

# *Source Laser impulsionnelle à haute cadence dans l'ultraviolet*

*Sébastien Forget*

# ***Introduction***

---

*Objectif*: répondre à un besoin exprimé par nos collègues biologistes.

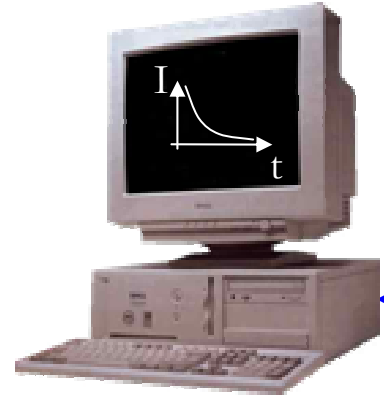
*Quel besoin ?*

Expériences de *mesure de temps de vie de fluorescence* : excitation par laser de molécules biologiques.

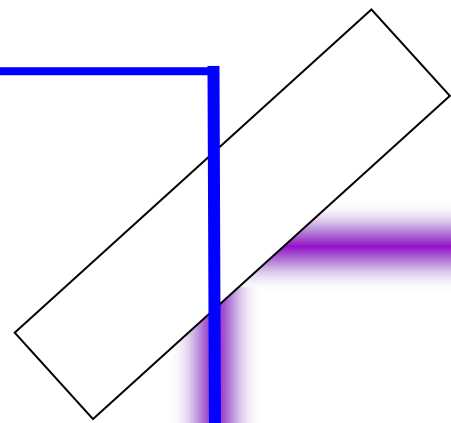
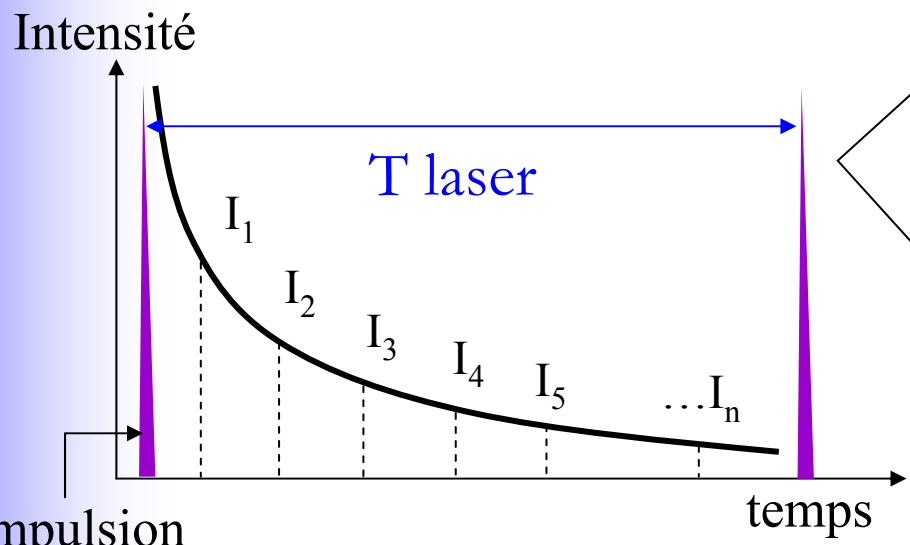
# Principe

## mesure de temps de vie de fluorescence

$\tau > 50 \text{ ns} \rightarrow C = 1/T < \text{quelques MHz}$



**LASER**



Objectif de microscope

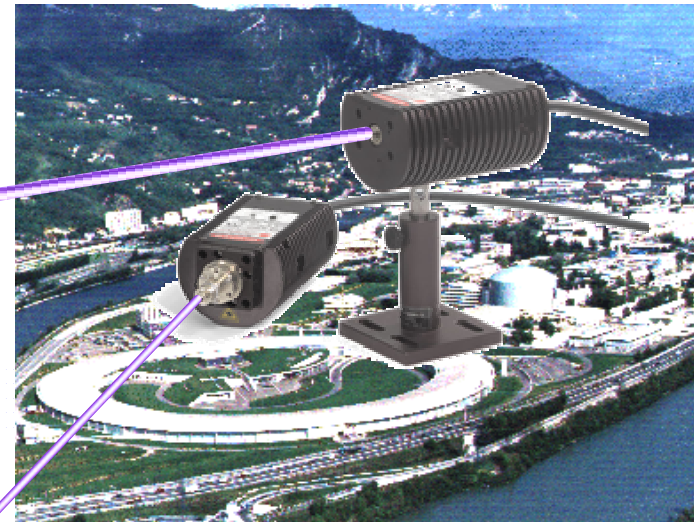


# ***Cahier des charges***

---

- **$C_{\text{laser}}$**  = quelques MHz
- **$\Delta t_{\text{laser}}$**  = moins d'une nanoseconde
- **$\lambda_{\text{laser}}$**  = ultraviolet
- **$P_{\text{laser}}$**  = quelques mW seulement
- **Compacité et simplicité** maximales

- Laser à verrouillage de modes + sélection d'impulsion + conversion de fréquence
- Diodes laser déclenchées par le gain + amplification + conversion de fréquence
- Diodes laser déclenchées par le gain ultraviolettes
- Synchrotron

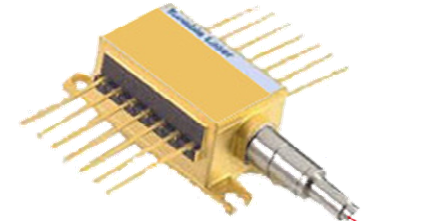


## Notre source laser doit être :

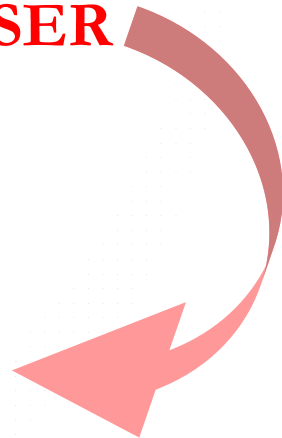
- Efficace
- Robuste
- Compacte



**POMPAGE PAR  
DIODES LASER**



- Diodes efficaces : 808 nm, 980 nm...
- Cristaux lasers efficaces :  
proche infrarouge ( $\approx 1,06 \mu\text{m}$ ) : Dopage au néodyme



## Notre source laser doit être :

- Efficace

- Robuste



**POMPAGE PAR  
DIODES LASER**

- Compacte

- Entièrement passive



**CHOIX DE LA  
SOURCE**

- Répondant au cahier des charges

- ultraviolet, accordable, impulsionnel.

## Notre source laser doit être :

- Efficace

- Robuste



**POMPAGE PAR  
DIODES LASER**

- Compacte

- Entièrement passive



**CHOIX DE LA  
SOURCE**

- Répondant au cahier des charges

- ultraviolet, accordable, impulsionnel.



**OPTIQUE NON-  
LINEAIRE**



# ***Problématique***

---

Laser solide pompé par diode : **INFRAROUGE**





Besoin de convertir la longueur d'onde jusqu'à  
**L'ULTRAVIOLET**

Or les rendements de conversion sont  
proportionnels à la **PUISSANCE** crête de la  
source.

Besoin de puissance : **AMPLIFICATEUR**

# ***Sommaire***

---

-  ***La source laser***
-  ***L'amplification***
-  ***La conversion de fréquence***
-  ***Conclusion***

# ***Sommaire***

---




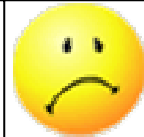
 ***La source laser***

 ***L'amplification***

 ***La conversion de fréquence***

 ***Conclusion***

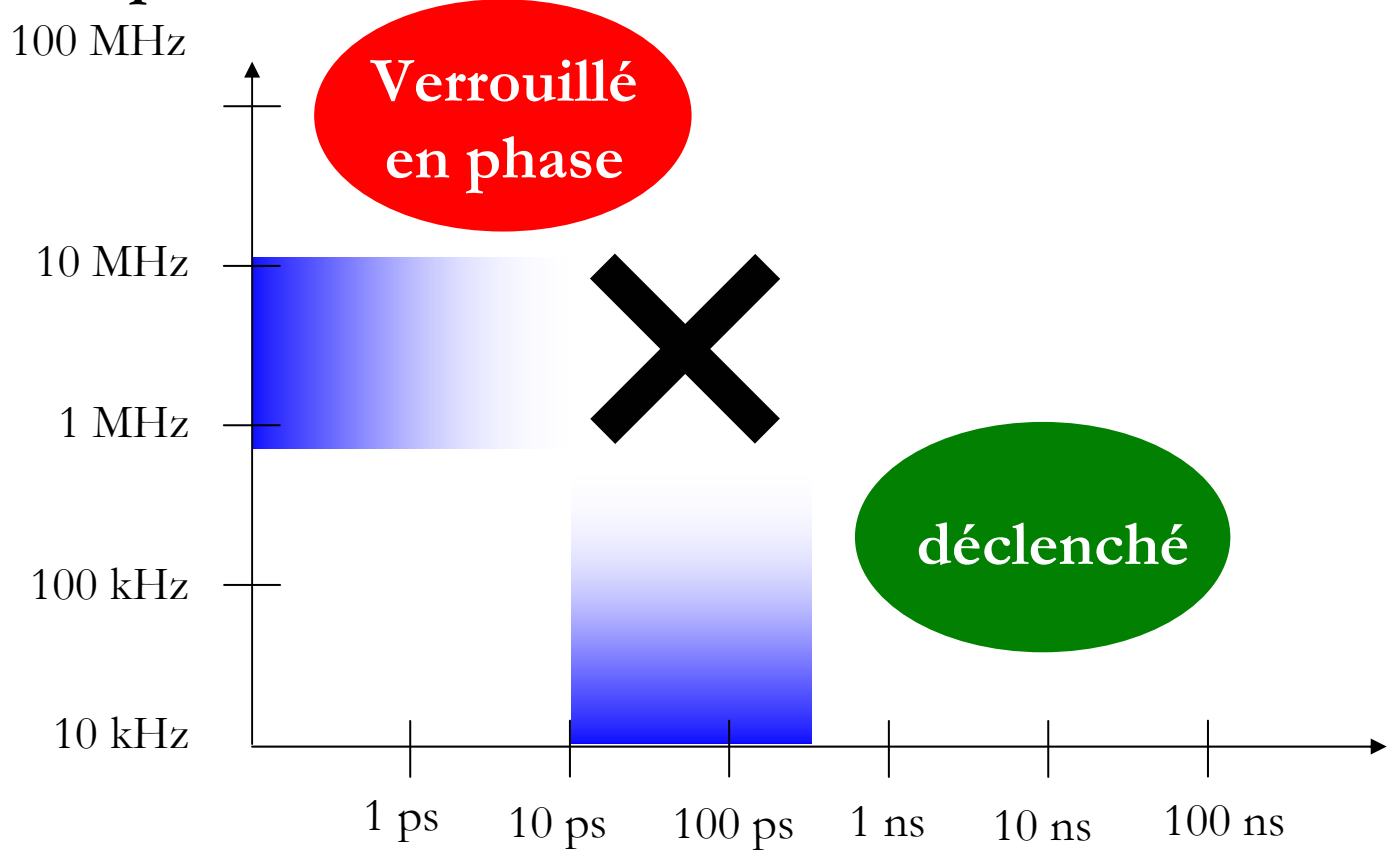
# Quelle source pour quelles impulsions ?

Type de laser impulsionnel	Durée des impulsions	Taux de répétition
Déclenché (Q-switch)	1 – 10 <sup>aines</sup> ns 	qq1 10 <sup>aines</sup> à qq1 100 <sup>aines</sup> kHz 
Verrouillage de mode	1 – 10 <sup>aines</sup> ps 	qq1 10 <sup>aines</sup> MHz 



# Quelle source pour quelles impulsions ?

Taux de répétition



Durée des impulsions

Verrouillage de mode : *diminuer la cadence*

$$\text{Cadence} \propto \left( \frac{c}{2L} \right) \quad \longrightarrow \quad \text{Augmenter } L \dots$$

... jusqu'à plus de 100 m

Déclenchement : *diminuer la durée*

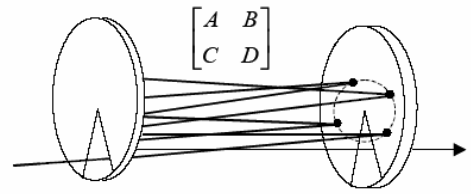
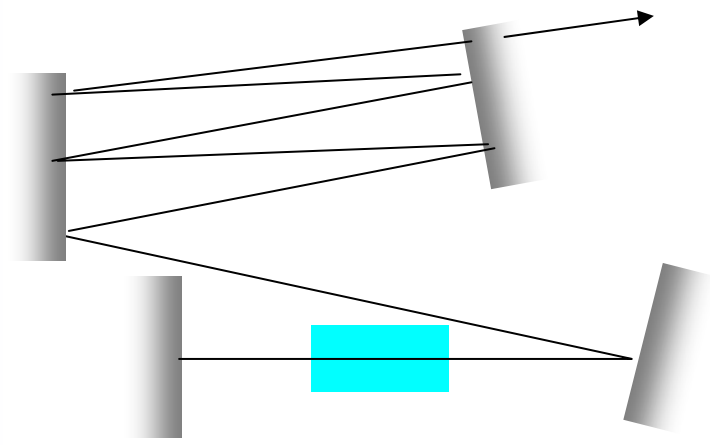
$$\Delta t \propto \frac{L}{\text{Pertes}} \quad \longrightarrow \quad \text{Diminuer } L \dots$$

... jusqu'à moins de 500  $\mu\text{m}$



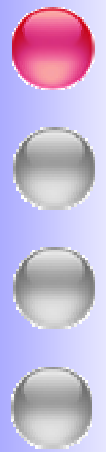
# 1/ Laser à verrouillage de mode : *la cavité géante*

**Principe** : augmenter la taille de la cavité grâce à une cellule multipassage.

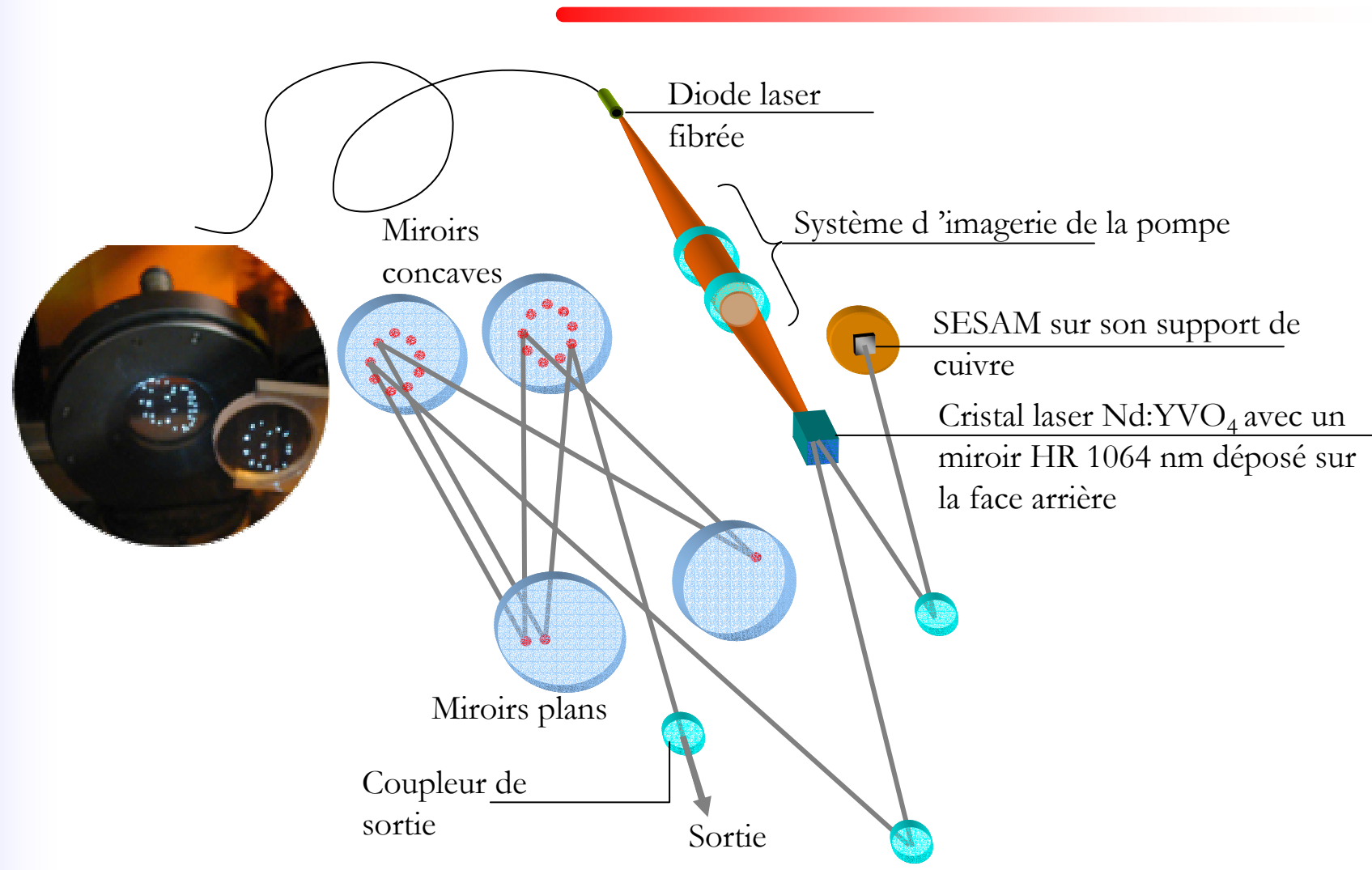


*Herriott and Kogelnik, 1965*

**$C = 1 \text{ MHz} \rightarrow L = 150 \text{ mètres}$**



# 1/ LVM : le schéma







Miroirs concaves

Alimentation de la diode de pompe

Boîte de protection

Miroirs plans

Fibre de la diode laser de pompe

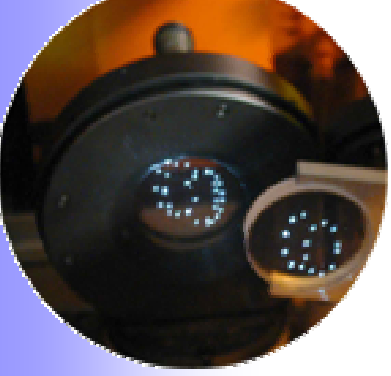
Lentilles de collimation/focalisation de la pompe

Cristal Nd:YVO<sub>4</sub>

SESAM

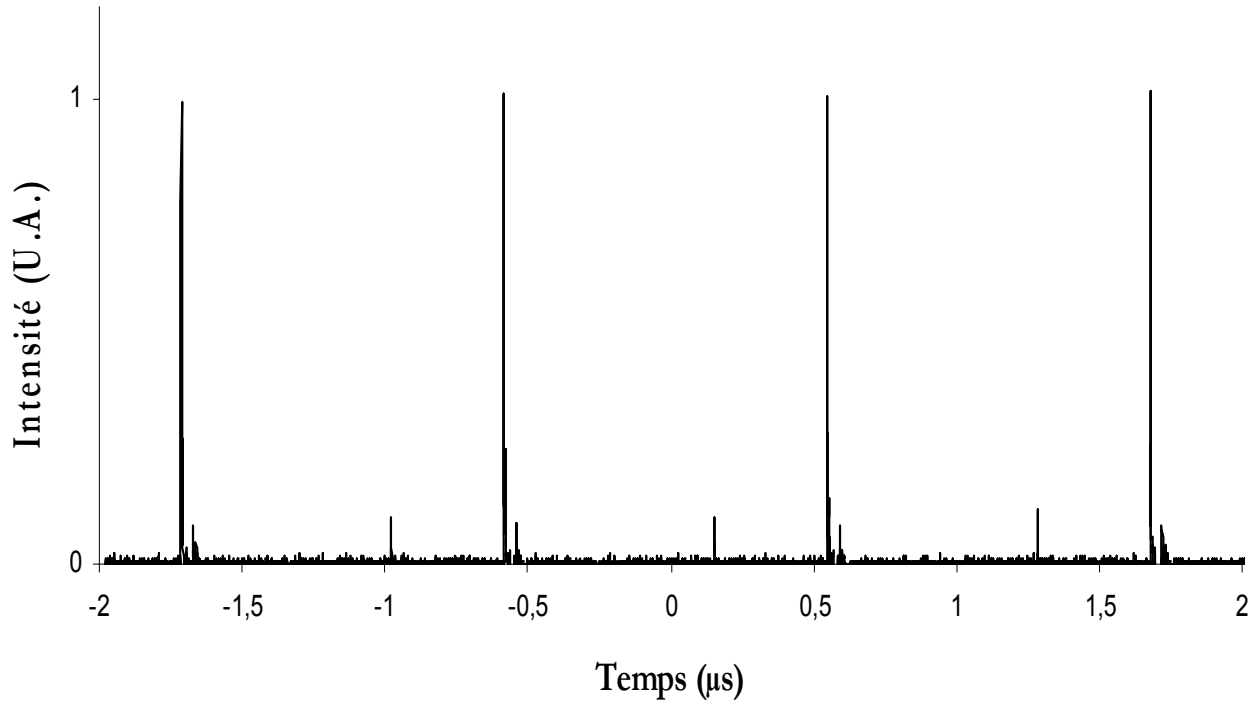
Miroirs de repli





# 1/ LVM : *les résultats*

---

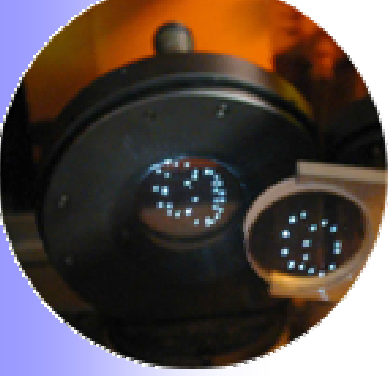


**884 KHz / 170m**

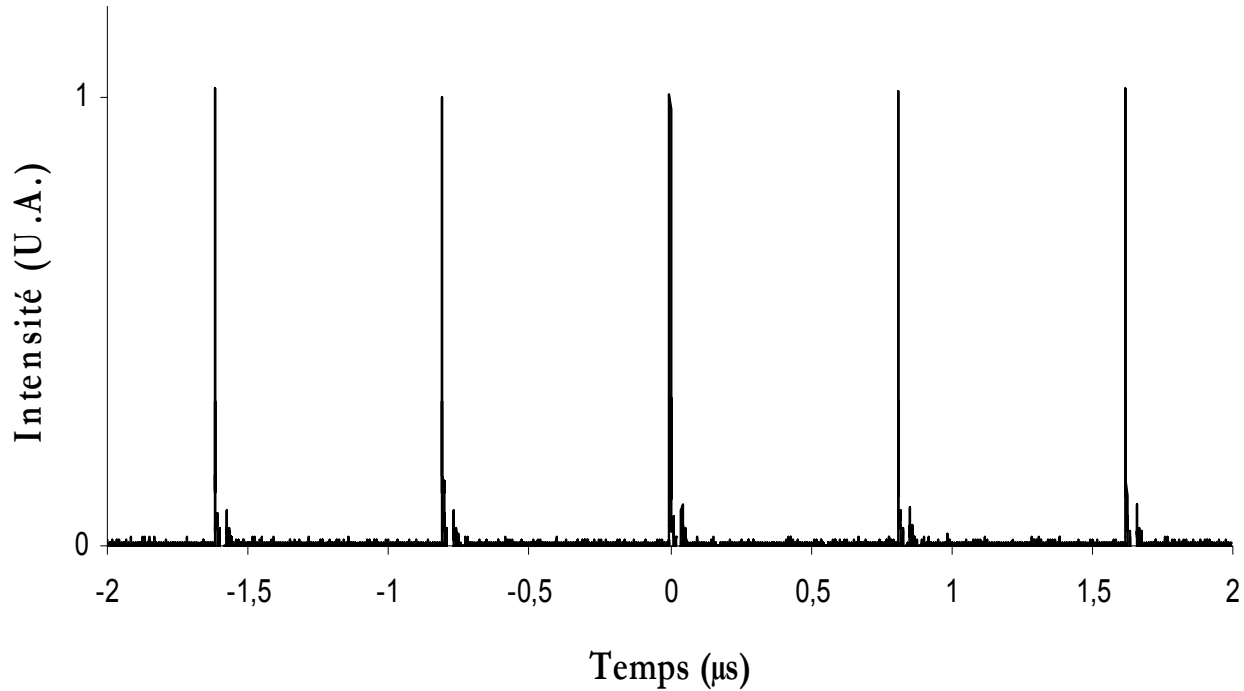
**$P_{\text{moyenne}} = 100\text{mW}$**

**$E = 113\text{ nJ}$**





# 1/ *LVM* : *les résultats*



**1,2 MHz/125m**

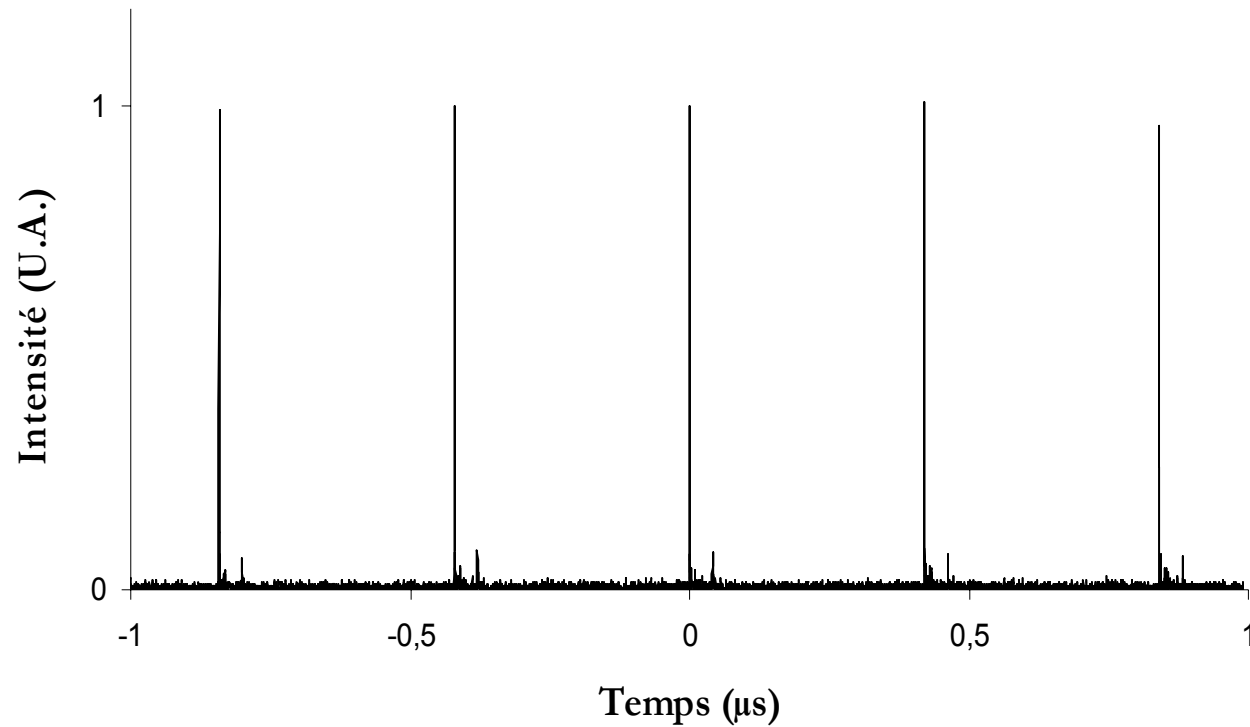
**$P_{\text{moyenne}} = 470\text{mW}$**

**$E = 390\text{ nJ}$**





# 1/ *LVM* : *les résultats*



**2,3 MHz/65m**

**$P_{\text{moyenne}} = 1\text{W}$**

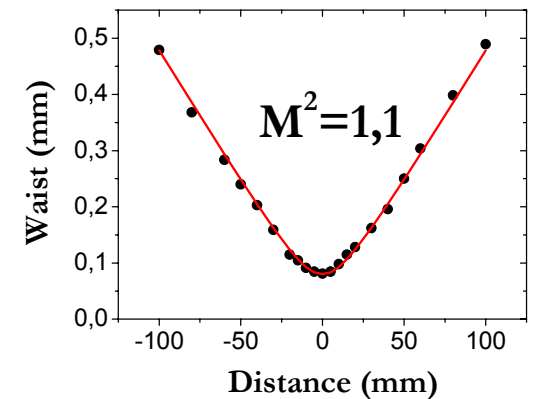
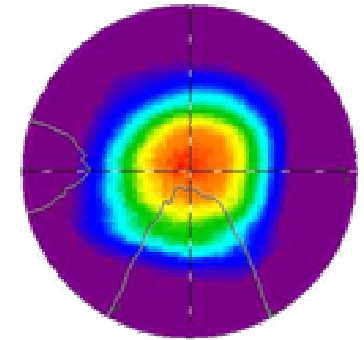
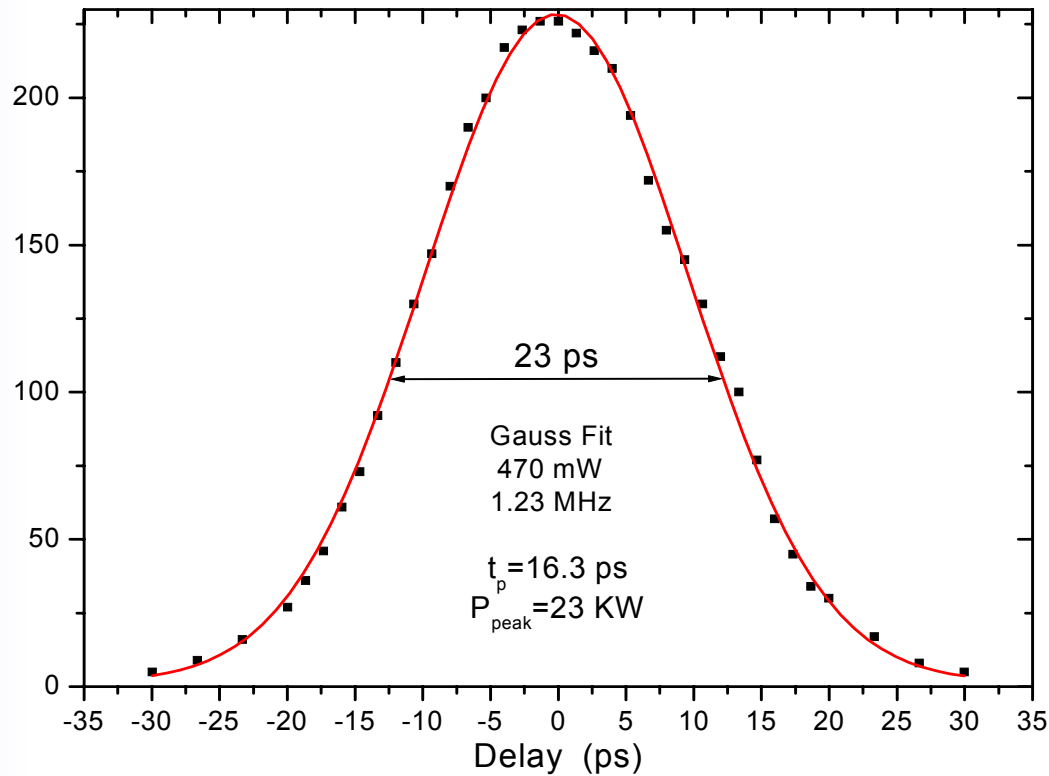
**$E = 435 \text{ nJ}$**

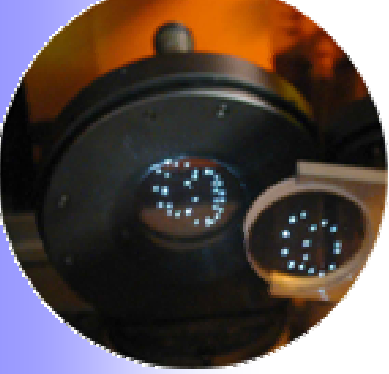




# 1/ *LVM* : *les résultats*

## autocorrélation





# 1/ LVM : Conclusion

---



• *Taux de répétition ajustable autour de quelques MHz*



• *Durée des impulsion de moins de 20 ps*



• *Faisceau de bonne qualité spatiale ( $M^2 = 1,1$ )*



• *Puissance crête autour de 25 kW*



• *Encombrement : environ 2 m<sup>2</sup>*



• *Robustesse : dépendante du SESAM*



## 2/ **Laser déclenché :** **la micro-cavité**

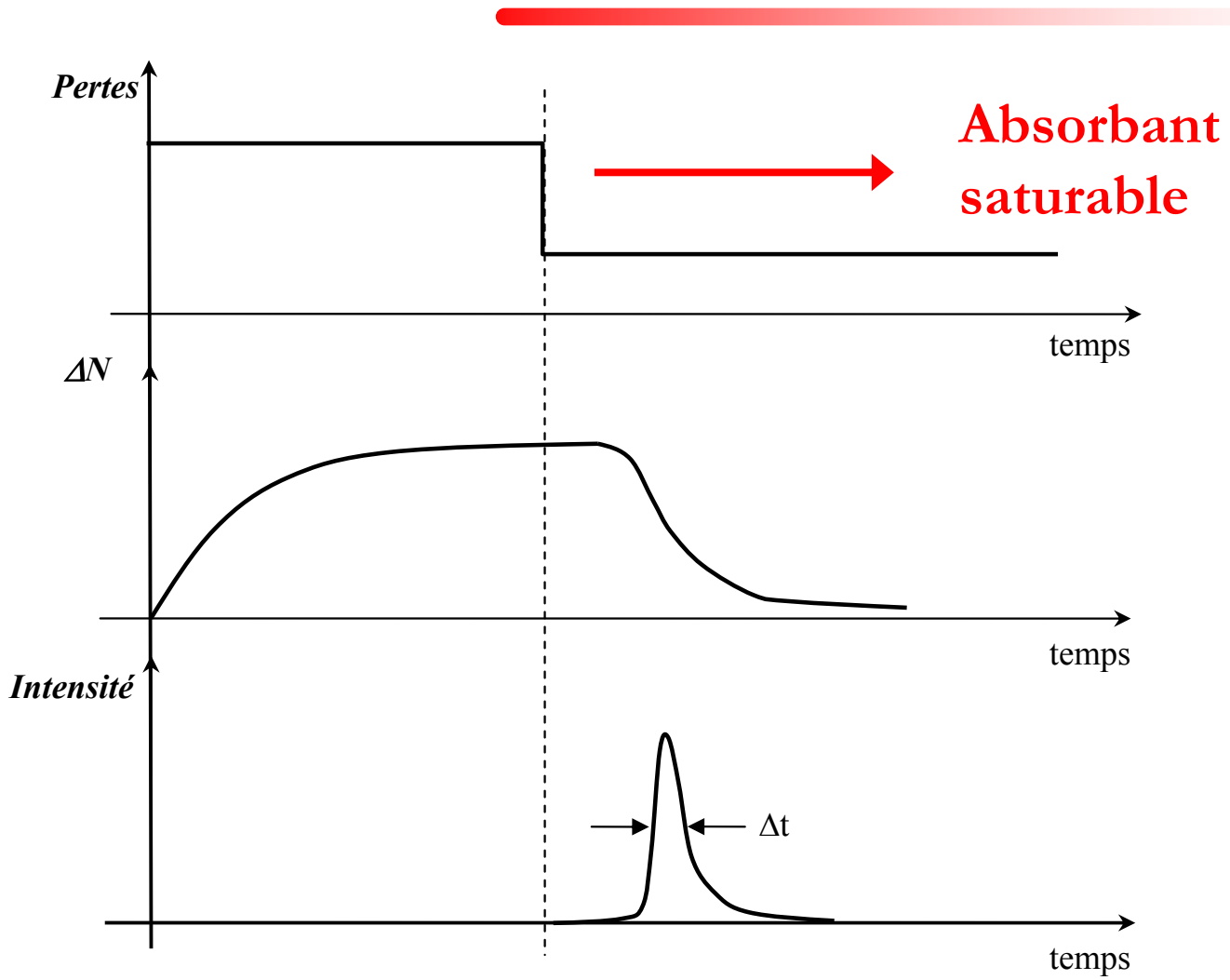
---

### Principe :

- Diminuer la taille de la cavité afin de diminuer la durée des impulsions produites.
- Utiliser un milieu laser à fort gain et un absorbant saturable bien choisi pour atteindre les cadences voulues

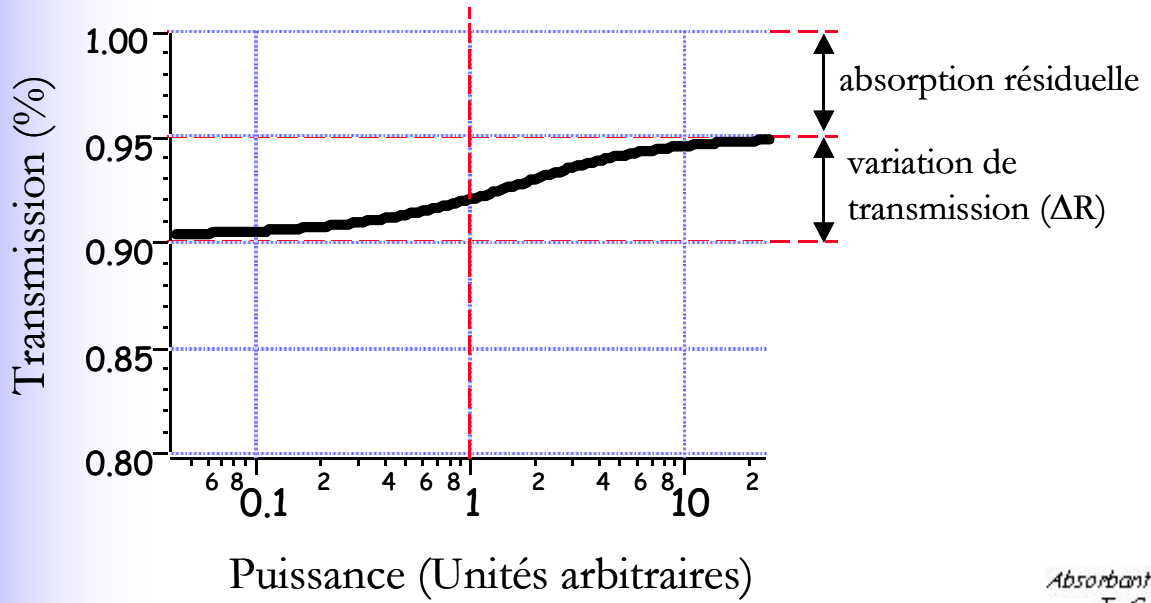


# 2/Laser déclenché : *Principe*

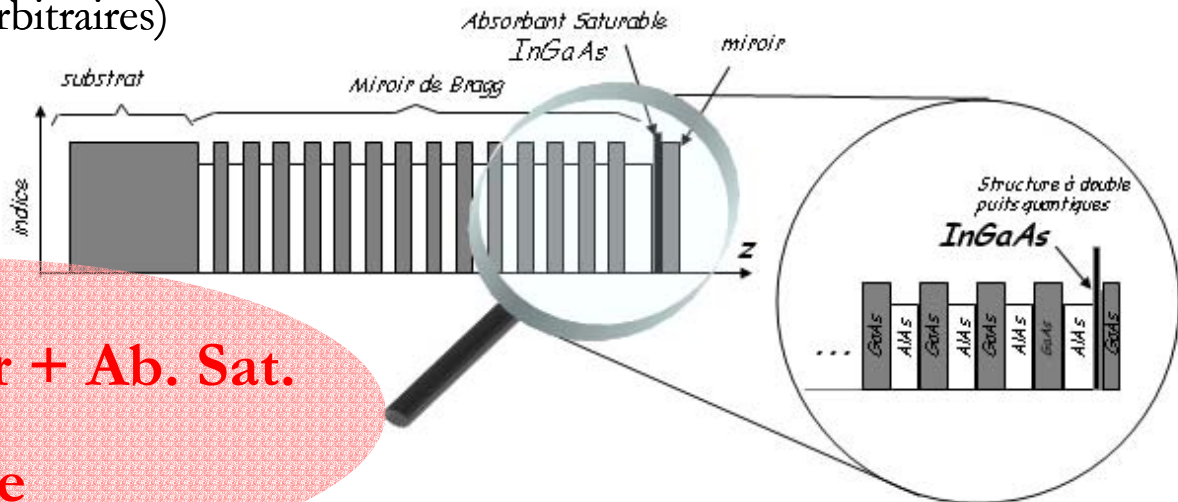




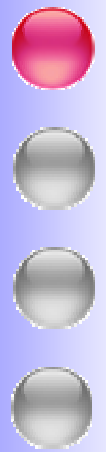
# 2/Laser déclenché : L'absorbant saturable



**Choix de  $\Delta R$  possible**



**Fonction miroir + Ab. Sat.**  
**→ Cavité courte**



# 2/Laser déclenché : *Dimensionnement*

On peut montrer que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta t = \frac{4S_p Tr}{\Delta R} \\ C = \frac{\frac{2 \sigma_L \eta_p P_p \tau}{A h \nu_p} - (P + \Delta R)}{2 \tau \Delta R} \end{array} \right.$$

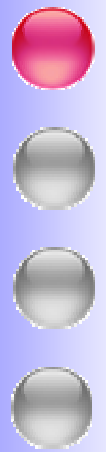
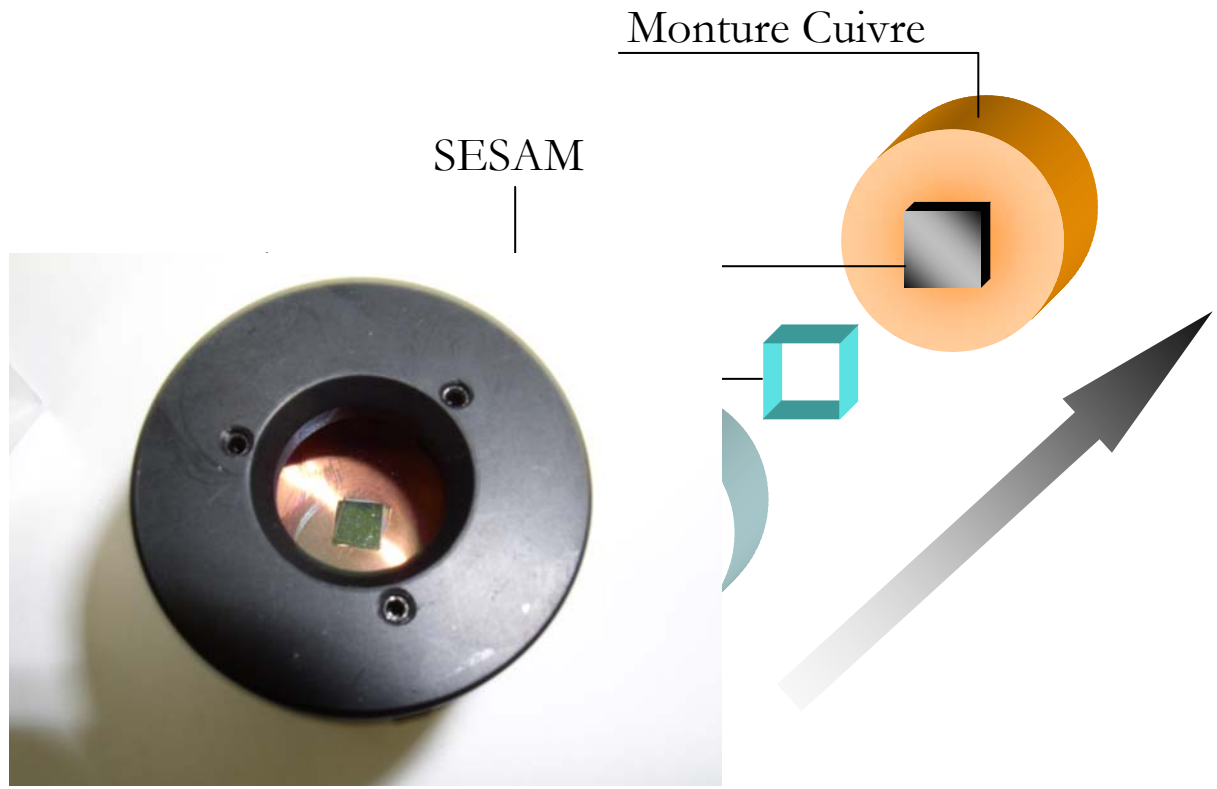
$\Delta t < 500 \text{ ps} \rightarrow L = 400 \text{ }\mu\text{m}$

$C = 1 \text{ MHz} \rightarrow \Delta R = 6\%$

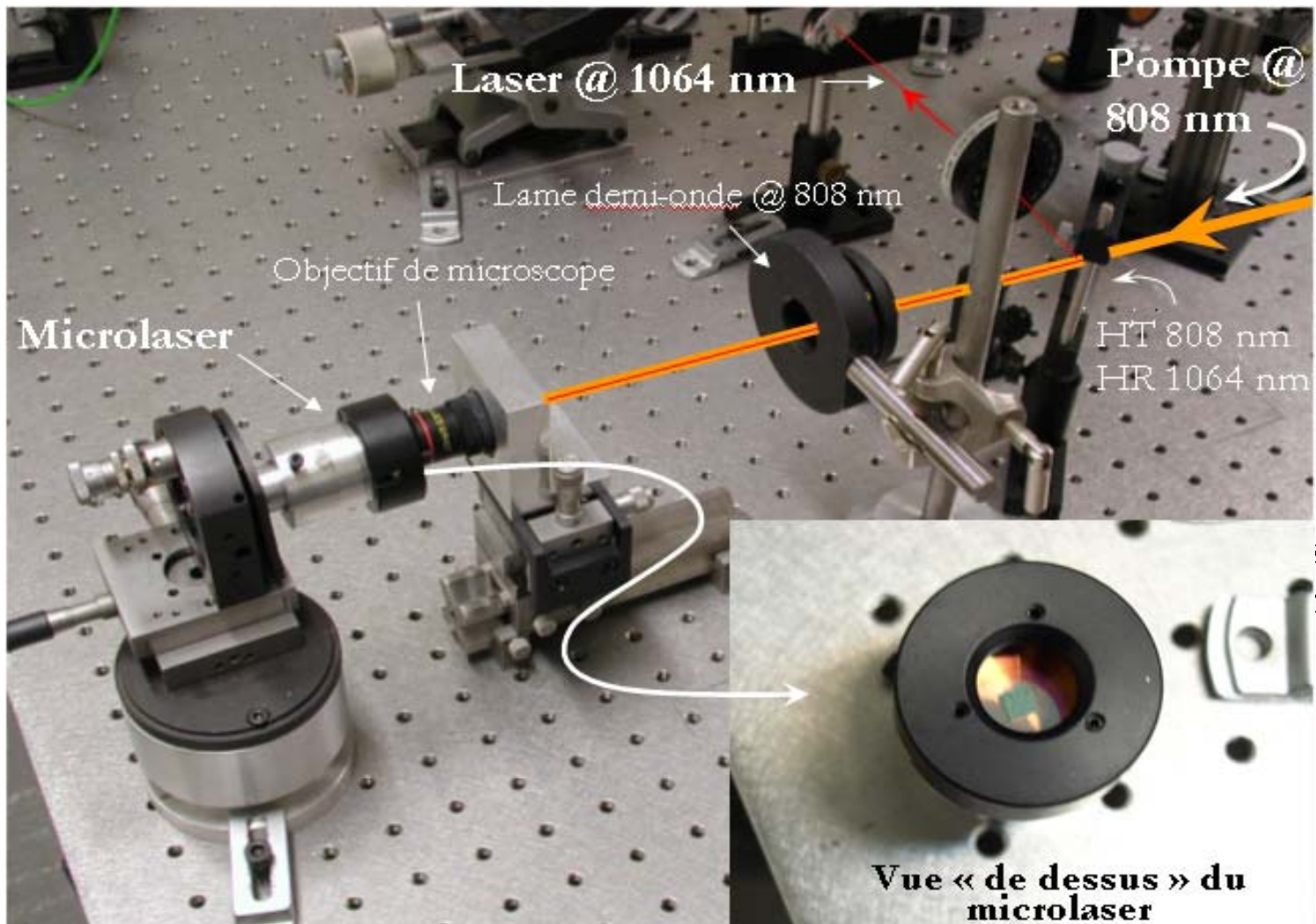


# 2/Laser déclenché :

## Schéma

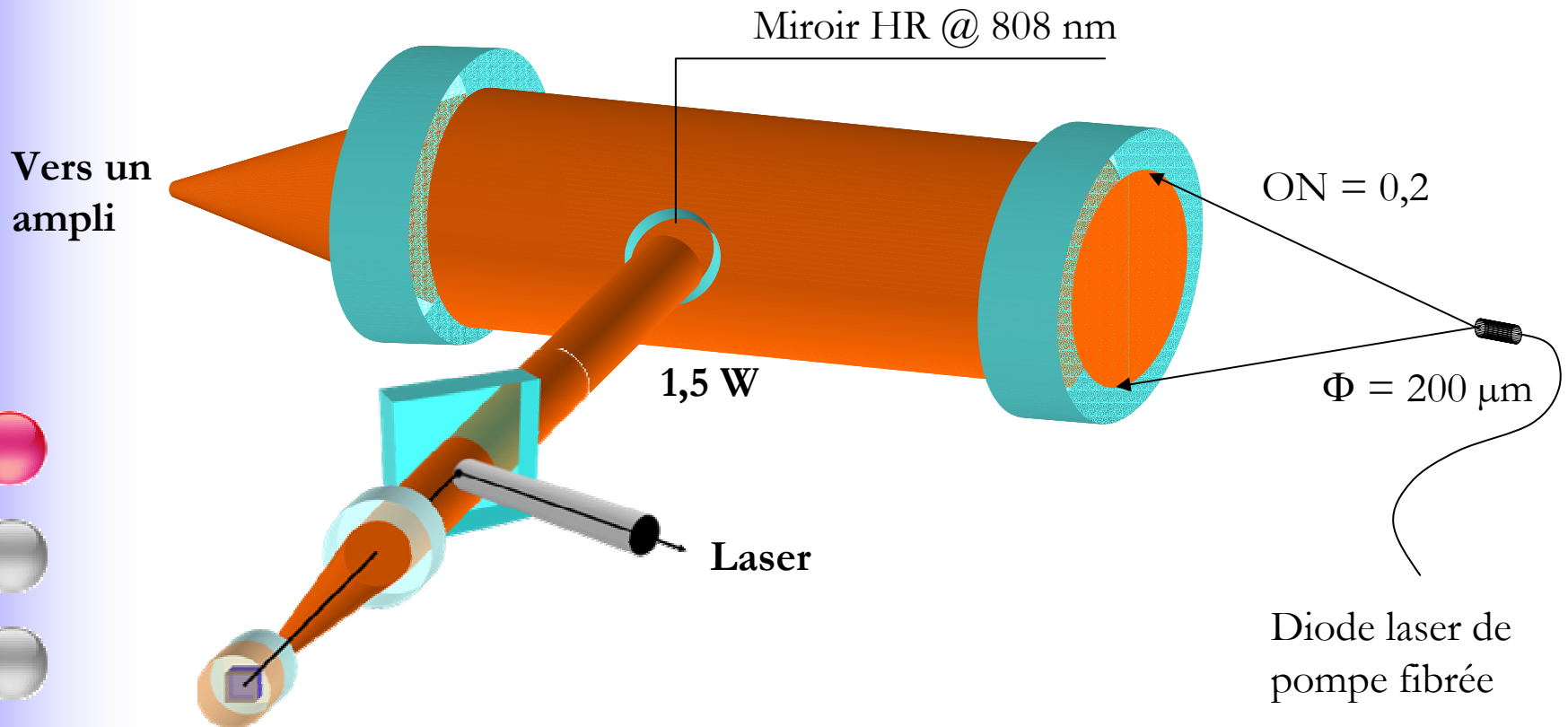


# 2/Laser déclenché : *Schéma*





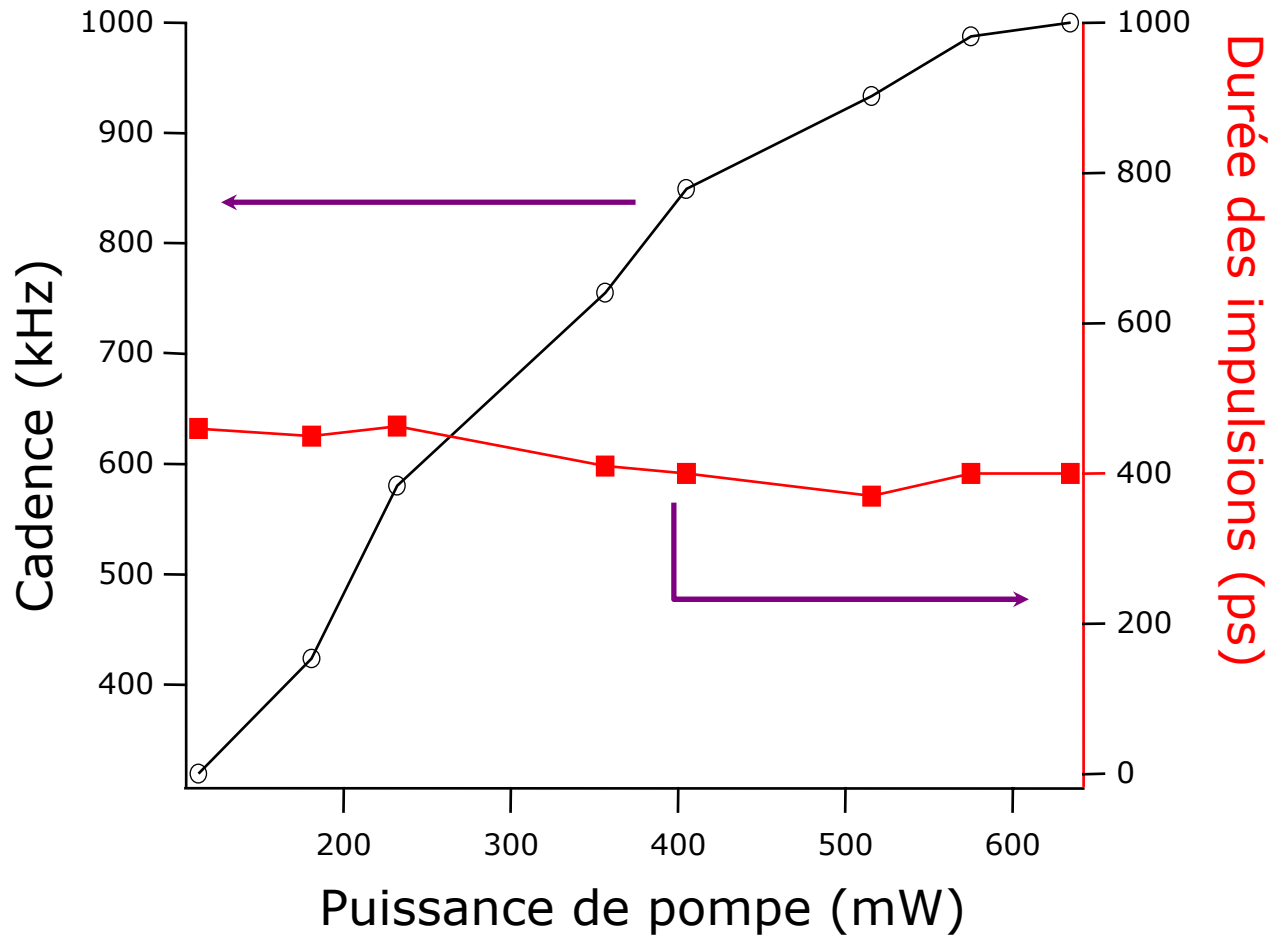
# 2/Laser déclenché : *La pompe*





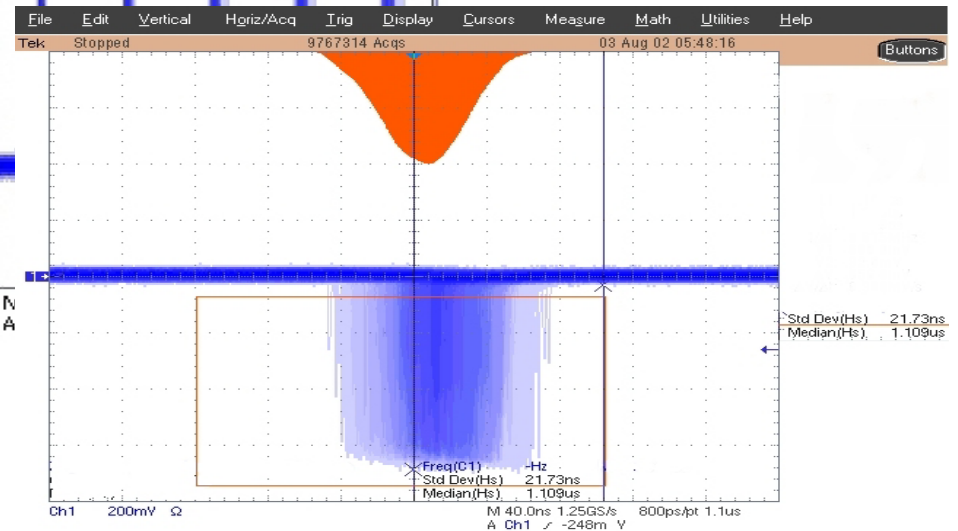
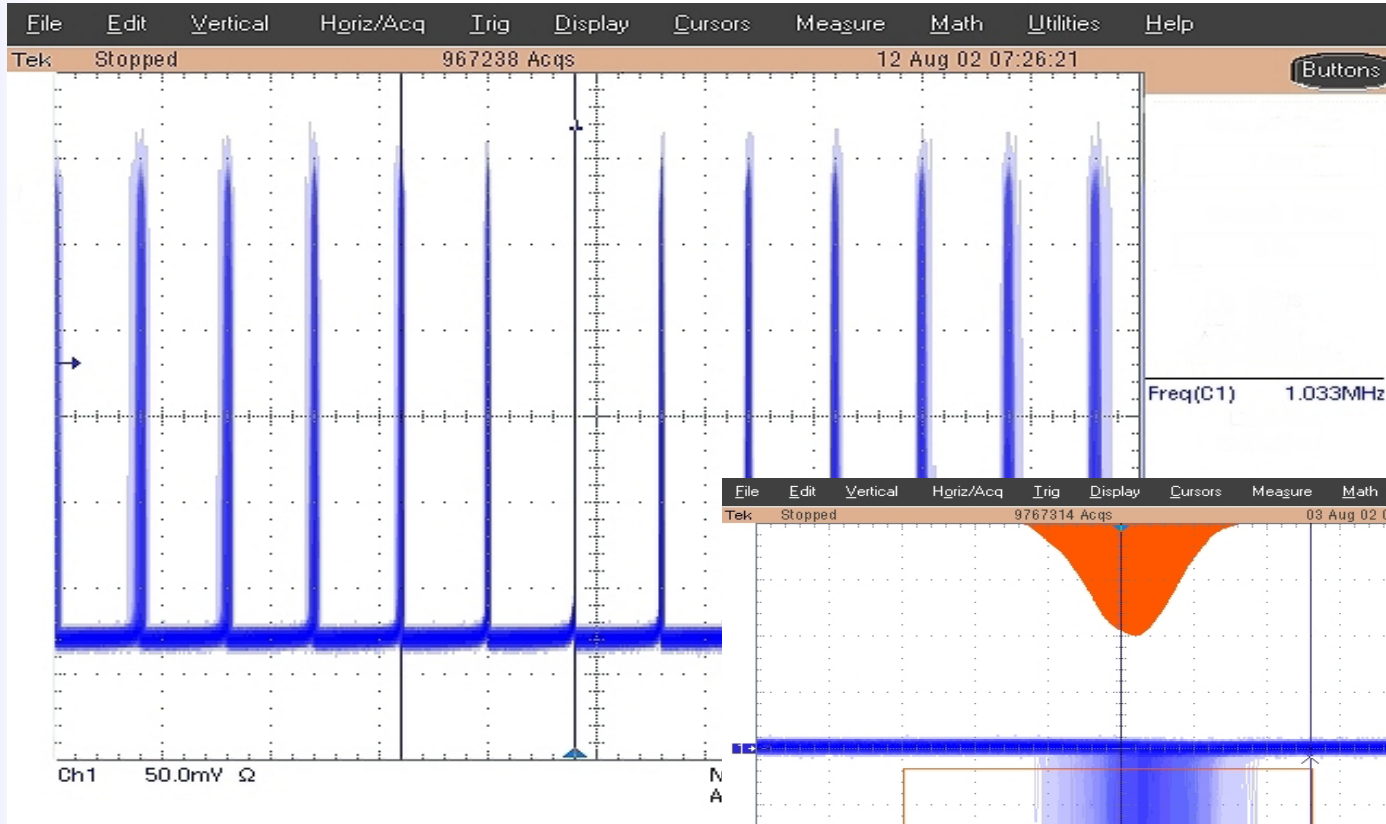
# ***2/Laser déclenché :***

## ***Résultats***





# 2/Laser déclenché : Cadence des impulsions



Gigue temporelle > 2%

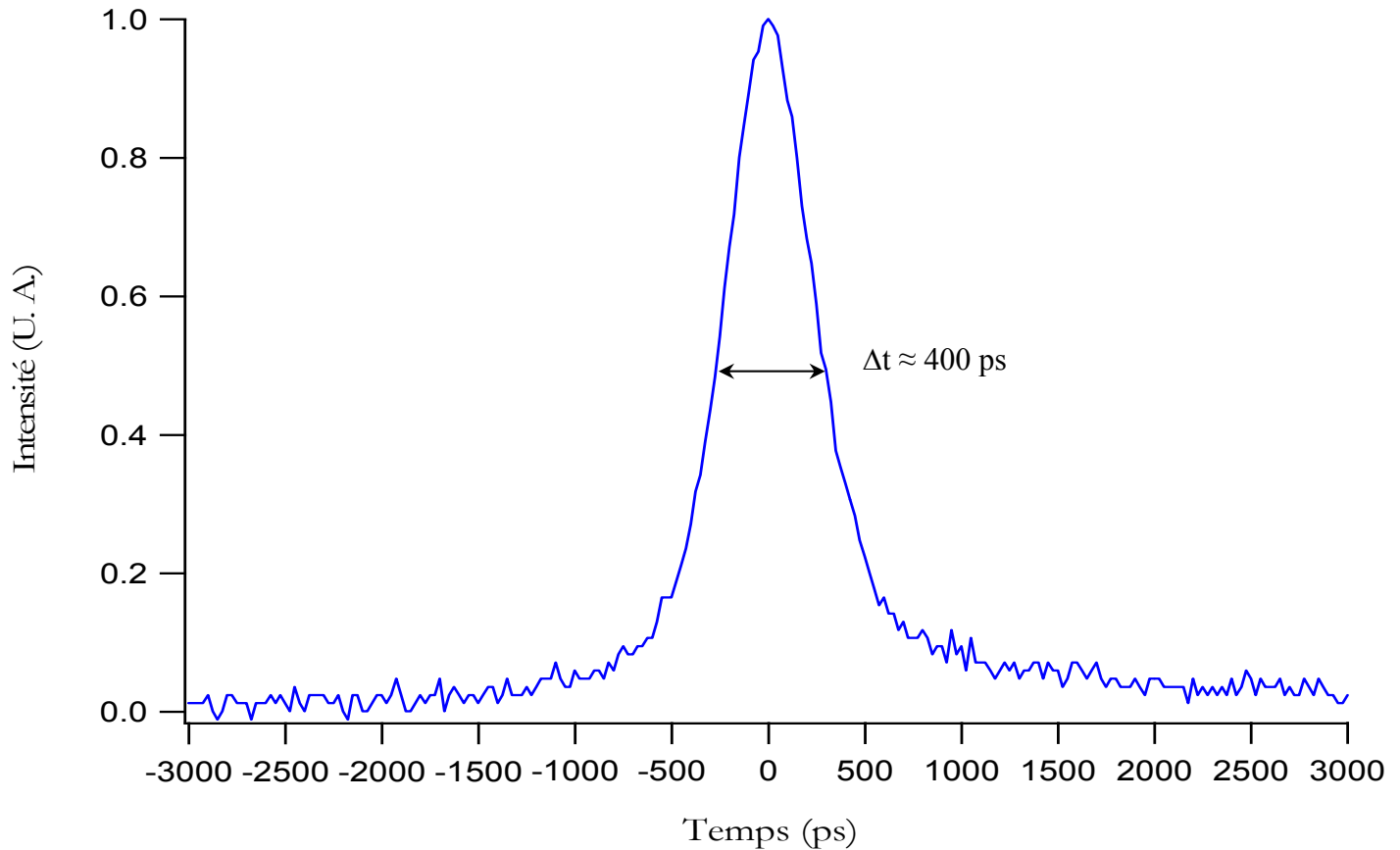






# ***2/Laser déclenché :*** ***Durée des impulsions***

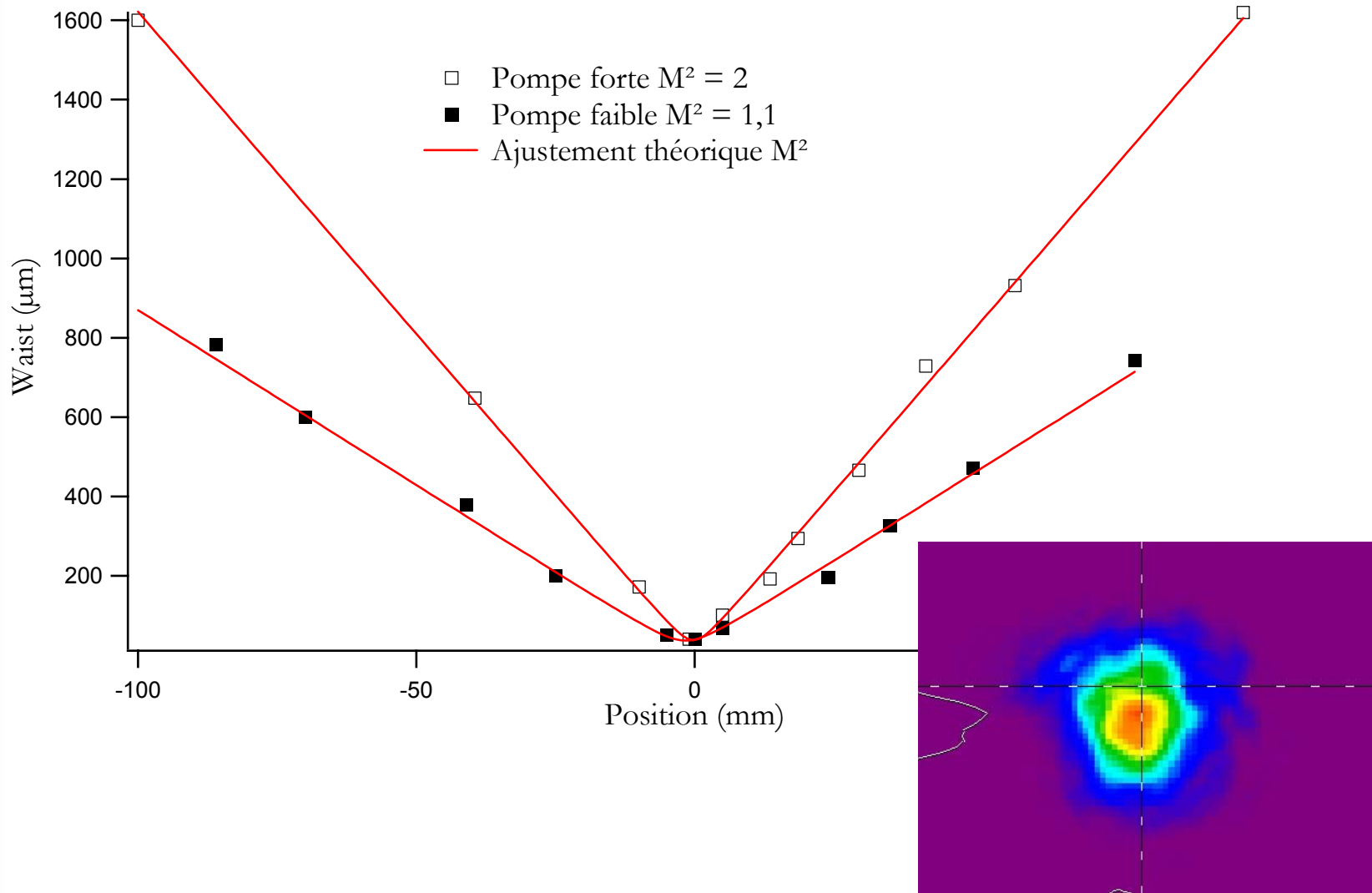
---

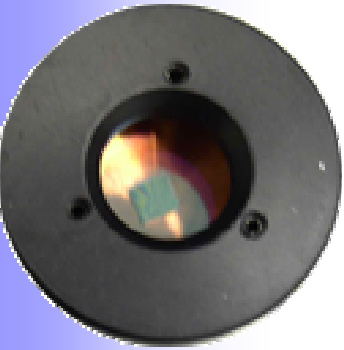




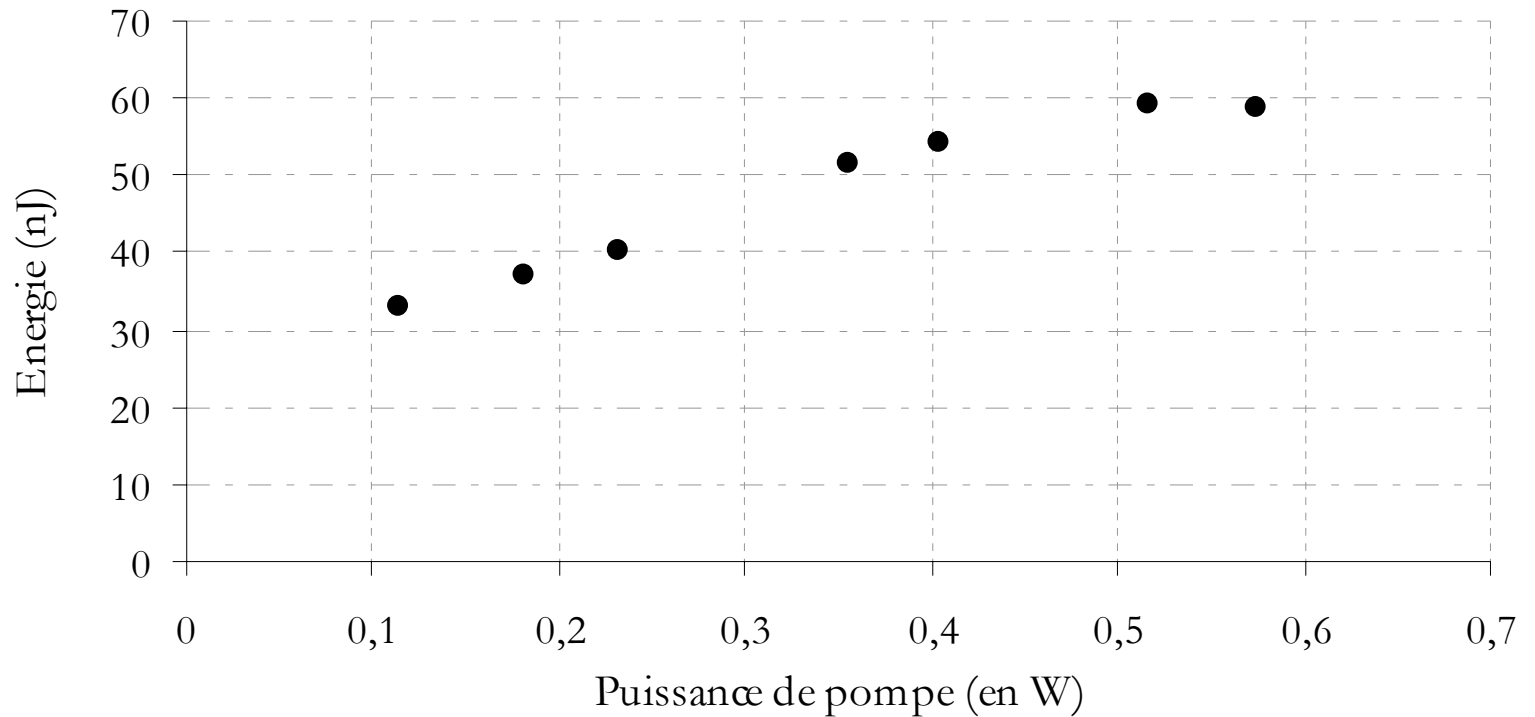


# 2/Laser déclenché : *Profil spatial*



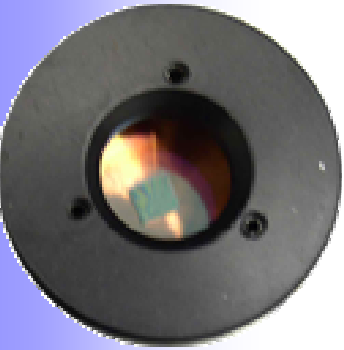


# ***2/Laser déclenché :*** ***Energie***



***Energie très faible : 60 nJ soit 60 mW à 1 MHz***





# 1/ Laser déclenché :

## Conclusion

---



• *Taux de répétition autour de 1 MHz*



• *Encombrement : très réduit*



• *Durée des impulsion de 400ps*



• *Robustesse : dépendante du SESAM*



• *Faisceau de bonne qualité spatiale ( $M^2 = 1,1$ )*



• *Puissance crête autour de 150 W*



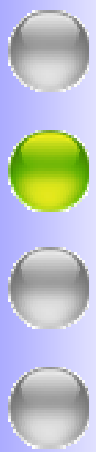
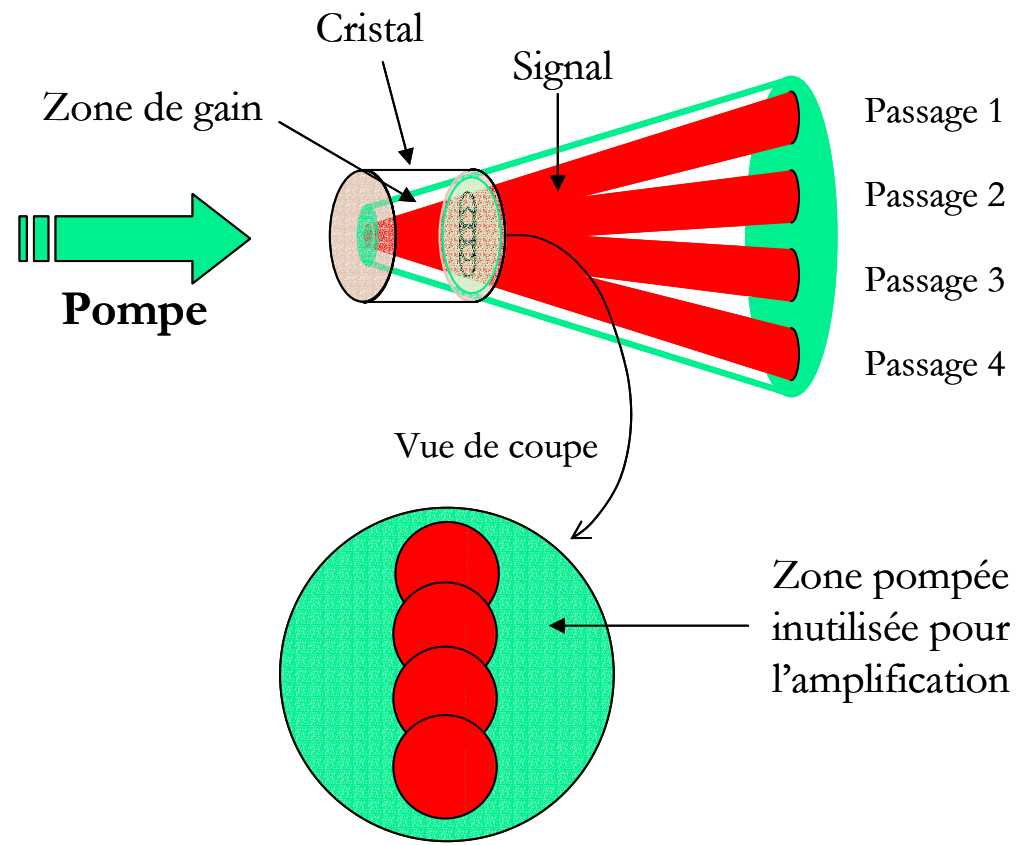
# ***Sommaire***

---

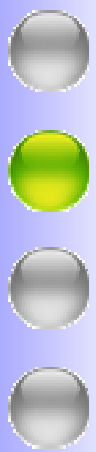
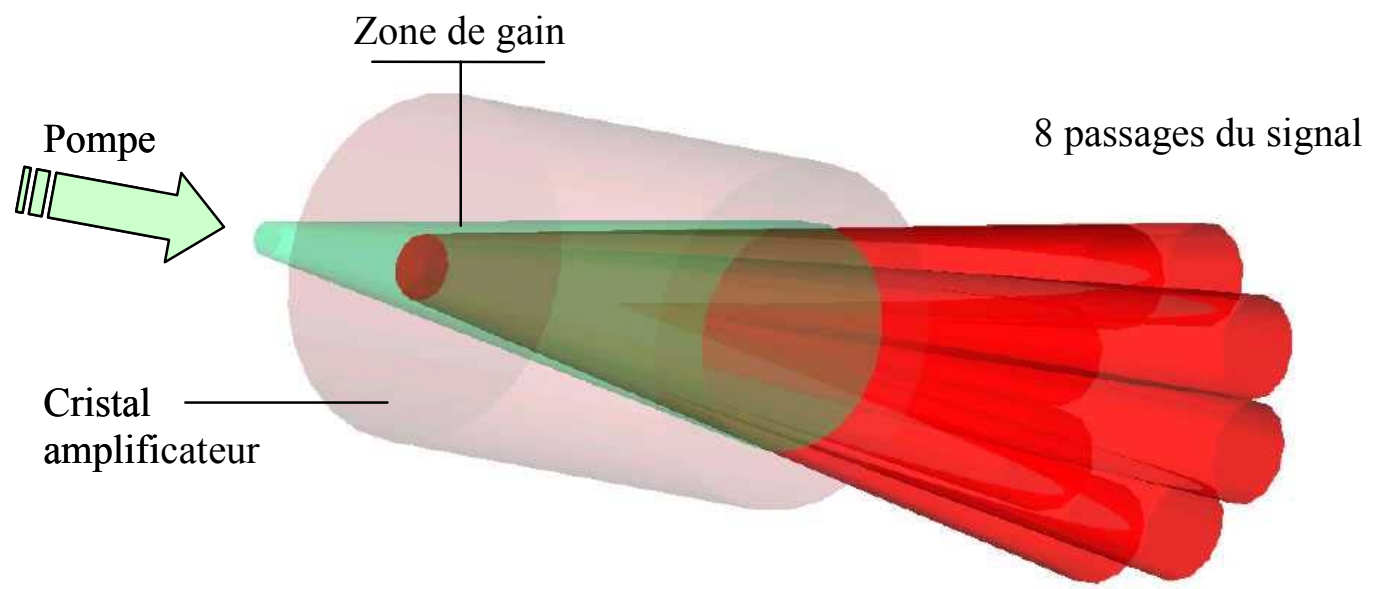
- ***La source laser***
- ***L'amplification***
- ***La conversion de fréquence***
- ***Conclusion***

# L'amplification

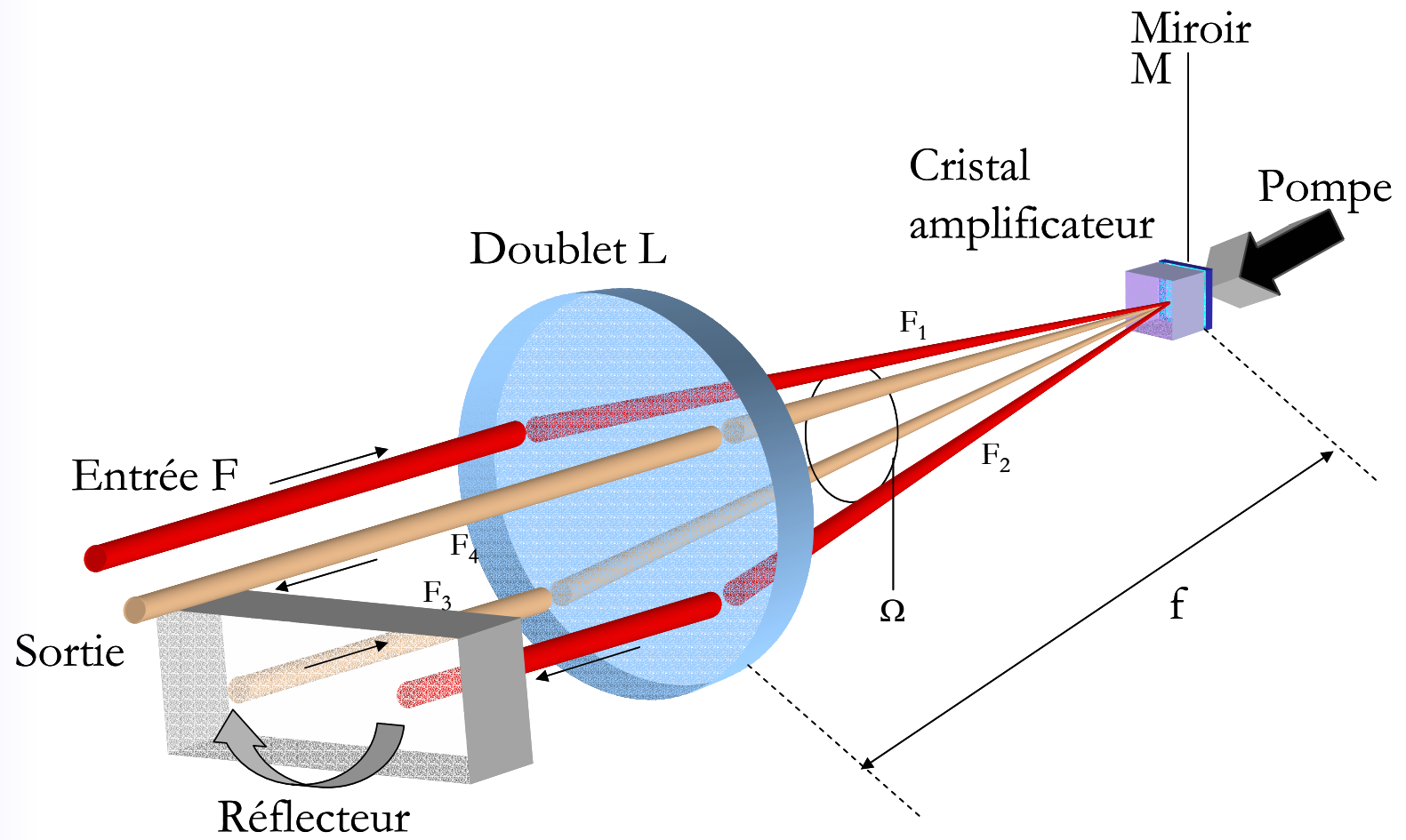
## *Multipassage géométrique classique :*



# L'amplification 3D

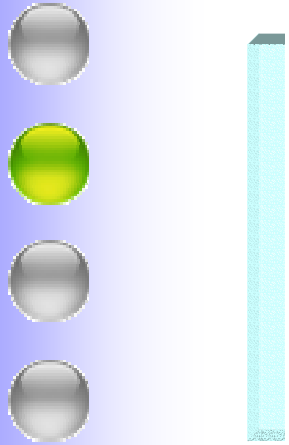
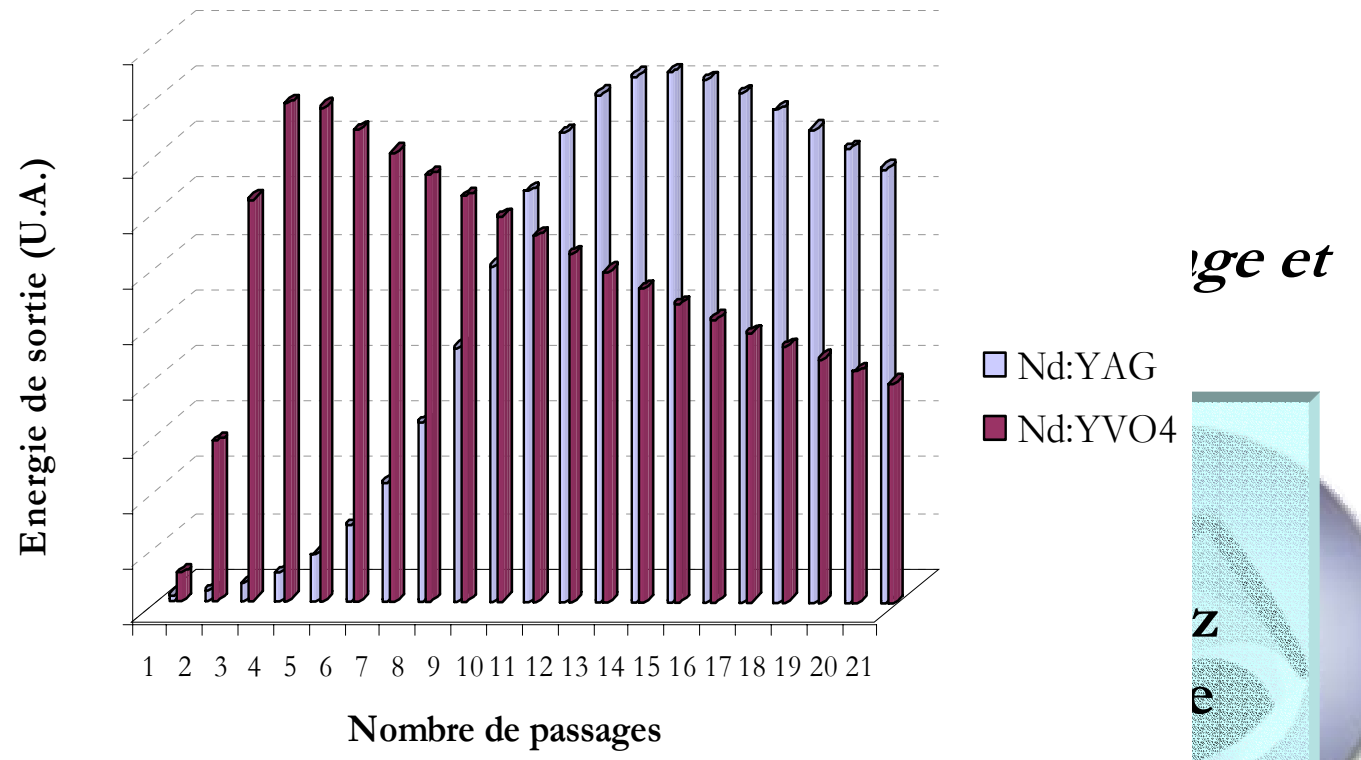


# L'amplification 3D en pratique...

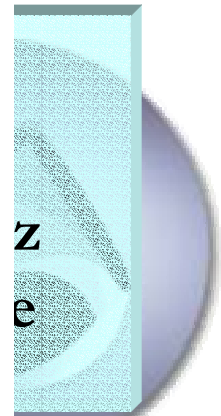


# L'amplification 3D en pratique...

*Choix du cristal : Nd:YVO<sub>4</sub>*

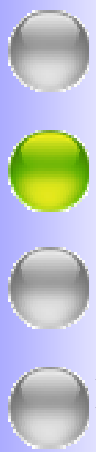
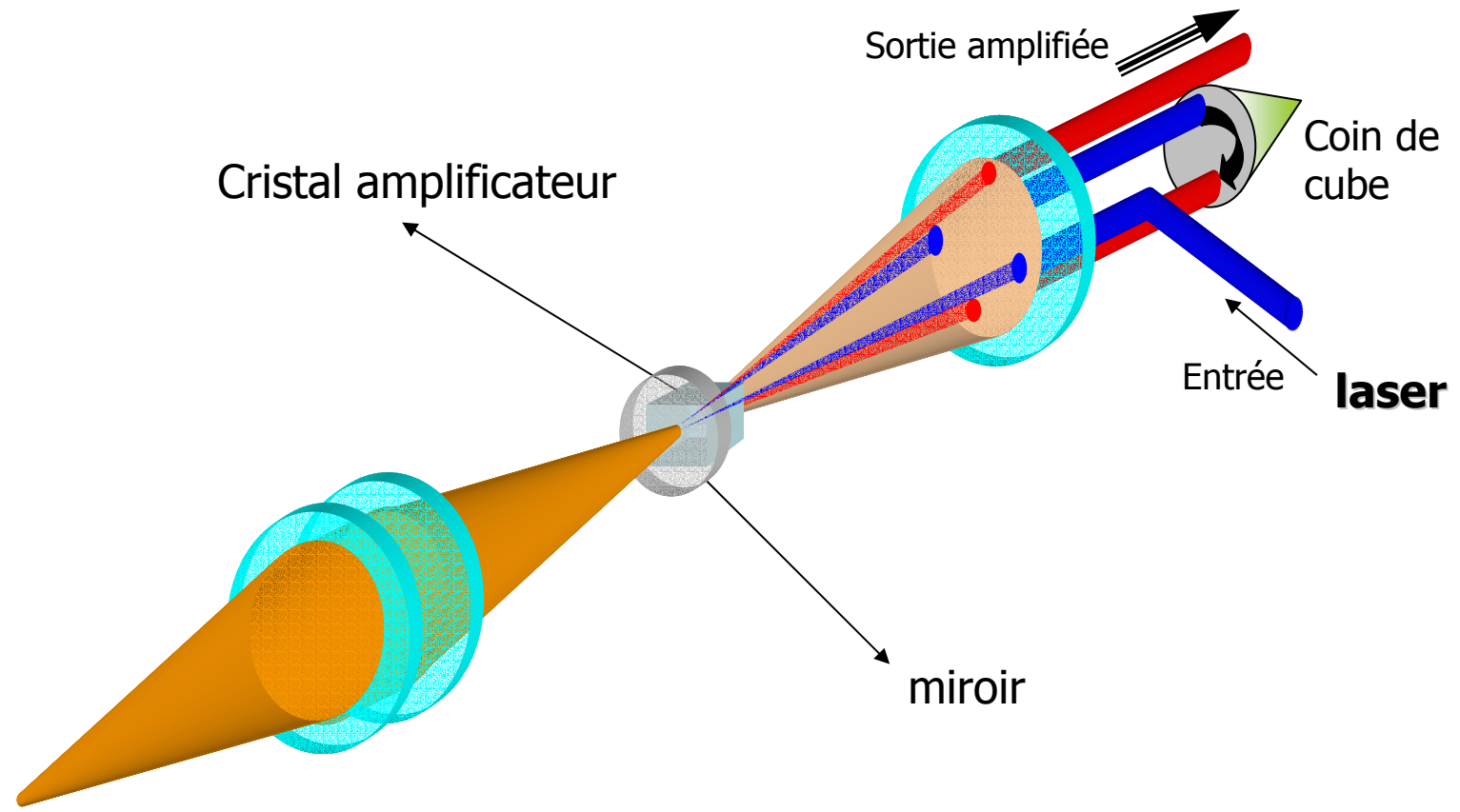


*ge et*



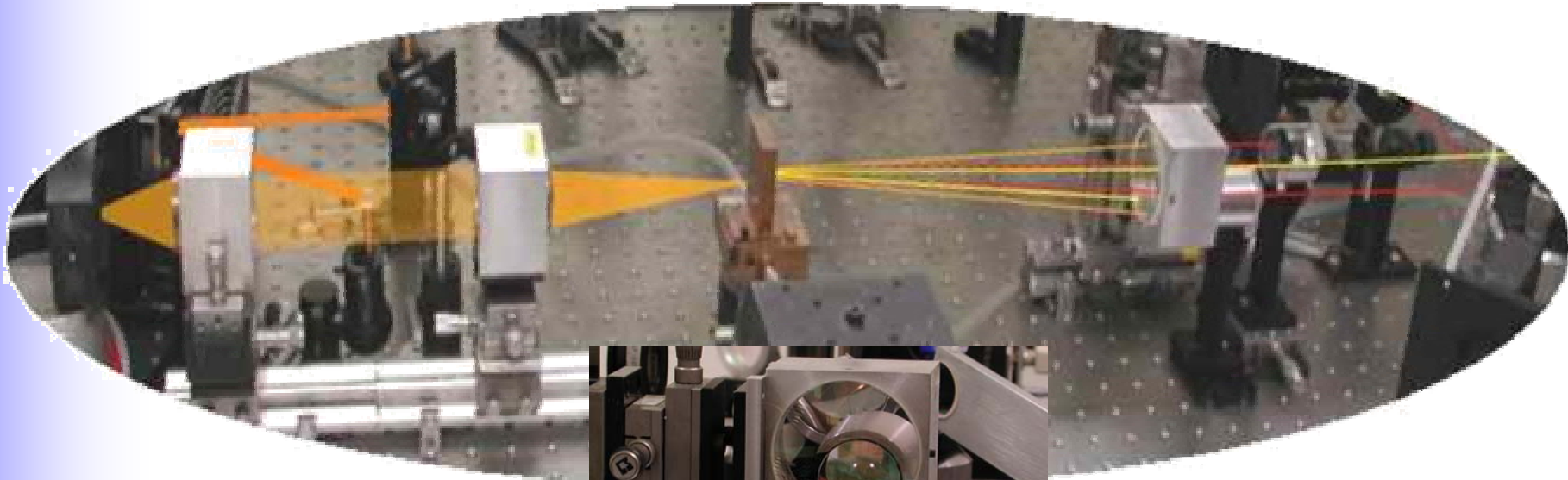


# L'amplification 3D en pratique...



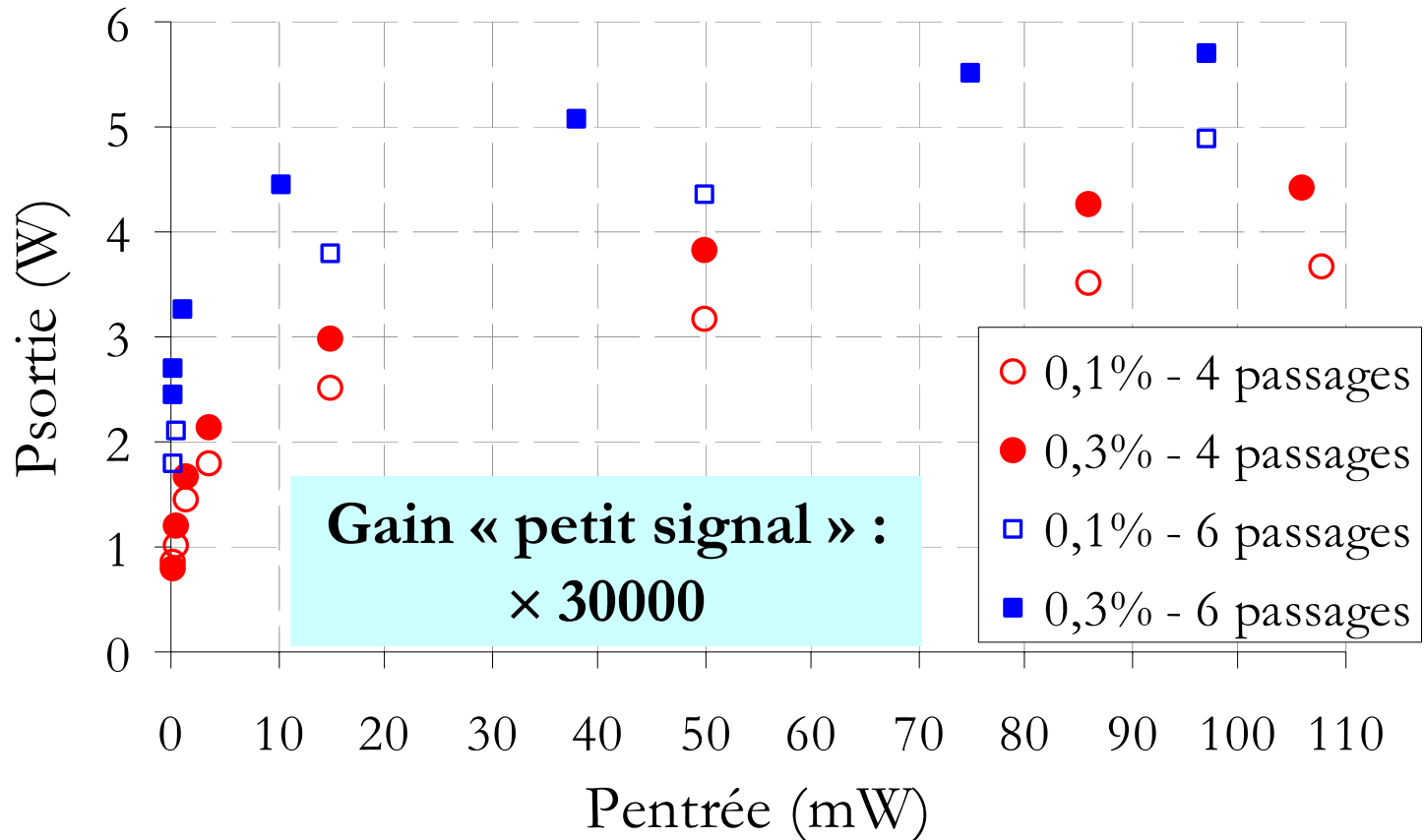
**Diode Laser fibrée**

# *L'amplification 3D en pratique...*





# *L'amplification 3D* *l'aspect « industriel »*



technologie





# L'amplification 3D

## résultats

---

**Rappel** : en sortie du microlaser...

*... peu d'énergie*

*... profil spatial mauvais*

→ On utilise un préamplificateur fibré (fibre double cœur dopée Ytterbium) :

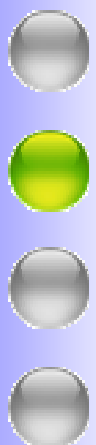
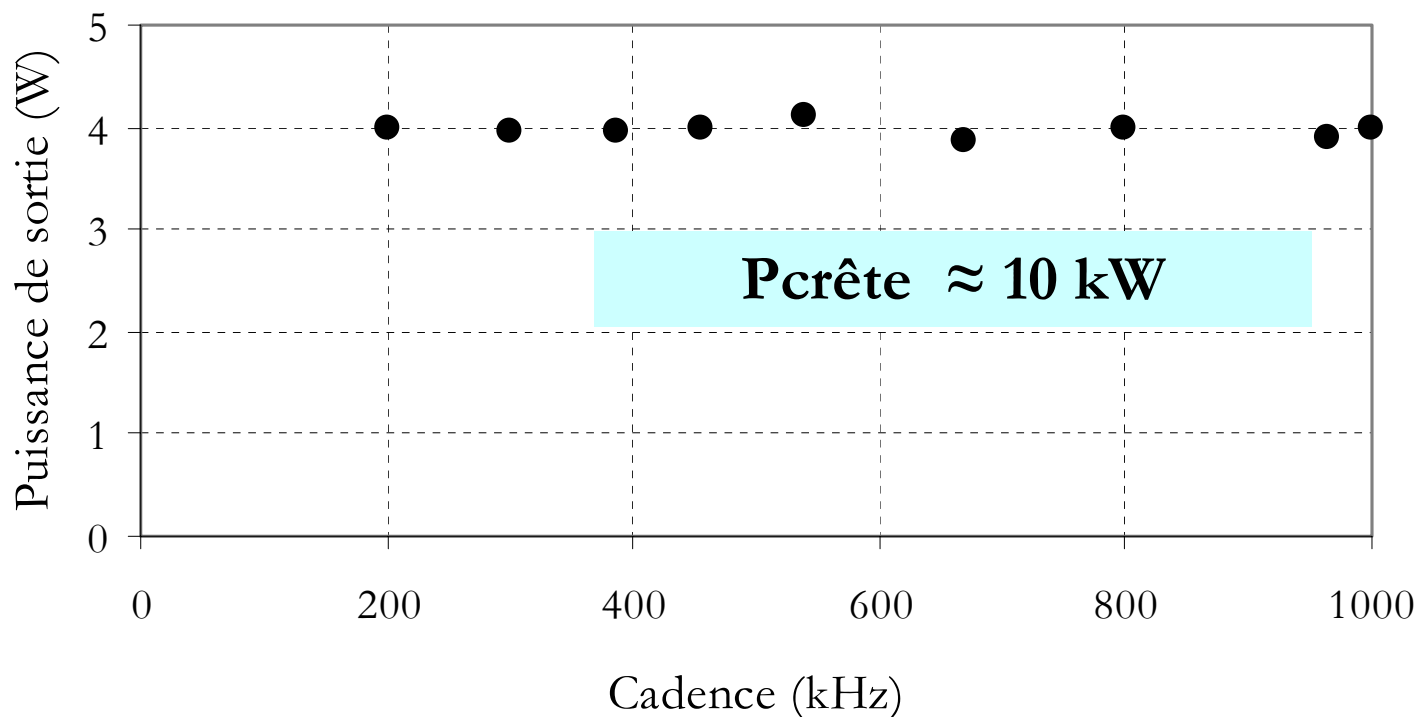
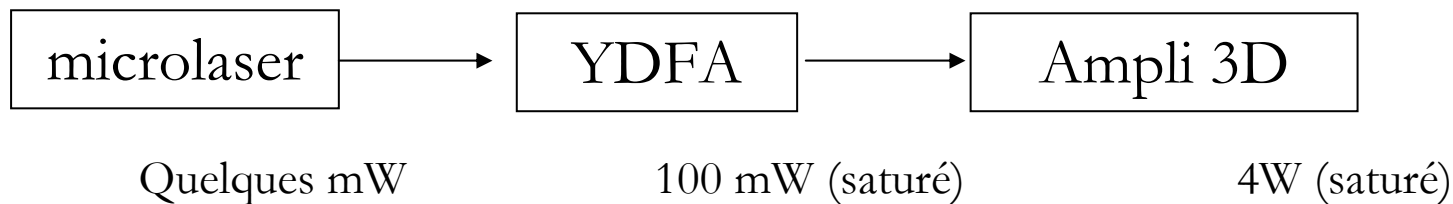
- Augmentation de l'énergie
- Filtrage spatial par la fibre





# *L'amplification 3D*

## *résultats*





# ***Laser déclenché :*** ***Conclusion***

---



*• Taux de répétition autour de 1 MHz*



*• Encombrement : très réduit*



*• Durée des impulsion de 400ps*



*• Robustesse : dépendante du SESAM*



*• Faisceau de bonne qualité spatiale ( $M^2 = 1,1$ )*



*• Puissance crête autour de 10 kW*





# ***Laser déclenché + ampli:*** ***Conclusion***

---



• *Taux de répétition autour de 1 MHz*



• *Encombrement : très réduit*



• *Durée des impulsion de 400ps*



• *Robustesse : dépendante du SESAM*



• *Faisceau de bonne qualité spatiale ( $M^2 = 1,1$ )*



• *Puissance crête autour de 10 kW*





# Rappel: **LVM** cavité longue

## Conclusion

---



• *Taux de répétition ajustable autour de quelques MHz*



• *Durée des impulsion de moins de 20 ps*



• *Faisceau de bonne qualité spatiale ( $M^2 = 1,1$ )*



• *Puissance crête autour de 25 kW*



• *Encombrement : environ 2 m<sup>2</sup>*



• *Robustesse : dépendante du SESAM*





# ***Sommaire***

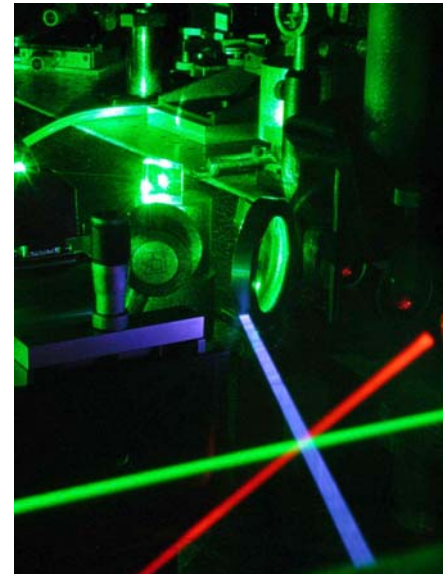
---

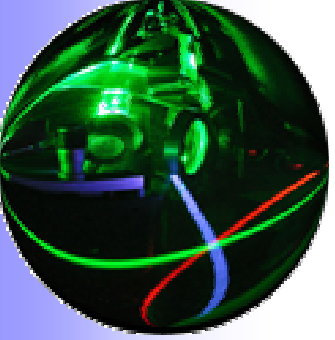
- ***La source laser***
- ***L'amplification***
- ***La conversion de fréquence***
- ***Conclusion***

# Problématique

- *Molécules d'intérêt biologique absorbent souvent dans l'**ultraviolet** (parfois le **visible**).*
- *Il est intéressant d'avoir une certaine plage d'**accordabilité** en longueur d'onde.*

*Nos lasers émettent à 1064 nm dans l'infrarouge : il faut **abaisser leur longueur d'onde** :  
**Optique Non-Linéaire***





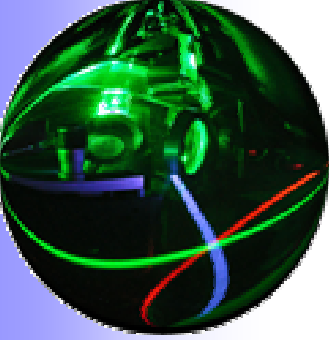
# Génération d'harmoniques

---

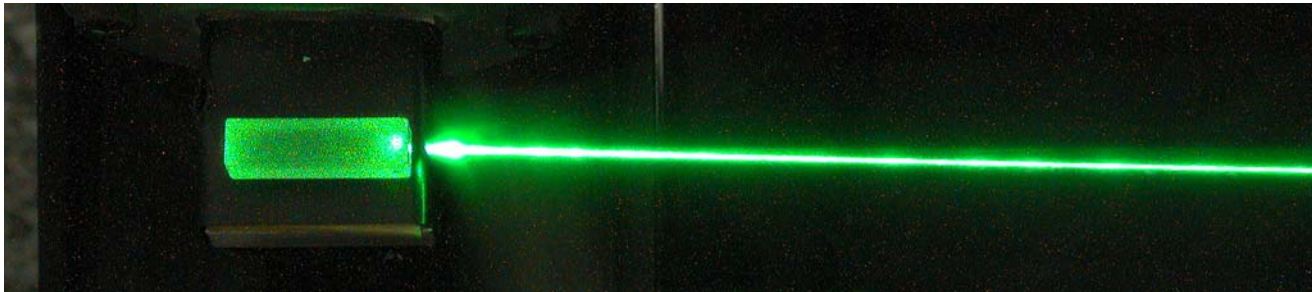
*Il est « facile » de doubler, tripler ou quadrupler la fréquence de nos lasers :*

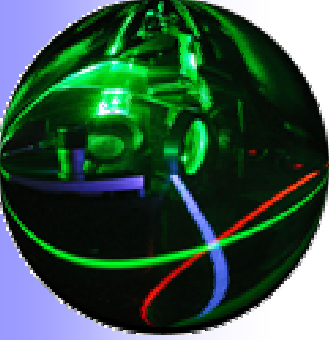
*→ Simple passage dans des cristaux non-linéaires appropriés.*



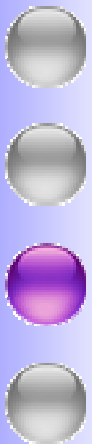
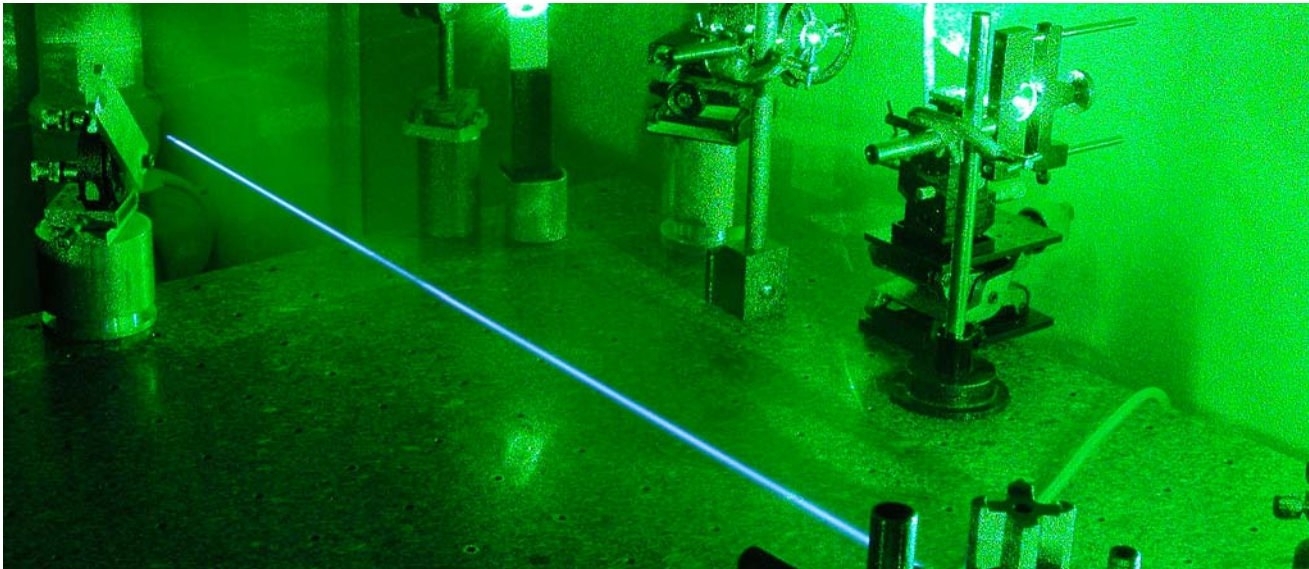
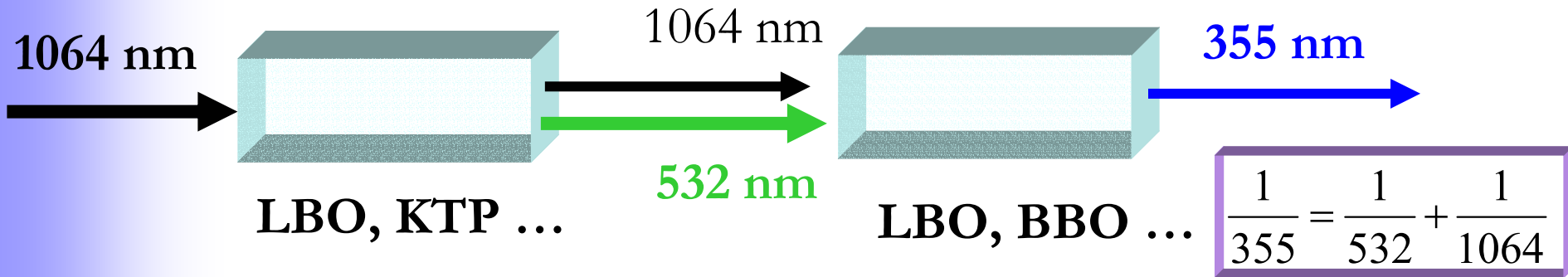


# Génération de *second harmonique*

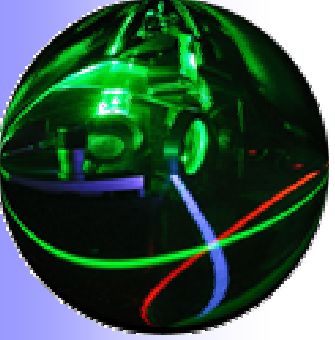




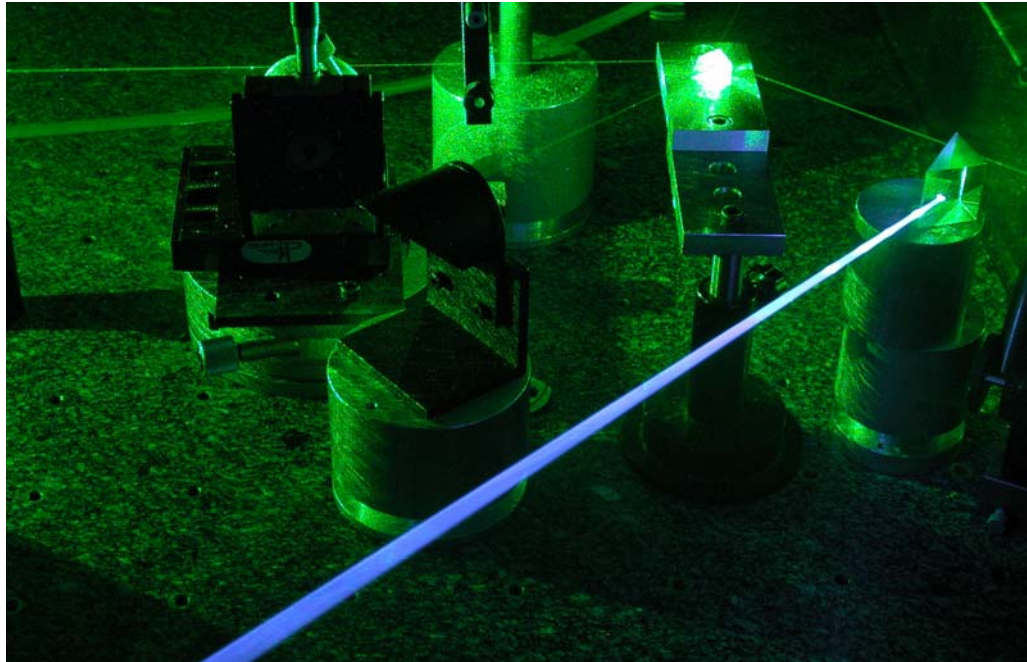
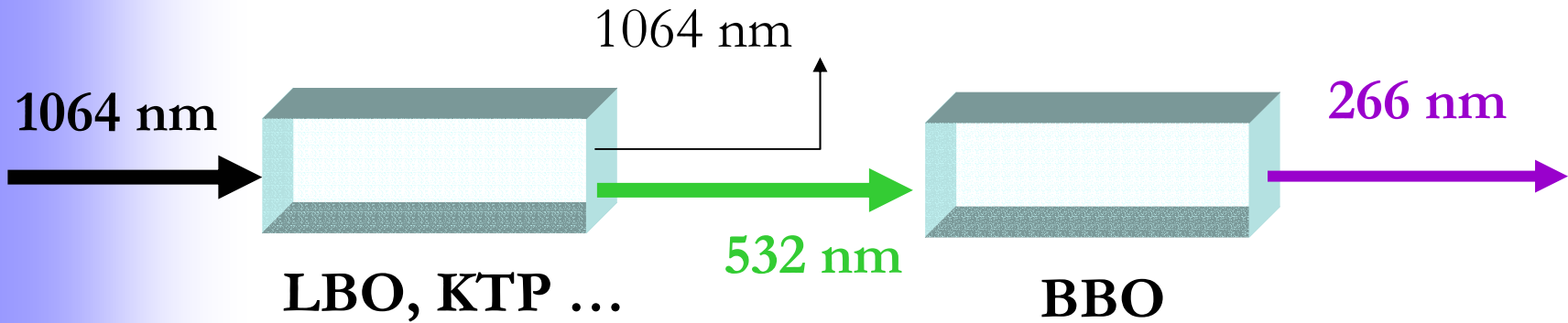
# Génération de troisième harmonique

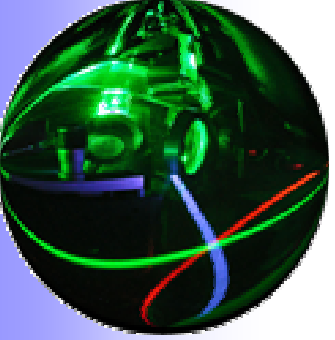






# Génération de quatrième harmonique





# Quid de *l'accordabilité* ?

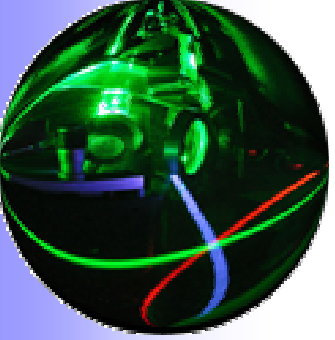
---

- *On veut obtenir une accordabilité de plusieurs dizaines de nanomètres dans le visible.*
- *On veut un système passif, en simple passage.*

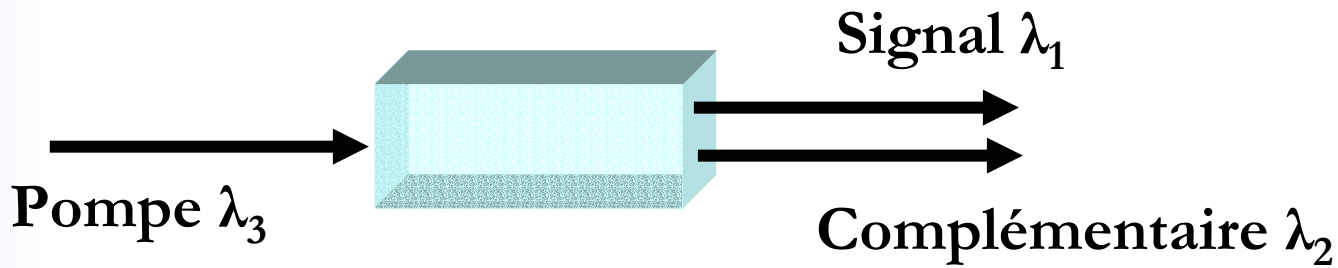


*Génération Paramétrique  
Optique*





# Génération Paramétrique Optique

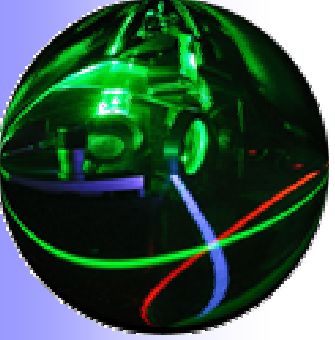


*Conservation de l'énergie :*

$$\frac{1}{\lambda_3} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}$$

*Le couple  $\lambda_1, \lambda_2$  est fixé par la condition d'accord de phase*





# L'accord de phase

Conservation de la quantité de mouvement :

$$\vec{k}_3 = \vec{k}_2 + \vec{k}_1 \quad \text{soit} \quad \vec{k}_3 - \vec{k}_2 - \vec{k}_1 = \vec{\Delta k} = \vec{0}$$

Accord de phase par biréfringence :

$$\frac{n_{\lambda_3}}{\lambda_3} - \frac{n_{\lambda_1}}{\lambda_1} - \frac{n_{\lambda_2}}{\lambda_2} = 0$$

*Possible en jouant sur la dispersion et les polarisations*

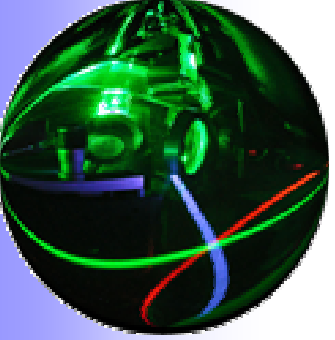


Fixe les  
polarisations



Détermine le  
coefficient  $d_{\text{eff}}$

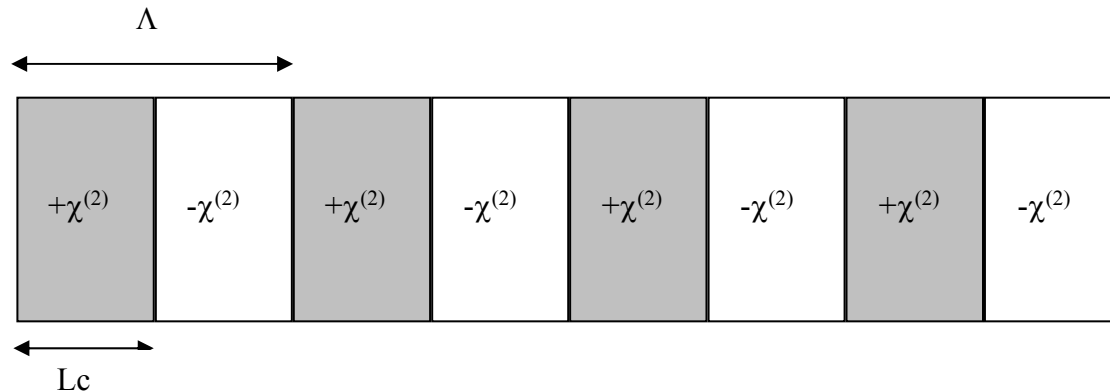




# *Le quasi accord de phase*

$$\vec{k}_3 - \vec{k}_2 - \vec{k}_1 = \boxed{\vec{\Delta k} \neq \vec{0}}$$

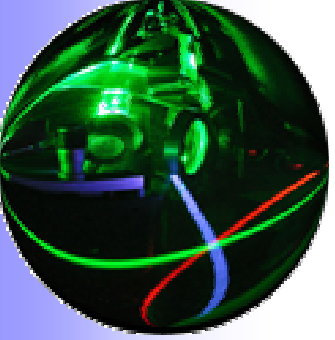
*Si on inverse périodiquement le coefficient non-linéaire :*



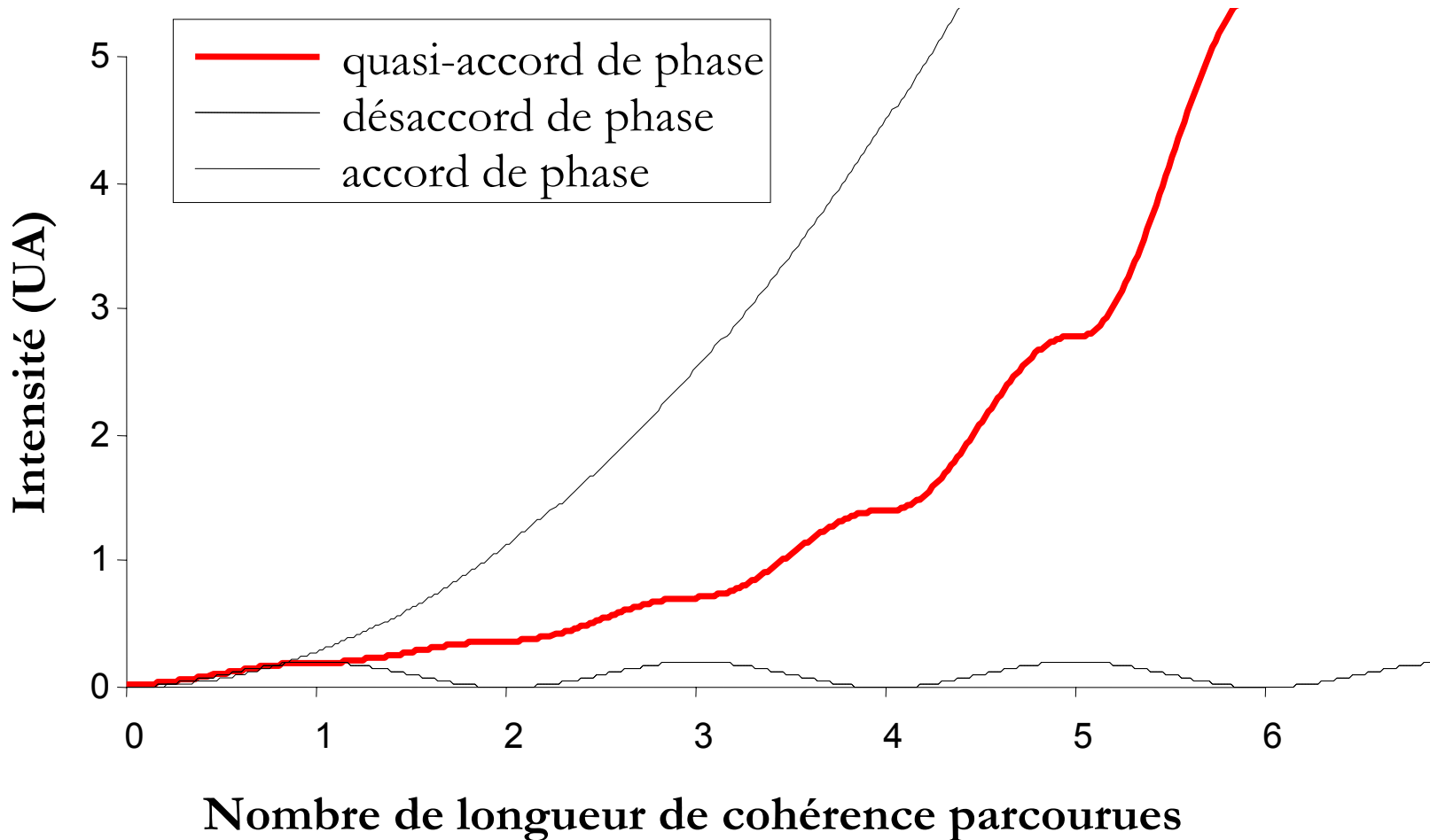
$$\vec{\Delta k}_{QAP} = \vec{\Delta k} + \frac{2m\pi}{\Lambda}$$

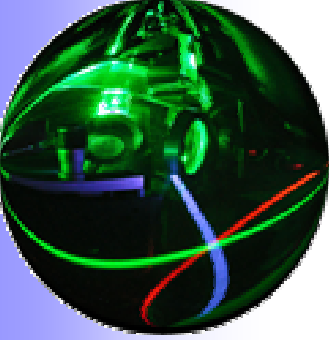
Où  $\Lambda$  = période d'inversion





# *Le quasi accord de phase*





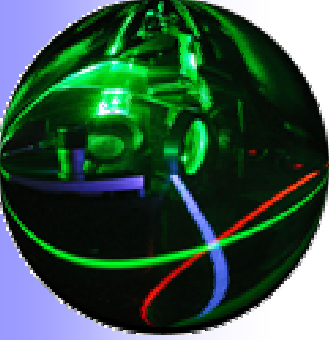
# ***Le quasi accord de phase***

---

$$d_{eff, QAP} = \frac{2}{\pi} d_{eff} \quad \textit{Mais ...}$$

- Plus de contrainte sur les polarisations
- Possibilité de les choisir afin d'avoir accès au meilleur coefficient non linéaire
- Pas de problème de **double réfraction**





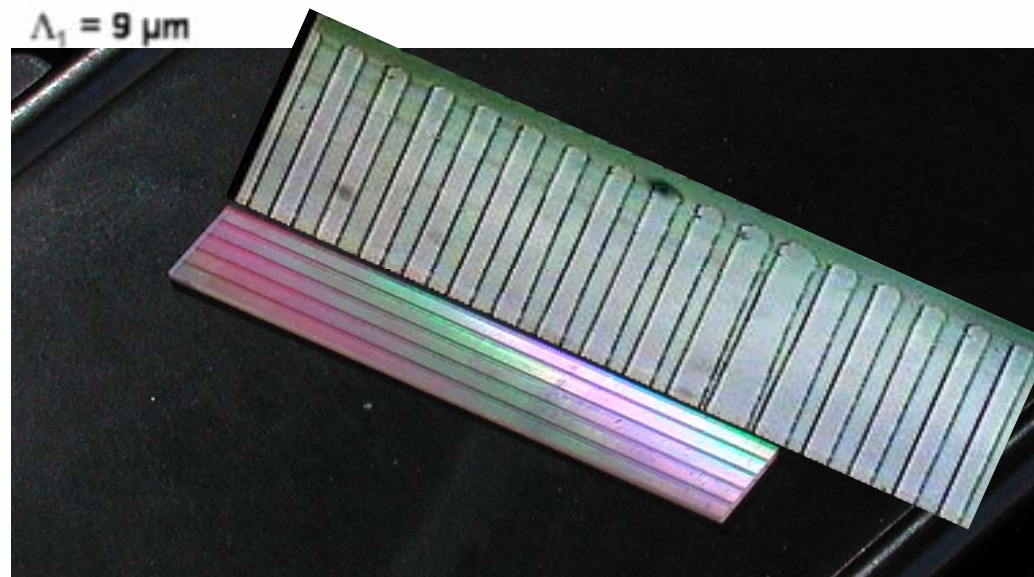
# *En chiffres et en pratique*

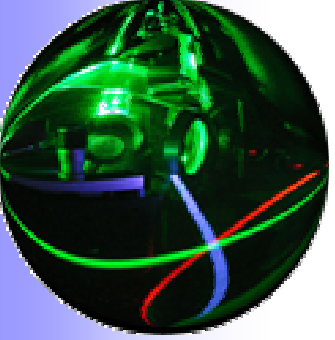
*Cristal le plus utilisé en QAP: le niobate de lithium (ppLN)*

$$d_{33} \approx 27 \text{ pm/V} \text{ donc } d_{\text{eff,QAP}} \approx 17 \text{ pm/V}$$

Par comparaison en accord de phase « classique » :

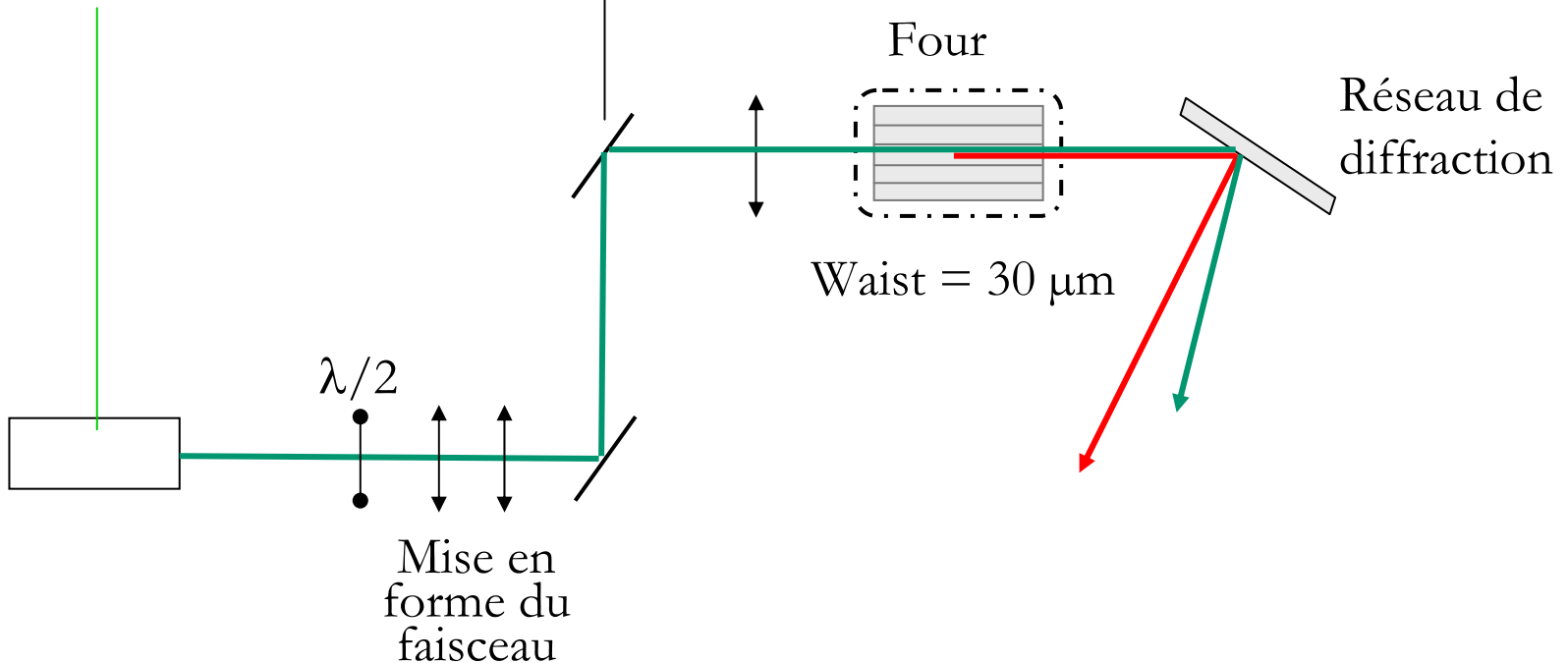
$$d_{\text{eff}} \leq \text{quelques pm/V}$$



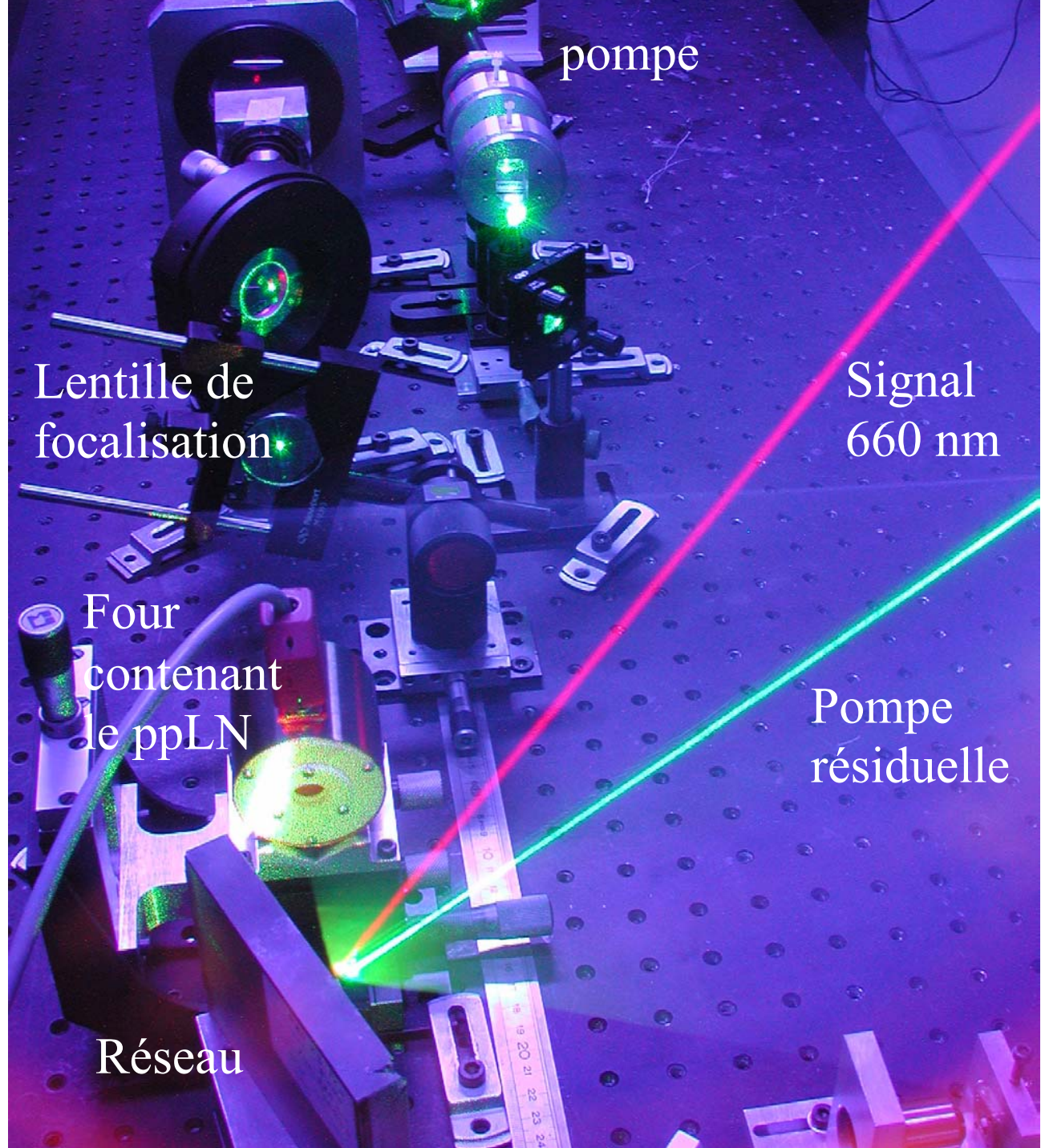
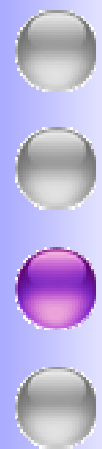
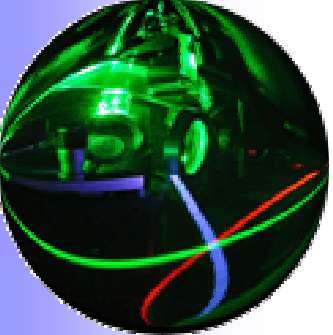


# Schéma expérimental

Source laser à 1 MHz  
doublée en fréquence







pompe

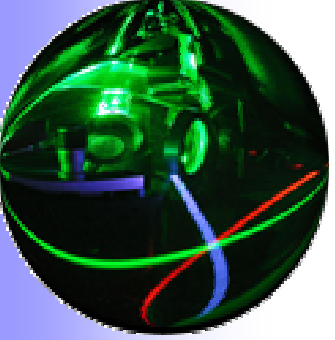
Lentille de focalisation

Signal 660 nm

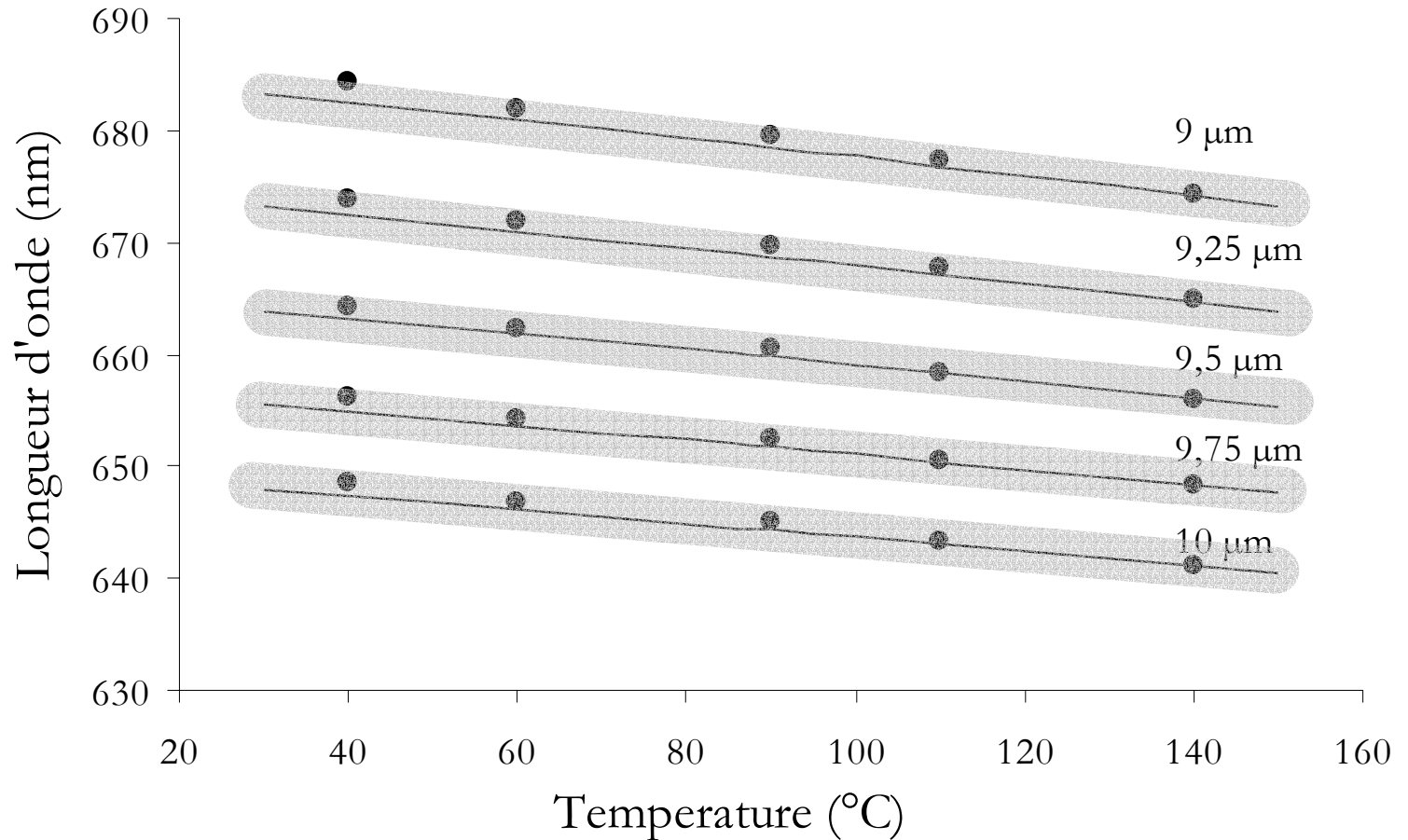
Four contenant le ppLN

Pompe résiduelle

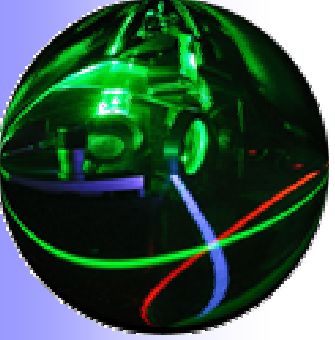
Réseau



# Résultats : *accordabilité*







# *Résultats*

---

- **Puissance** : quelques dizaines de milliwatts
- **Qualité de faisceau** très médiocre



Le doublement n'est pas trivial



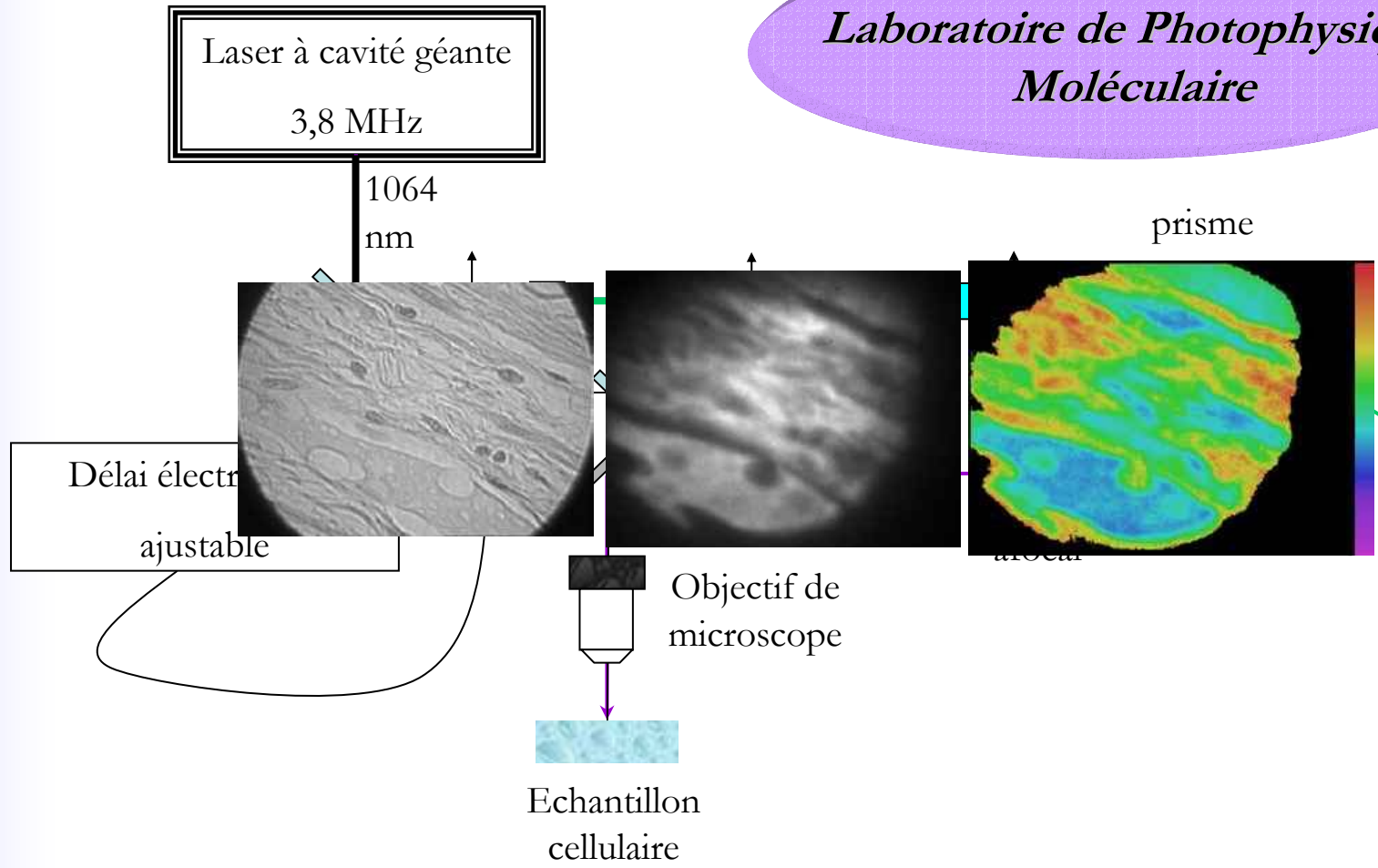
# ***Sommaire***

---

- ***La source laser***
- ***L'amplification***
- ***La conversion de fréquence***
- ***Conclusion***

# Application

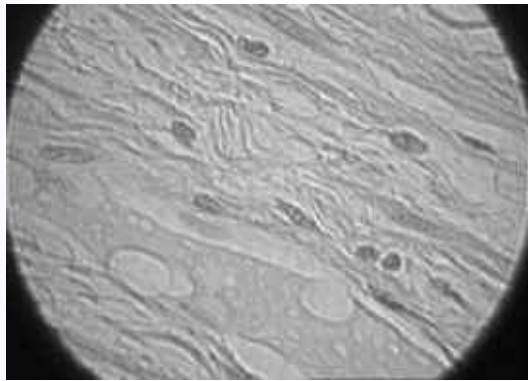
*Laboratoire de Photophysique  
Moléculaire*



# Application

Laboratoire de Photophysique  
Moléculaire

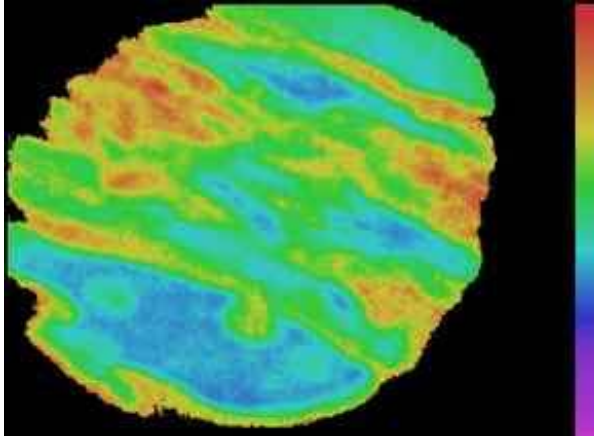
## image d'une coupe de prostate



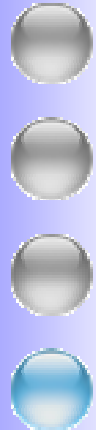
*image en  
transmission*



*image d'intensité  
de fluorescence*



*image des temps de vie de  
fluorescence*

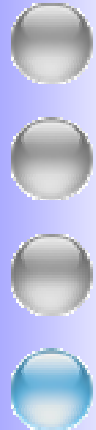
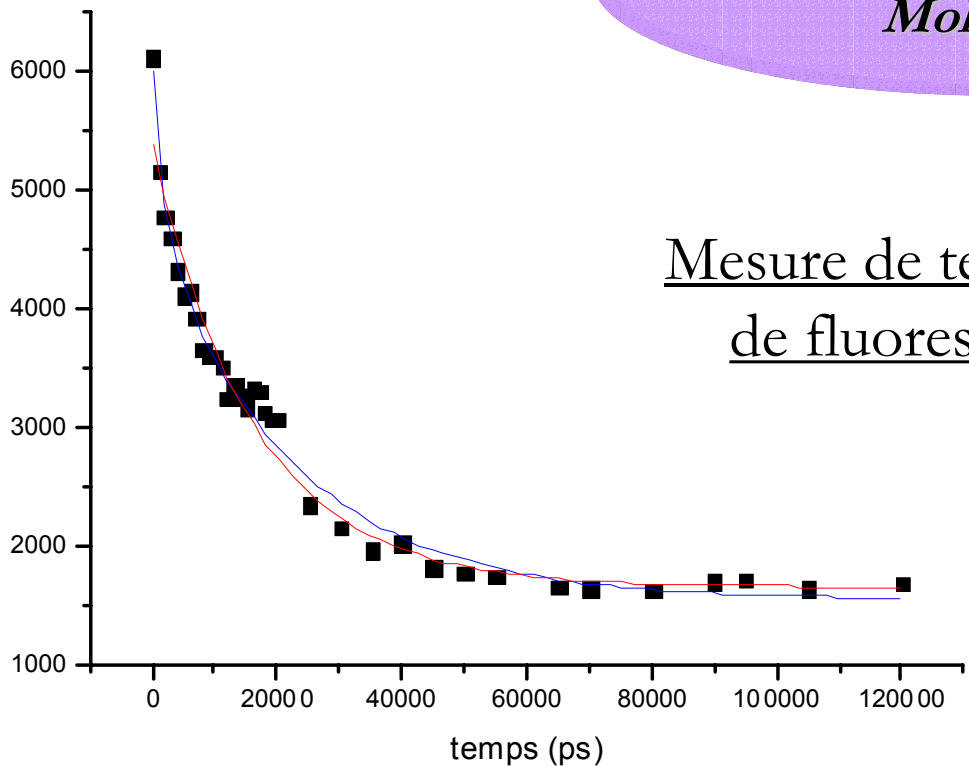


# Application

*Laboratoire de Photophysique  
Moléculaire*

Mesure de temps de déclin  
de fluorescence longs

Intensité de fluorescence

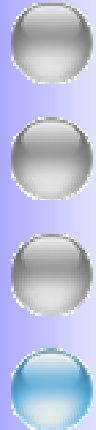
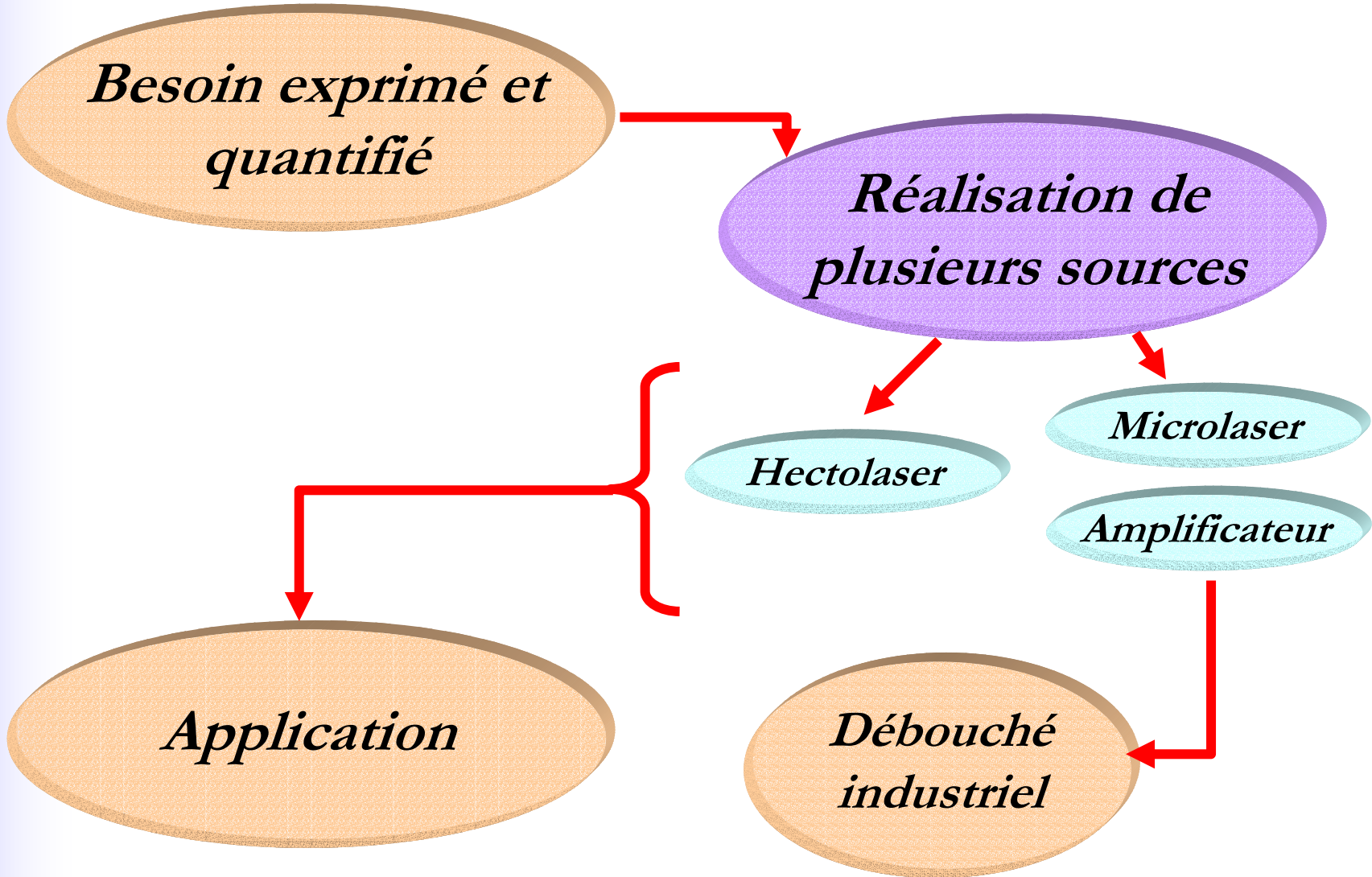


## *Perfectionnement du laser à cavité longue :*

- Encombrement
- Fiabilité long terme
- Adaptation aux besoins des utilisateurs
- Nouvelles longueurs d'ondes



# Conclusion



FIN



## *Equipe de direction*

*Producteur*

Monsieur Patrick Georges

*Producteur exécutif*

Professeur François Balembois

*Avis féminin*

Madame la maîtresse Gaëlle Lucas-Leclin

*Grain de sel*

Frédéric Druon

## *Avec par ordre d'apparition*

Louis MacDonagh

Aude Bouchier

Emilie Hérault

Stéphanie Le Moal

*Consulting industriel et scientifique*

Pierre-Jean Devilder

Laurent Lefort

Sandrine Lèveque-Fort

*Décors et costumes*

Gérard Roger

L'atelier d'Optique

L'atelier de Mécanique

*Et aussi...*

Sébastien Chénais

Sylvie Yiou

Pierre Raybaut

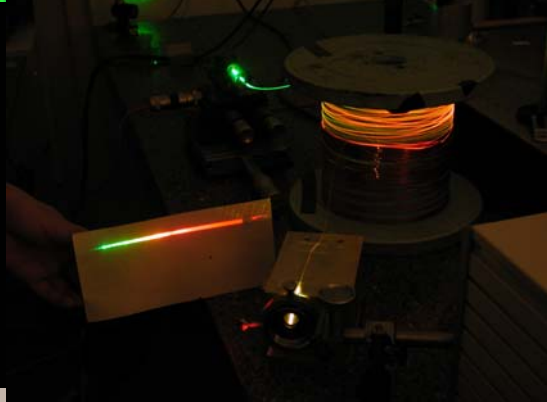
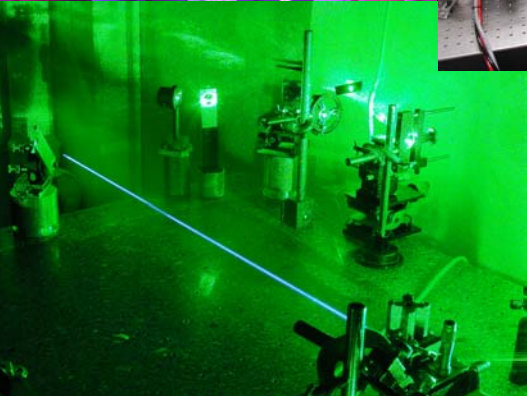
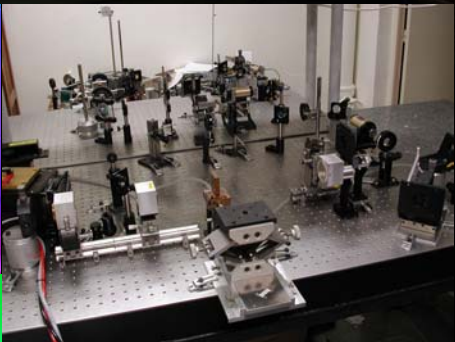
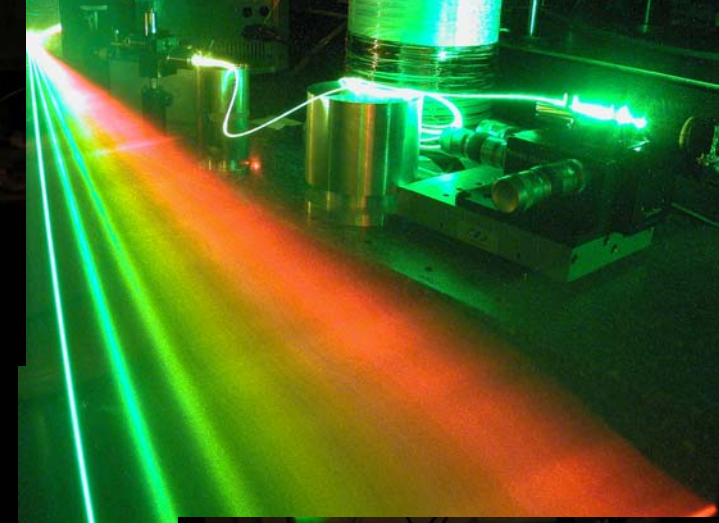
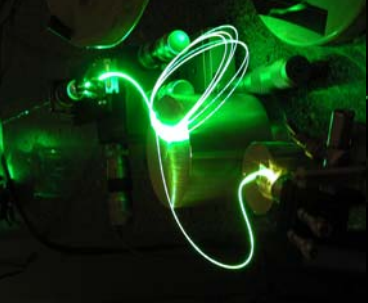
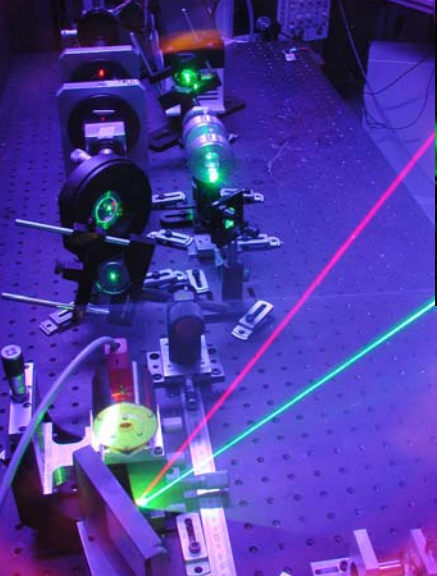
Renaud Lebrun

Mathieu Jacquemet

Celui ou celle que j'ai oublié

et

L'ensemble du personnel de l'Institut d'Optique



*Merci*

*à tous !*

