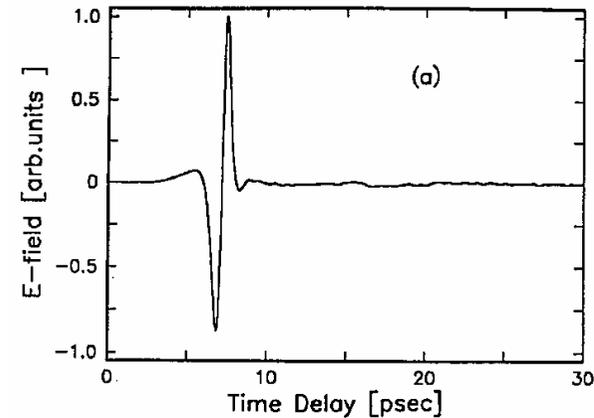
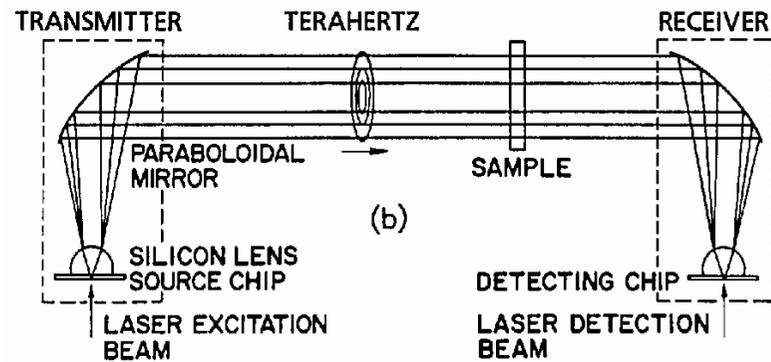


Caractérisation d'une impulsion ultra-courte

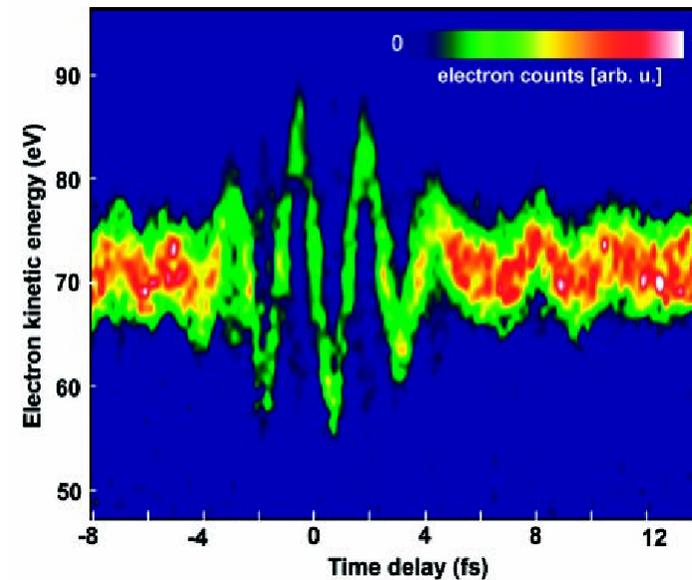
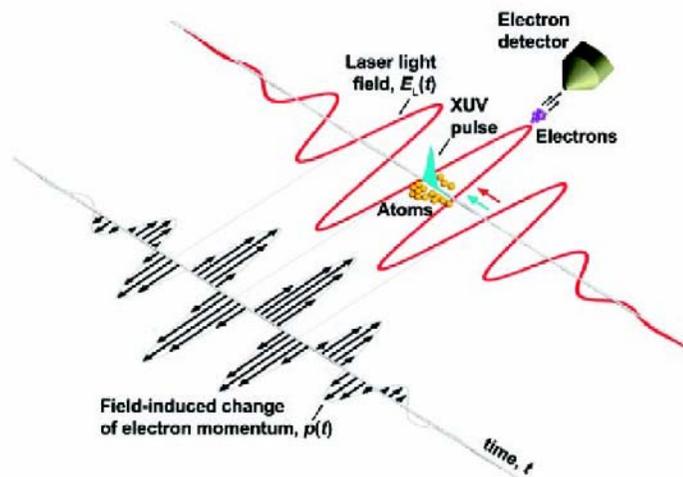
La méthode "facile" : utiliser une impulsion plus courte

- Mesure d'impulsions THz picosecondes à l'aide d'impulsions visibles femtosecondes



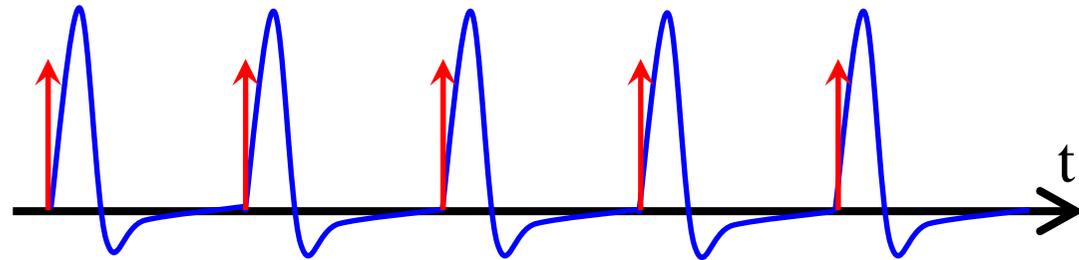
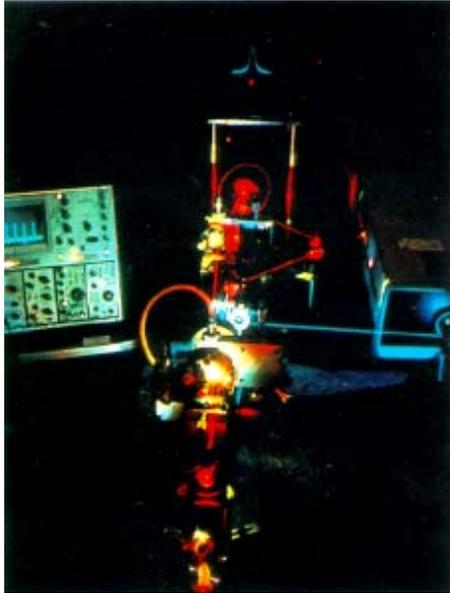
D. Grischkowsky *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B **10**, 2006 (1990)

- Mesure d'impulsions visibles femtosecondes à l'aide d'impulsions XUV attosecondes



E. Goulielmakis *et al.*, Science **305**, 1267 (2004)

Caractérisation d'une impulsion à l'aide d'un photodétecteur et d'un oscilloscope rapide

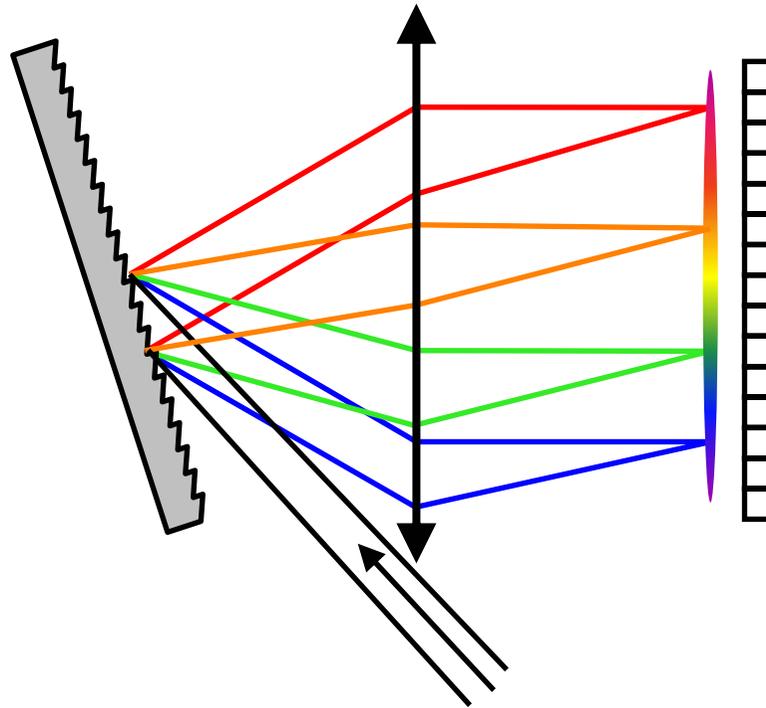


Pour une impulsion ultrabrève, le signal est proportionnel à l'énergie de l'impulsion : $\int_{-\infty}^{+\infty} I(t)dt$

- On mesure :
- La réponse impulsionnelle du système de détection
 - L'énergie par impulsion
 - Le taux de répétition du laser

Mais on n'a pas accès à la durée de l'impulsion ...

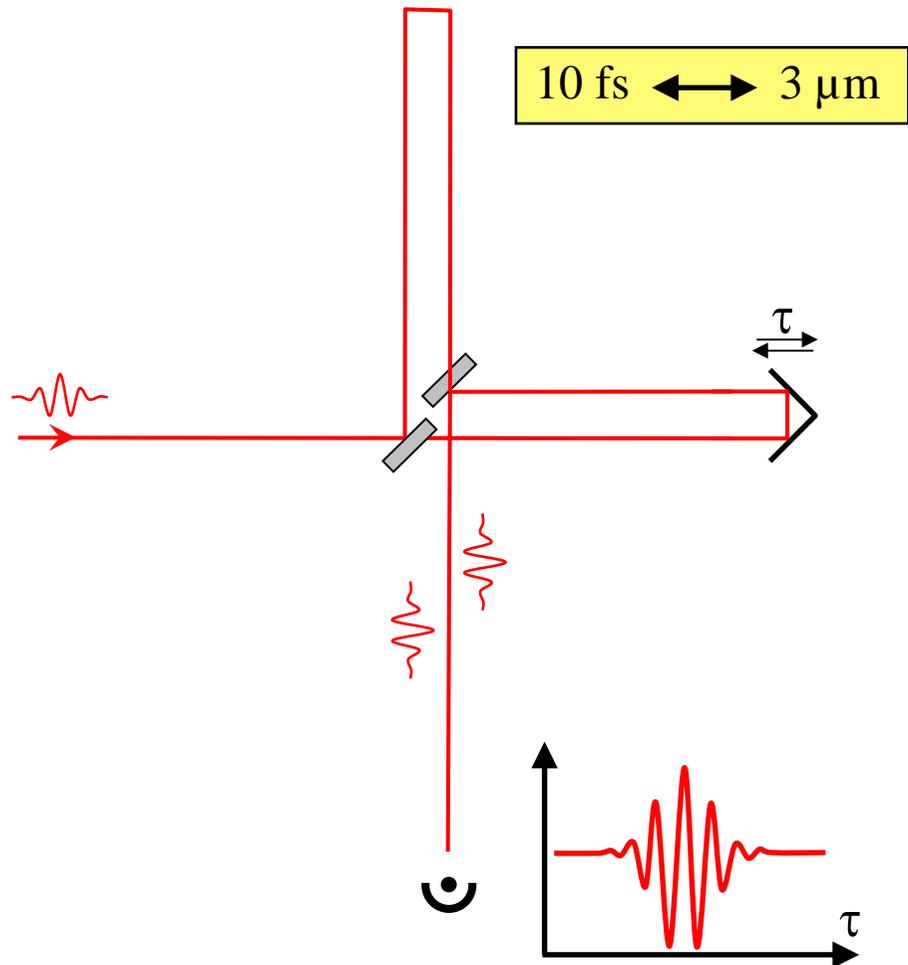
Caractérisation d'une impulsion à l'aide d'un spectromètre



Un réseau de diffraction permet d'établir une correspondance entre composante spectrale et coordonnée spatiale, ce qui permet de mesurer le spectre $|E(\omega)|^2$ à l'aide d'une caméra CCD.

Il reste à mesurer la **phase spectrale** $\varphi(\omega)$ pour caractériser entièrement $E(\omega) = |E(\omega)| \exp(i\varphi(\omega))$.

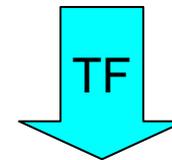
Caractérisation d'une impulsion à l'aide d'un interféromètre de Michelson



$$s(\tau) = \int (E(t) + E(t - \tau))^2 dt$$

$$= Cste + 2 \int E(t)E(t - \tau) dt$$

Autocorrélation du champ



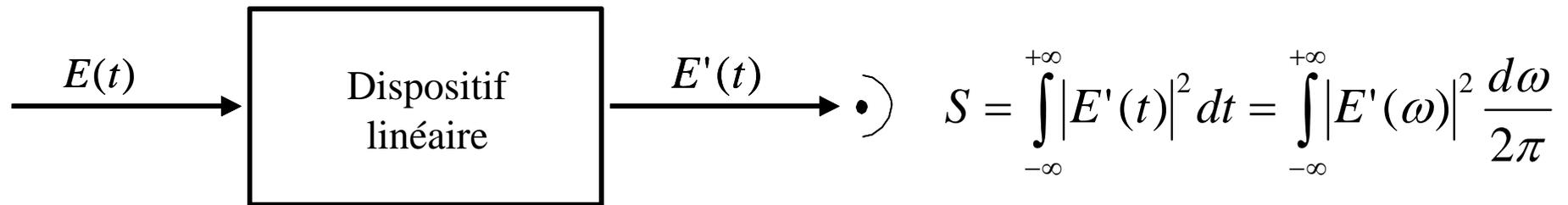
$$|E(\omega)|^2$$

L'autocorrélation du champ (ou autocorrélation du premier ordre) fournit l'**intensité spectrale** : c'est la spectroscopie par transformée de Fourier.

Mais on n'a aucune information sur la phase spectrale !

Ce n'est pas une mesure de durée.

Est-il possible de caractériser une impulsion isolée à l'aide d'un dispositif linéaire et stationnaire ?



Dispositif linéaire et stationnaire :

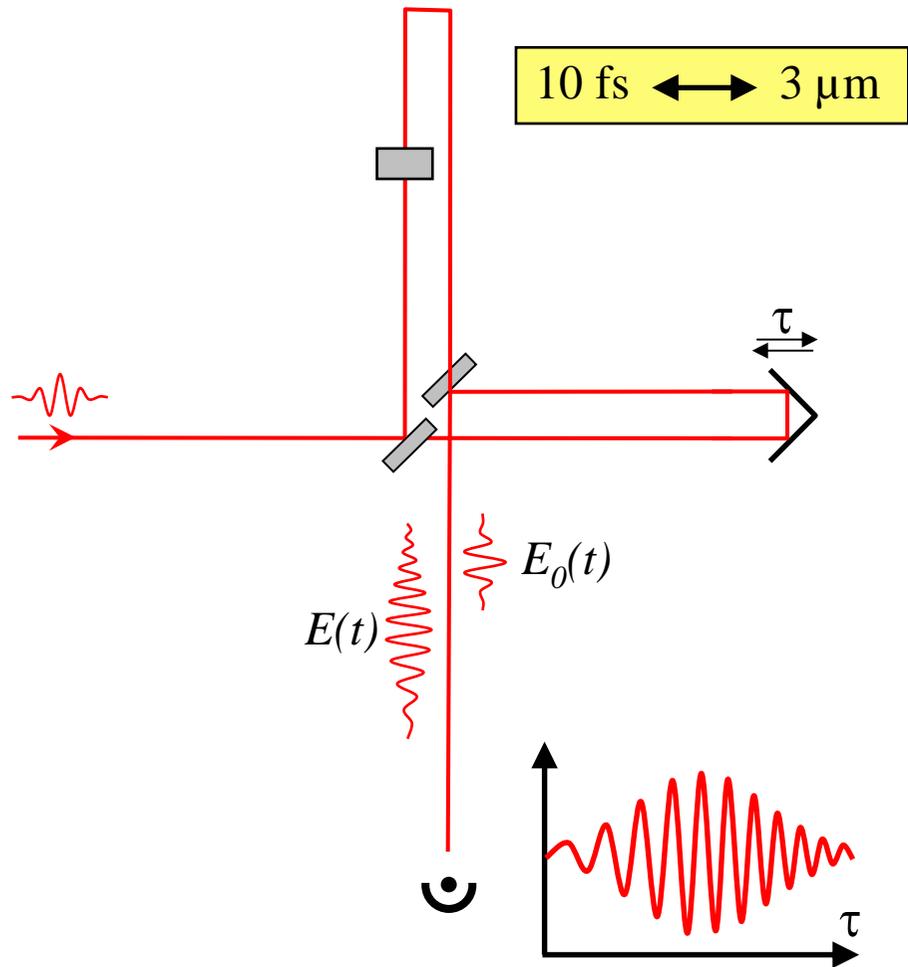
$$E'(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(t, t') E(t') dt' = \int_{-\infty}^{+\infty} R(t - t') E(t') dt' \quad \longrightarrow \quad E'(\omega) = R(\omega) E(\omega)$$

$$S = \int_{-\infty}^{+\infty} |R(\omega)|^2 |E(\omega)|^2 \frac{d\omega}{2\pi}$$

Réponse : NON !!

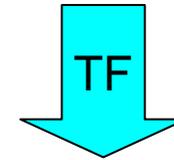
1. Introduction
- 2. Caractérisation avec référence (linéaire)
3. Caractérisation sans référence (non-linéaire)

Corrélation linéaire du premier ordre



$$s(\tau) = \int (E(t) + E_0(t - \tau))^2 dt$$
$$= Cste + 2 \int E(t) E_0(t - \tau) dt$$

Produit de corrélation

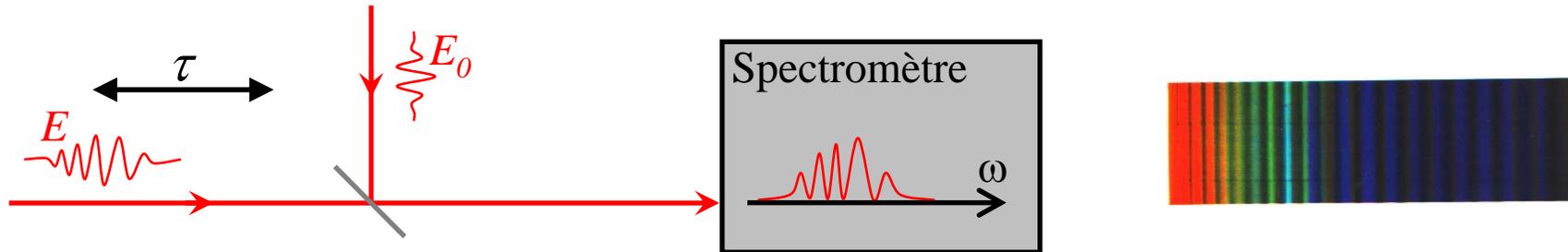


$$f(\omega) = \mathcal{E}_0^*(\omega) \mathcal{E}(\omega)$$

Si l'impulsion de référence est connue, on peut en déduire l'amplitude et la phase spectrale de l'impulsion inconnue.

Interférométrie spectrale

Analogie spectral de l'expérience des fentes d'Young



$$\begin{aligned} S(\omega) &= \left| \mathcal{E}_0(\omega) + \mathcal{E}(\omega)e^{i\omega\tau} \right|^2 \\ &= \left| \mathcal{E}_0(\omega) \right|^2 + \left| \mathcal{E}(\omega)e^{i\omega\tau} \right|^2 + \boxed{\mathcal{E}_0^*(\omega)\mathcal{E}(\omega)}e^{i\omega\tau} + \mathcal{E}^*(\omega)\mathcal{E}_0(\omega)e^{-i\omega\tau} \\ &= \left| \mathcal{E}_0(\omega) \right|^2 + \left| \mathcal{E}(\omega)e^{i\omega\tau} \right|^2 + f(\omega)e^{i\omega\tau} + f^*(\omega)e^{-i\omega\tau} \end{aligned}$$

$$f(\omega) = \mathcal{E}_0^*(\omega)\mathcal{E}(\omega) \quad \rightarrow \quad f(t) = \mathcal{E}_0^*(-t) \otimes \mathcal{E}(t) \quad \text{Produit de corrélation}$$

C. Froehly et al., *Nouv. Rev. Optique* (1973)

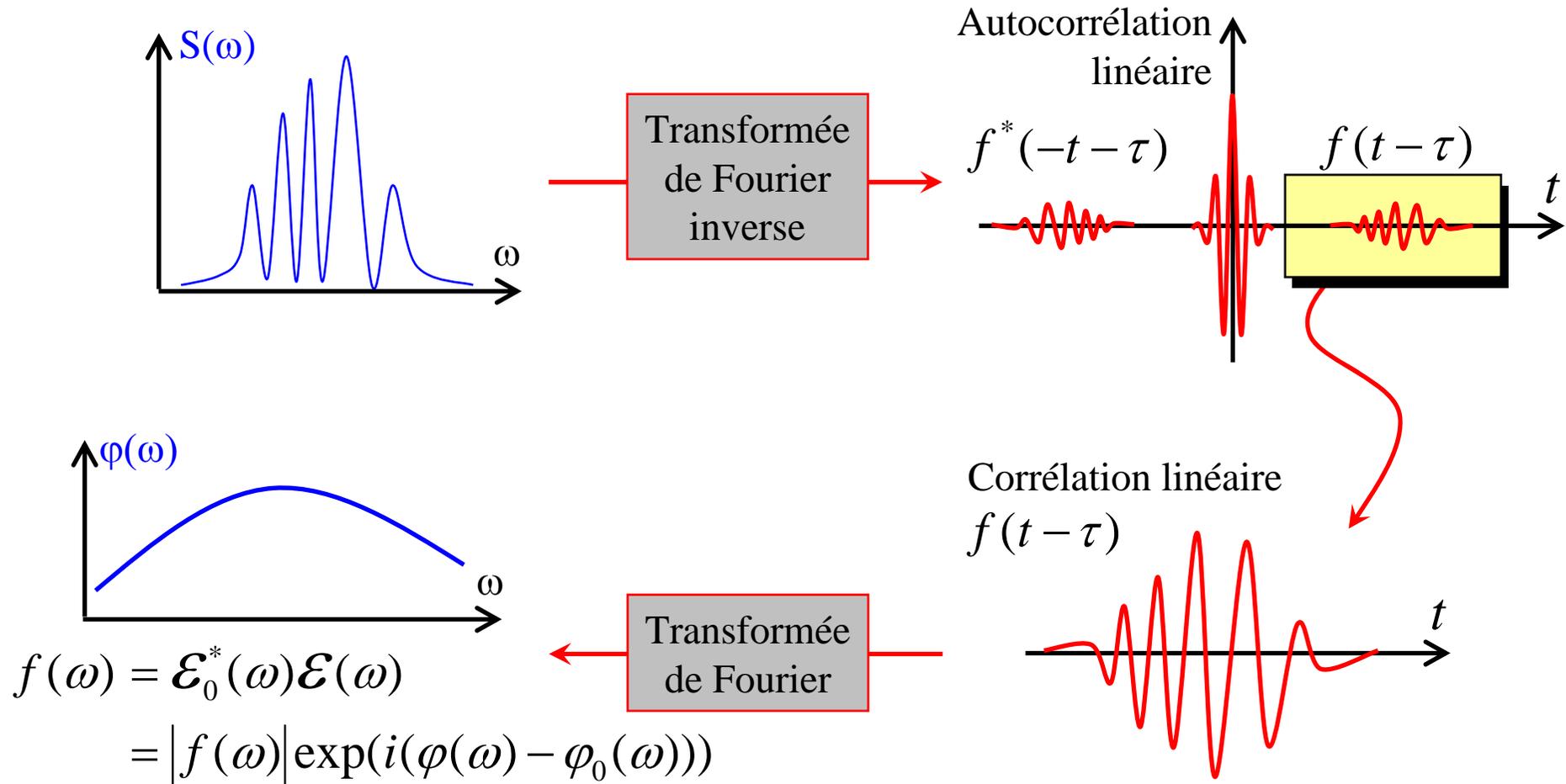
F. Reynaud et al., *Opt. Lett.* **14**, 275 (1989)

E. Tokunaga et al., *Opt. Lett.* **18**, 370 (1993)

J.-P. Geindre et al., *Opt. Lett.* **19**, 1997 (1994)

A. P. Kovacs et al., *Opt. Lett.* **20**, 788 (1995)

Interférométrie spectrale par transformée de Fourier



Domaine spectral : L. Lepetit, G. Chériaux, M. Joffre, J. Opt. Soc. Am. B **12**, 2467 (1995)

C. Dorrer, N. Belabas, J.P. Likforman, M. Joffre, J. Opt. Soc. Am. B **17**, 1795 (2000)

Domaine spatial : M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi, J. Opt. Soc. Am. **72**, 156 (1982)

Interférométrie spectrale par transformée de Fourier

$$f(\omega) = \mathcal{E}_0^*(\omega)\mathcal{E}(\omega) = |f(\omega)|\exp(i(\varphi(\omega) - \varphi_0(\omega)))$$

- ✓ Méthode sensible car **linéaire**.
- ✓ Monocoup car reposant sur une mesure de spectre.
- ✓ Permet de mesurer la **dispersion** d'un élément optique linéaire en utilisant le faisceau avant dispersion comme référence.
- ✓ Permet de mesurer une impulsion inconnue à condition de disposer d'une impulsion de référence parfaitement caractérisée dont le spectre recouvre celui de l'impulsion inconnue.

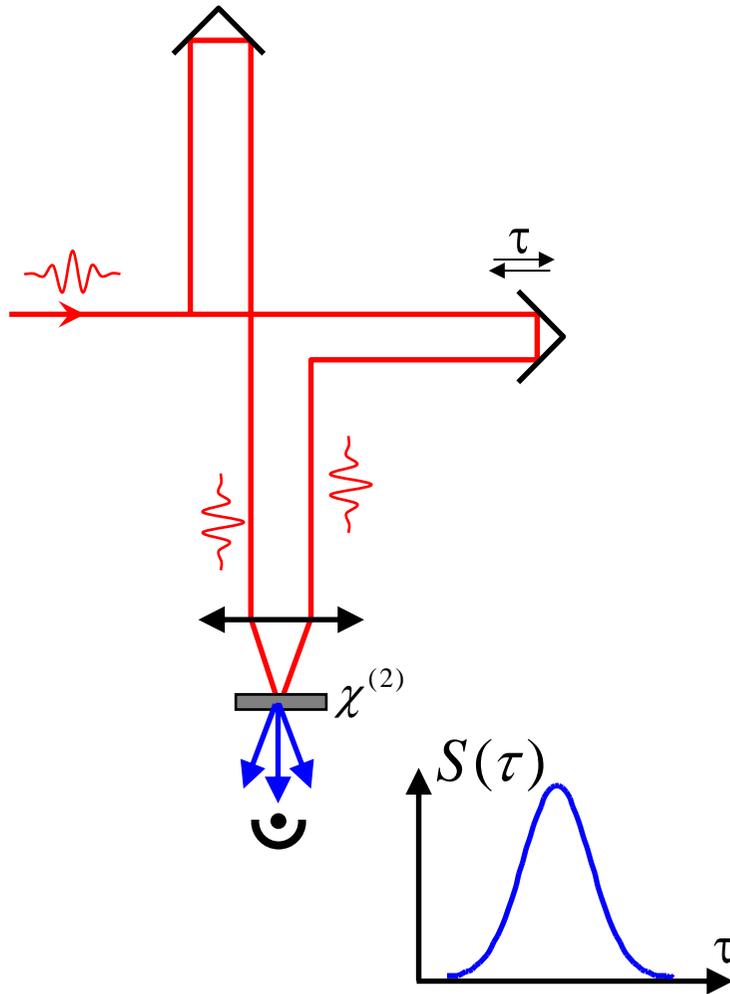
L. Lepetit, G. Chériaux, M. Joffre, J. Opt. Soc. Am. B **12**, 2467 (1995)

C. Dorrer, N. Belabas, J.P. Likforman, M. Joffre, J. Opt. Soc. Am. B **17**, 1795 (2000)

1. Introduction
2. Caractérisation avec référence (linéaire)
- 3. Caractérisation sans référence (non-linéaire)
 - 3.1 Autocorrélation de l'intensité
 - 3.2 Méthodes spectrographiques
 - 3.3 Méthodes interférométriques

Caractérisation d'une impulsion isolée

L'autocorrélation intensimétrique : une méthode non-linéaire stationnaire



$$P^{(2)}(t) = \chi^{(2)} E(t) E(t - \tau)$$

$$S(\tau) \propto \int_{-\infty}^{+\infty} |P^{(2)}(t)|^2 dt \propto \int_{-\infty}^{+\infty} I(t) I(t - \tau) dt$$

Autocorrélation de l'intensité

Si la forme de l'impulsion est déjà connue, sa durée à mi-hauteur peut être déduite de la largeur de l'autocorrélation.

Gaussienne : facteur **1.414**

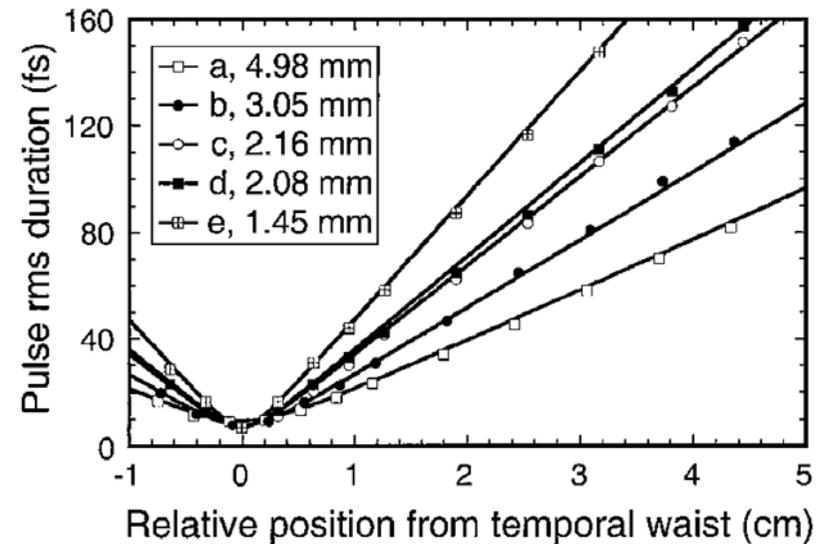
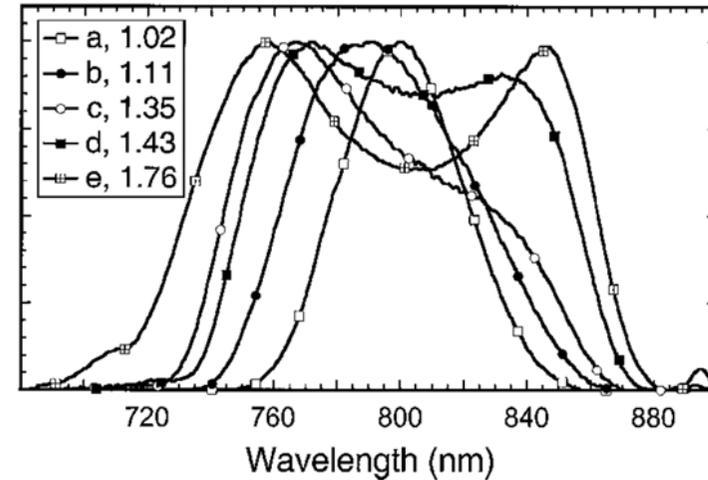
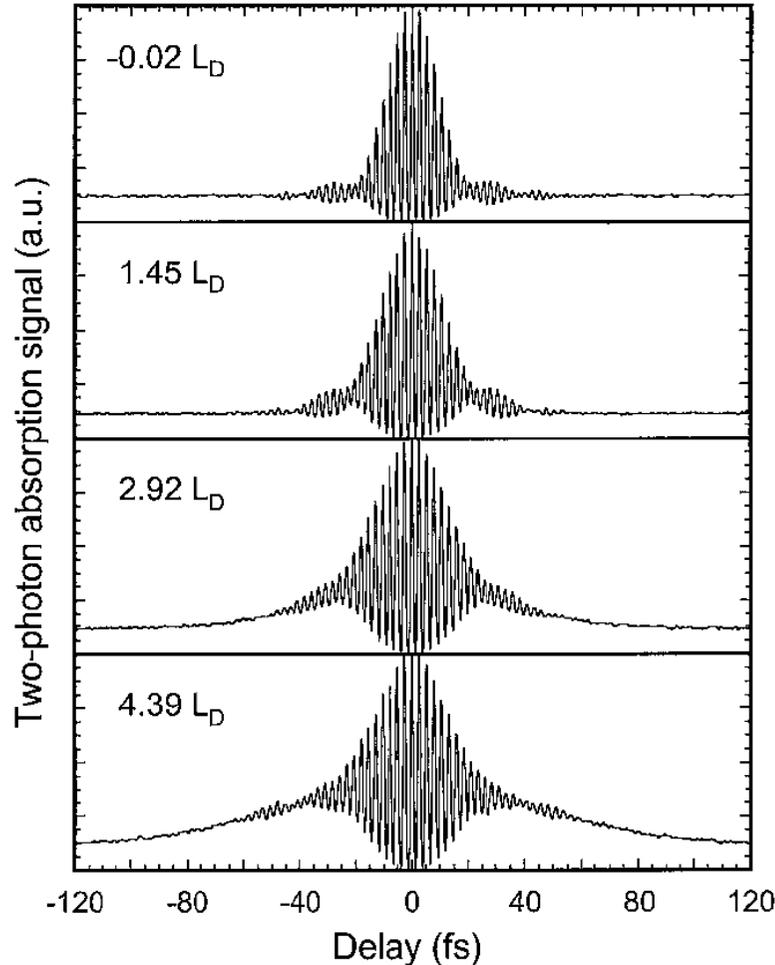
Sécante hyperbolique carrée : facteur **1.55**

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \tau^2 S(\tau) d\tau = \iint (t - t')^2 I(t) I(t') dt dt' = 2\Delta t^2$$

L'autocorrélation permet de déterminer la durée RMS d'une impulsion sans hypothèse préalable sur sa forme temporelle.

Mesure de la durée RMS d'une impulsion

Facteur de qualité d'une impulsion : $2\Delta t\Delta\omega$

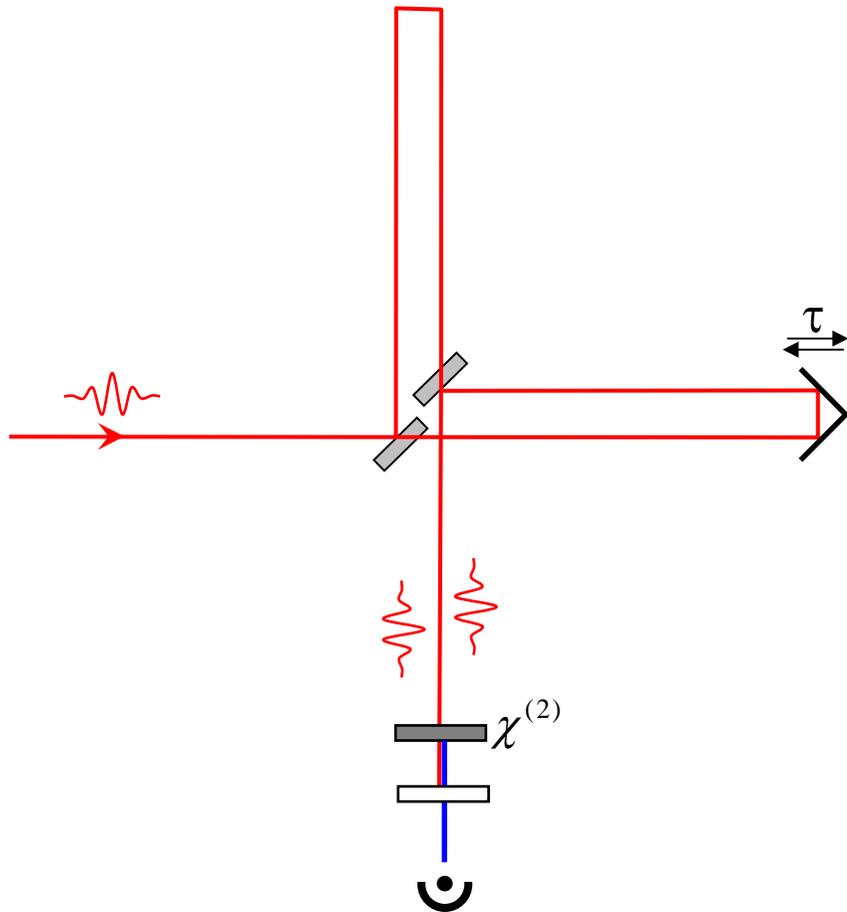


G. Rousseau, N. McCarthy, M. Piché

Description of pulse propagation in a dispersive medium by use of a pulse quality factor

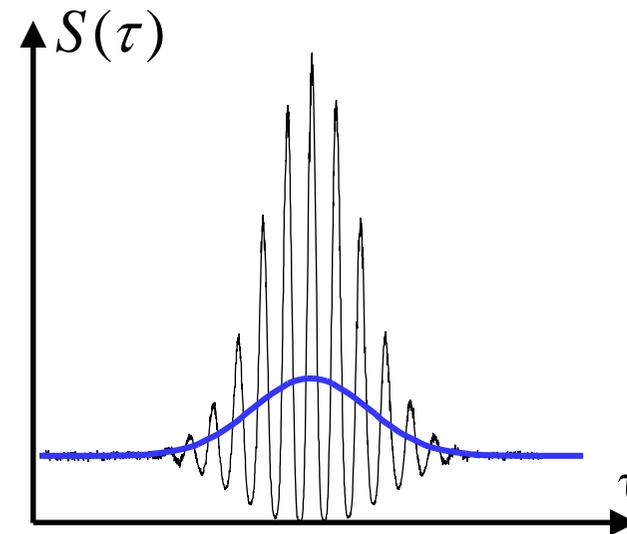
Opt. Lett. **27**, 1649 (2002)

Autocorrélation interférométrique du second ordre



$$P^{(2)}(t) = \chi^{(2)}(E(t) + E(t - \tau))^2$$

$$S(\tau) = \int (E(t) + E(t - \tau))^4 dt$$

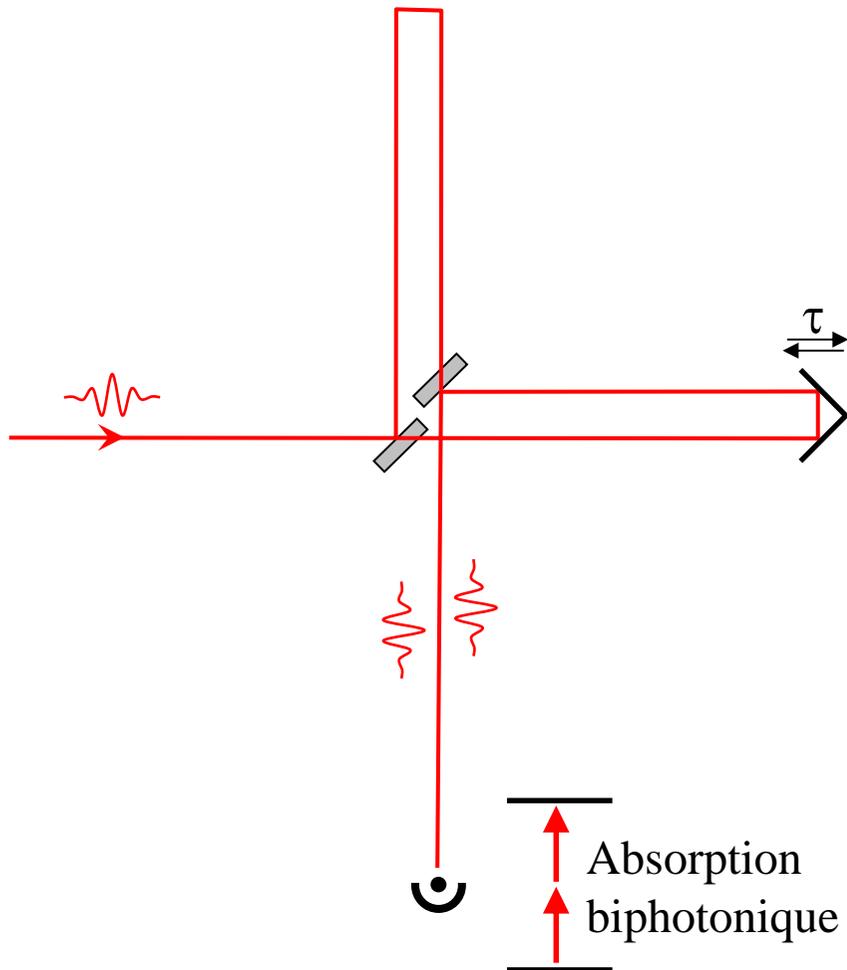


K. Naganuma, K. Mogi, H. Yamada

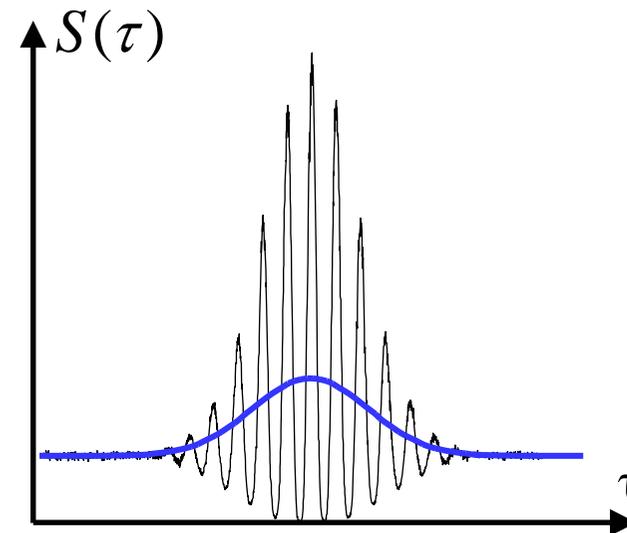
General method for ultrashort light-pulse chirp measurement

IEEE J. Quant. Electr. **25**, 1225-1233 (1989)

Utilisation d'un photodétecteur non-linéaire



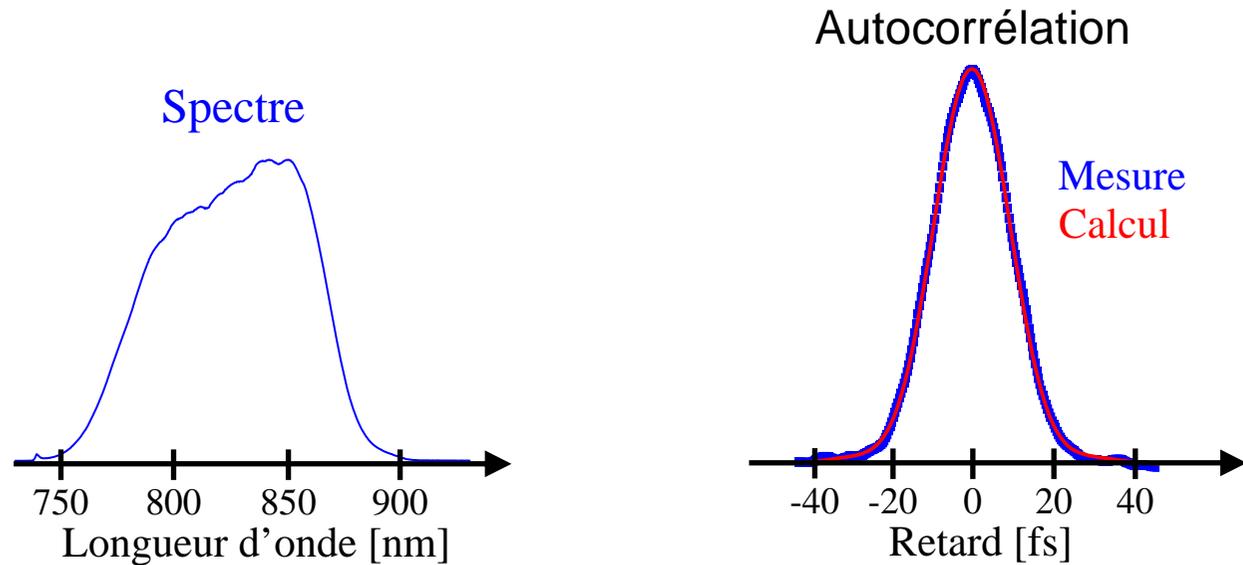
$$S(\tau) = \int (E(t) + E(t - \tau))^4 dt$$



D.T. Reid et al., Opt. Lett. 22, 233 (1997) ; W. Rudolph et al., Opt. Lett. 22, 313 (1997)
J.K. Ranka et al., Opt. Lett. 22, 1344 (1997)

Caractérisation complète d'une impulsion limitée par transformée de Fourier par transformée de Fourier

Impulsion limitée par transformée de Fourier de durée à mi-hauteur égale à 16 fs



Le bon accord entre l'autocorrélation mesurée et l'autocorrélation calculée à partir du spectre mesuré (en supposant une phase nulle) indique que $\Delta t^2 = \Delta t_{\varphi=0}^2$.

Or, de manière générale, $\Delta t^2 = \Delta t_{\varphi=0}^2 + \Delta \tau_g^2$.

On en déduit que $\Delta \tau_g = 0$.

→ La phase spectrale varie donc linéairement avec la fréquence.

Caractérisation complète d'une impulsion qui n'est pas limitée par transformée de Fourier

Théorème :

Le champ électrique $\mathcal{E}(t)$ associé à une impulsion brève est entièrement déterminé par la connaissance simultanée des grandeurs suivantes :

- ✓ Spectre de l'impulsion
- ✓ Spectre de l'impulsion doublée
- ✓ Autocorrélation intensimétrique

Ou encore :

- ✓ Autocorrélation du premier ordre (transformée de Fourier du spectre)
- ✓ Autocorrélation interférométrique du second ordre

(à l'ambiguïté du temps près, $\mathcal{E}(t)$ et $\mathcal{E}(-t)$ donnant le même résultat)

Problème : comment parvenir à cette solution unique ?

K. Naganuma, K. Mogi, H. Yamada
General method for ultrashort light-pulse chirp measurement
IEEE J. Quant. Electr. **25**, 1225-1233 (1989)

Caractérisation complète d'une impulsion qui n'est pas limitée par transformée de Fourier

On pourra s'inspirer des méthodes de mesure de la phase spatiale $\varphi(x,y)$, mais :

Domaine spatial : $|E(x,y,z)|^2$ peut être aisément mesuré pour différentes valeurs de z , i.e. à la fois dans l'espace direct et dans l'espace de Fourier.

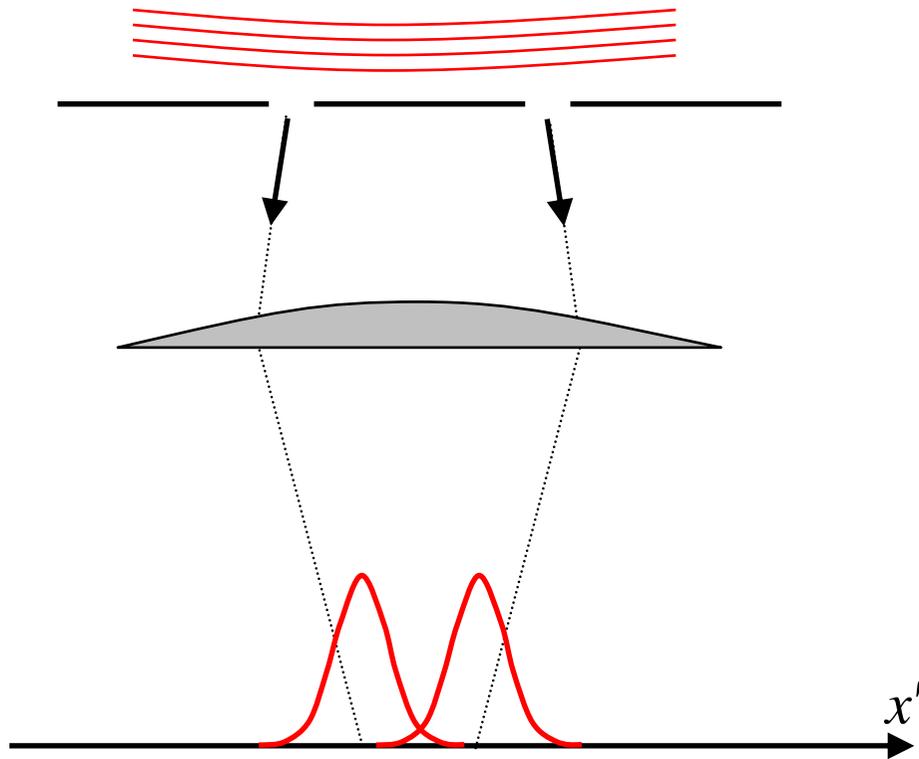
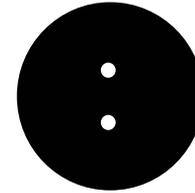
Domaine spectro-temporel : $|E(\omega)|^2$ peut être aisément mesuré, mais pas $|E(t)|^2$.

→ La caractérisation d'une impulsion ultracourte exige des méthodes spécifiques.

- ✓ Approche tomographique
- ✓ Approche spectrographique (FROG)
- ✓ Approche interférométrique (SPIDER)

3.2 Méthodes spectrographiques

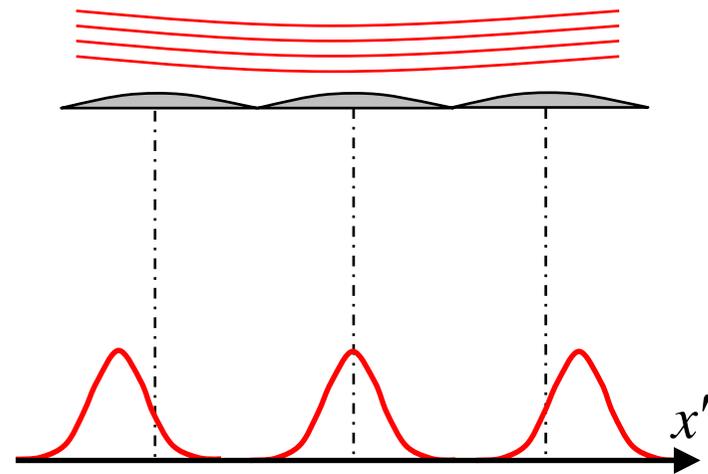
Du disque de Scheiner au Hartmann-Shack



Christoph Scheiner (1619)

Hartmann (1900)

Shack and Platt (1971) → Hartmann-Schack

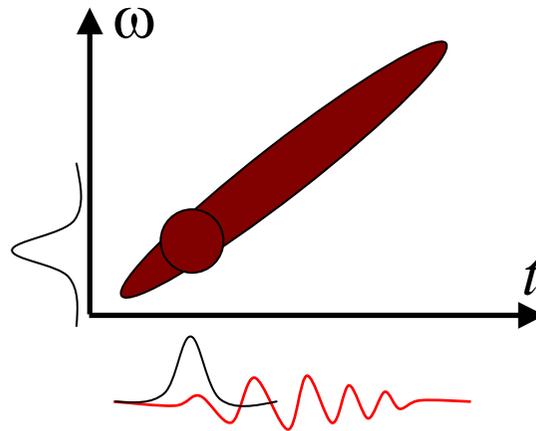


→ $d\phi/dx$

Méthodes spectrographiques

Méthodes de mesure de la phase spectrale inspirées de la méthode de Hartmann pour la phase spatiale

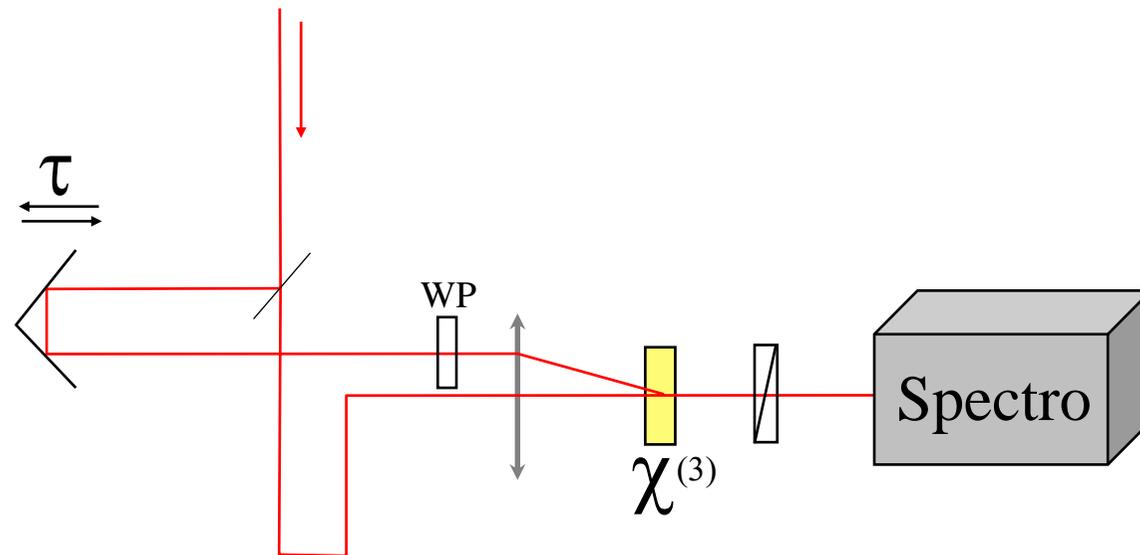
$$S(t, \omega) = \left| \int E(t') g(t'-t) \exp(i\omega t') dt' \right|^2$$



Exemple : Frequency Resolved Optical Gating

Frequency-resolved optical gating (FROG)

✓ Polarization-gating FROG



$$S(\tau, \omega) = \left| \int E(t) |E(t - \tau)|^2 \exp(i\omega t) dt \right|^2 \xrightarrow{\text{Algorithme itératif}} \varphi(\omega)$$

R. Trebino, D.J. Kane

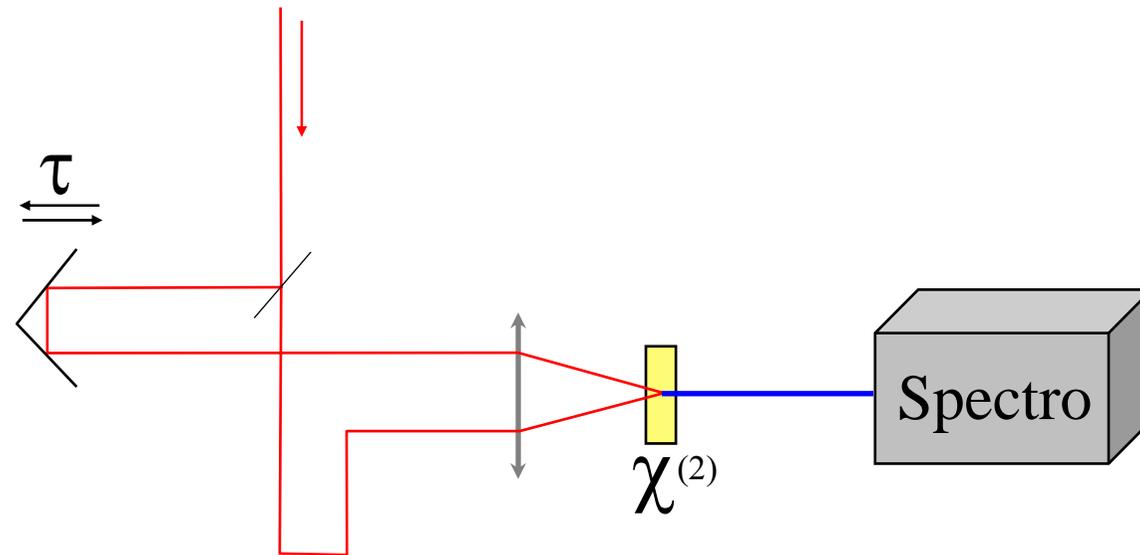
Using phase retrieval to measure the intensity and phase of ultrashort pulses - frequency-resolved optical gating

J. Opt. Soc. Am. A 10, 1101-1111 (1993)

R. Trebino *et al.*, Rev. Sci. Instr. **68**, 3277-3295 (1997)

Frequency-resolved optical gating (FROG)

✓ SHG FROG (second harmonic generation)



$$S(\tau, \omega) = \left| \int E(t)E(t - \tau) \exp(i\omega t) dt \right|^2 \xrightarrow{\text{Algorithme itératif}} \varphi(\omega)$$

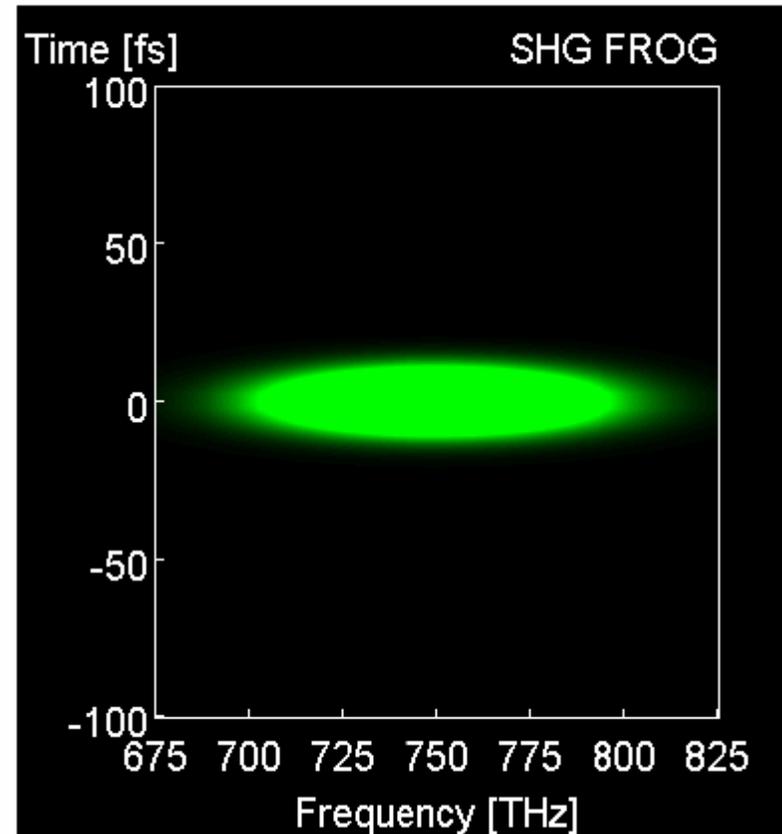
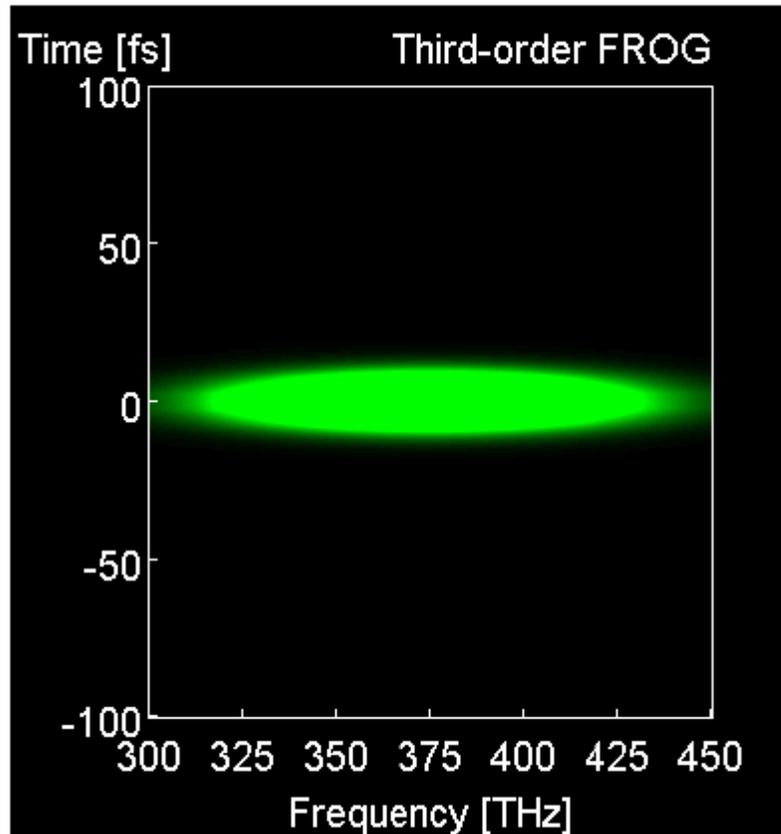
J. Paye, M. Ramaswamy, J.G. Fujimoto, E.P. Ippen

Measurement of the amplitude and phase of ultrashort light-pulses from spectrally resolved autocorrelation
Opt. Lett. **18**, 1946 (1993)

R. Trebino *et al.*, Rev. Sci. Instr. **68**, 3277-3295 (1997)

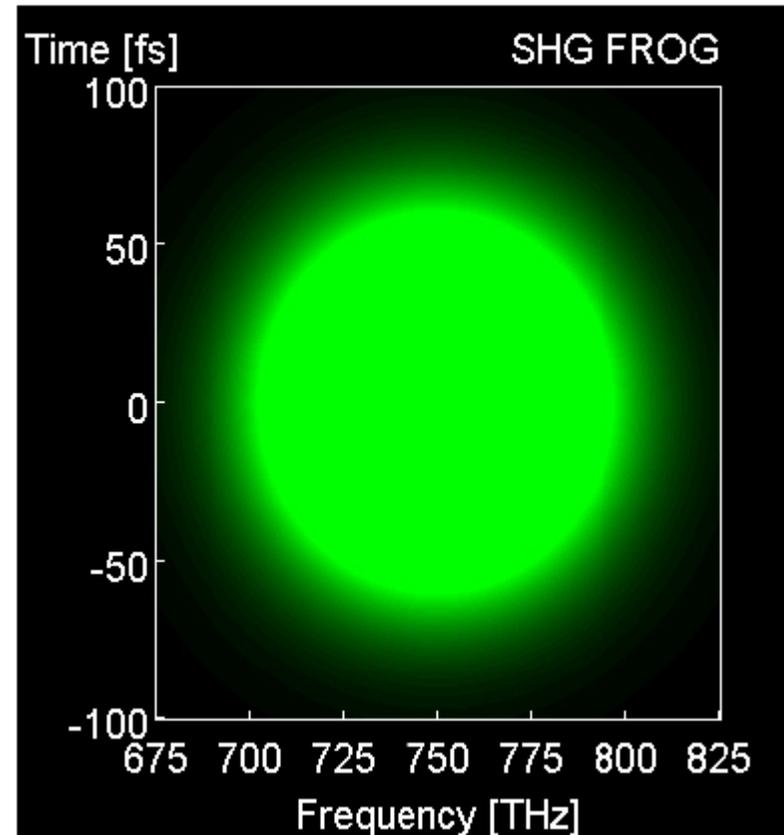
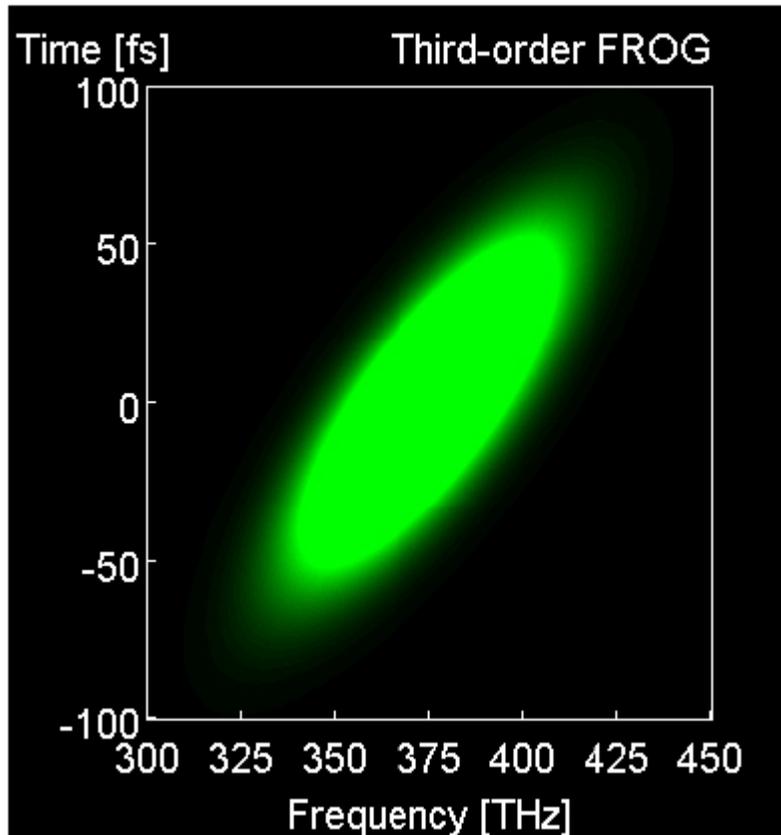
Quelques exemples de traces FROG

Impulsion limitée par transformée de Fourier de durée 10 fs.



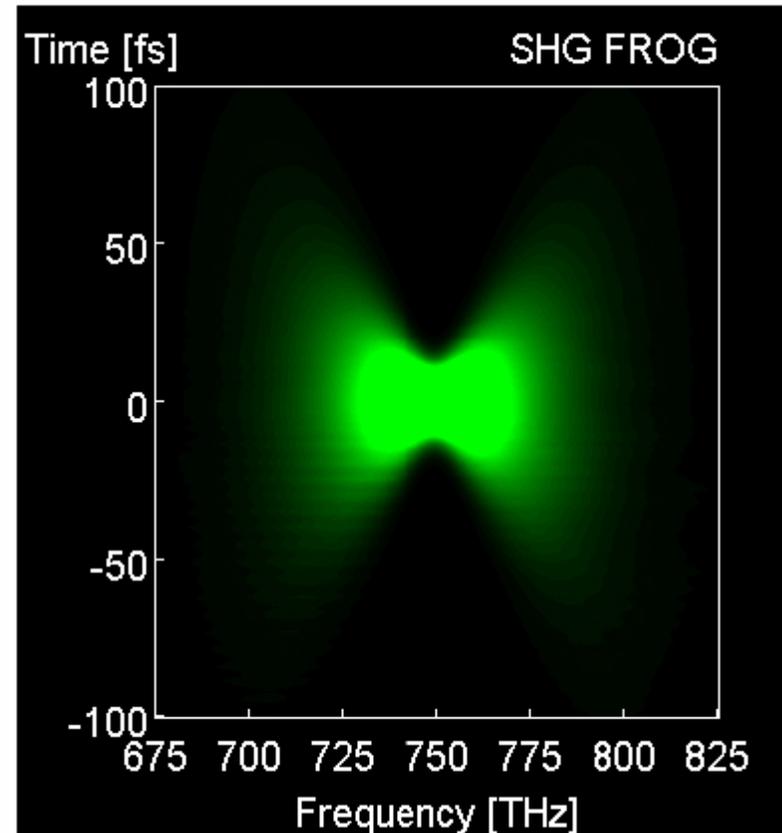
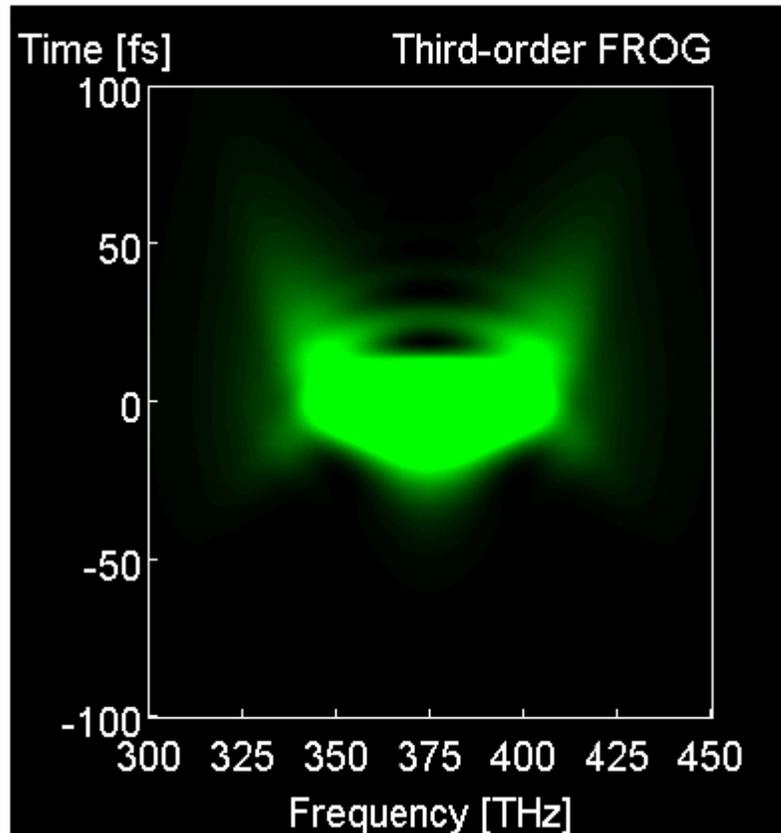
Quelques exemples de traces FROG

Impulsion présentant une phase spectrale quadratique $\varphi^{(2)} = 200 \text{ fs}^2$.



Quelques exemples de traces FROG

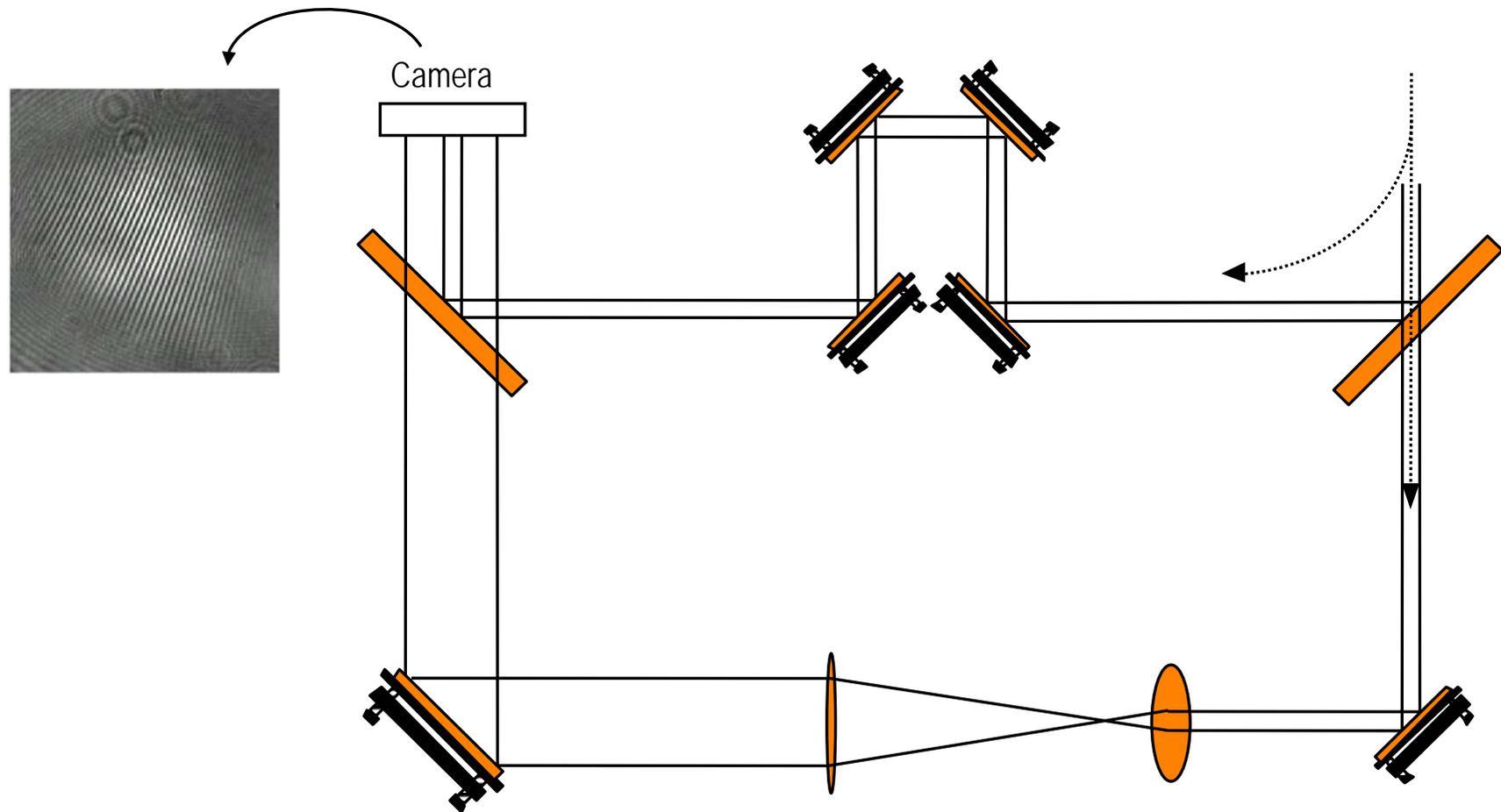
Impulsion présentant une phase spectrale cubique $\varphi^{(3)} = 2000 \text{ fs}^3$.



3.3 Méthodes interférométriques

non itératives !

Mesure interférométrique de la phase spatiale

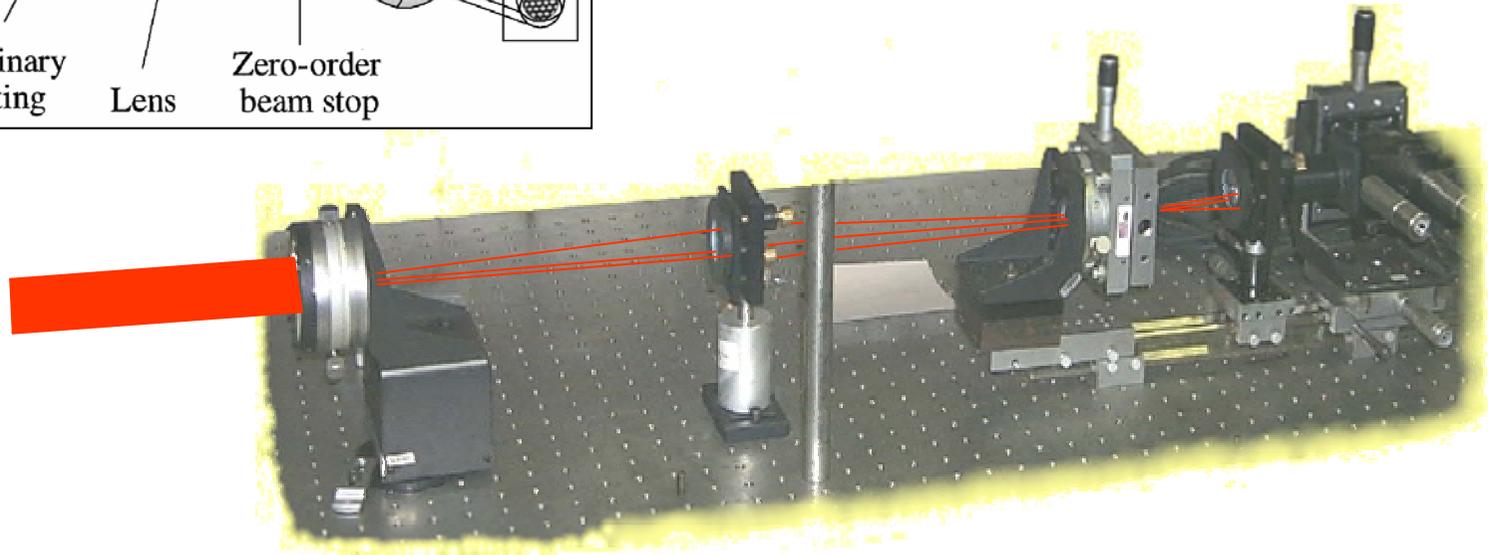
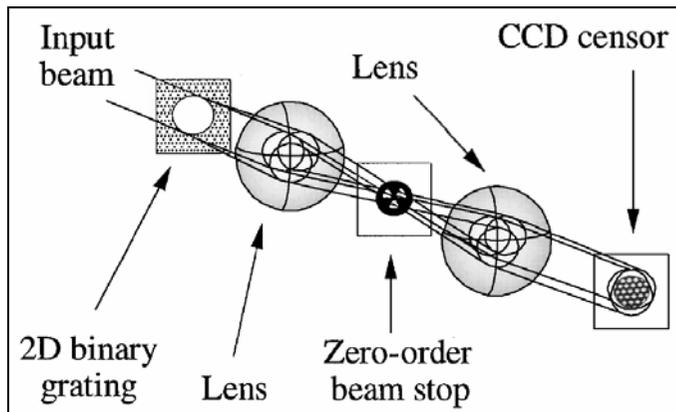


M. Takeda, H. Ina et S. Kobayashi, *J. Opt. Soc. Am.* **72**, 156 (1982)

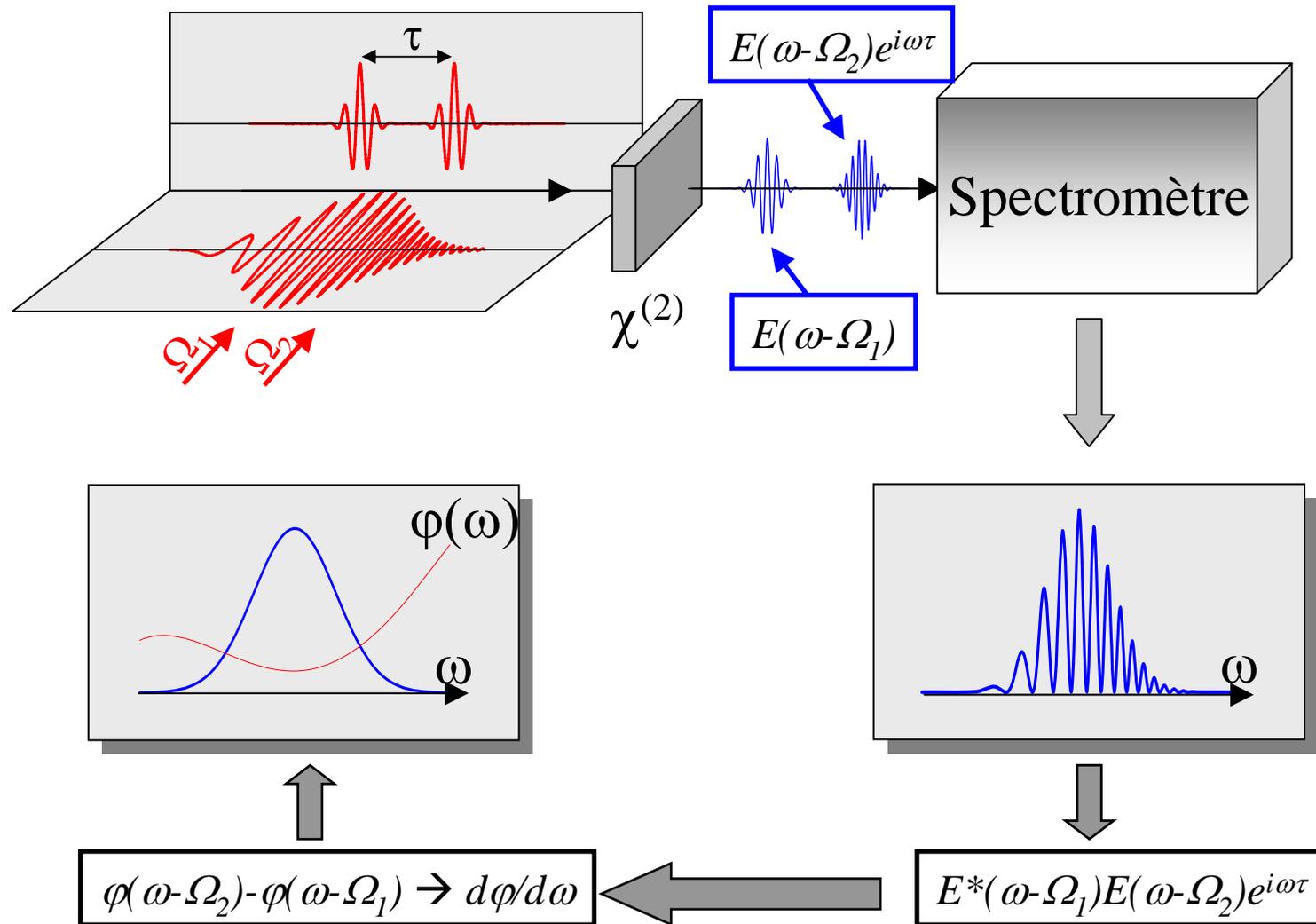
J.-C. Chanteloup, *Contrôle et mise en forme des fronts de phase et d'énergie*, PhD thesis

<http://tel.ccsd.cnrs.fr/documents/archives0/00/00/31/40/>

Mesure de phase spatiale par interférométrie à décalage

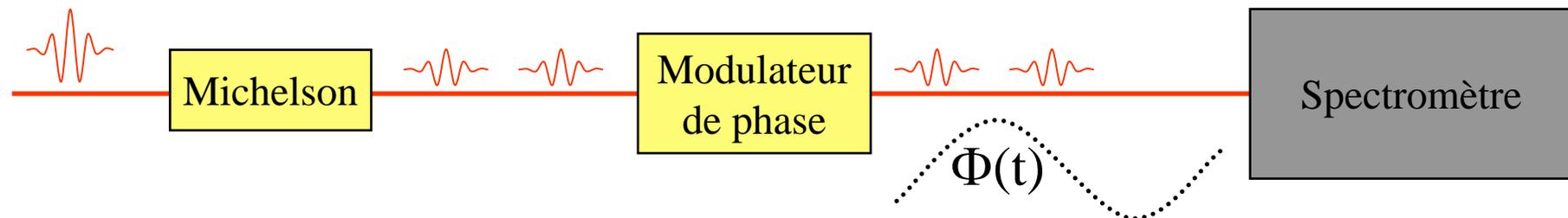


Interférométrie spectrale à décalage (SPIDER)

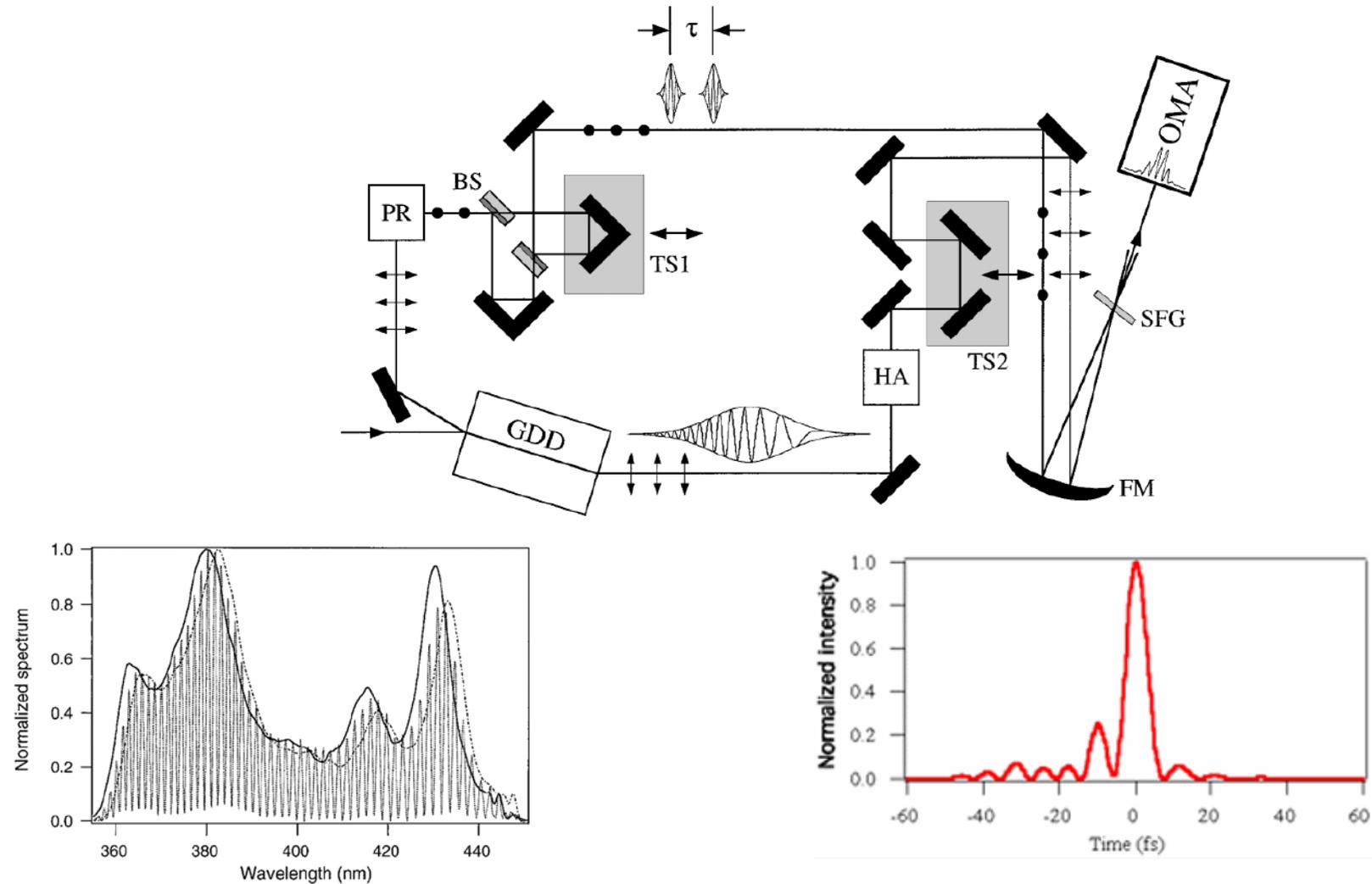


SPIDER : thème et variations

Version originale	Iaconis & Walmsley, Opt. Lett. ('98)	
HOT SPIDER	Dorrer et al., Opt. Lett. ('01)	Détection homodyne
M-spider	Hirasawa et al., APB ('02)	Impulsion étirée externe
ZAP SPIDER	Baum et al., Opt. Lett. ('04)	Zero additional phase
IR ZAP SPIDER	Kubarych et al., Opt. Lett. ('04)	Infrarouge moyen (5 μm)
SEA SPIDER	Kosik et al., Opt. Lett. ('05)	Spatial encoding
Time-domain HOT SPIDER	Monmayrant et al., Opt. Lett. ('03) Ventalon et al., Opt. Lett. ('03)	Absence de spectromètre
Electro-optic SPIDER	Dorrer & Kang, Opt. Lett. ('03)	Linéaire et non stationnaire



SPIDER : mesure d'une impulsion de 6 fs



L. Gallmann, D.H. Sutter, N. Matuschek, G. Steinmeyer, U. Keller, C. Iaconis, I.A. Walmsley
Characterization of sub-6-fs optical pulses with spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction
Opt. Lett. **24**, 1314 (1999)

Conclusion

- Le champ électrique associé à une impulsion ultracourte est entièrement déterminé par son spectre $|E(\omega)|^2$, accessible à l'aide d'un spectromètre, et sa phase spectrale $\varphi(\omega)$.
- Lorsqu'une impulsion de référence de spectre approprié est disponible, la phase spectrale peut être mesurée par des méthodes linéaires, qui sont les plus sensibles. L'interférométrie spectrale par transformée de Fourier permet d'effectuer une telle mesure à l'aide d'un unique tir laser.
- L'autocorrélation interférométrique du second ordre permet de déterminer la durée RMS d'une impulsion. Associée à une mesure du spectre, il est possible d'en déduire exactement la forme temporelle d'une impulsion lorsqu'elle est limitée par transformée de Fourier.
- Les méthodes FROG et SPIDER permettent de déterminer la phase spectrale d'une impulsion de forme temporelle arbitraire.