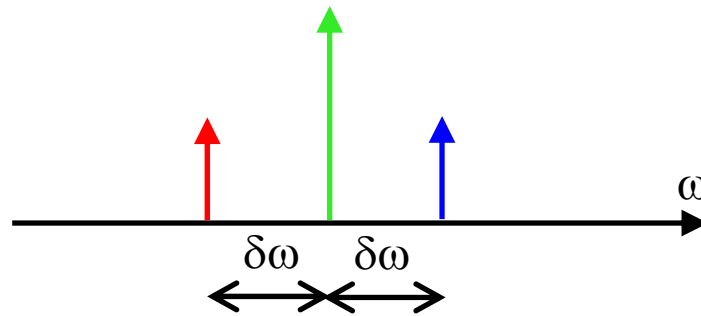


Génération d'impulsions femtosecondes *du visible à l'ensemble du spectre électromagnétique*

1. Oscillateurs femtosecondes
2. Amplificateurs femtosecondes
3. Génération de nouvelles longueurs d'onde par optique non-linéaire
4. Génération d'harmoniques : vers les attosecondes

Superposition de modes longitudinaux

- Domaine spectral



- Domaine temporel

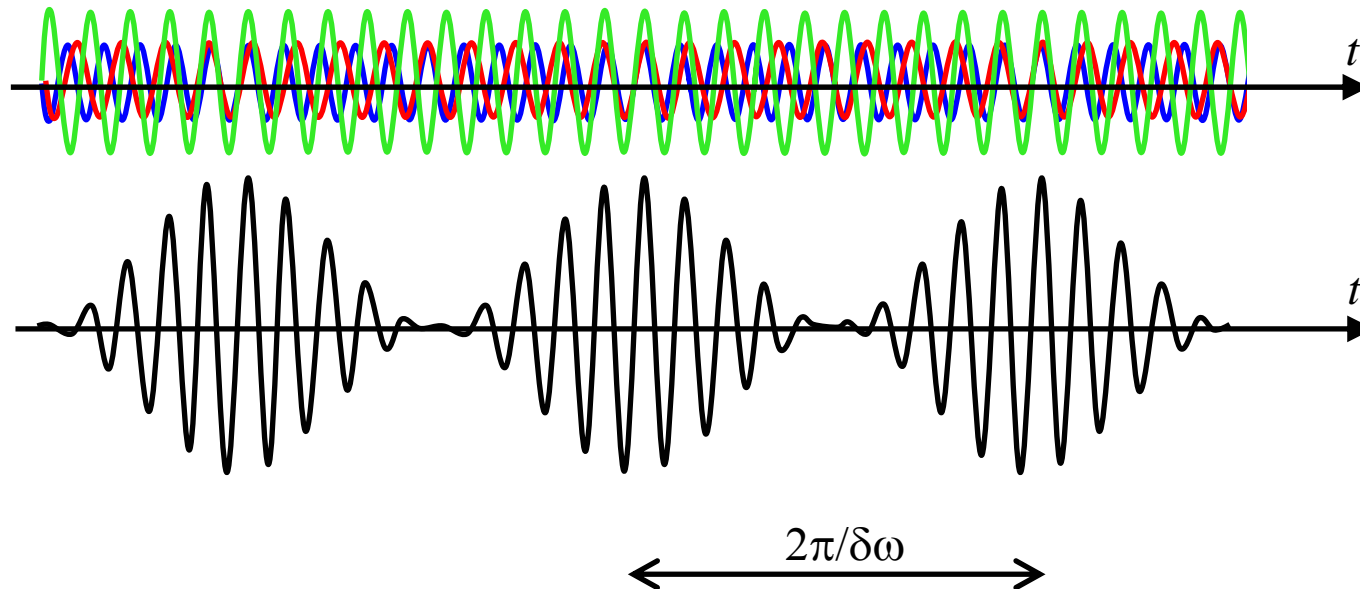
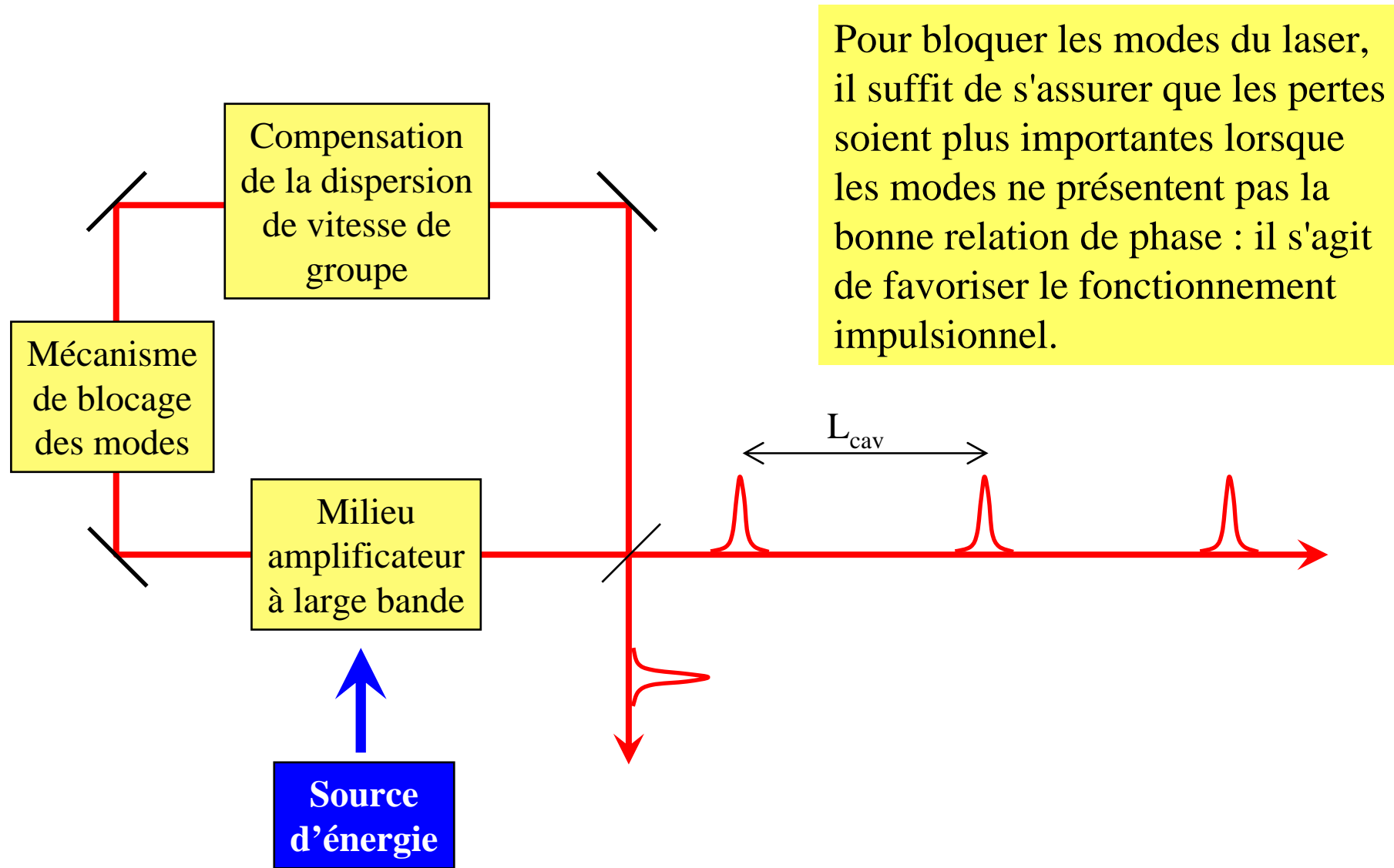
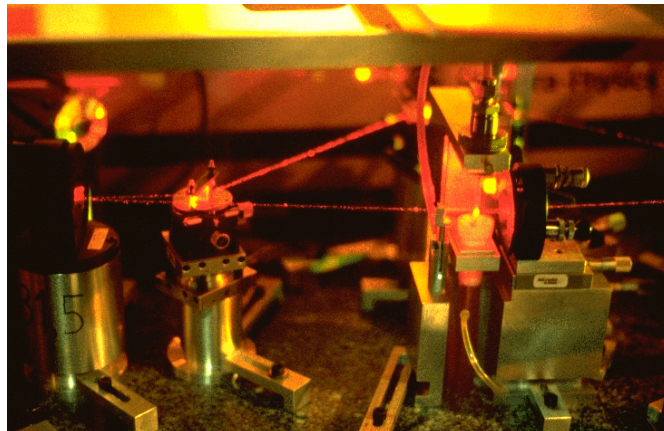
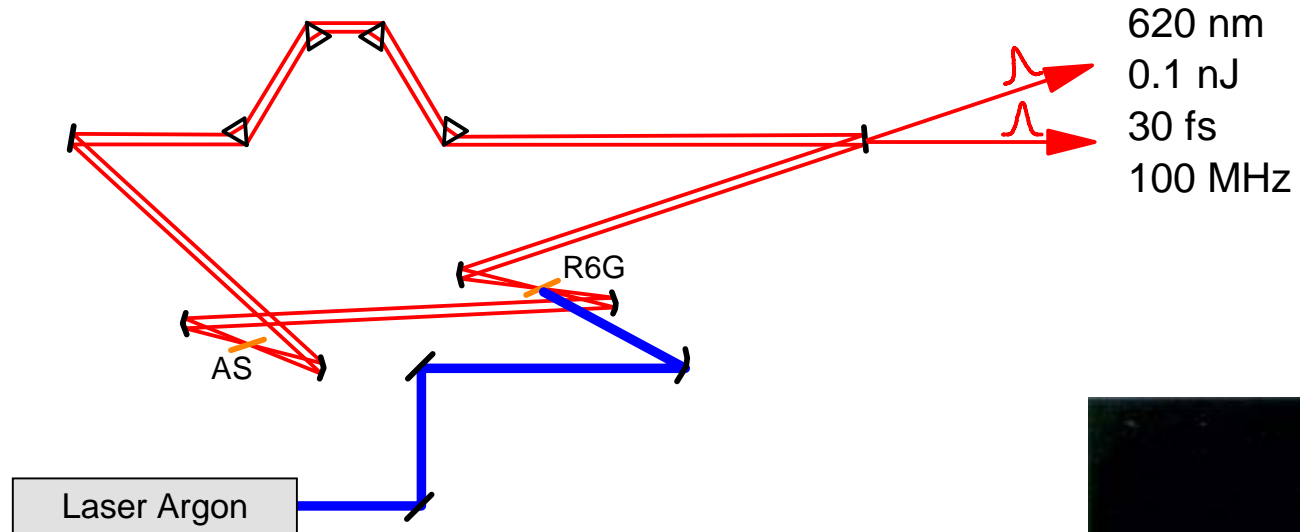


Schéma de principe d'un laser femtoseconde

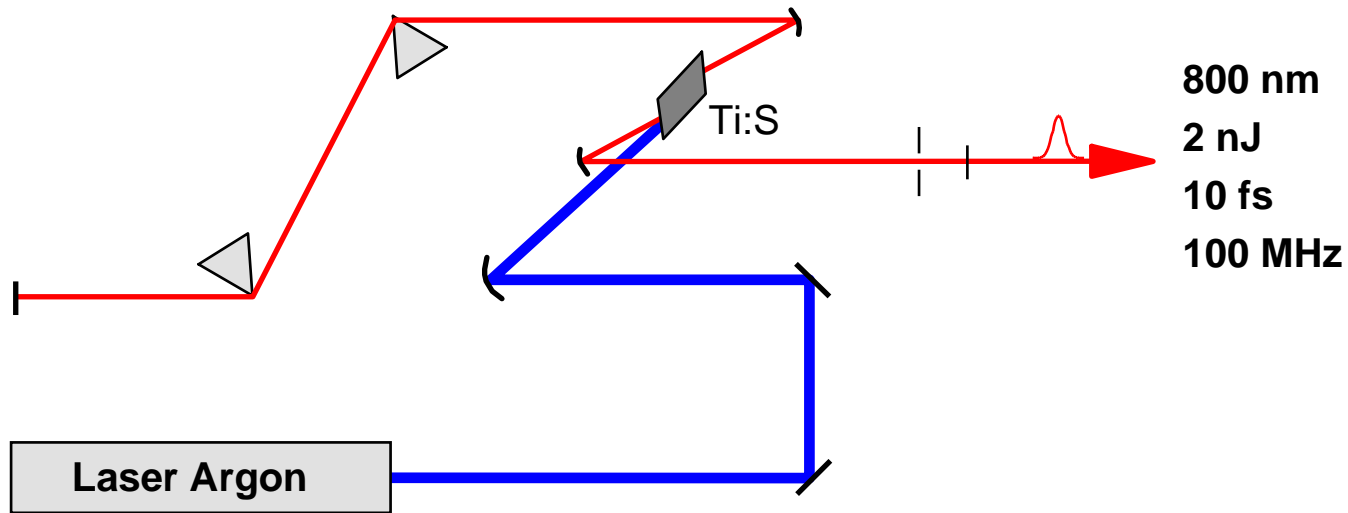


Laser à colorant

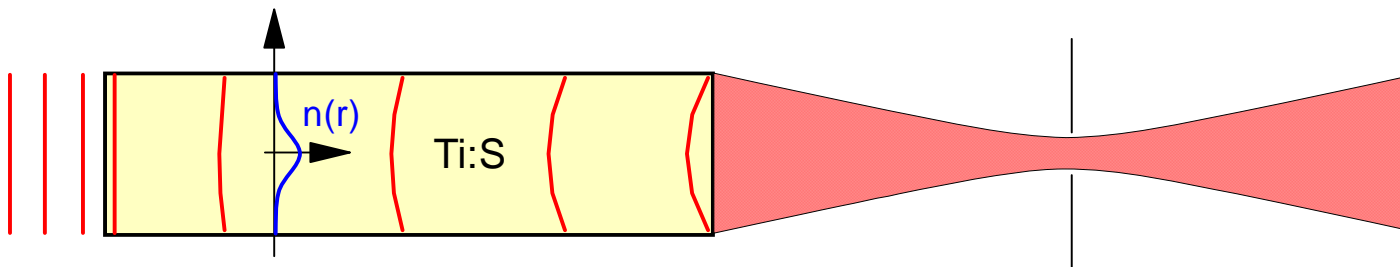
Mécanisme de blocage des modes : **absorbant saturable**



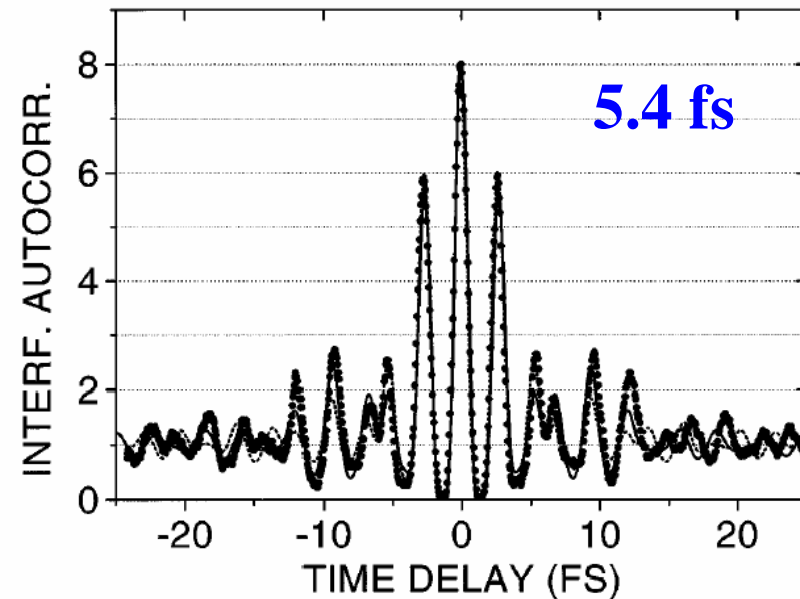
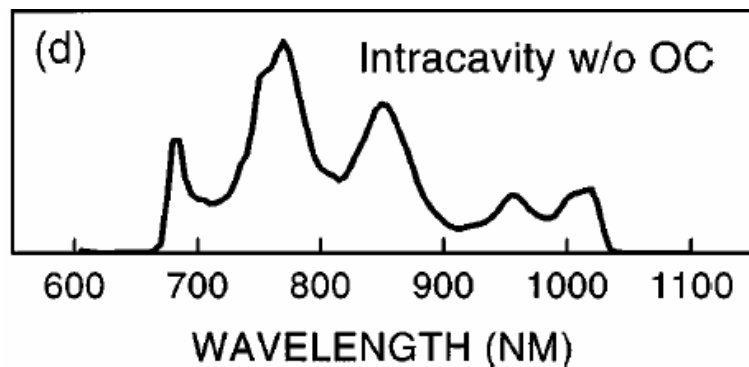
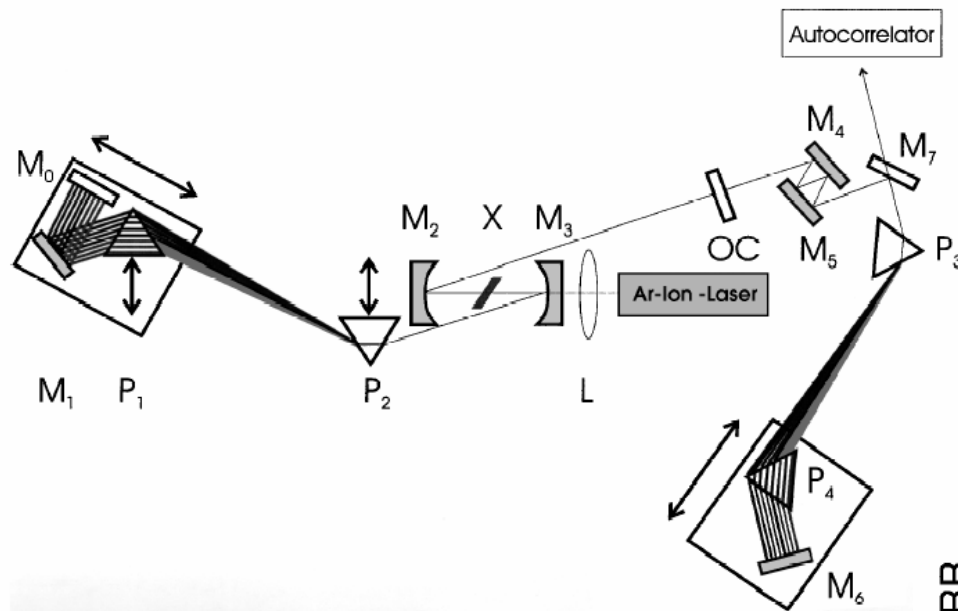
Laser Titane:Saphir



Mécanisme de blocage des modes : Autofocalisation par effet Kerr



Laser Titane:Saphir à impulsions ultracourtes



U. Morgner, F. X. Kärtner, S. H. Cho, Y. Chen, H. A. Haus, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen, V. Scheurer, G. Angelow, T. Tschudi, *Sub-two-cycle pulses from a Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser*, Opt. Lett. **24**, 411 (1999).

Oscillateurs femtosecondes commerciaux

140 fs, 0.72 - 0.93 μm



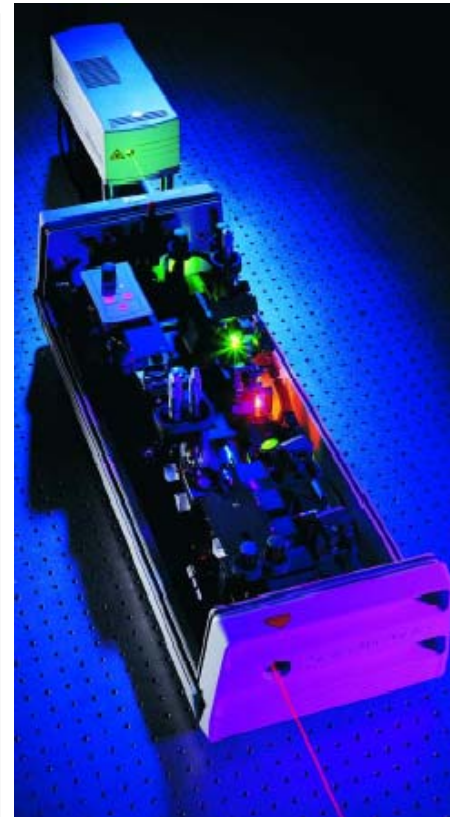
<http://www.coherentinc.com/>

12 fs, 800 nm



<http://www.femtolasers.com/>

100 fs, 0.7 - 1.0 μm



<http://www.spectraphysics.com/>

250 fs, 1.55 μm

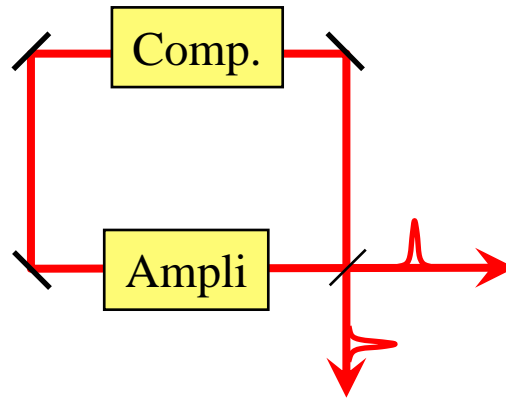


<http://www.menlosystems.com/>

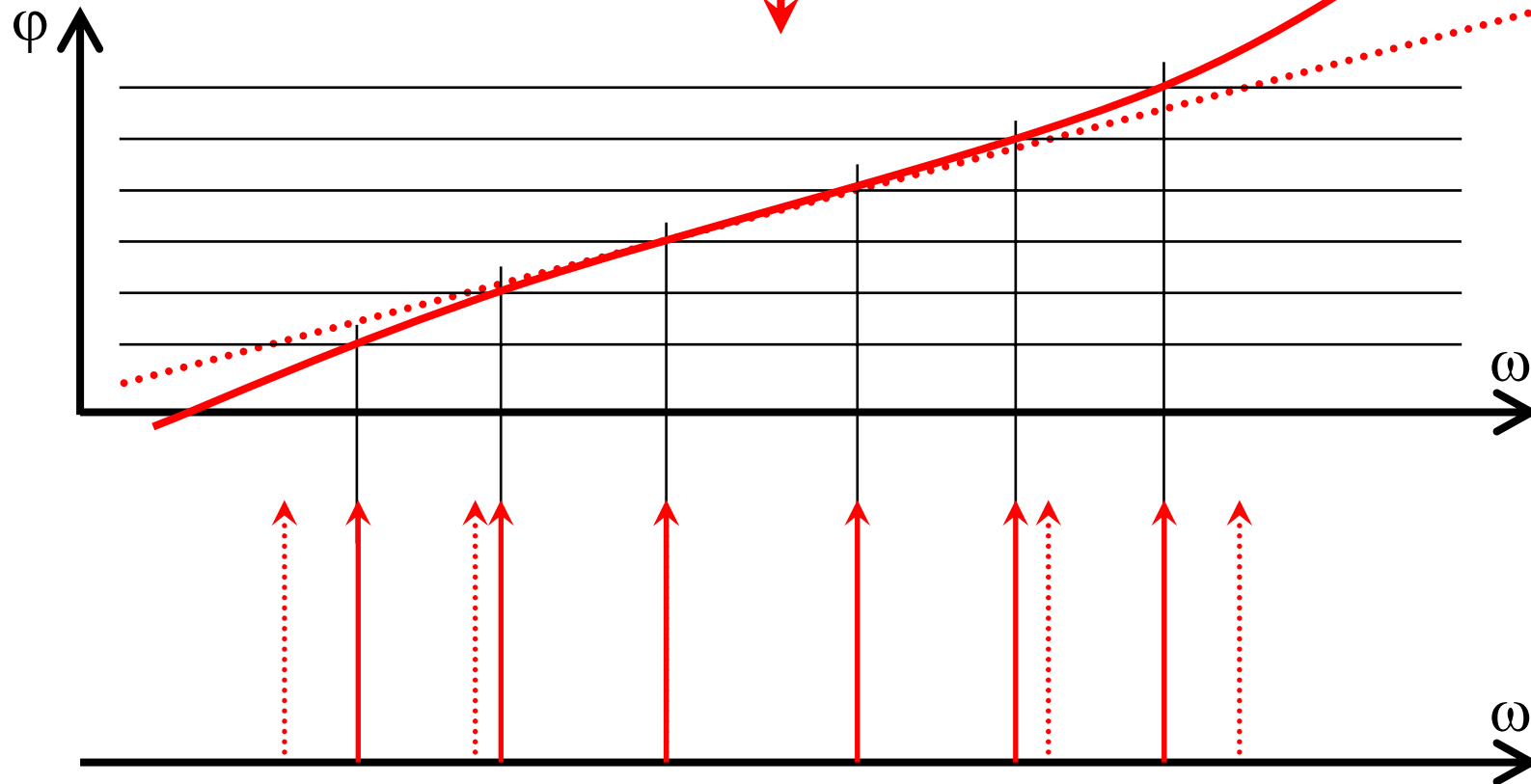
Un autre emploi des oscillateurs femtosecondes:

Les peignes de fréquences

Compensation de la dispersion ?



Impossible avec la
Précision requise !



Rappel : Soliton

Equation de Schrödinger non-linéaire

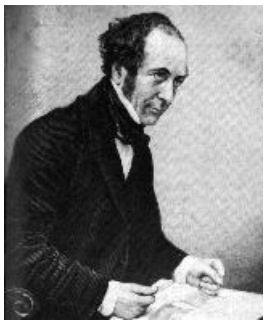
$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{ik_0''}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) A(z, t) = i\gamma |A(z, t)|^2 A(z, t)$$

Cas d'un milieu à **dispersion négative** :

$$\frac{\partial u}{\partial z} = i \left(\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + |u|^2 u \right)$$

Solution :
$$u(z, t) = \frac{\exp(iz/2)}{\cosh t}$$

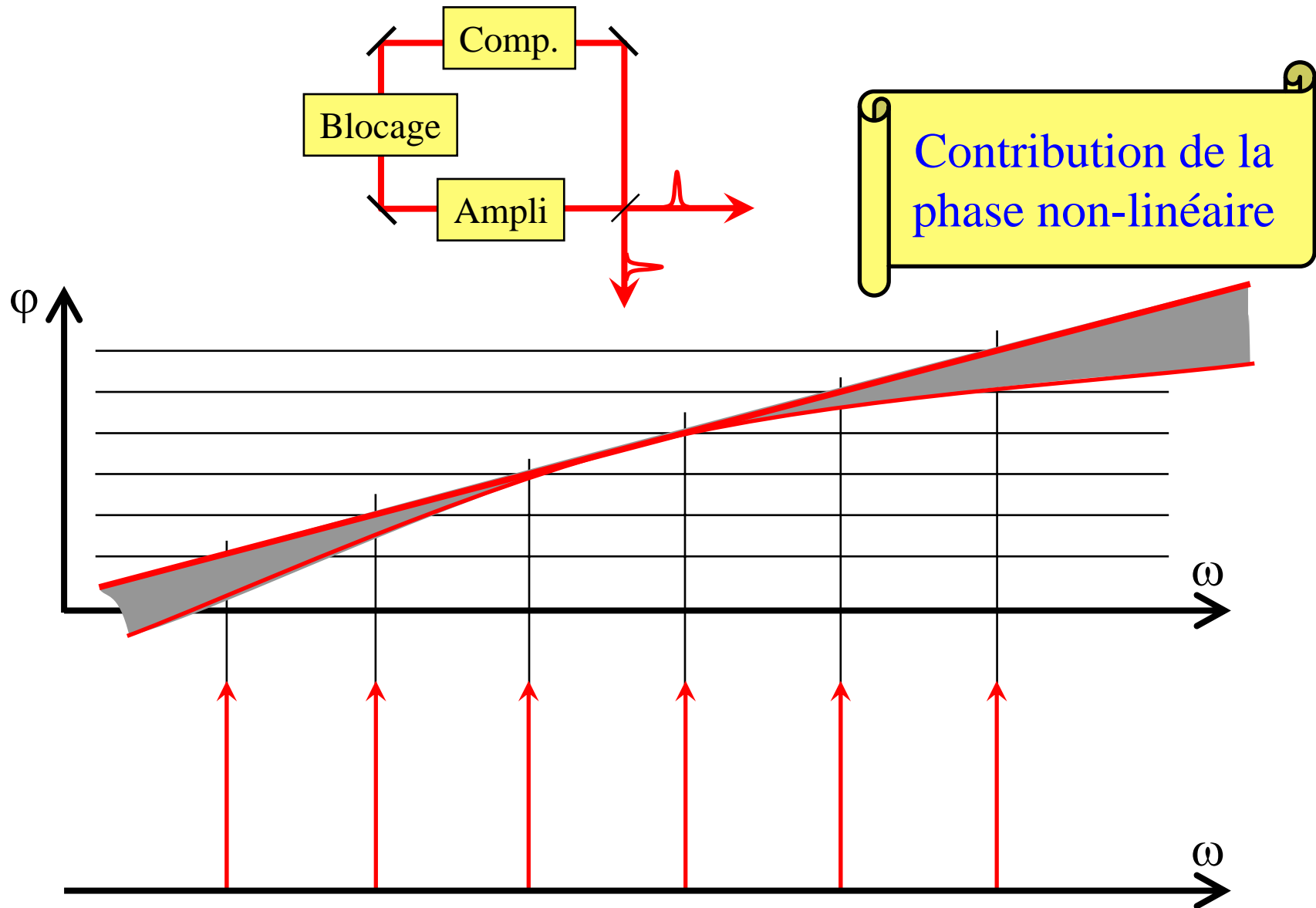
Propagation sans déformation :
compensation entre effet Kerr et
dispersion de vitesse de groupe.



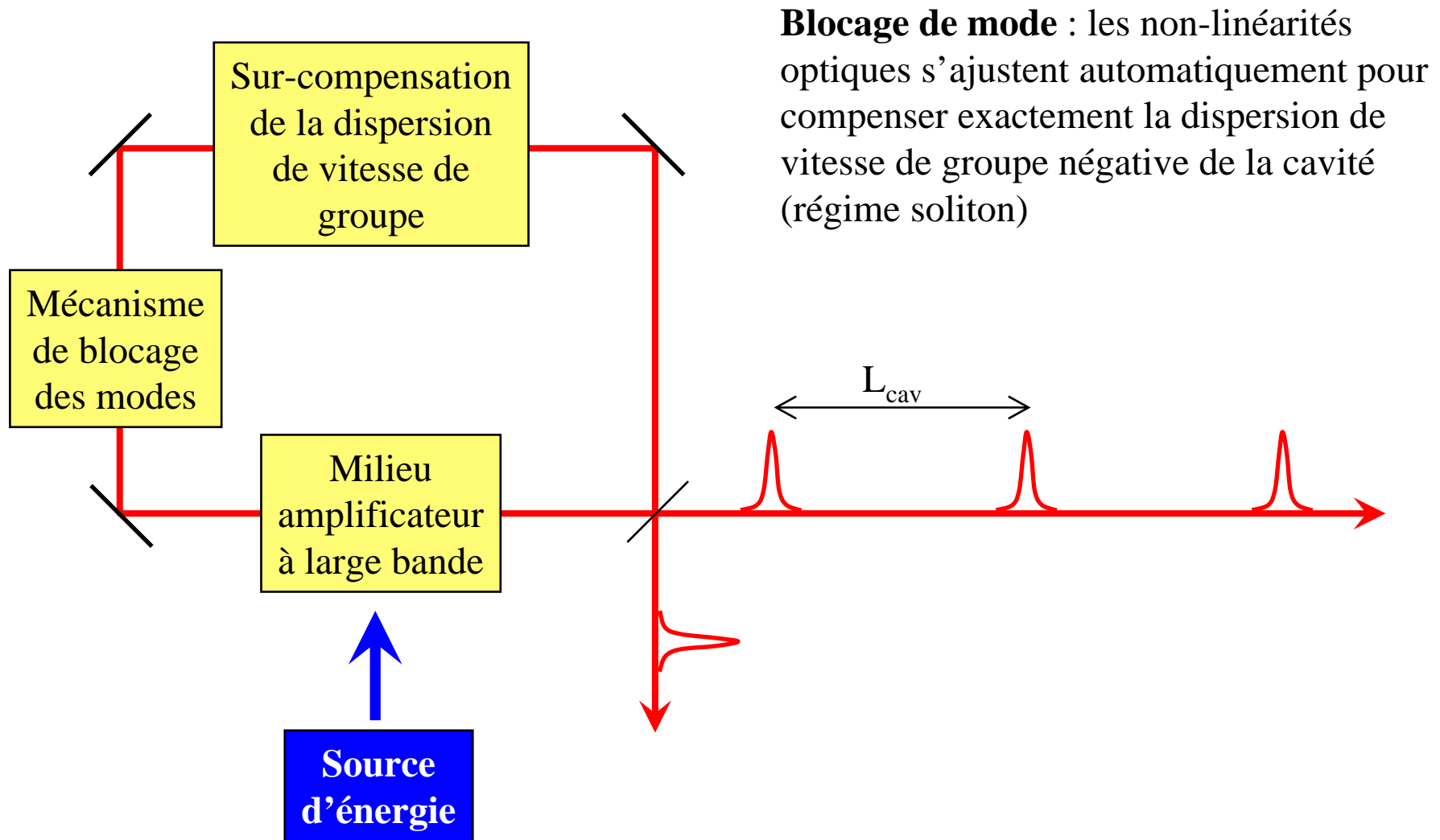
John Scott Russell (1834)



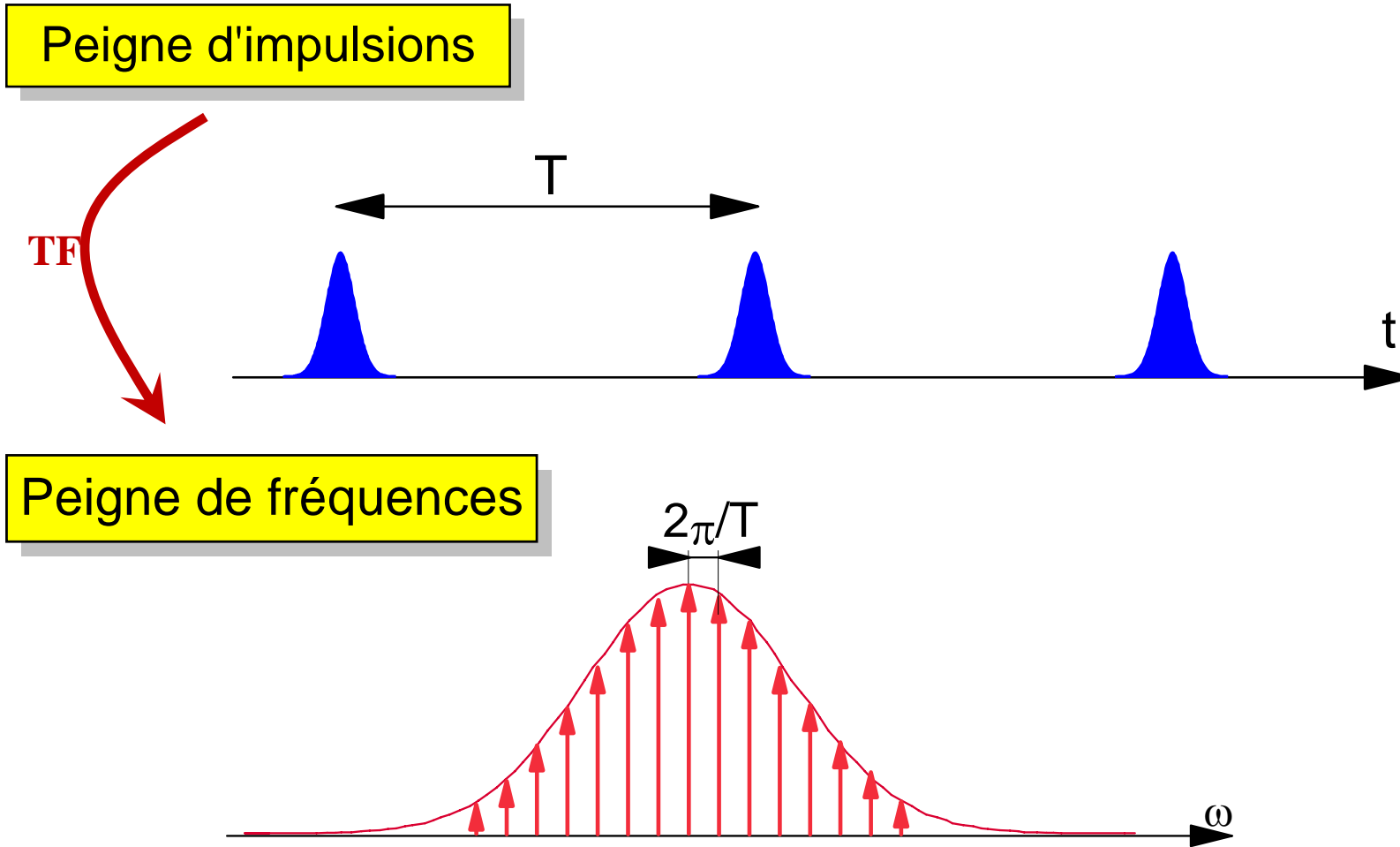
Principe d'un oscillateur femtoseconde



Principe d'un oscillateur femtoseconde

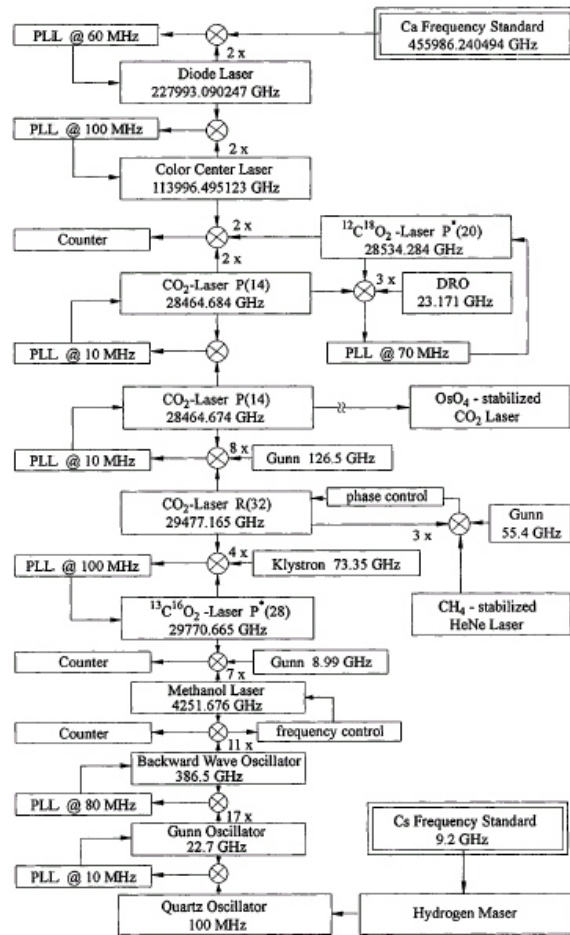


Peigne de fréquences

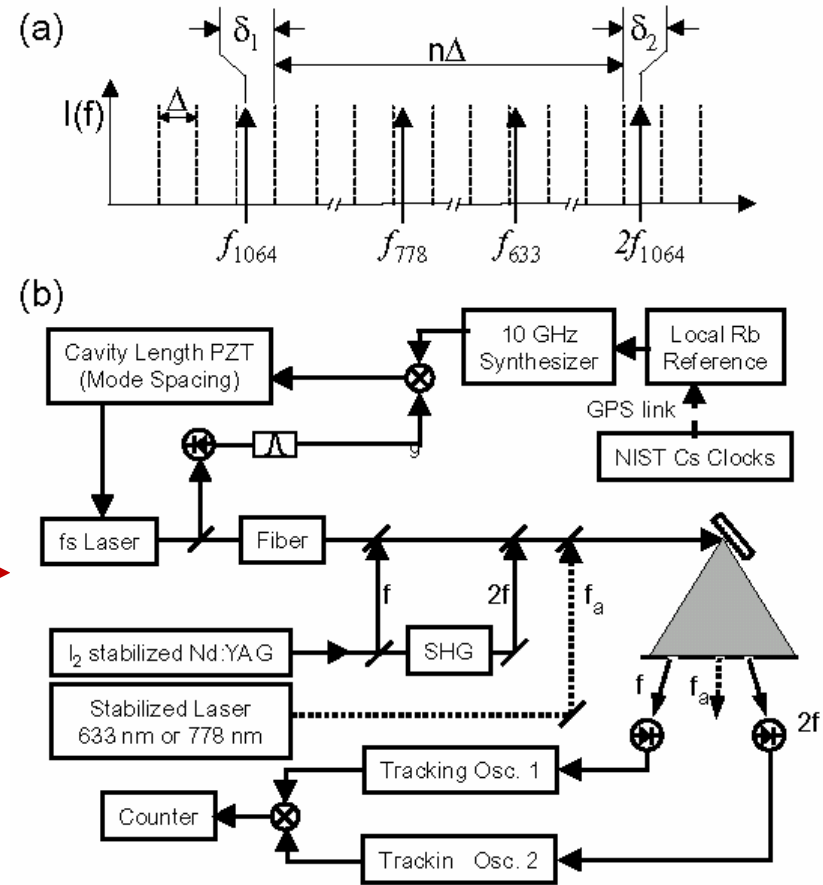


Les effets non-linéaires s'ajustent afin de compenser exactement la dispersion résiduelle de la cavité.
Equidistance du peigne de l'ordre de 10^{-17} : T. Udem et al., *Opt. Lett.* **24**, 881 (1999).

Une révolution dans la métrologie des fréquences



Phys. Rev. Lett. **76**, 18 (1996)

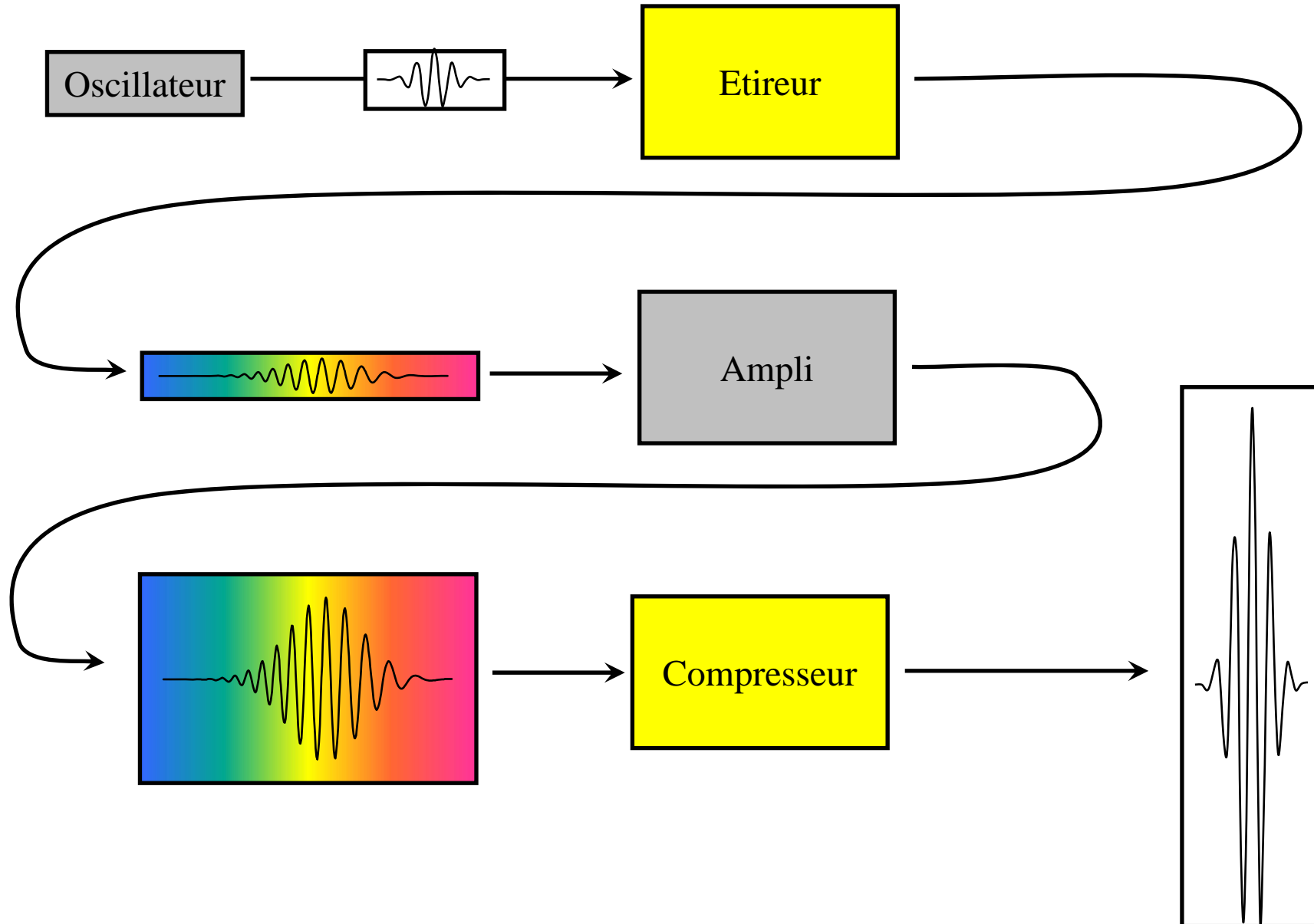


Phys. Rev. Lett. **84**, 5102 (2000)

Th. Udem, R. Holzwarth et T.W. Hänsch, *optical frequency metrology*, Nature **416**, 233 (2002)
 C. Chardonnet et A. Amy-Klein, *lasers femtosecondes appliqués à la métrologie des fréquences*,
 Systèmes femtosecondes (publications de l'université de Saint-Etienne)

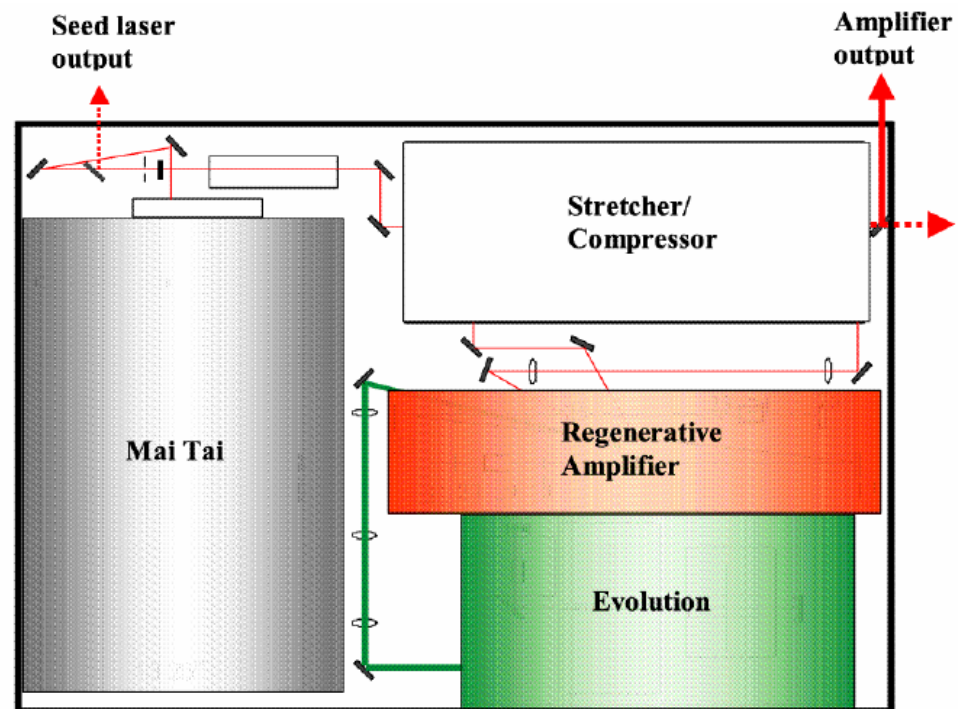
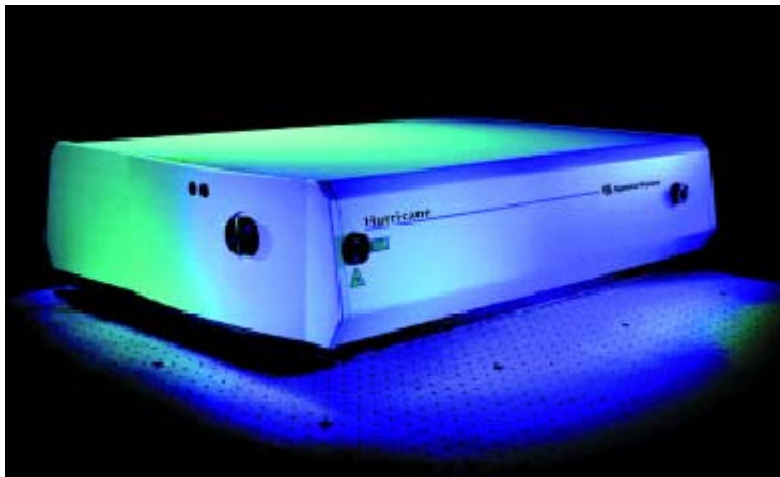
2. Amplificateurs femtosecondes

Amplification à dérive de fréquence (CPA)



Exemples d'amplificateurs femtosecondes

SpectraPhysics Hurricane

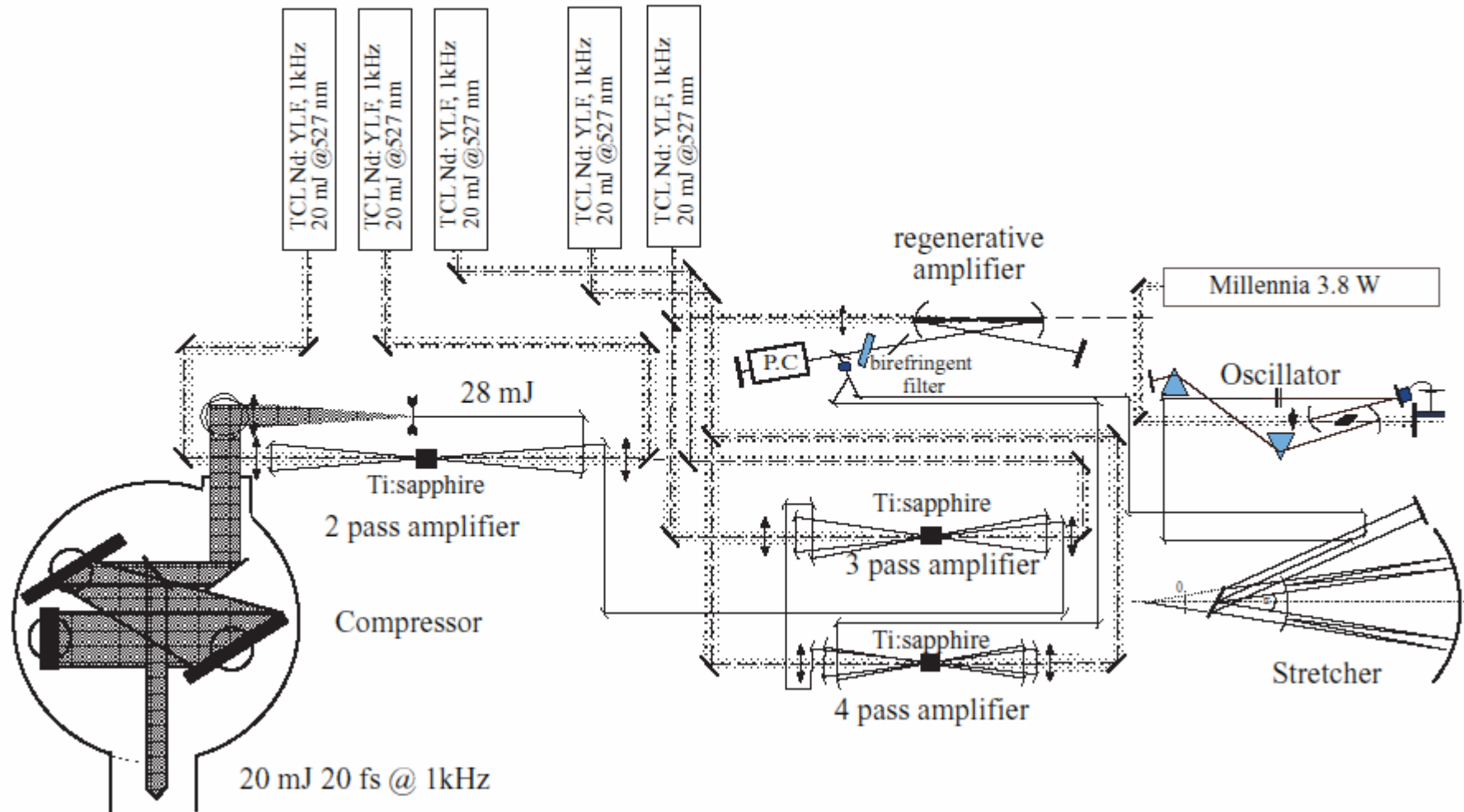


$$1\text{mJ} / 100 \text{ fs} = 10 \text{ GW} (@ 1\text{kHz})$$

<http://www.spectraphysics.com/>

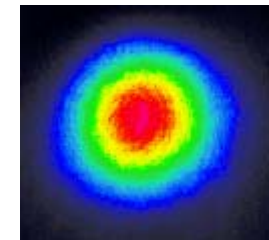
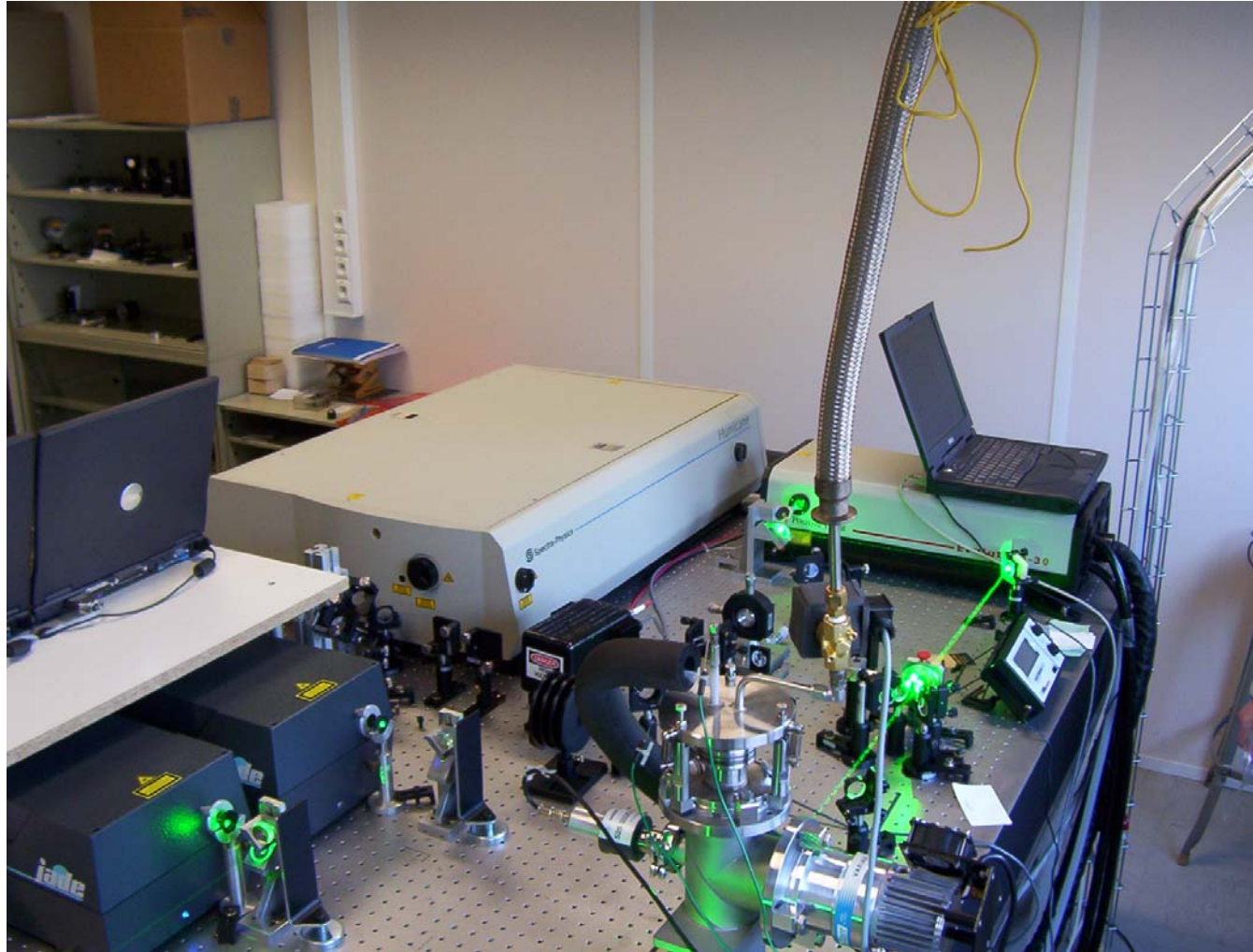
Exemples d'amplificateurs femtosecondes

CELIA (Bordeaux)



Exemples d'amplificateurs femtosecondes

LOB



A. Bonvalet et al.

10 mJ / 100 fs = 100 GW (@ 1 kHz)

Exemples d'amplificateurs femtosecondes

Laboratoire d'Optique Appliquée (ENSTA – Ecole Polytechnique)



1J / 30 fs = 30 TW (@ 10 Hz)

Exemples d'amplificateurs femtosecondes

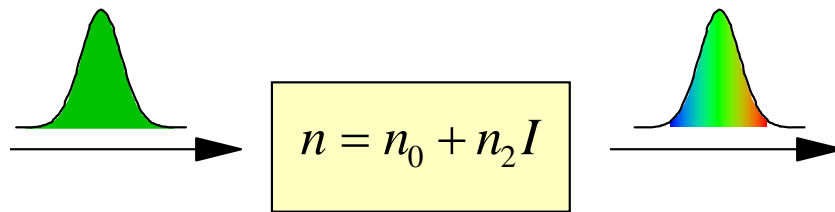
Laboratoire Livermore (Etats-Unis)



1 kJ / 1 ps = 1 PW

3. Génération de nouvelles longueurs d'onde par optique non-linéaire

Génération de continuum spectral



$$\phi(t, z) = \phi(t, 0) + n_0 \frac{\omega_0}{c} z + n_2 \frac{\omega_0}{c} z I(t, z - vt)$$

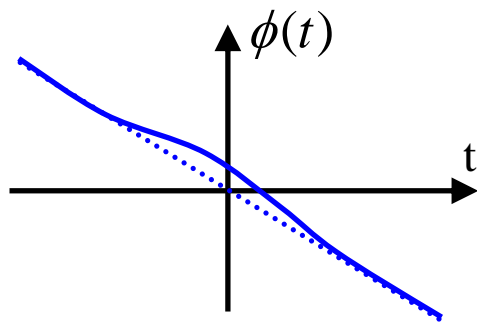
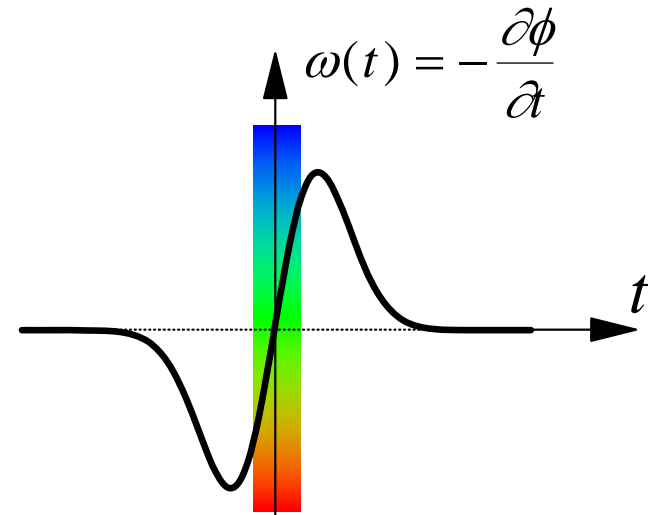
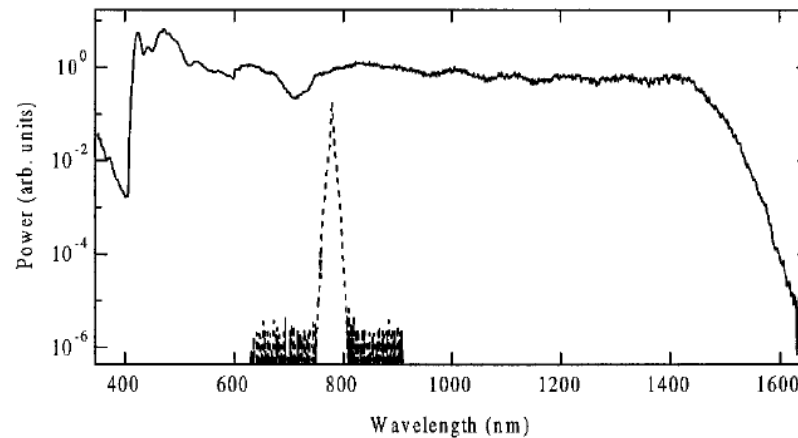
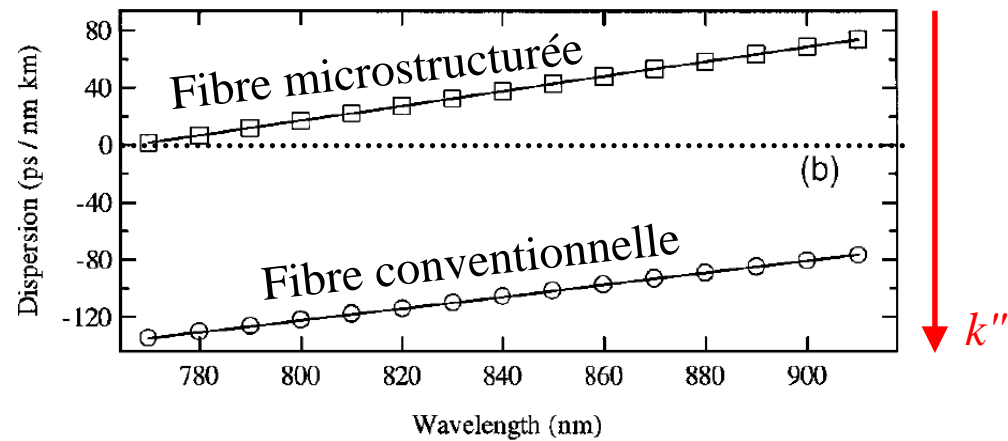
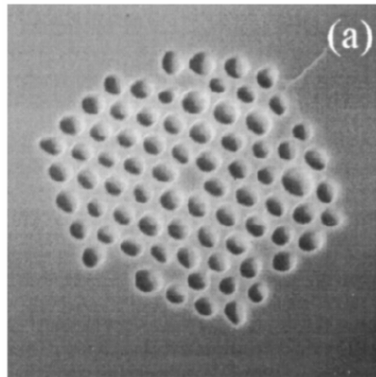


Photo C. Le Blanc (LOA)

Génération de continuum spectral dans des fibres optiques microstructurées

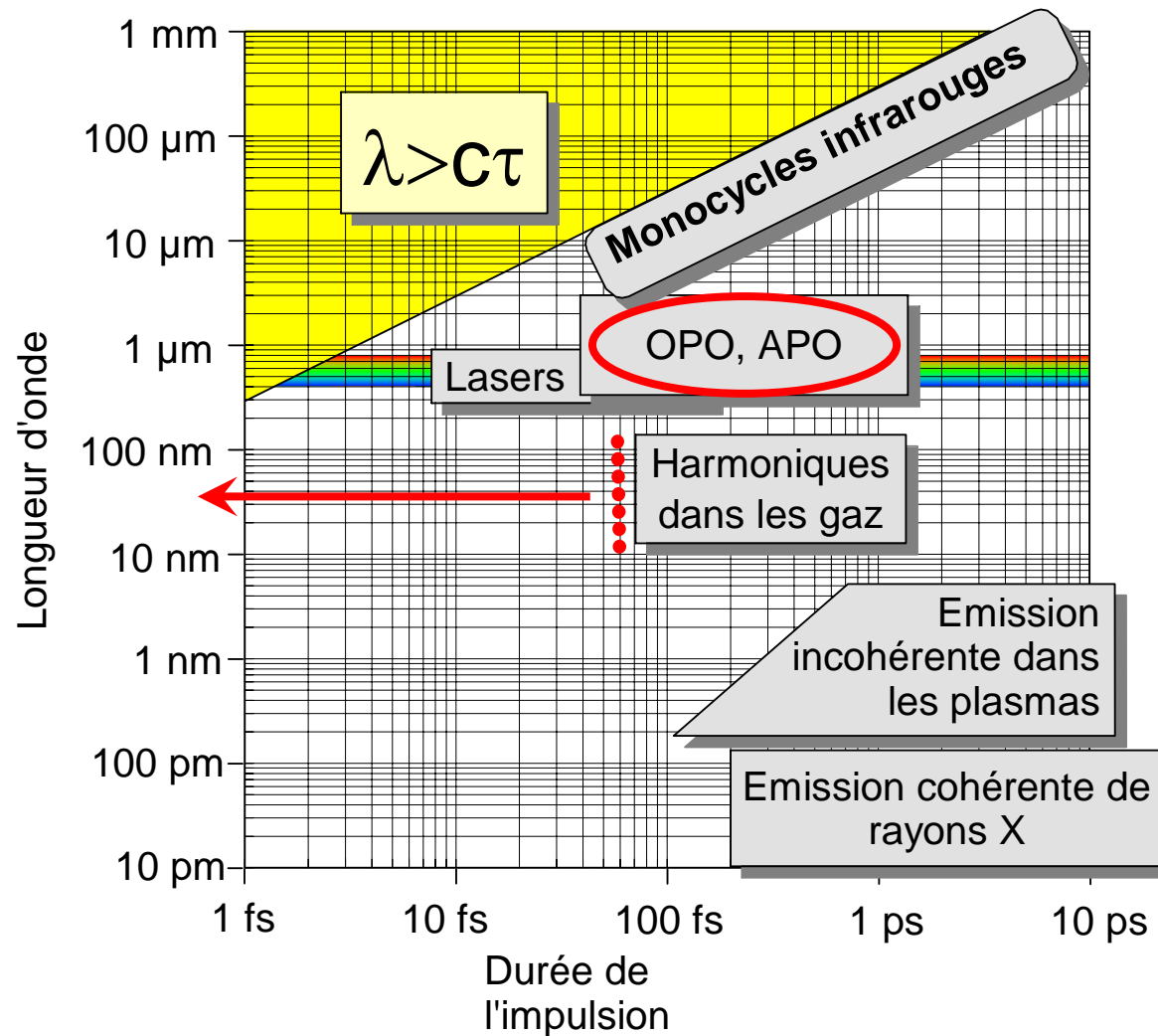
Dispersion de vitesse de groupe négative dans le visible !



J.K. Ranka, R.S. Windeler, A.J. Stentz

Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm
Opt. Lett. **25**, 25-27 (2000)

Génération de nouvelles longueurs d'onde



Différence de fréquences et amplification paramétrique

$$P^{(2)}(t) = \chi^{(2)} \mathcal{E}_P(t) \mathcal{E}_S^*(t) \rightarrow \mathcal{E}_I(t) \quad \hbar\omega_P = \hbar\omega_S + \hbar\omega_I$$

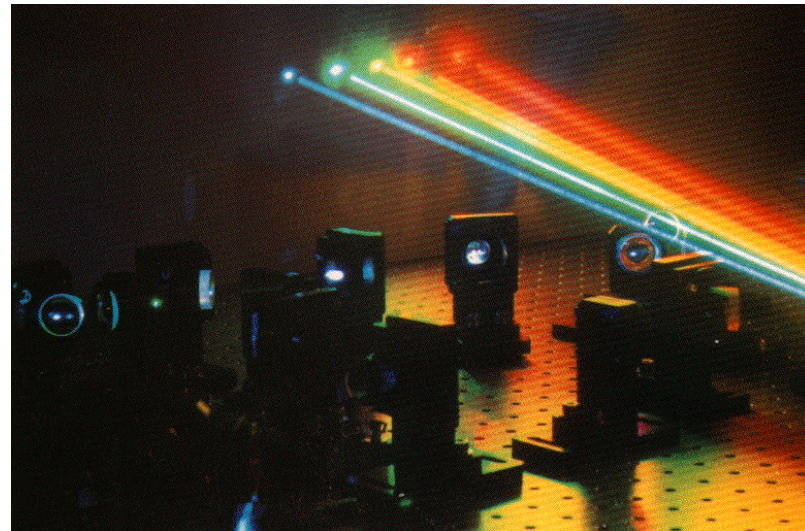
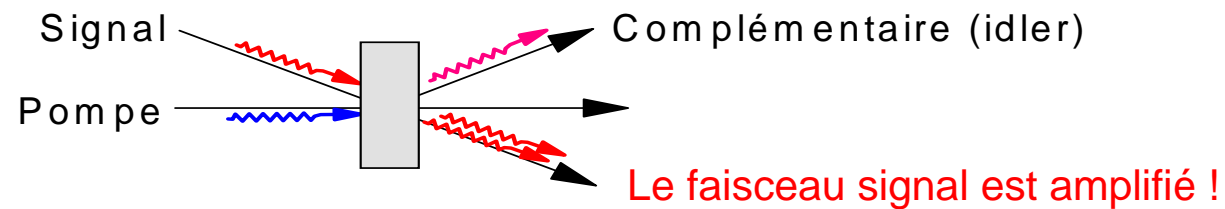
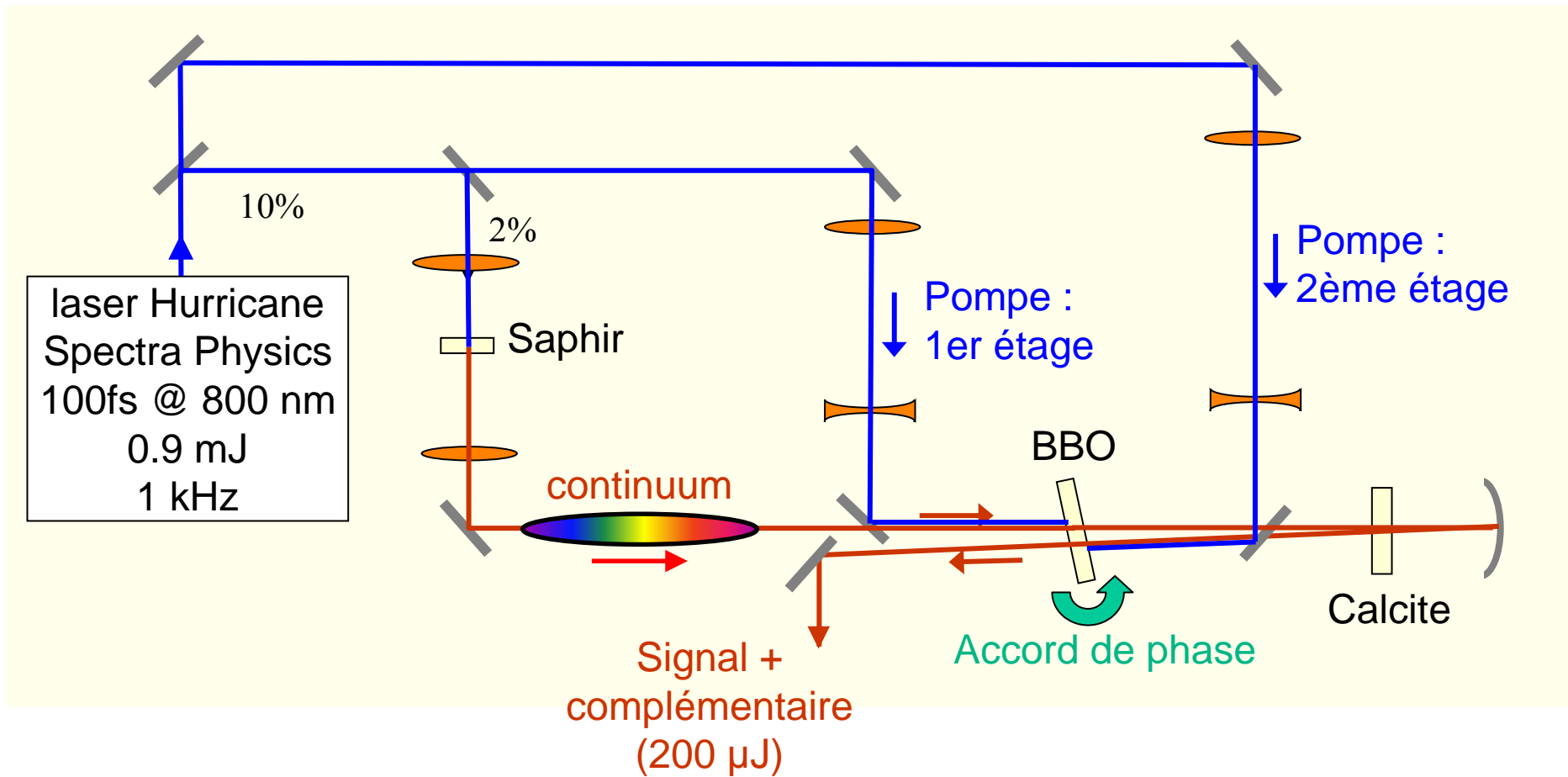


Photo B.M. Industries

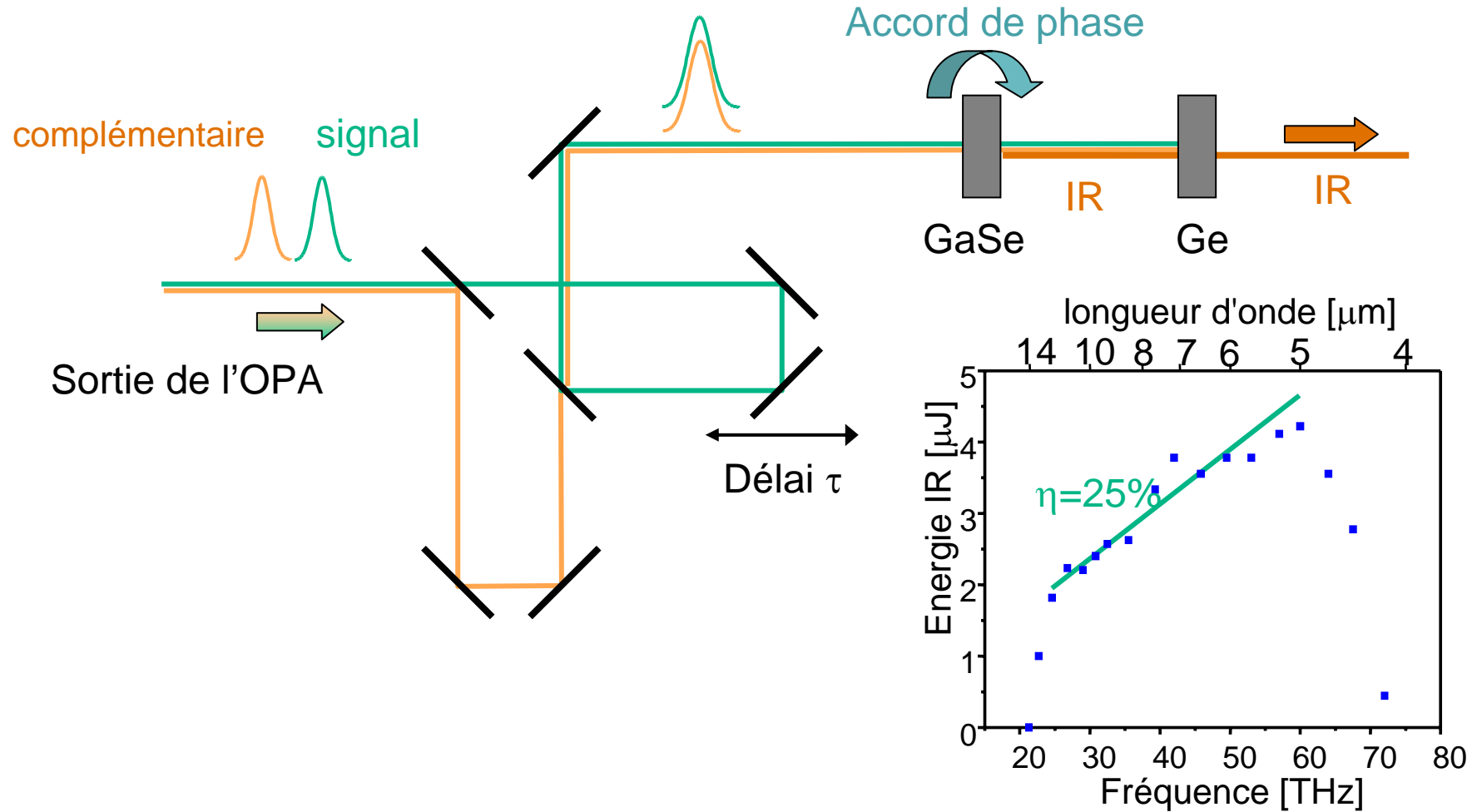
Amplificateur paramétrique optique



C. Ventalon, J.M. Fraser, J.P. Likforman, D.M. Villeneuve, P.B. Corkum, M. Joffre
Generation and complete characterization of intense mid-infrared ultrashort pulses
J. Opt. Soc. Am. B **23**, 332-340 (2006)
<http://tel.ccsd.cnrs.fr/tel-00008323>

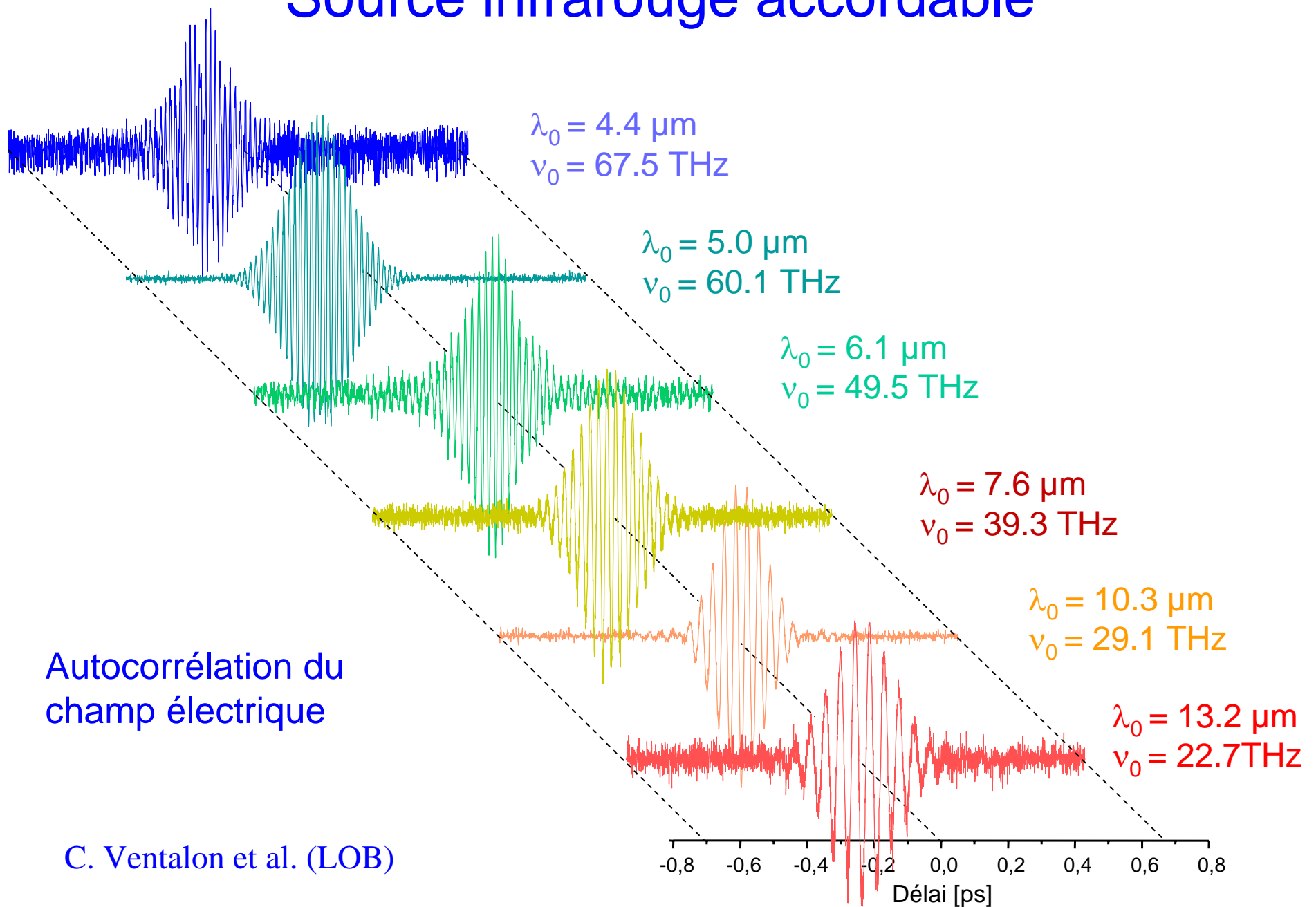
Génération d'infrarouge moyen (5 – 15 μm)

Principe : différence de fréquences entre signal et complémentaire



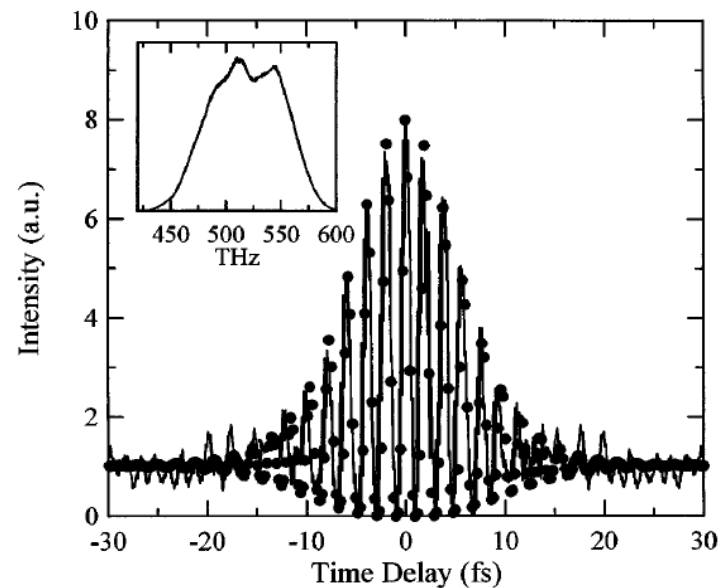
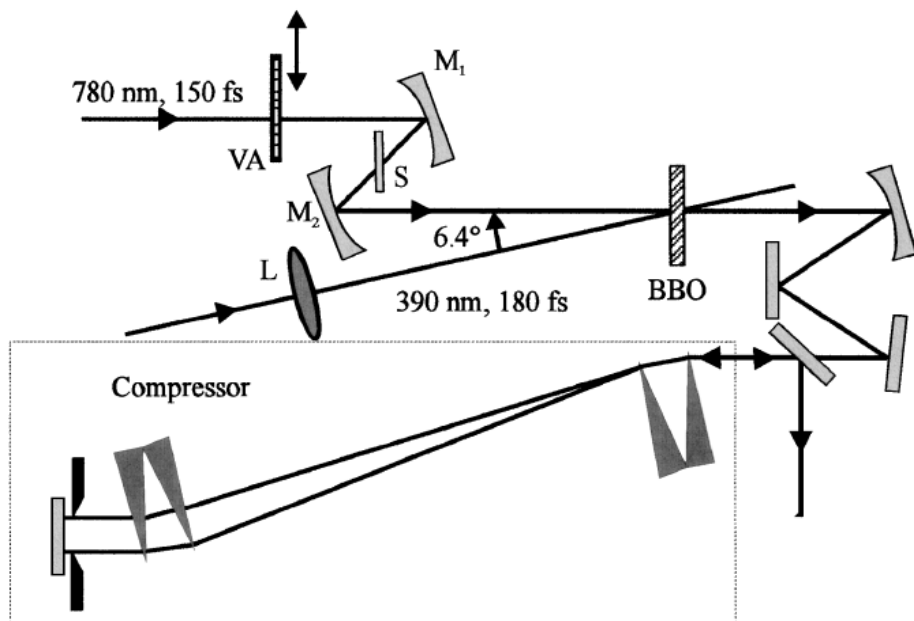
C. Ventalon, J.M. Fraser, J.P. Likforman, D.M. Villeneuve, P.B. Corkum, M. Joffre
Generation and complete characterization of intense mid-infrared ultrashort pulses
J. Opt. Soc. Am. B **23**, 332-340 (2006) ; <http://tel.ccsd.cnrs.fr/tel-00008323>

Source infrarouge accordable



C. Ventalon et al. (LOB)

Amplificateur paramétrique optique non-colinéaire (NOPA)

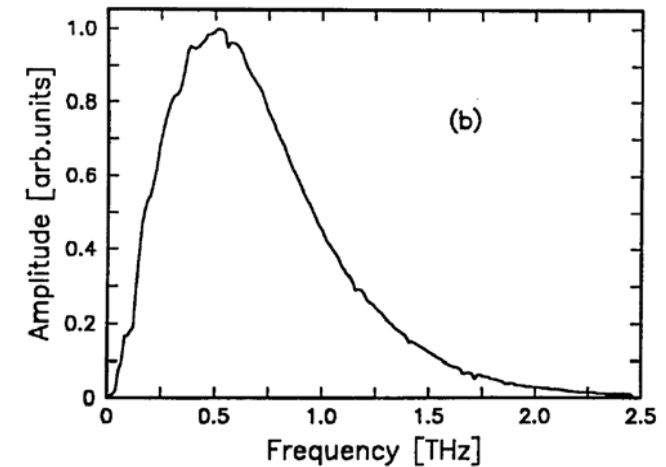
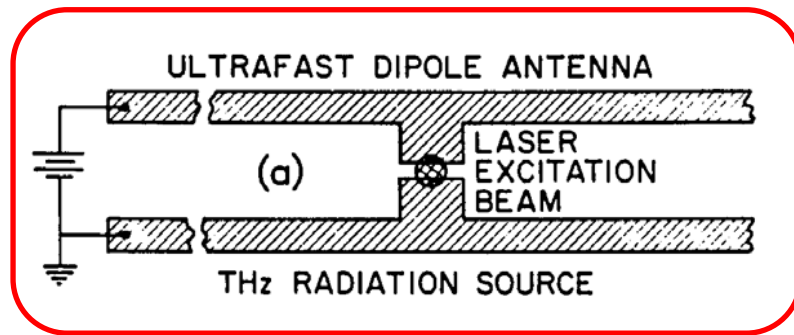
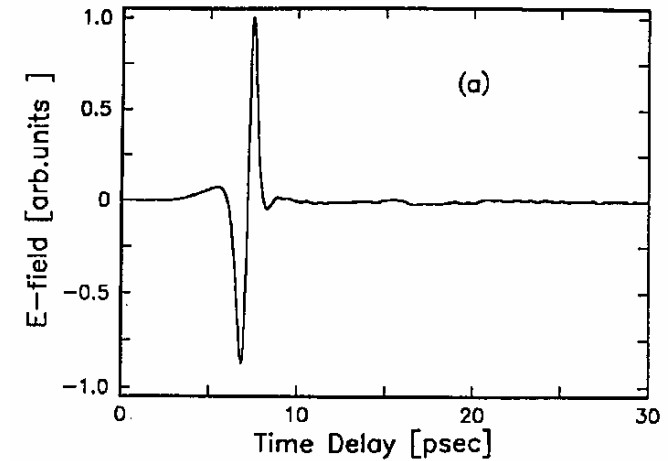
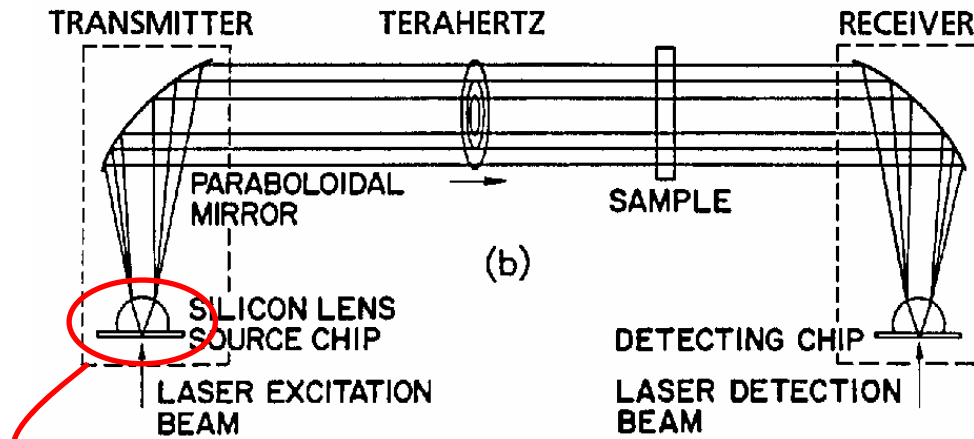


G. Cerullo, M. Nisoli, S. Stagira, S. De Silvestri

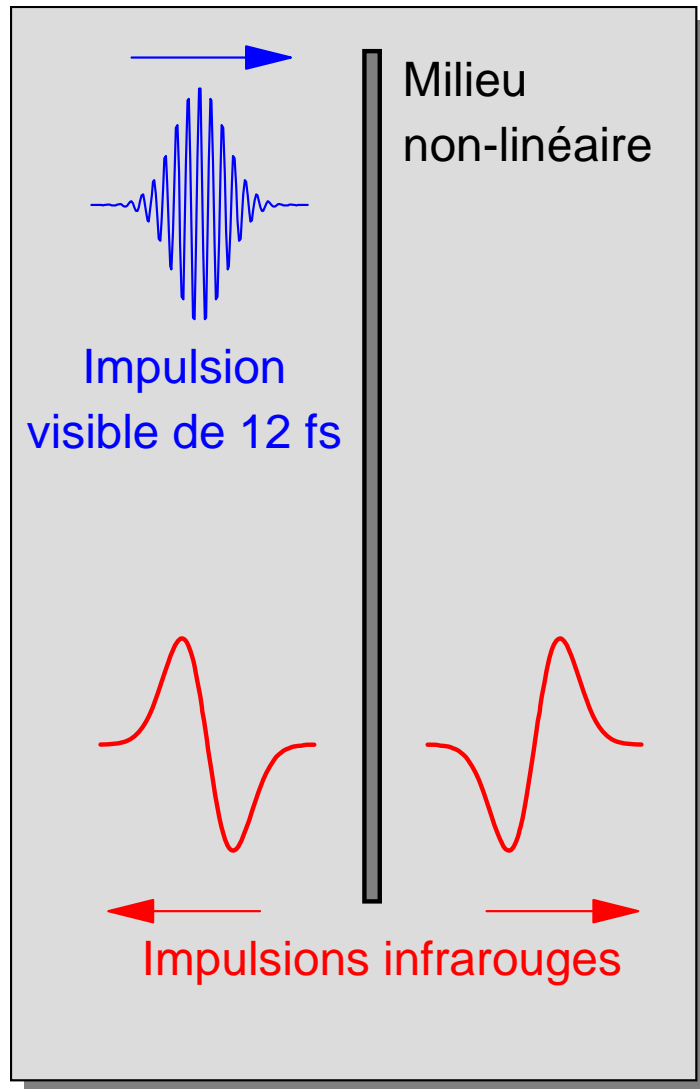
Sub-8-fs pulses from an ultrabroadband optical parametric amplifier in the visible

Opt. Lett. **23**, 1283-1285 (1998).

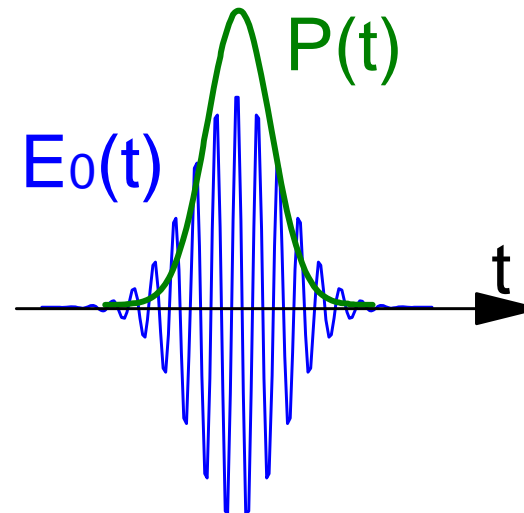
Génération d'impulsions THz



Emission infrarouge par redressement optique



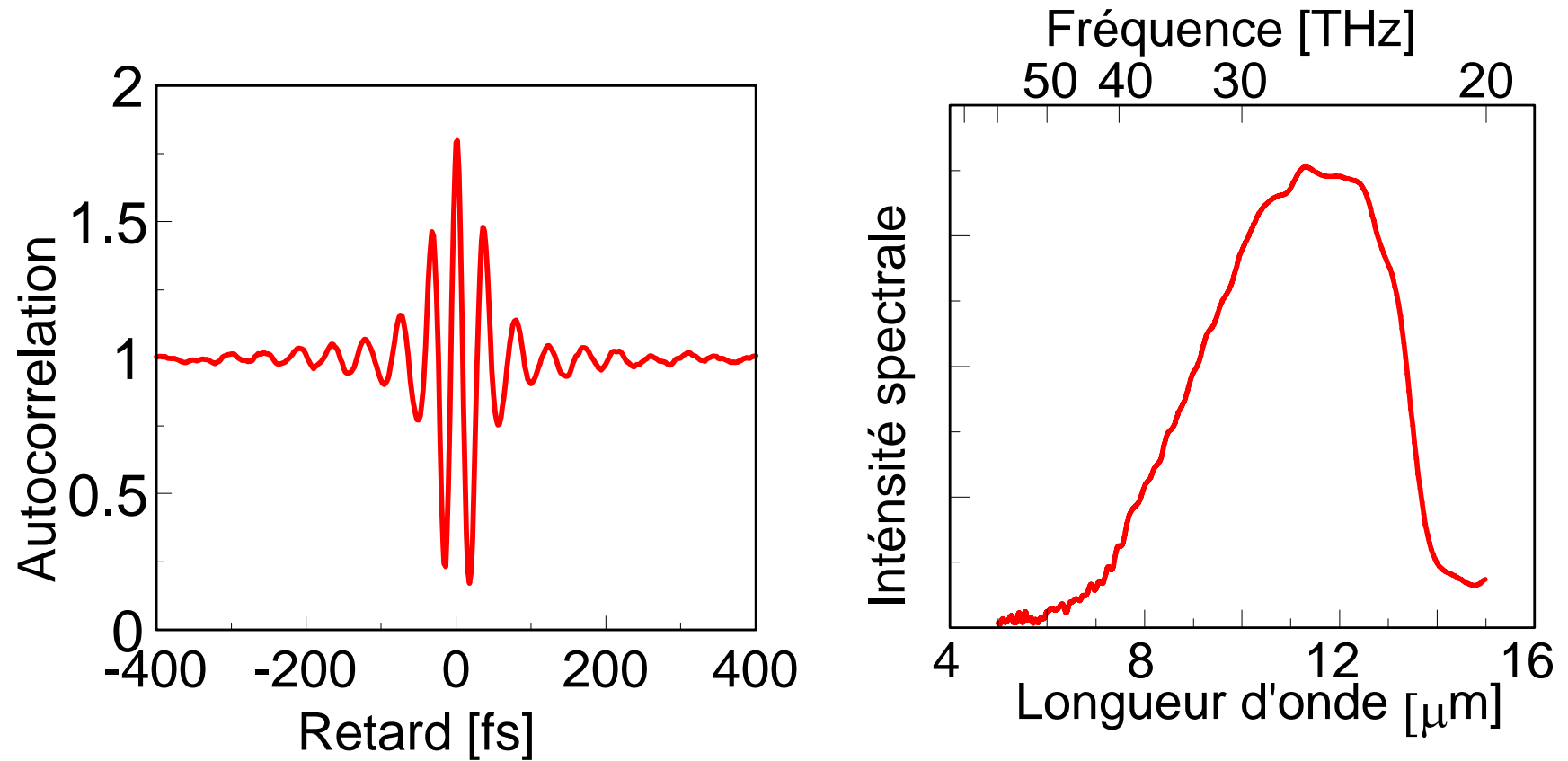
- Redressement optique : $P^{(2)}(t) = \varepsilon_0 \chi^{(2)} |E_0(t)|^2$



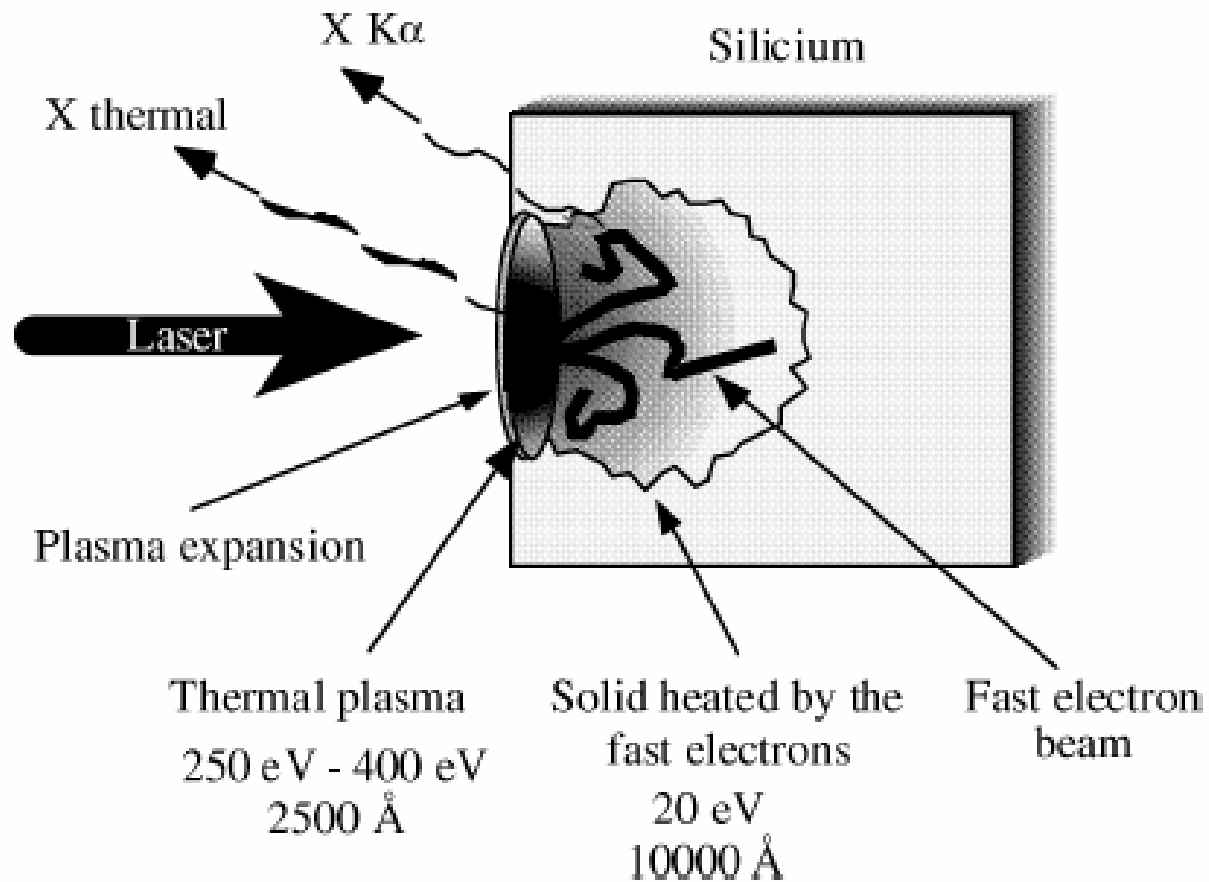
- Propagation : $\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 P^{(2)}(t)}{\partial t^2}$

$$E(t) = -\frac{nL}{2\varepsilon_0 c} \frac{\partial P^{(2)}}{\partial t}$$

Emission infrarouge par redressement optique

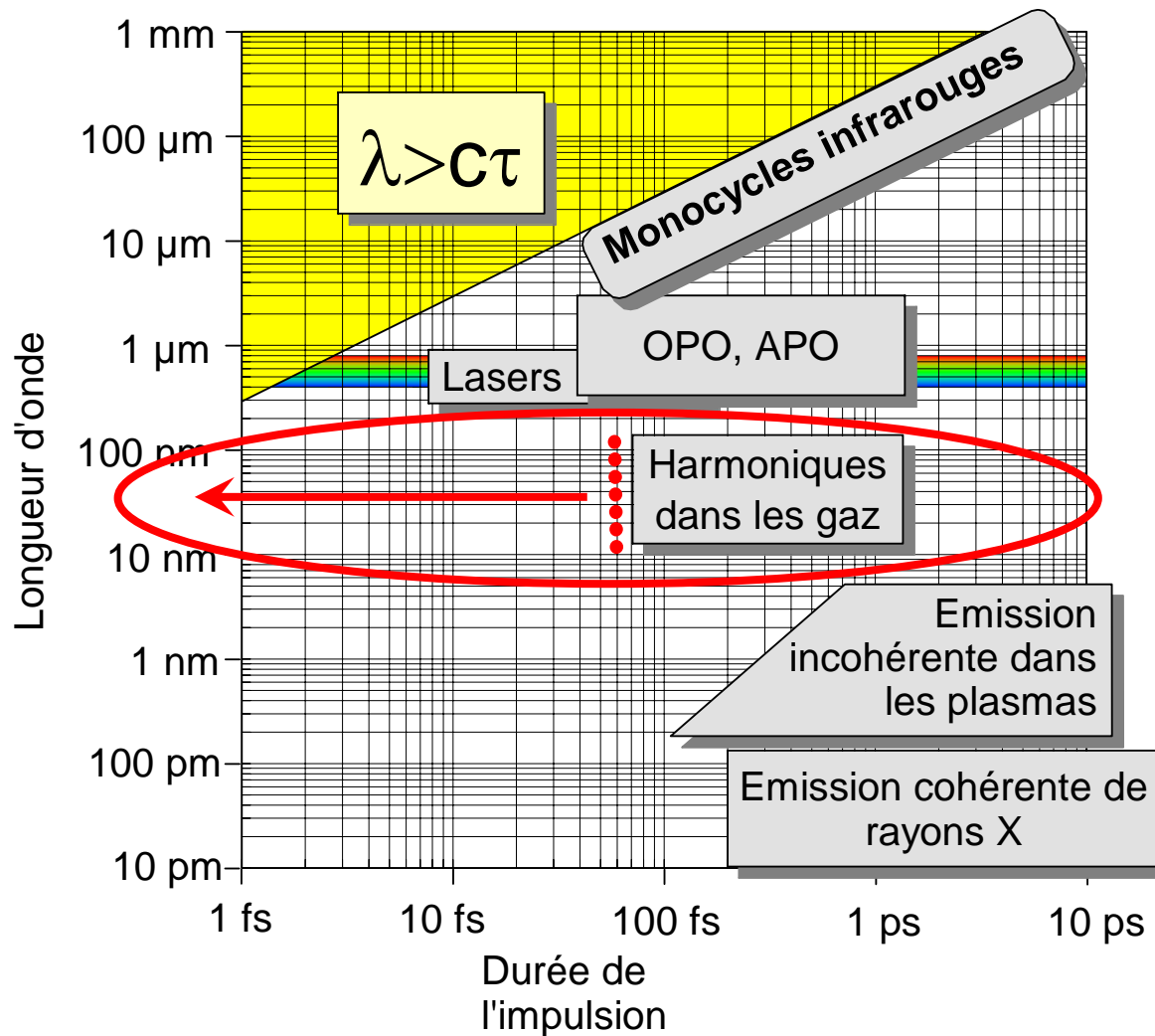


Génération d'impulsions X femtosecondes

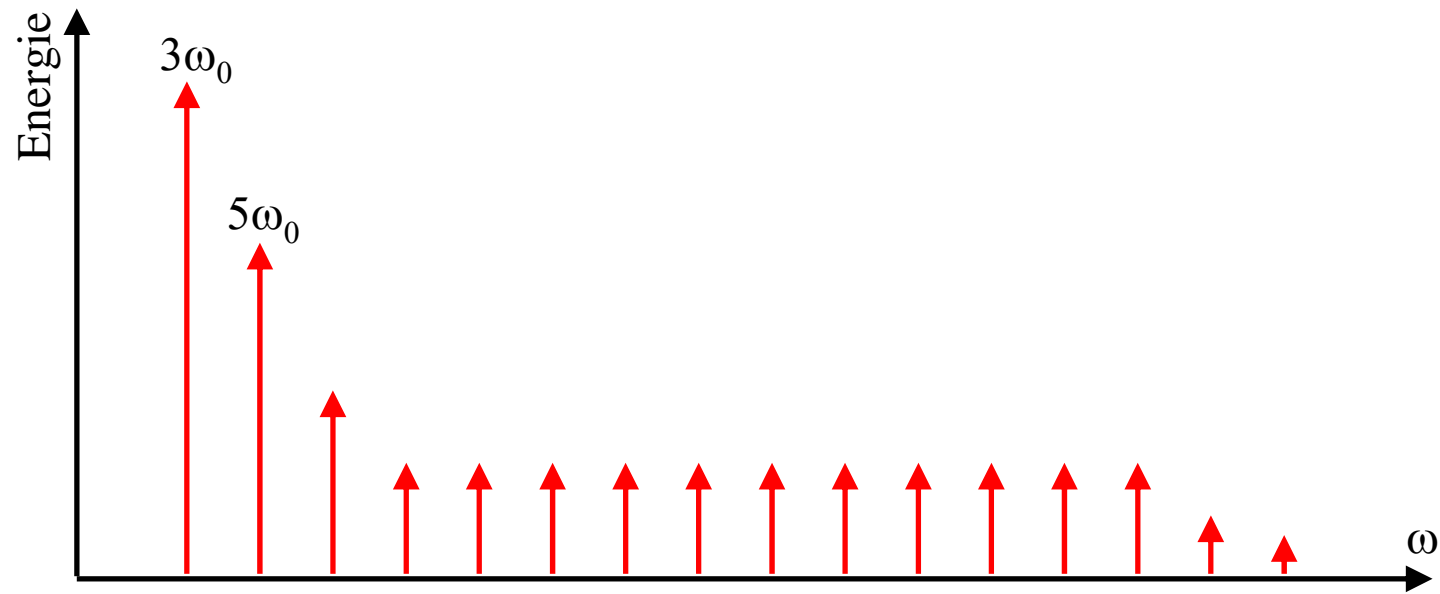


A. Rousse, C. Rischel, J.-C. Gauthier, C.R. Acad. Sci. IV, 305 (2000).

4. Génération d'harmoniques d'ordres élevés : vers les attosecondes

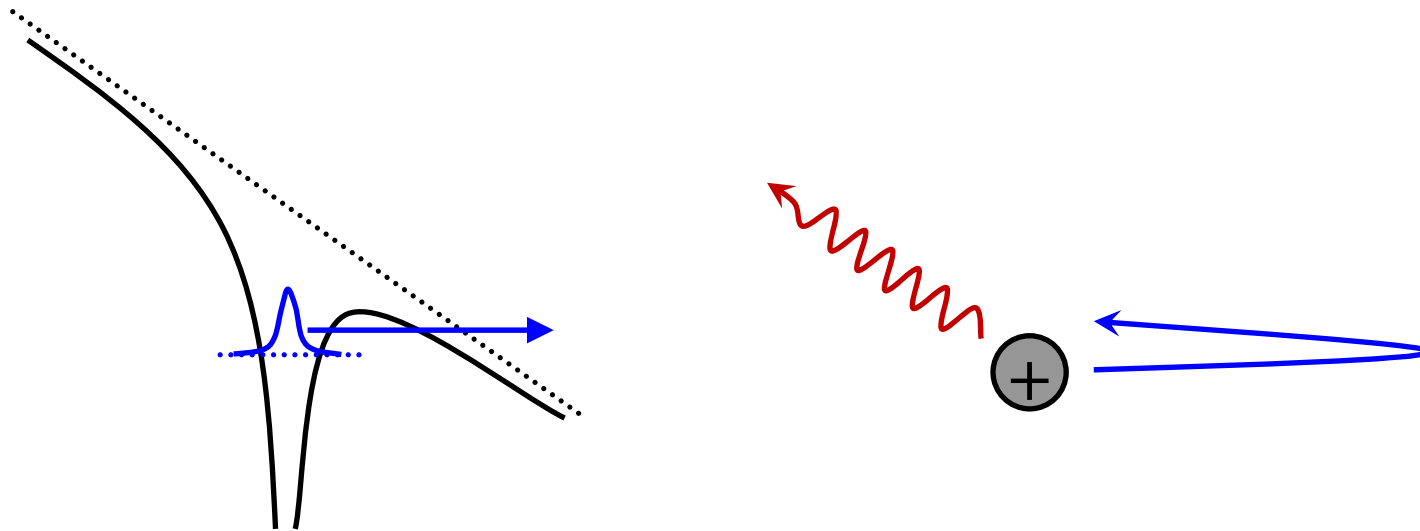


Génération d'harmoniques d'ordres élevés



Modèle semi-classique

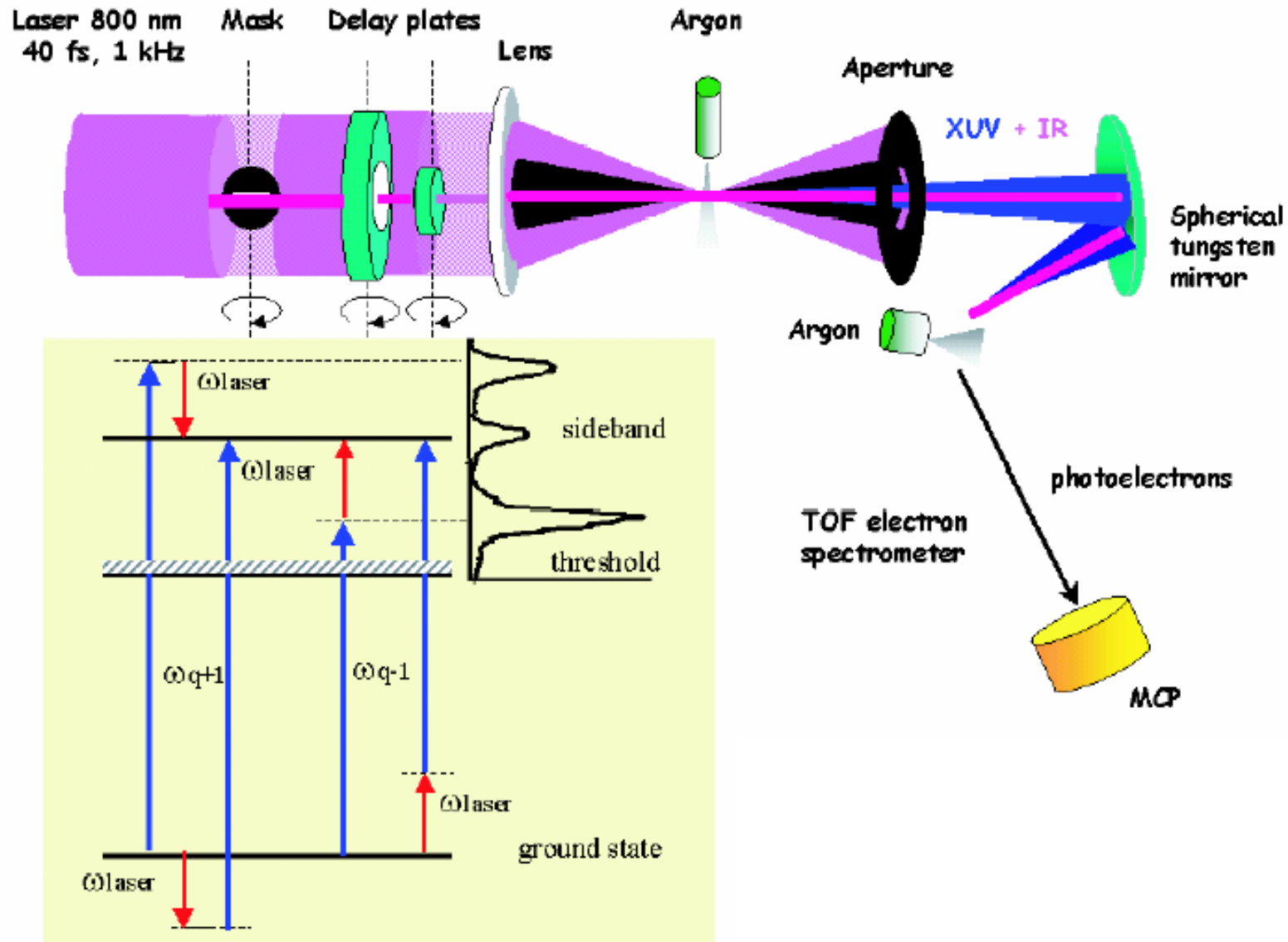
$$V(\mathbf{r}, t) = V_{Coul}(\mathbf{r}) + exE(t)$$



→ Génération d'un train d'impulsions attosecondes (as)

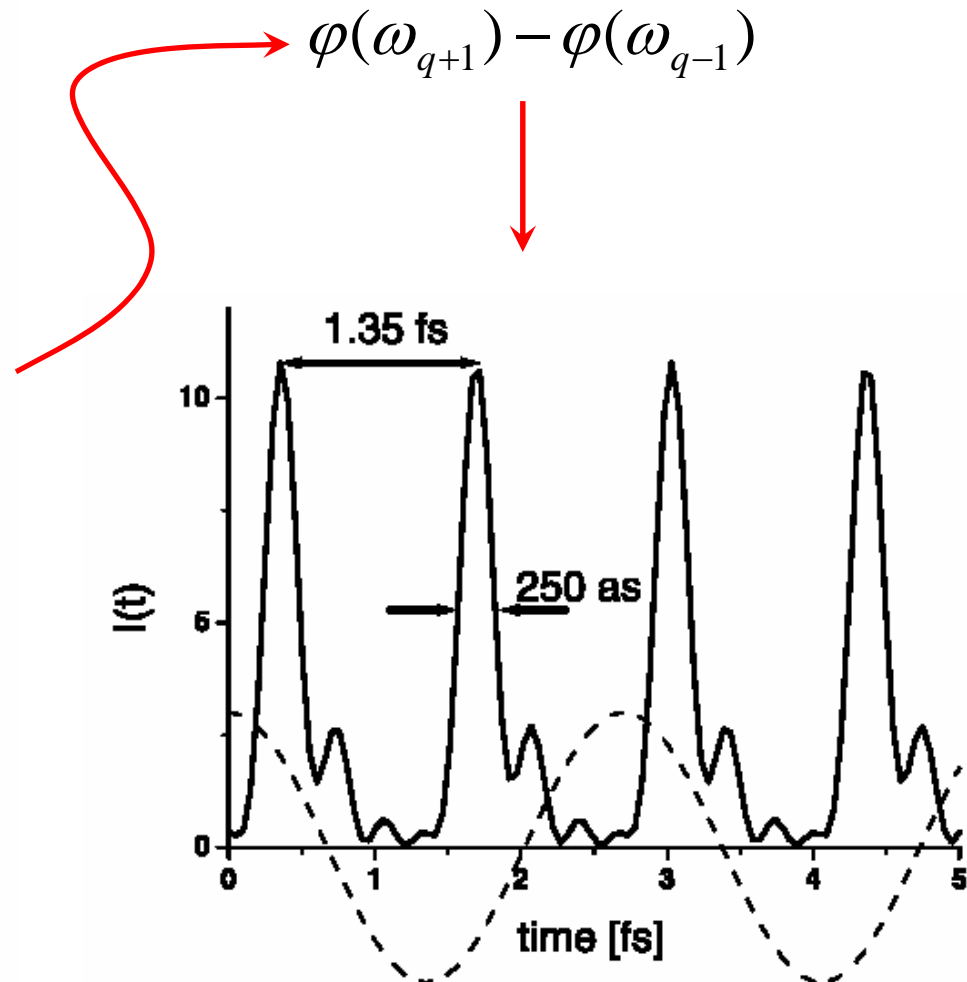
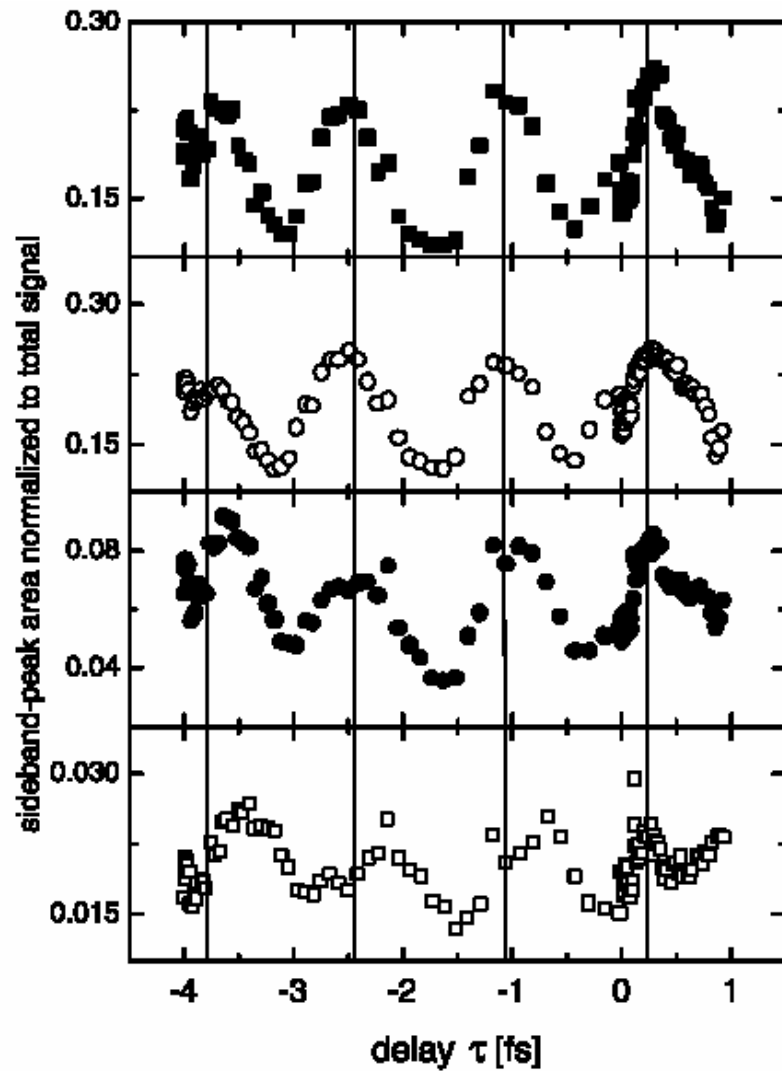
RABBITT

Caractérisation d'un train d'impulsions as



RABBITT

Caractérisation d'un train d'impulsions as



Conclusion

- Les oscillateurs femtosecondes et les amplificateurs de basse puissance sont désormais des produits commerciaux utilisés dans une très grande variété d'application.
- La disponibilité d'impulsions intenses rend possible la génération de nouvelles longueurs d'onde couvrant une fraction considérable du spectre électromagnétique, s'étendant de l'infrarouge lointain aux rayons X.
- Les sources ultra-intenses ont ouvert de nouveaux champs de recherche dans le domaine de la physique des hautes intensité (génération d'harmoniques, impulsions attosecondes, accélération de particules, allumage rapide pour la fusion contrôlée, etc.).