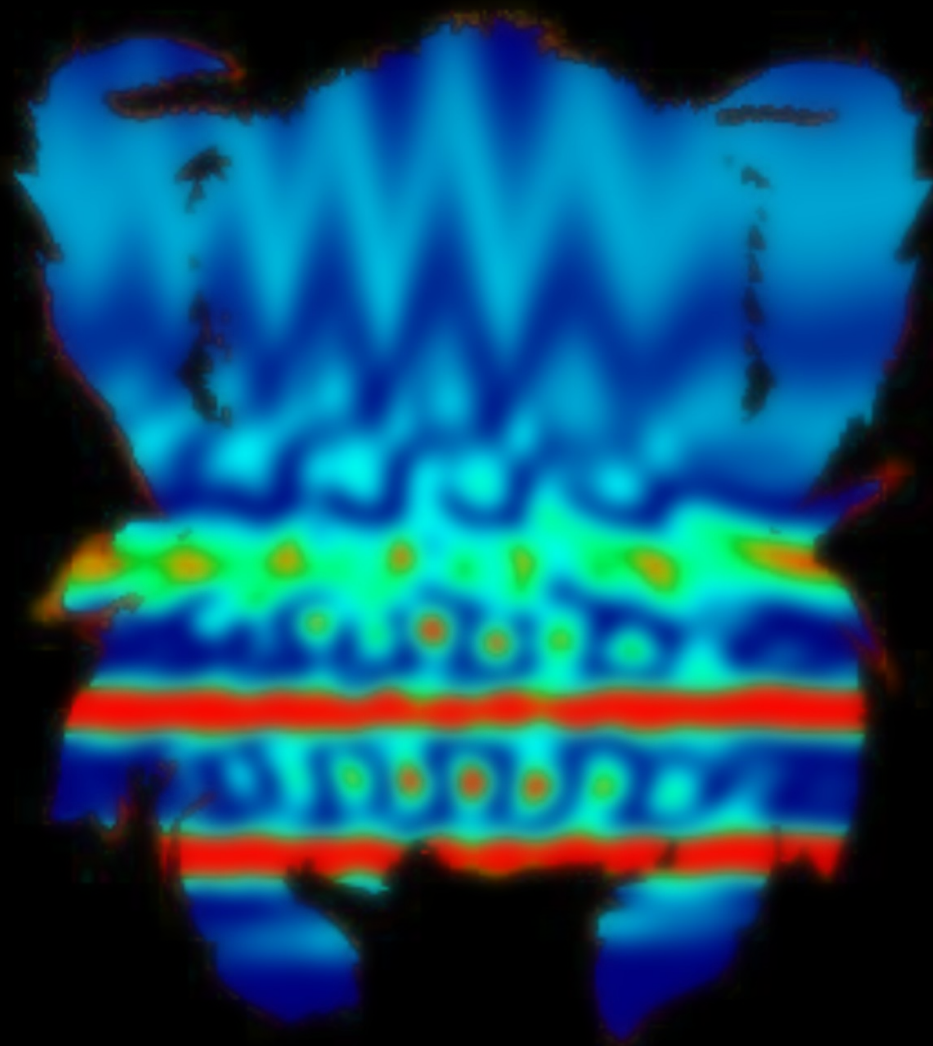


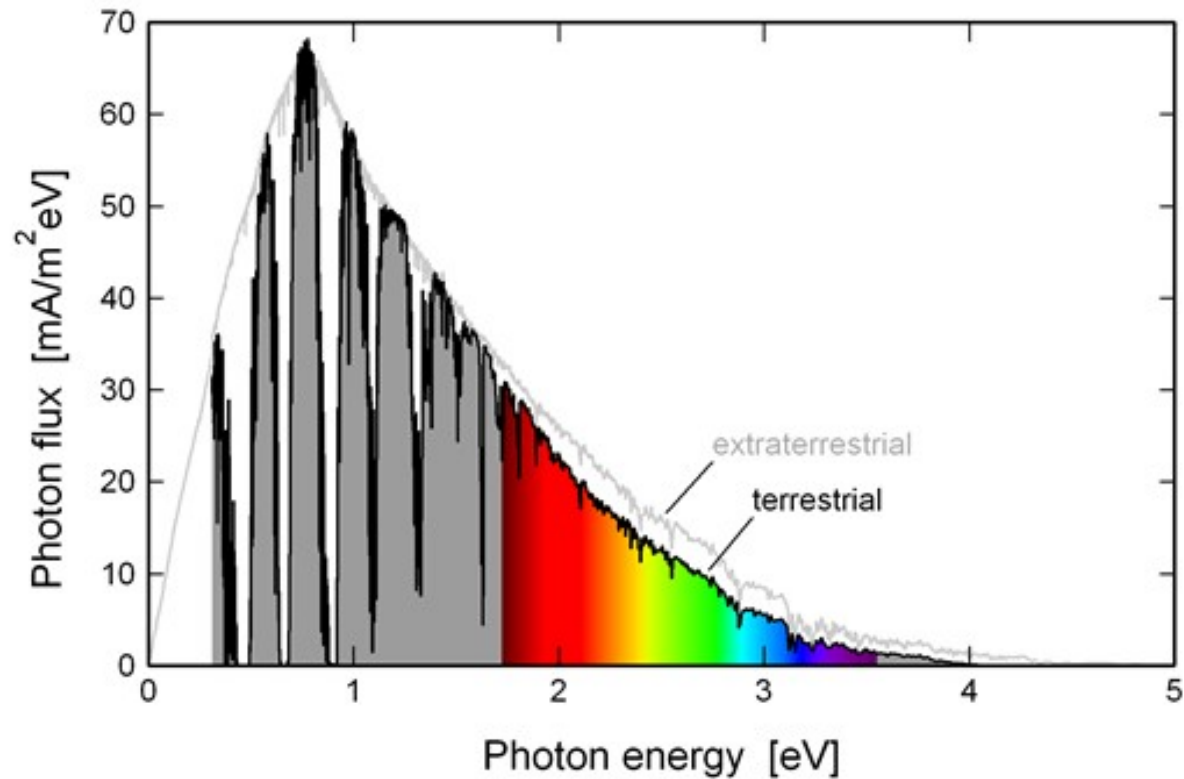
Caractérisation d'impulsions attosecondes



Yann Mairesse – CELIA – yann.mairesse@u-bordeaux.fr
harmodyn.celia.u-bordeaux.fr

Temps et spectre

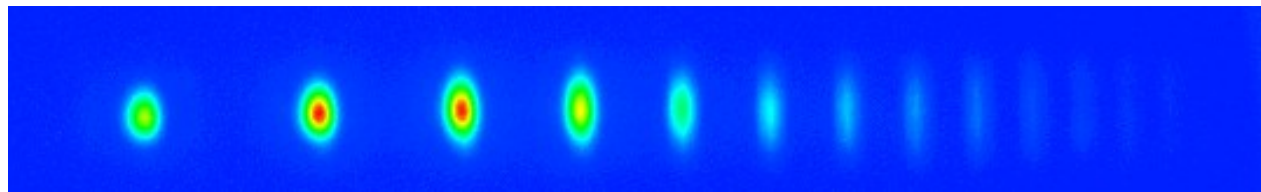
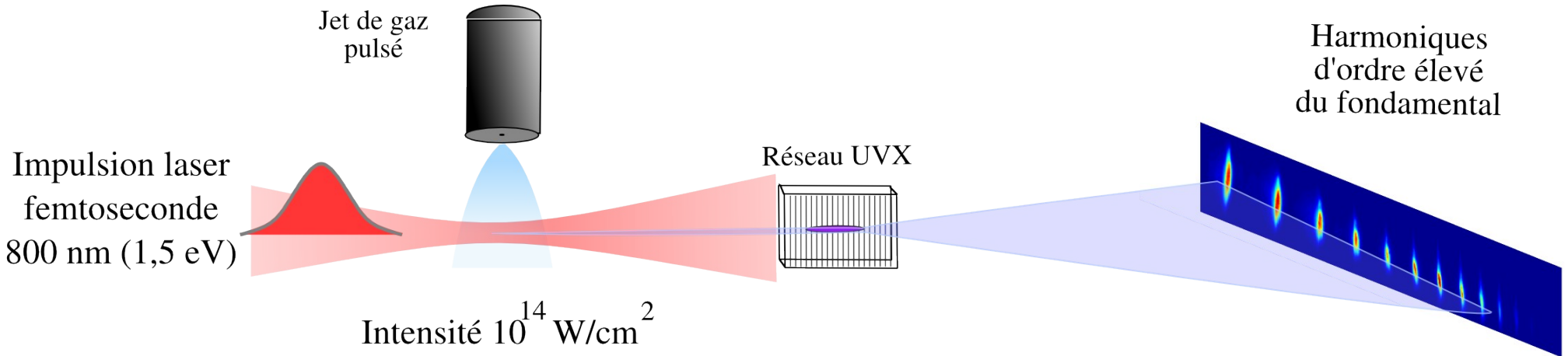
Spectre solaire :



Impulsions attosecondes : nécessite une largeur spectrale de plusieurs eV
→ domaine VUV-XUV

Source large bande et cohérente dans l'XUV ?

Génération d'harmoniques d'ordre élevé dans les gaz



H15
23.3eV

H21
32.6eV

H27
41.9eV

H39
60.5eV

J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **21** (1988) L31-L35. Printed in the UK

LETTER TO THE EDITOR

**Multiple-harmonic conversion of 1064 nm radiation
in rare gases**

M Ferray, A L'Huillier, X F Li, L A Lompré, G Mainfray and C Manus
Service de Physique des Atomes et des Surfaces, 91191 Gif sur Yvette, Cédex, France

Received 2 November 1987

Découverte en 1988 (Saclay - Chicago)

Emission cohérente (spatialement et temporellement)

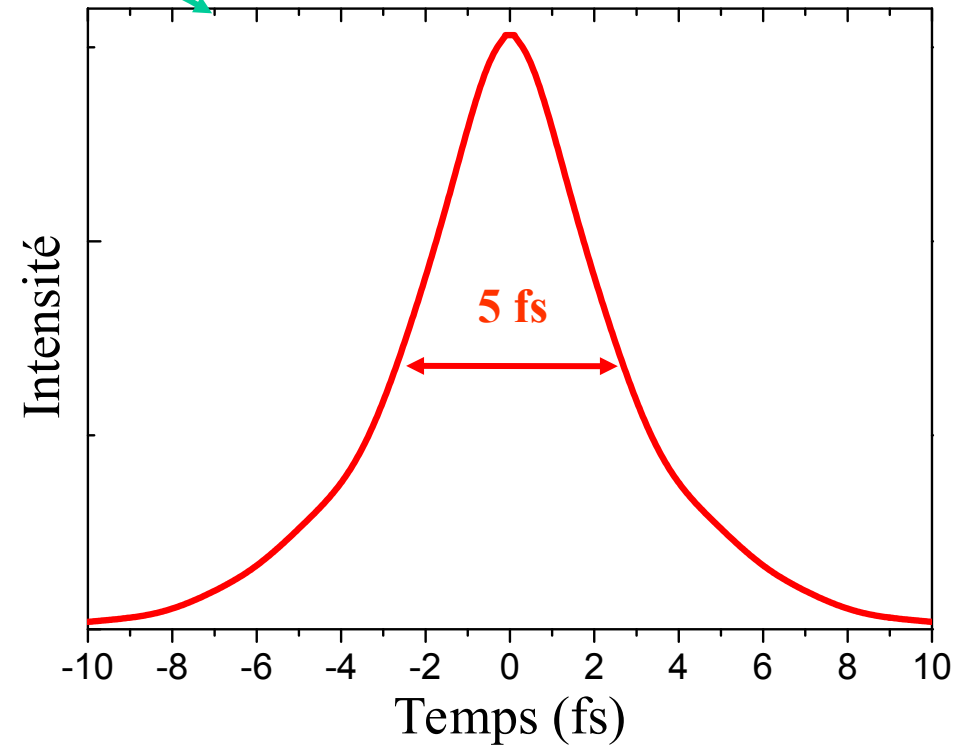
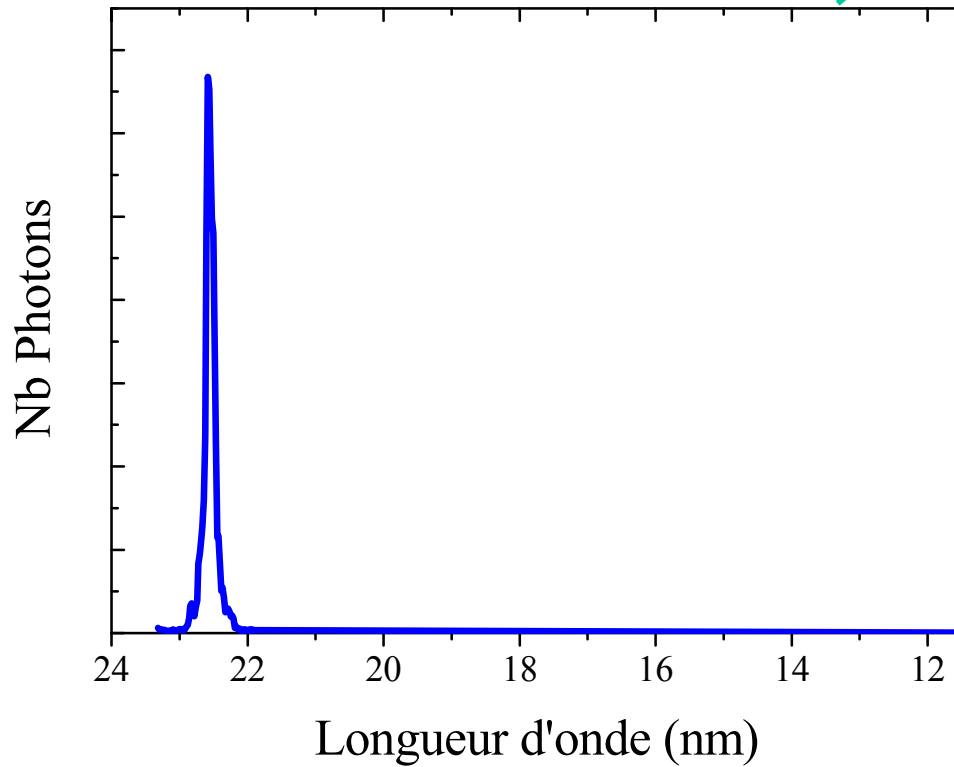
Large gamme spectrale

Brillante : jusque $\sim 10^{10}$ photons par tir / 10^{14} photons par seconde

Source d'impulsions attosecondes ?

Profil temporel d'une harmonique ?

Transformée de Fourier

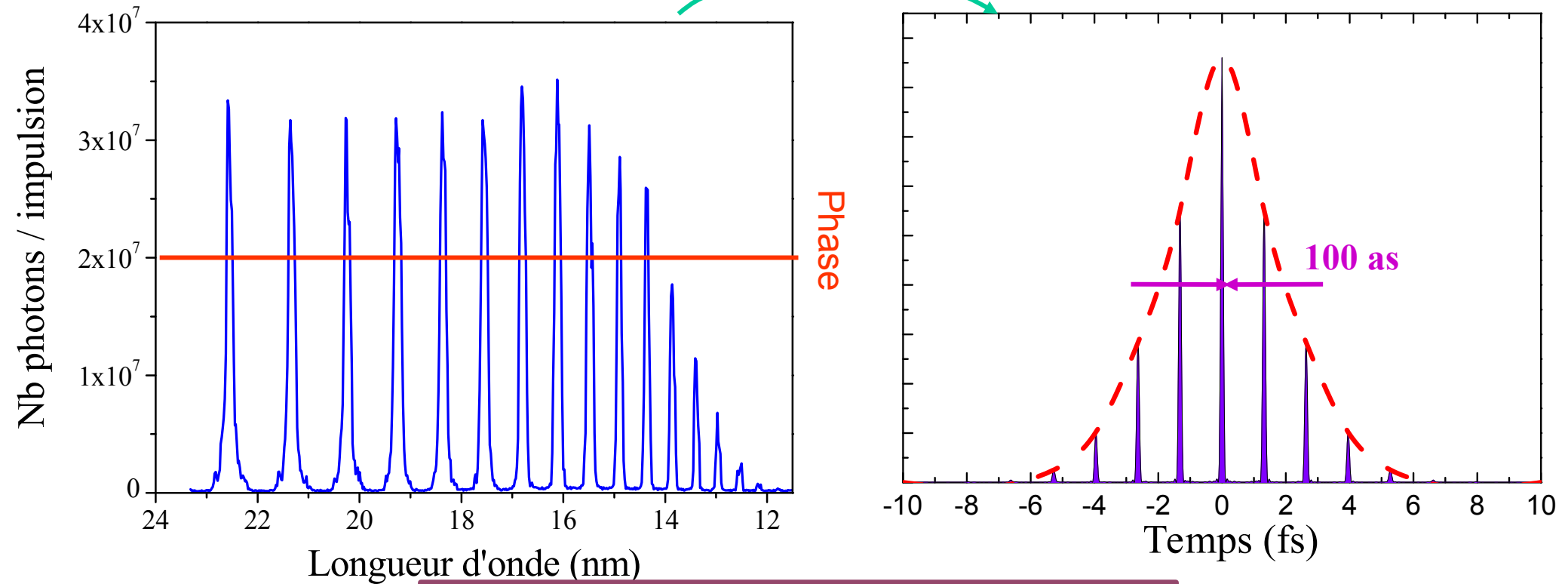


Emission à l'échelle femtoseconde

Déterminé par la durée de l'impulsion laser génératrice

Superposition de plusieurs harmoniques

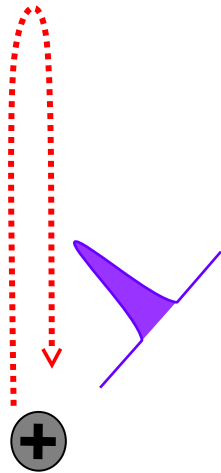
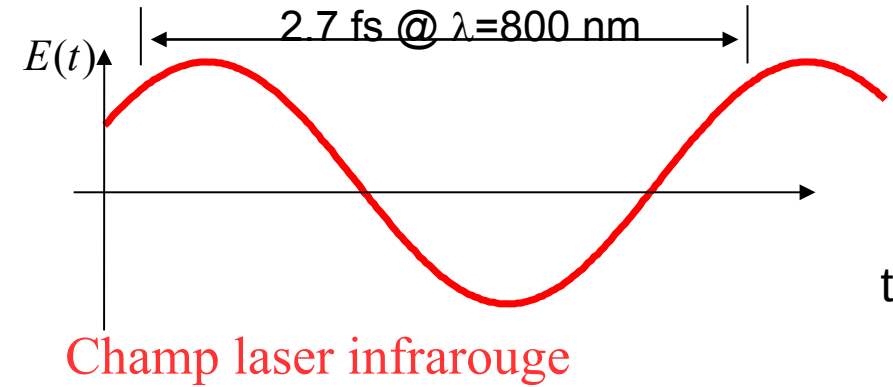
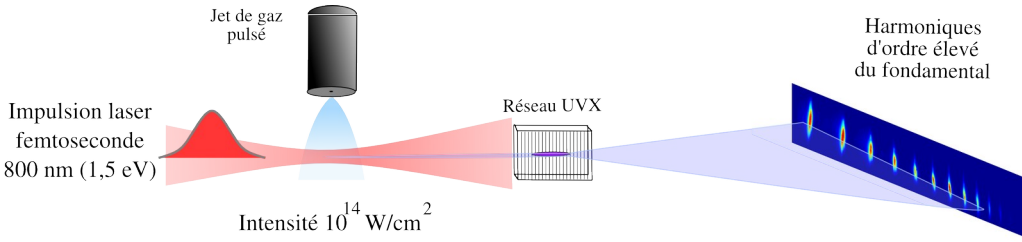
Transformée de Fourier



Train d'impulsions attosecondes

Gy. Farkas & Cs. Toth, Phys Lett A 168 447 (1992)
S.E. Harris et al, Opt. Commun. 100 487 (1993)

Mécanisme d'émission des impulsions attosecondes ?



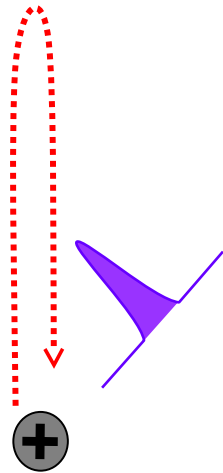
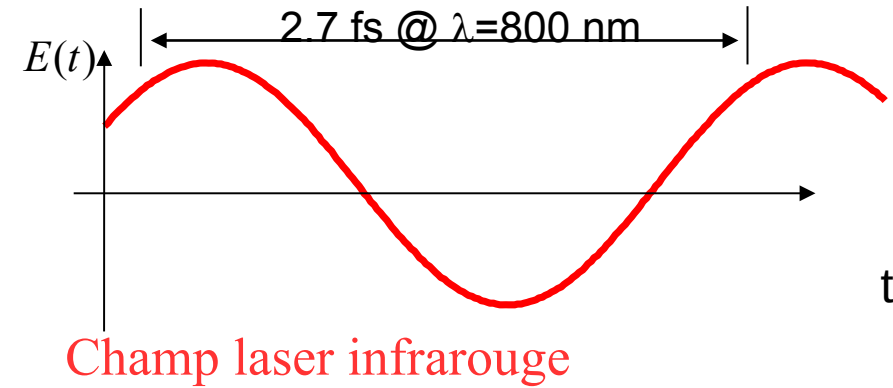
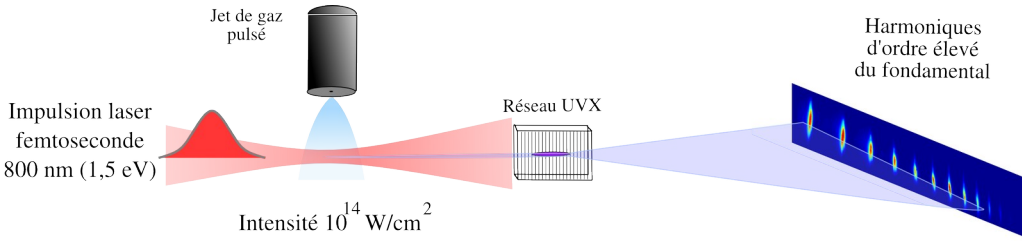
Le champ électrique du laser :

- arrache un électron (effet tunnel)
- accélère cet électron
- le ramène vers l'ion parent
→ recombinaison radiative

→ **Émission d'une impulsion attoseconde**

M. Yu Kuchiev, JETP Lett, 45, 405 (1987)
P.B. Corkum PRL 71, 1994 (1993)
K. Kulander et al. SILAP (1993)

Mécanisme d'émission des impulsions attosecondes ?



Le champ électrique du laser :

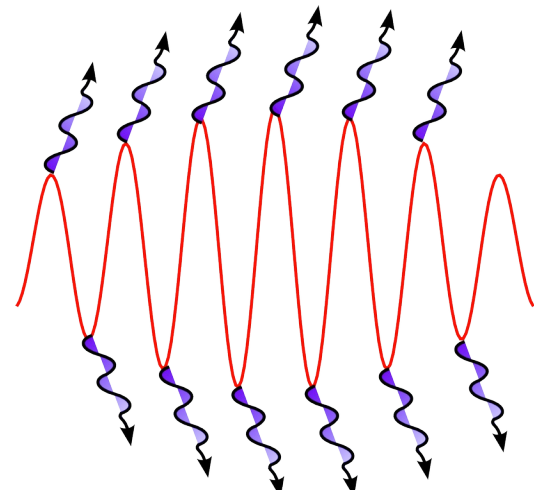
- arrache un électron (effet tunnel)
- accélère cet électron
- le ramène vers l'ion parent
→ recombinaison radiative

→ **Émission d'une impulsion attoseconde**

M. Yu Kuchiev, JETP Lett, 45, 405 (1987)
P.B. Corkum PRL 71, 1994 (1993)
K. Kulander et al. SILAP (1993)

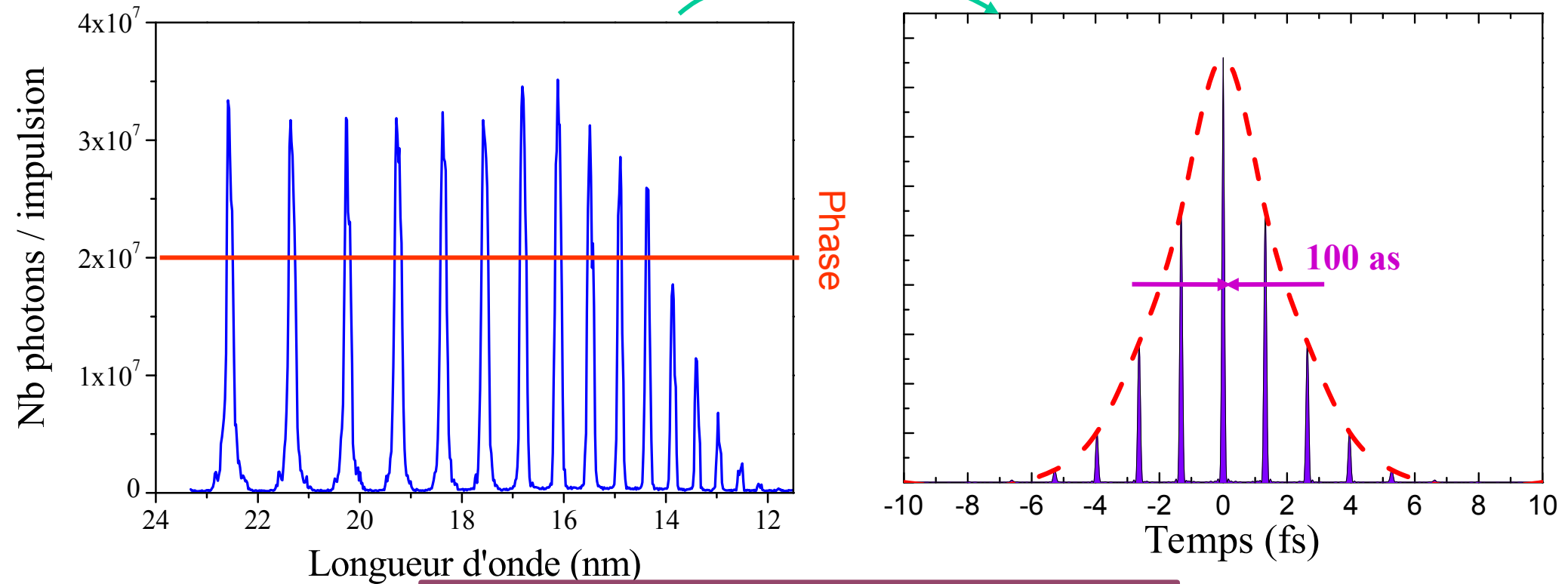
Une impulsion attoseconde est émise à chaque demi-période laser

→ **Train d'impulsion attoseconde**



Superposition de plusieurs harmoniques

Transformée de Fourier



Train d'impulsions attosecondes

Gy. Farkas & Cs. Toth, Phys Lett A 168 447 (1992)
S.E. Harris et al, Opt. Commun. 100 487 (1993)

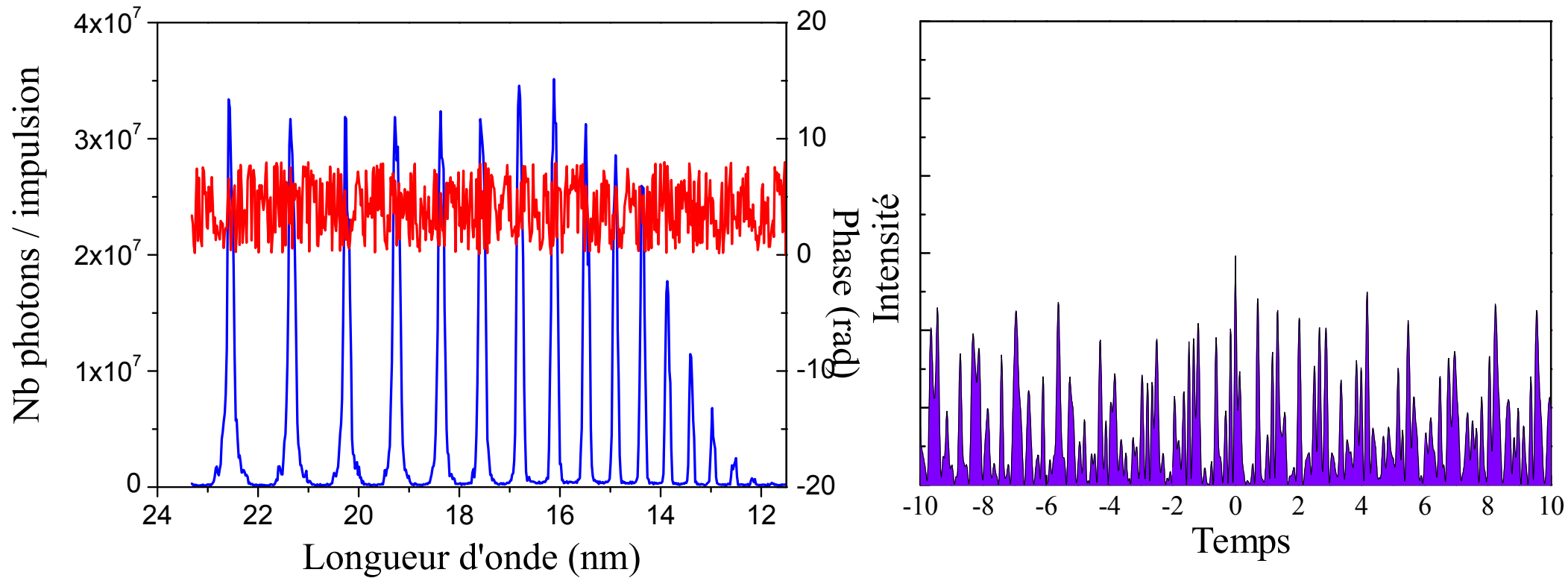
Superposition de N
harmoniques

$$\tau \approx \frac{T_0}{2N} \rightarrow$$

$\tau < 10$ as avec 300 harmoniques

Attention à la phase spectrale !

Effet d'une phase spectrale aléatoire



→ **Nécessité de caractériser la phase spectrale (ou le profil temporel)**

Caractérisation d'impulsions ultrabrèves

De nombreuses techniques existent dans le domaine visible/IR

Autocorrélation non-linéaire

D-Scan

SPIDER (Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-field Reconstruction)

FROG (Frequency-Resolved Optical Gating)

TADPOLE

GRENOUILLE

ARAIGNEE (Another Ridiculous Acronym InvolvinG Non-iterative E-field Extraction)

Nécessité d'un effet non-linéaire ou d'un filtre non-stationnaire

Difficile dans l'XUV

Les effets non-linéaires sont peu efficaces dans cette gamme spectrale

Les sources lumineuses sont bien moins intenses

Rappel : efficacité de conversion en génération d'harmoniques d'ordre élevé : 10^{-5}

Ce problème est résolu par l'utilisation de lasers à électrons libres X

**Il faut de nouvelles techniques
Et de nouveaux acronymes ridicules**

FROG-CRAB
FROMAGE
ESCARGOT...

Comment caractériser les impulsions attosecondes ?

Interférométrie de photoélectrons:

- (i) convertir l'impulsion lumineuse en paquet d'ondes électronique
- (ii) caractériser le profil temporel du paquet d'ondes électronique en utilisant des techniques d'interférométrie électronique

Utilisation du mécanisme de génération d'harmoniques:

- manipulation temporelle du front d'onde : attosecond lighthouse
- manipulation temporelle des trajectoires électroniques

Génération et caractérisation d'impulsions attosecondes

Introduction : harmoniques et attosecondes

I – Mesure de trains d'impulsions attosecondes

II – Mesure d'impulsions attosecondes arbitraires :
FROGCRAB et ses évolutions

III – Mesures in-situ / manipulation du mécanisme de génération

Comment caractériser les impulsions attosecondes ?

Interférométrie de photoélectrons:

- (i) convertir l'impulsion lumineuse en paquet d'ondes électronique
- (ii) caractériser le profil temporel du paquet d'ondes électronique en utilisant des techniques d'interférométrie électronique

Pour convertir une impulsion lumineuse en paquet d'ondes électronique, il suffit de photoioniser un gaz : effet photoélectrique

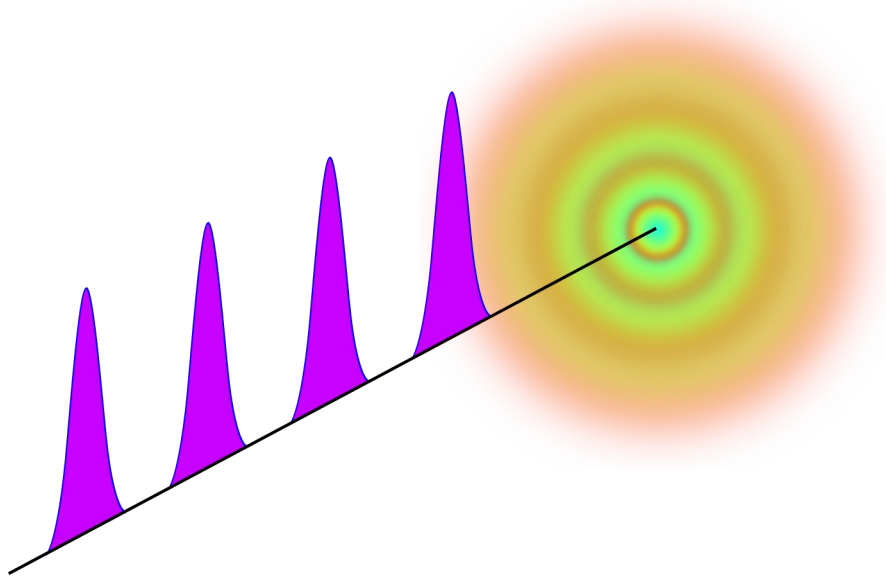
Mécanismes d'ionisation

I-Absorption d'un photon : effet photoélectrique

L'énergie du photon absorbé doit être supérieure au potentiel d'ionisation de l'espèce considérée
→ Domaine VUV (Vacuum Ultraviolet) / XUV (Extreme Ultraviolet) : $E_{\text{phot}} > 10\text{eV}$

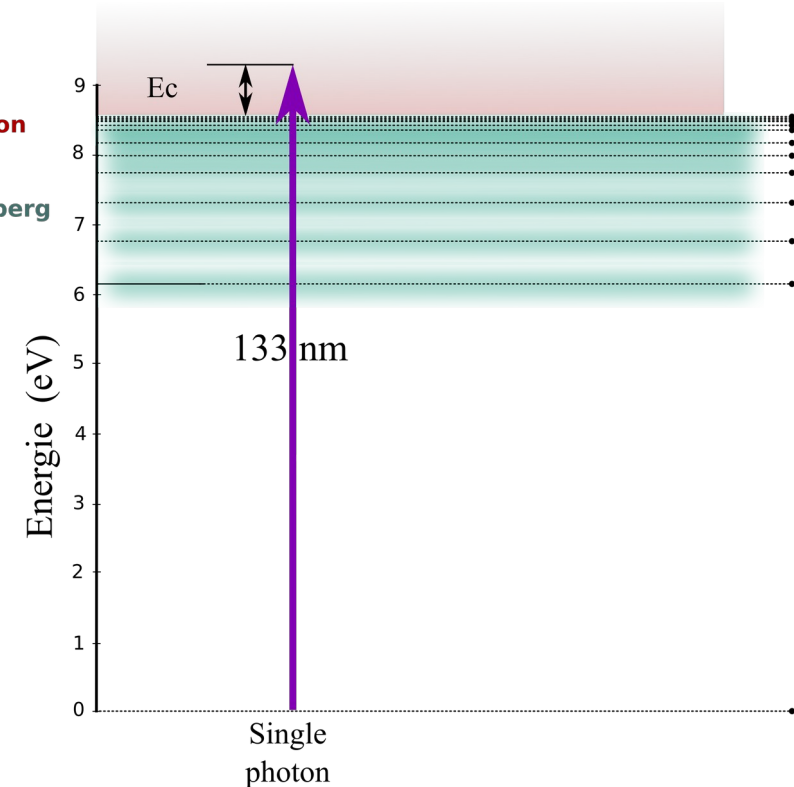
Produit un électron d'énergie cinétique $E_{\text{phot}} - I_p$

La lumière XUV permet de photoioniser n'importe quel matériau, même à très faible intensité (processus linéaire)



Seuil d'ionisation

Etats de Rydberg



Caractérisation du paquet d'ondes électronique ?
Interférométrie ?

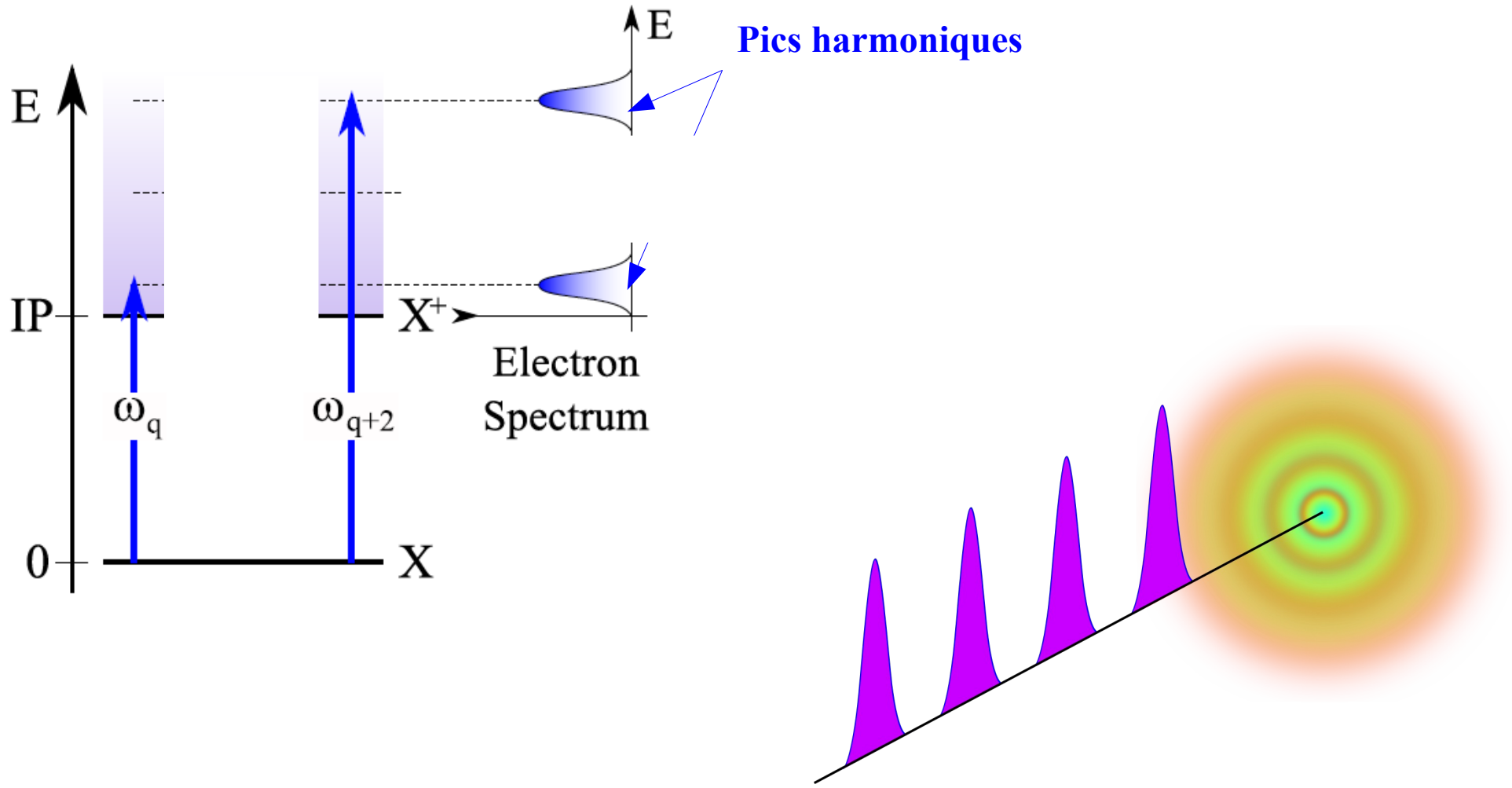
Mesure de trains d'impulsions attosecondes : RABBITT

Reconstruction of Attosecond Beating by Interference of Two-photon Transitions

V. Véliard et al., PRA 54, 721 (1996)

Principe :

Ionisation d'un gaz par absorption d'harmoniques



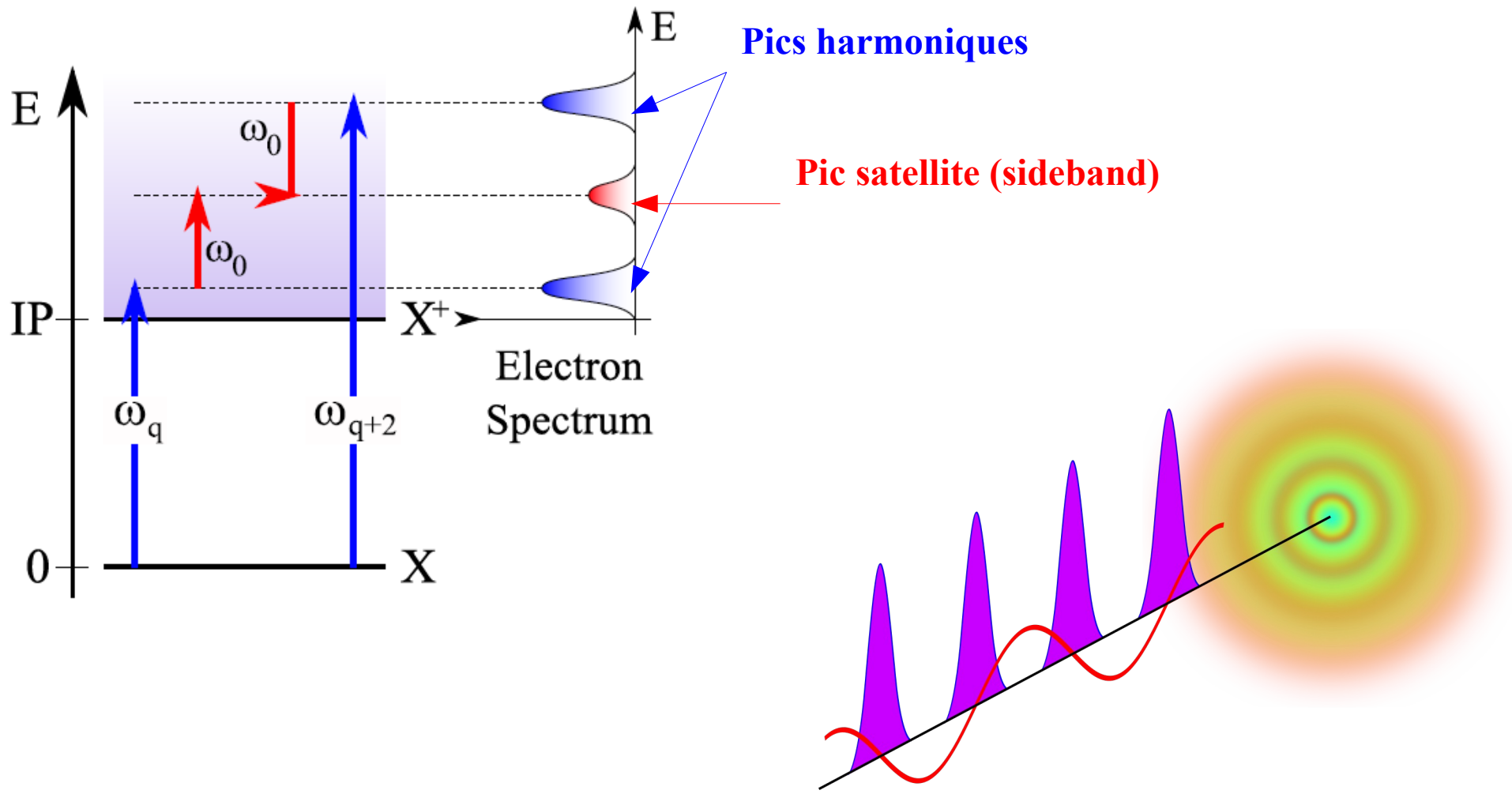
Mesure de trains d'impulsions attosecondes : RABBITT

Reconstruction of Attosecond Beating by Interference of Two-photon Transitions

V. Véniard et al., PRA 54, 721 (1996)

Principe :

Ionisation d'un gaz par absorption d'harmoniques + IR



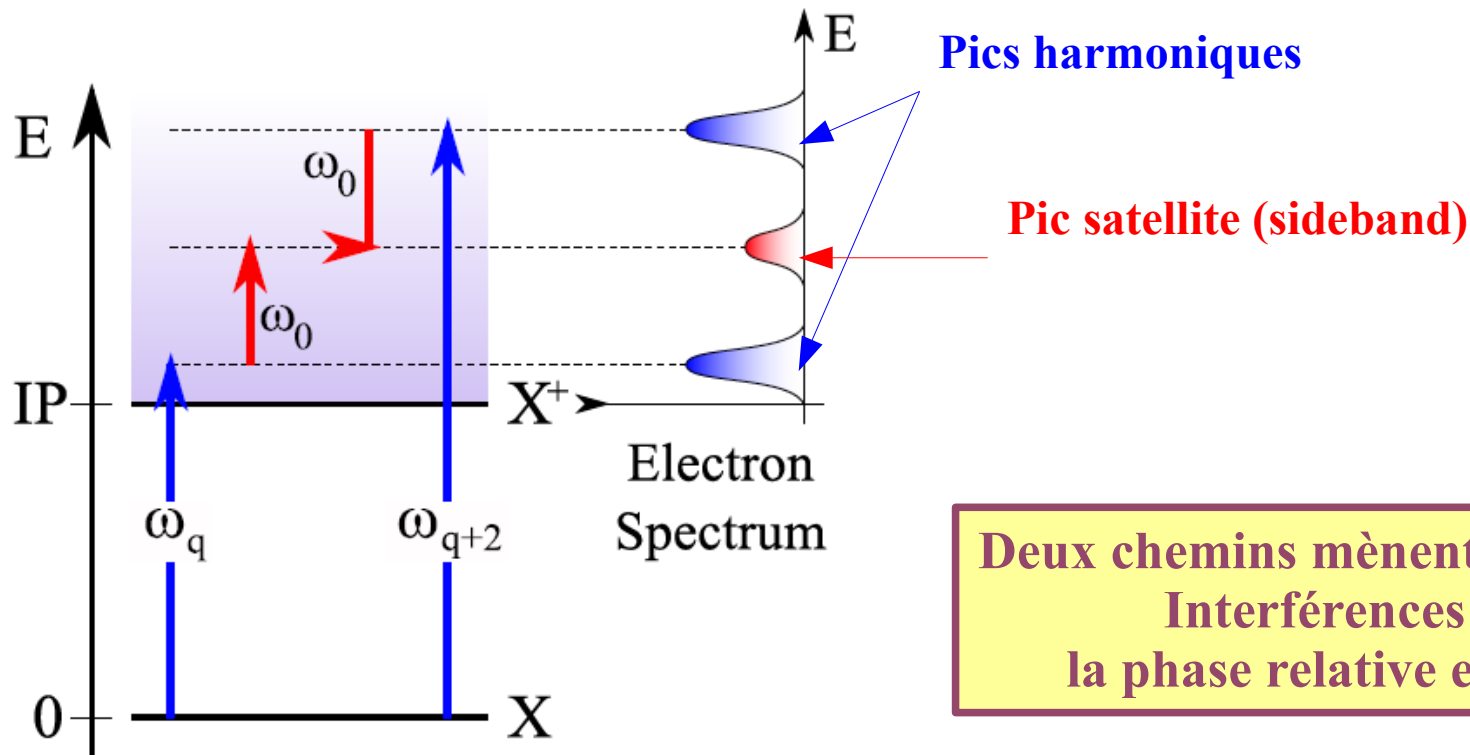
Mesure de trains d'impulsions attosecondes : RABBITT

Reconstruction of Attosecond Beating by Interference of Two-photon Transitions

V. Véniard et al., PRA 54, 721 (1996)

Principe :

Ionisation d'un gaz par absorption d'harmoniques + IR



Deux chemins mènent au même pic satellite
Interférences qui encodent
la phase relative entre harmoniques

L'intensité du satellite $2q$ comporte un terme oscillant :

$$I_{2q} = I_{2q}^0 \cos \left(\underbrace{2\varphi_{IR}}_{\text{Habillage}} + \underbrace{\varphi(\omega_{2q+1}) - \varphi(\omega_{2q-1})}_{\text{Harmoniques}} + \underbrace{\theta_{2q+1} - \theta_{2q-1}}_{\text{Détection}} \right)$$

Mesure de trains d'impulsions attosecondes : RABBITT

Reconstruction of Attosecond Beating by Interference of Two-photon Transitions

Réalisation expérimentale:

P.M. Paul et al., Science 292, 1689 (2001)

Observation of a Train of Attosecond Pulses from High Harmonic Generation

P. M. Paul,¹ E. S. Toma,² P. Breger,¹ G. Mullot,³ F. Augé,³
Ph. Balcou,³ H. G. Muller,^{2*} P. Agostini¹

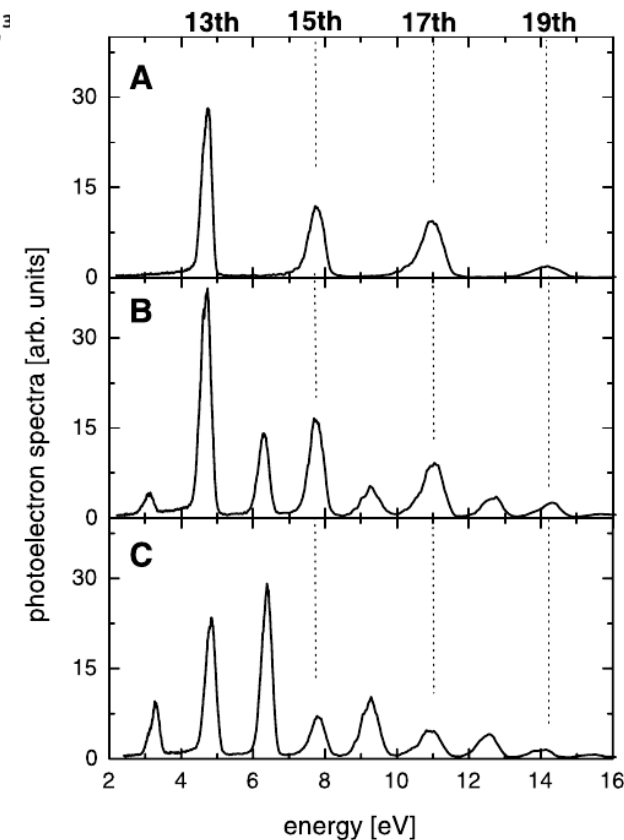
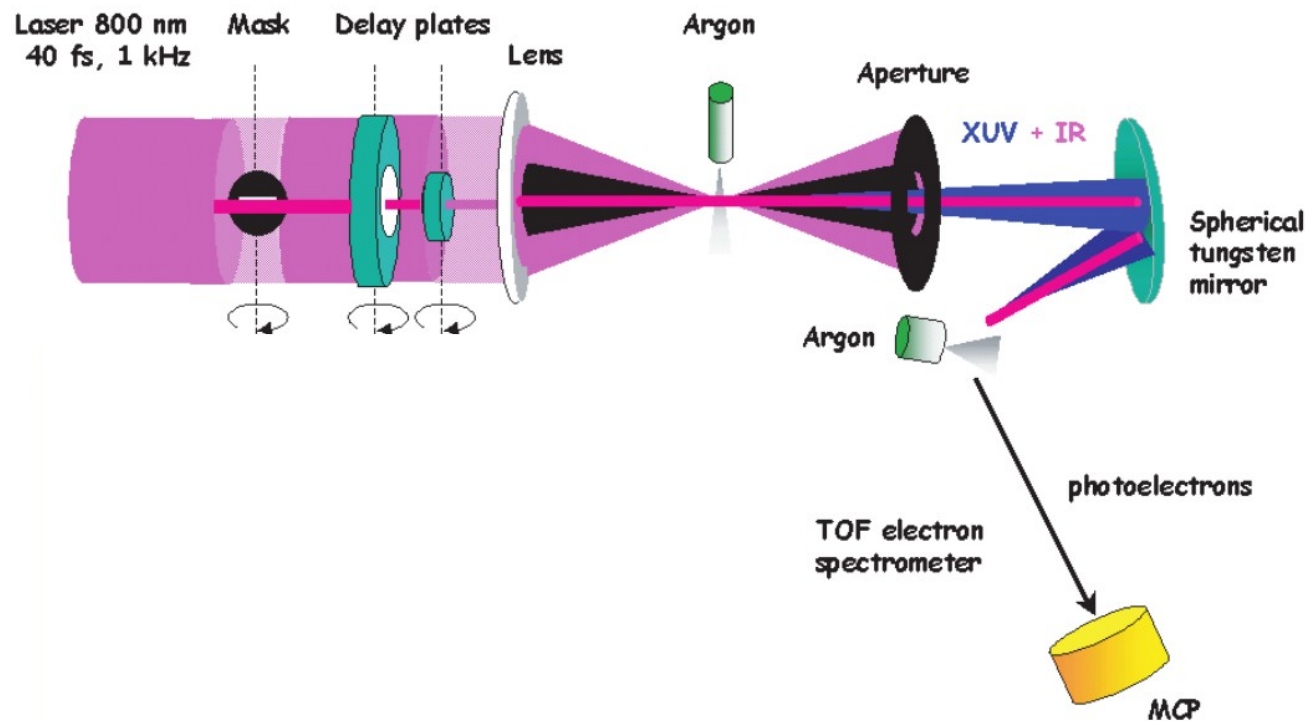


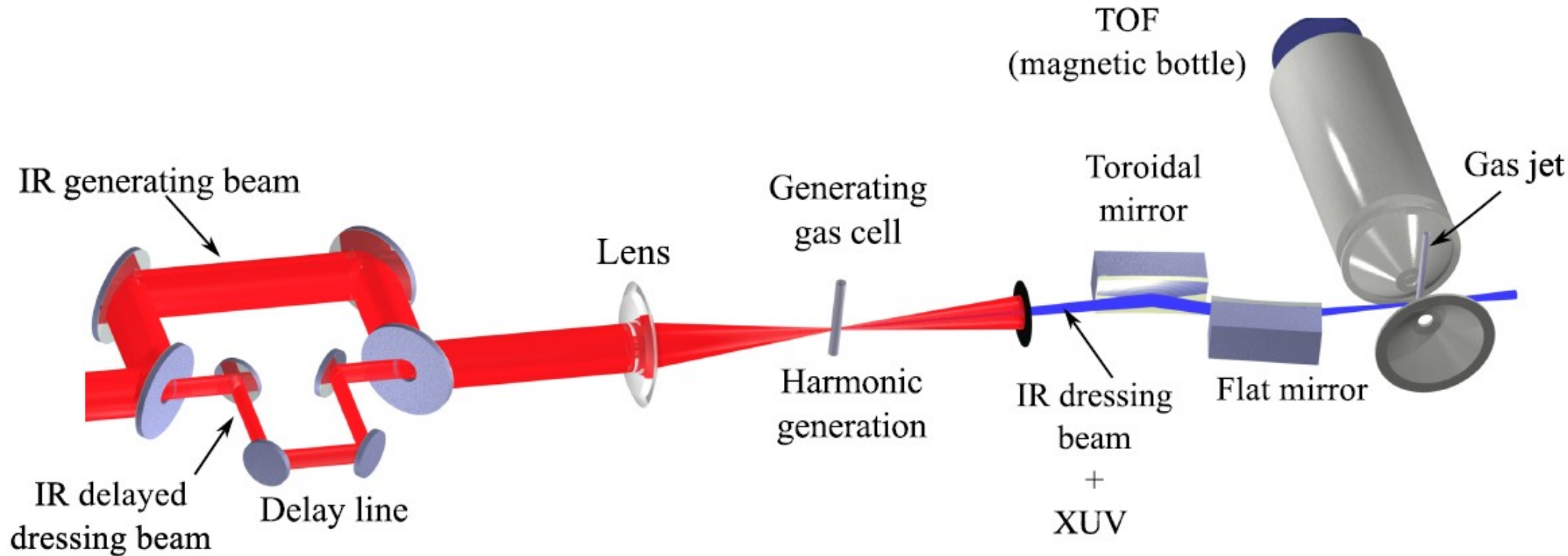
Fig. 1. Photoelectron spectra of argon ionized by a superposition of odd harmonics from an IR laser (A). In (B and C) copropagating fundamental radiation was added, causing sidebands to appear between the harmonic peaks. Changing the time delay between IR and harmonics from -1.7 fs in (B) to -2.5 fs in (C) causes a strong amplitude change of the sidebands.

Mesure de trains d'impulsions attosecondes : RABBITT

Reconstruction of Attosecond Beating by Interference of Two-photon Transitions

Autre dispositif expérimental:

Mairesse et al., 2003 (Saclay)

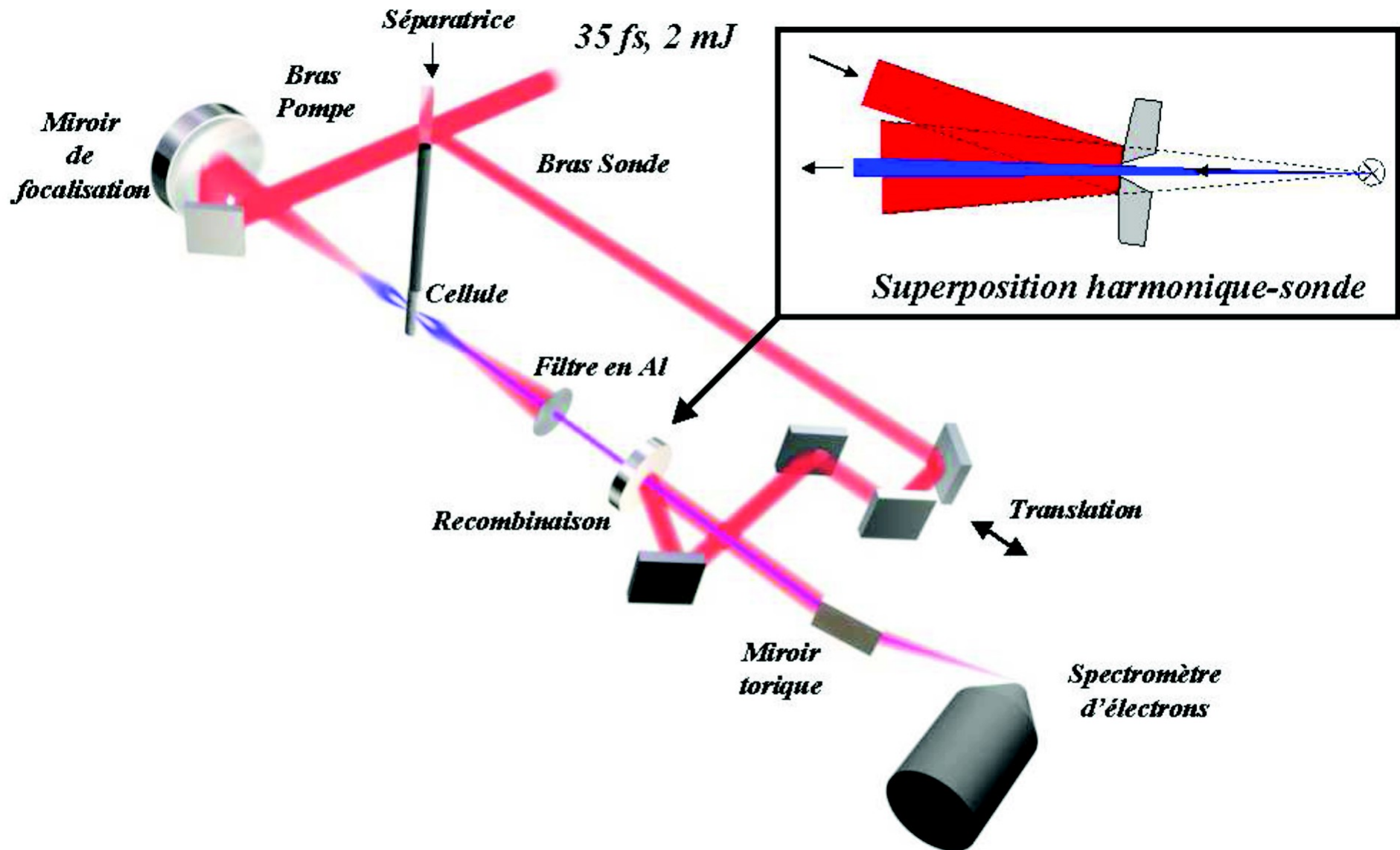


Mesure de trains d'impulsions attosecondes : RABBITT

Reconstruction of Attosecond Beating by Interference of Two-photon Transitions

Autre dispositif expérimental:

Lopez-Martens et al., 2005 (Lund)



Mesure de trains d'impulsions attosecondes : RABBITT

Reconstruction of Attosecond Beating by Interference of Two-photon Transitions

Réalisation expérimentale:

P.M. Paul et al., Science 292, 1689 (2001)

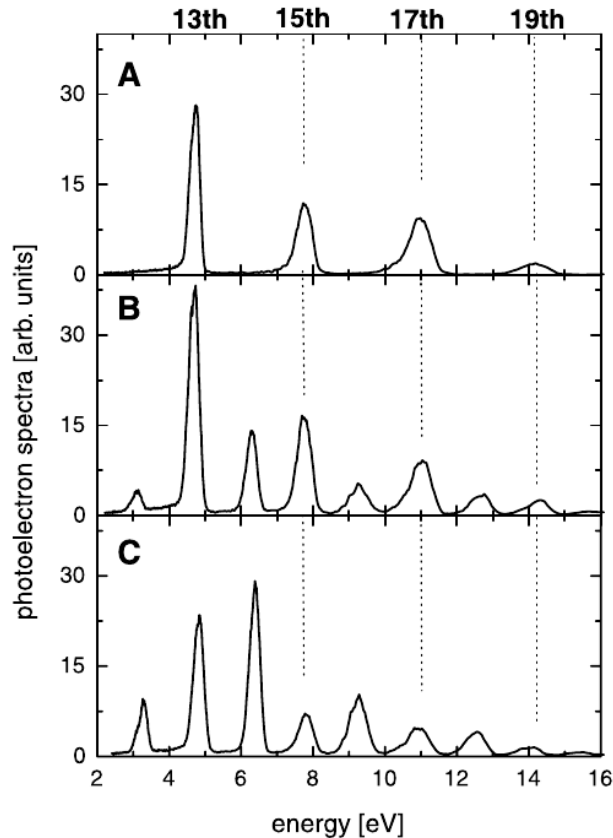


Fig. 1. Photoelectron spectra of argon ionized by a superposition of odd harmonics from an IR laser (A). In (B and C) copropagating fundamental radiation was added, causing sidebands to appear between the harmonic peaks. Changing the time delay between IR and harmonics from -1.7 fs in (B) to -2.5 fs in (C) causes a strong amplitude change of the sidebands.

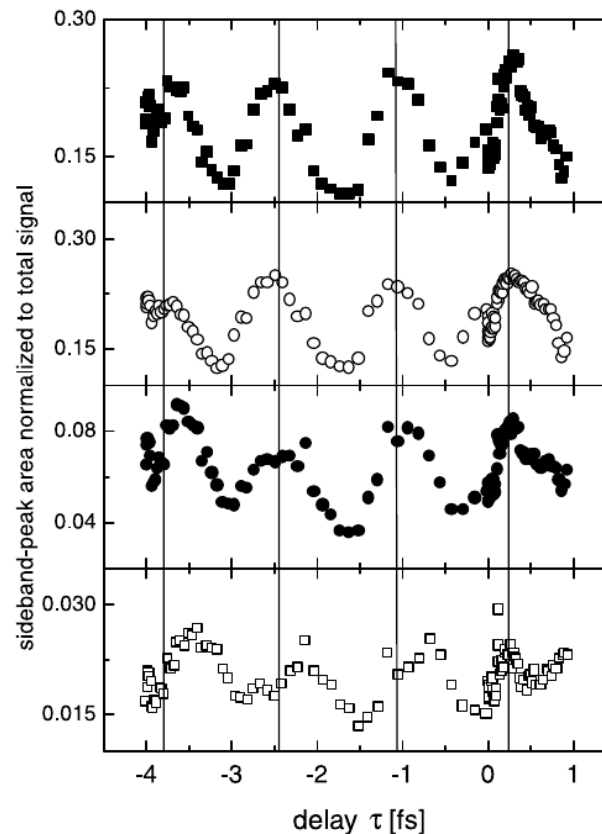
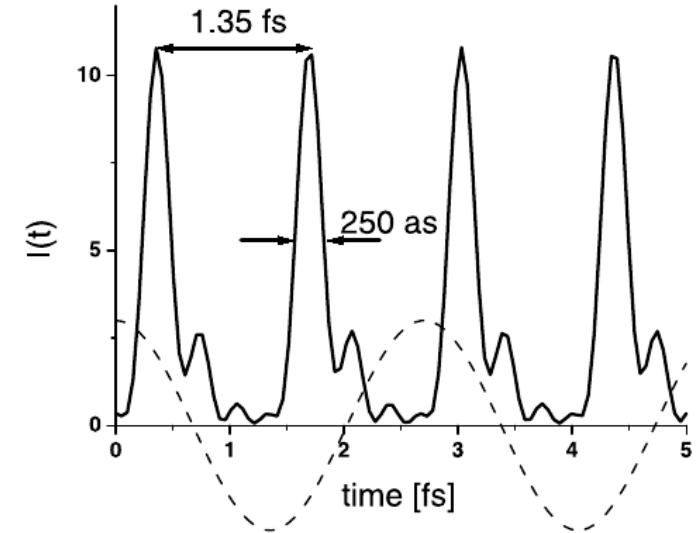
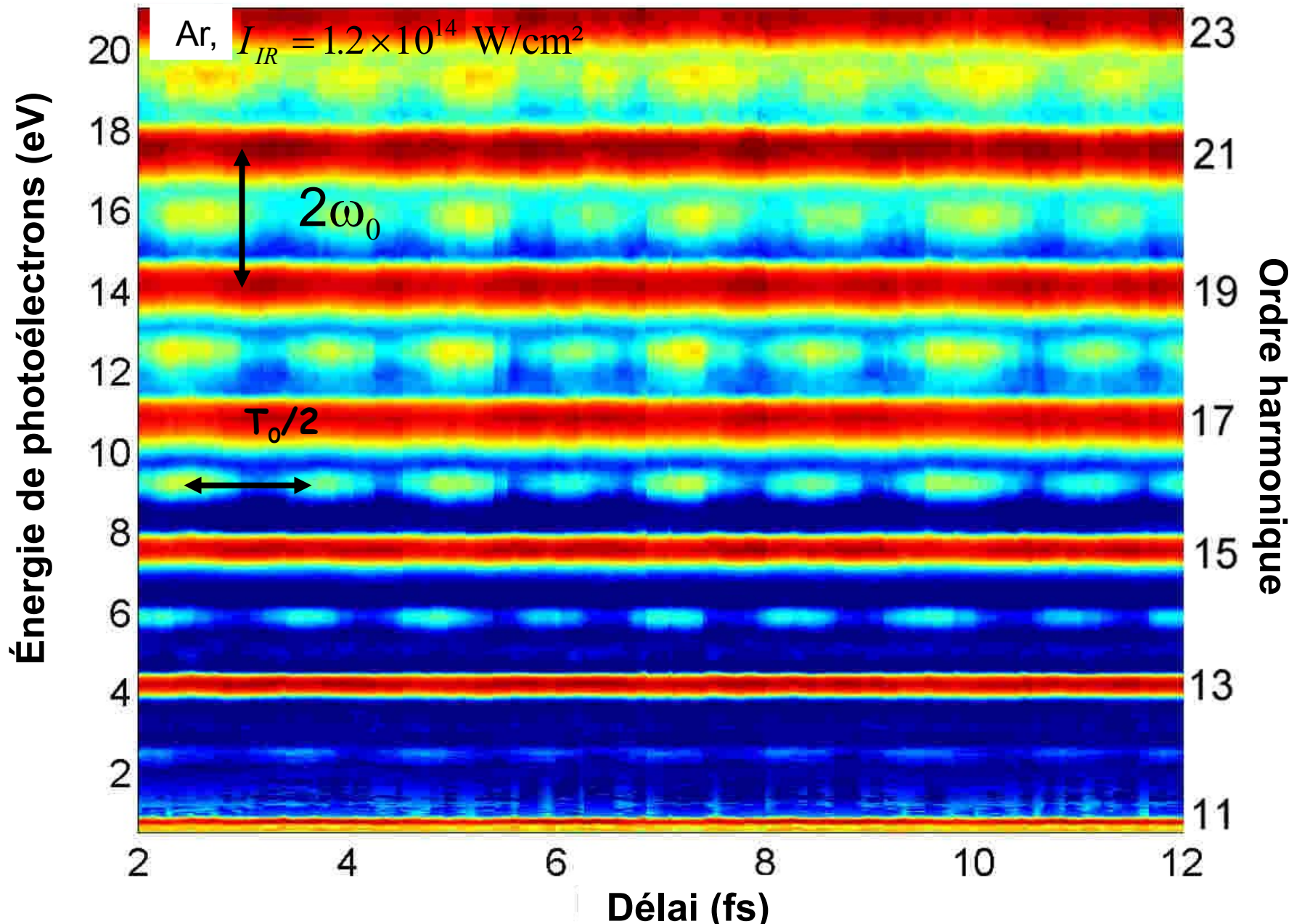


Fig. 3. Area of the first four sideband peaks (to higher energies from top to bottom) as a function of the time delay between the IR pulse and the harmonics. The first three curves oscillate in phase; the lowest one is shifted forward by 0.35 fs. The vertical lines are spaced by 1.35 fs, half the cycle time of the driving laser.



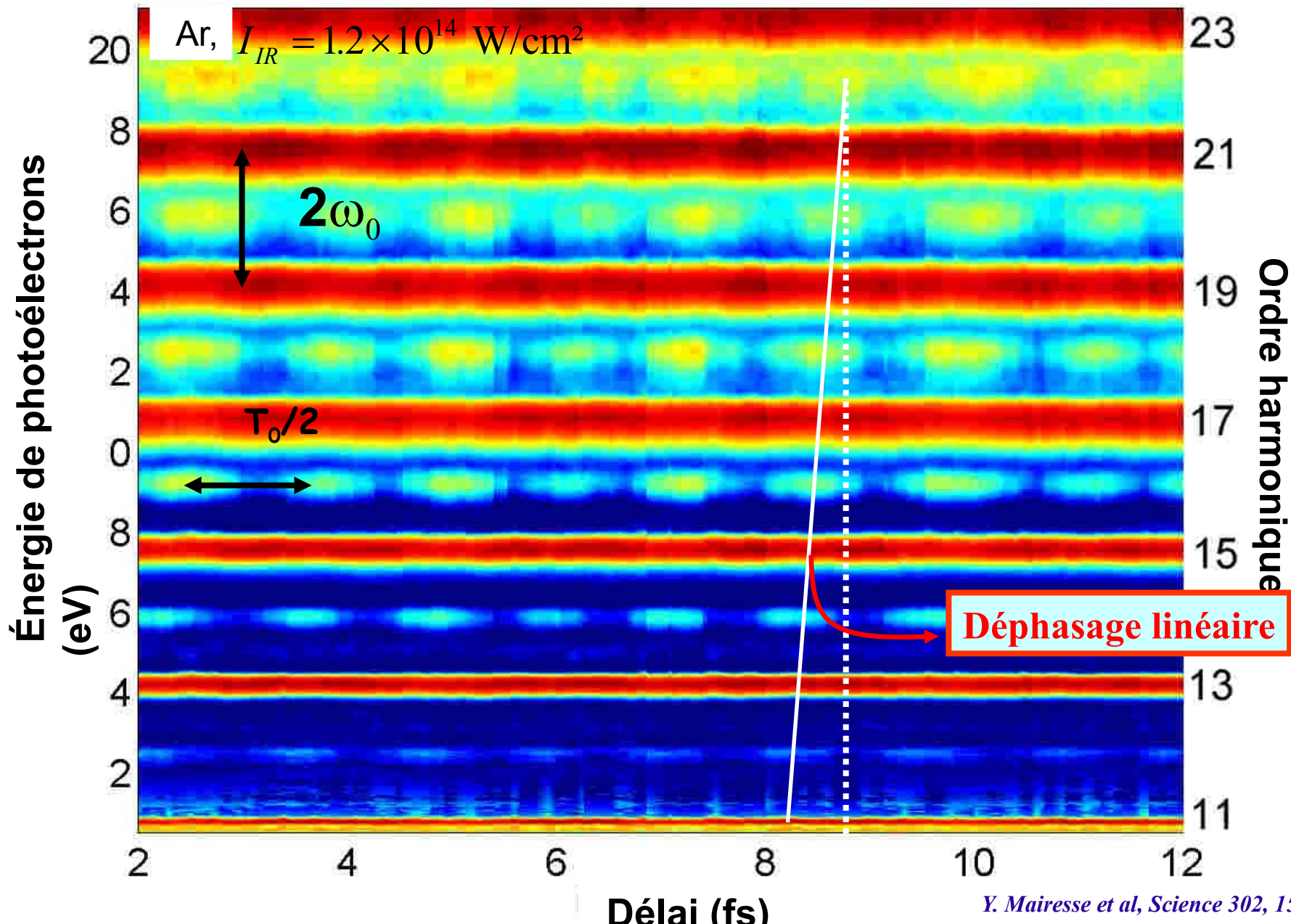
Mesure de trains d'impulsions attosecondes : RABBITT

Y. Mairesse et al, Science 302, 1540 (2003)



Mesure de trains d'impulsions attosecondes : RABBITT

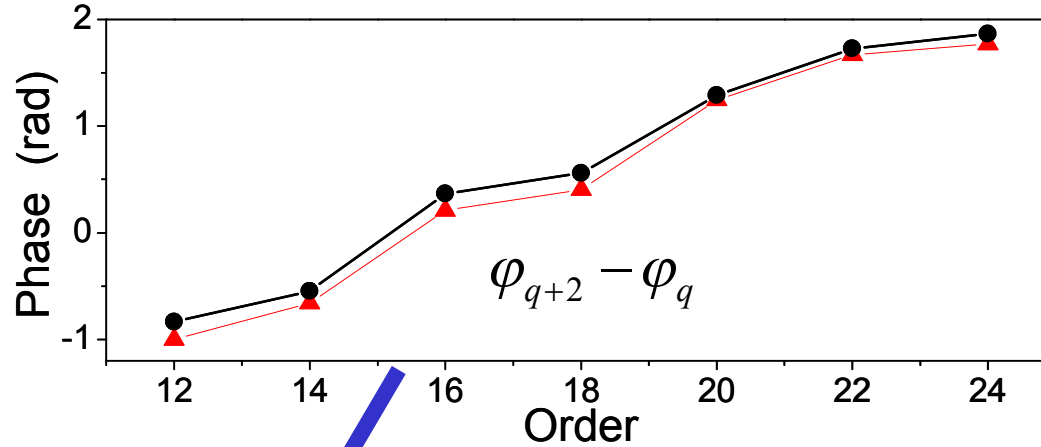
Y. Mairesse et al, Science 302, 1540 (2003)



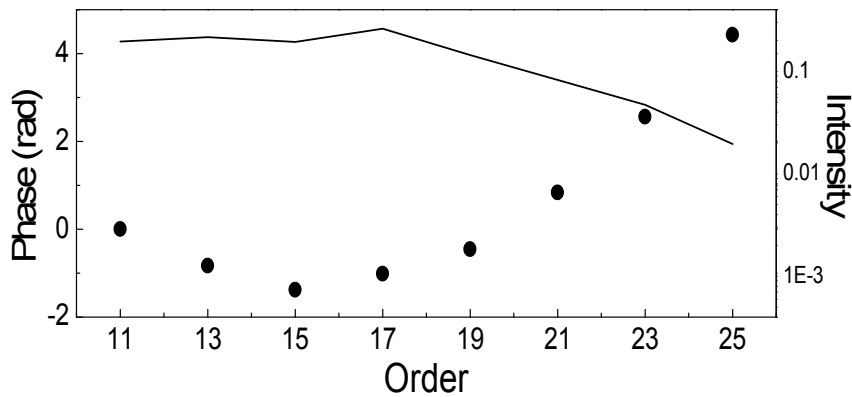
Y. Mairesse et al, Science 302, 1540 (2003)

Mesure de trains d'impulsions attosecondes : RABBITT

Phases des satellites corrigées par les phases atomiques θ



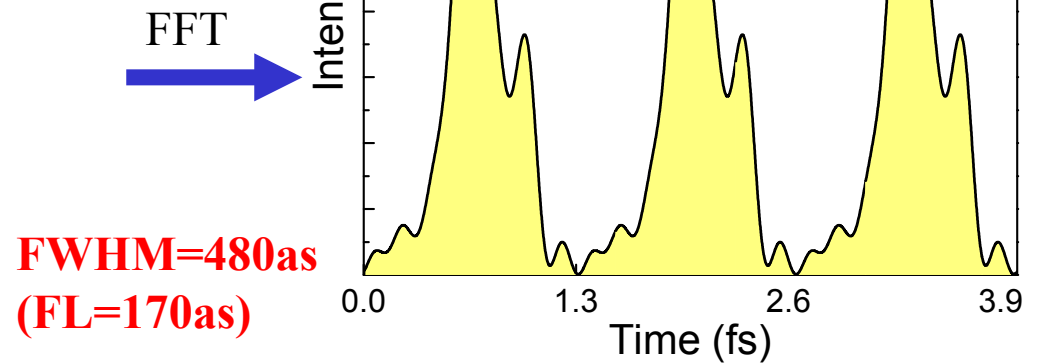
Phases harmoniques



Intégration



Train atto



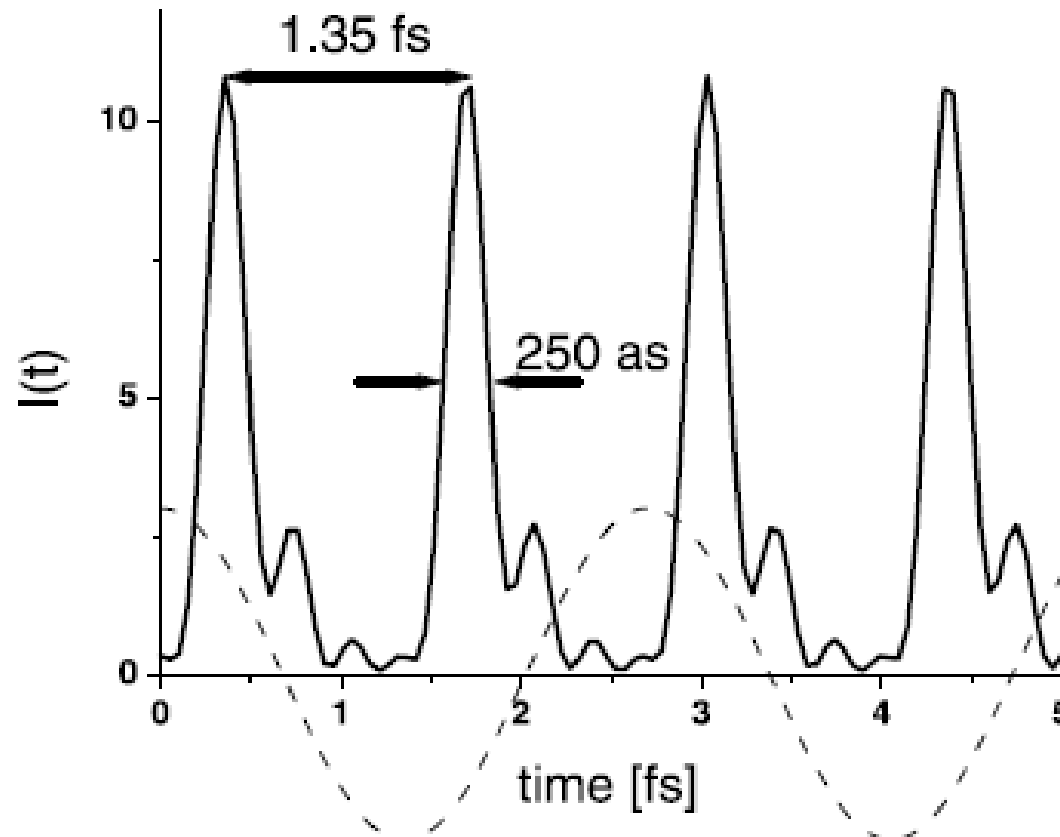
Trains d'impulsions attosecondes

2001: Premières mesures de trains d'impulsions attosecondes

Observation of a Train of Attosecond Pulses from High Harmonic Generation

P.M. Paul et al, Science 292, 1689

P. M. Paul,¹ E. S. Toma,² P. Breger,¹ G. Mullot,³ F. Augé,³
Ph. Balcou,³ H. G. Müller,^{2*} P. Agostini¹



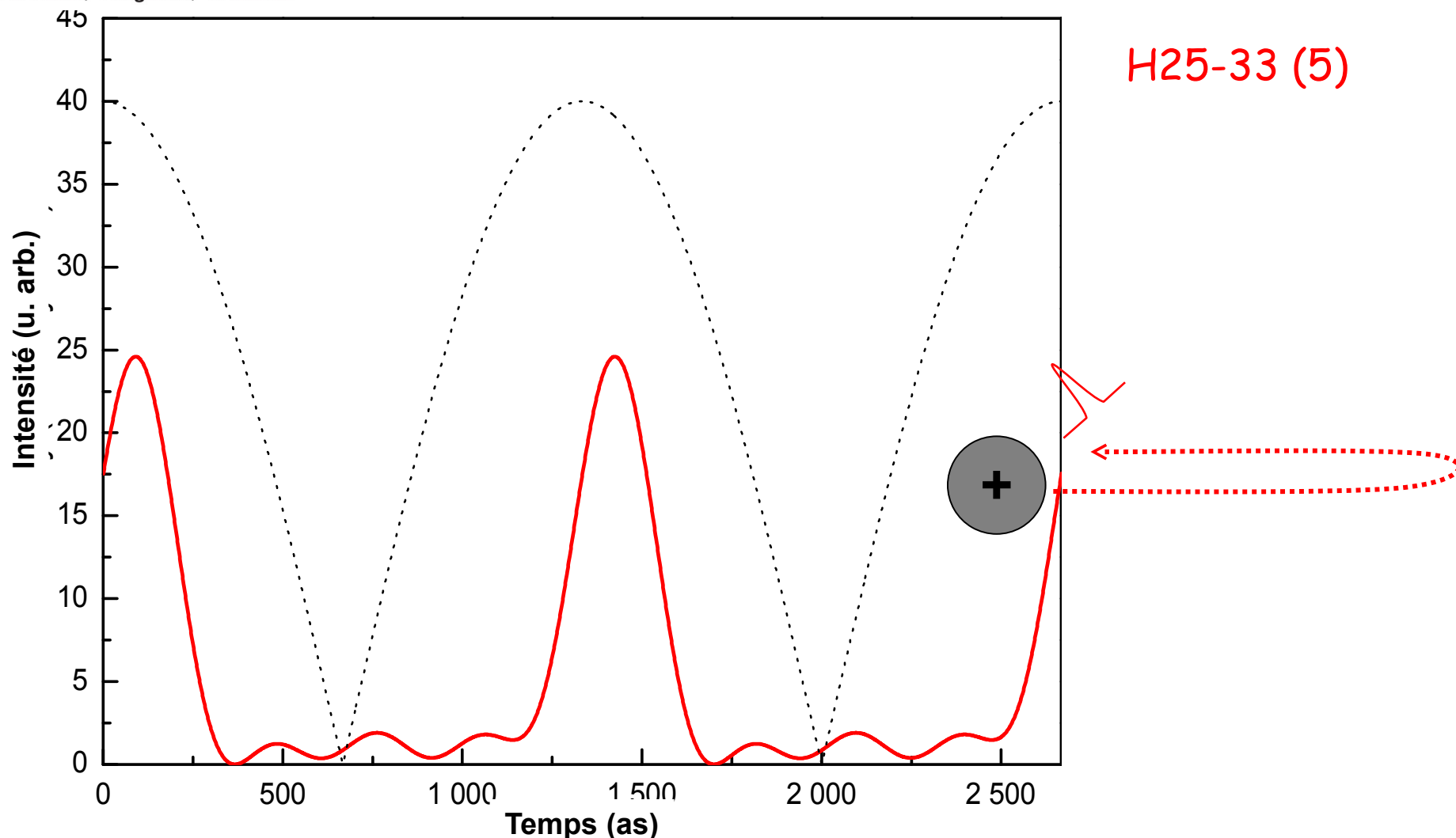
Trains d'impulsions attosecondes

2003: Synchronisation des harmoniques à l'échelle attoseconde

Attosecond Synchronization of High-Harmonic Soft X-rays

Y. Mairesse et al, Science 302, 1540

Y. Mairesse,¹ A. de Bohan,¹ L. J. Frasinski,² H. Merdji,¹
L. C. Dinu,³ P. Monchicourt,¹ P. Breger,¹ M. Kovačev,¹ R. Taïeb,⁴
B. Carré,¹ H. G. Müller,³ P. Agostini,¹ P. Salières¹



Visualisation directe des recombinaisons électroniques

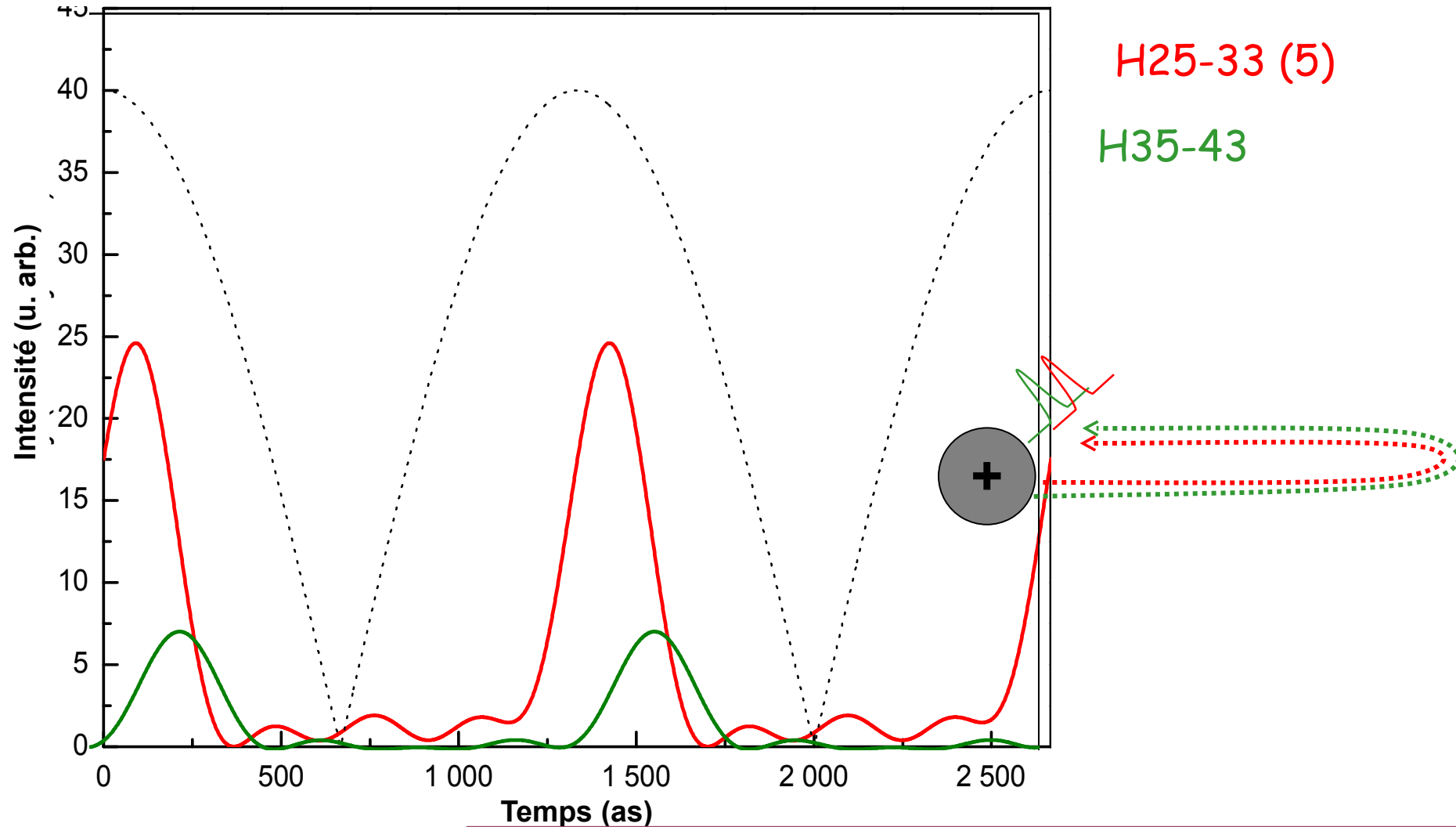
Trains d'impulsions attosecondes

2003: Synchronisation des harmoniques à l'échelle attoseconde

Attosecond Synchronization of High-Harmonic Soft X-rays

Y. Mairesse et al, Science 302, 1540

Y. Mairesse,¹ A. de Bohan,¹ L. J. Frasinski,² H. Merdji,¹
L. C. Dinu,³ P. Monchicourt,¹ P. Breger,¹ M. Kovačev,¹ R. Taïeb,⁴
B. Carré,¹ H. G. Müller,³ P. Agostini,¹ P. Salières¹



Visualisation directe des recombinaisons électroniques

Trains d'impulsions attosecondes

2003: Synchronisation des harmoniques à l'échelle attoseconde

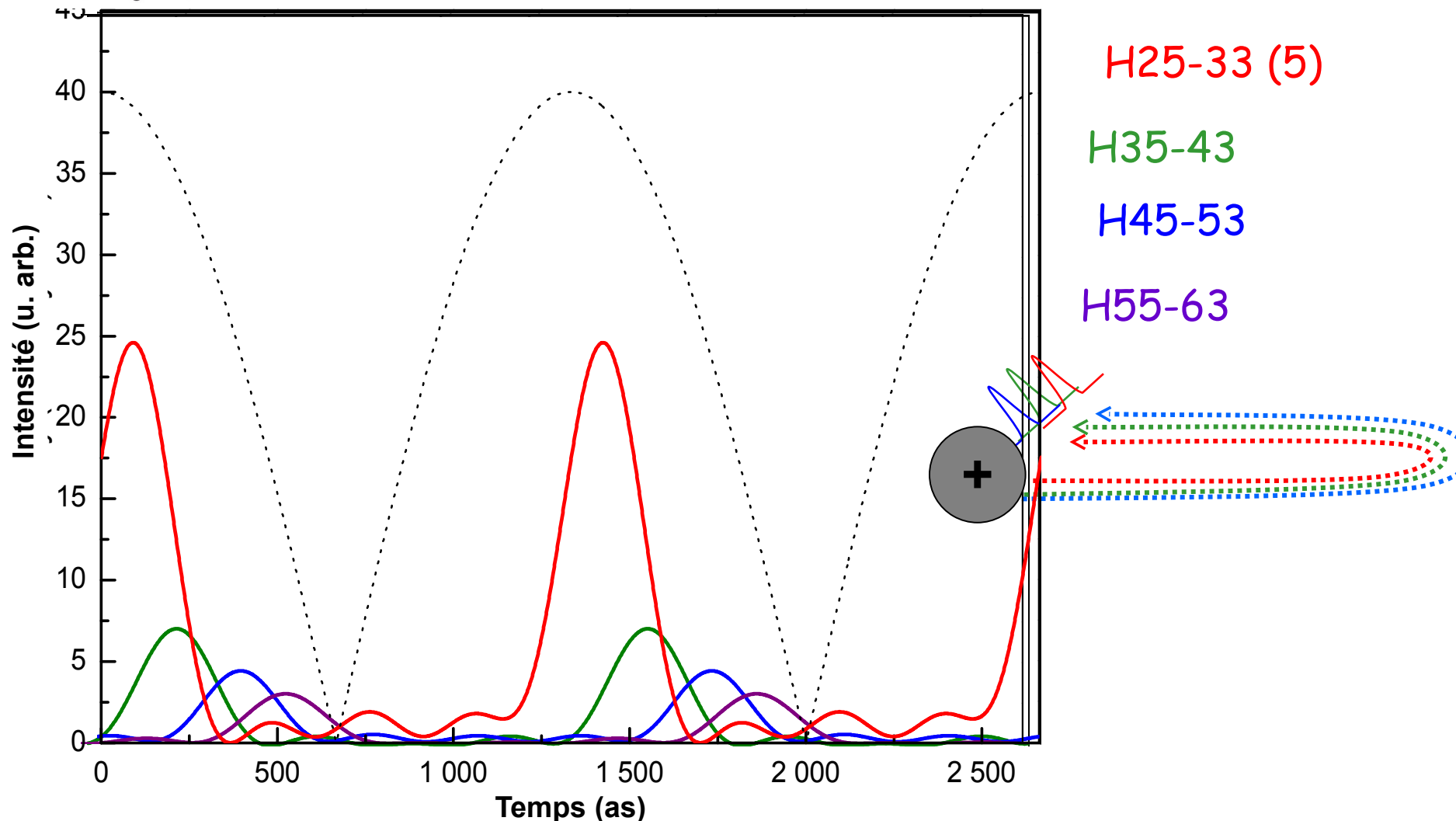
Attosecond Synchronization of High-Harmonic Soft X-rays

Y. Mairesse et al, Science 302, 1540

Y. Mairesse,¹ A. de Bohan,¹ L. J. Frasinski,² H. Merdji,¹

L. C. Dinu,³ P. Monchicourt,¹ P. Breger,¹ M. Kovačev,¹ R. Taïeb,⁴

B. Carré,¹ H. G. Müller,³ P. Agostini,¹ P. Salières¹



Visualisation directe des recombinaisons électroniques

Trains d'impulsions attosecondes

2004-: Réduction de la durée des impulsions attosecondes

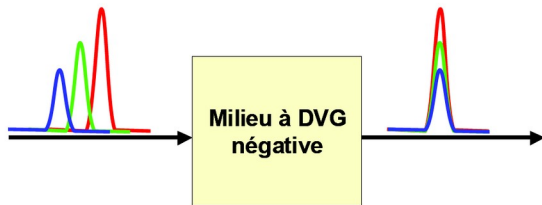
PRL **94**, 033001 (2005)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
28 JANUARY 2005

Amplitude and Phase Control of Attosecond Light Pulses

Rodrigo López-Martens,^{1,*} Katalin Varjú,^{1,†} Per Johnsson,¹ Johan Mauritsson,^{1,‡} Yann Mairesse,² Pascal Salières,² Mette B. Gaarde,³ Kenneth J. Schafer,³ Anders Persson,¹ Sune Svanberg,¹ Claes-Göran Wahlström,¹ and Anne L'Huillier¹



Epaisseur
du filtre:

200 nm

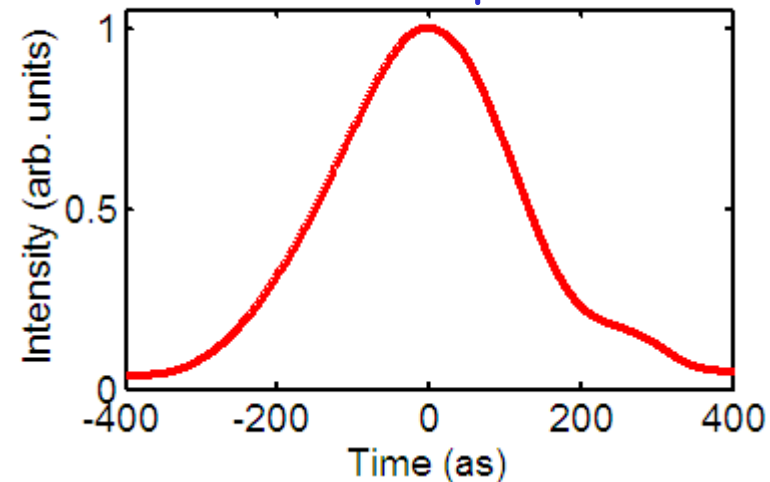
Durée
d'impulsion:

290 as

Fig. 4.25: Principe de la compression d'impulsion attosecondes.

Compression des impulsions attosecondes par propagation dans des filtres d'aluminium

Profil temporel



Trains d'impulsions attosecondes

2004-: Réduction de la durée des impulsions attosecondes

PRL **94**, 033001 (2005)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
28 JANUARY 2005

Amplitude and Phase Control of Attosecond Light Pulses

Rodrigo López-Martens,^{1,*} Katalin Varjú,^{1,†} Per Johnsson,¹ Johan Mauritsson,^{1,‡} Yann Mairesse,² Pascal Salières,² Mette B. Gaarde,³ Kenneth J. Schafer,³ Anders Persson,¹ Sune Svanberg,¹ Claes-Göran Wahlström,¹ and Anne L'Huillier¹

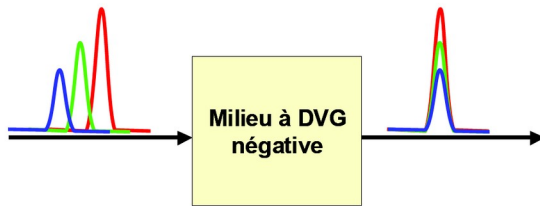


Fig. 4.25: Principe de la compression d'impulsion attosecondes.

Epaisseur
du filtre:

Durée
d'impulsion:

200 nm

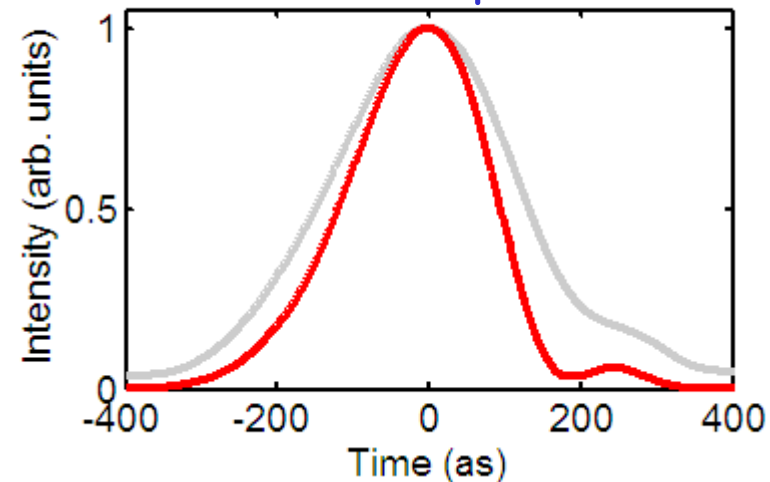
290 as

400 nm

220 as

Compression des impulsions attosecondes par propagation dans des filtres d'aluminium

Profil temporel



Trains d'impulsions attosecondes

2004-: Réduction de la durée des impulsions attosecondes

PRL **94**, 033001 (2005)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
28 JANUARY 2005

Amplitude and Phase Control of Attosecond Light Pulses

Rodrigo López-Martens,^{1,*} Katalin Varjú,^{1,†} Per Johnsson,¹ Johan Mauritsson,^{1,‡} Yann Mairesse,² Pascal Salières,² Mette B. Gaarde,³ Kenneth J. Schafer,³ Anders Persson,¹ Sune Svanberg,¹ Claes-Göran Wahlström,¹ and Anne L'Huillier¹

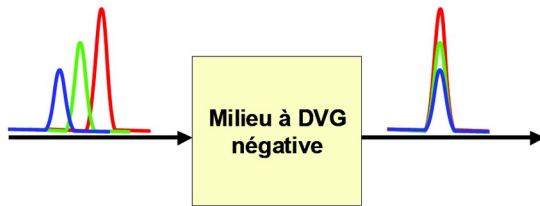


Fig. 4.25: Principe de la compression d'impulsion attosecondes.

Compression des impulsions attosecondes par propagation dans des filtres d'aluminium

Epaisseur
du filtre:

Durée
d'impulsion:

200 nm

290 as

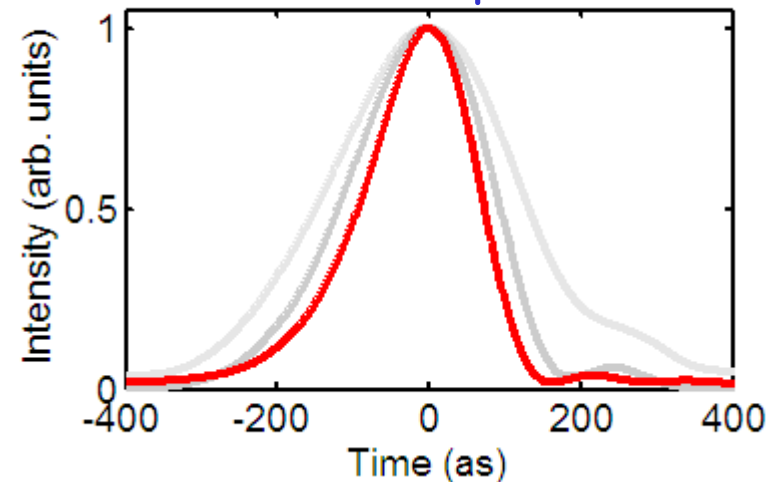
400 nm

220 as

600 nm

170 as

Profil temporel



Trains d'impulsions attosecondes

2004-: Réduction de la durée des impulsions attosecondes

New Journal of Physics

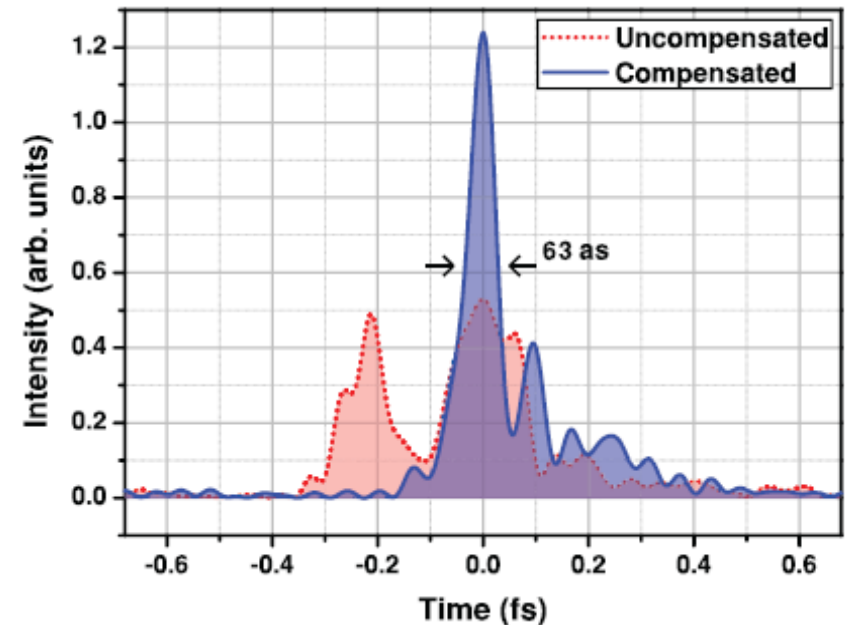
The open-access journal for physics

D. H. Ko et al, New J. Phys 12, 063008 (2010)

Attosecond chirp compensation over broadband high-order harmonics to generate near transform-limited 63 as pulses

Dong Hyuk Ko¹, Kyung Taec Kim^{1,2}, Juyun Park¹, Jae-hwan Lee¹ and Chang Hee Nam^{1,3}

¹ Department of Physics and Coherent X-ray Research Center, KAIST.



Compression des impulsions attosecondes par propagation dans des filtres métalliques + cellule de gaz

Trains d'impulsions attosecondes

2005-: Développement d'optiques multicouches pour le contrôle de la phase spectrale

1558 OPTICS LETTERS / Vol. 31, No. 10 / May 15, 2006

Design and characterization of extreme-ultraviolet broadband mirrors for attosecond science

Anne-Sophie Morlens, Rodrigo López-Martens, Olga Boyko, Philippe Zeitoun, and Philippe Balcou
Laboratoire d'Optique Appliquée, Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées—Ecole Polytechnique—CNRS UMR 7639, F-91761 Palaiseau, France

Katalin Varjú, Erik Gustafsson, Thomas Remetter, and Anne L'Huillier
Department of Physics, Lund University, P.O. Box 118, 221 00 Lund, Sweden

Sophie Kazamias

Laboratoire d'Interaction du rayonnement X Avec la Matière, Université Paris-Sud, 91405 Orsay, France

Julien Gautier, Franck Delmotte, and Marie-Françoise Ravet

Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, CNRS-UMR 8501, 91403 Orsay, France

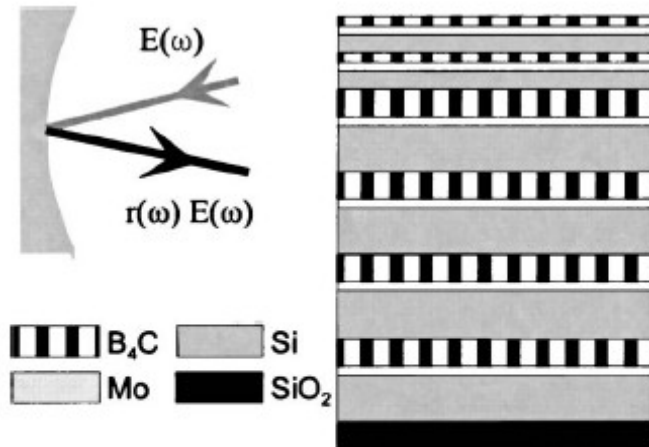


Fig. 1. Aperiodic multilayer structure of the three-material broadband XUV mirror. From the top to the bottom, there are two 16.3 nm thick and four 40.6 nm thick $\text{B}_4\text{C}/\text{Mo}/\text{Si}$ layers sitting on a SiO_2 substrate.

Control of the attosecond synchronization of XUV radiation with phase-optimized mirrors

C. Bourassin-Bouchet,^{1,*} Z. Diveki,² S. de Rossi,¹ E. English,² E. Meltchakov,¹ O. Gobert,² D. Guénot,² B. Carré,² F. Delmotte,¹ P. Salières,² and T. Ruchon²

C. Bourassin-Bouchet et al, Opt.Expe. 19, 3809 (2011)

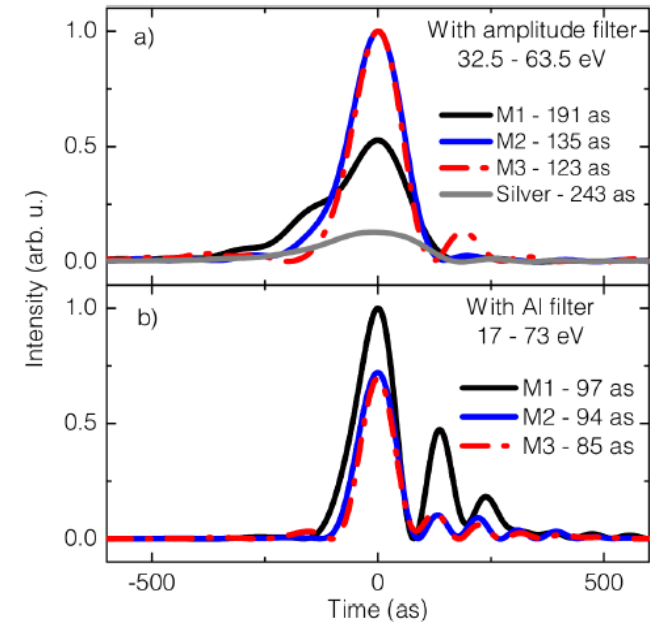
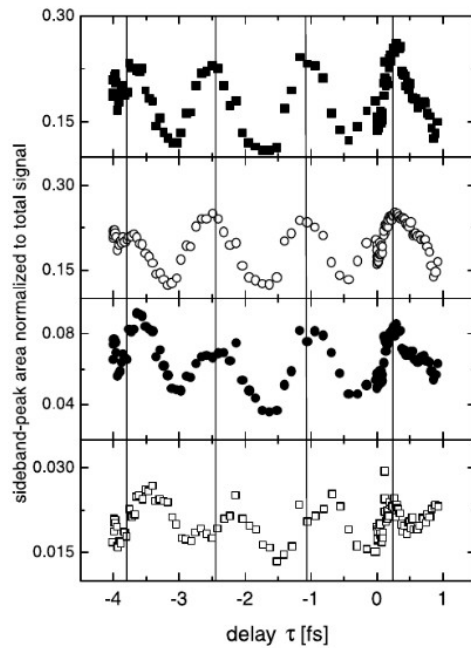
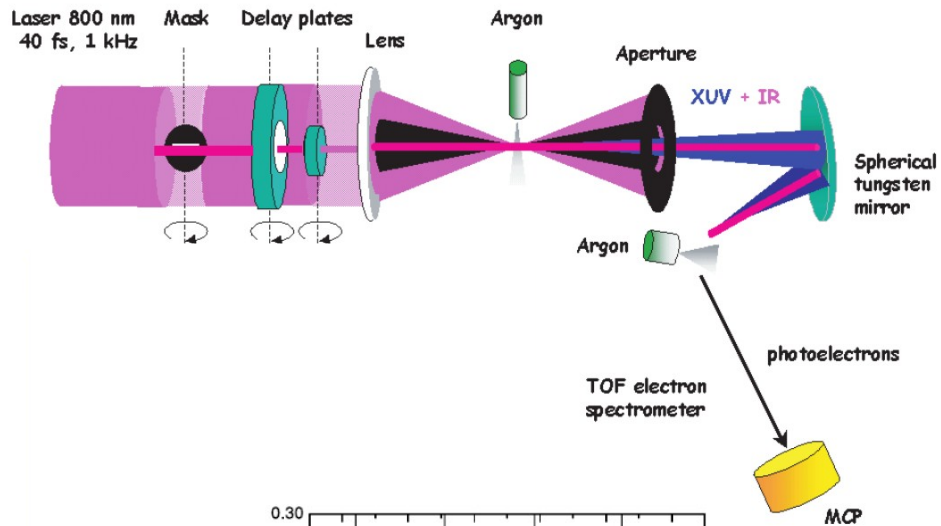


Fig. 5. Temporal reconstruction of attosecond pulses after reflection off the mirrors using the data displayed in Fig. 4 and the corresponding ones for M_1 , M_3 and the reference mirror when considering (a) only the $32.5 - 63.5 \text{ eV}$ range, or (b) the transmission through a 250 nm -thick aluminum filter. The full width at half maximum is indicated for each pulse.

Stabilité attoseconde : état de l'art

Observation of a Train of Attosecond Pulses from High Harmonic Generation

P. M. Paul,¹ E. S. Toma,² P. Breger,¹ G. Mullot,³ F. Augé,³
Ph. Balcou,³ H. G. Müller,^{2*} P. Agostini¹

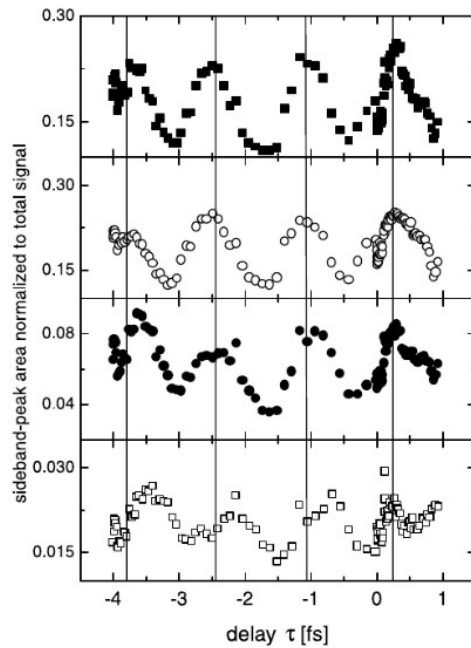
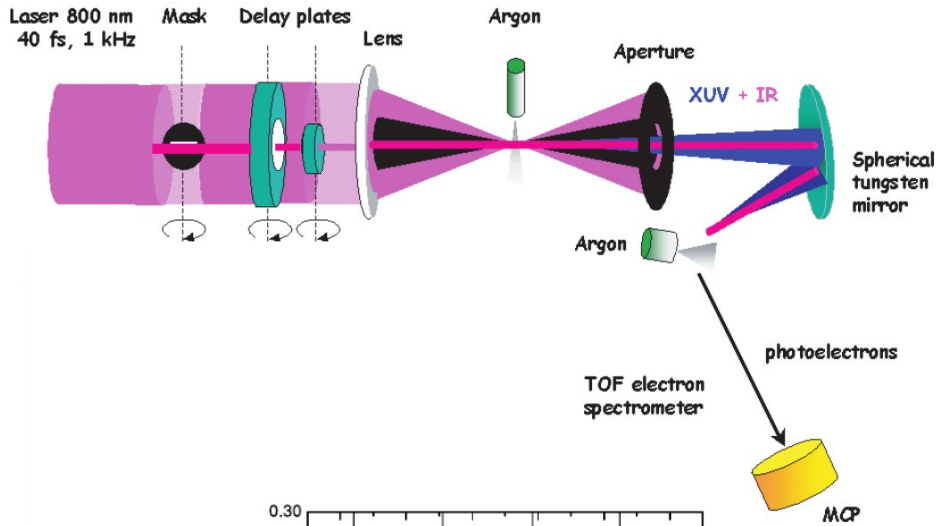


Stabilité attoseconde : état de l'art

PHYSICAL REVIEW APPLIED 15, 034036 (2021)

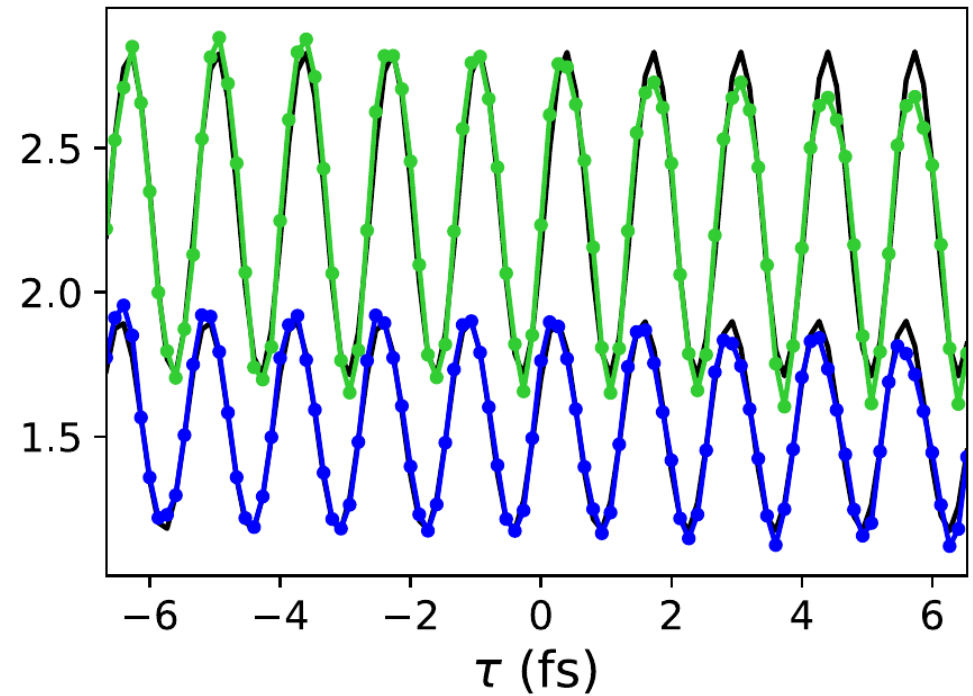
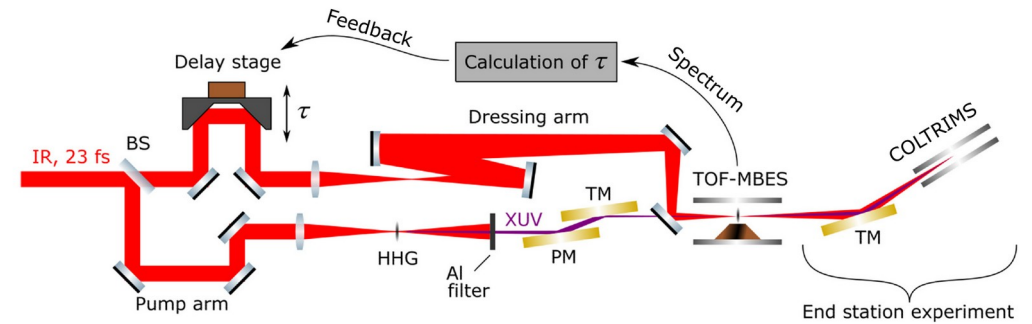
Observation of a Train of Attosecond Pulses from High Harmonic Generation

P. M. Paul,¹ E. S. Toma,² P. Breger,¹ G. Mullot,³ F. Augé,³
Ph. Balcou,³ H. G. Müller,^{2*} P. Agostini¹



In Situ Sub-50-Attosecond Active Stabilization of the Delay Between Infrared and Extreme-Ultraviolet Light Pulses

Martin Luttmann^{⊙,*}, David Bresteau[⊙], Jean-François Hergott, Olivier Tcherbakoff, and
Thierry Ruchon^{⊙†}
Université Paris-Saclay, CEA, CNRS, LIDYL, Gif-sur-Yvette 91191, France



Génération et caractérisation d'impulsions attosecondes

Introduction : harmoniques et attosecondes

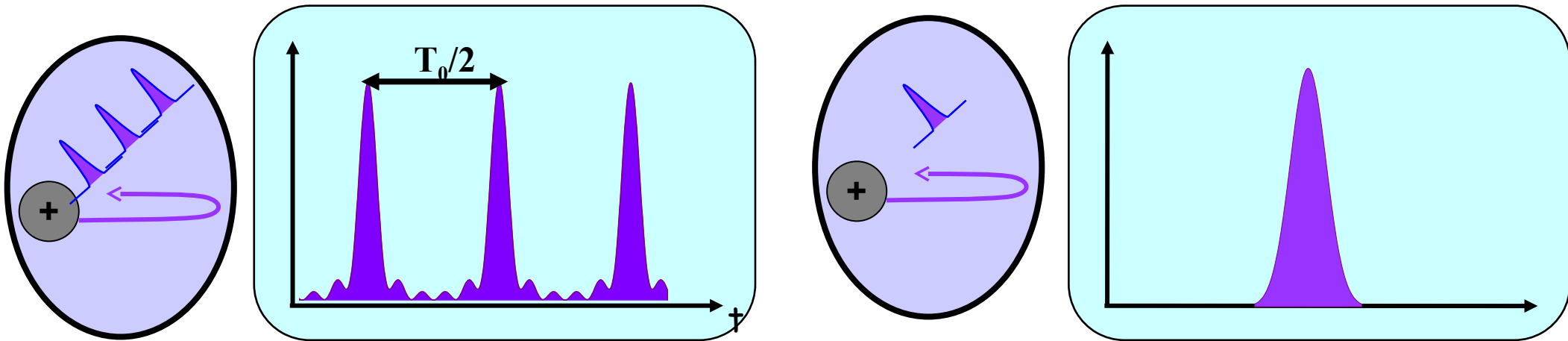
I – Mesure de trains d'impulsions attosecondes

**II – Mesure d'impulsions attosecondes arbitraires :
FROGCRAB et ses évolutions**

III – Mesures in-situ

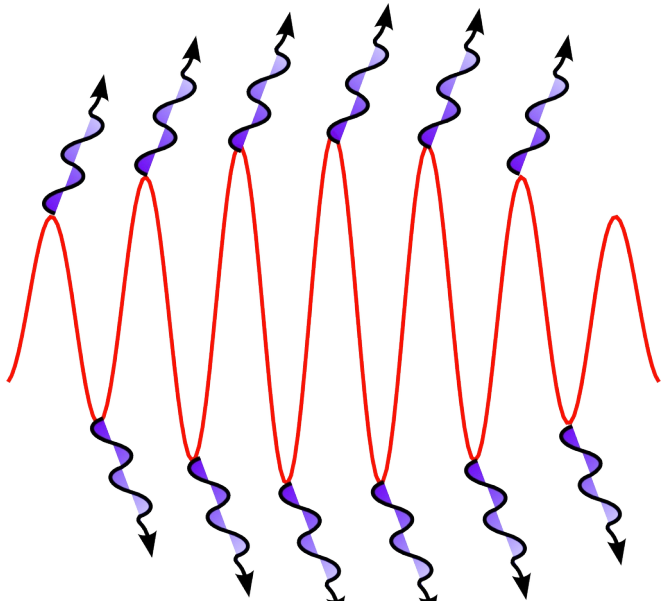
Les trains d'impulsions attosecondes sont bien caractérisés et bien contrôlés

Comment produire une impulsion attoseconde unique ?



Il faut une seule collision électronique

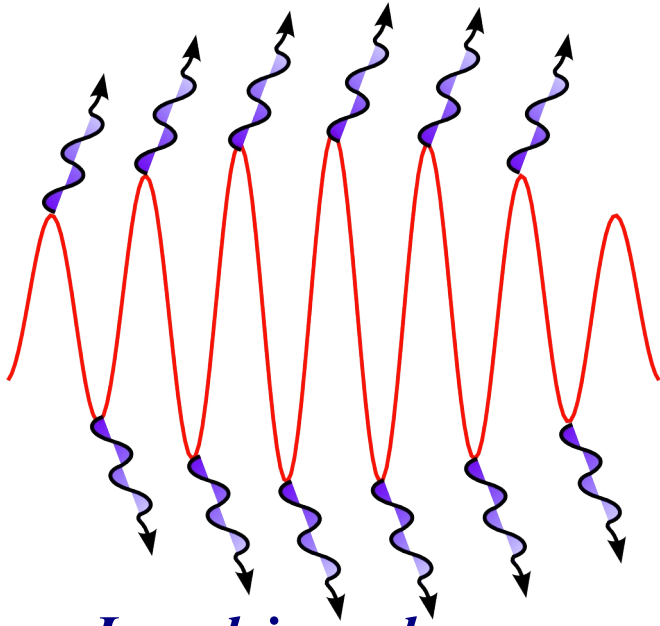
Utilisation d'impulsions laser "monocycles"



*Impulsion « longue »
20 fs*

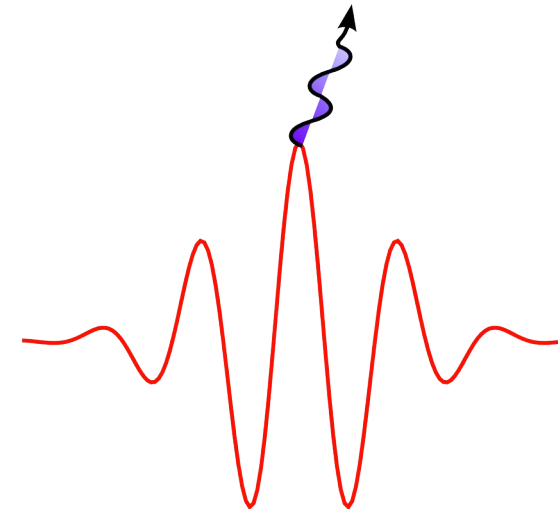
*Train d'impulsions atto
Spectre : peigne d'harmoniques*

Utilisation d'impulsions laser "monocycles"



*Impulsion « longue »
20 fs*

*Train d'impulsions atto
Spectre : peigne d'harmoniques*



*Impulsion « monocycle »
5 fs
Impulsion atto unique
Spectre continu*

2001: Premières mesures d'impulsions attosecondes uniques

M. Hentschel et al, Nature 414, 509

articles

Attosecond metrology

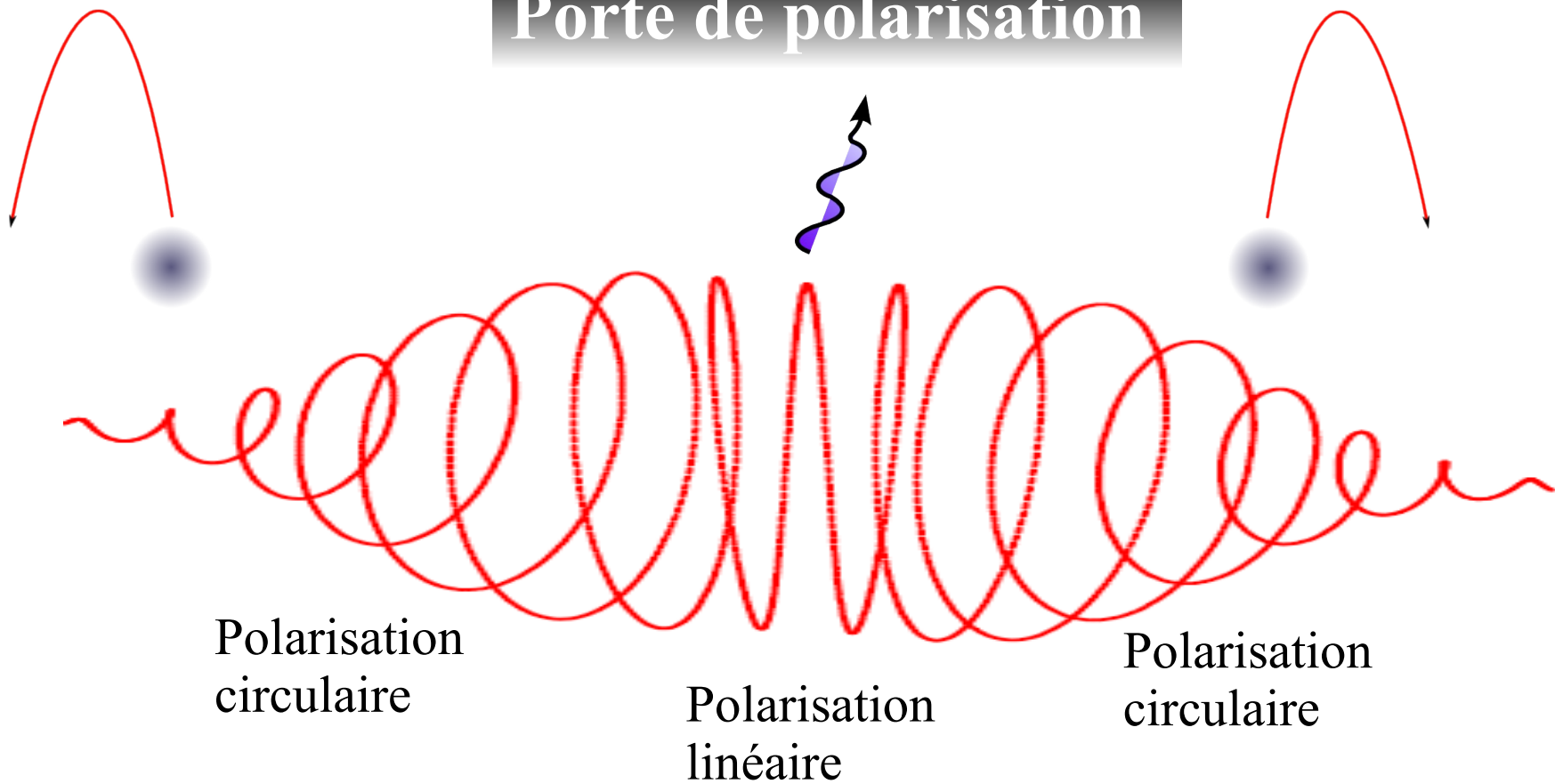
M. Hentschel*†, R. Kienberger*†, Ch. Spielmann*, G. A. Reider*, N. Milosevic*, T. Brabec*, P. Corkum‡, U. Heinzmann§, M. Drescher§ & F. Krausz*

* Institut für Photonik, Technische Universität Wien, Gusshausstr. 27, A-1040 Wien, Austria

‡ Steacie Institute of Molecular Sciences, NRC Canada, Ottawa, Canada K1A 0R6

§ Fakultät für Physik, Universität Bielefeld, D-33615 Bielefeld, Germany

Porte de polarisation



Impulsion attoseconde unique

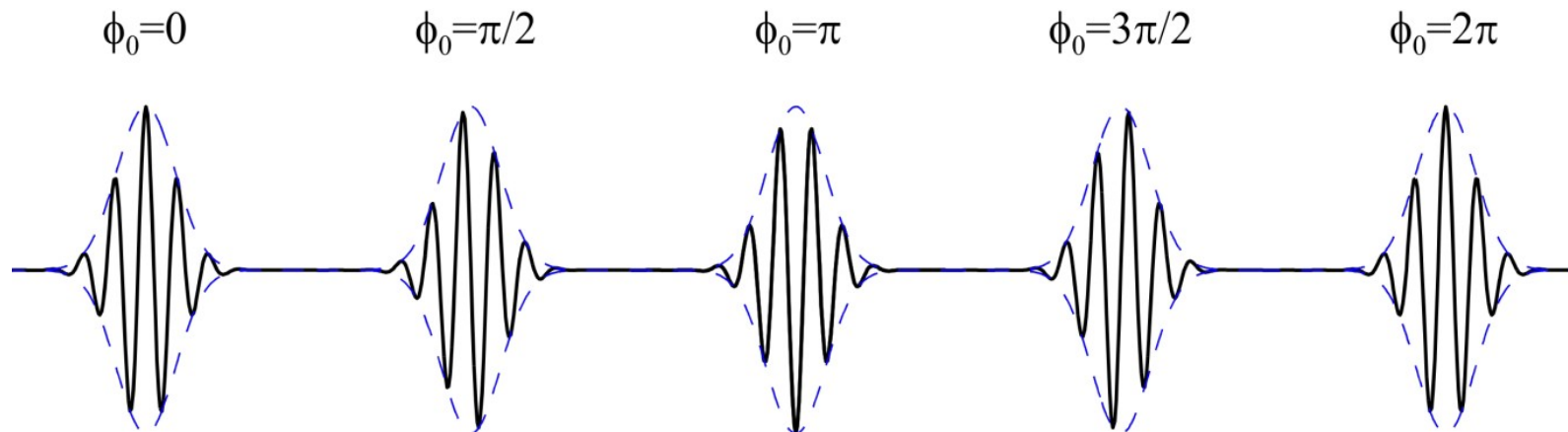
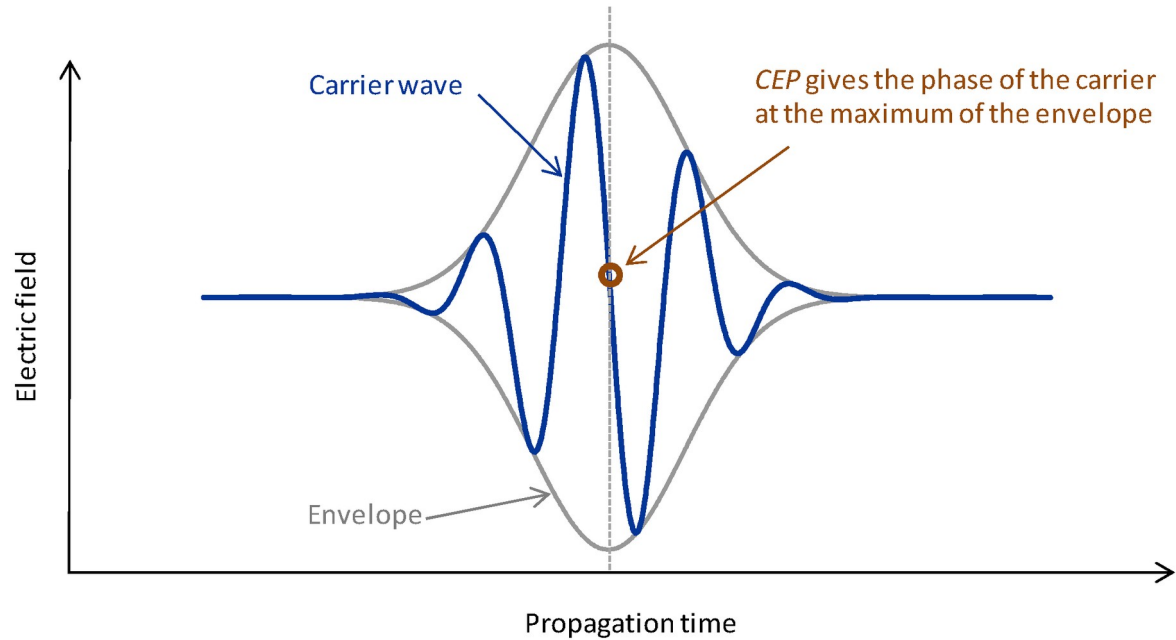
2006-2007: Impulsions de 130 as

I. Sola et al, Nature Physics 2 319 (2006)

G. Sansone et al., Science 314 443 (2006)

**Attention à la phase absolue
(Carrier-Envelope Phase)**

Phase absolue / CEP



Impulsions longues multicycles ($>20\text{fs}$ à 800 nm): pas d'importance.

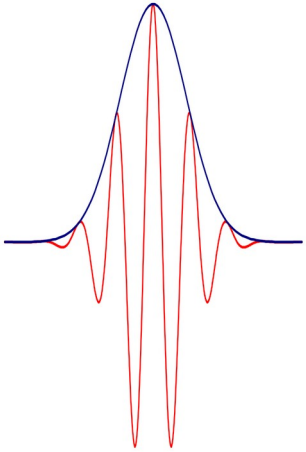
Impulsions brèves quasi-monocycles : la CEP détermine l'intensité maximale

et les dynamiques induites par l'impulsion

En général, la CEP d'un laser n'est pas intrinsèquement stable.

Mesure de la CEP

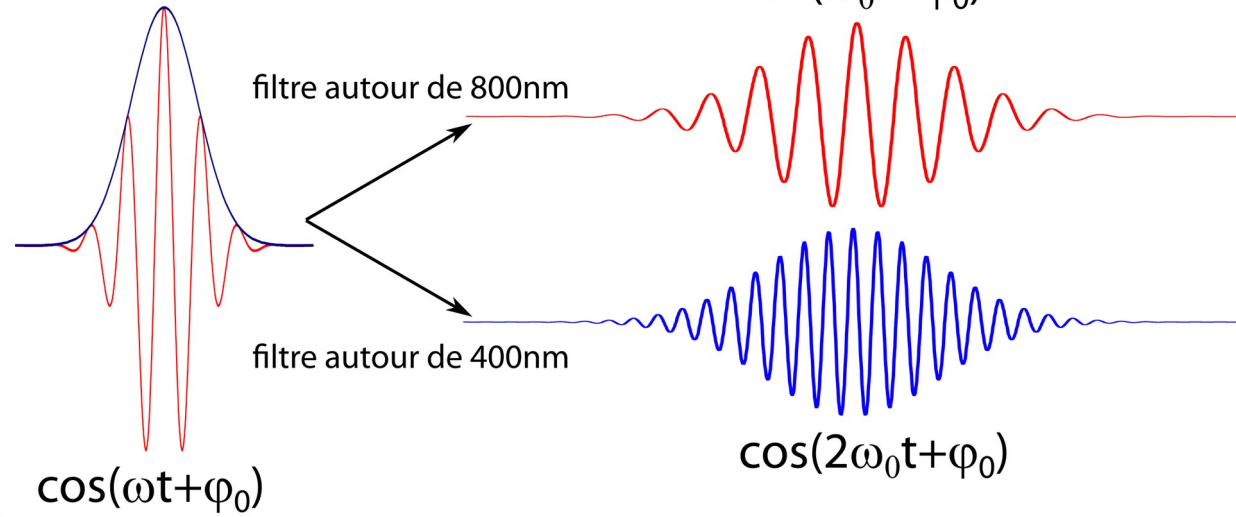
impulsion large bande
de <400 nm à >800 nm



$$\cos(\omega t + \varphi_0)$$

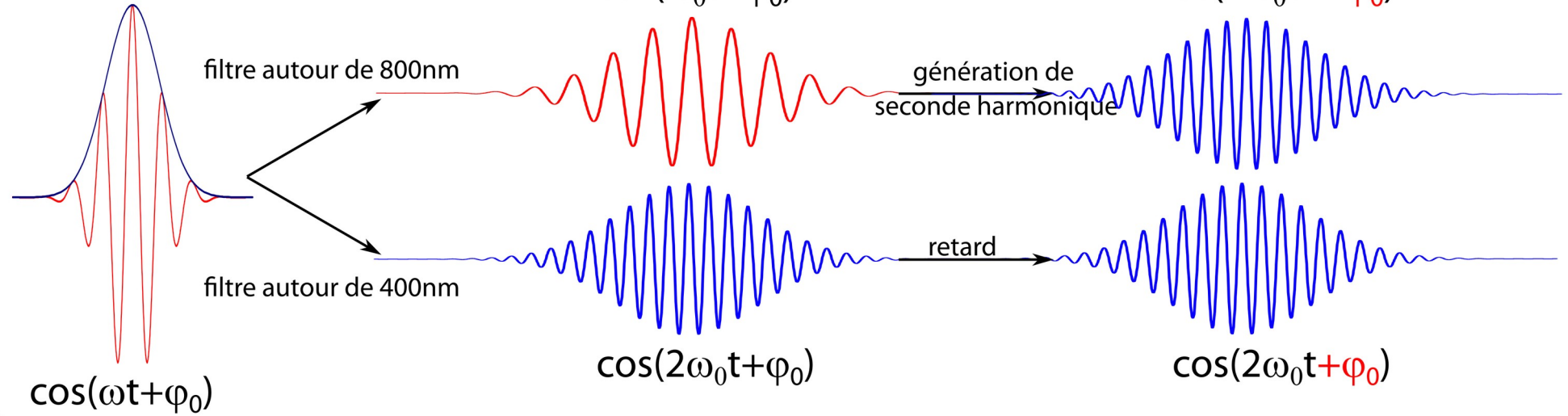
Mesure de la CEP

impulsion large bande
de <400 nm à >800 nm

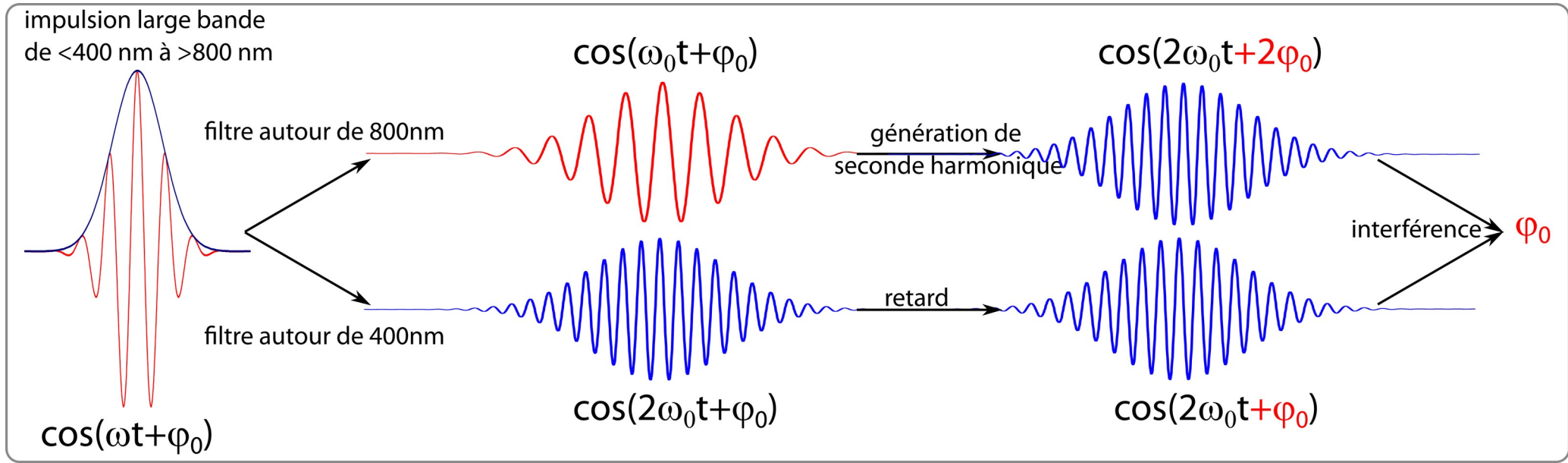


Mesure de la CEP

impulsion large bande
de <400 nm à >800 nm



Mesure de la CEP



Interferométrie f-2f

1436 OPTICS LETTERS / Vol. 26, No. 18 / September 15, 2001

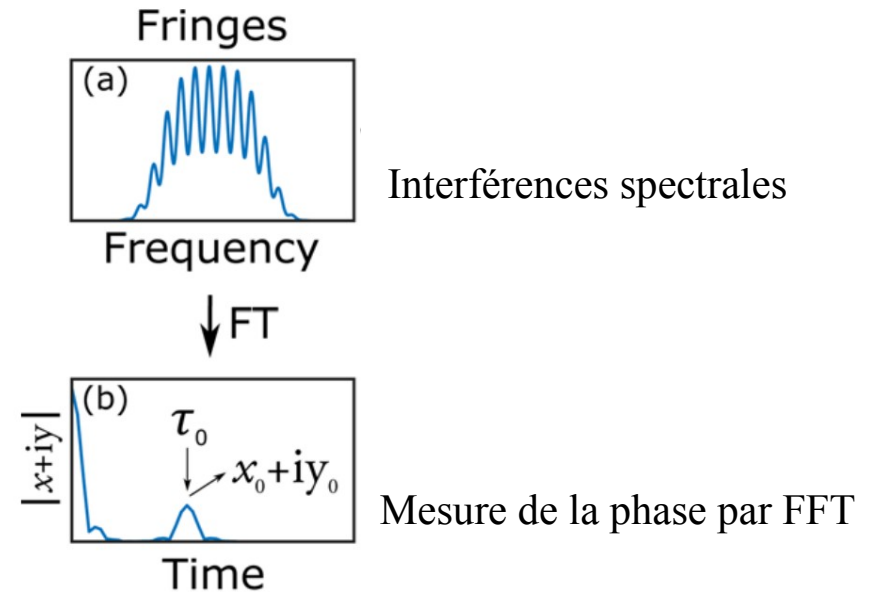
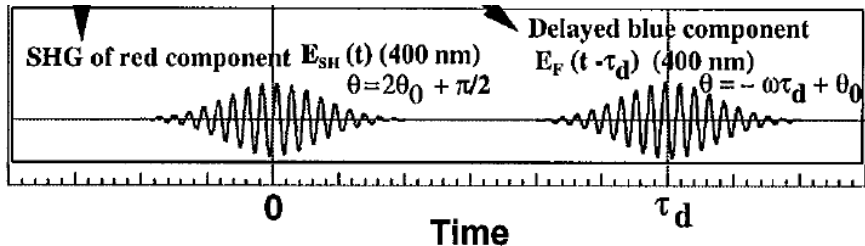
Single-shot measurement of carrier-envelope phase changes by spectral interferometry

Masayuki Kakehata, Hideyuki Takada, Yohei Kobayashi, and Kenji Torizuka

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568, Japan

Yoshihiko Fujihira, Tetsuya Homma, and Hideo Takahashi

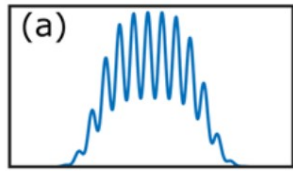
Shibaura Institute of Technology, 3-9-14 Shibaura, Minato-ku, Tokyo 108-8548, Japan



Rétroaction → stabilisation de la CEP du laser

Mesure de la CEP

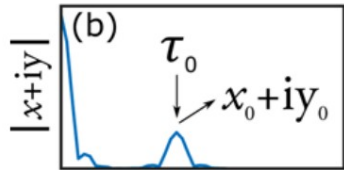
Fringes



Interférences spectrales

Frequency

↓ FT

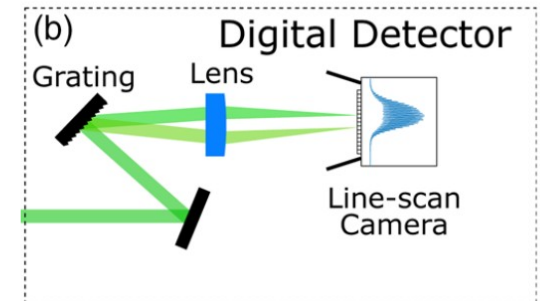


Mesure de la phase par FFT

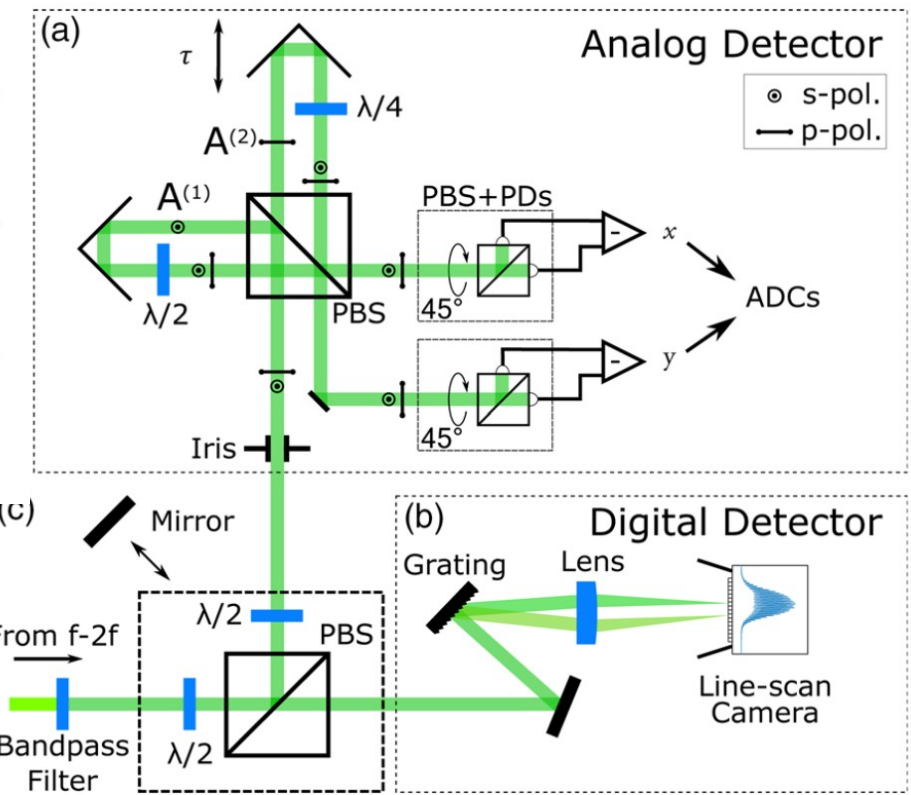
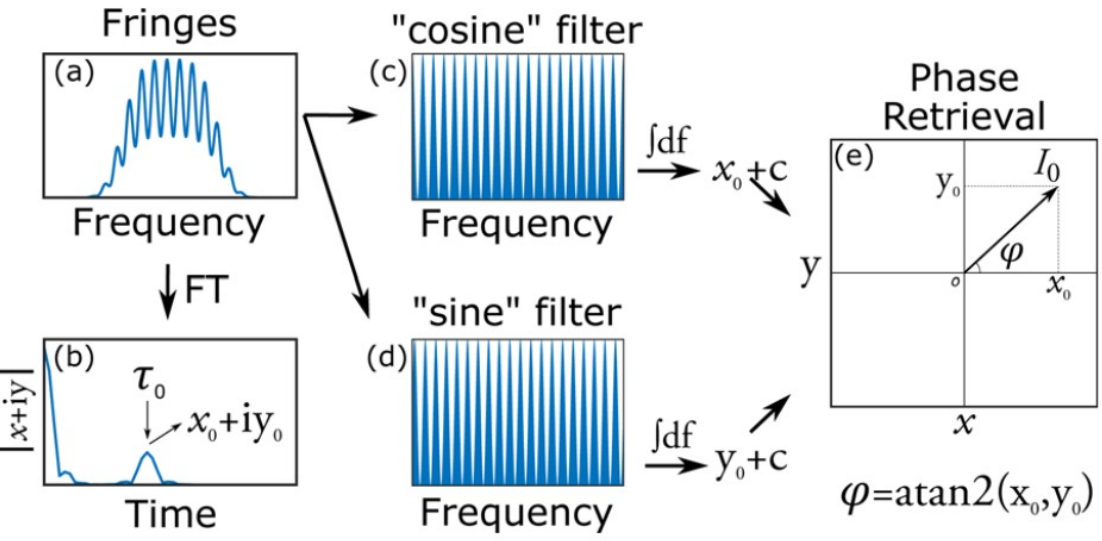
Time

Problème : durée de la mesure

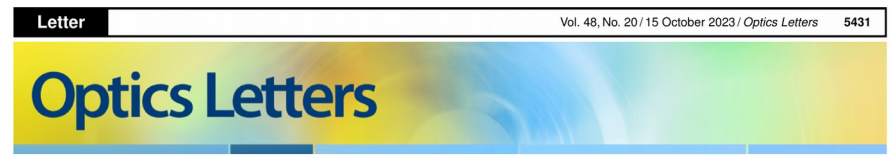
→ impacte la vitesse de rétroaction



Mesure de la CEP



Solution : Mesure analogique



Single-shot, high-repetition rate carrier-envelope-phase detection of ultrashort laser pulses

CHEN GUO,^{1,*} MIGUEL MIRANDA,^{2,3} ANN-KATHRIN RAAB,¹ ANNE-LISE VIOTTI,¹ PAULO TIAGO GUERREIRO,³ ROSA ROMERO,³ HELDER CRESPO,^{3,4} ANNE L'HUILLIER,¹ AND CORD L. ARNOLD¹

¹Department of Physics, Lund University, P. O. Box 118, SE-22100 Lund, Sweden
²IFIMUP-IN and Departamento de Física e Astronomia, Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre 687, 4169-007 Porto, Portugal
³Sphere Ultrafast Photonics, Rua do Campo Alegre, 1021, Edifício FC6, 4169-007 Porto, Portugal
⁴Blackett Laboratory, Imperial College, London SW7 2AZ, UK

Caractérisation d'impulsions atto uniques

Comment les impulsions attosecondes uniques sont-elles été caractérisées ?

RABBITT fonctionne seulement pour un spectre discret

1999-2000 : propositions théoriques : SPIDER, Streak Camera

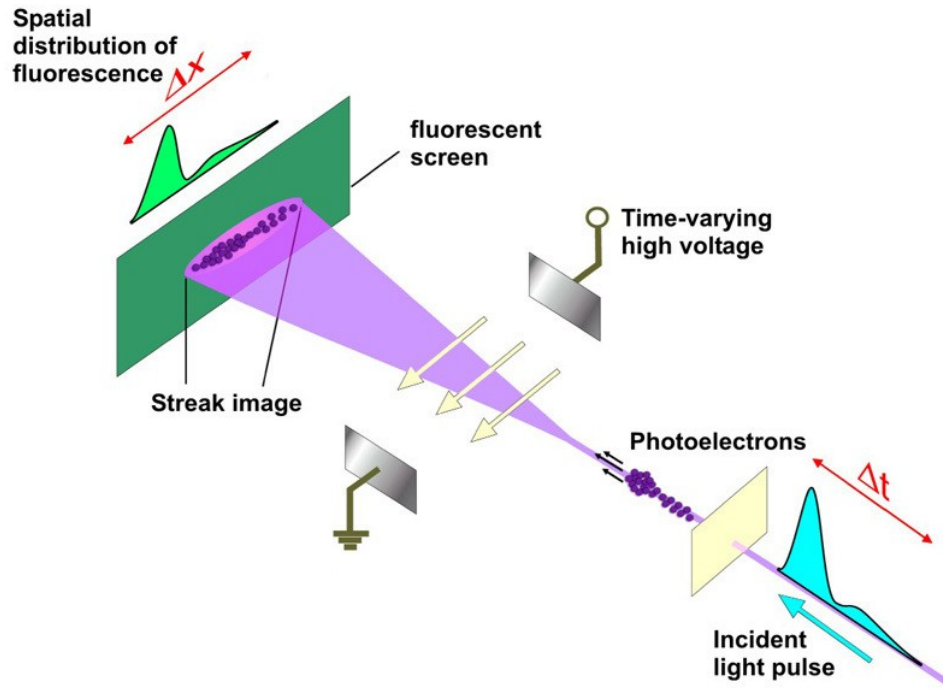
2001 : implémentation expérimentale : impulsion de 650 fs

M. Hentschel et al, Nature 414, 509 (2001)

On utilise toujours la conversion de l'impulsion atto en paquet d'électrons atto

Caméra à balayage de fente attoseconde

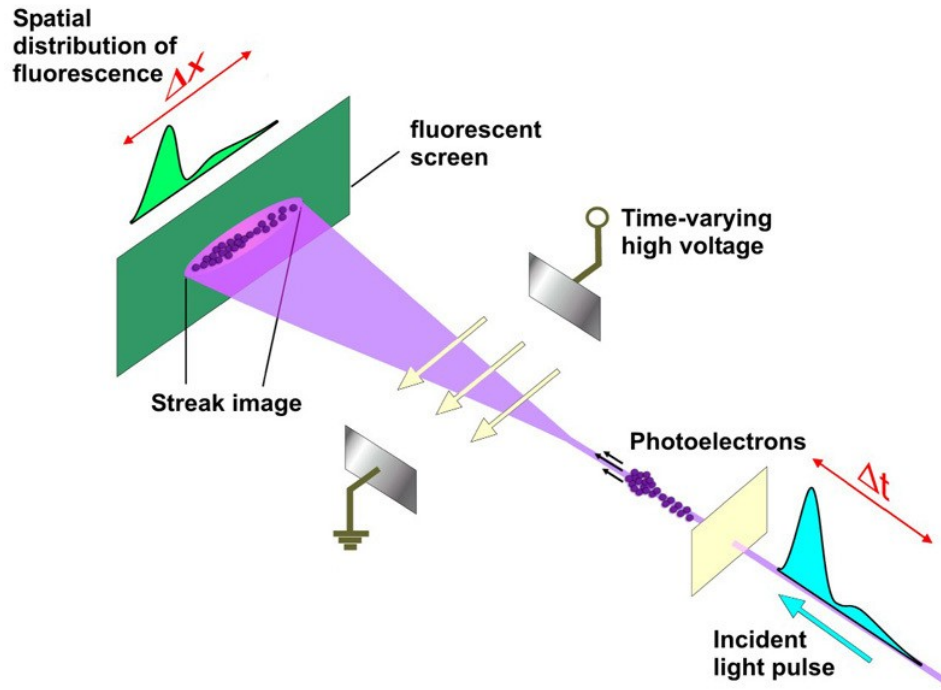
Caméra à balayage de fente conventionnelle : (streak camera)



Résolution : quelques ps

Caméra à balayage de fente attoseconde

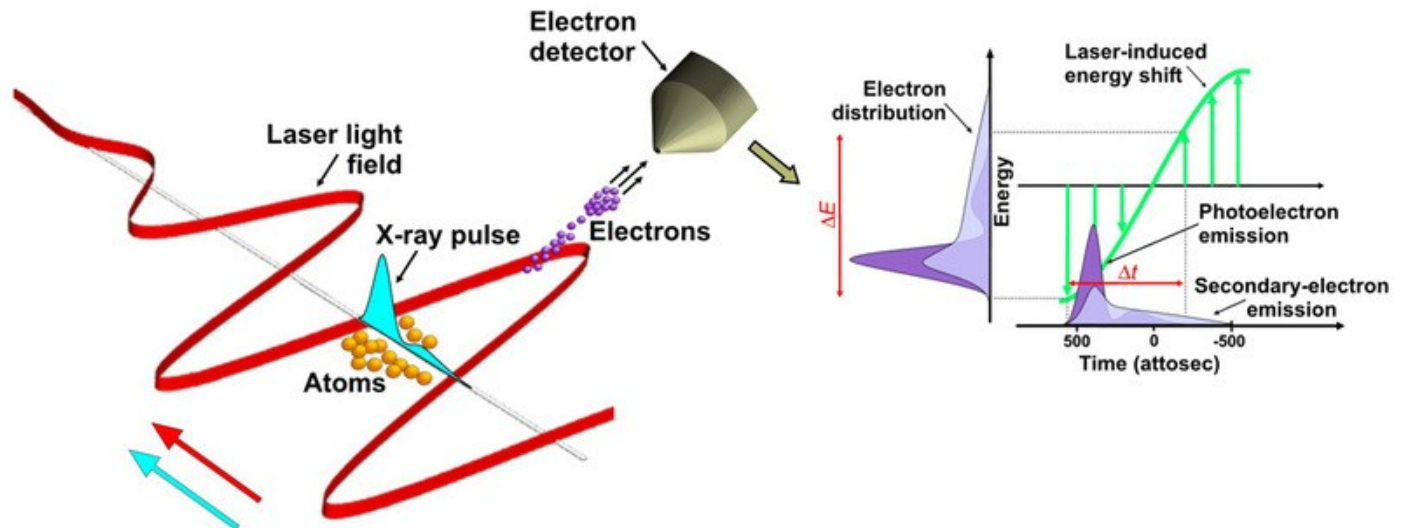
Caméra à balayage de fente conventionnelle : (streak camera)



Résolution : quelques ps

Caméra à balayage de fente atto :

J. Itatani et al, PRL 88, 173903 (2002)



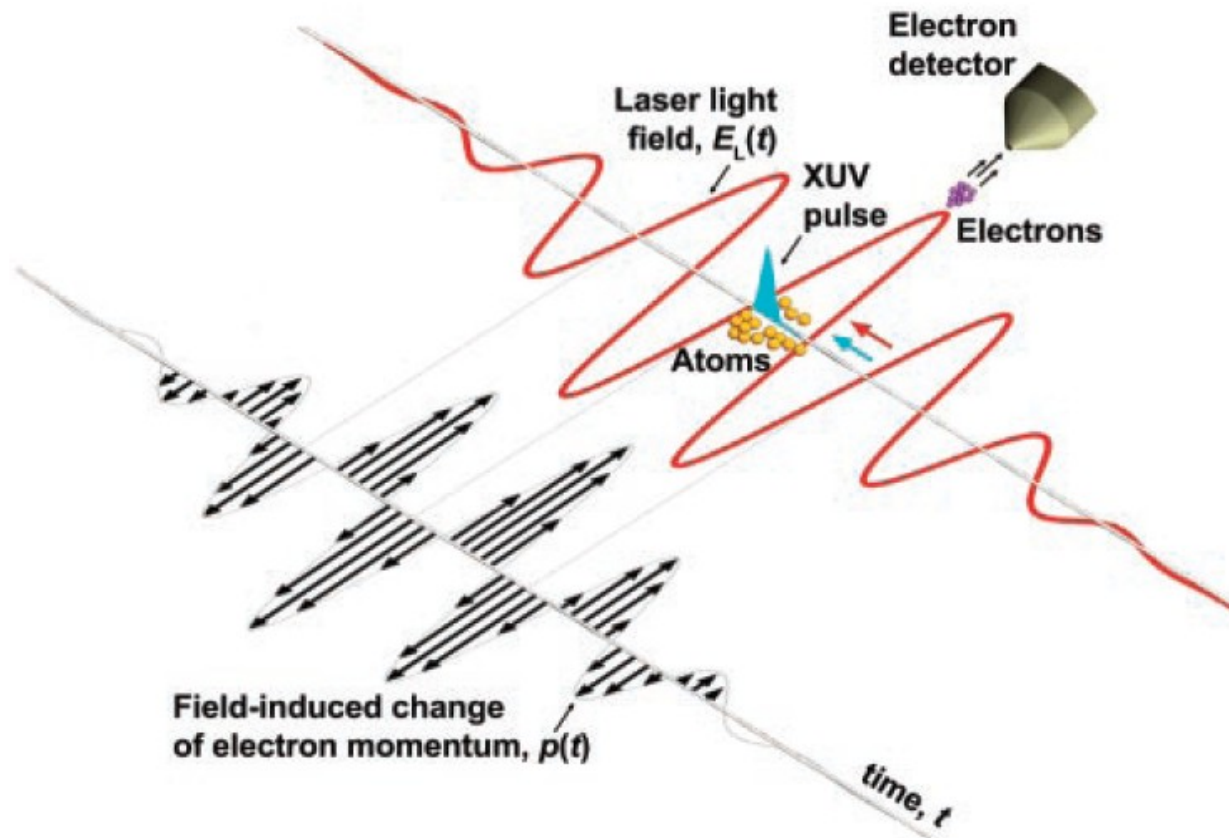
Le champ laser comme modulateur de phase ultrarapide

Convertir l'impulsion attoseconde optique en un paquet d'électrons

Photoionisation d'un gaz rare par l'impulsion attoseconde XUV

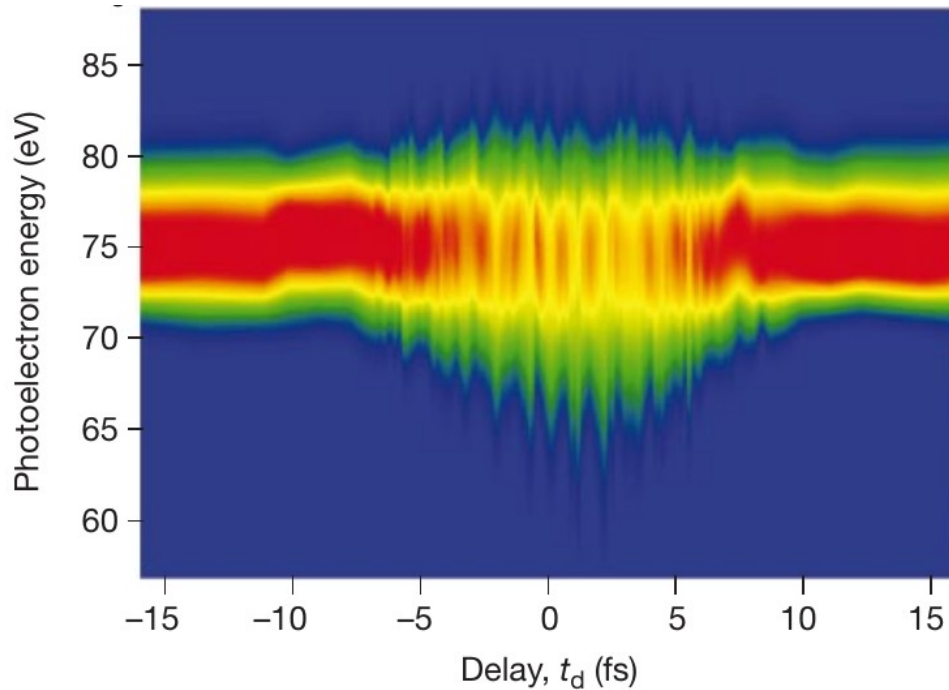
Caractériser le paquet d'électrons

Utilisation d'un champ laser de retard contrôlé comme modulateur de phase



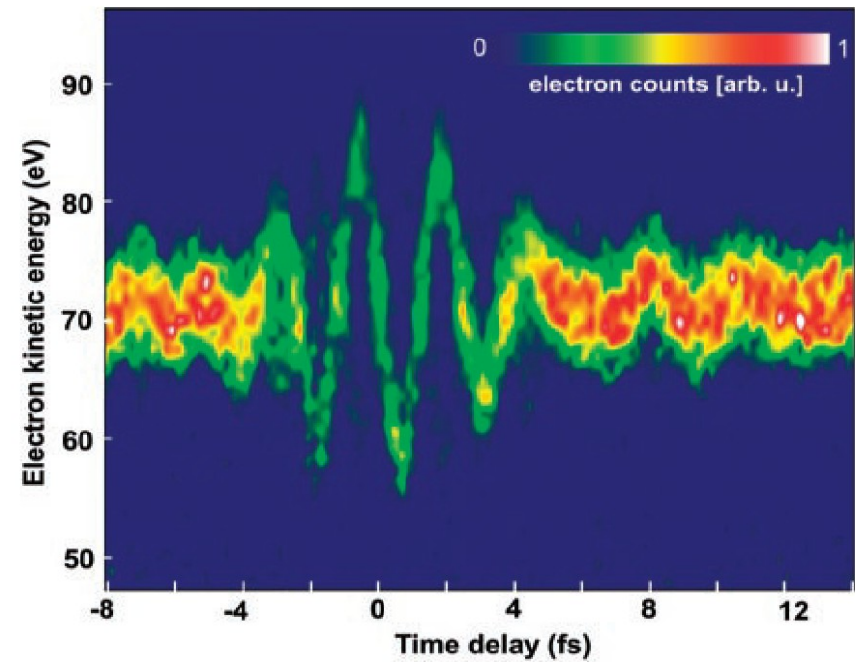
Mesures d'impulsions attosecondes uniques

M. Hentschel et al, Nature 414, 509 (2001)



CEP non stabilisée

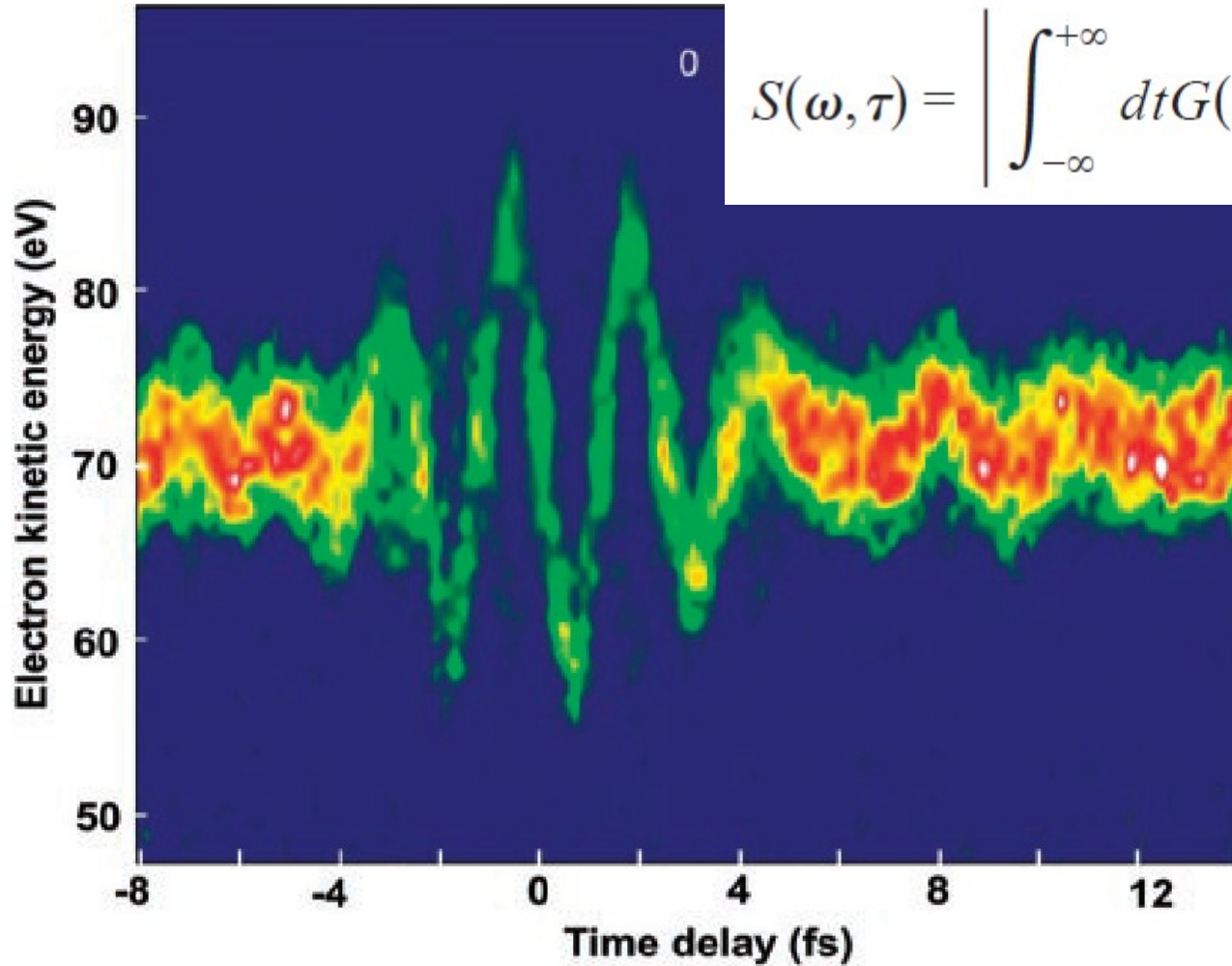
E. Goulielmakis et al, Science 305, 1267 (2004)



CEP stabilisée

Le champ laser comme modulateur de phase ultrarapide

fréquence



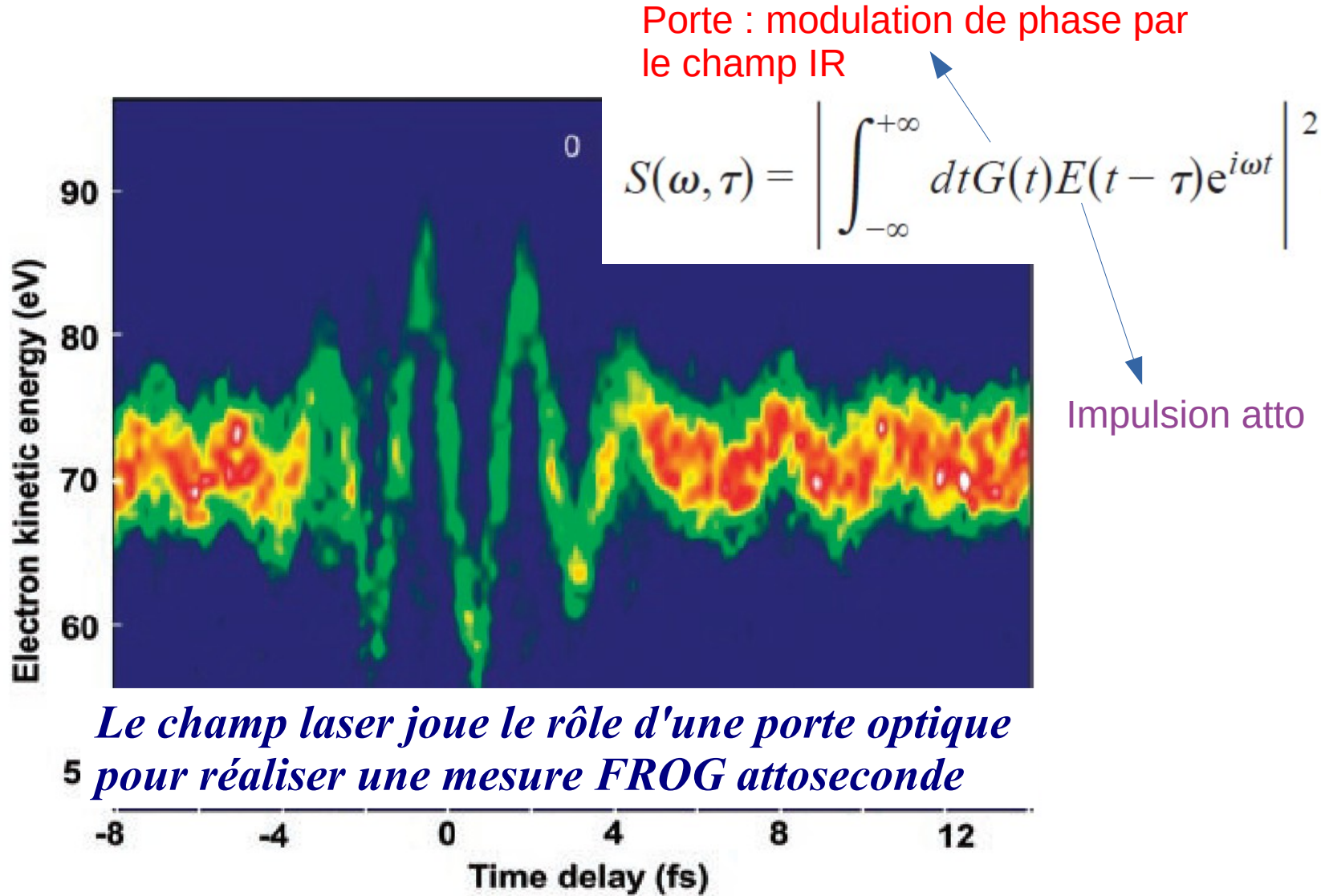
$$S(\omega, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} dt G(t) E(t - \tau) e^{i\omega t} \right|^2$$

C'est un spectrogramme

temps

Le champ laser comme modulateur de phase ultrarapide

fréquence



*Le champ laser joue le rôle d'une porte optique
pour réaliser une mesure FROG attoseconde*

C'est un spectrogramme

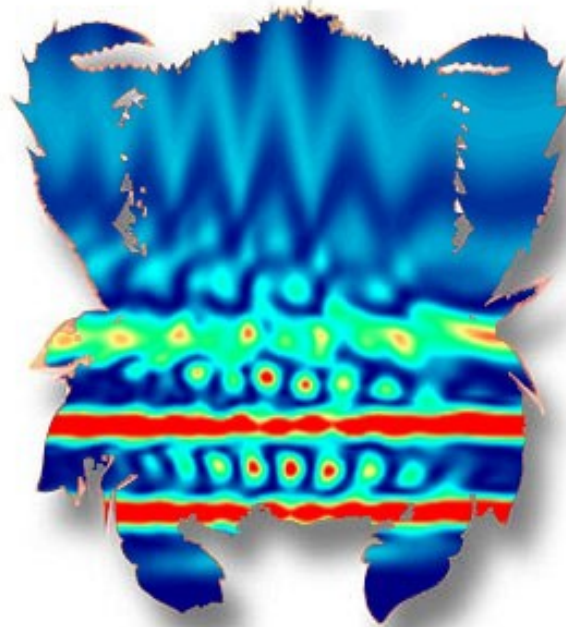
temps

Frequency-resolved optical gating for complete reconstruction of attosecond bursts

Y. Mairesse and F. Quéré

DSM-DRECAM—Service des Photons, Atomes et Molécules, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

(Received 14 April 2004; published 27 January 2005)



*(scientific name : Ranina Ranina. Also called **Spanner crab**. Loc : Australia)*

Algorithme itératif (par exemple PCGPA)
→ Reconstruction de l'impulsion atto et du champ IR

FROG CRAB

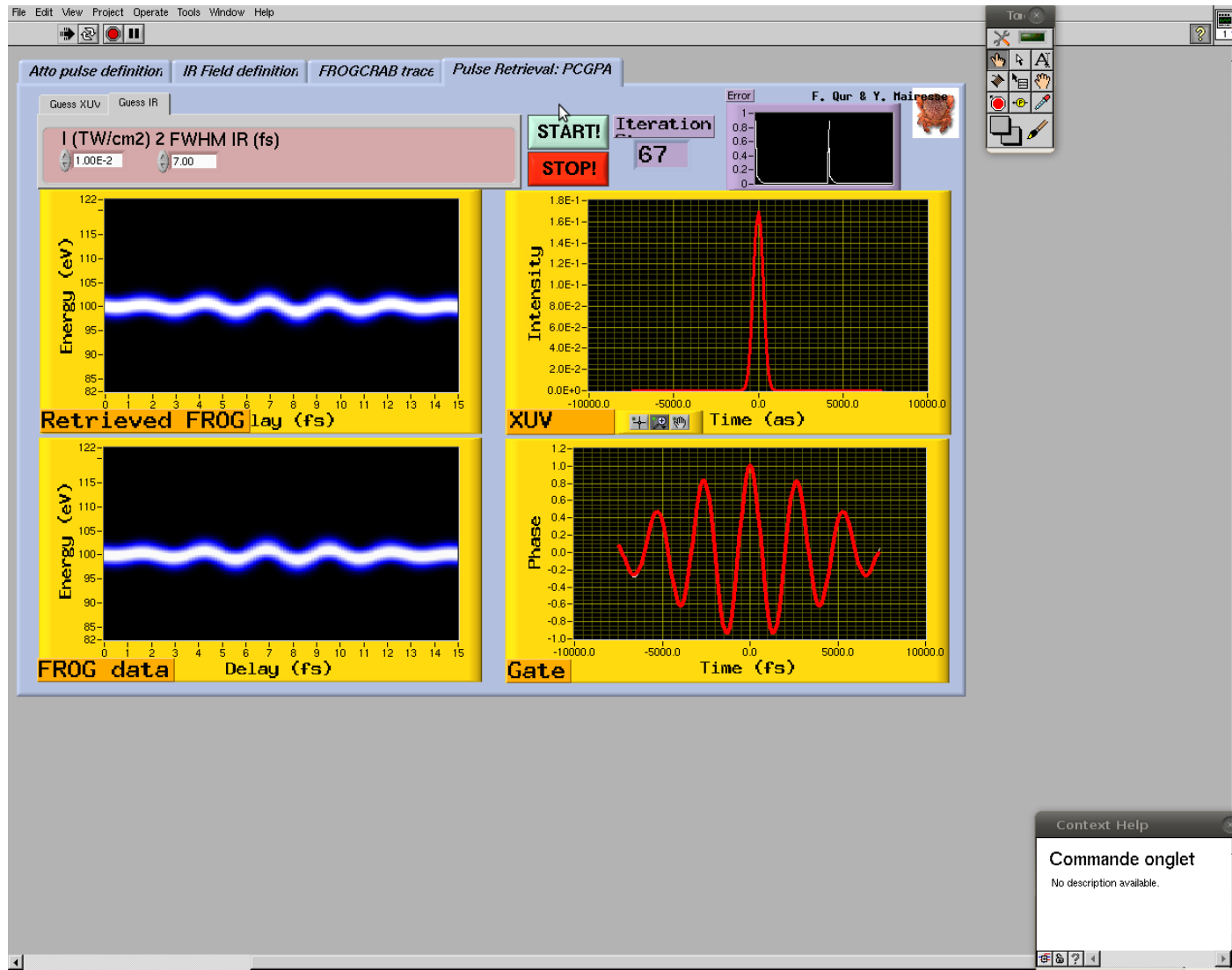
PHYSICAL REVIEW A 71, 011401(R) (2005)

Frequency-resolved optical gating for complete reconstruction of attosecond bursts

Y. Mairesse and F. Quéré

DSM-DRECAM–Service des Photons, Atomes et Molécules, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

(Received 14 April 2004; published 27 January 2005)

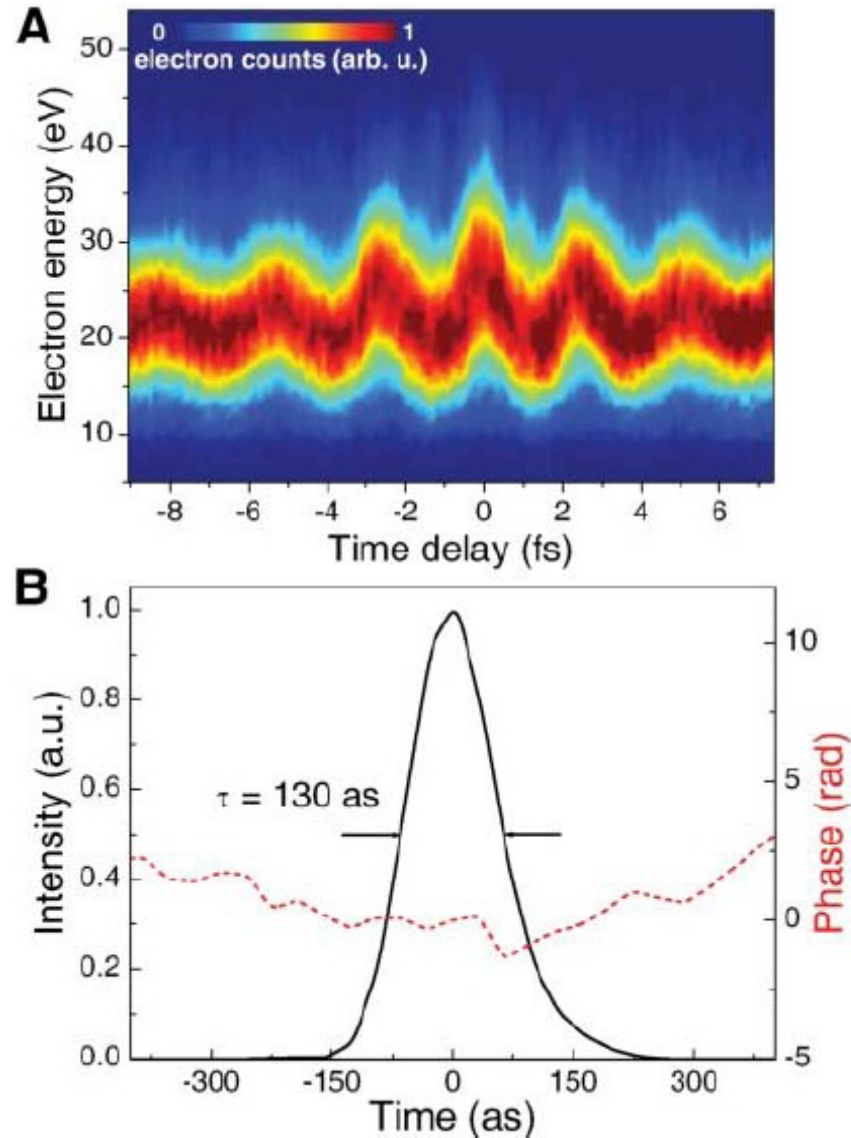


Impulsions atto uniques

Isolated Single-Cycle Attosecond Pulses

G. Sansone,¹ E. Benedetti,¹ F. Calegari,¹ C. Vozzi,¹ L. Avaldi,² R. Flammini,² L. Poletto,³ P. Villoresi,³ C. Altucci,⁴ R. Velotta,⁴ S. Stagira,¹ S. De Silvestri,¹ M. Nisoli^{1*}

G. Sansone et al., Science 314, 443 (2006)

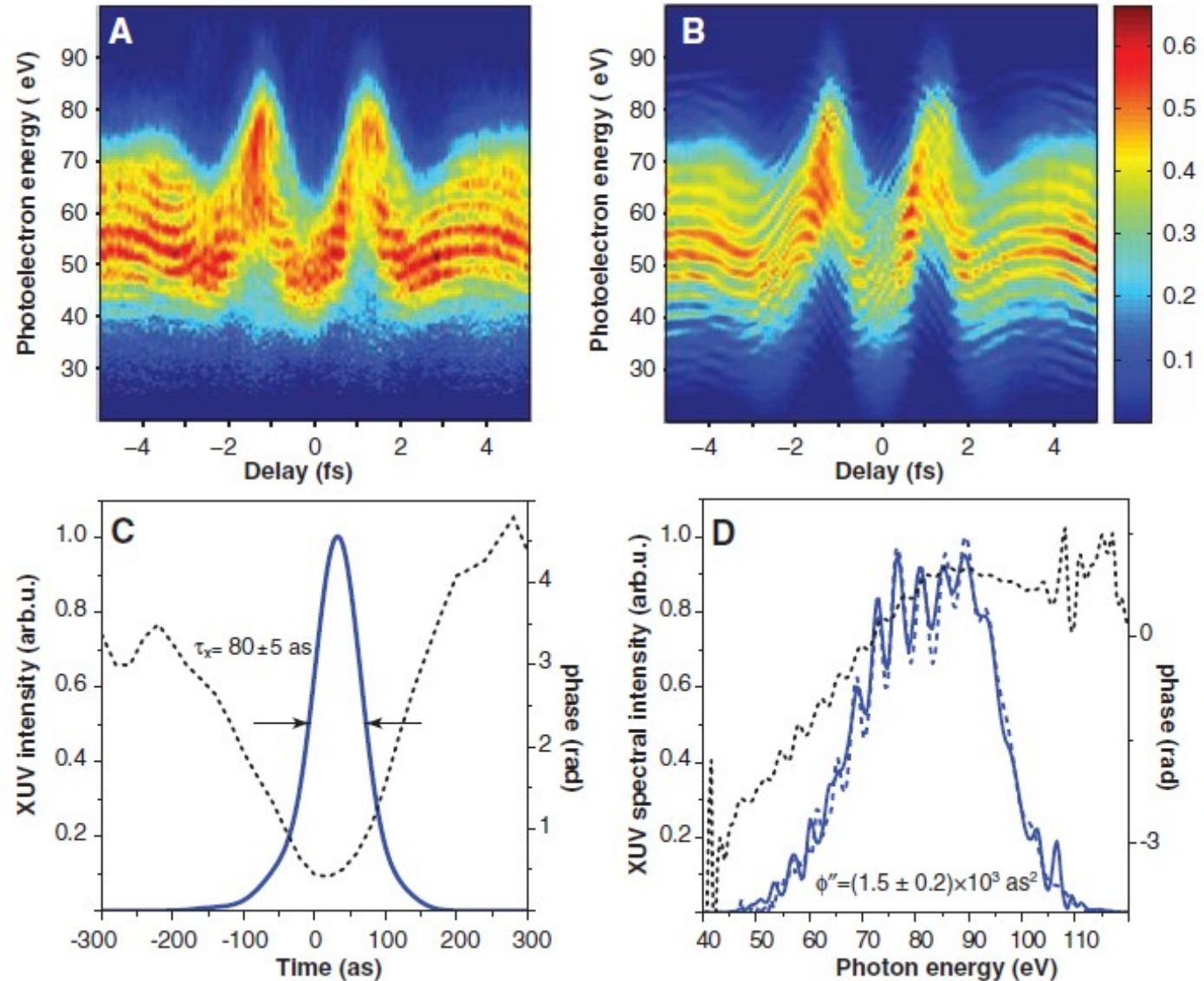


Impulsions atto uniques

Single-Cycle Nonlinear Optics

E. Goulielmakis,^{1*} M. Schultze,¹ M. Hofstetter,² V. S. Yakovlev,² J. Gagnon,¹
M. Uiberacker,² A. L. Aquila,³ E. M. Gullikson,³ D. T. Attwood,³ R. Kienberger,¹
F. Krausz,^{1,2*} U. Kleineberg^{2*}

E. Goulielmakis et al., Science 320, 1614 (2008)



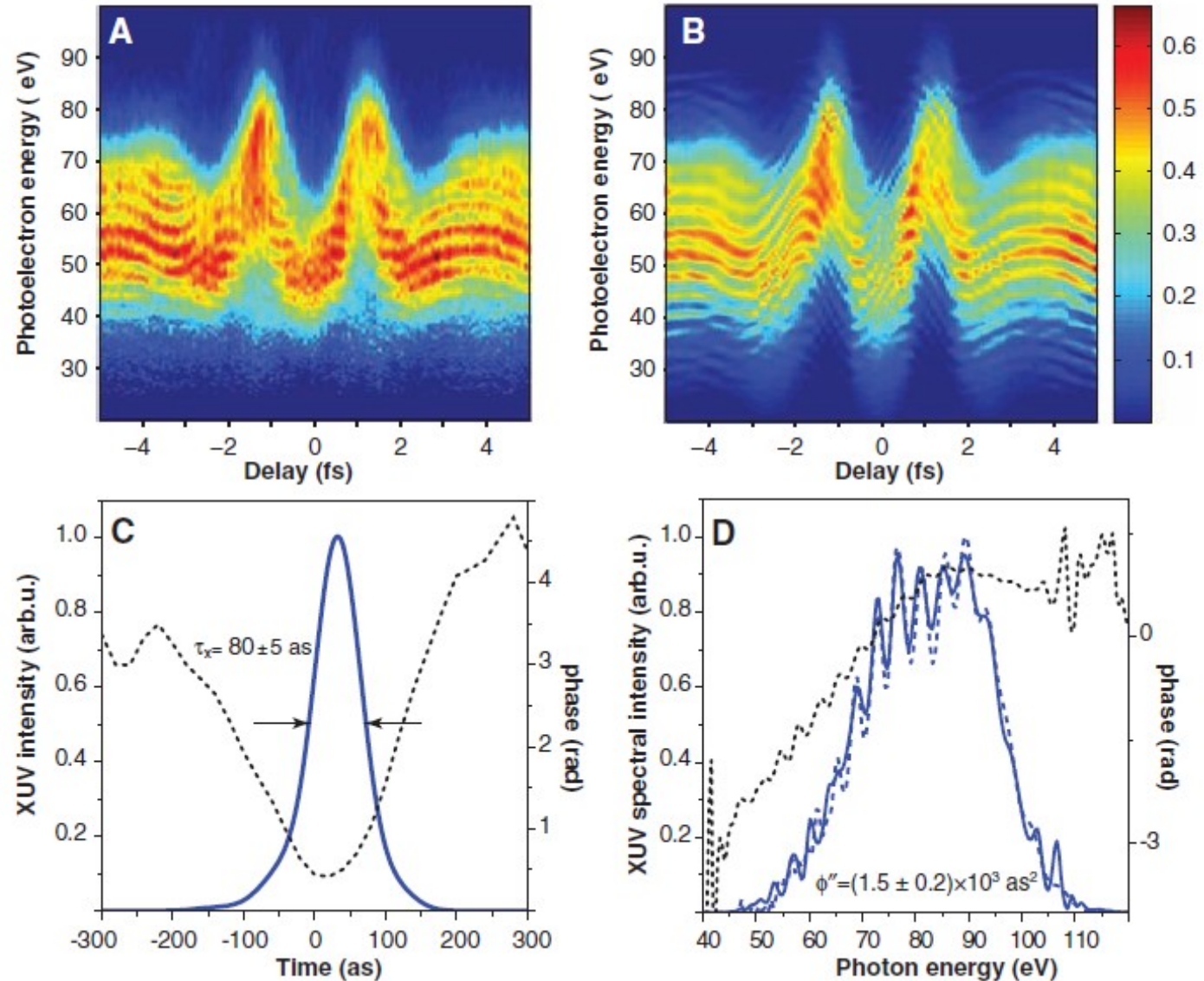
Impulsions atto uniques

Single-Cycle Nonlinear Optics

E. Goulielmakis,^{1*} M. Schultze,¹ M. Hofstetter,² V. S. Yakovlev,² J. Gagnon,¹
M. Uiberacker,² A. L. Aquila,³ E. M. Gullikson,³ D. T. Attwood,³ R. Kienberger,¹
F. Krausz,^{1,2*} U. Kleineberg^{2*}

E. Goulielmakis et al., Science 320, 1614 (2008)

Remarque : y a t-il vraiment une impulsion attoseconde unique dans cette expérience?

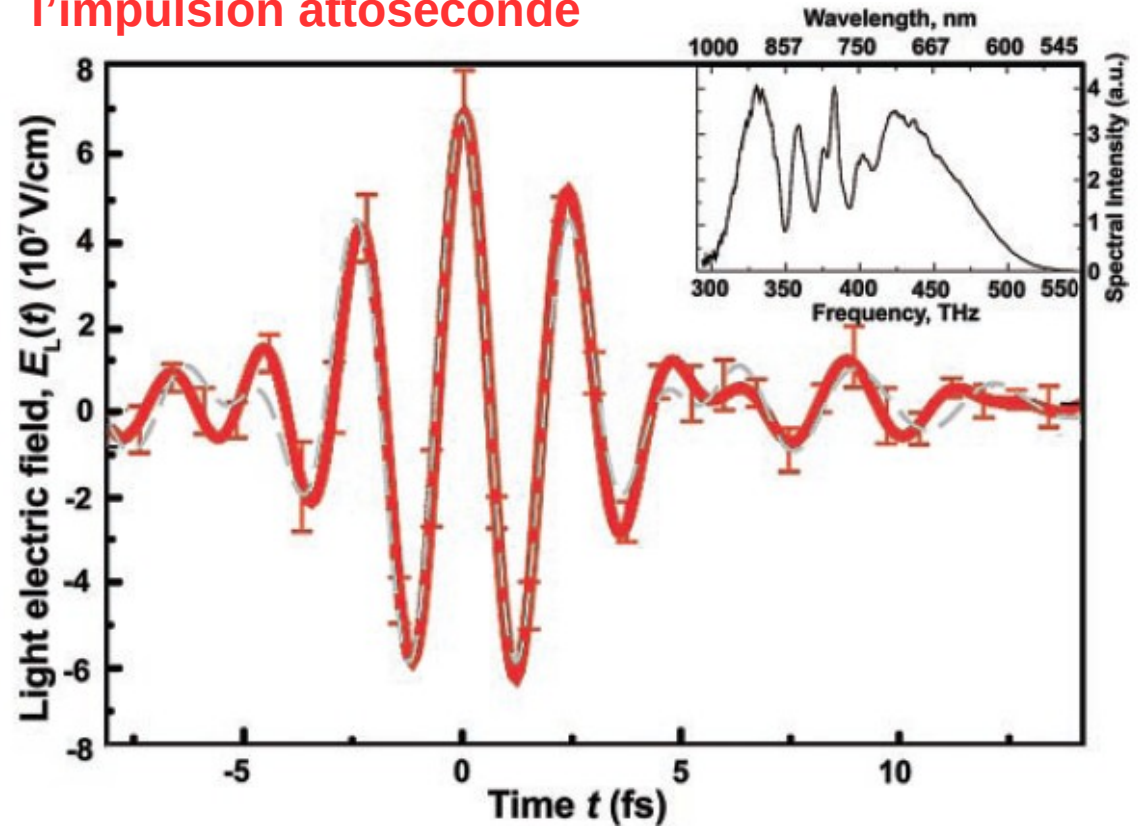
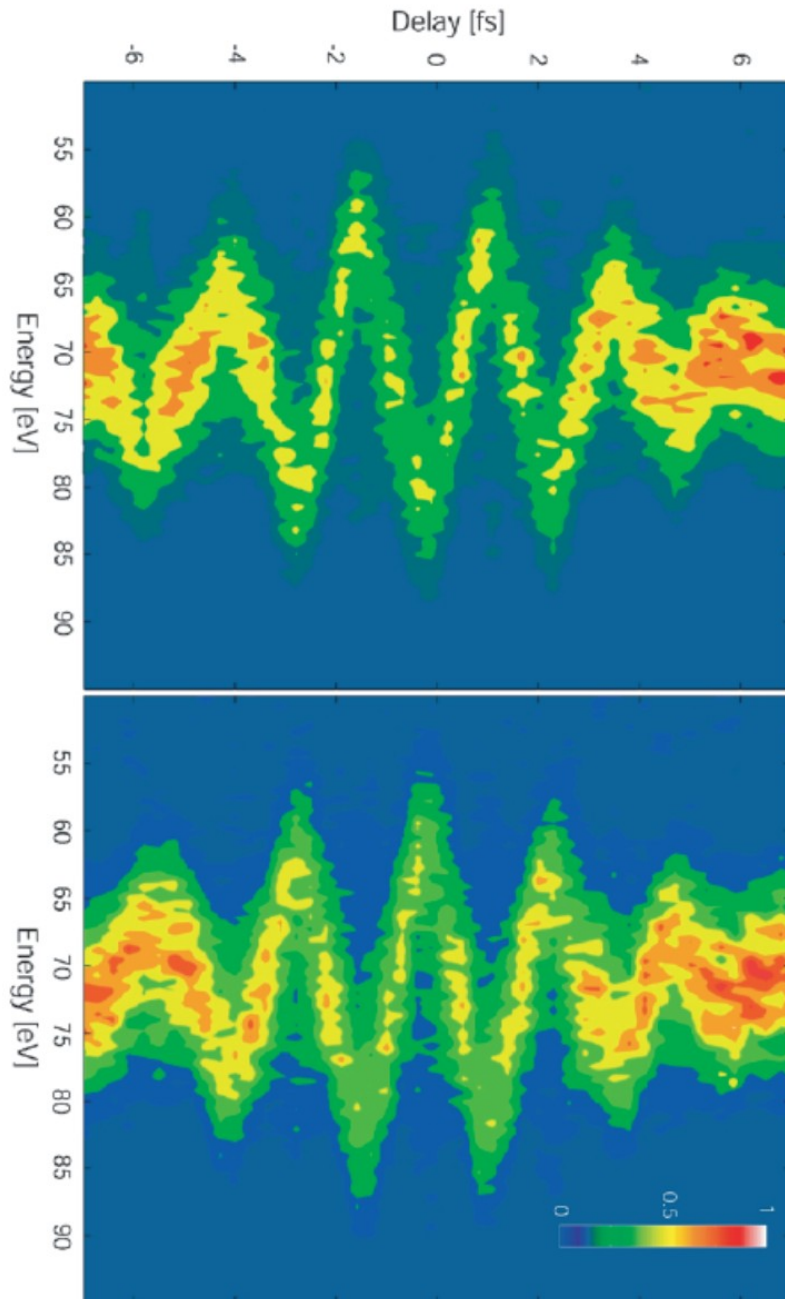


Mesure du champ électrique infrarouge

FROG CRAB fournit l'impulsion attoseconde et l'impulsion infrarouge

→ **Mesure directe du champ électrique de l'impulsion laser**

On échantillonne l'oscillation du laser avec l'impulsion attoseconde

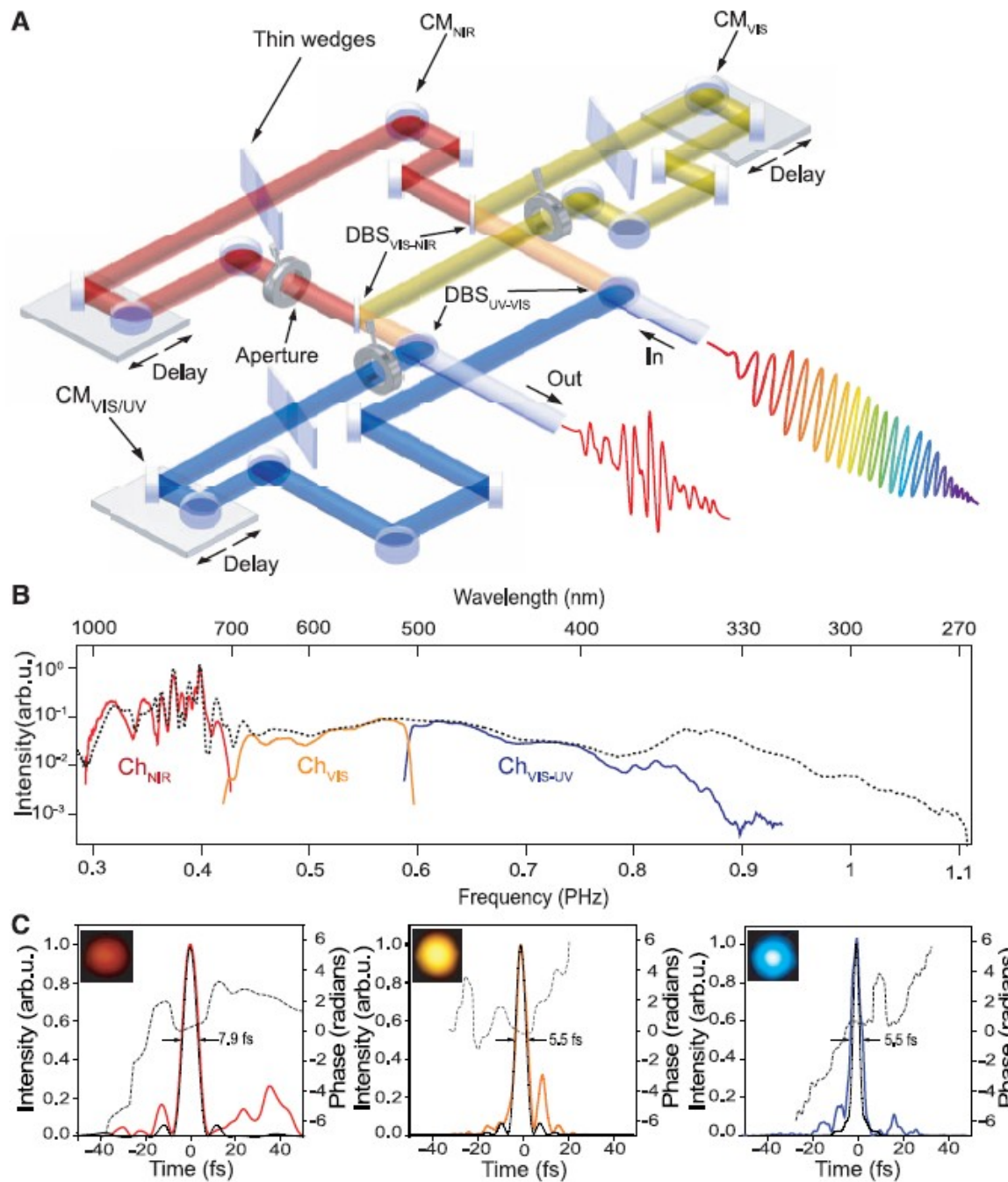


Visualisation directe de l'oscillation du champ électrique infrarouge

Mesure de champs lasers complexes

Champ laser très large bande. Possibilité de sculpter le champ électrique laser

A. Wirth et al, Science 334, 194 (2012)



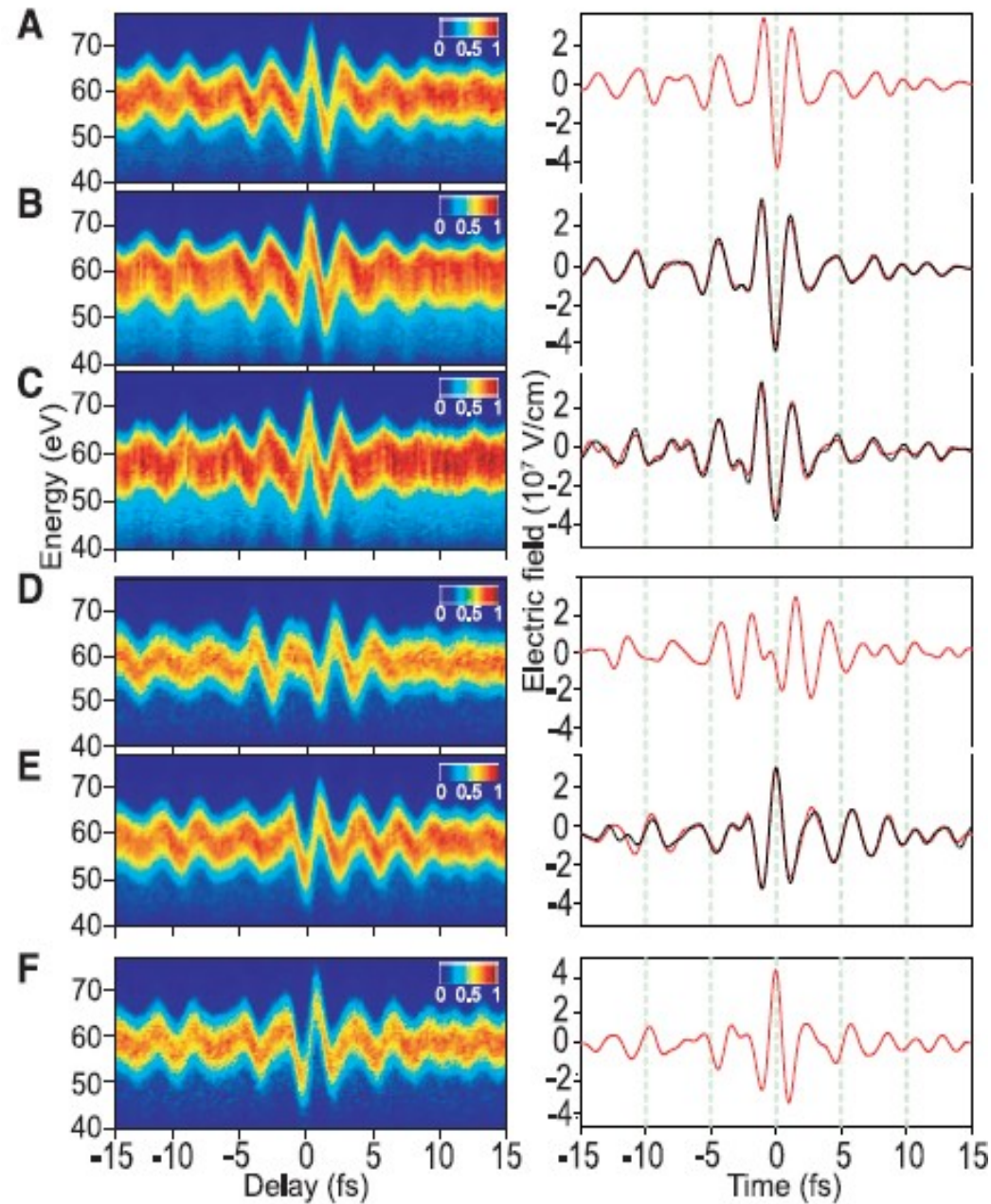
Mesure de champs lasers complexes

A. Wirth et al, Science 334, 194 (2012)



Mesure de champs lasers complexes

A. Wirth et al, Science 334, 194 (2012)



Mesure de champs lasers avec polarisation complexe

Détection de la distribution 3D des photoélectrons
→ **Mesure de champs électriques vectoriels**

R. Boge et al, Opt. Express 26967 (2014)

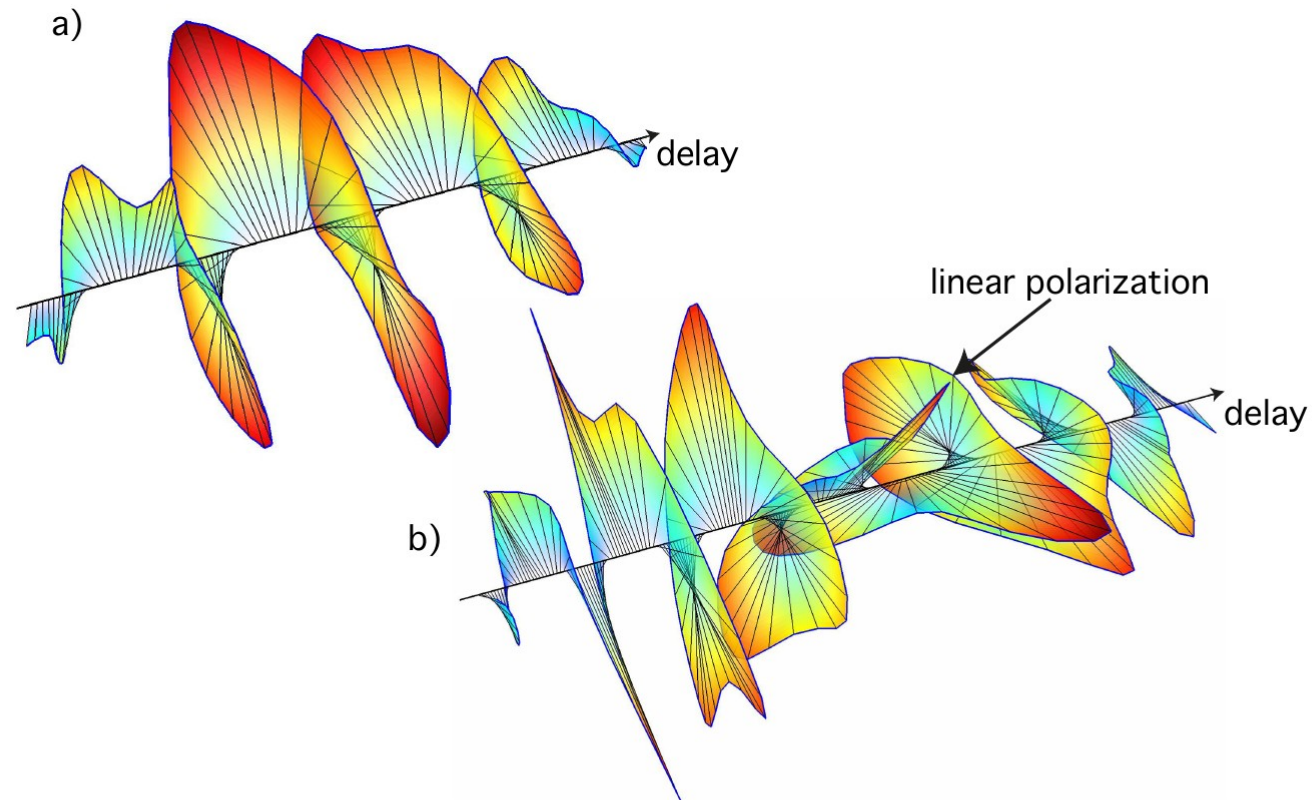


Fig. 4. Visualization of the temporal behavior of the pulse electric field for PS1 (a) and PS2 (b). In (b) one can clearly see a change in helicity with a linear part in the center of the pulse.

Mesure complète d'un train atto

New Journal of Physics

The open-access journal for physics

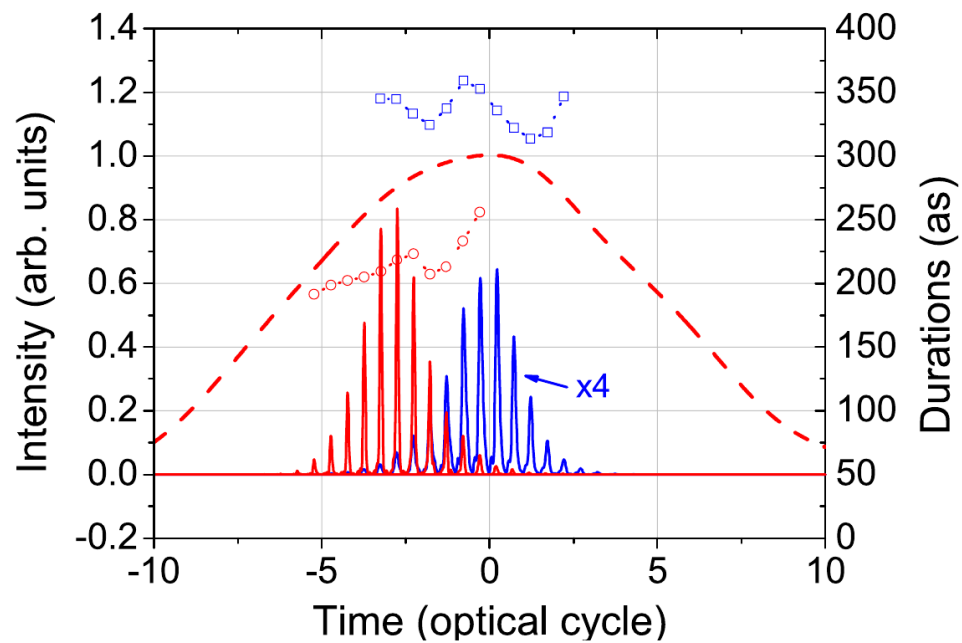
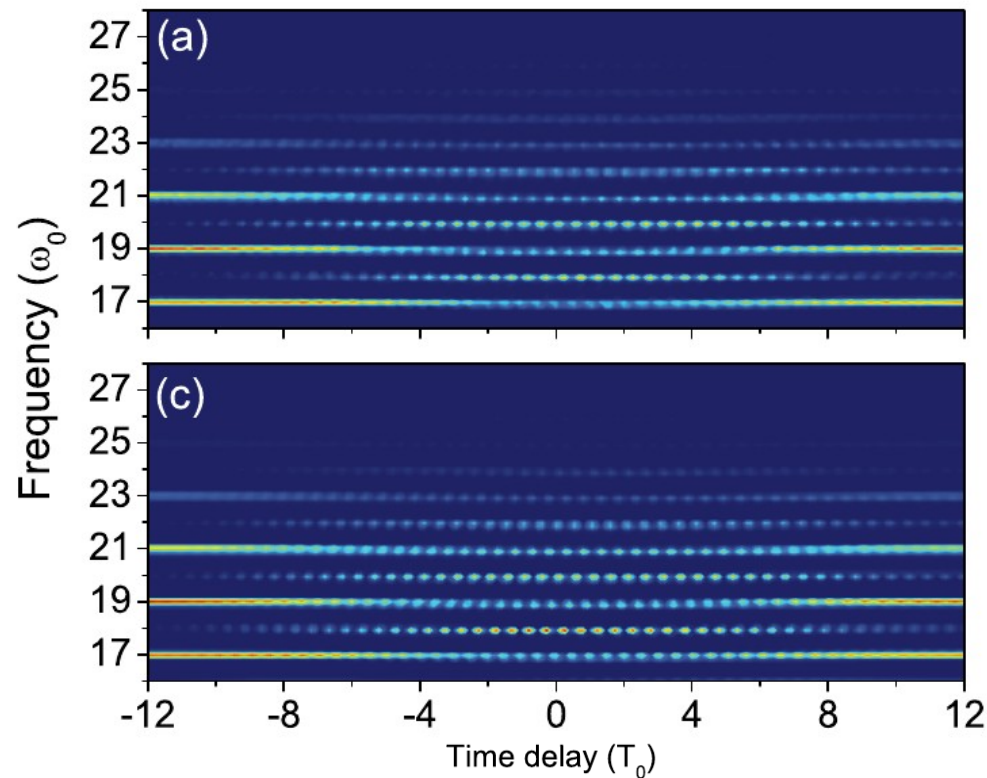
Complete temporal reconstruction of attosecond high-harmonic pulse trains

Kyung Taec Kim^{1,2}, Dong Hyuk Ko¹, Juyun Park¹, Valer Tosa^{1,3}
and Chang Hee Nam^{1,4}

¹Department of Physics and Coherent X-ray Research Center, KAIST,
Daejeon 305-701, Korea

²Advanced Photonics Research Institute and Center for Femto-Atto Science
and Technology, GIST, Gwangju 500-712, Korea

³National Institute for R&D of Isotopic and Molecular Technologies,
400293 Cluj-Napoca, Romania



Limitations de PCGPA

PCGPA repose sur des transformées de Fourier

Valide dans FROGCRAB seulement si la largeur spectrale de l'impulsion ΔW est \ll son énergie centrale W_0

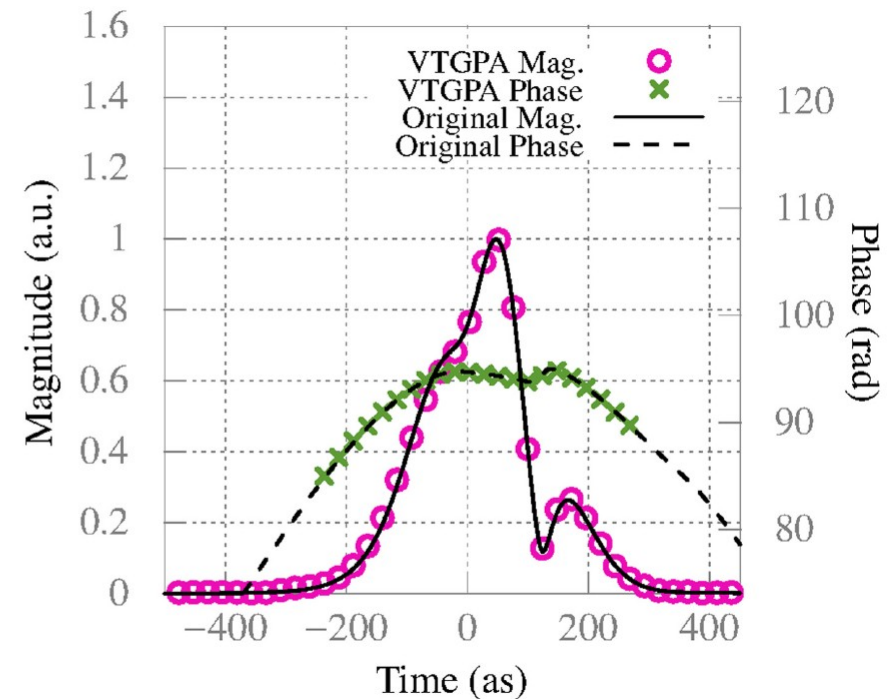
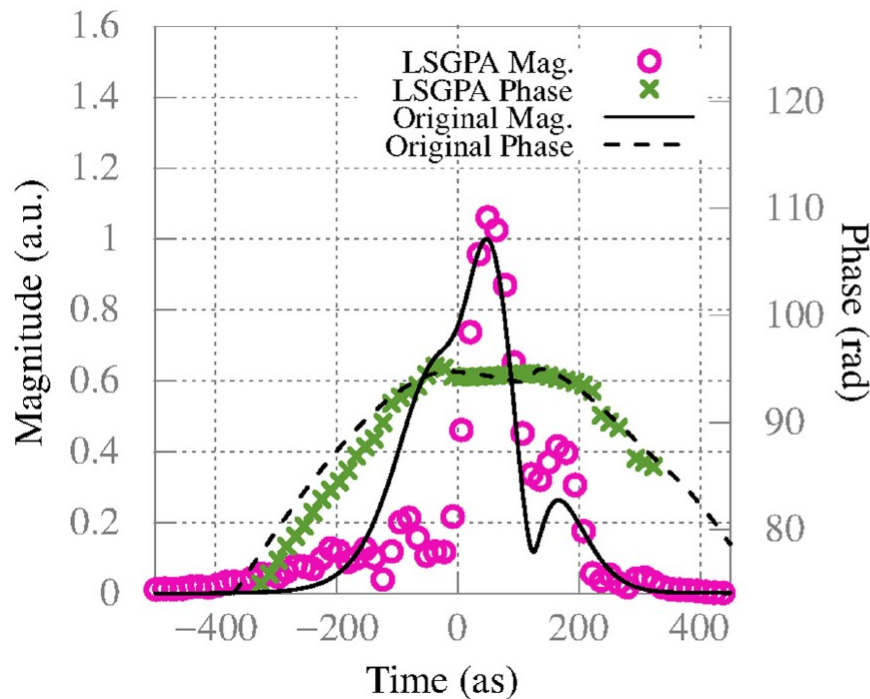
“central momentum approximation”

Si ce n'est pas le cas, on ne peut pas utiliser la transformée de Fourier et on doit utiliser d'autres algorithmes

Nouveaux algos \rightarrow mesure d'impulsions attosecondes très large bande

PAPER

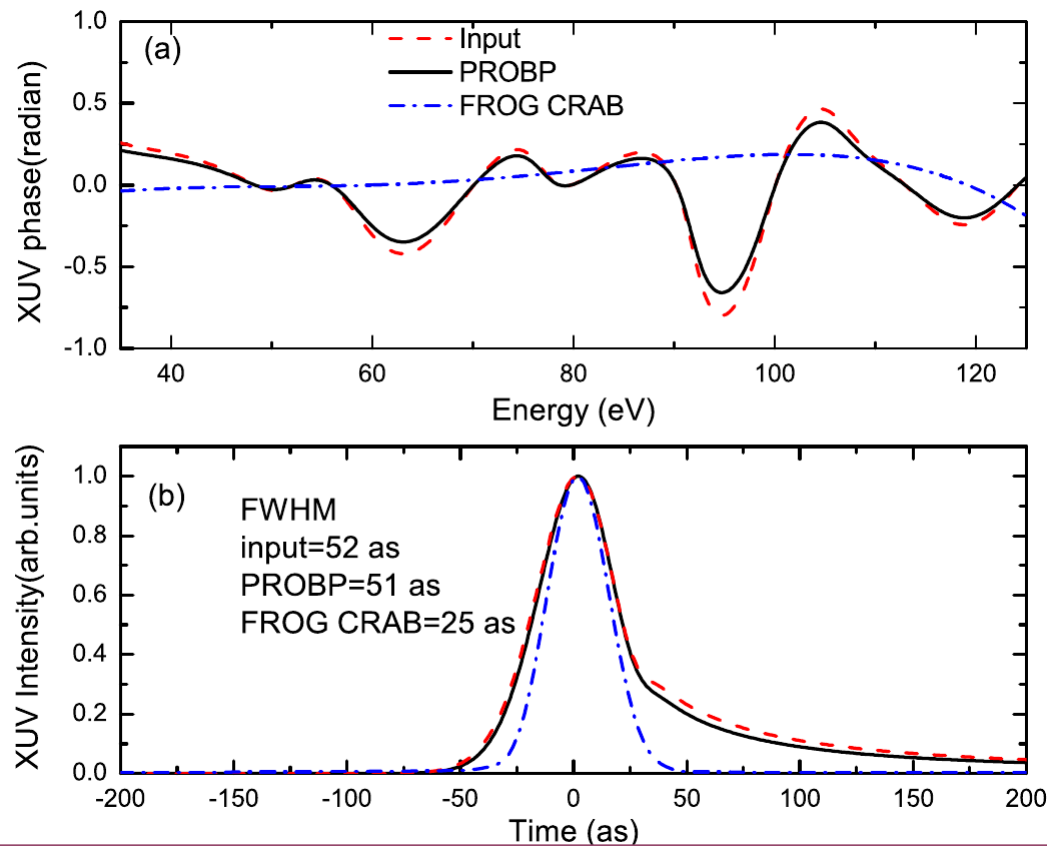
Volkov transform generalized projection algorithm for attosecond pulse characterization

P D Keathley¹, S Bhardwaj¹, J Moses¹, G Laurent¹ and F X Kärtner^{1,2}¹ Department of Electrical Engineering and Computer Science and Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology, 77 Mass. Ave, Cambridge, MA 02139, USA² Center for Free-Electron Laser Science, DESY and Department of Physics, University of Hamburg, Notkestraße 85, D-22607 Hamburg, Germany

Reconstruction précise d'impulsions large bande complexes

Phase-retrieval algorithm for the characterization of broadband single attosecond pulsesXi Zhao,^{1,2} Hui Wei,¹ Yan Wu,^{1,3} and C. D. Lin^{1,*}¹*Department of Physics, Kansas State University, Manhattan, Kansas 66506, USA*²*Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, People's Republic of China*³*School of Science, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, People's Republic of China*

(Received 17 February 2017; published 10 April 2017)

Algorithme génétique, pas de FFT, pas de central momentum approximation**Reconstruction précise d'impulsions large bande complexes**

PROOF – Phase Retrieval by Omega Oscillation Filtering

Traitement du signal différent : FFT de chaque composante énergétique

→ Reconstruction de la phase spectrale, même large bande

NATURE COMMUNICATIONS | 8: 186

| DOI: 10.1038/s41467-017-00321-0 | www.nature.com/naturecommunications

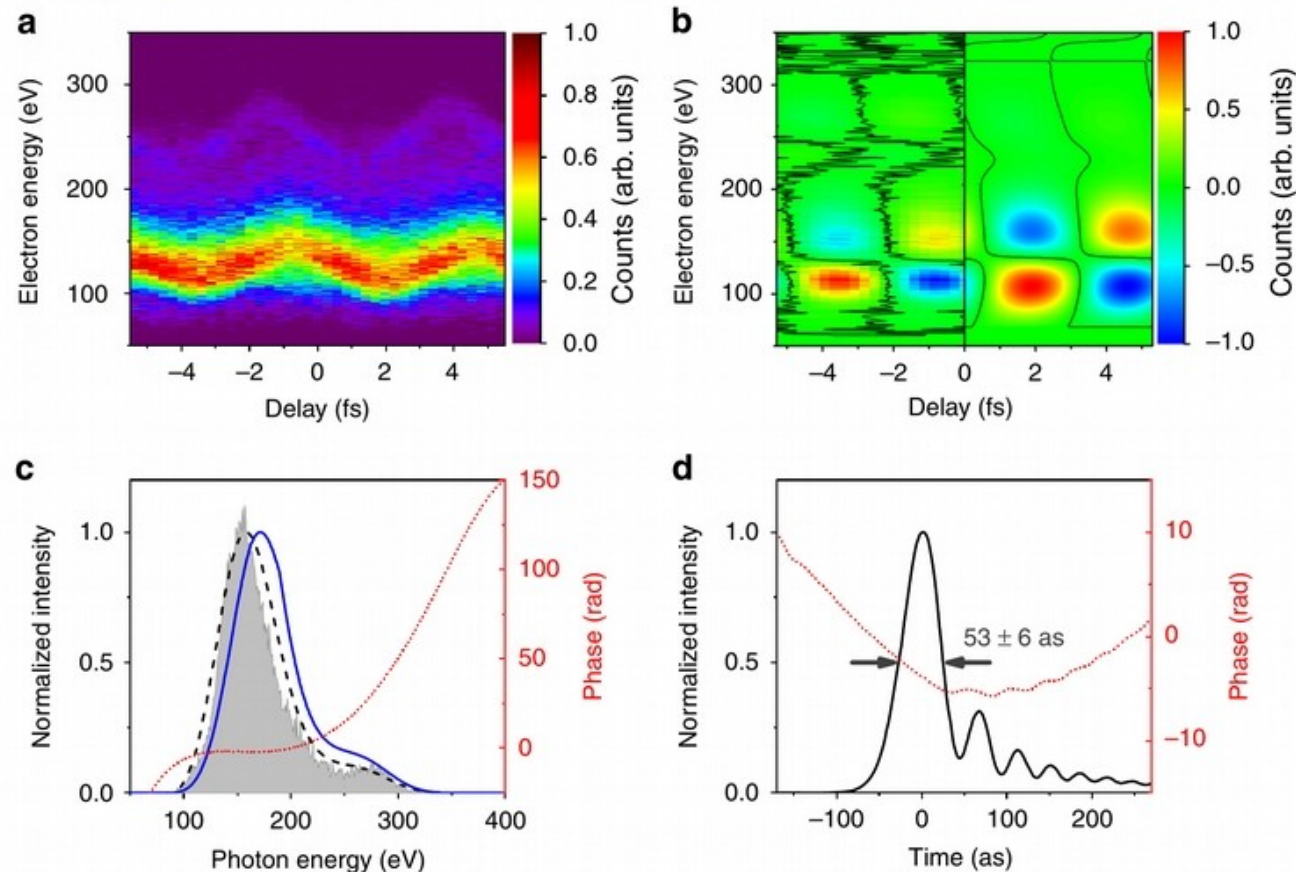


Fig. 3 PROOF retrieved 53 as soft X-ray pulse. **a** Photoelectron spectrogram as a function of temporal delay between the soft X-ray and the streaking IR pulses in the case of a 400-nm-thick tin filter. A negative delay corresponds to an earlier IR pulse arrival. **b** Filter I_ω trace (-5 to 0 fs) from the spectrogram in **a** and the retrieved I_ω trace (0-5 fs). **c** Experimentally recorded (gray shade) and PROOF-retrieved spectra (black dash) by adding helium photoionization potential (24.6 eV); corrected photon spectrum (blue solid), and spectrum phase (red dot) from PROOF. **d** Retrieved temporal intensity profile and phase of the 53 as pulses

Au delà de FROG-CRAB: mixedFROG

ARTICLE

Received 11 Aug 2014 | Accepted 30 Jan 2015 | Published 6 Mar 2015

DOI: 10.1038/ncomms7465

OPEN

Partially coherent ultrafast spectrography

C. Bourassin-Bouchet^{1,2} & M.-F. Courie¹

NATURE COMMUNICATIONS | 6:6465 | DOI: 10.1038/ncomms7465 | www.nature.com/naturecommunications

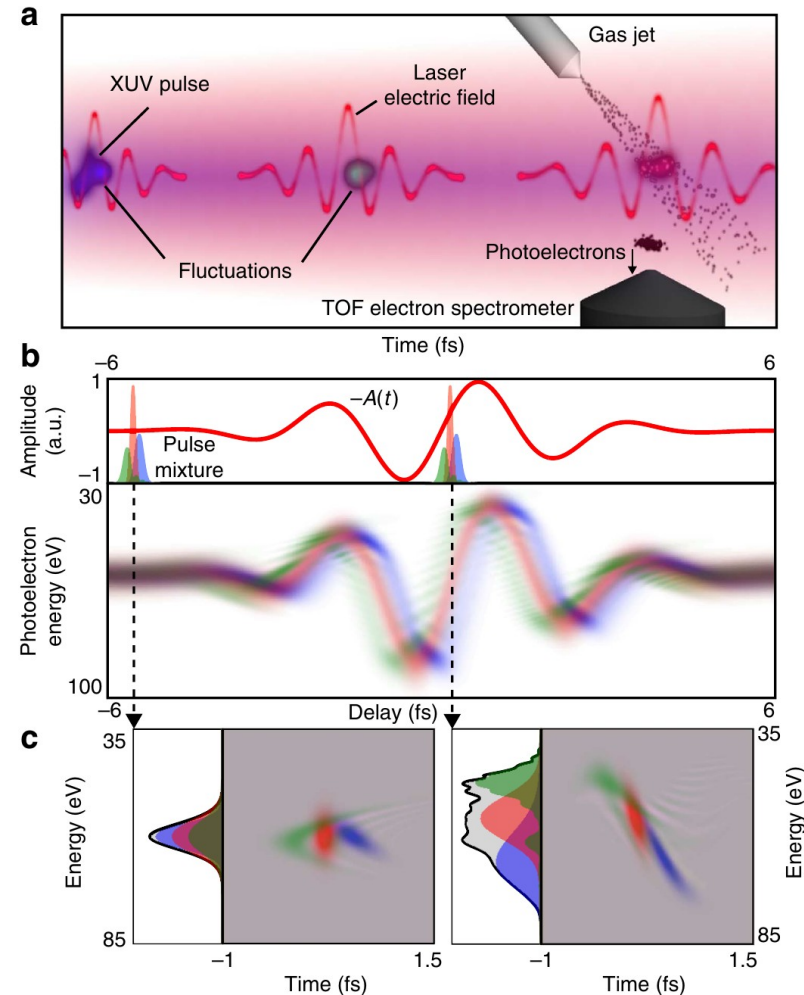
Les fluctuations (ou les couplages spatio temporels...) créent plusieurs traces FROG-CRAB qui s'ajoutent

Comment les distinguer ?

Idee : emprunter des idées de l'optique quantique et de l'imagerie par diffraction cohérente

- Augmenter l'intensité du laser
→ Sépare les différentes contributions incohérentes
- Utiliser un algorithme (MSGPA) pour les retrouver

Figure 1 | Partially coherent spectrography with ultrashort XUV pulses. (a) Schematic of a FROG-CRAB measurement in the presence of decoherence, here due to shot-to-shot XUV pulse fluctuations. (b) Photoelectron spectra obtained for various delays between the pulse mixture and the 800-nm laser pulse (duration 3-fs FWHM, intensity 8 TW cm^{-2}) represented by its vector potential $A(t)$. Each colour (red, green and blue) corresponds to a pure ultrashort pulse. (c) Wigner function $W_p(\omega, t)$ and the associated energy spectrum of the electron wave packet without (left panel) and with (right panel) laser pulse at a given delay.



Au delà de FROG-CRAB: mixedFROG

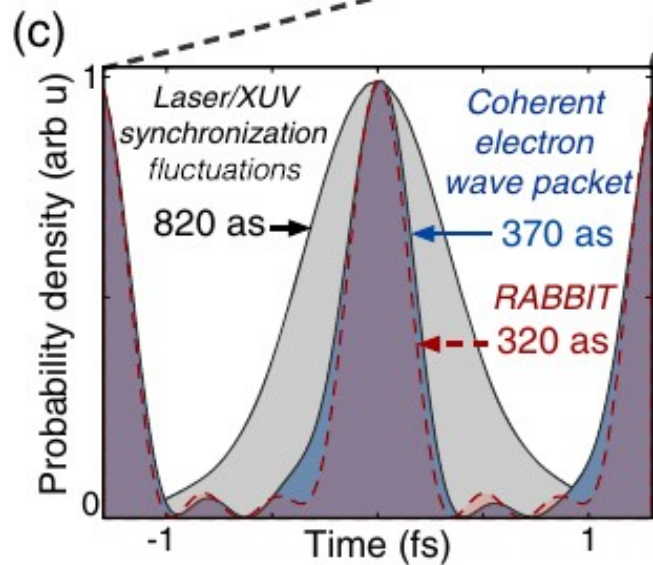
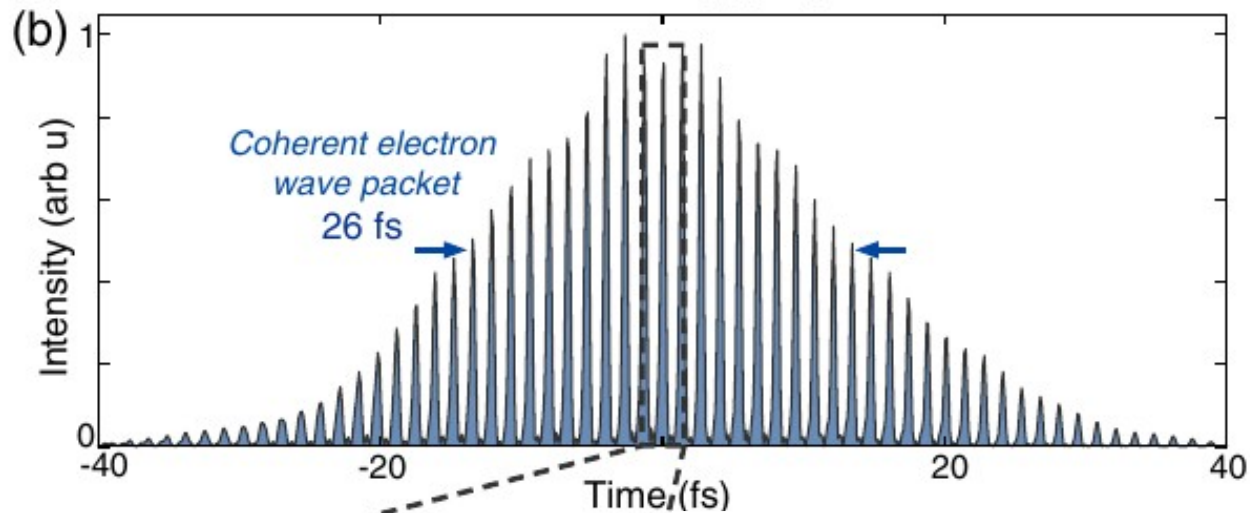
PHYSICAL REVIEW X **10**, 031048 (2020)

Quantifying Decoherence in Attosecond Metrology

C. Bourassin-Bouchet^{1,*}, L. Barreau², V. Gruson², J.-F. Hergott², F. Quéré², P. Salières², and T. Ruchon²

¹Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Université Paris-Saclay, 91127 Palaiseau Cedex, France

²LIDYL, CEA, CNRS, Université Paris-Saclay, CEA Saclay, 91191 Gif-Sur-Yvette, France



Accès au paquet d'électrons cohérent
et aux pertes de cohérence dans la mesure

Génération et caractérisation d'impulsions attosecondes

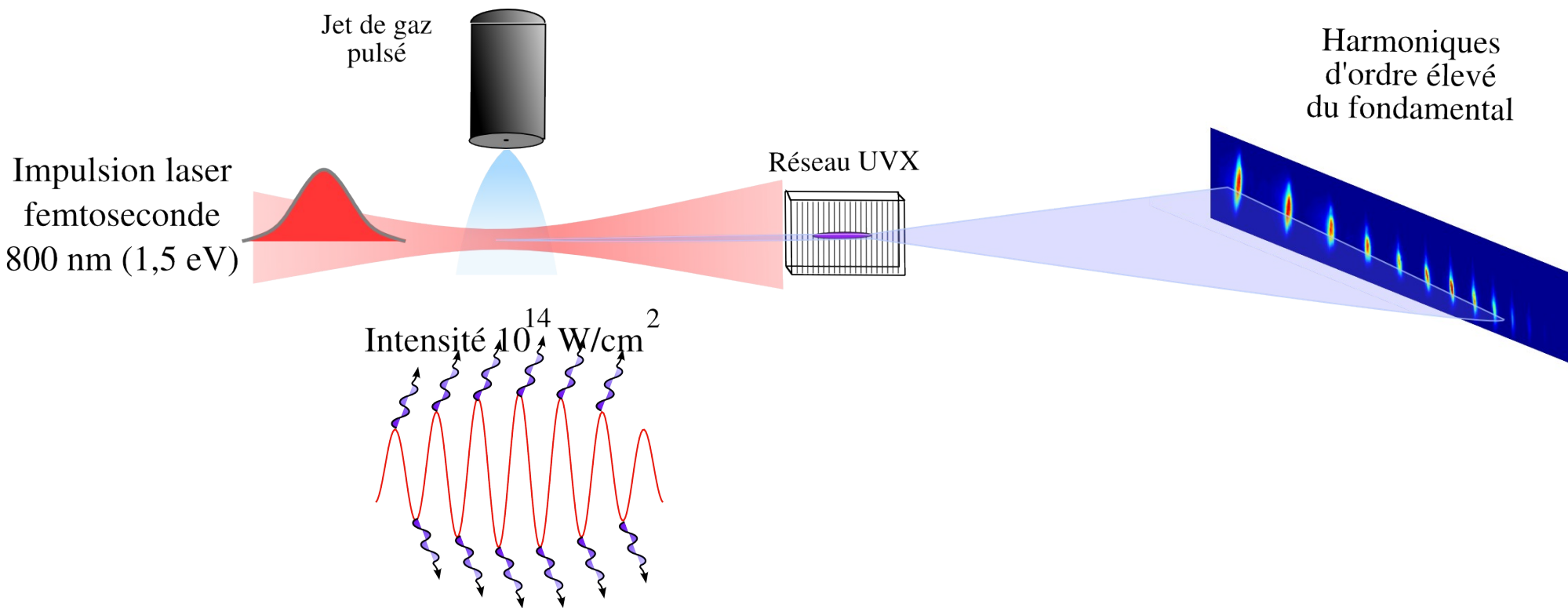
Introduction : harmoniques et attosecondes

I – Mesure de trains d'impulsions attosecondes

II – Mesure d'impulsions attosecondes arbitraires :
FROGCRAB et ses évolutions

III – Mesures in-situ

Principe



Manipuler le processus de génération pour obtenir de l'information sur sa dynamique temporelle

ARTICLES

Measuring and controlling the birth of attosecond XUV pulses

N. DUDOVICH^{1*}, O. SMIRNOVA¹, J. LEVESQUE^{1,2}, Y. MAIRESSE¹, M. YU. IVANOV¹, D. M. VILLENEUVE¹
AND P. B. CORKUM^{1*}

¹National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario K1A 0R6, Canada

²INRS-EMT, 1650 boulevard Lionel-Boulet, CP 1020, Varennes, Québec J3X 1S2, Canada

Manipulation spectrale/temporelle

N. Dudovich et al., Nat. Phys. 2, 781 (2006)

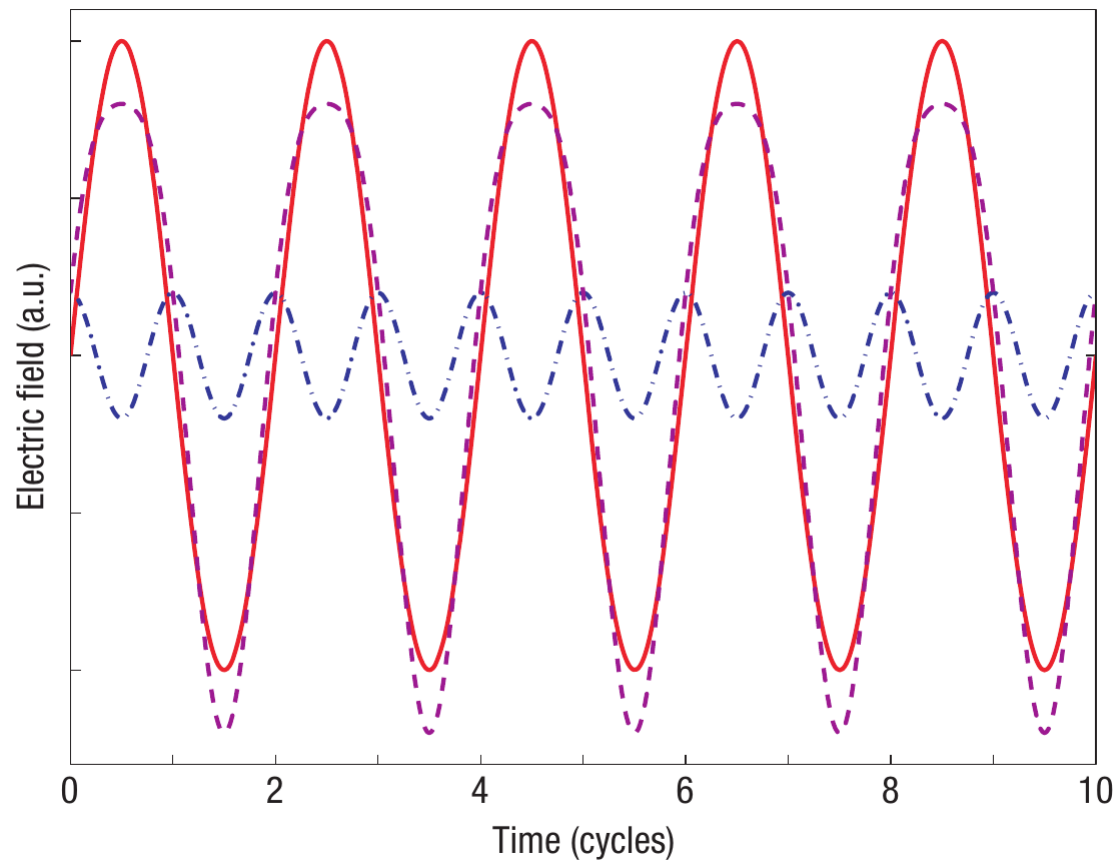
Principe :

Contrôle sub-cycle du profil temporel du champ électrique générateur

Ex : combinaison d'un champ à w et $2w$

→ Brise la symétrie d'inversion

→ Génération d'harmoniques paires entre les harmoniques impaires



Manipulation spectrale/temporelle

N. Dudovich et al., Nat. Phys. 2, 781 (2007)

Principe :

Contrôle sub-cycle du profil temporel du champ électrique générateur

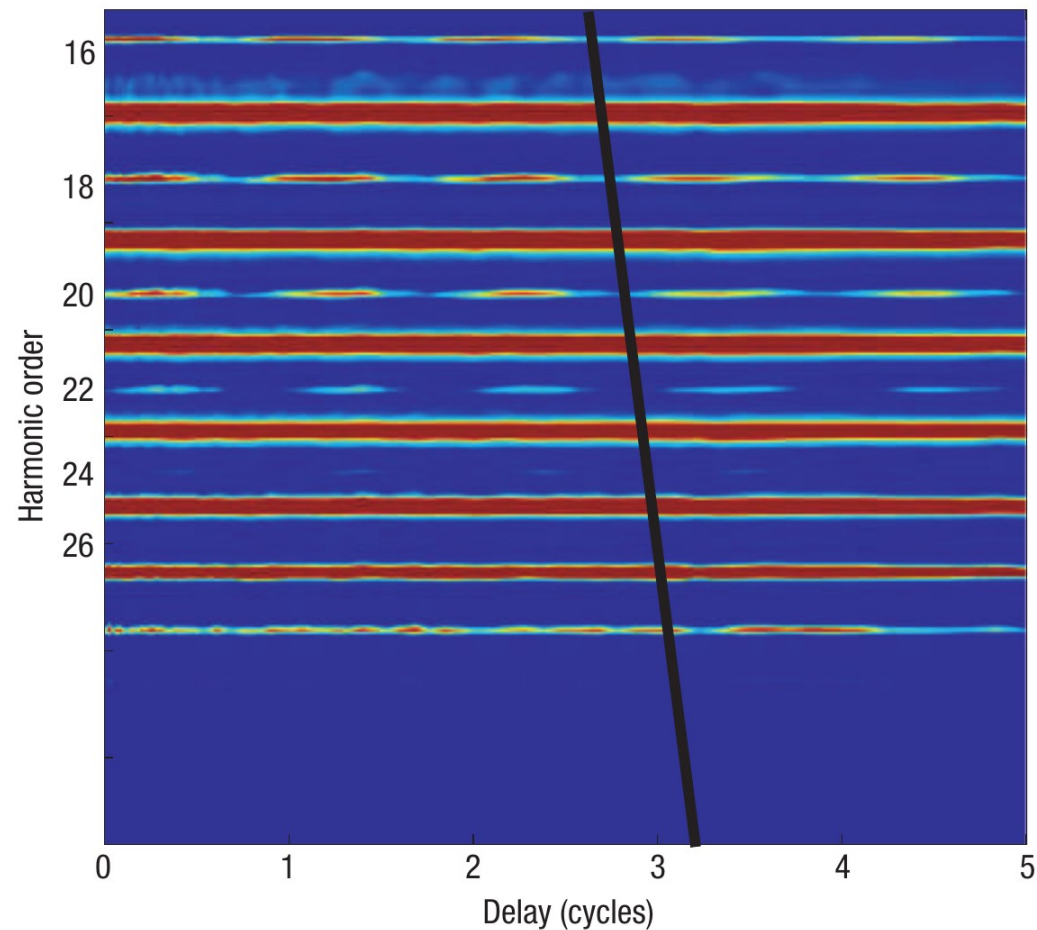
Ex : combinaison d'un champ à w et $2w$

→ Brise la symétrie haut/bas

→ Génération d'harmoniques paires entre les harmoniques impaires

Scan du délai $w-2w$ → Oscillation des harmoniques paires

La phase encode la phase relative des harmoniques



Analogie avec RABBITT

PHYSICAL REVIEW A **80**, 033836 (2009)

Atomic and macroscopic measurements of attosecond pulse trains

J. M. Dahlström,¹ T. Fordell,¹ E. Mansten,¹ T. Ruchon,² M. Swoboda,¹ K. Klünder,¹ M. Gisselbrecht,¹
A. L'Huillier,¹ and J. Mauritsson¹

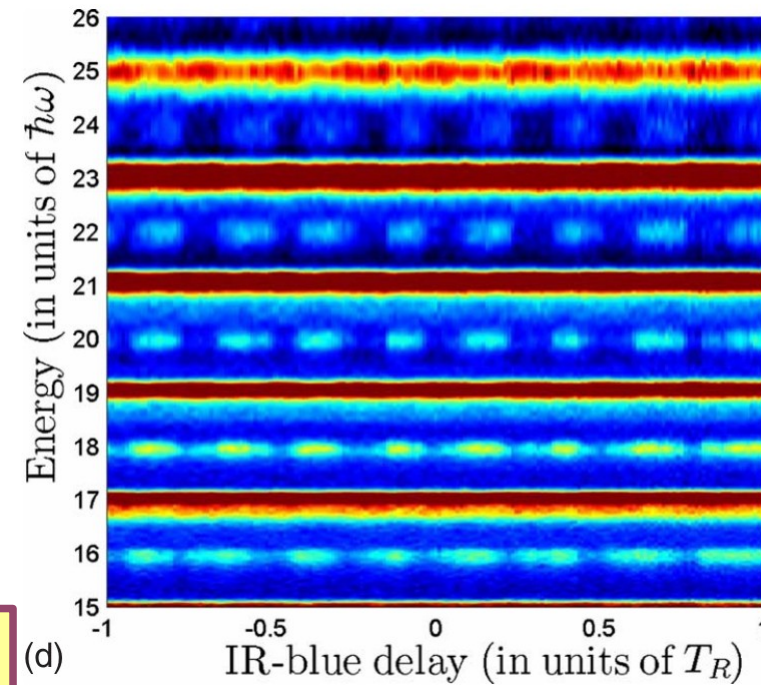
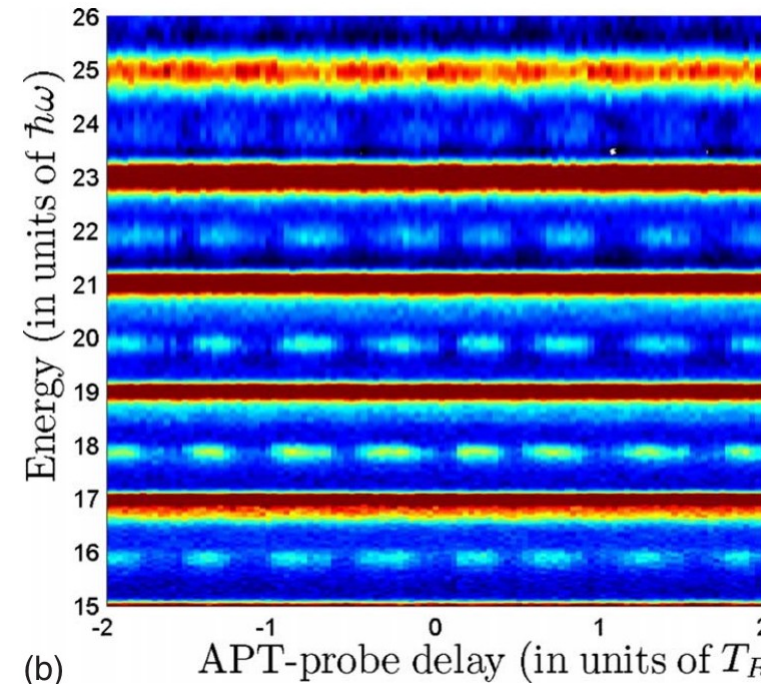
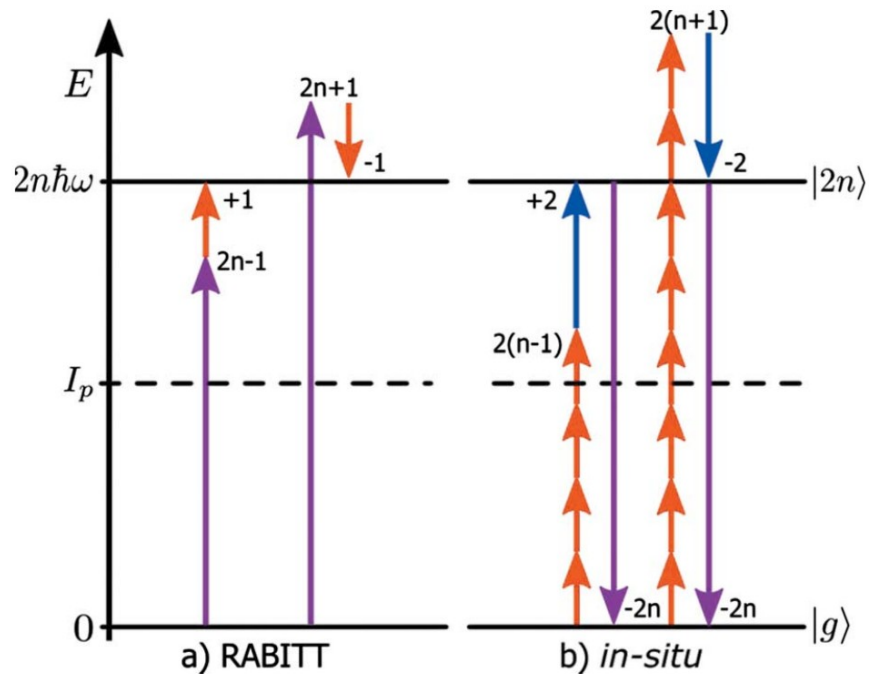


FIG. 2. (Color online) Energy diagrams associated with the two characterization methods. (a) Sidebands are created through the absorption and emission of an ir photon (ω_R) in the RABITT method. (b) Even harmonics are produced in the *in situ* method due to the presence of a weak blue field ($2\omega_R$). Attosecond pulses are characterized by studying the interferences arising from the degenerate ways of reaching the sidebands or even harmonics.

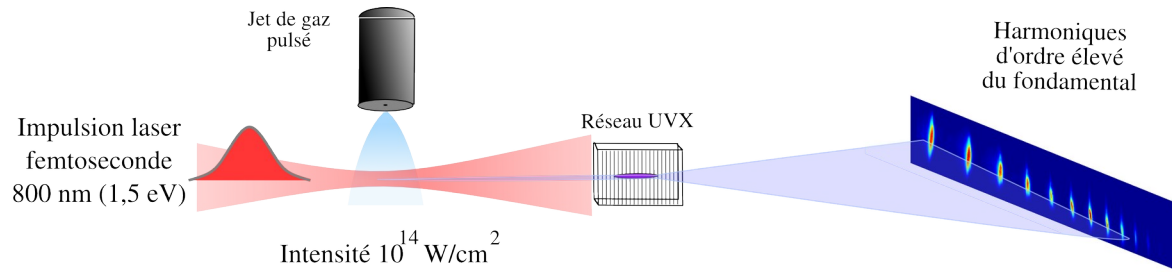
Conceptuellement proche, mais des différences existent

Manipulation spatio-temporelle : le phare attoseconde

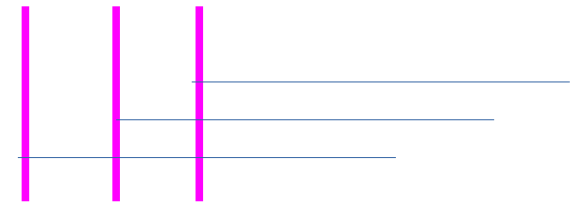
H. Vincenti et F. Quéré, PRL 108, 113904 (2012)

Principe :

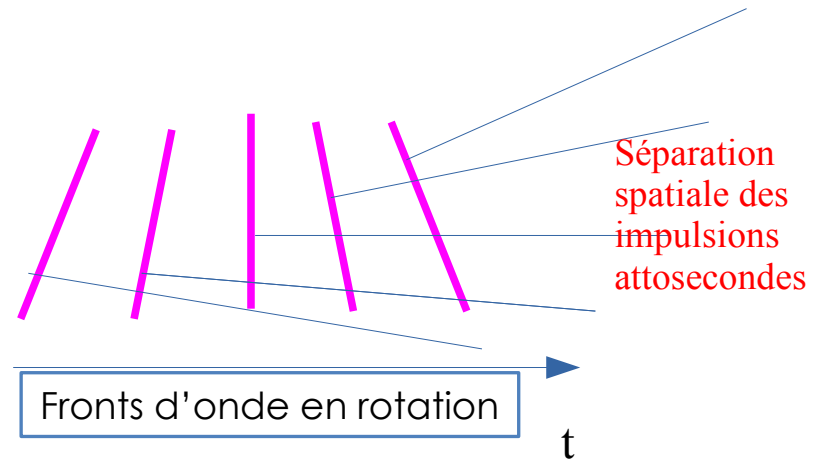
induire une rotation de front d'ondes au foyer pour envoyer les impulsions attosecondes dans des directions différentes



Foyer du laser
= zone de génération



Fronts d'onde parallèles



Fronts d'onde en rotation

t

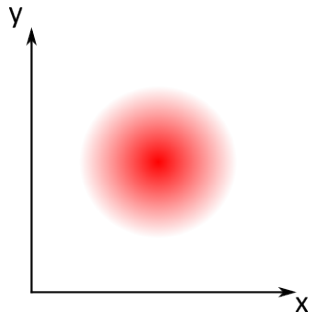
Le phare attoseconde

H. Vincenti et F. Quéré, PRL 108, 113904 (2012)

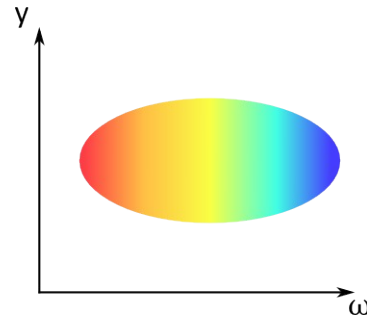
Principe :

induire une rotation de front d'ondes au foyer pour envoyer les impulsions attosecondes dans des directions différentes

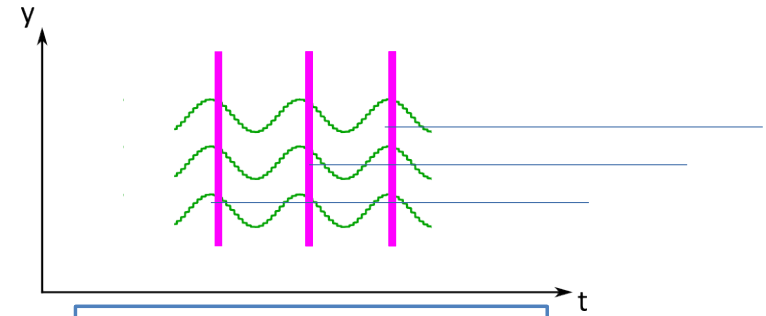
Tâche focale



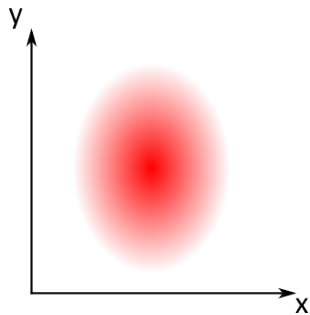
Étalage spectral



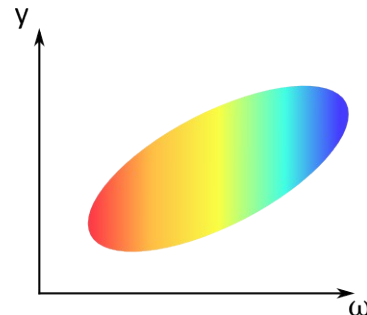
Fronts d'onde



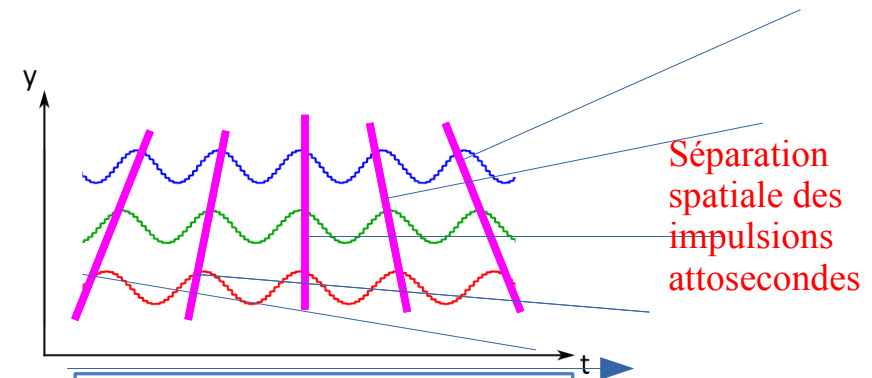
Fronts d'onde parallèles



Élongation de la tâche



« Chirp spatial »

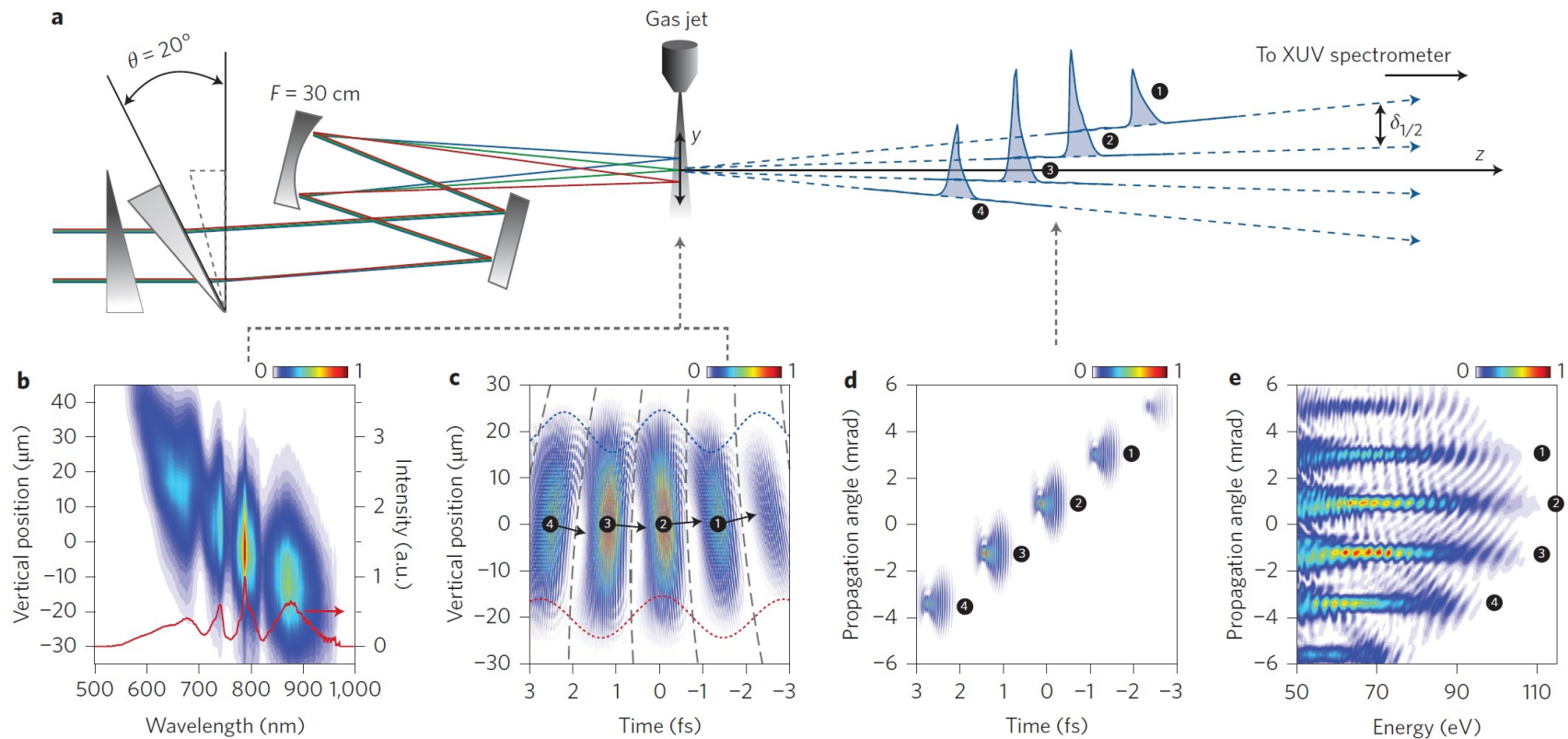


Séparation spatiale des impulsions attosecondes

Fronts d'onde en rotation

Photonic streaking of attosecond pulse trains

Kyung Taec Kim^{1*}, Chunmei Zhang¹, Thierry Ruchon², Jean-François Hergott², Thierry Auguste²,
D. M. Villeneuve¹, P. B. Corkum¹ and F. Quéré^{2*}

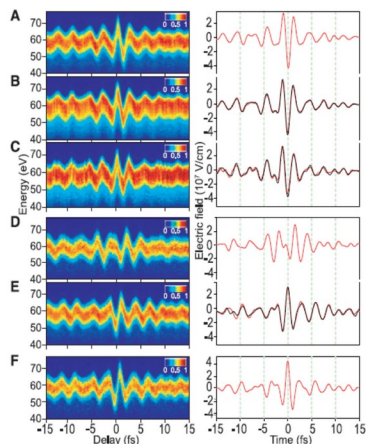


Mapping spatio-temporel de l'émission attoseconde

Mesure in-situ de champs électriques

Mesure de champs lasers complexes

A. Wirth et al, Science 334, 194 (2012)



Peut on utiliser la génération d'impulsions attosecondes pour mesurer un champ laser?

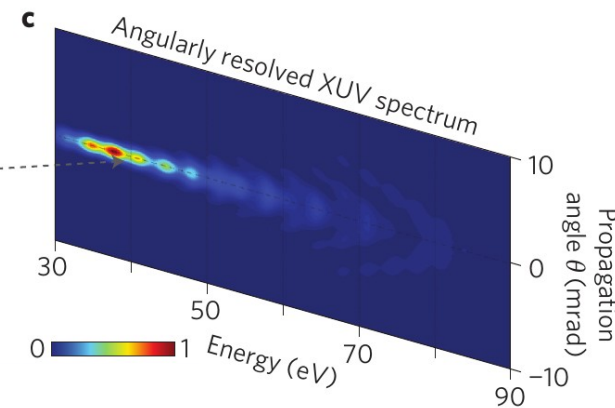
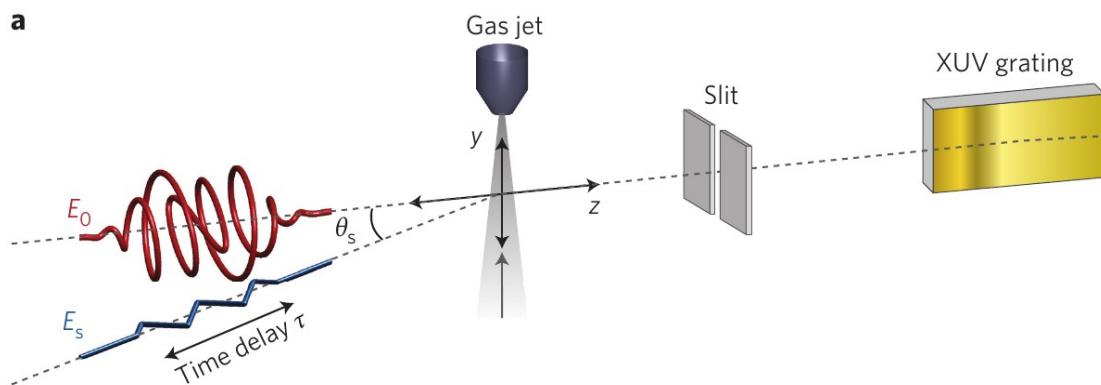
LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 3 NOVEMBER 2013 | DOI: 10.1038/NPHOTON.2013.286

nature
photonics

Petahertz optical oscilloscope

Kyung Taec Kim¹, Chunmei Zhang¹, Andrew D. Shiner¹, Bruno E. Schmidt², François Légaré²,
D. M. Villeneuve¹ and P. B. Corkum^{1*}



Mesure in-situ de champs électriques

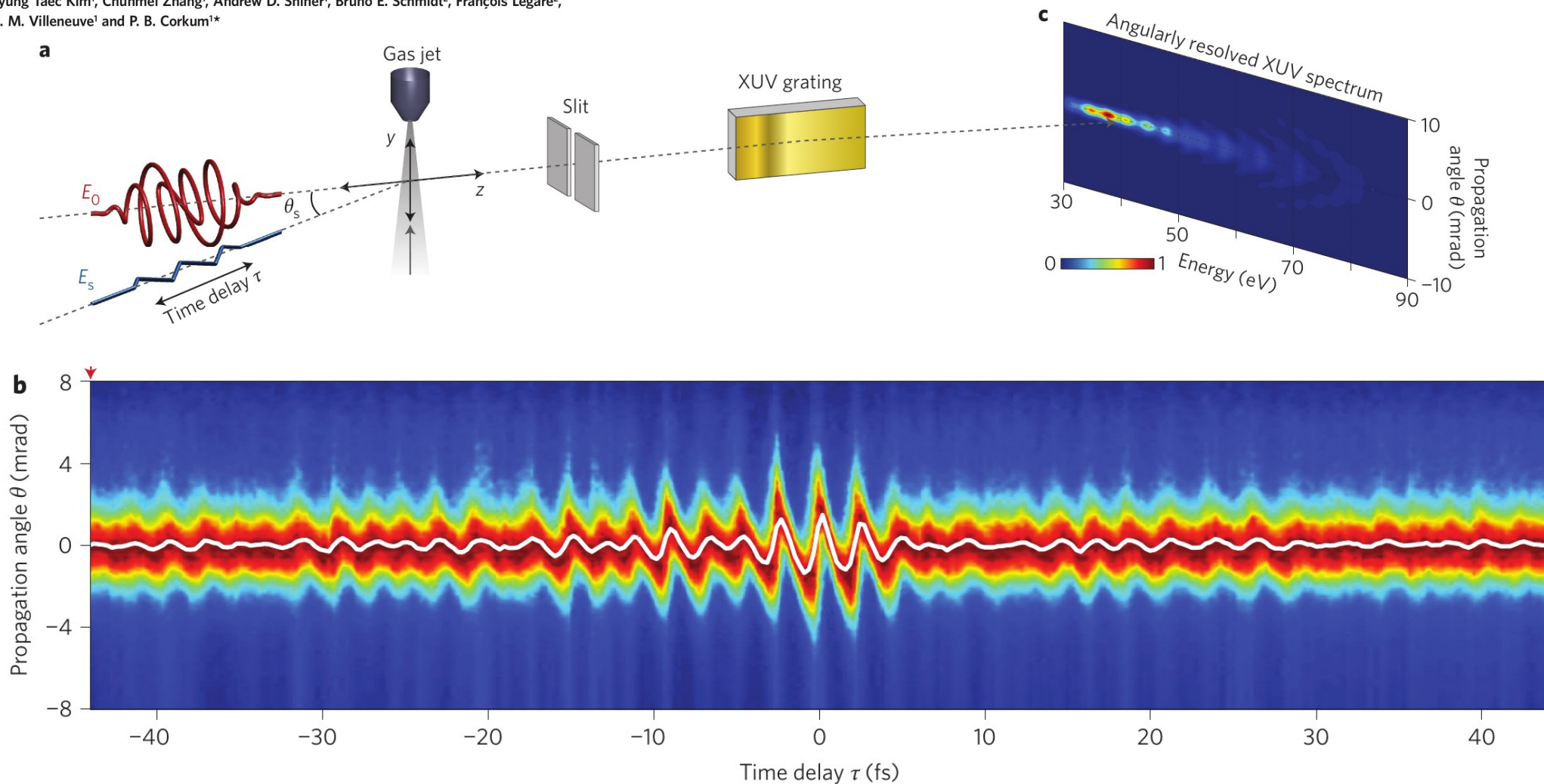
LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 3 NOVEMBER 2013 | DOI: 10.1038/NPHOTON.2013.286

nature
photonics

Petahertz optical oscilloscope

Kyung Taec Kim¹, Chunmei Zhang¹, Andrew D. Shiner¹, Bruno E. Schmidt², François Légaré²,
D. M. Villeneuve¹ and P. B. Corkum^{1*}

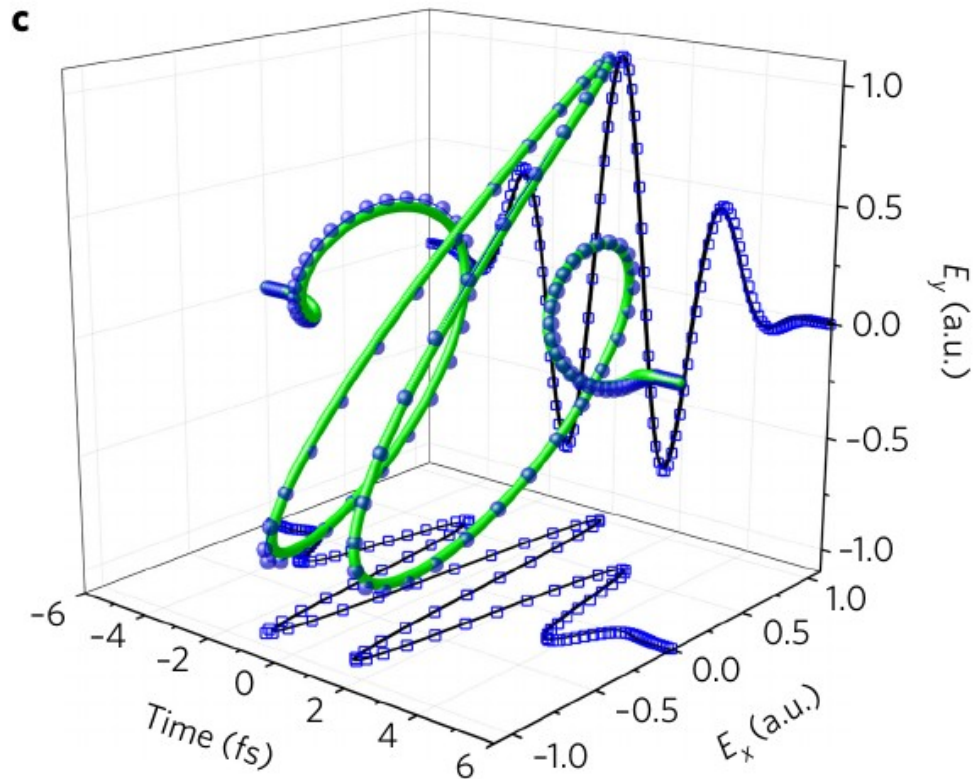


Mesure directe tout-optique du champ électrique laser

Vectorial optical field reconstruction by attosecond spatial interferometry

P. Carpeggiani^{1,2†}, M. Reduzzi^{1,2†}, A. Comby^{1†}, H. Ahmadi^{1,3}, S. Kühn⁴, F. Calegari^{2,5,6}, M. Nisoli^{1,2}, F. Frassetto⁷, L. Poletto⁷, D. Hoff⁸, J. Ullrich⁹, C. D. Schröter¹⁰, R. Moshhammer¹⁰, G. G. Paulus⁸ and G. Sansone^{1,2,4,11*}

Possible en 3D → mesure de la polarisation instantanée



Conclusions

Des trains d'impulsions attosecondes sont produits dans les laboratoires depuis la première expérience de génération d'harmoniques d'ordre élevé.

La difficulté était de les mesurer.

L'amélioration des techniques de caractérisations permet un **contrôle fin** des impulsions attosecondes :

- trains ou isolées
- différents nombres d'impulsions par cycle dans un train
- contrôle du chirp et de la durée

Les méthodes de caractérisation attosecondes sont désormais employées pour **caractériser le processus de photoionisation lui même** en employant des impulsions bien caractérisées (i.e. mesure de la différence entre le profil temporel de l'impulsion attoseconde et celui du paquet d'ondes électronique produit)

Des défis restent à relever:

- augmentation de la largeur de bande
→ contributions multiples à la photoionisation
- mesure des effets de cohérence partielle
- mesures résolues spatialement et couplage spectro-spatiaux
- mesures mono coups avec fortes fluctuations tir à tir
- jitter FEL-laser ...