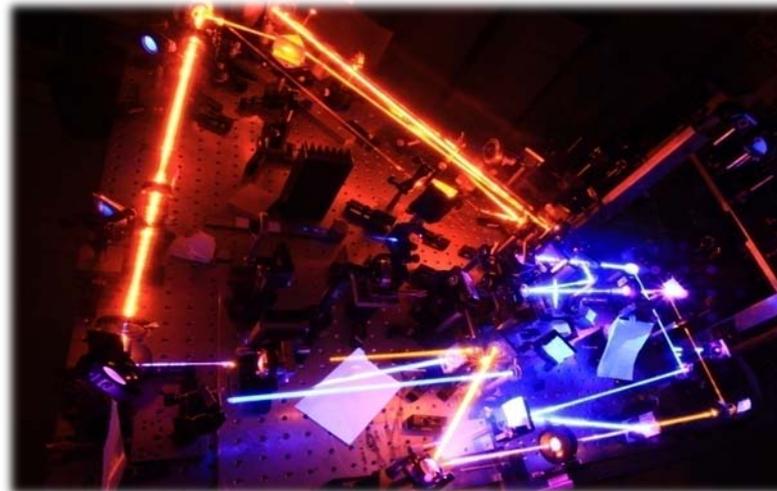


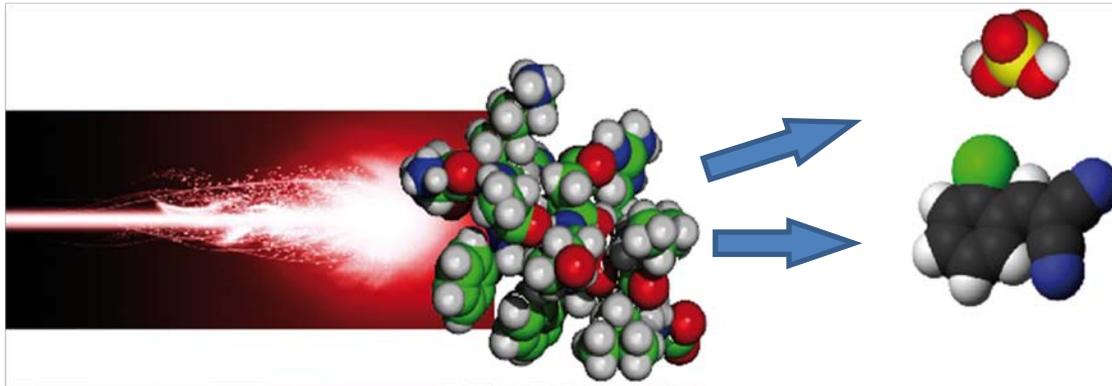
Façonnage d'impulsions dans l'UV Contrôle cohérent



Sébastien Weber



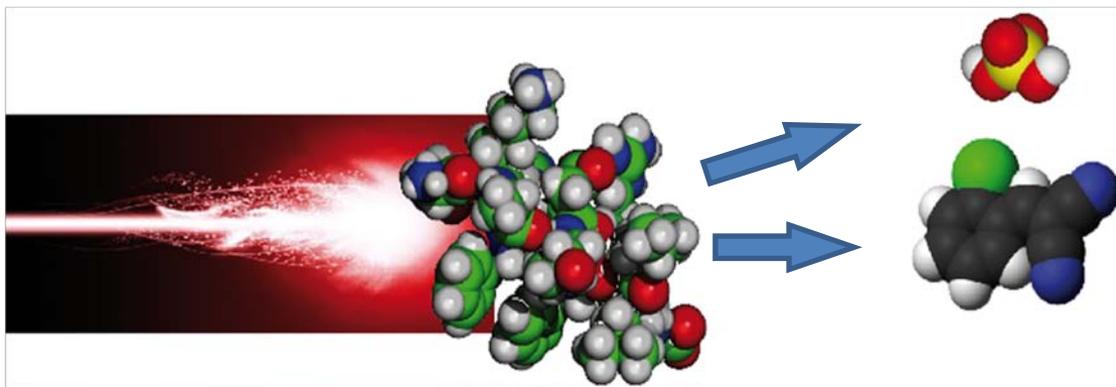
Le contrôle cohérent



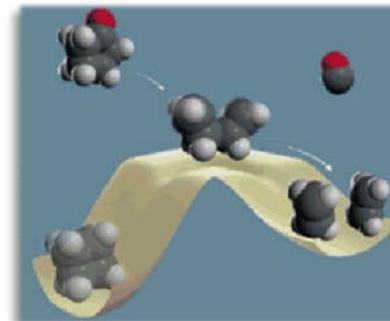
- Proposé dans les années 80 pour contrôler les produits d'une réaction chimique en utilisant les propriétés de cohérence de la lumière.
- 2 possibilités :
 - ❑ Modifier les surfaces de potentiel : Stolow *et al.* Science **314**, 278 (2006)
 - ❑ Modifier les paramètres de l'impulsion : énergie, longueur d'onde, phase spectrale...



Le contrôle cohérent



- Proposé dans les années 80 pour contrôler les produits d'une réaction chimique en utilisant les propriétés de cohérence de la lumière.
- 2 possibilités :
 - ❑ Modifier les surfaces de potentiel : *Stolow et al. Science 314, 278 (2006)*
 - ❑ Modifier les paramètres de l'impulsion : énergie, longueur d'onde, phase spectrale...





Contrôle en boucle ouverte

Sources laser

- Proche IR
- Visible (NOPA)
- UV (Mélanges)



(1)



Contrôle en boucle ouverte

Sources laser

- Proche IR
- Visible (NOPA)
- UV (Mélanges)



Façonneurs

- Ligne 4f+cristaux liquides
- AOPDF UV





Contrôle en boucle ouverte

Sources laser

- Proche IR
- Visible (NOPA)
- UV (Mélanges)



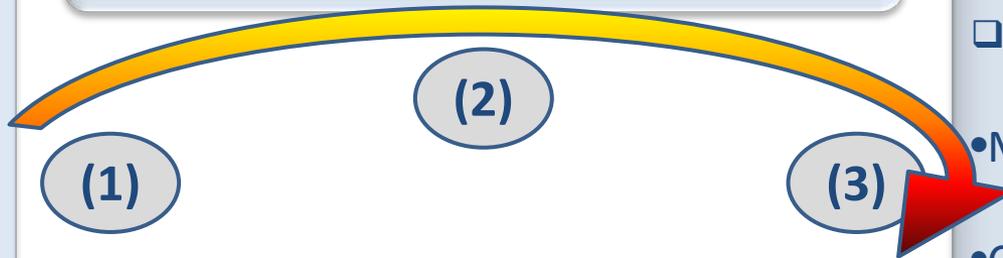
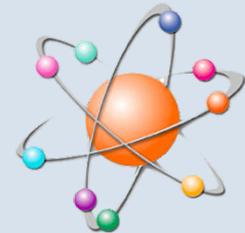
Façonneurs

- Ligne 4f+cristaux liquides
- AOPDF UV



Système

- Atomes (Rubidium)
 - Transitoires Cohérents
 - Spin Orbité
- Molécules froides
- Cristaux (factorisation)





Contrôle en boucle ouverte

Sources laser

- Proche IR
- Visible (NOPA)
- UV (Mélanges)



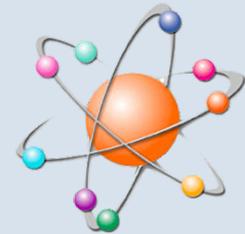
Façonneurs

- Ligne 4f+cristaux liquides
- AOPDF UV



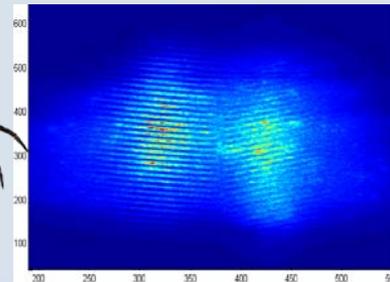
Système

- Atomes (Rubidium)
 - Transitoires Cohérents
 - Spin Orbité
- Molécules froides
- Cristaux (factorisation)



Mesure-analyse

- FROG 
- SPIDER 
- SSI
- Simulations



(1)

(2)

(3)

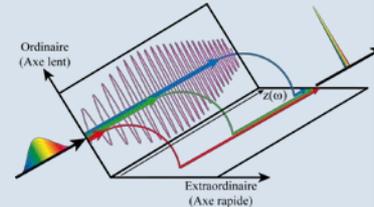
(4)

Plan de l'exposé

I. Introduction

II. **Façonnage dans l'ultraviolet**

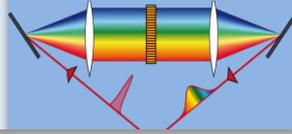
1. Etat de l'art
2. Filtre acousto-optique dispersif programmable
3. Résultats-Perspectives



III. Expérience Pompe-Sonde

IV. Factorisation de grands nombres

V. Conclusion



Etat de l'art

Ligne 4f

➤ Masque acousto-optique

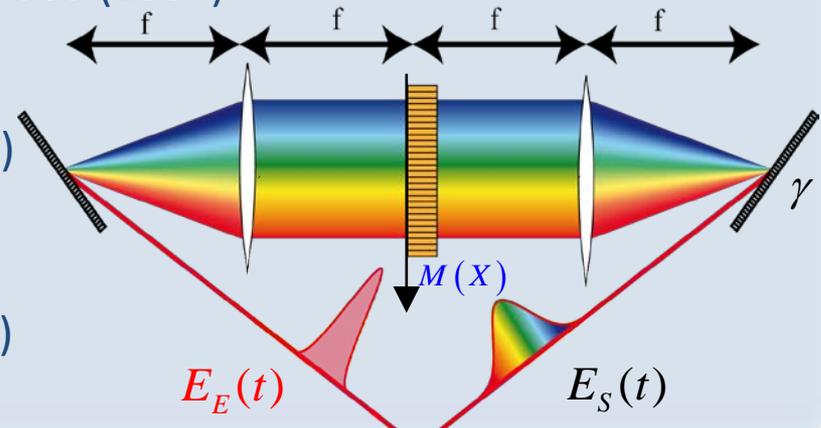
- ❑ M. Roth *et al.* Appl. Phys. B **80**, 441-444 (2005)
- ❑ B. J. Pearson *et al.* Optics Express **15**, 4385 (2007)

➤ MEMs (matrice de micromiroirs)

Hacker *et al.* Appl. Phys. B **76**, 711 (2003)

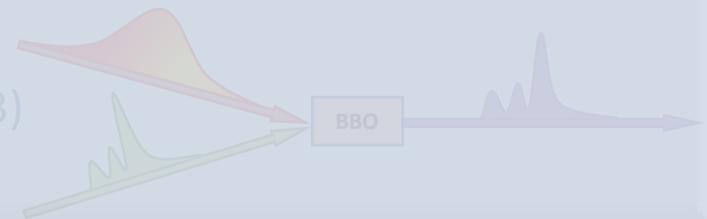
➤ Cristaux liquides

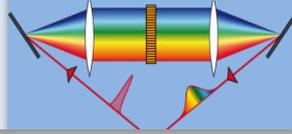
J. Zhu *et al.* Applied Optics **49** 350 (2010)



Transfert de phase

I. Z. Kozma *et al.* Opt. Express **11**, 3110 - 3115 (2003)





Etat de l'art

Ligne 4f

➤ Masque acousto-optique

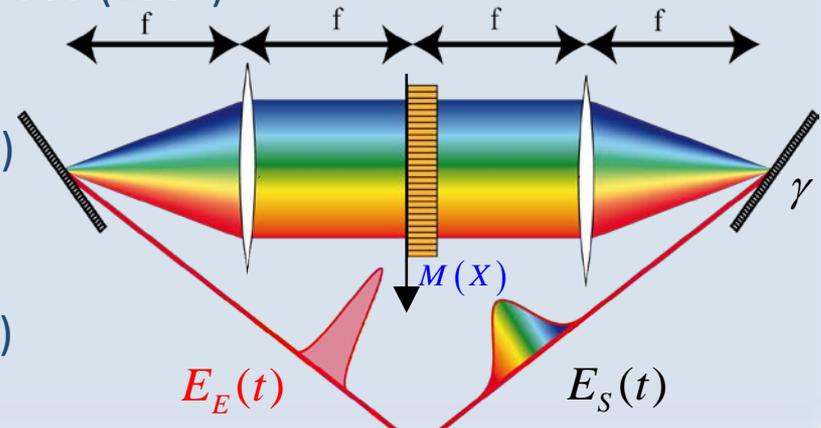
- ❑ M. Roth *et al.* Appl. Phys. B **80**, 441-444 (2005)
- ❑ B. J. Pearson *et al.* Optics Express **15**, 4385 (2007)

➤ MEMs (matrice de micromiroirs)

Hacker *et al.* Appl. Phys. B **76**, 711 (2003)

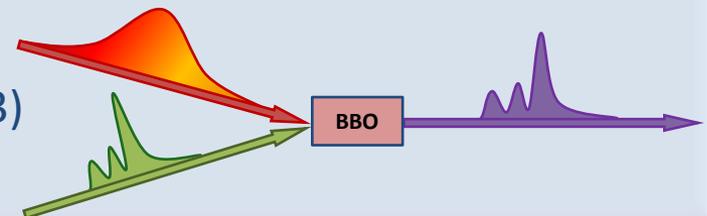
➤ Cristaux liquides

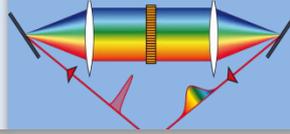
J. Zhu *et al.* Applied Optics **49** 350 (2010)



Transfert de phase

I. Z. Kozma *et al.* Opt. Express **11**, 3110 - 3115 (2003)





Filtre acousto-optique programmable: transfert de phase de l'acoustique à l'optique

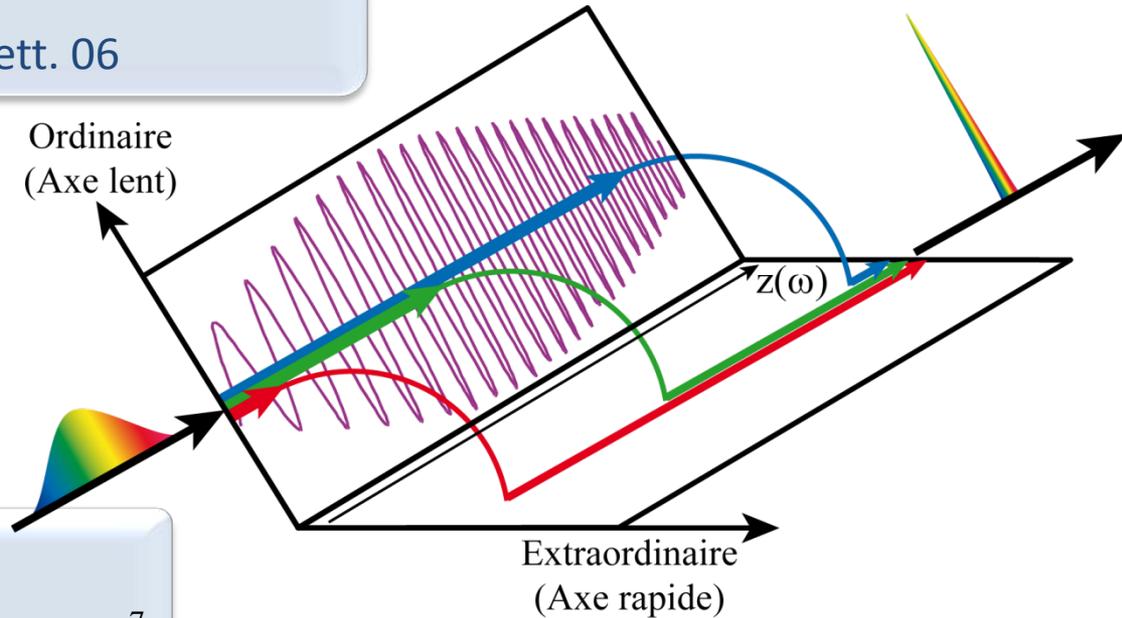
- **Le principe** : P. Tournois Opt. Comm 97
- **Dans l'IR** : F. Verluise *et al.* Opt. Lett. 00
- **Dans le visible** : A. Monmayrant *et al.* App.Phys.B 05
- **Dans l'UV** : S. Coudreau *et al.* Opt. Lett. 06

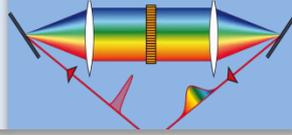
Le façonnage nécessite des polarisations orthogonales!

$$k_d(\omega_d) = K(\Omega) + k_i(\omega_i)$$

$$E_d(t) \propto E_i(t) \otimes S(t/\alpha) \quad \alpha = \frac{\Omega}{\omega_i} \approx 10^{-7}$$

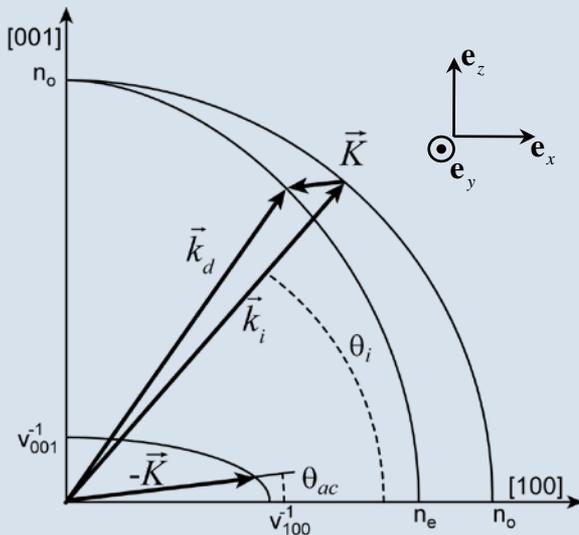
$$\tilde{E}_d(\omega) \propto \tilde{E}_i(\omega) \cdot \tilde{S}(\alpha\omega)$$





Interaction acousto-optique

Accord de phase



$$\vec{k}_d(\omega_d) = \mathbf{K}(\Omega) + \vec{k}_i(\omega_i)$$

$$\omega_d = \omega_i \pm \Omega \approx \omega_i$$

Acoustique et déformation

Onde acoustique $u = u_0 \mathbf{e}_y \cos(\Omega t - K_x x - K_z z)$

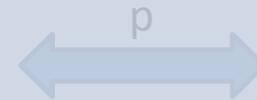
→ Déformation S selon xy et yz

$$S = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{yx} & S_{zx} \\ S_{xy} & S_{yy} & S_{zy} \\ S_{xz} & S_{yz} & S_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & S_6 & 0 \\ S_6 & 0 & S_4 \\ 0 & S_4 & 0 \end{pmatrix}$$

Déformation et optique

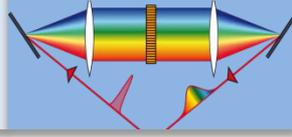
Tenseur photo-élastique

Variation de la permittivité $\Delta \varepsilon$



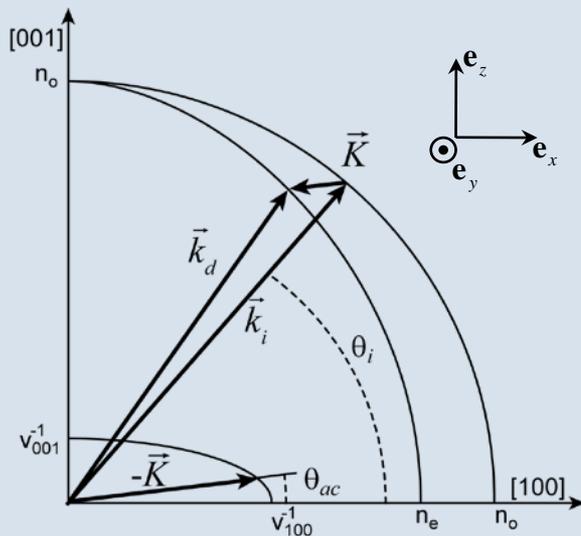
Déformation S

$$\Delta \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)_{ij} = P_{ijkl} S_{kl} \longleftrightarrow \Delta \varepsilon = \varepsilon (p : S) \varepsilon$$



Interaction acousto-optique

Accord de phase



$$\vec{k}_d(\omega_d) = \mathbf{K}(\Omega) + \vec{k}_i(\omega_i)$$

$$\omega_d = \omega_i \pm \Omega \approx \omega_i$$

Acoustique et déformation

Onde acoustique $\mathbf{u} = u_0 \mathbf{e}_y \cos(\Omega t - K_x x - K_z z)$

→ Déformation S selon xy et yz

$$S = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{yx} & S_{zx} \\ S_{xy} & S_{yy} & S_{zy} \\ S_{xz} & S_{yz} & S_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & S_6 & 0 \\ S_6 & 0 & S_4 \\ 0 & S_4 & 0 \end{pmatrix}$$

Déformation et optique

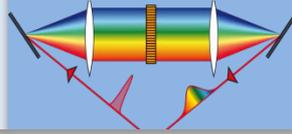
Tenseur photo-élastique

Variation de la permittivité $\Delta \varepsilon$



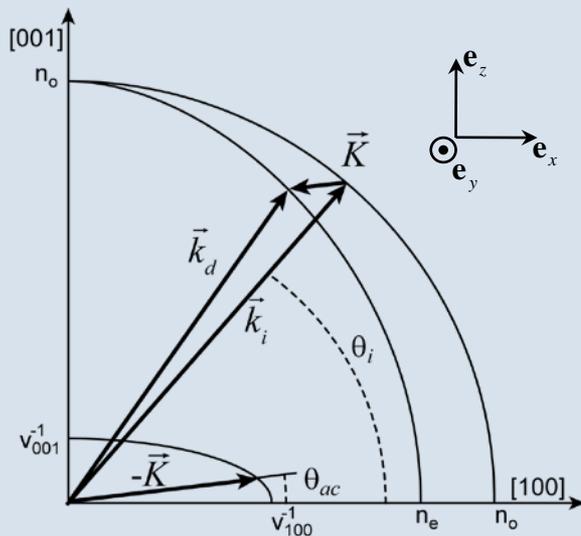
Déformation S

$$\Delta \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)_{ij} = P_{ijkl} S_{kl} \longleftrightarrow \Delta \varepsilon = \varepsilon (p : S) \varepsilon$$



Interaction acousto-optique

Accord de phase



$$\vec{k}_d(\omega_d) = \mathbf{K}(\Omega) + \vec{k}_i(\omega_i)$$

$$\omega_d = \omega_i \pm \Omega \approx \omega_i$$

Acoustique et déformation

Onde acoustique $\mathbf{u} = u_0 \mathbf{e}_y \cos(\Omega t - K_x x - K_z z)$

→ Déformation S selon xy et yz

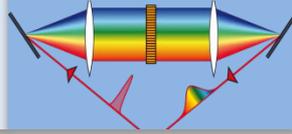
$$S = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{yx} & S_{zx} \\ S_{xy} & S_{yy} & S_{zy} \\ S_{xz} & S_{yz} & S_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & S_6 & 0 \\ S_6 & 0 & S_4 \\ 0 & S_4 & 0 \end{pmatrix}$$

Déformation et optique

Tenseur photo-élastique

Variation de la permittivité $\Delta \varepsilon$ \longleftrightarrow Déformation S

$$\Delta \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)_{ij} = p_{ijkl} S_{kl} \longleftrightarrow \Delta \varepsilon = \varepsilon (p : S) \varepsilon$$



Polarisation du terme source

Terme source

$$\nabla^2 \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, \omega) + \mu_0 \omega^2 \varepsilon(\mathbf{r}, \omega) \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, \omega) = -\mu_0 \omega^2 \Delta \varepsilon(\mathbf{r}, \omega) \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, \omega)$$

Terme source

$$\Delta \varepsilon \tilde{\mathbf{E}} \propto \varepsilon(p:S) \varepsilon \cdot \mathbf{e}_i$$

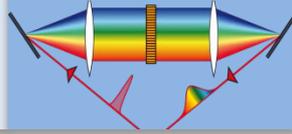
$$\varepsilon = \begin{pmatrix} n_o^2 & 0 & 0 \\ 0 & n_o^2 & 0 \\ 0 & 0 & n_e^2 \end{pmatrix}$$

$$p_{\text{KDP}} : S = \begin{pmatrix} 0 & p_{66} S_6 & 0 \\ p_{66} S_6 & 0 & p_{44} S_4 \\ 0 & p_{44} S_4 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{e}_i = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\rightarrow \Delta \varepsilon \tilde{\mathbf{E}} \propto \begin{pmatrix} n_o^4 p_{66} S_6 \\ 0 \\ n_o^2 n_e^2 p_{44} S_4 \end{pmatrix} \perp \mathbf{e}_i$$

La polarisation du champ diffracté est modifiée par le choix de la polarisation et de la propagation de l'onde acoustique

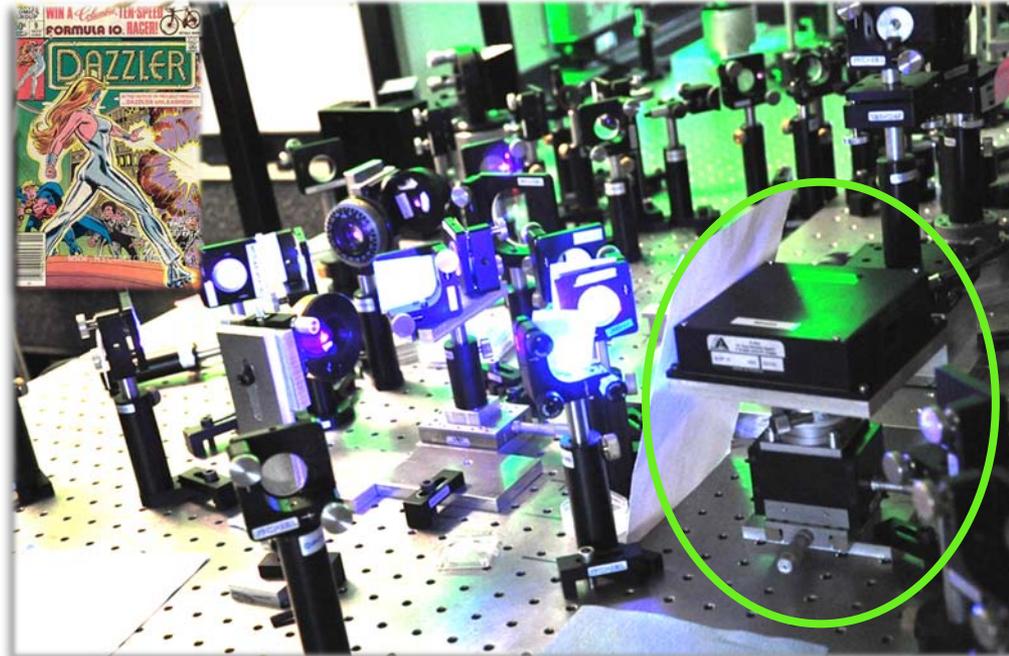


Dispositif expérimental

AOPDF commercial : Dazzler (Fastlite) T-UV-260-410/T2 (cristal de KDP L=78mm)

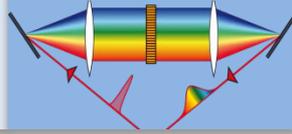
3 sources UV

- SHG @ 404 nm
BBO 200 μm , FWHM=7 nm, E=10 μJ
- SFG @ 300-360 nm
BBO 200 μm NOPA+IR
FWHM=3 nm, E=4 μJ
- THG @ 270 nm
BBO 200 μm + BBO150 μm
FWHM=2 nm, E=25 μJ

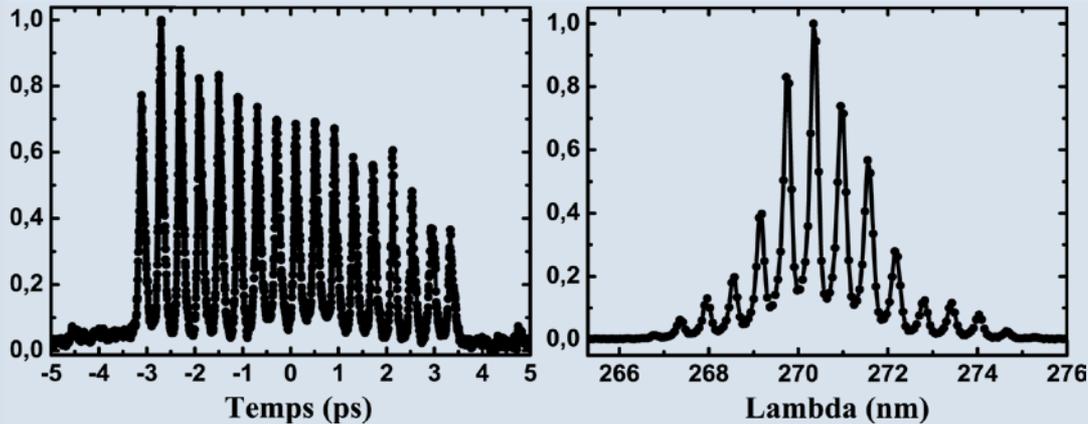


Techniques de caractérisation

- XFROG par somme ou différence de fréquence
- Cross-corrélation
- Caractérisation Spatio-temporelle dans la continuité de cette thèse



Exemple de façonnage à 270 nm



17 impulsions $\Delta t=400$ fs

➤ Augmentation progressive du nombre d'impulsions.

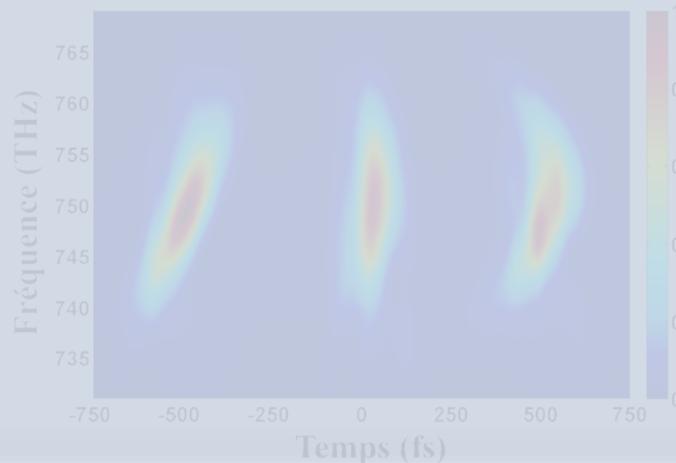
➤ Les impulsions externes sont en bord de cristal.

➤ Avec 17 impulsions, le contrôle en amplitude est plus complexe.

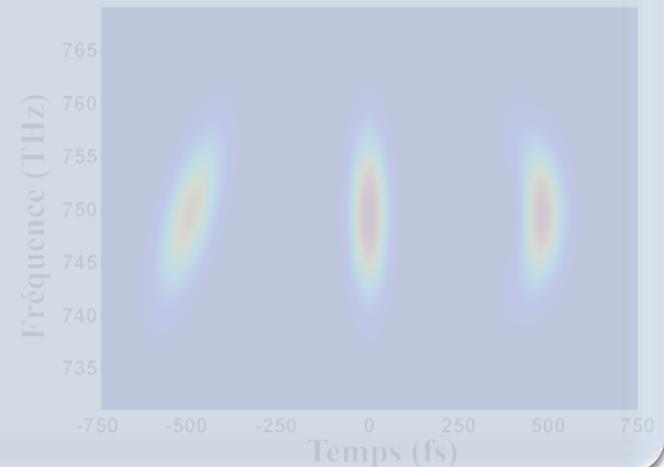
Spectrogrammes d'un train de 3 impulsions espacées de 500 fs :

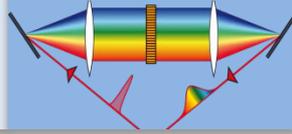
- 1) $\phi^{(2)}=2000$ fs²
- 2) Limitée TF
- 3) $\phi^{(3)}=-10^5$ fs³

Spectrogramme expérimental

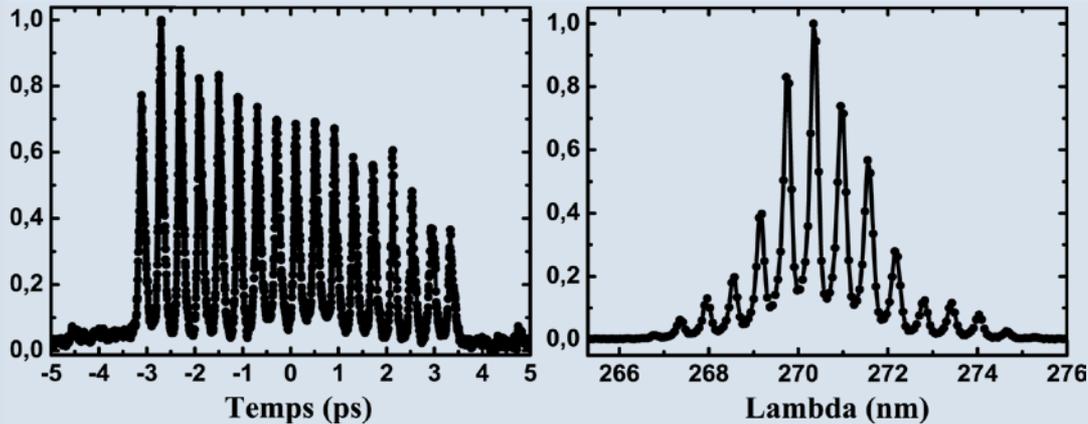


Spectrogramme théorique





Exemple de façonnage à 270 nm



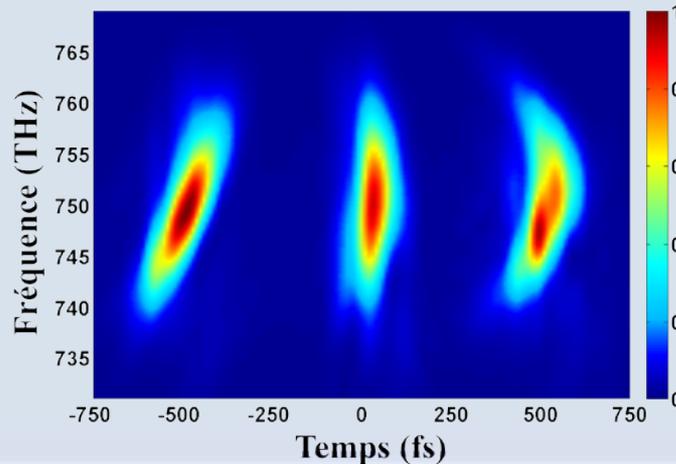
17 impulsions $\Delta t=400$ fs

- Augmentation progressive du nombre d'impulsions.
- Les impulsions externes sont en bord de cristal.
- Avec 17 impulsions, le contrôle en amplitude est plus complexe.

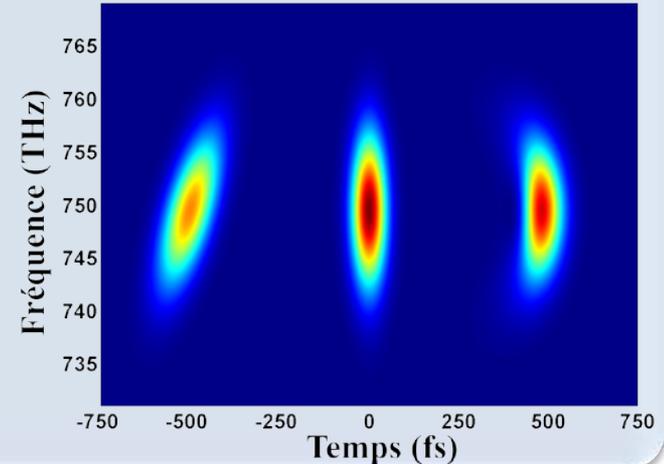
Spectrogrammes d'un train de 3 impulsions espacées de 500 fs :

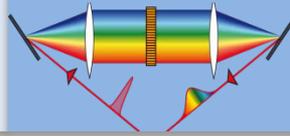
- 1) $\phi^{(2)}=2000$ fs²
- 2) Limitée TF
- 3) $\phi^{(3)}=-10^5$ fs³

Spectrogramme expérimental



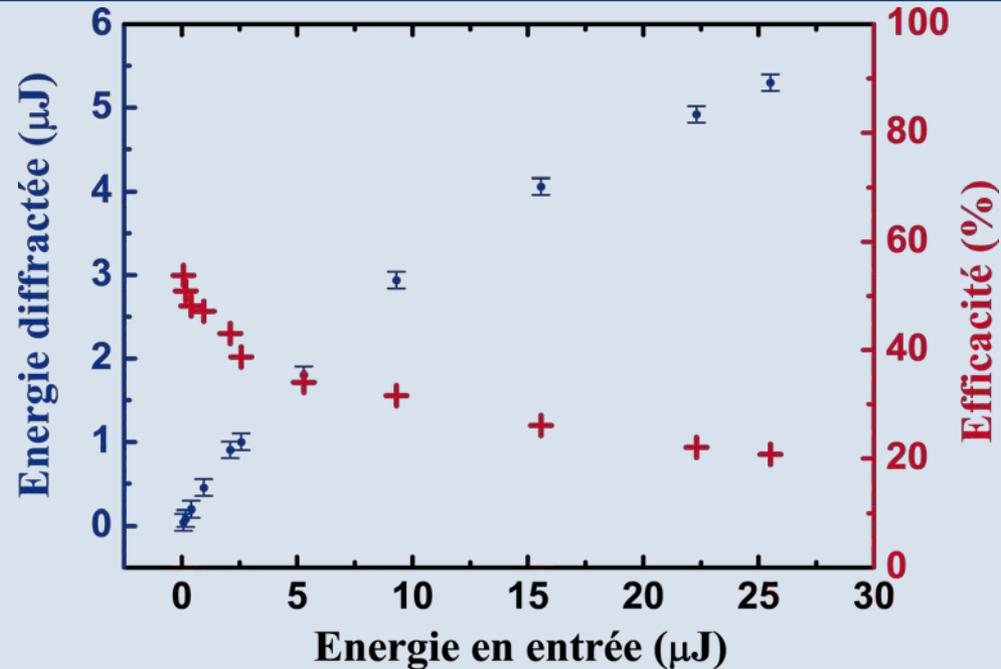
Spectrogramme théorique



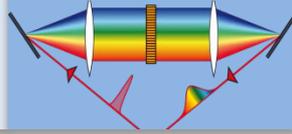


Efficacité de diffraction à 270 nm

Energie diffractée

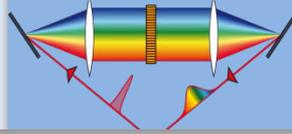


- Environ 5 μJ obtenu (20 à 50% d'efficacité)
- Variation non linéaire de l'efficacité synonyme d'une absorption à deux photons
- L'efficacité dépend du façonnage



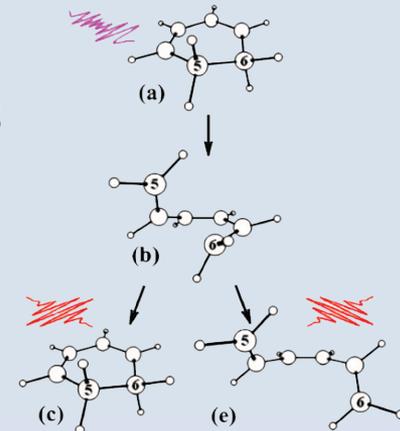
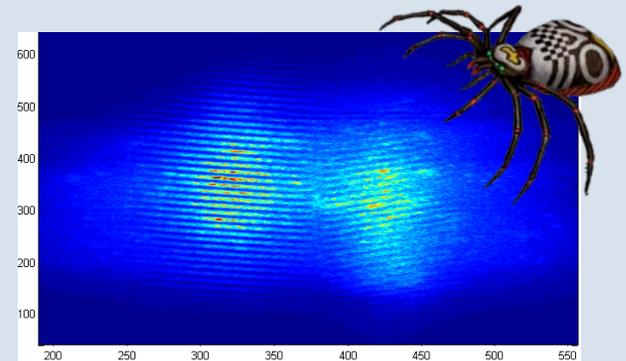
Conclusion

- Accordabilité du dispositif sur une large fenêtre spectrale [250nm- 410nm].
- Fenêtre temporelle estimée expérimentalement de 5 à 6 ps selon la longueur d'onde.
- L'efficacité de diffraction est comprise entre 20% et 40% selon la longueur d'onde et l'énergie à l'entrée (absorption à deux photons à 270 nm)
- Résolution spectrale typique de 0.02 nm à 270 nm



Perspectives

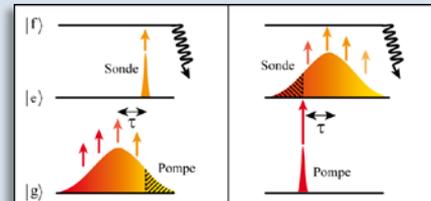
- Construction d'un NOPA UV accordable et façonnable
- Caractérisation des couplages spatio-temporels
 - ❑ Interférométrie spatio-spectrale
 - ❑ Mesures SPIDER UV
 - ❑ Collaboration avec Oxford
- Expérience pompe-sonde sur des molécules organiques
 - ❑ Transitions dans l'UV
 - ❑ Contrôle par des impulsions UV façonnées

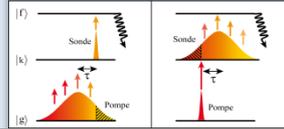


M. Kotur *et al.* J. Chem. Phys. **130**, 134311 (2009)

Plan de l'exposé

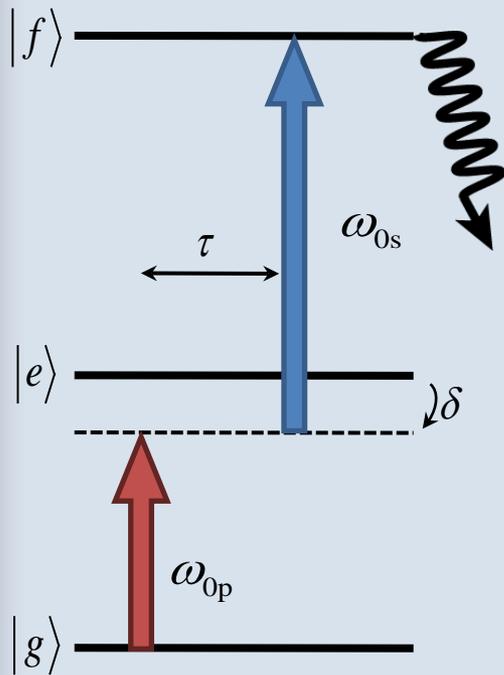
- I. Introduction
- II. Façonnage dans l'ultraviolet
- III. **Expérience Pompe-Sonde**
 1. Rappel des transitoires cohérents
 2. Rôle de la sonde
 3. Compensation de la phase
 4. Conclusion et perspectives
- IV. Factorisation de grands nombres
- V. Conclusion





Expérience Pompe-Sonde

Système à 3 niveaux



Signal détecté

➤ On mesure la fluorescence de l'état f proportionnelle à

$$|f(\tau)|^2 = |f(t \rightarrow \infty, \tau)|^2$$

➤ En régime perturbatif :

$$f(\tau) = -\frac{\mu_{ge}\mu_{ef}}{4\hbar^2} \int_{-\infty}^{\infty} dt' E_s(t' - \tau) e^{i\omega_{fe}(t' - \tau)} \int_{-\infty}^{t'} dt'' E_p(t'') e^{i\omega_{eg}t''}$$

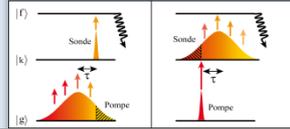
➤ Dans le domaine spectral :

$$f(\tau) \propto \underbrace{\pi \tilde{E}_p(\omega_{eg}) \tilde{E}_s(\omega_{fe})}_{\text{Terme résonnant}} + iP \underbrace{\int d\omega \frac{\tilde{E}_p(\omega + \omega_{eg}) \tilde{E}_s(\omega_{fe} - \omega)}{\omega}}_{\text{Terme non-résonnant}} e^{-i\omega\tau}$$

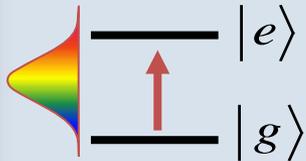
Terme résonnant

Terme non-résonnant

Excitation par une impulsion chirpée



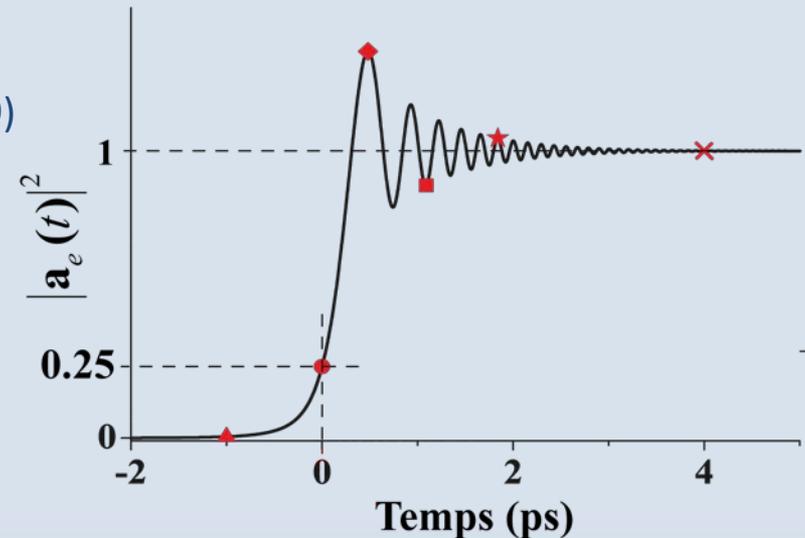
Population de l'état excité : « transitoires cohérents »



N. V. Vitanov et al. *PRA* **59**, 988 (1999)

$$a_e(t) \propto \int_{-\infty}^t e^{-2\ln 2 \left(\frac{t'}{\tau_c}\right)^2} e^{-i\frac{t'^2}{2\phi''}} dt'$$

Intégrale d'une phase quadratique équivalente à la diffraction de Fresnel



➤ Mise en évidence des transitoires cohérents avec une sonde ultracourte (thèse S. Zamith)

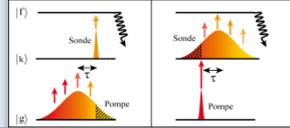
➤ Contrôle des transitoires par une pompe façonnée. Nombreux résultats : lentille de Fresnel temporelle, holographie quantique ...

J. Degert et al. *PRL* **89**, 203003 (2002)

A. Monmayrant et al *PRL* **96**, 103002 (2006)

A. Monmayrant et al *Opt. Com.* **264**, 256-263 (2006)

Motivations

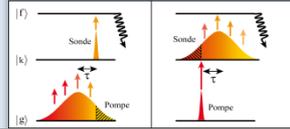


Le rôle de la sonde dans les expériences de contrôle

- Influence de :
 - ❑ sa longueur d'onde *Katsuki et al. Science 2006*
 - ❑ sa polarisation *Sokell et al. JPB 2000*

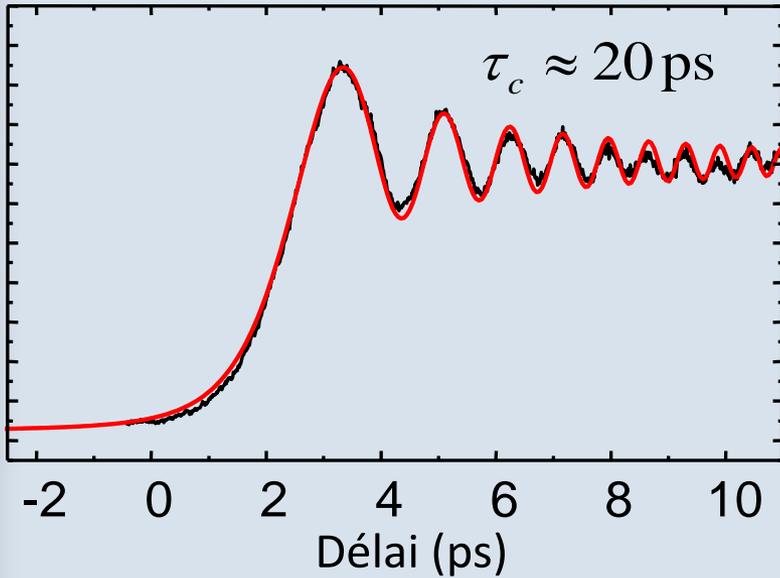
- Pompe et sonde façonnées pour contrôler l'évolution et l'état final de Li_2
 - ❑ *Dai et Leone JCP 2007*

- Intérêt dans les expériences CARS pour améliorer la résolution spectrale et temporelle
 - ❑ *Dudovitch et al. Nature 2002*
 - ❑ *Polli et al. CLEO 2009*



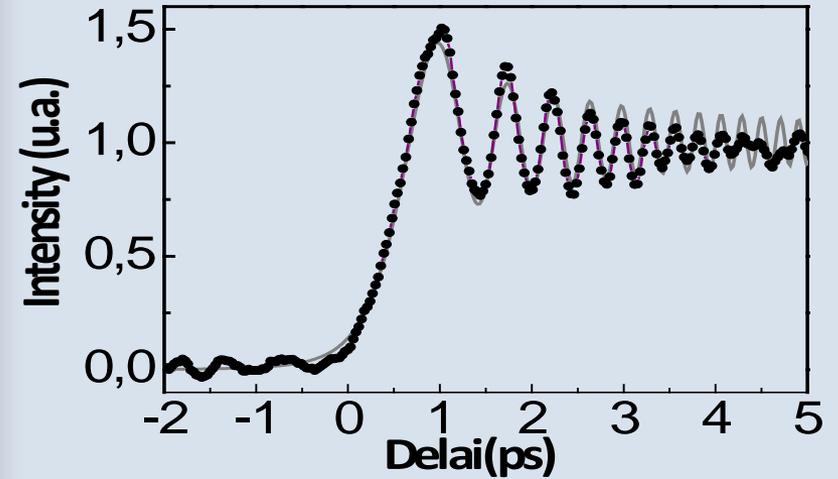
Premier résultat : sonde chirpée

Transitoires « classiques »

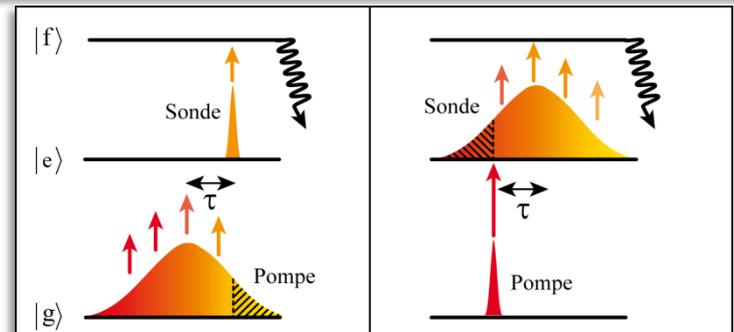


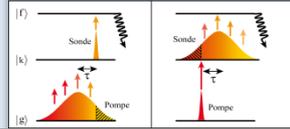
- Pompe fortement chirpée
- Sonde limitée TF

Transitoires avec sonde chirpée



- Pompe limitée TF
- Sonde fortement chirpée $\phi^{(2)} = -1.4 \cdot 10^5 \text{ fs}^2$



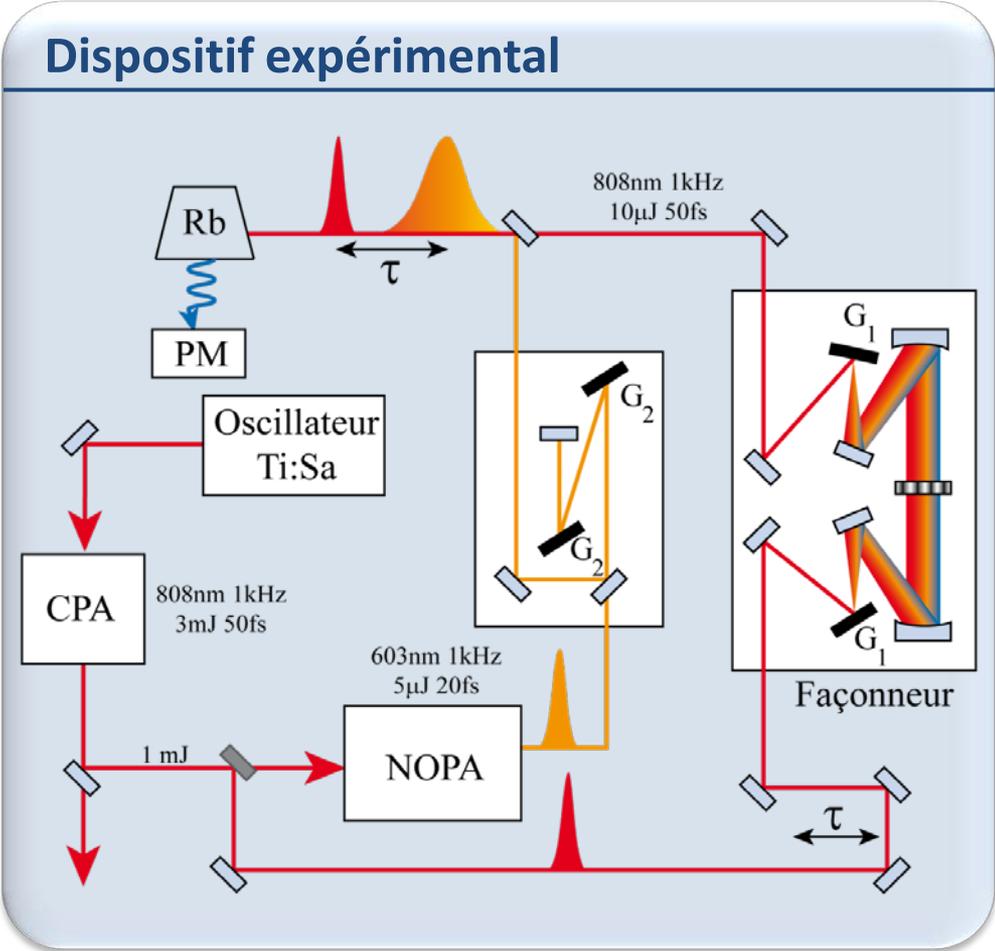


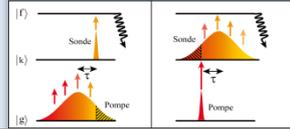
Dispositif expérimental

Expérience pompe-sonde dans le rubidium.

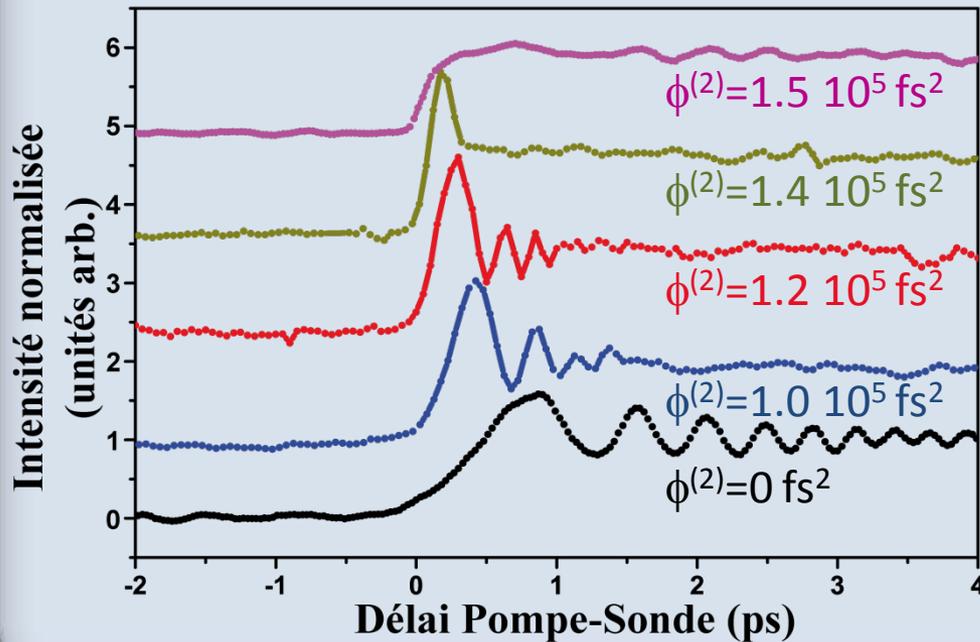
Atome de Rubidium

- Pompe courte-sonde chirpée
- Pompe chirpée-sonde chirpée





Evolution avec la phase de la pompe



➤ Les oscillations disparaissent progressivement

➤ Reste un pic de cross-corrélation dû aux désaccords aux résonances

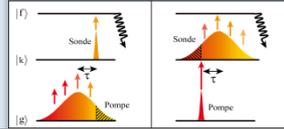
➤ Dynamique similaire à celle obtenue avec des impulsions limitées TF

Forte influence de la sonde sur la dynamique mesurée.

Cas extrême :

- ❑ Sonde fortement chirpée ($-1.4 \cdot 10^5 \text{ fs}^2$) $\Delta t = 14 \text{ ps}$
- ❑ Pompe fortement chirpée ($1.4 \cdot 10^5 \text{ fs}^2$) $\Delta t = 12 \text{ ps}$

Evolution rapide de la population de l'état final : le temps de montée est inférieur à 100 fs!!



Phase globale du système

$$f(\tau) \propto \pi \tilde{E}_p(\omega_{eg}) \tilde{E}_s(\omega_{fe}) + iP \int d\omega \frac{A_p(\omega + \omega_{eg}) e^{i\phi_p(\omega + \omega_{eg})} A_s(\omega_{fe} - \omega) e^{i\phi_s(\omega_{fe} - \omega)}}{\omega} e^{-i\omega\tau}$$

$$\phi_p(\omega + \omega_{eg}) + \phi_s(\omega_{fe} - \omega) = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{\phi_p^{(2)}}{2} (\omega - \delta_p)^2 + \frac{\phi_s^{(2)}}{2} (-\omega - \delta_s)^2 = 0$$

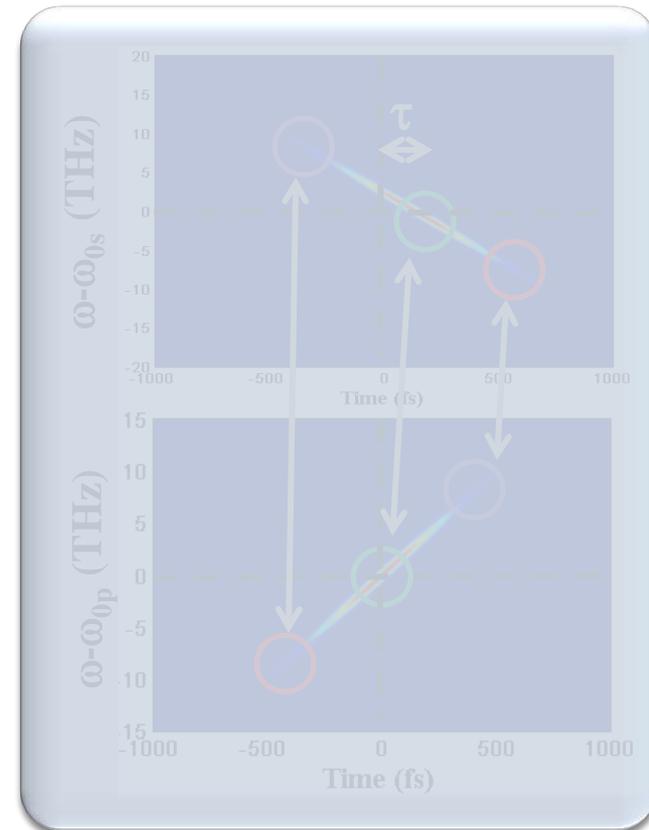
$$\Rightarrow \phi_p^{(2)} = -\phi_s^{(2)} \text{ et } \delta_p = -\delta_s$$

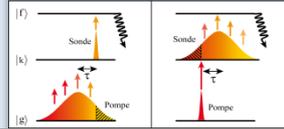
$$\delta_p = \omega_{0p} - \omega_{eg}$$

$$\delta_s = \omega_{0s} - \omega_{fe}$$

Résonance à 2 photons

- Les phases spectrales s'annulent mutuellement.
- Accès à une dynamique courte avec pompe et sonde fortement façonnées!
- Peut être utilisé pour mesurer la phase d'une impulsion inconnue





Phase globale du système

$$f(\tau) \propto \pi \tilde{E}_p(\omega_{eg}) \tilde{E}_s(\omega_{fe}) + iP \int d\omega \frac{A_p(\omega + \omega_{eg}) e^{i\phi_p(\omega + \omega_{eg})} A_s(\omega_{fe} - \omega) e^{i\phi_s(\omega_{fe} - \omega)}}{\omega} e^{-i\omega\tau}$$

$$\phi_p(\omega + \omega_{eg}) + \phi_s(\omega_{fe} - \omega) = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{\phi_p^{(2)}}{2} (\omega - \delta_p)^2 + \frac{\phi_s^{(2)}}{2} (-\omega - \delta_s)^2 = 0$$

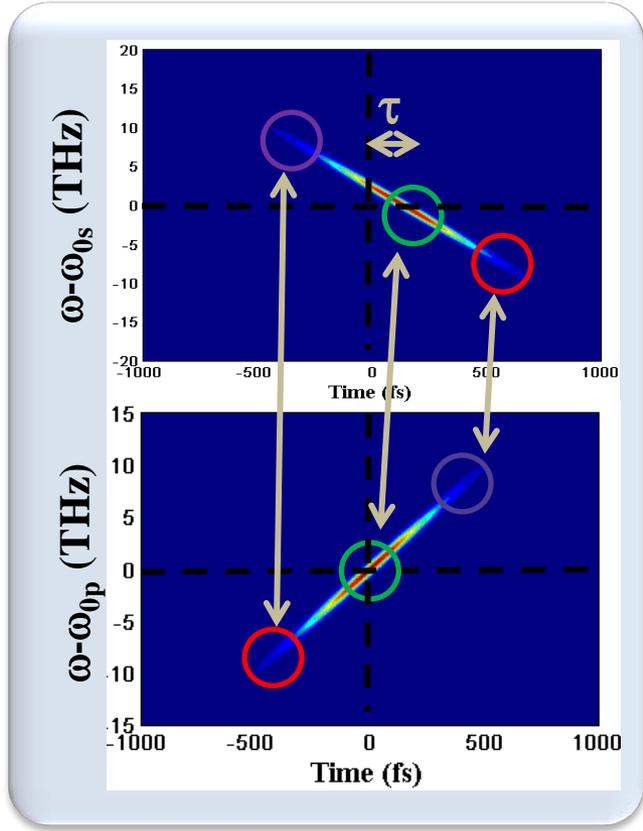
$$\Rightarrow \phi_p^{(2)} = -\phi_s^{(2)} \text{ et } \delta_p = -\delta_s$$

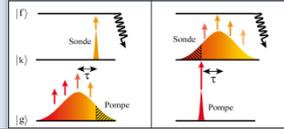
$$\delta_p = \omega_{0p} - \omega_{eg}$$

$$\delta_s = \omega_{0s} - \omega_{fe}$$

Résonance à 2 photons

- Les phases spectrales s'annulent mutuellement.
- Accès à une dynamique courte avec pompe et sonde fortement façonnées!
- Peut être utilisé pour mesurer la phase d'une impulsion inconnue





Phase globale du système

$$f(\tau) \propto \pi \tilde{E}_p(\omega_{eg}) \tilde{E}_s(\omega_{fe}) + iP \int d\omega \frac{A_p(\omega + \omega_{eg}) e^{i\phi_p(\omega + \omega_{eg})} A_s(\omega_{fe} - \omega) e^{i\phi_s(\omega_{fe} - \omega)}}{\omega} e^{-i\omega\tau}$$

$$\phi_p(\omega + \omega_{eg}) + \phi_s(\omega_{fe} - \omega) = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{\phi_p^{(2)}}{2} (\omega - \delta_p)^2 + \frac{\phi_s^{(2)}}{2} (-\omega - \delta_s)^2 = 0$$

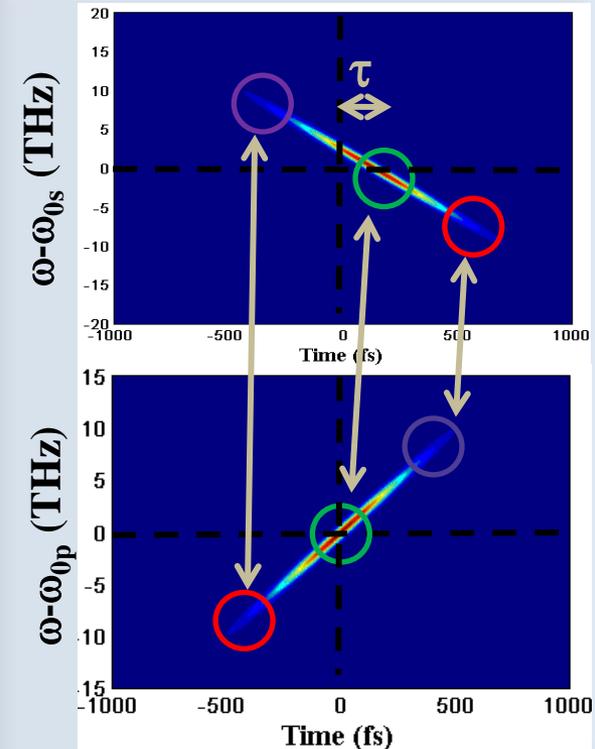
$$\Rightarrow \phi_p^{(2)} = -\phi_s^{(2)} \text{ et } \delta_p = -\delta_s$$

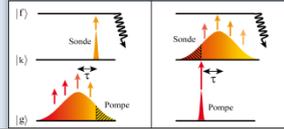
$$\delta_p = \omega_{0p} - \omega_{eg}$$

$$\delta_s = \omega_{0s} - \omega_{fe}$$

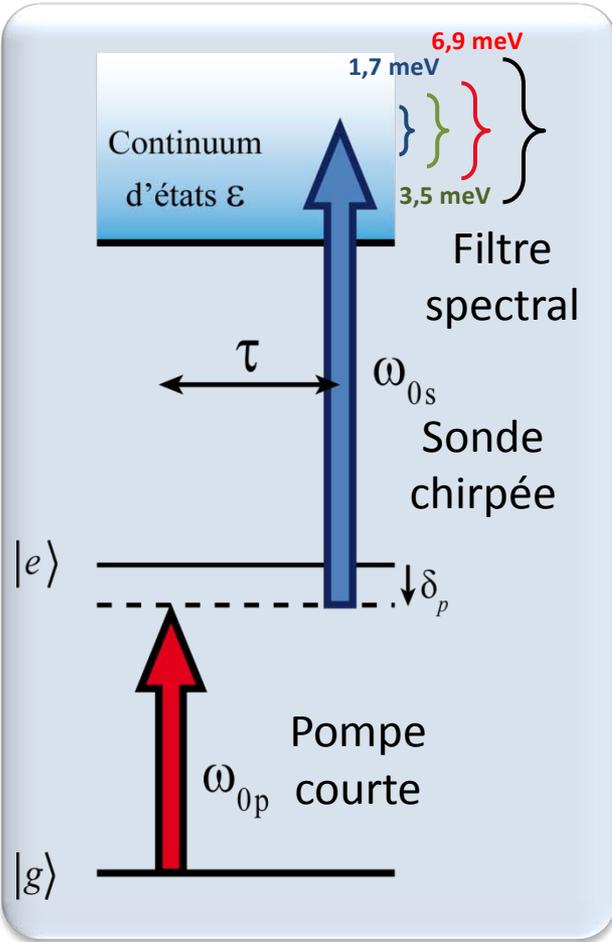
Résonance à 2 photons

- Les phases spectrales s'annulent mutuellement.
- Accès à une dynamique courte avec pompe et sonde fortement façonnées!
- Peut être utilisé pour mesurer la phase d'une impulsion inconnue

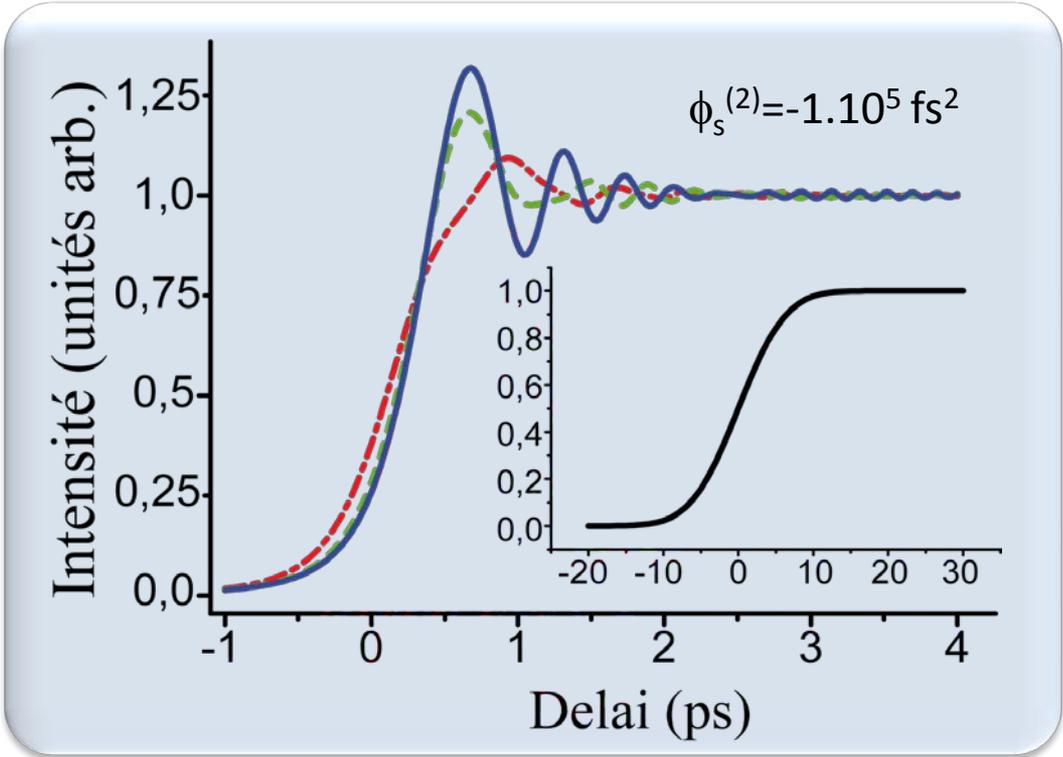




Perspectives : transitions vers un continuum



- Dynamique différente pour chaque fréquence
- Perte de la cohérence temporelle de l'interaction
- Dynamique retrouvée par un filtrage spectral du signal



Plan de l'exposé

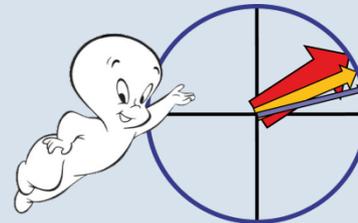
I. Introduction

II. Façonnage dans l'ultraviolet

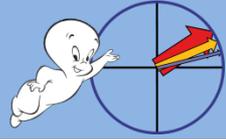
III. Expérience Pompe-Sonde

IV. Factorisation de grands nombres

1. Factorisation et somme de Gauss
2. Expériences et résultats
3. Proposition théorique
4. Conclusion



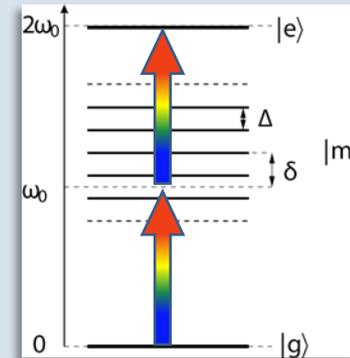
V. Conclusion



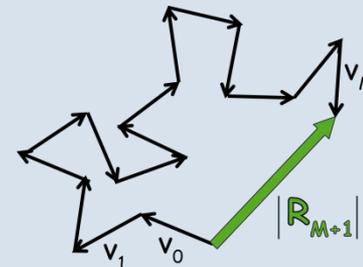
Factorisation de grands nombres

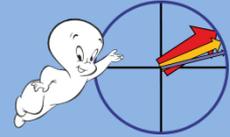
- Proposition théorique de W. Schleich sur l'utilisation de somme de Gauss pour la factorisation, alternative au calcul quantique .
- Les similarités de ces sommes avec nos travaux sur les phases quadratiques ont donné lieu à une forte collaboration théorique et expérimentale:

- ❑ W. Merkel *et al.* Fortschr. Phys. 2006
- ❑ W. Merkel *et al.* PRA 2007
- ❑ Bigourd *et al.* PRL 2008



- Amélioration de la technique par des phases aléatoires
Weber *et al.* Europhys. Lett. 2008





Les expériences de factorisation

➤ Théorie :

- ❑ W. Merkel *et al.* Fortschr. Phys. (2006)
- ❑ M. Stefanak *et al.* New Journal of Physics (2007)

➤ RMN :

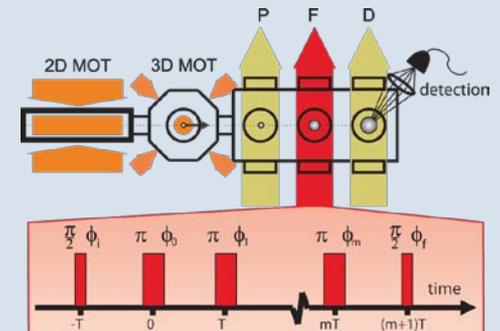
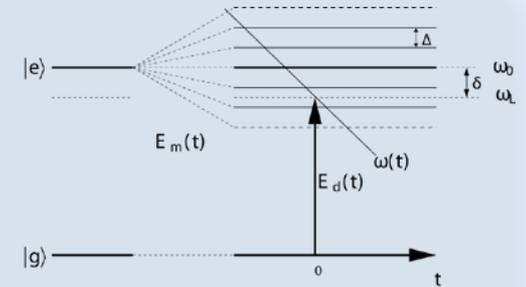
- ❑ M. Mehring *et al.* Phys. Rev. Lett. (2007)
- ❑ T. S. Mahesh *et al.* Phys. Rev. A (2007)
- ❑ X. Peng *et al.* Europhysics Letters (2008)

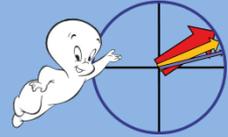
➤ Atomes froids: M. Gilowski *et al.* Phys. Rev. Lett. (2008)

➤ BEC : M. Sadgrove *et al.* Phys. Rev. Lett. (2008)

➤ Train d'impulsions femtosecondes

- ❑ D. Bigourd *et al.* Phys. Rev. Lett. (2008)
- ❑ S. Weber *et al.* Europhysics Letters (2008)

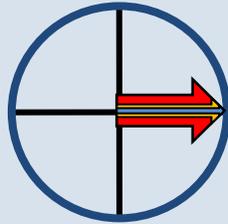




La somme de Gauss

Si l est un facteur de N

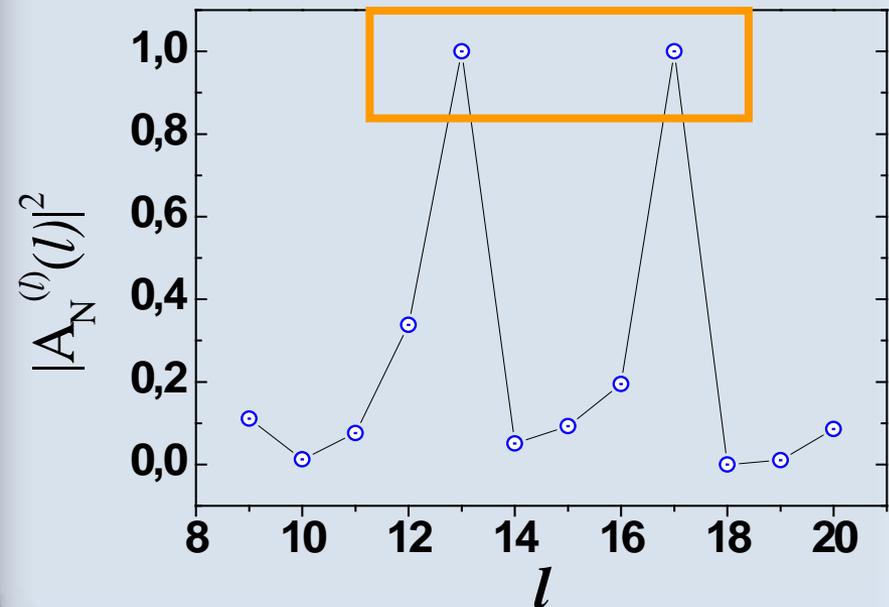
$$\frac{N}{l} \equiv p \text{ (entier)}$$



$$A_N^{(l)}(l) = \sum_{m=0}^{l-1} \rho_m \exp\{2i\pi m^2 p\} = \sum_{m=0}^{l-1} \rho_m = 1$$

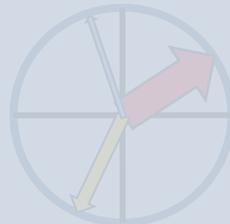
$$A_N^{(l)}(l) = \sum_{m=0}^{l-1} \rho_m \exp\left\{2i\pi m^2 \frac{N}{l}\right\}$$

Factorisation of $N=221=13 \times 17$

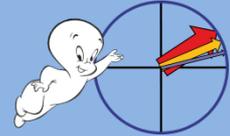


Si l est un facteur de N

$$\frac{N}{l} \equiv p + \varepsilon$$



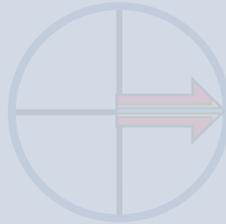
$$A_N^{(l)}(l) = \sum_{m=0}^{l-1} \rho_m \exp\{2i\pi m^2 \varepsilon\} \ll 1$$



La somme de Gauss

Si l est un facteur de N

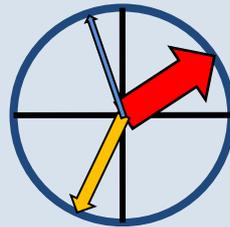
$$\frac{N}{l} \equiv p \text{ (entier)}$$



$$A_N^{(l)}(l) = \sum_{m=0}^{l-1} \rho_m \exp\{2i\pi m^2 p\} = \sum_{m=0}^{l-1} \rho_m = 1$$

Si l n'est pas un facteur de N

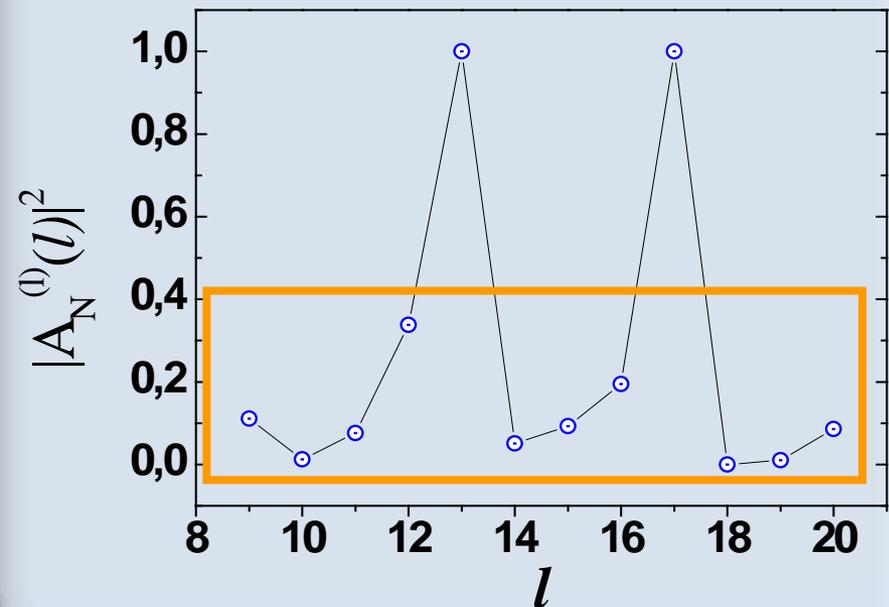
$$\frac{N}{l} \equiv p + \varepsilon$$

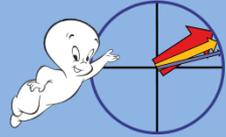


$$|A_N^{(l)}(l)| = \left| \sum_{m=0}^{l-1} \rho_m \exp\{2i\pi m^2 \varepsilon\} \right| \ll 1$$

$$A_N^{(l)}(l) = \sum_{m=0}^{l-1} \rho_m \exp\left\{2i\pi m^2 \frac{N}{l}\right\}$$

Factorisation of $N=221=13 \times 17$





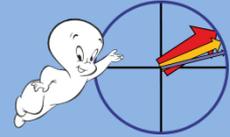
Particularités : troncation et pré-calcul

$$A_N^{(M)}(l) = \frac{1}{M+1} \sum_{m=0}^M \exp \left\{ 2i\pi m^2 \frac{N}{l} \right\}$$

- En pratique, seuls les premiers termes de la somme sont suffisant pour discriminer facteurs et non-facteurs. : M. Stefanak et al. *New Journal of Physics* **9**, 370 (2007)
- La troncation M est ajustable
- Mais : apparition de « fantômes » (non-facteurs difficilement discriminables)
- Dans toutes les expériences, les termes de phases de la somme sont pré-calculés.



Nécessite un système physique dans lequel la somme de Gauss est calculée automatiquement pour l variant entre 2 et \sqrt{N}



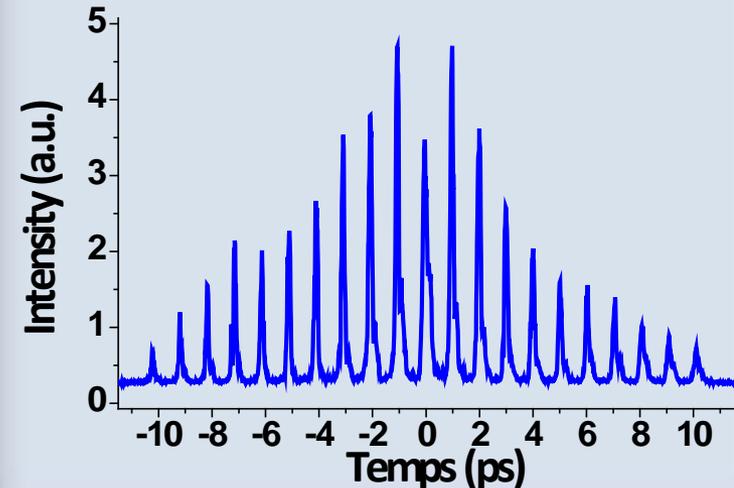
Expérience de principe

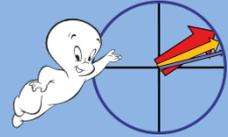
Train d'impulsions avec une phase de Gauss



$$H(\omega) = \sum_{m=0}^M \exp\{i\theta_m + im\phi^{(1)}(\omega - \omega_p)\}$$

$$\theta_m = 2\pi m^2 \frac{N}{l} \quad \text{avec } \phi^{(1)} = 200 \text{ fs}$$

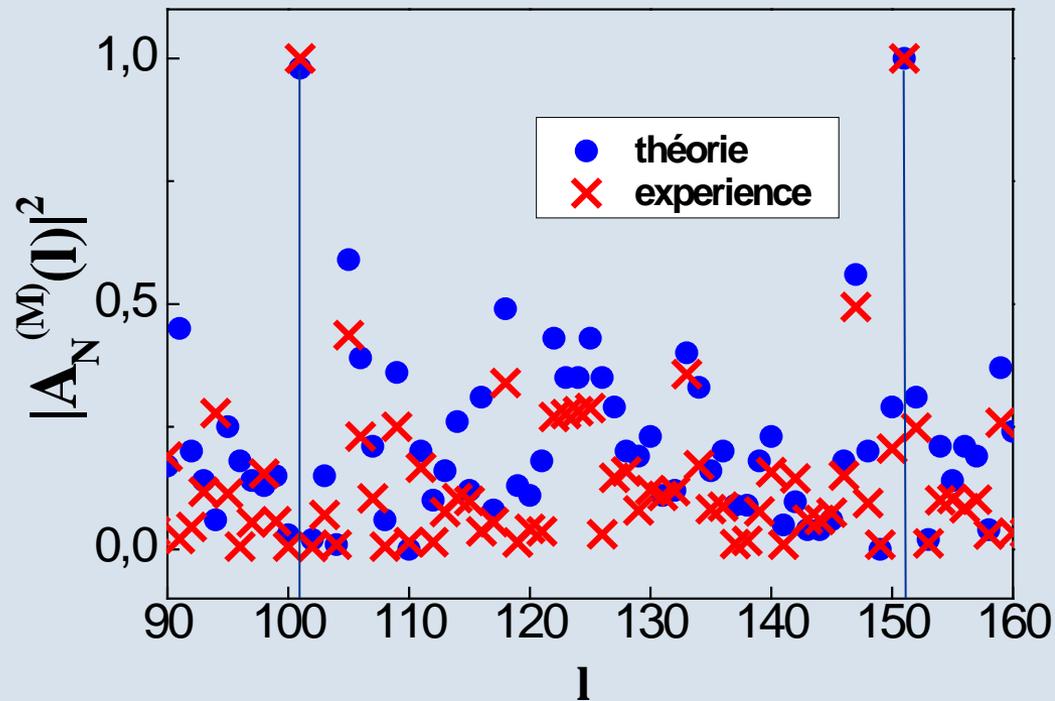


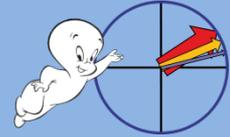


Premiers résultats

$N=15251=101 \times 151$

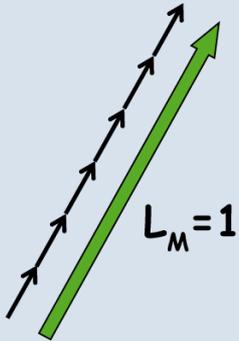
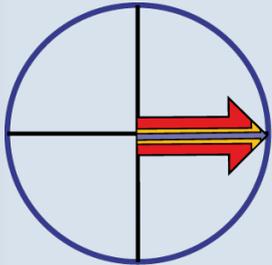
$M+1=9$ impulsions



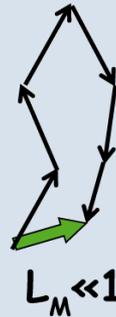
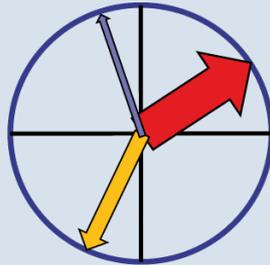


Troncation => fantômes

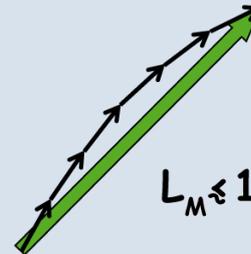
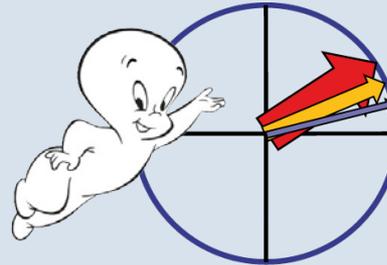
Facteurs



Non-facteurs



« Fantômes »



Exemple de fantôme

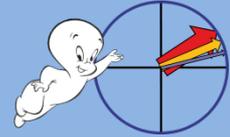
$$N = (p-1)(p+1) = p^2 - 1$$

$$\rightarrow \frac{N}{p} = p - \frac{1}{p}$$

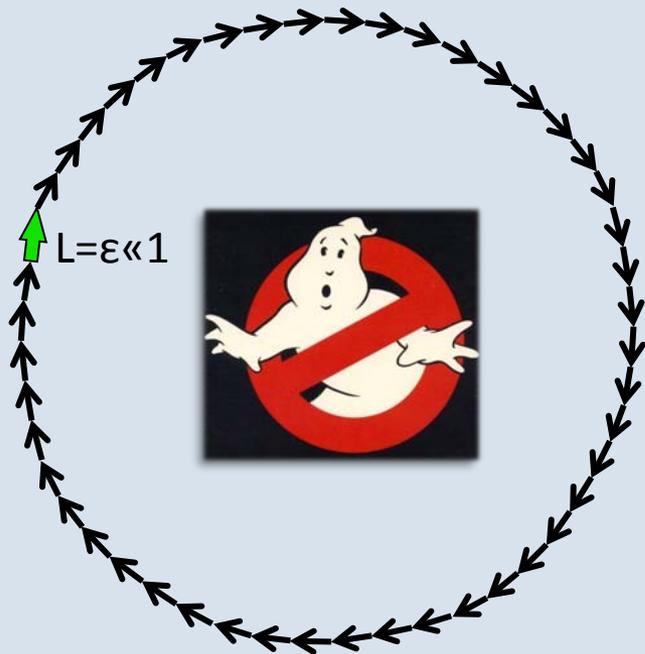
$$\phi_{\text{Gauss}} = 2\pi m^2 p + 2\pi \frac{m^2}{p}$$

Si $p \gg M^2$

La phase évolue très
lentement avec
l'indice m



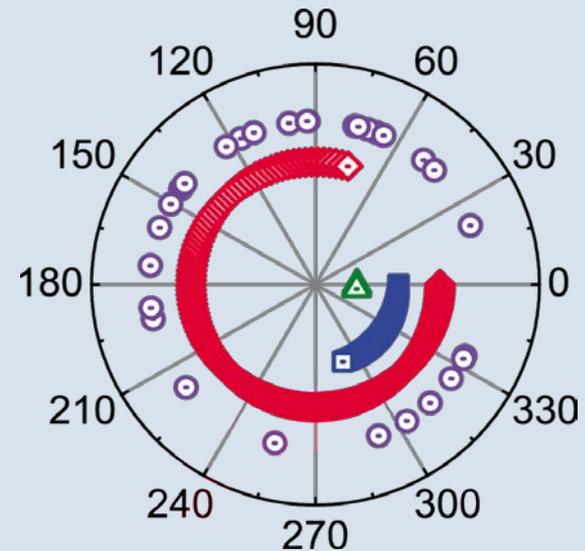
Comment tuer les « fantômes » ?



Augmenter le nombre d'impulsions

➔ limite expérimentale!

$N=49991 \times 49993$ $l=49992$



30 phases

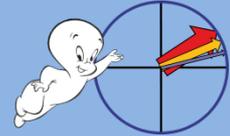
200 impulsions

100 impulsions

30 impulsions aléatoires

Termes de phase de Gauss aléatoires

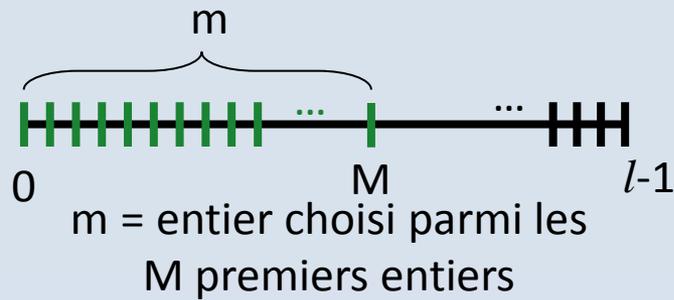
➔ nouvelle approche!



Nouvelle approche aléatoire

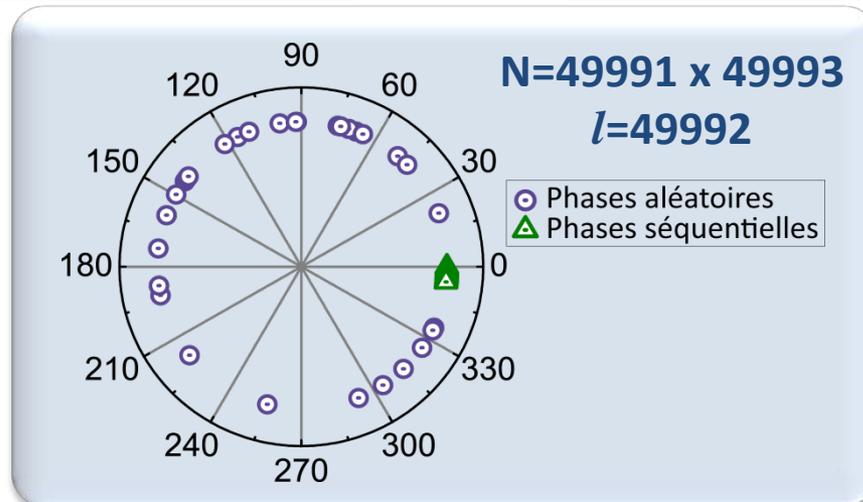
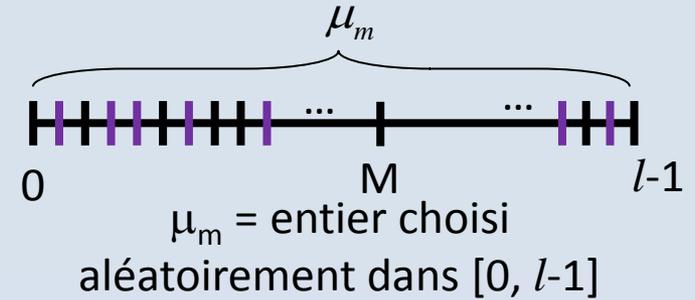
Méthode « séquentielle »

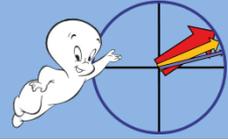
$$A_N^{(M)}(l) = \frac{1}{M+1} \sum_{m=0}^M \exp \left\{ 2i\pi m^2 \frac{N}{l} \right\}$$



Méthode « aléatoire »

$$A_{\text{al}}^{(M)}(l) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^M \exp \left\{ 2i\pi \mu_m^2 \frac{N}{l} \right\}$$

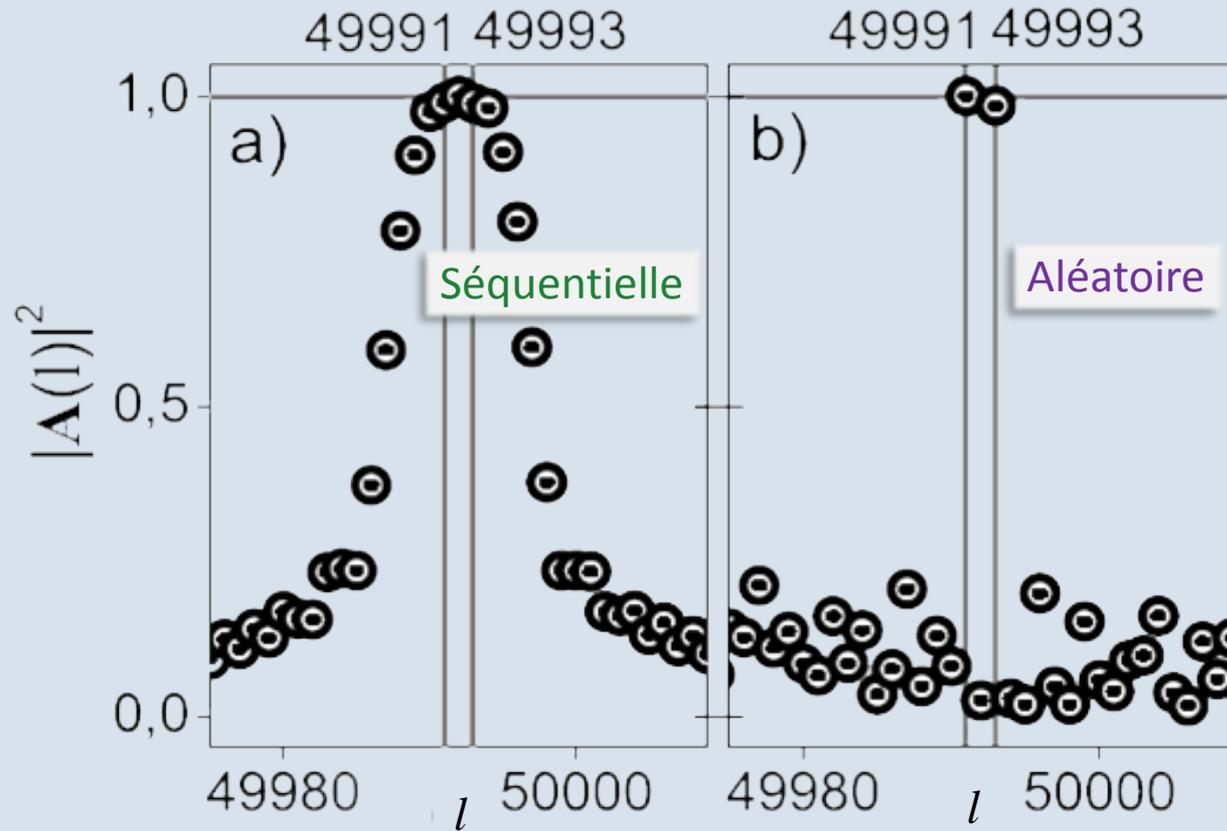


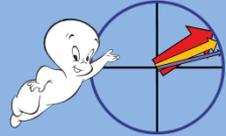


Résultats expérimentaux

$N=49991 \times 49993=2\,499\,200\,063$

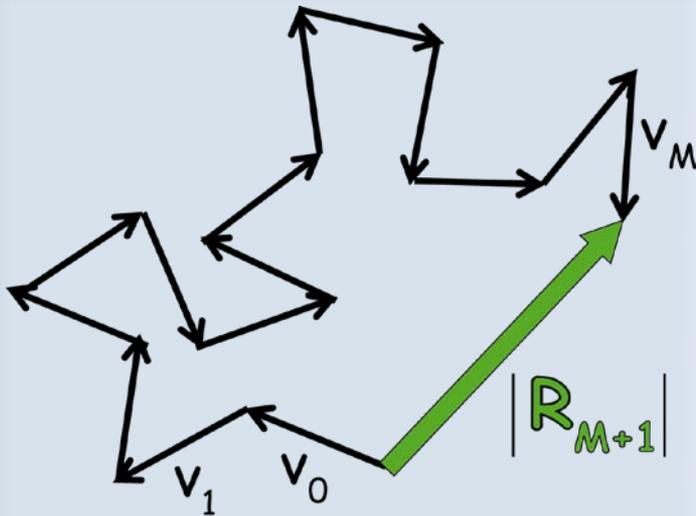
$M+1=31$ impulsions





Estimation de la troncation

Modèle de marche aléatoire



$$|A_{al}^{(M)}| = |R_{M+1}|$$

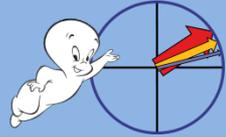
$$\text{Pas de la marche : } a = \frac{1}{M+1}$$

Densité de probabilité

$$P_n(\mathbf{r}) \approx \frac{1}{\pi n a^2} \exp\left\{-\frac{r^2}{n a^2}\right\}$$

Probabilité d'avoir un fantôme

$$\begin{aligned} P_S &= P\left(|A_{al}^{(M)}| > \sqrt{S}\right) \\ &= 1 - P\left(|A_{al}^{(M)}| < \sqrt{S}\right) \\ &= 1 - 2\pi \int_{r < \sqrt{S}} dr r P_{M+1}(r) \\ &= \exp\left\{-(M+1)S\right\} \end{aligned}$$



Troncation

$$l \in [1 \sqrt{N}] \rightarrow \sqrt{N} \text{ expériences}$$

Tous les fantômes sont supprimés si la probabilité d'en trouver parmi les \sqrt{N} tirages est négligeable.

$$\rightarrow P_s \sqrt{N} = \varepsilon \ll 1 \quad \text{et} \quad P_s \approx \exp\{-(M+1)S\}$$

Troncation

$$M+1 = \frac{1}{2S} \ln N - \frac{1}{S} \ln \varepsilon = \frac{1}{2S} \ln \left(\frac{N}{\varepsilon^2} \right)$$

Exemple

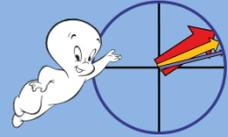
$$\varepsilon = 0.01$$

$$S = 0.5$$

$$N = 2\,499\,200\,063$$

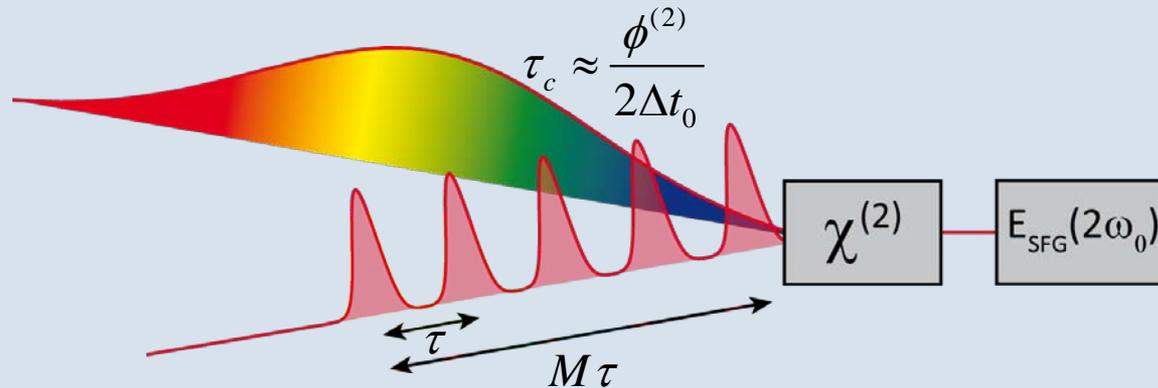
$$M \approx 31$$

- Loi d'échelle améliorée pour la troncation : logarithmique
- Nombres de 10 et 13 chiffres factorisés ≈ 33 et 43 bits
- La phase est pré-calculée
- Nécessite \sqrt{N} expériences



Proposition théorique

Somme de fréquence



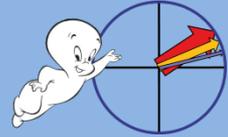
$$\tilde{E}_{\text{SFG}}(2\omega_0) \propto \sum_{m=0}^M \exp\left\{2im^2 \frac{\tau^2}{\phi^{(2)}}\right\} \equiv \sum_{m=0}^M \exp\left\{2i\pi m^2 \frac{N}{l}\right\}$$

$$\textcircled{1} \quad \frac{N}{l} = \frac{\tau^2}{\pi |\phi^{(2)}|}$$

$$\textcircled{2} \quad |\phi^{(2)}| \geq \frac{4}{3} \Delta t_0 M \tau$$

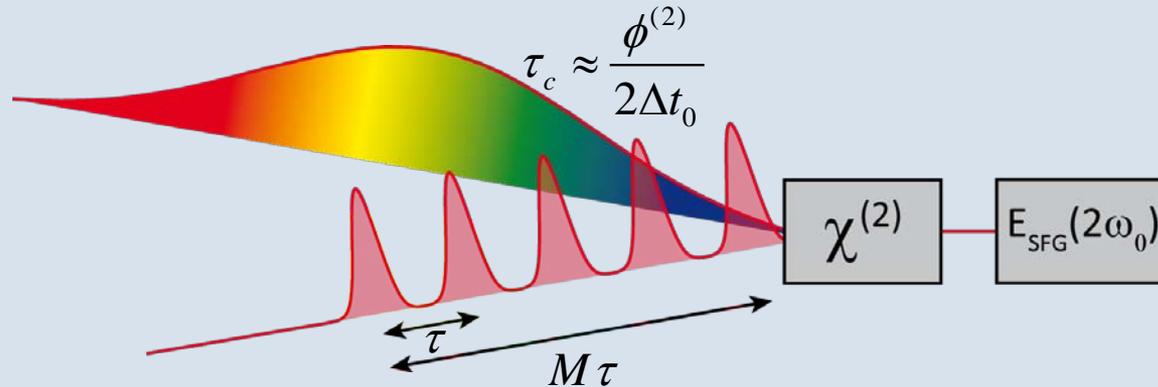
$$\textcircled{3} \quad \left(\frac{N}{l}\right)_{\min} = \sqrt{N}$$

$$\textcircled{4} \quad \left(\frac{N}{l}\right)_{\max} = N$$



Proposition théorique

Somme de fréquence



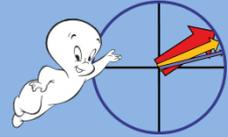
$$\tilde{E}_{\text{SFG}}(2\omega_0) \propto \sum_{m=0}^M \exp\left\{2im^2 \frac{\tau^2}{\phi^{(2)}}\right\} \equiv \sum_{m=0}^M \exp\left\{2i\pi m^2 \frac{N}{l}\right\}$$

$$\textcircled{1} \quad \frac{N}{l} = \frac{\tau^2}{\pi |\phi^{(2)}|}$$

$$\textcircled{2} \quad |\phi^{(2)}| \geq \frac{4}{3} \Delta t_0 M \tau$$

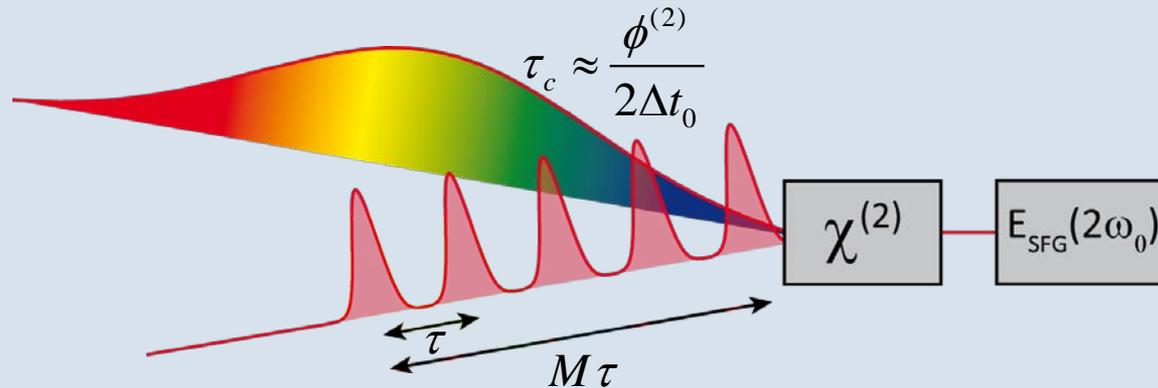
$$\textcircled{3} \quad \left(\frac{N}{l}\right)_{\min} = \sqrt{N}$$

$$\textcircled{4} \quad \left(\frac{N}{l}\right)_{\max} = N$$



Proposition théorique

Somme de fréquence



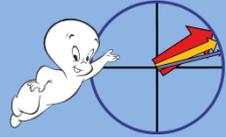
$$\tilde{E}_{\text{SFG}}(2\omega_0) \propto \sum_{m=0}^M \exp\left\{2im^2 \frac{\tau^2}{\phi^{(2)}}\right\} \equiv \sum_{m=0}^M \exp\left\{2i\pi m^2 \frac{N}{l}\right\}$$

$$\textcircled{1} \quad \frac{N}{l} = \frac{\tau^2}{\pi |\phi^{(2)}|}$$

$$\textcircled{2} \quad |\phi^{(2)}| \geq \frac{4}{3} \Delta t_0 M \tau$$

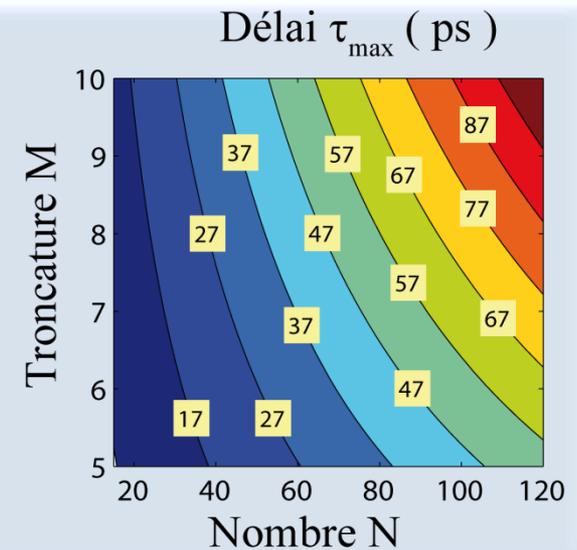
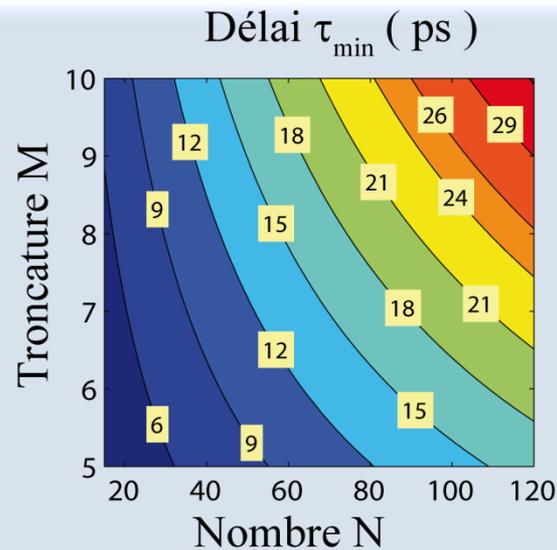
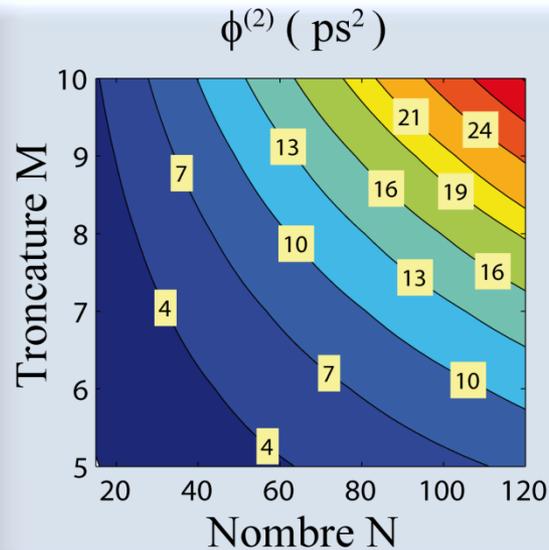
$$\textcircled{3} \quad \left(\frac{N}{l}\right)_{\min} = \sqrt{N}$$

$$\textcircled{4} \quad \left(\frac{N}{l}\right)_{\max} = N$$



Chirp constant – délai variable

$$\textcircled{1} \quad |\phi^{(2)}| = \frac{19\pi}{9} \Delta t_0^2 M^2 N \quad \textcircled{2} \quad \tau_{\min} = \frac{4\pi}{3} \Delta t_0 M N^{3/4} \quad \textcircled{3} \quad \tau_{\max} = \frac{4\pi}{3} \Delta t_0 M N \quad \Delta t_0 = 50 \text{ fs}$$

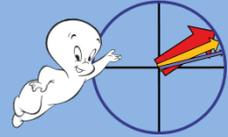


Exemple

$N \approx 105$ $105 = 3 \times 5 \times 7$
 $M+1=10$ impulsions

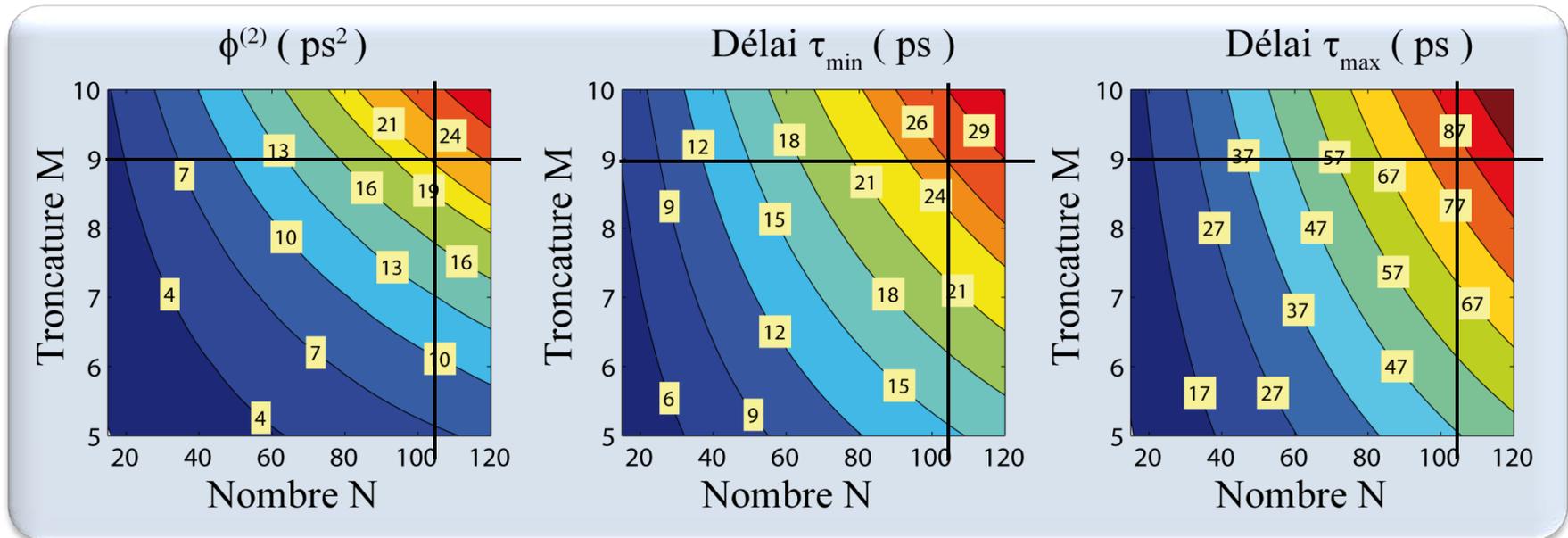


$$|\phi^{(2)}| \approx 20 \text{ ps}^2 \quad \tau_{\min} \approx 24 \text{ ps} \quad \tau_{\max} \approx 80 \text{ ps}$$



Chirp constant – délai variable

$$\textcircled{1} \quad |\phi^{(2)}| = \frac{19\pi}{9} \Delta t_0^2 M^2 N \quad \textcircled{2} \quad \tau_{\min} = \frac{4\pi}{3} \Delta t_0 M N^{3/4} \quad \textcircled{3} \quad \tau_{\max} = \frac{4\pi}{3} \Delta t_0 M N \quad \Delta t_0 = 50 \text{ fs}$$

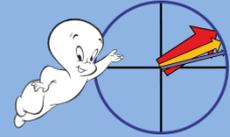


Exemple

$N \approx 105 = 3 \times 5 \times 7$
 $M+1=10$ impulsions



$$|\phi^{(2)}| \approx 21 \text{ ps}^2 \quad \tau_{\min} \approx 26 \text{ ps} \quad \tau_{\max} \approx 82 \text{ ps}$$

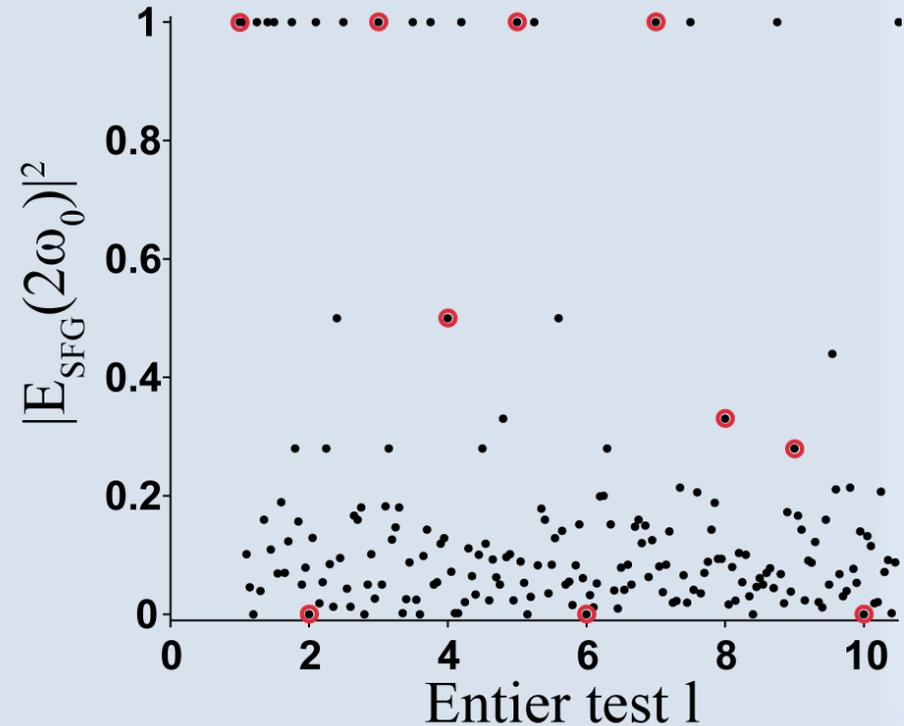
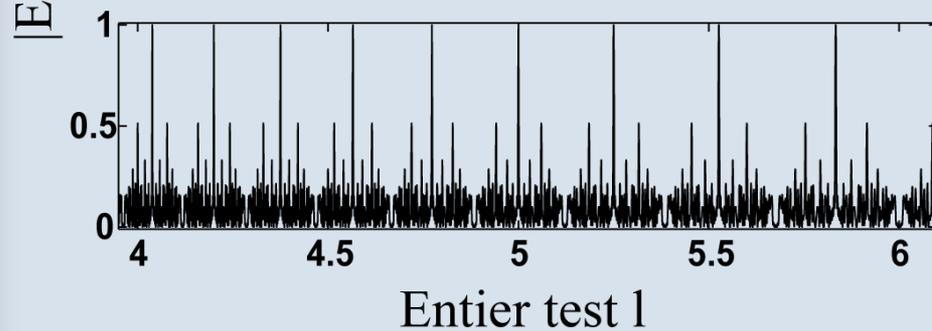
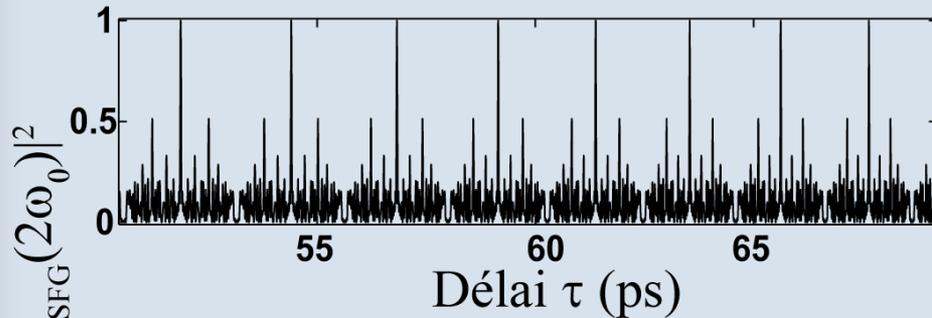


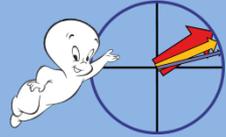
Simulation de factorisation

$N=3 \times 5 \times 7 = 105$

$M+1=10$ impulsions

$$l = \frac{N\pi |\phi^{(2)}|}{\tau^2}$$





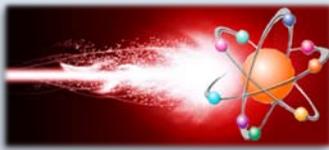
Conclusion

- Factorisation de grands nombres de l'ordre de 13 chiffres
- Amélioration de la loi d'échelle des « fantômes » (en log) par choix aléatoire des phases
- Proposition théorique d'un système calculant directement la somme de Gauss
- Mise en œuvre expérimentale prochainement
- Mais nécessite encore la répétition de \sqrt{N} expériences

Conclusion générale

Considérations générales

- Contrôle cohérent en boucle ouverte
- Façonnage et caractérisation d'impulsions
- Systèmes variés



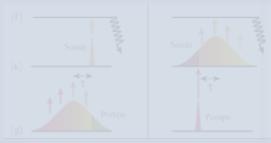
Façonnage dans l'UV

- Façonnage par interaction acousto-optique
- Diverses mises en forme (train d'impulsions, phases...)
- Fenêtre temporelle de l'ordre de 6 ps
- Efficacité de l'ordre de 20 à 40 %



Système pompe-sonde

- Rôle de la sonde dans un système à 3 niveaux
- Influence et compensation de la phase quadratique
- Dynamique courte avec des impulsions longues



Factorisation par somme de Gauss

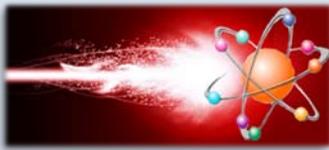
- Rôle de la somme de Gauss
- Mise en œuvre expérimentale et proposition théorique
- Méthode dite « aléatoire »
- Factorisation de nombre à 10 et 13 chiffres



Conclusion générale

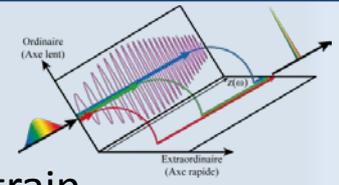
Considérations générales

- Contrôle cohérent en boucle ouverte
- Façonnage et caractérisation d'impulsions
- Systèmes variés



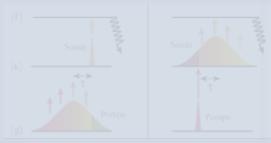
Façonnage dans l'UV

- Façonnage par interaction acousto-optique
- Diverses mises en forme (train d'impulsions, phases...)
- Fenêtre temporelle de l'ordre de 6 ps
- Efficacité de l'ordre de 20 à 40 %



Systeme pompe-sonde

- Rôle de la sonde dans un système à 3 niveaux
- Influence et compensation de la phase quadratique
- Dynamique courte avec des impulsions longues



Factorisation par somme de Gauss

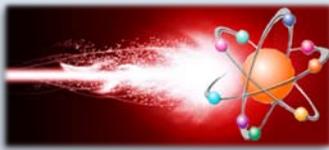
- Rôle de la somme de Gauss
- Mise en œuvre expérimentale et proposition théorique
- Méthode dite « aléatoire »
- Factorisation de nombre à 10 et 13 chiffres



Conclusion générale

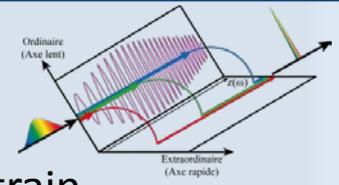
Considérations générales

- Contrôle cohérent en boucle ouverte
- Façonnage et caractérisation d'impulsions
- Systèmes variés



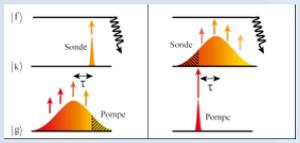
Façonnage dans l'UV

- Façonnage par interaction acousto-optique
- Diverses mises en forme (train d'impulsions, phases...)
- Fenêtre temporelle de l'ordre de 6 ps
- Efficacité de l'ordre de 20 à 40 %



Système pompe-sonde

- Rôle de la sonde dans un système à 3 niveaux
- Influence et compensation de la phase quadratique
- Dynamique courte avec des impulsions longues



Factorisation par somme de Gauss

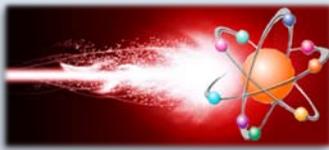
- Rôle de la somme de Gauss
- Mise en œuvre expérimentale et proposition théorique
- Méthode dite « aléatoire »
- Factorisation de nombre à 10 et 13 chiffres



Conclusion générale

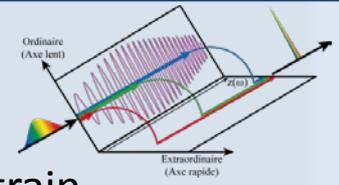
Considérations générales

- Contrôle cohérent en boucle ouverte
- Façonnage et caractérisation d'impulsions
- Systèmes variés



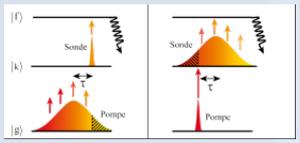
Façonnage dans l'UV

- Façonnage par interaction acousto-optique
- Diverses mises en forme (train d'impulsions, phases...)
- Fenêtre temporelle de l'ordre de 6 ps
- Efficacité de l'ordre de 20 à 40 %



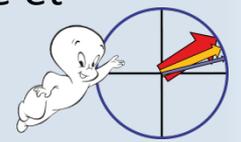
Système pompe-sonde

- Rôle de la sonde dans un système à 3 niveaux
- Influence et compensation de la phase quadratique
- Dynamique courte avec des impulsions longues



Factorisation par somme de Gauss

- Rôle de la somme de Gauss
- Mise en œuvre expérimentale et proposition théorique
- Méthode dite « aléatoire »
- Factorisation de nombre à 10 et 13 chiffres



Merci à vous

- Blabla blabla:
 - _____
 - _____
- Reblabla
 - _____
 - _____



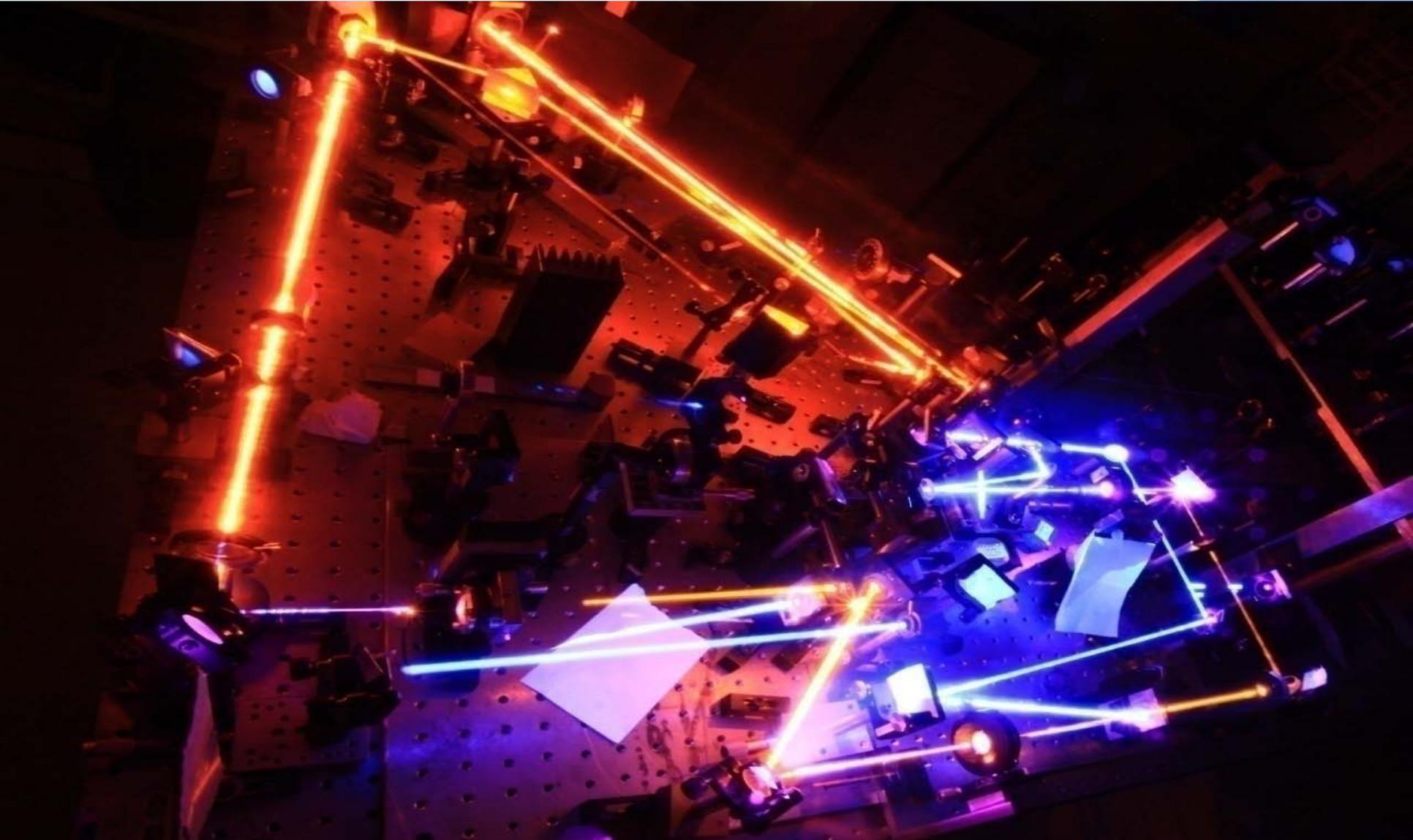
Merci de votre attention !

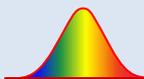
➤ Blabla blabla:

- _____
- _____

➤ Reblabla

- _____
- _____





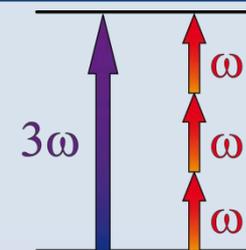




Différents schémas

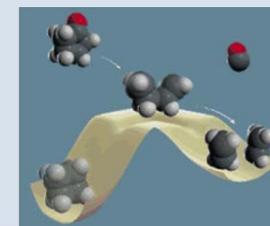
Contrôle cohérent : interférences à plusieurs couleurs

- **Théorie** : Brumer Shapiro *JCP* 86
- **Expérience** : Elliot et al. *PRL* 90 ; Gordon et al. *Science* 95



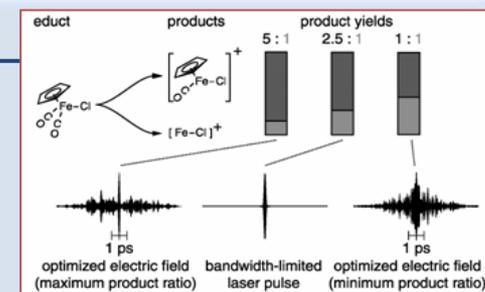
Contrôle temporel : séquence d'impulsions

- **Théorie** : Tannor, Kosloff, Rice *JCP* 86
- **Expérience** : Zewail et al. *Nature* 92



Contrôle optimal : mise en forme et boucle fermée

- **Théorie** : Rabitz et al. *PRL* 92, *Science* 93, *Science* 2001
- **Expérience** : Gerber et al. *Science* 98 ; Wöste et al. *CP* 2001





Outils et techniques

Mise en forme d'impulsions

- Façonneur infrarouge haute résolution:
 - ❑ Factorisation de grands nombresWeber et al. *EPL* **83** 34008 (2008)
 - ❑ Contrôle de la précession de Spin-Orbite . Chatel et al. *JPB* **41** 074023 (2008)
 - ❑ Transitoires cohérentsWeber et al. *PRA* **81** 023415 (2010)
 - ❑ Refroidissement de moléculesSofitikis et al. *NJP* **11** 055037 (2009)

- AOPDF UV
 - ❑ Façonnage et accordabilitéWeber et al. *APB* **98** 323 (2010)
 - ❑ Caractérisation dans le diamantWeber et al. *UVX* **15** (2009)

Caractérisation

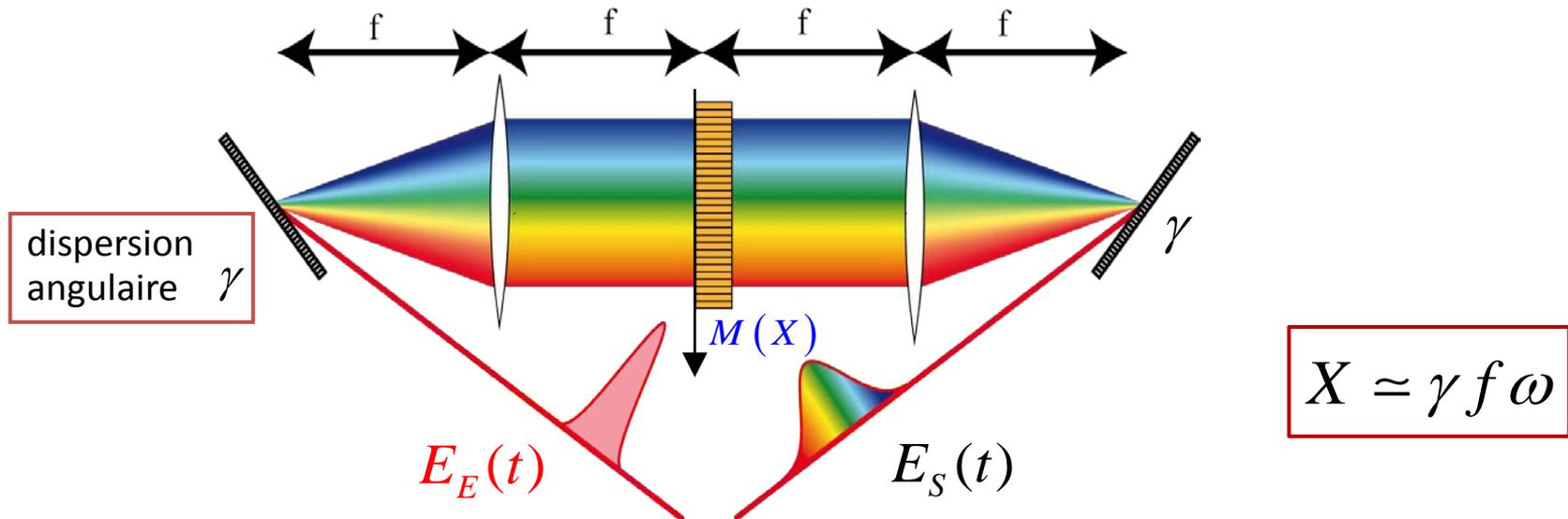
- Cross-corrélations
- XFROG
- SPIDER





Domaine femtoseconde

$$E(t) = A(t) e^{i\phi(t)} \stackrel{TF/TF^{-1}}{\Leftrightarrow} \tilde{E}(\omega) = A(\omega) e^{i\phi(\omega)}$$



$$\tilde{E}_S(\omega) = A_M(\omega) e^{i\phi_M(\omega)} \tilde{E}_E(\omega)$$



Représentation du champ

Enveloppe et phase spectrale

$$A(\omega) \text{ et } \phi(\omega)$$

Intensité temporelle

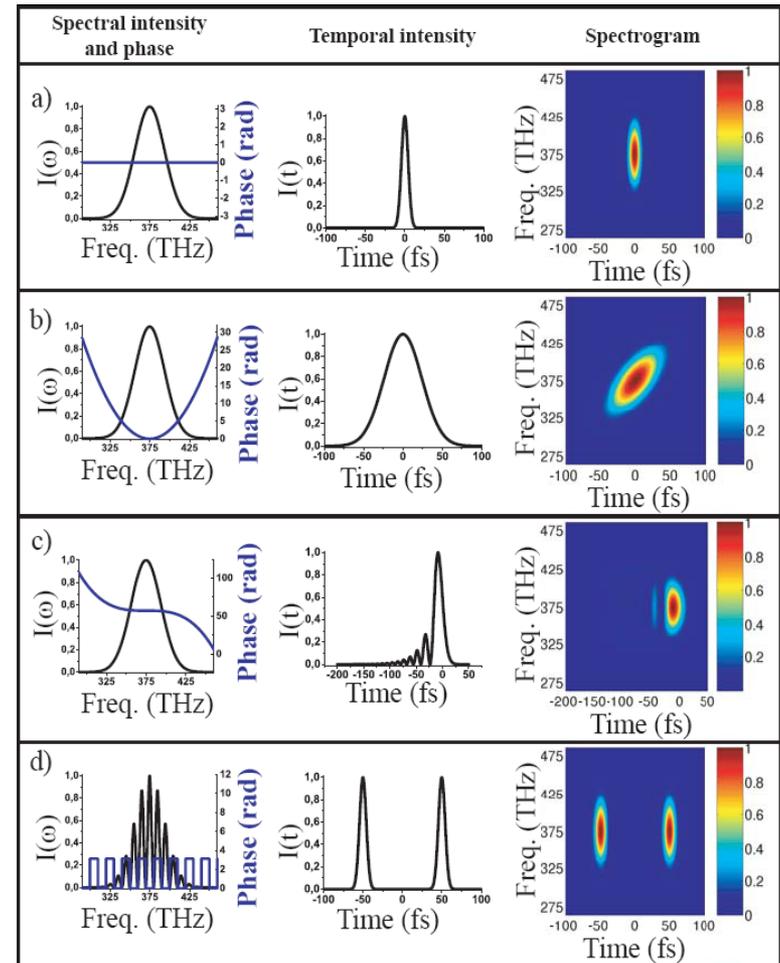
$$A^2(t)$$

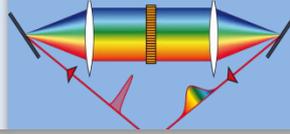
Spectrogramme

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

Tutorial façonnage et caractérisation

A. Monmayrant, S. Weber et B. Chatel
Journal of Physics B **43** 103001 (2010)

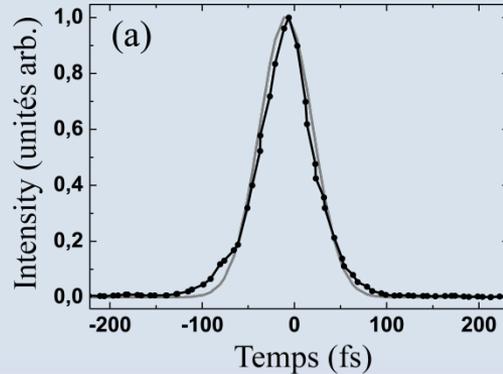




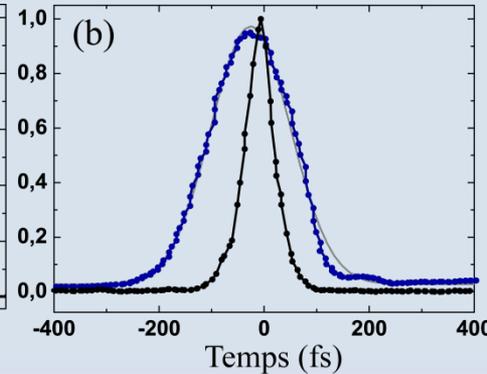
Résultats

@
4
0
0
n
m

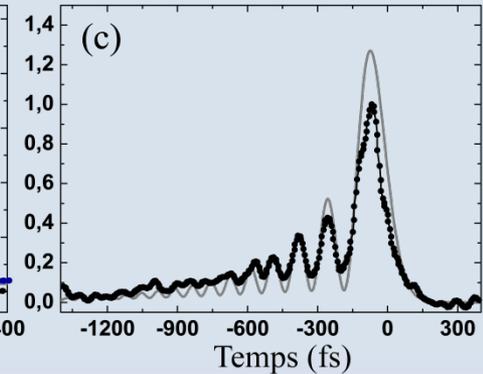
Impulsion comprimée
à sa limite TF 62 fs



Phase quadratique
 $\phi^{(2)} = -2000 \text{ fs}^2$

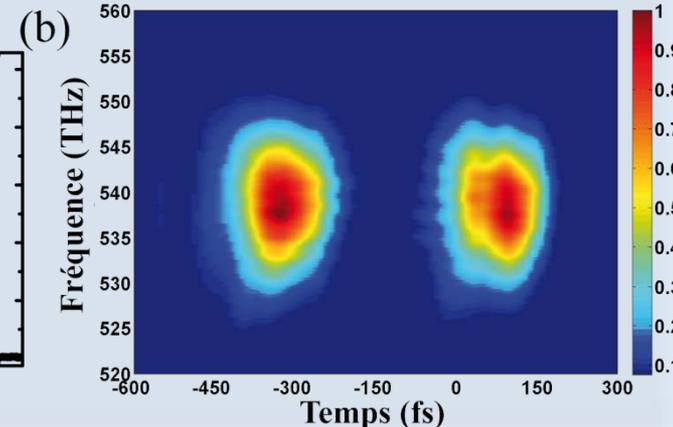
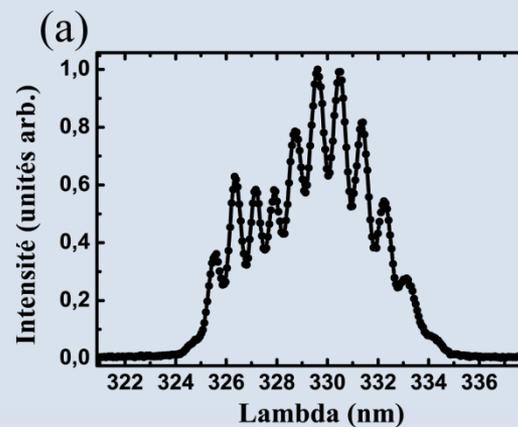


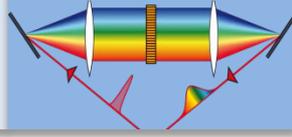
Phase cubique
 $\phi^{(3)} = -1.10^6 \text{ fs}^3$



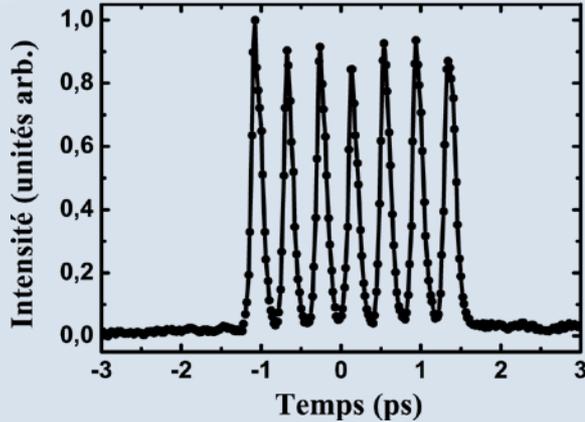
@
3
3
0
n
m

- Train de deux impulsions limitées TF retardées de 400 fs
- Faible signal (instabilité du NOPA)
- Spectrogramme en accord avec la théorie

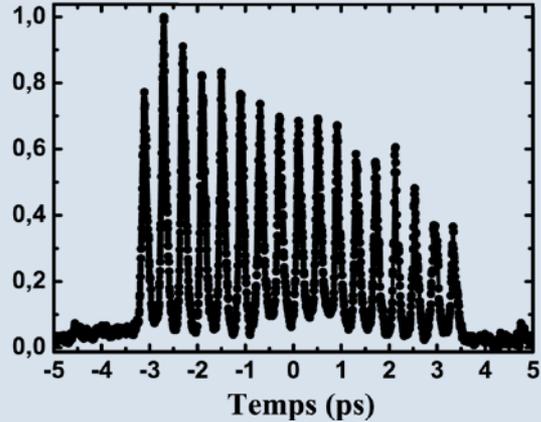




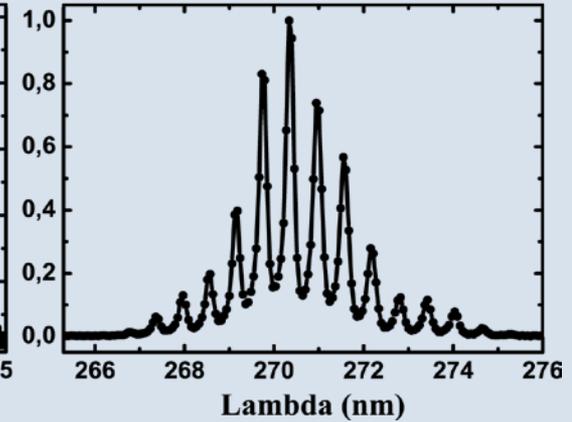
Résultats @270 nm



Train de 7 impulsions
séparées de 400 fs

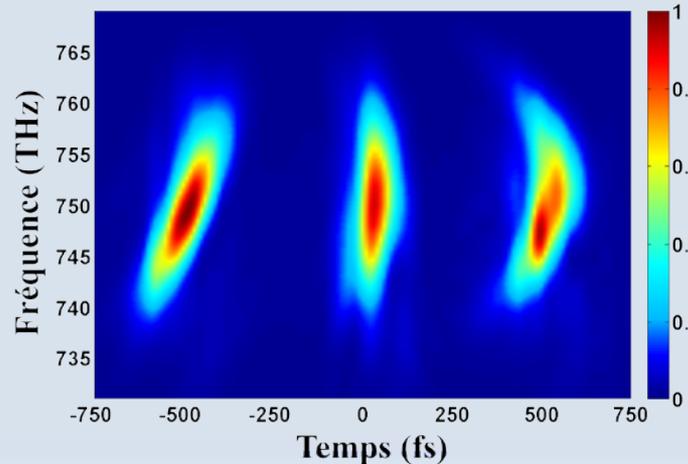


Train de 17 impulsions
séparées de 400 fs

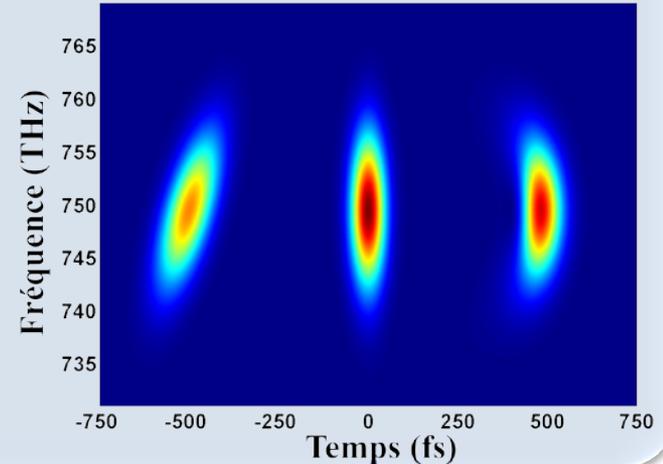


Spectre du train

Spectrogramme expérimental

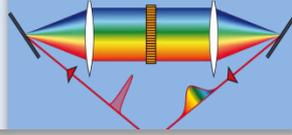


Spectrogramme théorique



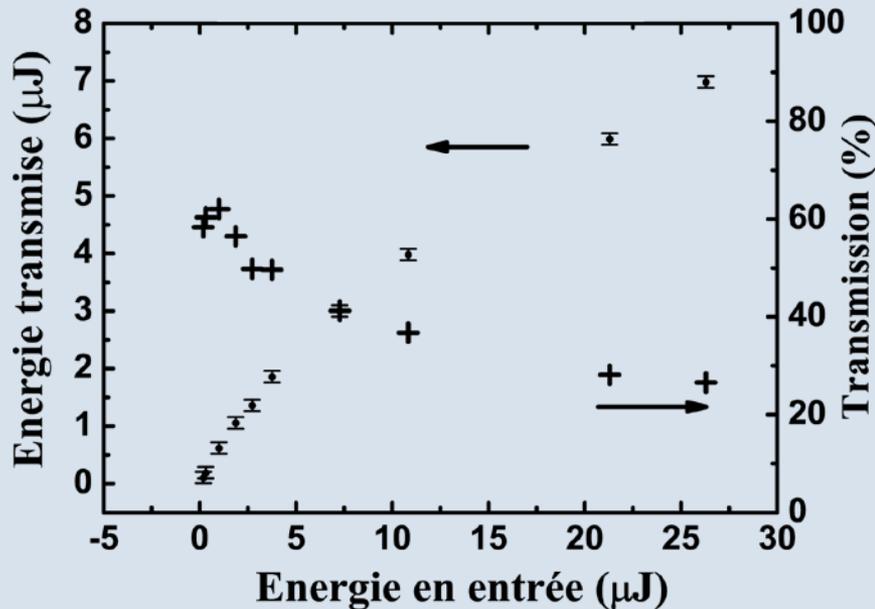
Spectrogrammes d'un
train de 3 impulsions
espacées de 500 fs :

- 1) $\phi^{(2)} = 2000 \text{ fs}^2$
- 2) Limitée TF
- 3) $\phi^{(3)} = -10^5 \text{ fs}^3$

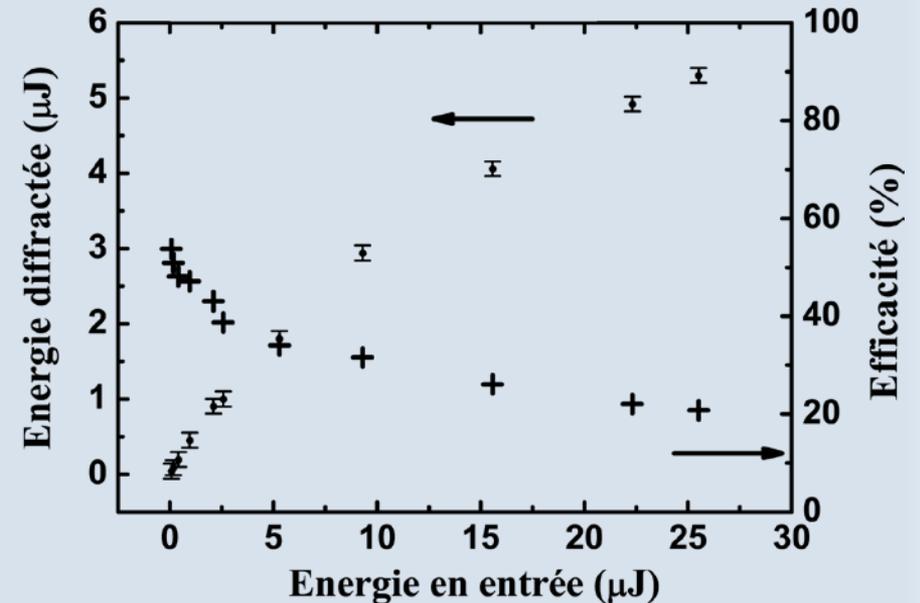


Efficacité de diffraction à 270 nm

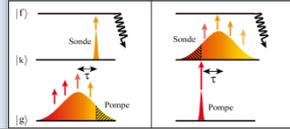
Energie transmise sans diffraction



Energie diffractée

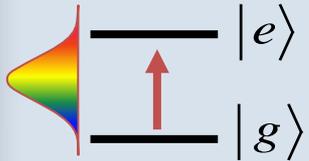


Variation non linéaire de l'efficacité synonyme d'une absorption à deux photons

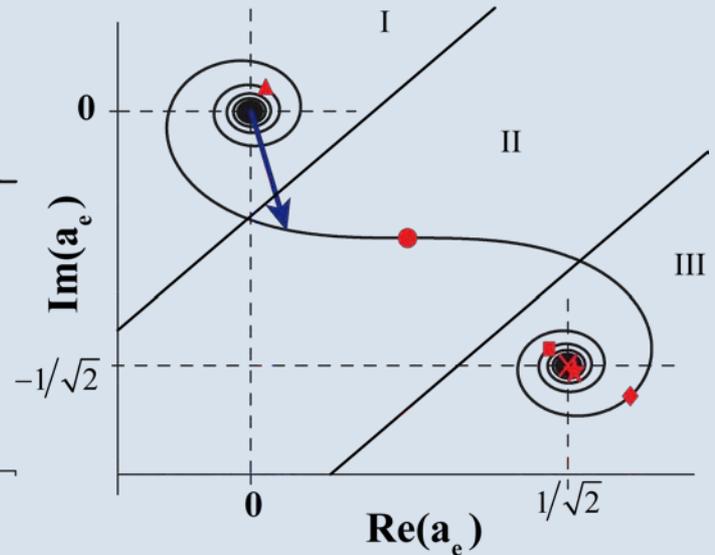
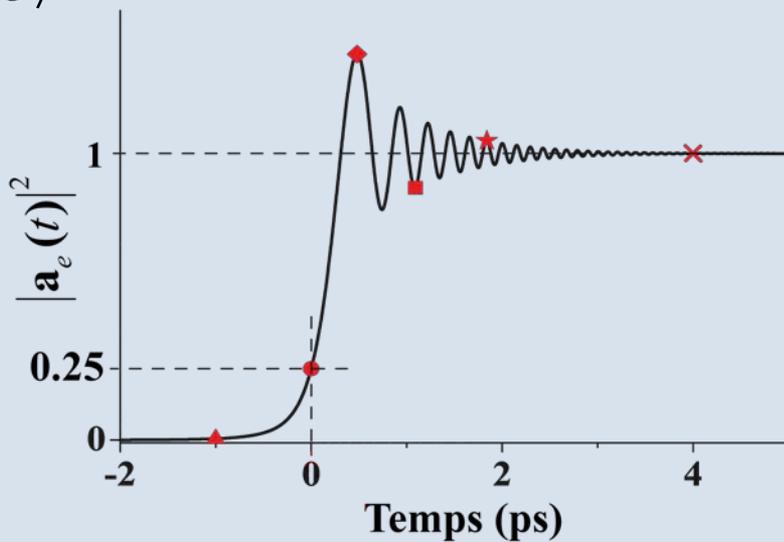


Excitation par une impulsion chirpée

Population de l'état excité : « transitoires cohérents »



N. V. Vitanov et al. *PRA* **59**, 988 (1999)

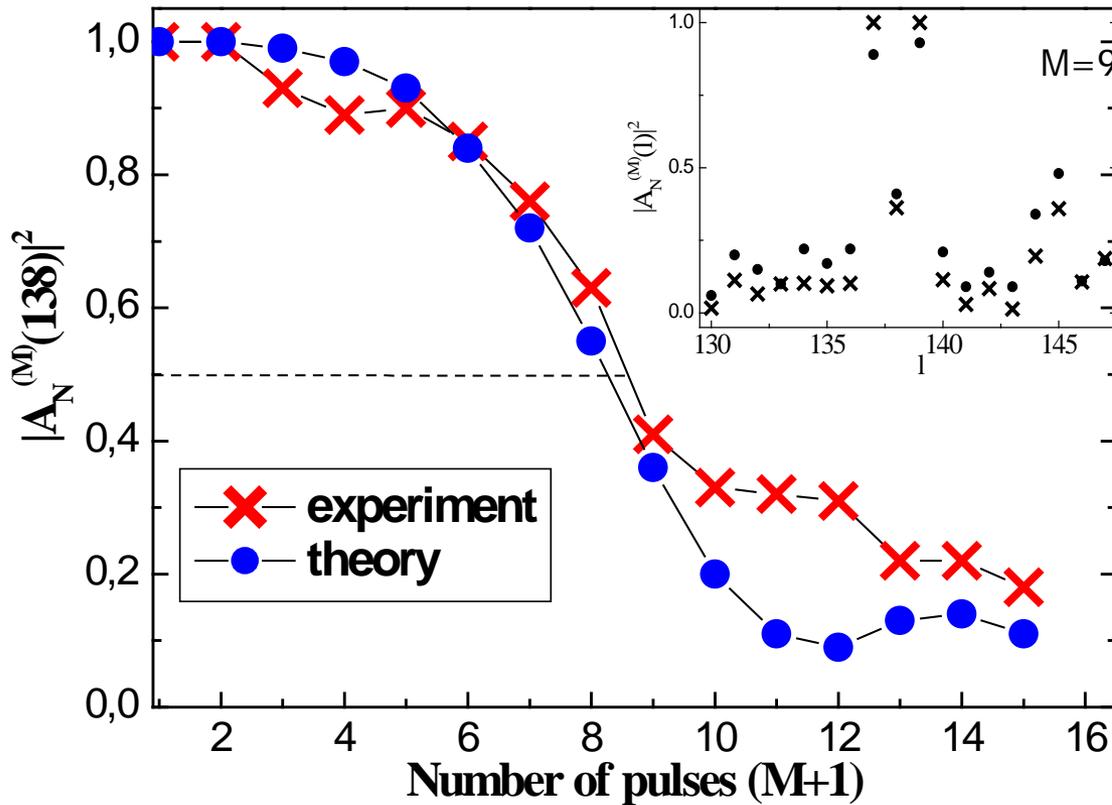


$$a_e(t) \propto \int_{-\infty}^t e^{-2\ln 2 \left(\frac{t'}{\tau_c}\right)^2} e^{-i\frac{t'^2}{2\phi''}} dt'$$

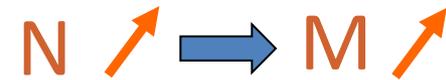
Intégrale d'une phase quadratique équivalente à la diffraction de Fresnel

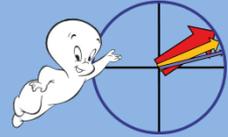
Influence of the pulse number

$$N=19043=137*139 \quad k=138$$



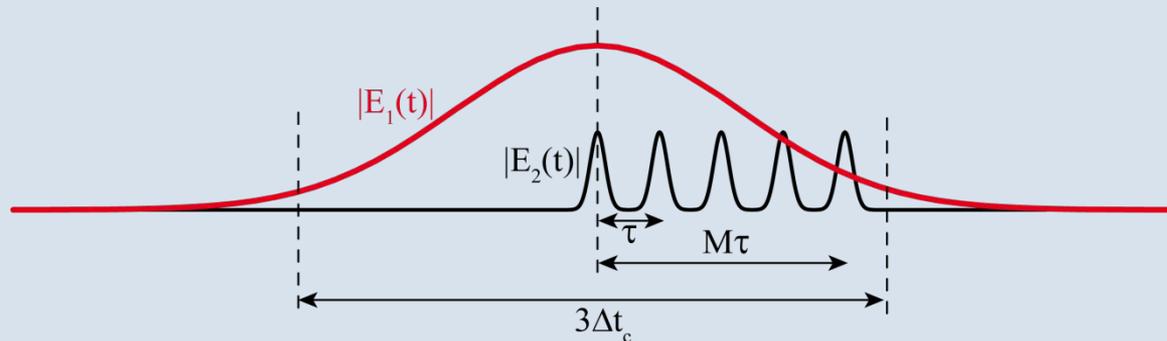
How far can we go?





Proposition théorique

Somme de fréquence



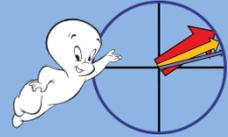
$$\tilde{E}_{\text{SFG}}(2\omega_0) \propto \sum_{m=0}^M \exp\left\{2im^2 \frac{\tau^2}{\phi^{(2)}}\right\} \equiv \sum_{m=0}^M \exp\left\{2i\pi m^2 \frac{N}{l}\right\}$$

$$\textcircled{1} \quad \frac{N}{l} = \frac{\tau^2}{\pi |\phi^{(2)}|}$$

$$\textcircled{2} \quad |\phi^{(2)}| \geq \frac{4}{3} \Delta t_0 M \tau$$

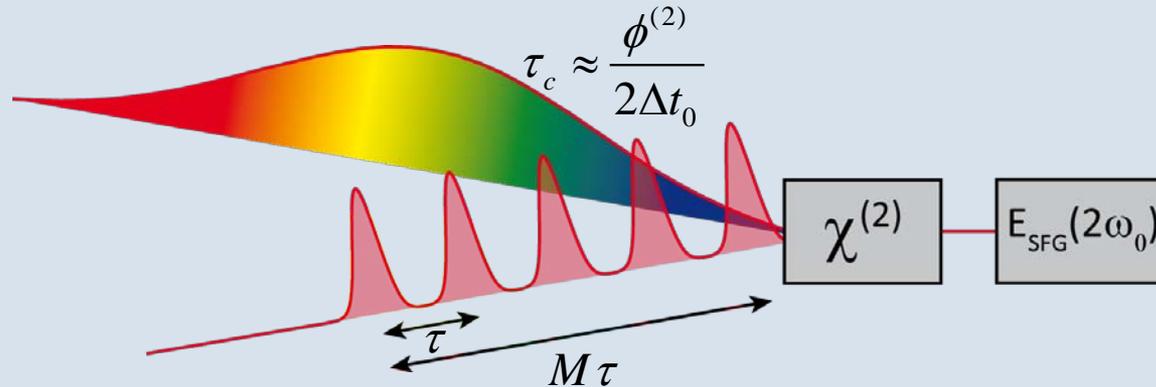
$$\textcircled{3} \quad \left(\frac{N}{l}\right)_{\min} = \sqrt{N}$$

$$\textcircled{4} \quad \left(\frac{N}{l}\right)_{\max} = N$$



Proposition théorique

Somme de fréquence : impulsions produite par un Fabry-Pérot



$$\tilde{E}_{\text{SFG}}(2\omega_0) \propto \sum_{m=0}^M \exp \left\{ 2im^2 \frac{\tau^2}{\phi^{(2)}} + \boxed{im\tau\omega_0} \right\} \equiv \sum_{m=0}^M \exp \left\{ 2i\pi m^2 \frac{N}{l} \right\}$$

- Fabry-Perot : la phase varie linéairement avec le délai $m\tau$.
- Pour obtenir la factorisation il faut des délais multiple de la période T :

$$\tau = pT = p \frac{2\pi}{\omega_0}$$

- Nécessite une stabilité interférométrique du Fabry-Pérot et une très bonne précision sur le délai.