $0 \rightarrow 500$ ns
 - Eur. Phys. J. D 2002
- Augmentation d'énergie des impulsions : $\times 2,5$

➤ Lasers solides impulsions bi-fréquences

- Lasers impulsions bi-fréquences: **Nd:YAG-Cr:YAG**, **Er-Yb:verre-Co:ASL** ($\Delta\nu: 0 \rightarrow 20$ GHz).
 - Appl. Opt. 2002
 - Opt. Lett. 2003
- **Battement cohérent** d'impulsion à impulsion → lidar-radar.
 - IEEE J. Lightwave Technol. 2003

Conclusion générale

➤ Conversion de fréquence → source bi-fréquence visible

→ Méthodes : hors cavité ou intracavité

→ Cristal non linéaire : massif ou quasi-accord de phase

⇒ Impulsions bi-fréquences accordables à **532 nm** et à **775 nm**.

- J. Phys. IV : Proc. 2002

- J. Opt. Soc. Am. B 2003

→ **Cristal spécifique** de PPLN → source bi-fréquence (**4,2 THz**)

dans le **visible** → génération d'ondes THz.

Perspectives

→ Applications :

- Lidar-radar Doppler.
- Génération d'ondes sub-millimétriques.
- Spectroscopie.
- Applications médicales, ...

→ Développements futurs :

- Microchip utilisant le cristal électro-optique.
- “Chirp” rapide de la fréquence.
- Boucles d'asservissements.
- Lasers auto-doublés.