



# Confinement temporel de la génération d'harmoniques d'ordres élevés

*TCHERBAKOFF Olivier*

# MOTIVATION

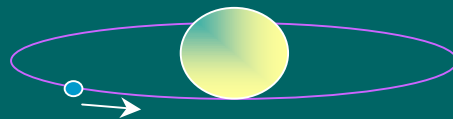
Les impulsions lasers ultra-courtes permettent l'étude de processus ultra-brefs

Les sources lasers intenses actuelles sont limitées à 3,8 fs

B. Schenkel *et al.*, Opt. Lett. **28**, 1987 (2003)

**1 attoseconde = 1 as =  $10^{-18}$  s**

Temps de révolution classique 1<sup>ère</sup> orbite de Bohr



$T = 150$  as

# Source attoseconde

## Pré requis

→ SPECTRE LARGE ( $\Delta E=10$  eV →  $\Delta\tau=180$  as)

→ FRÉQUENCES BLOQUÉES EN PHASE

$\lambda = 800$  nm  $T=2,66$  fs

$\lambda = 10$  nm  $T=33,4$  as → Domaine VUV

Source  
potentielle



Génération d'harmoniques d'ordres élevés

# Travaux effectués

**I Génération d'harmoniques d'ordres élevés.**

**II Confinement temporel de l'émission VUV.**

**III Post-compression d'impulsion laser.**

**IV Observation de transitions non linéaires.**

**V Conclusion & Perspectives.**

# Dispositif de production

I Génération d'harmoniques d'ordres élevés

II Confinement temporel de l'émission VUV

III Conclusion Perspectives

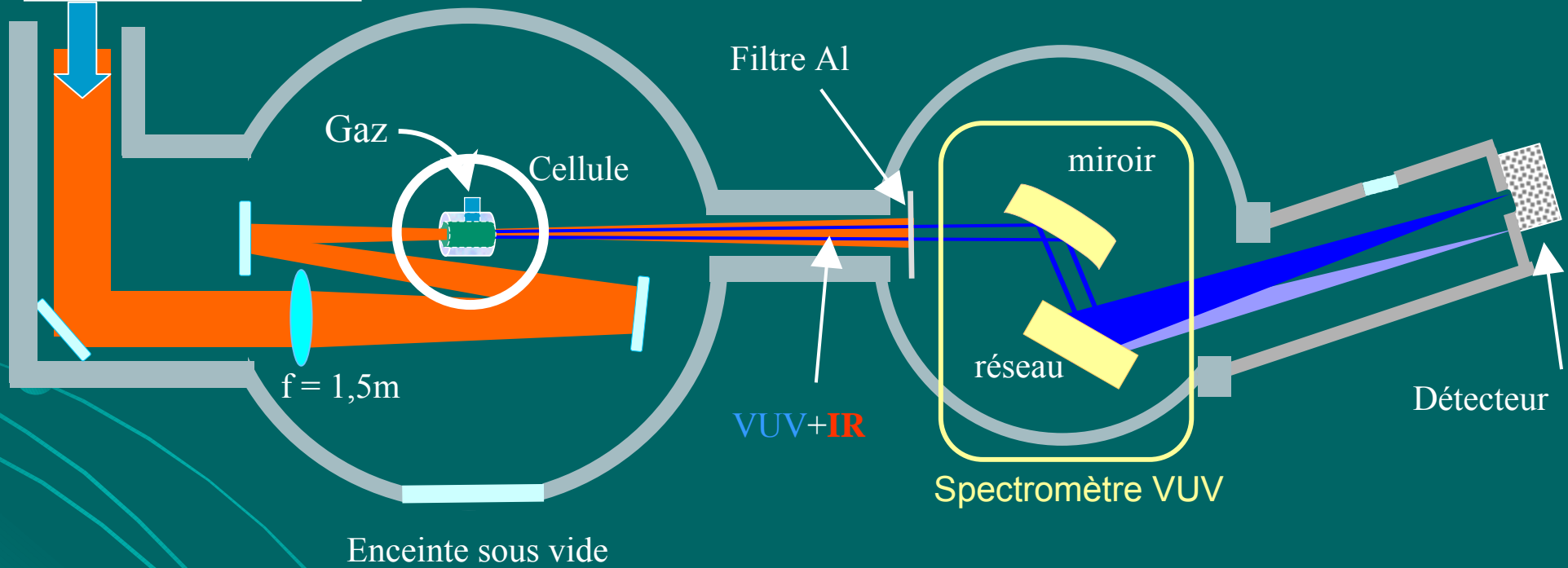
Chaîne laser CELIA

$\lambda_0 = 800 \text{ nm}$

$\tau = 30 \text{ fs}$

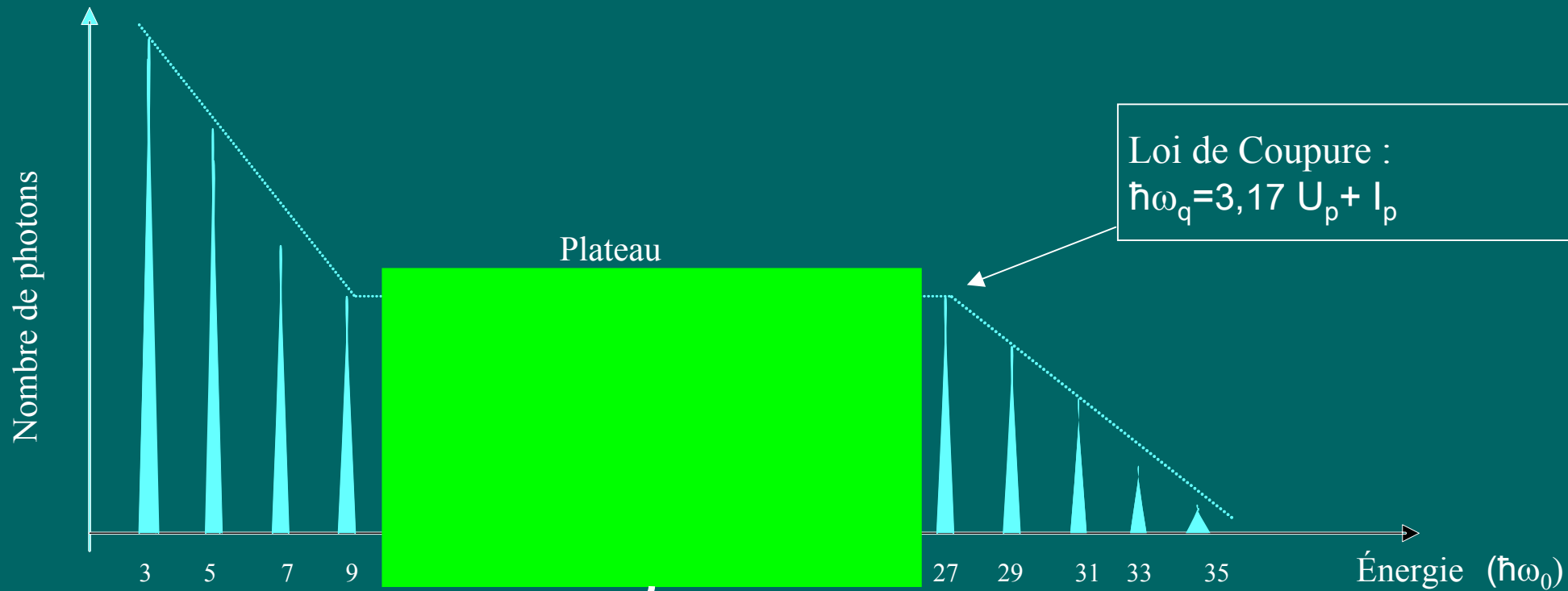
$E = 5 \text{ mJ}$

@ 1 kHz



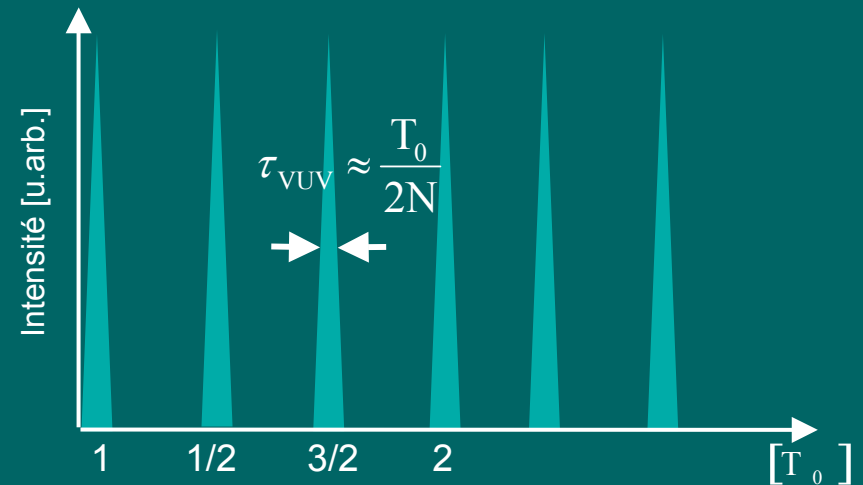
# Spectre typique

- I Génération d'harmoniques d'ordres élevés
- II Confinement temporel de l'émission VUV
- III Conclusion Perspectives



Si N harmoniques en phase

Pour 10 harmoniques,  $\tau_{\text{VUV}} = 133 \text{ as}$   
 $T_0 = 2,66 \text{ fs}$  ( $\lambda_0 = 800 \text{ nm}$ )



# Propriétés de l'émission harmonique

I Génération  
d'harmoniques  
d'ordres élevés

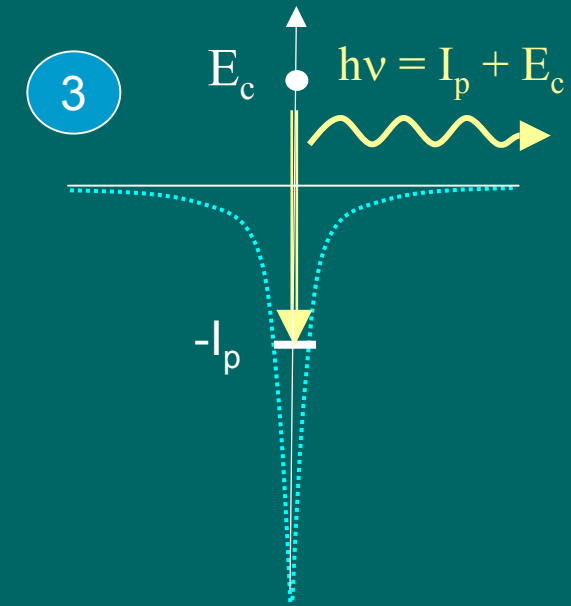
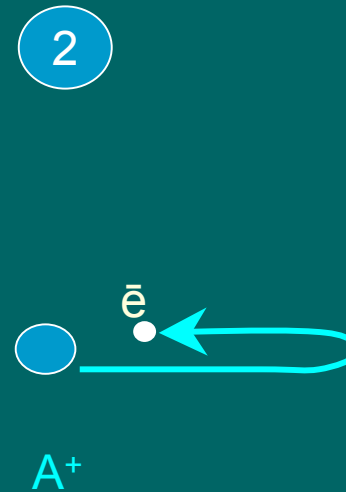
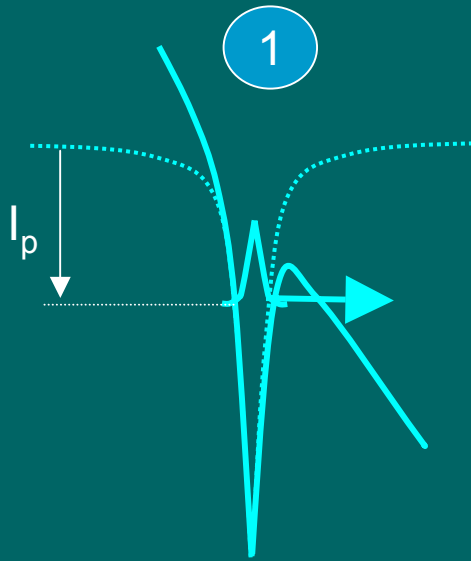
II Confinement  
temporel de  
l'émission VUV

III Conclusion  
Perspectives

- Rayonnement VUV jusqu'à  $\approx 3$  nm ( $\hbar\omega \approx 410$  eV)
- Efficacité  $\frac{E_{\text{harmonique}}}{E_{\text{laser}}}$  (Ar  $\lambda > 40$  nm):  $\approx 10^{-6}$
- Cohérent spatialement et temporellement
- Collimaté dans la direction du laser (divergence  $\approx 10$  mrad)
- Synchronisé avec le laser fondamental
- Durée  $\tau_{\text{harmonique}} < \tau_{\text{laser}}$

# Modèle en 3 étapes

- I Génération d'harmoniques d'ordres élevés
- II Confinement temporel de l'émission VUV
- III Conclusion Perspectives



- 1 Ionisation  
Periodicité  $T_0/2$
- 2 Oscillation  
gain d'énergie cinétique  $E_c$
- 3 Recombinaison radiative  
 $h\nu = I_p + E_c \leq I_p + 3,17 U_p$ .

+ cohérence du processus

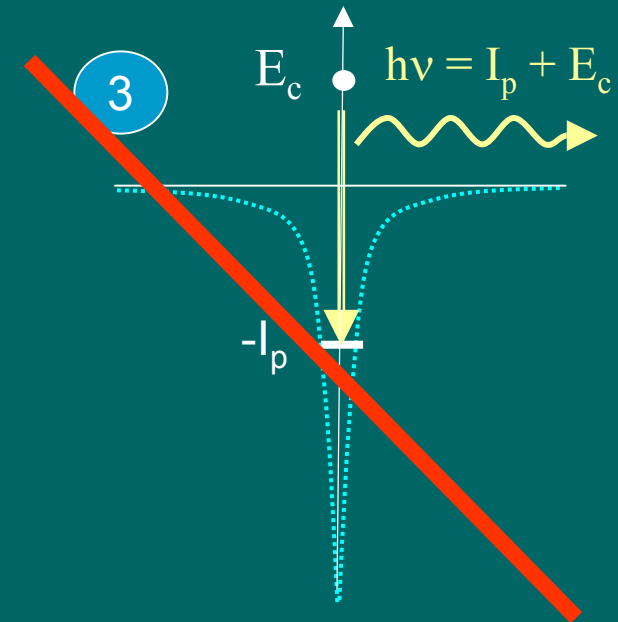
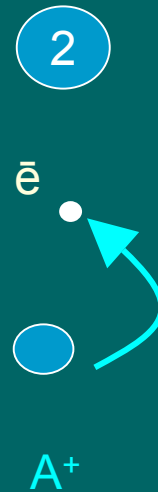
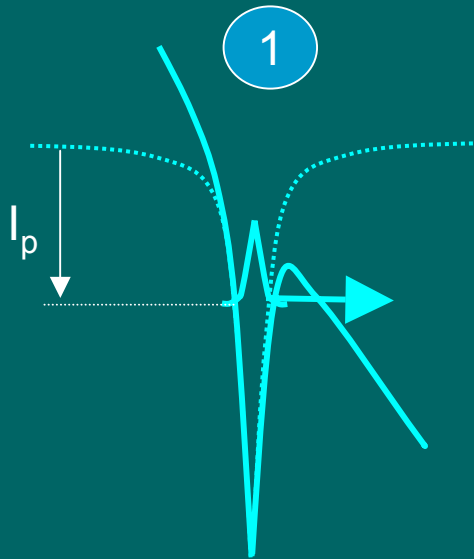


# Champ polarisé circulairement

I Génération d'harmoniques d'ordres élevés

II Confinement temporel de l'émission VUV

III Conclusion Perspectives



1 Ionisation

2 Oscillation

3 ~~Recombinaison radiative~~

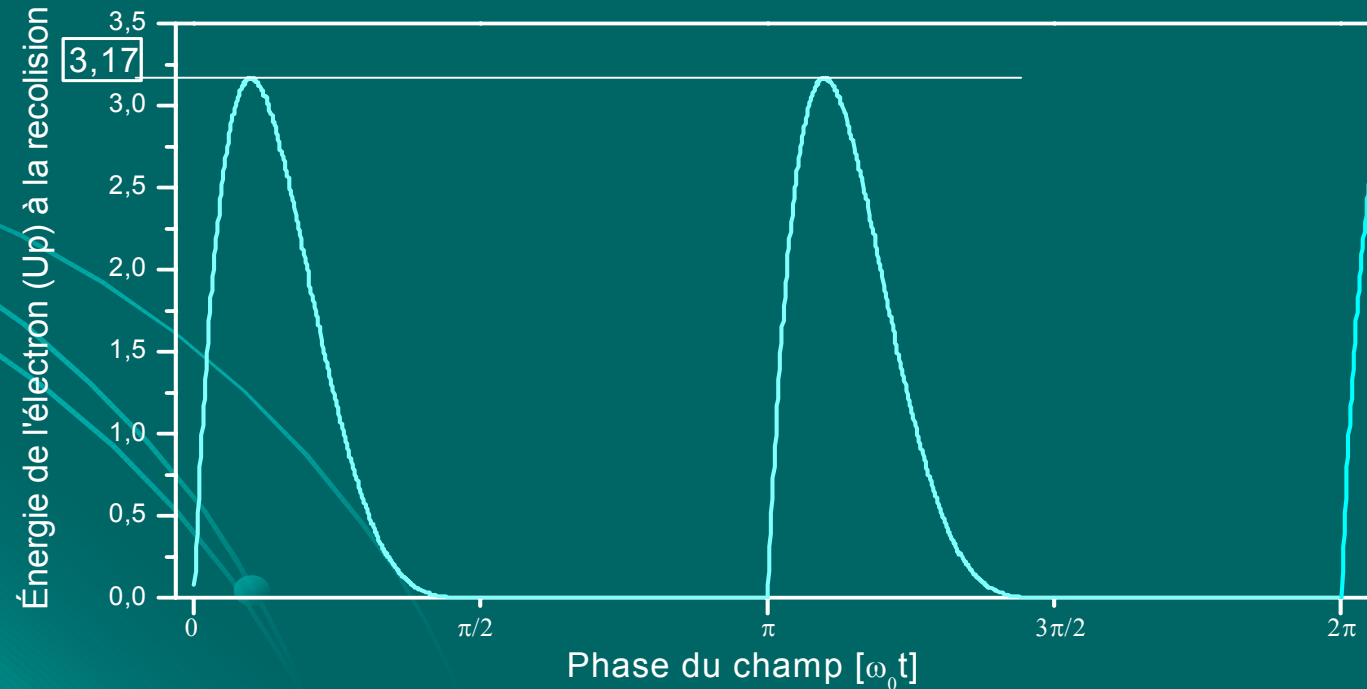
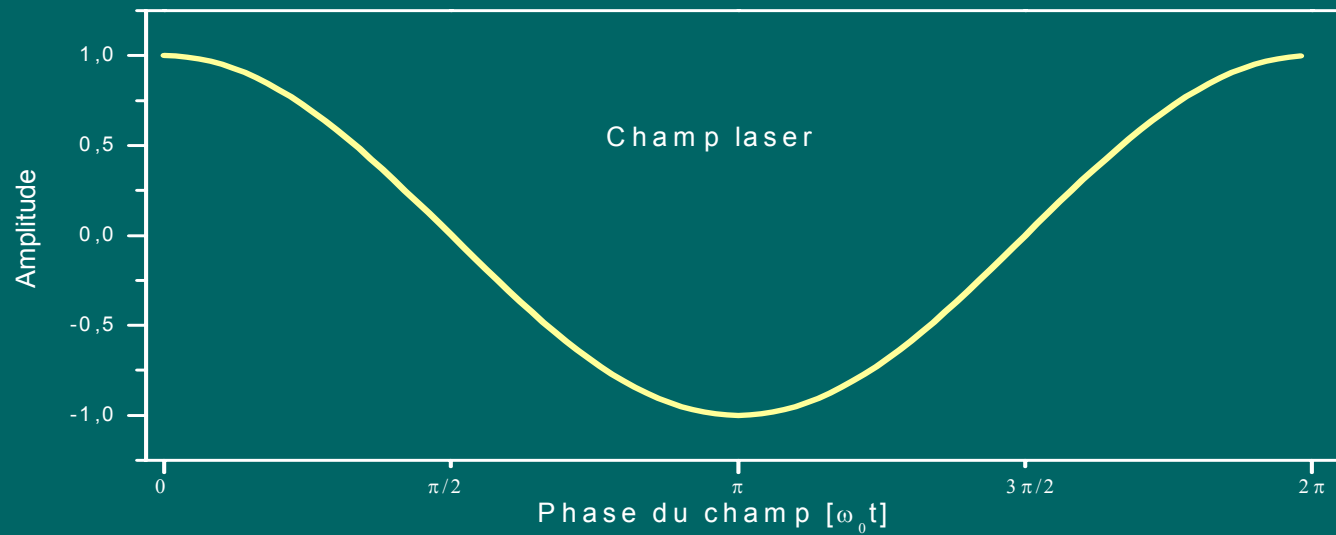
Pas d'émission harmoniques

# Énergie des électrons

I Génération d'harmoniques d'ordres élevés

II Confinement temporel de l'émission VUV

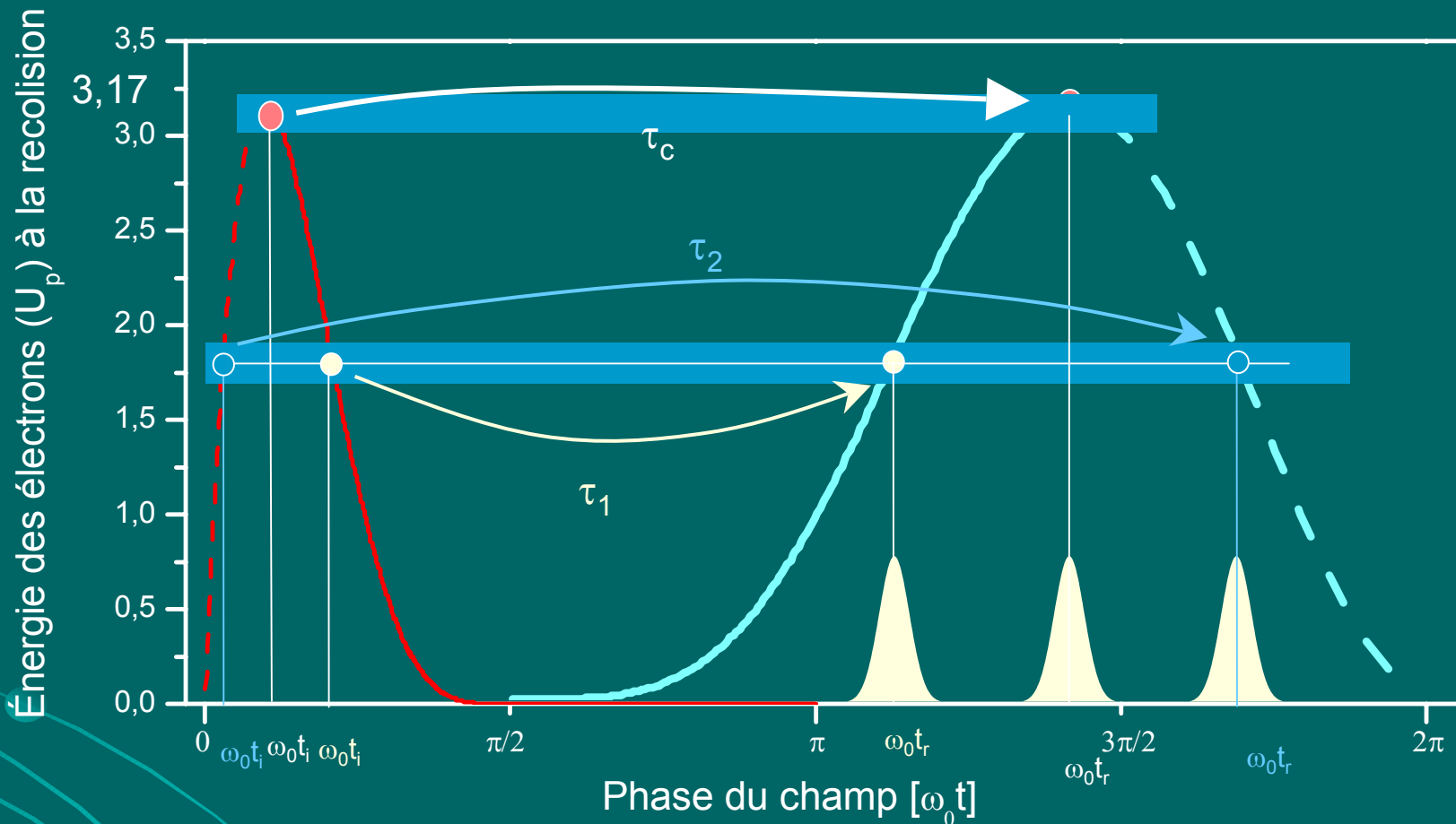
III Conclusion Perspectives



$$E_c \text{ max} = 3,17 U_p$$

# Trajectoires électroniques

- I Génération d'harmoniques d'ordres élevés
- II Confinement temporel de l'émission VUV
- III Conclusion Perspectives

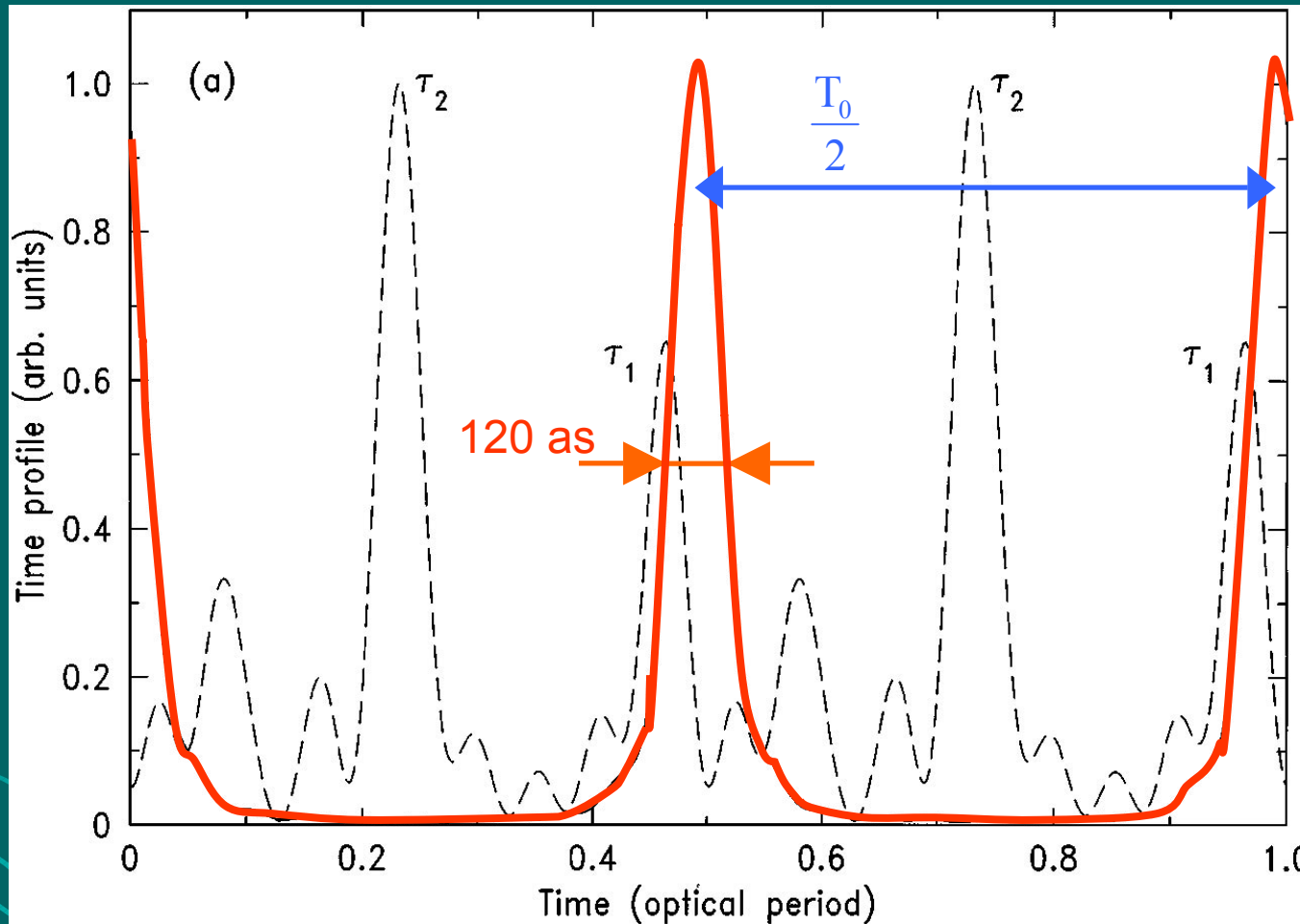


Phase atomique  
 $\Phi_{at}^i = \alpha_q^i I$

- $\alpha_q^1$  ( $10^{14} \text{ cm}^2/\text{W}$ ) = 1    plateau  $\tau_1$
- $\alpha_q^2$  ( $10^{14} \text{ cm}^2/\text{W}$ ) = 25    plateau  $\tau_2$
- $\alpha_q^c$  ( $10^{14} \text{ cm}^2/\text{W}$ ) = 12,5    coupure

# Train d'impulsions attosecondes

- I Génération d'harmoniques d'ordres élevés
- II Confinement temporel de l'émission VUV
- III Conclusion Perspectives



- Réponse de l'atome unique.
- Réponse de l'atome unique + propagation.

Profil temporel, H41 – H61( plateau), Ne,  $I = 4 \cdot 10^{14} \text{ W.cm}^{-2}$

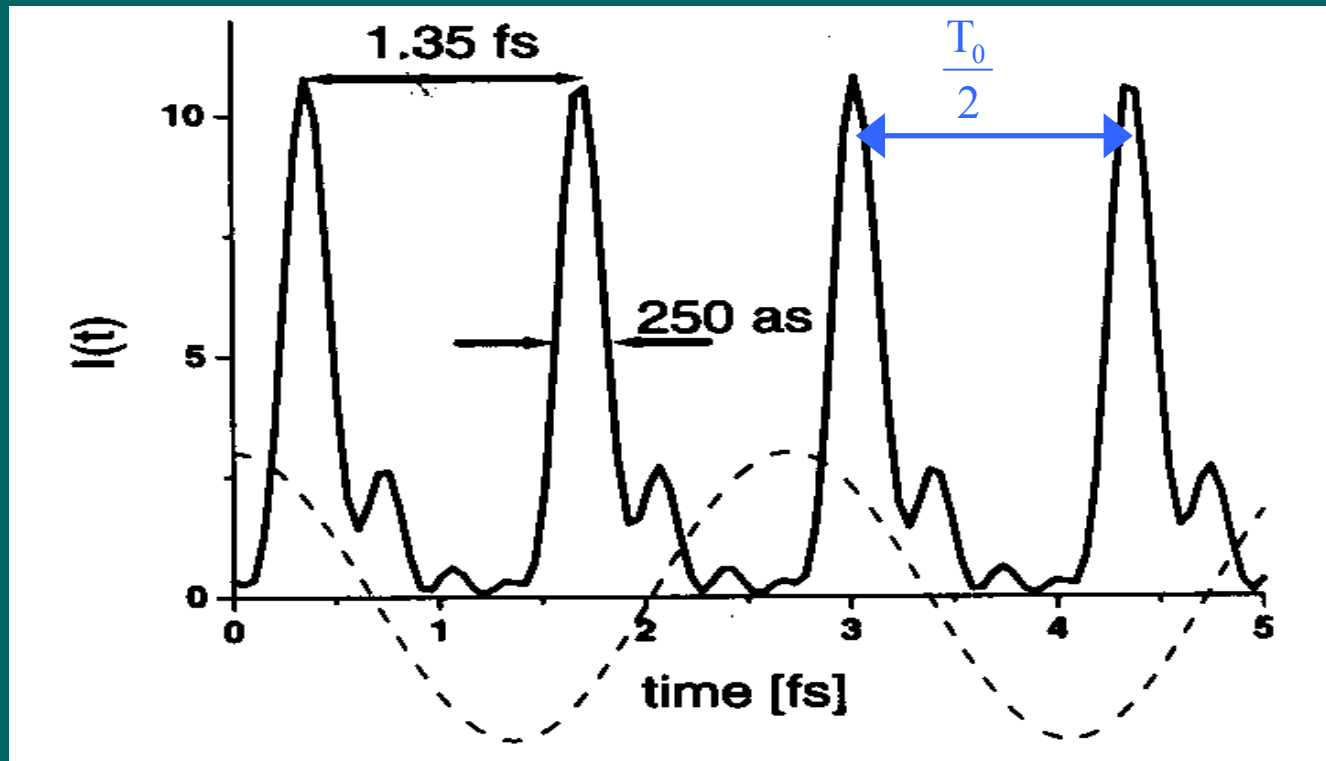
# RABBIT

(Reconstruction of Attosecond Beating By Interference of two-photon Transition)

I Génération d'harmoniques d'ordres élevés

II Confinement temporel de l'émission VUV

III Conclusion Perspectives



$\lambda_0 = 800$  nm

$T_0 = 2,66$  fs

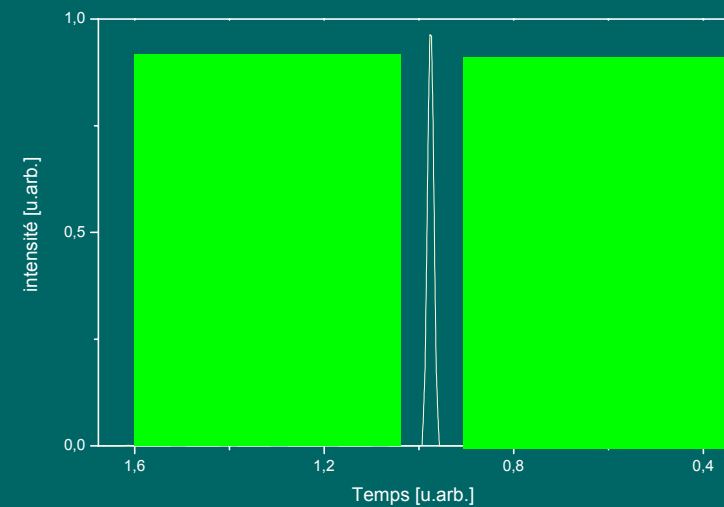
Harmoniques 11 à 19, Argon.

# PLAN

I Génération d'harmoniques d'ordres élevés

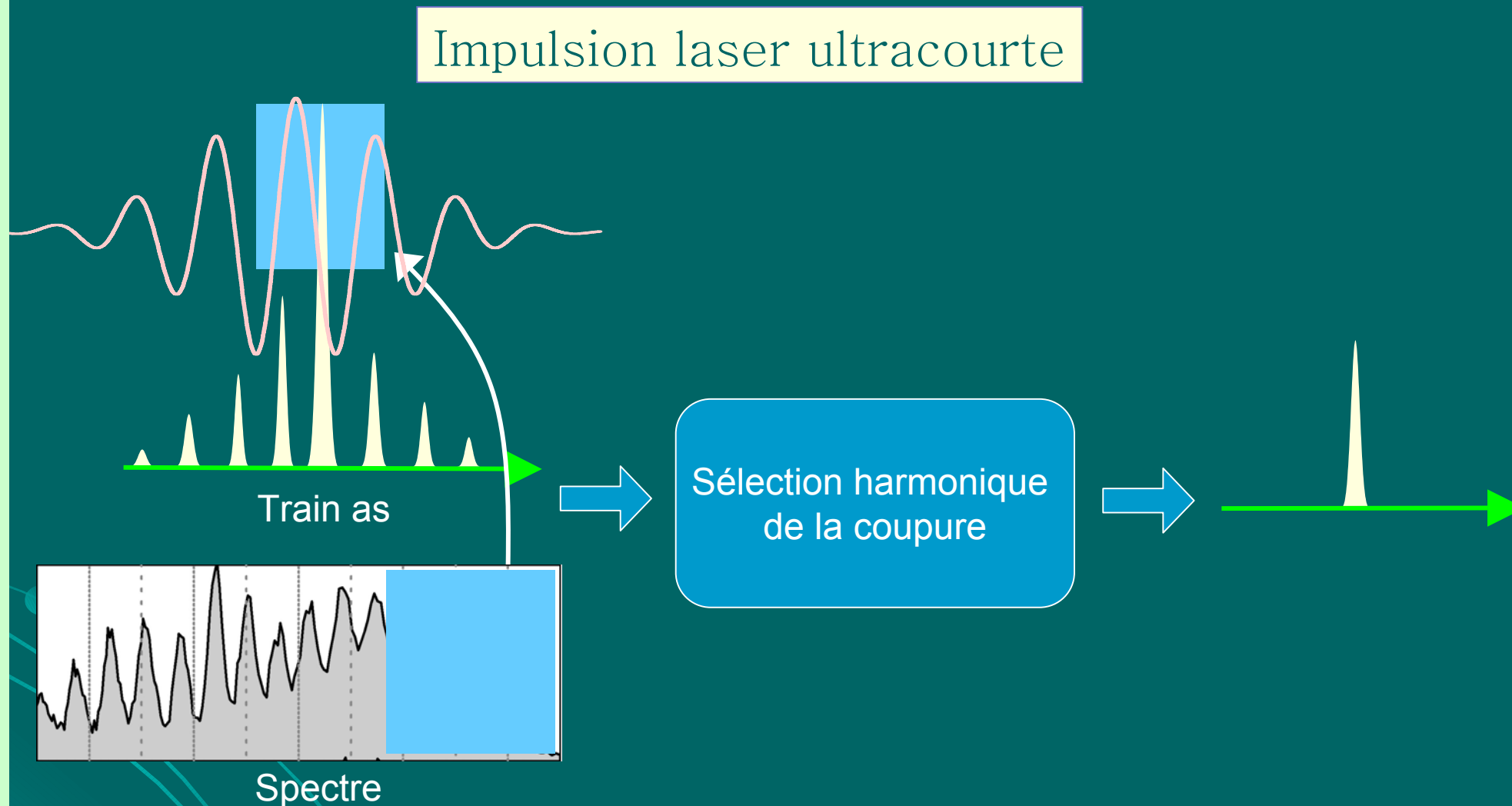
II Confinement temporel de l'émission VUV

III Conclusion Perspectives



# Sélection d'une impulsion attoseconde(1)

- I Génération d'harmoniques d'ordres élevés
- II Confinement temporel de l'émission VUV
- III Conclusion Perspectives



R. Kienberberger, Science, **297**, 1144 (2002)

**Impulsion ultra-courte (5 fs) + Contrôle de la phase absolue**

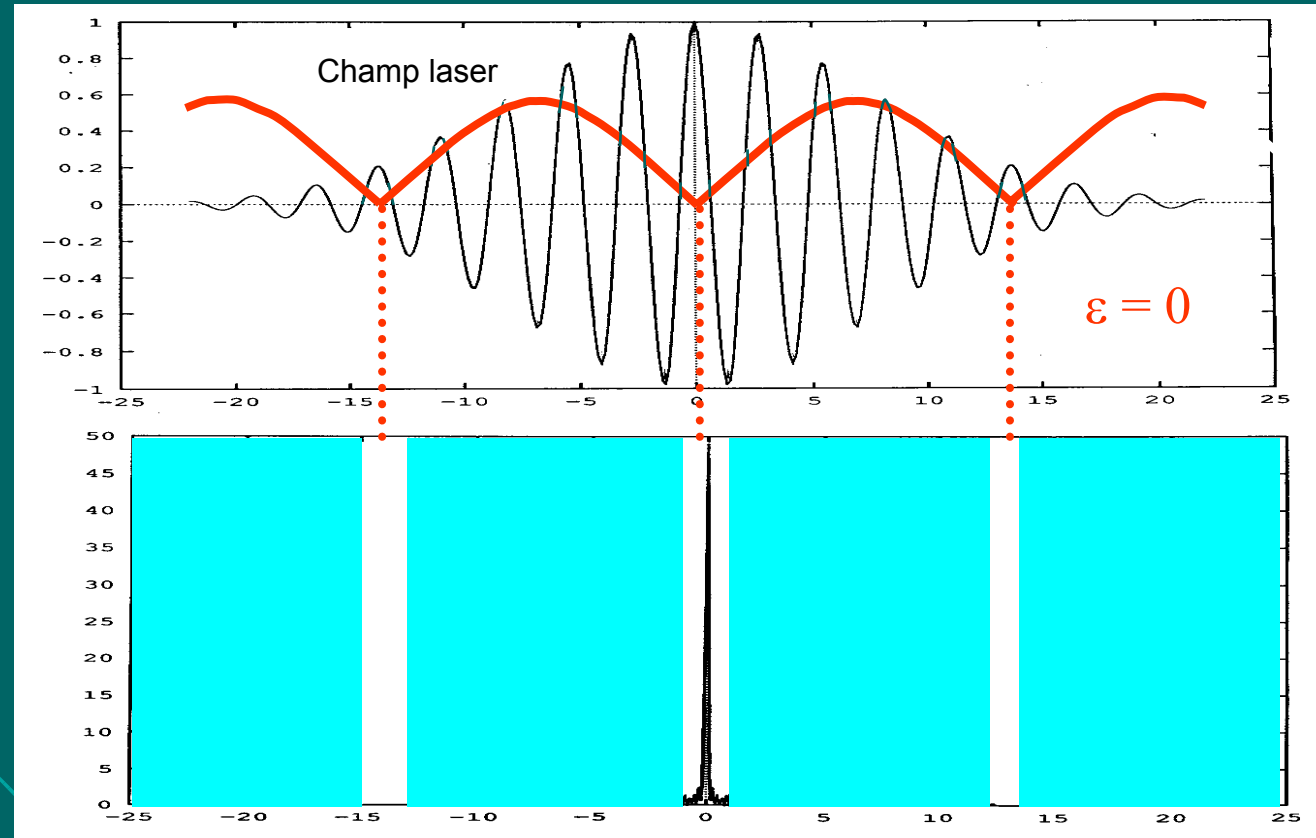
# Sélection d'une impulsion attoseconde(2)

I Génération  
d'harmoniques  
d'ordres élevés

II Confinement  
temporel de  
l'émission VUV

III Conclusion  
Perspectives

## Modulation temporelle de polarisation



P. Corkum, Opt Lett. **19**, 1870 (1994)

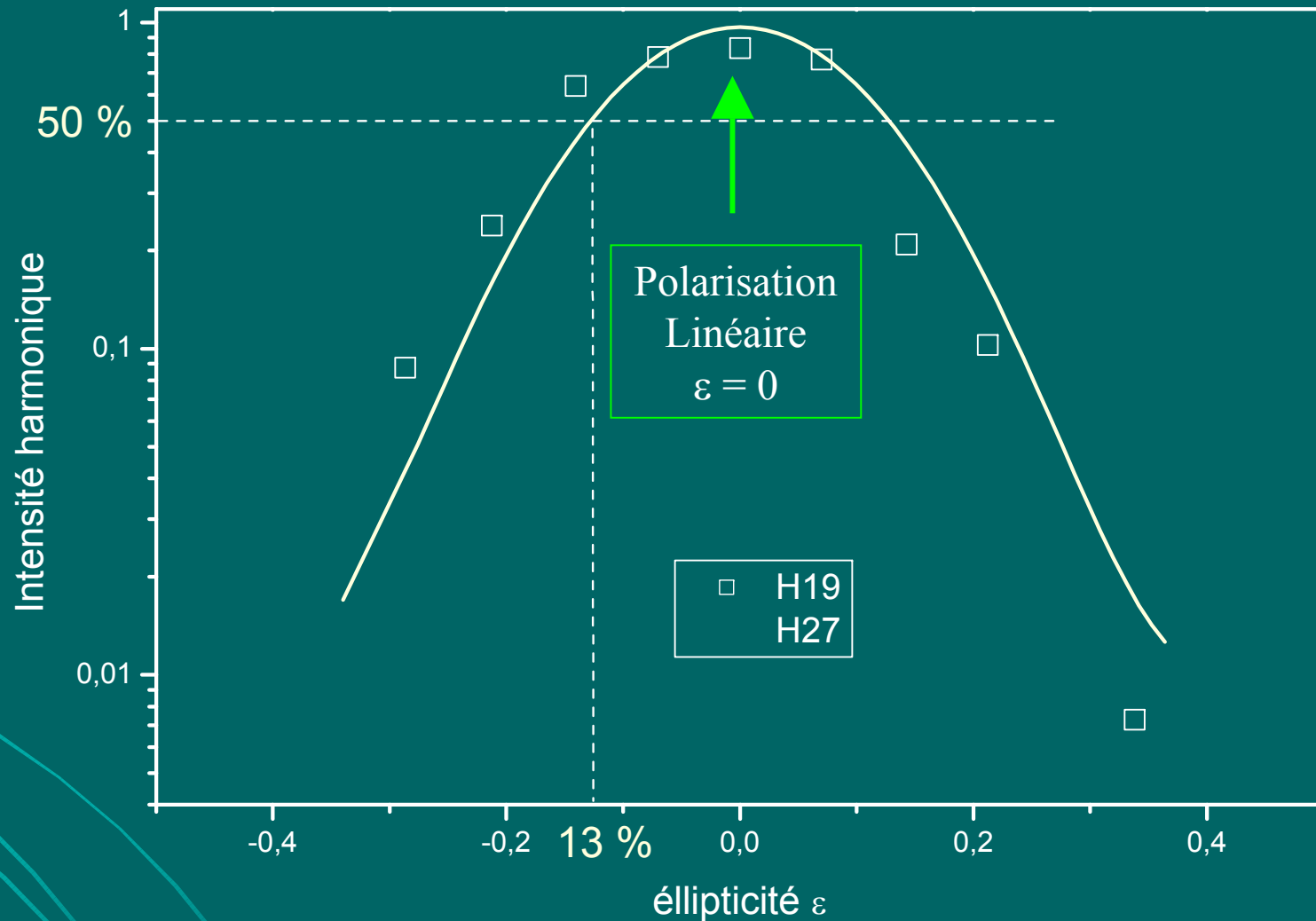
V. T. Platonenko and V. V. Strelkov, JOSA B **16**, 435 (1999)

**Impulsion « longue » (10 fs) + Modulation de la polarisation**



# Influence de la polarisation

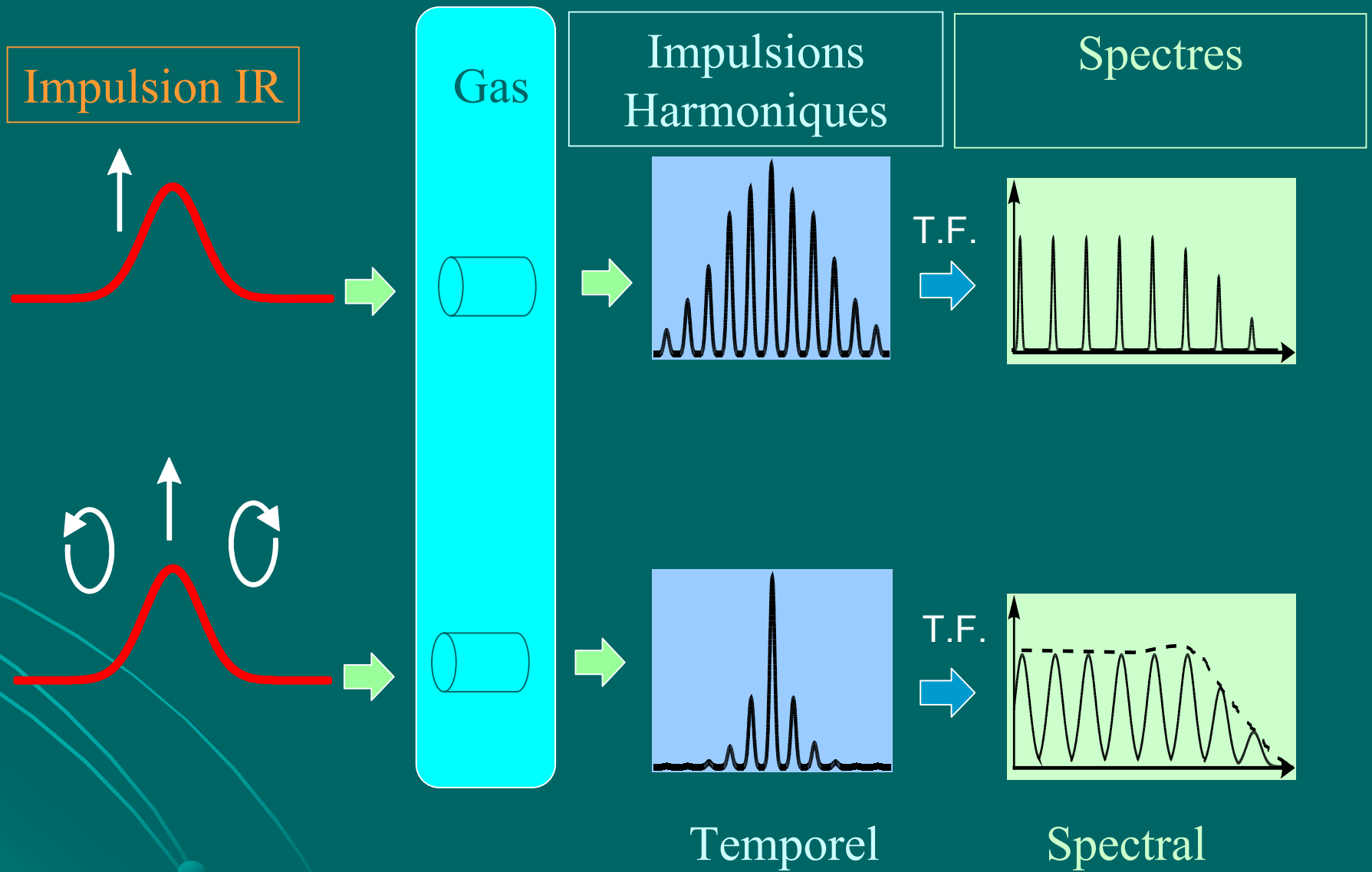
- I Génération d'harmoniques d'ordres élevés
- II Confinement temporel de l'émission VUV
- III Conclusion Perspectives



$$\mathbf{E}(t) = E_0 [\cos(\omega_0 t) \mathbf{x} + \epsilon \sin(\omega_0 t) \mathbf{y}]$$

# Effet du confinement

- I Génération d'harmoniques d'ordres élevés
- II Confinement temporel de l'émission VUV
- III Conclusion Perspectives

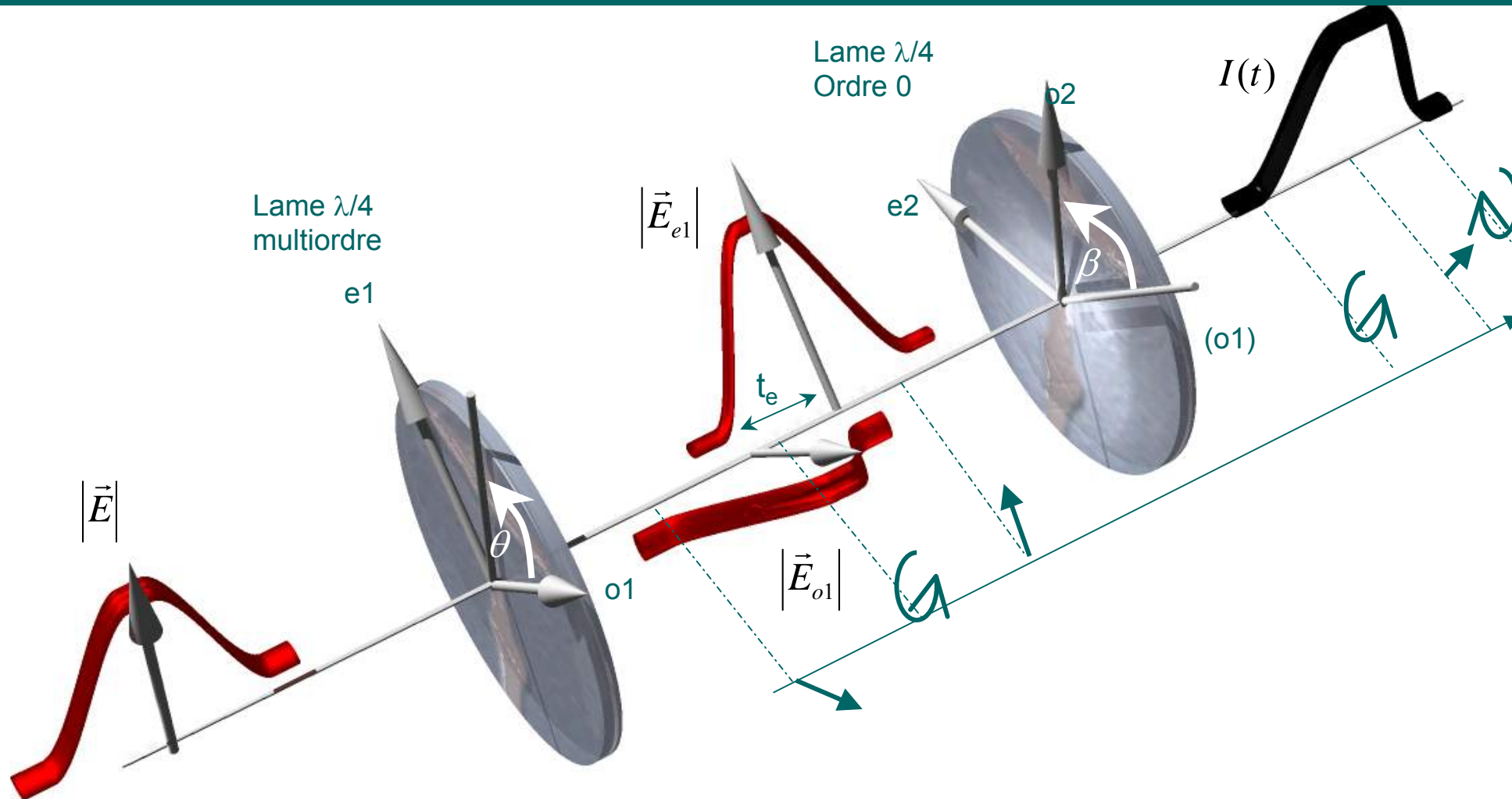


# Technique de modulation de la polarisation

I Génération d'harmoniques d'ordres élevés

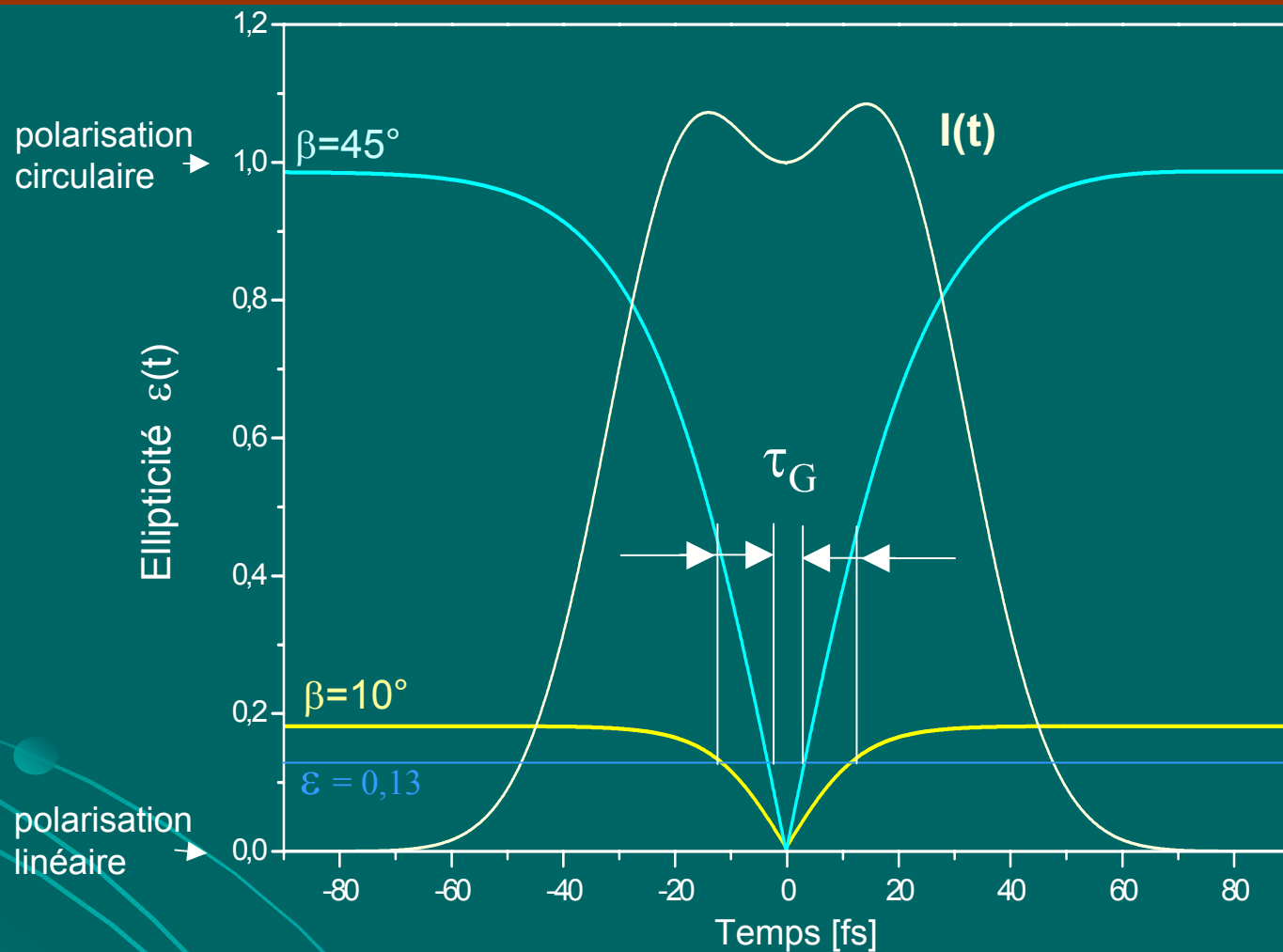
II Confinement temporel de l'émission VUV

III Conclusion Perspectives

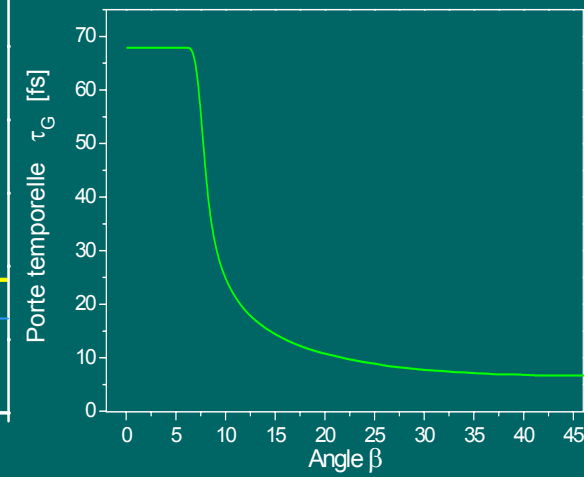


# Porte de polarisation

- I Génération d'harmoniques d'ordres élevés
- II Confinement temporel de l'émission VUV
- III Conclusion Perspectives



Efficacité du processus de génération d'harmonique décroît de 50 % pour  $\varepsilon = 13 \%$



Porte étroite ( $\beta = 45^\circ$ ) :  $\tau_G = \tau/5 \approx 7$  fs  
 Porte large ( $\beta = 0^\circ$ ) :  $\tau_G = 2\tau \approx 70$  fs

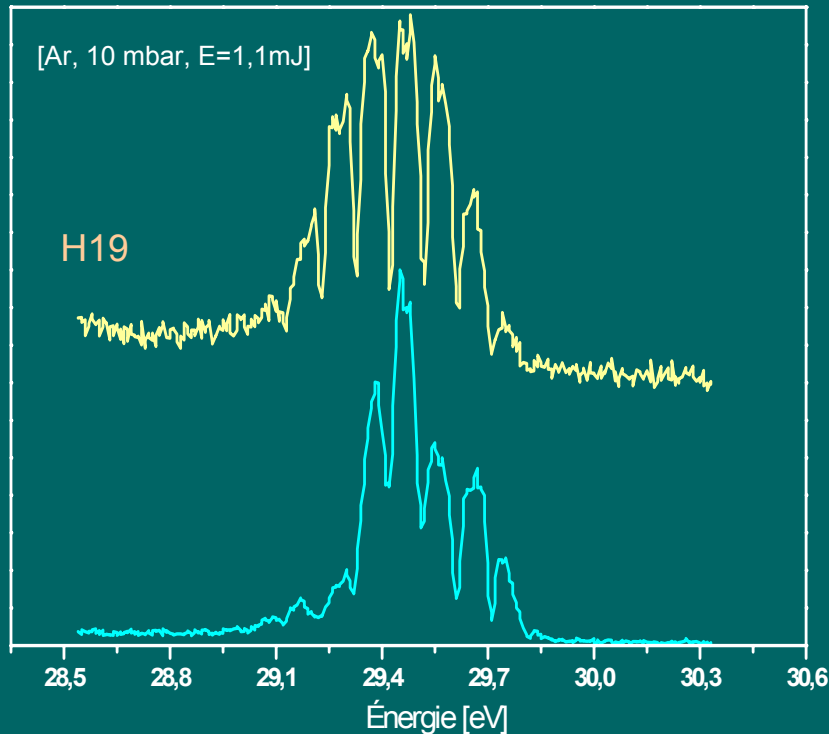
$t_e = 34$  fs  
 $\tau \sim 35$  fs

# Effet spectral du confinement

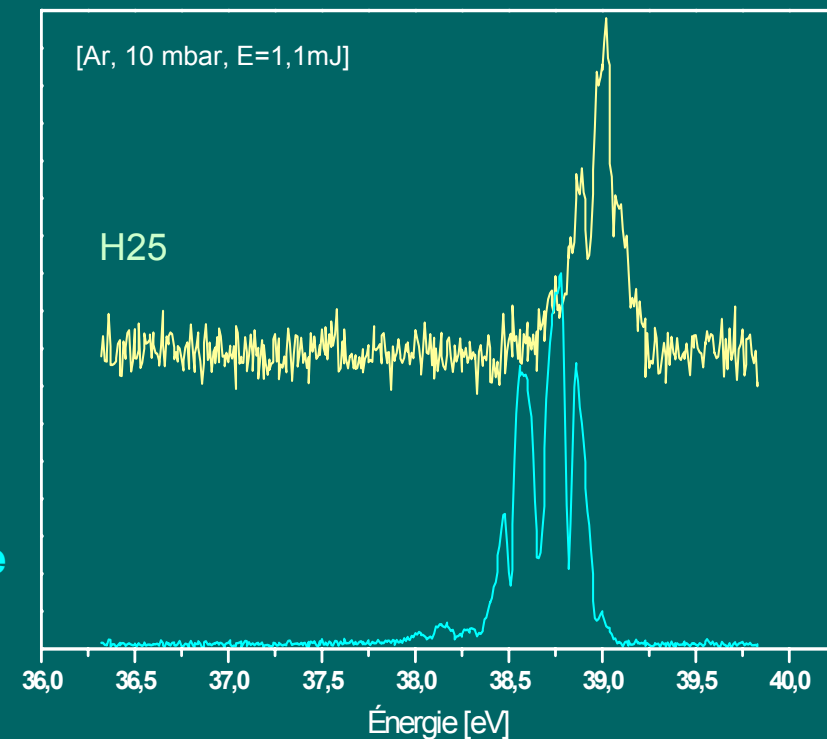
I Génération d'harmoniques d'ordres élevés

II Confinement temporel de l'émission VUV

III Conclusion Perspectives



Harmonique du Plateau



Harmonique de la coupure

Effet de la modulation de l'ellipticité sur les harmoniques :

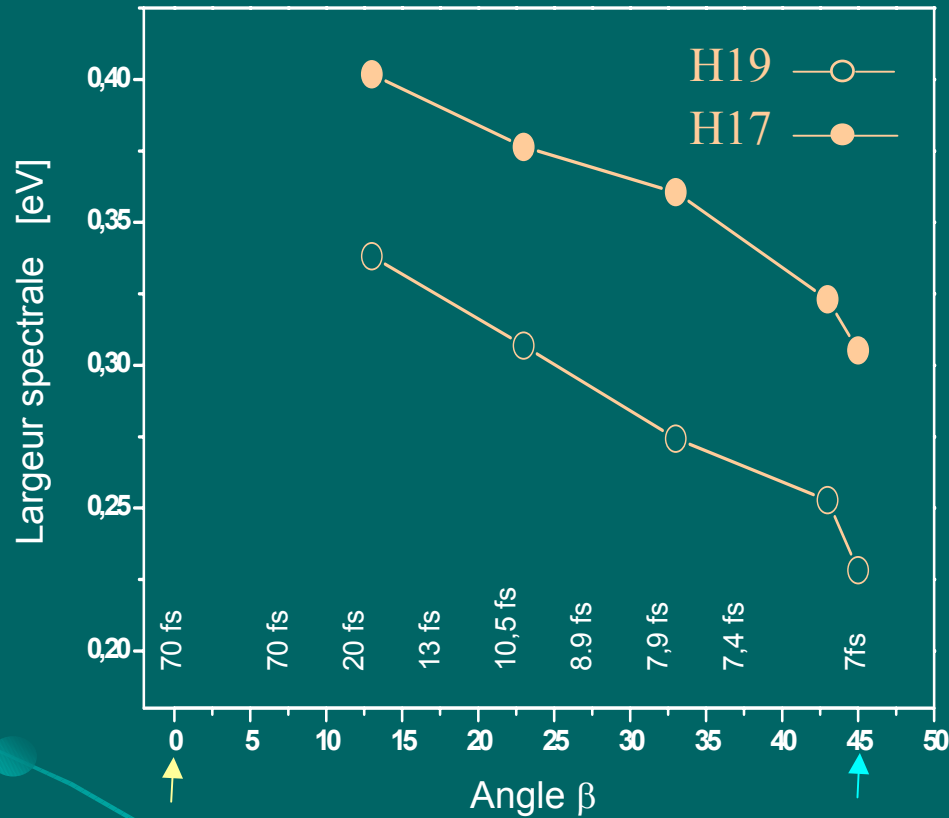
- du plateau : retrécissement spectral
- de la coupure : élargissement spectral

# Évolution de la largeur spectrale

I Génération d'harmoniques d'ordres élevés

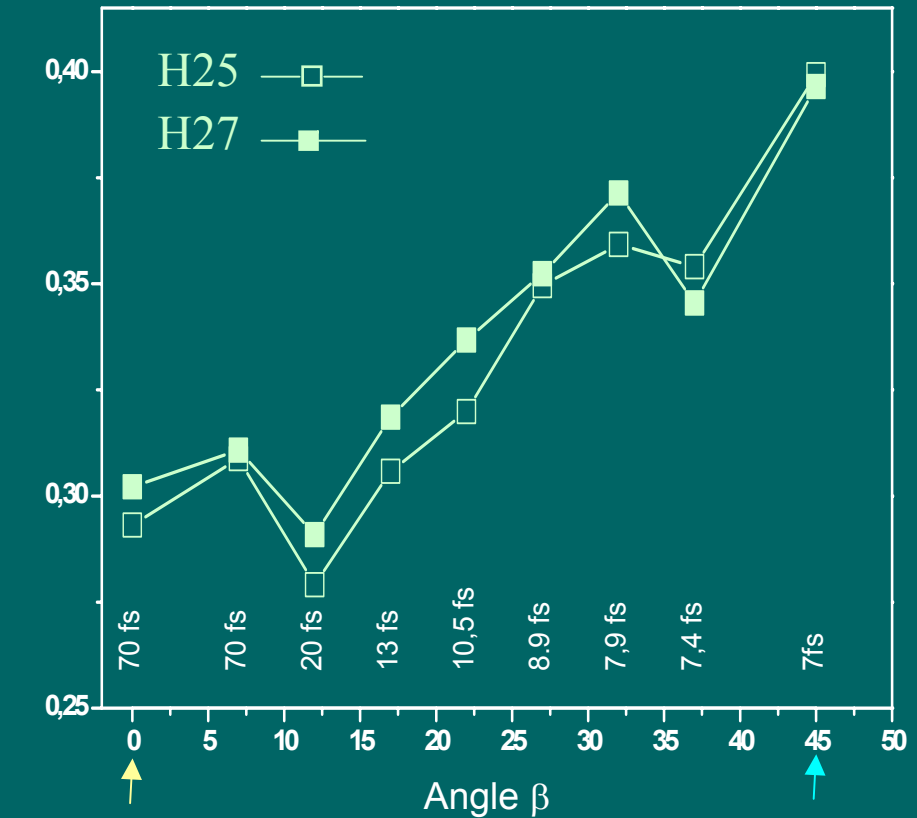
II Confinement temporel de l'émission VUV

III Conclusion Perspectives



Porte large

Porte étroite



Porte large

Porte étroite

H17, H 19 : *plateau*  $\Delta E$

H25, H27: *Coupure*  $\Delta E$

Évolution contrastée

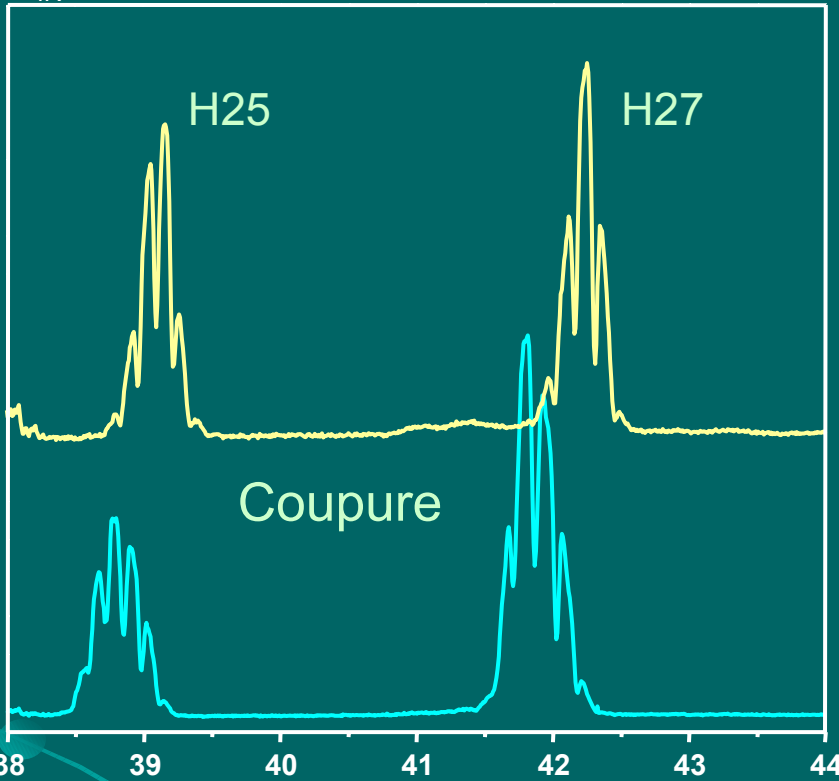
# Confirmation du contraste plateau-coupure

I Génération d'harmoniques d'ordres élevés

II Confinement temporel de l'émission VUV

III Conclusion Perspectives

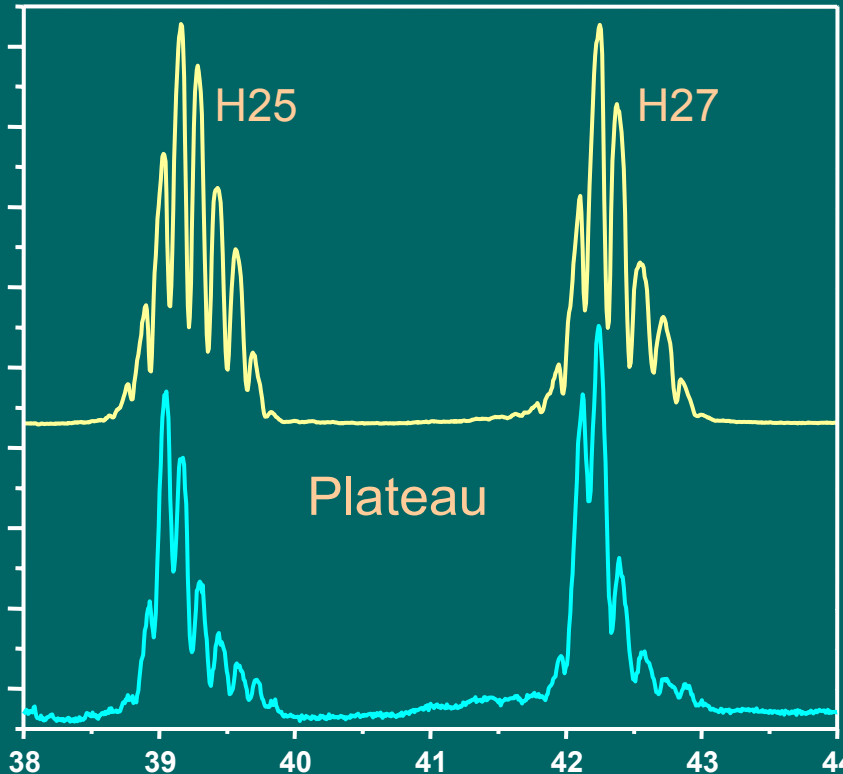
$E_{IR} = 1,1 \text{ mJ}$



En modifiant l'énergie laser, les harmoniques H25 H27 passent de la coupure au plateau.

On retrouve le comportement contrasté des harmoniques de la coupure et du plateau.

$E_{IR} = 2,2 \text{ mJ}$



# Contributions à la largeur spectrale

I Génération  
d'harmoniques  
d'ordres élevés

II Confinement  
temporel de  
l'émission VUV

III Conclusion  
Perspectives

- L'ionisation du milieu
- La dérive de fréquence.
- La durée d'émission.
- Phase atomique

Phase du champ harmonique à la fréquence  $q\omega_0$  :

$$\varphi_q = -q\omega_0 t - \alpha_q^i I$$

Fréquence instantanée :

$$\omega_q = -\frac{d\varphi_q}{dt} = q\omega_0 + \alpha_q^i \frac{dI}{dt}$$

plateau  $\tau_1$



Pas d'élargissement spectral ( $\alpha_q^1$  très faible)

plateau  $\tau_2$



**Élargissement spectral**

coupure



Faible élargissement spectral  $\left(\frac{dI}{dt} \approx 0\right)$



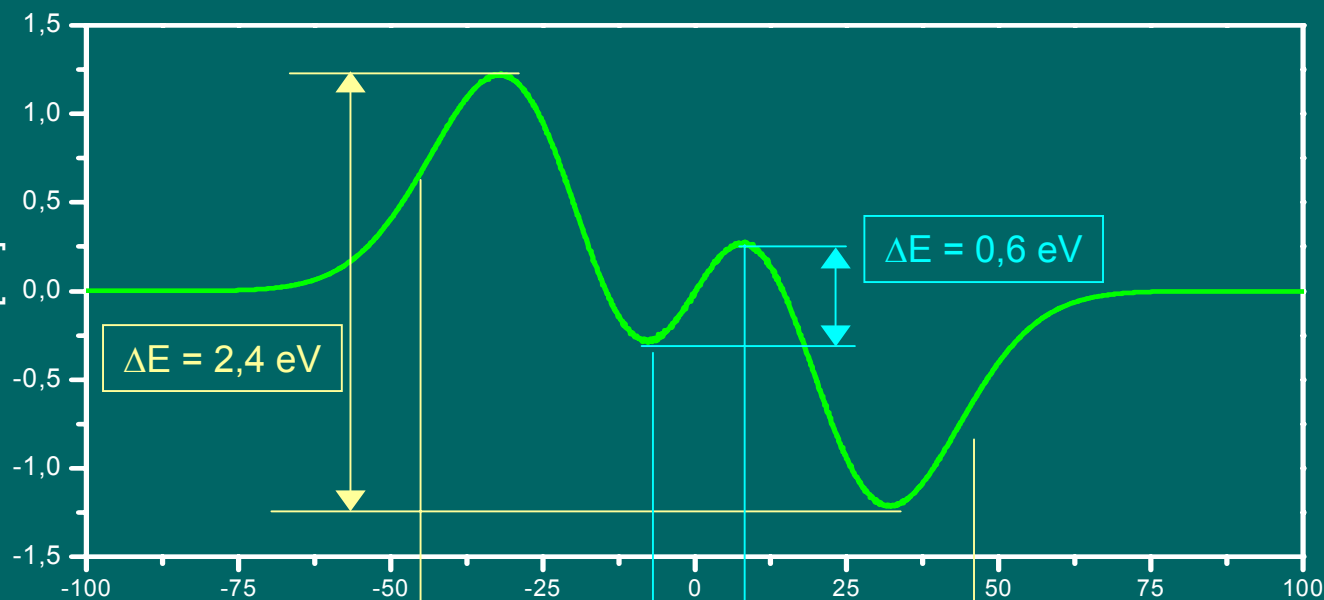
# Interprétation

- I Génération d'harmoniques d'ordres élevés
- II Confinement temporel de l'émission VUV
- III Conclusion Perspectives

Trajectoire longue

$\tau_2$

$$\alpha_q^2 \frac{dI}{dt} \text{ [eV]}$$

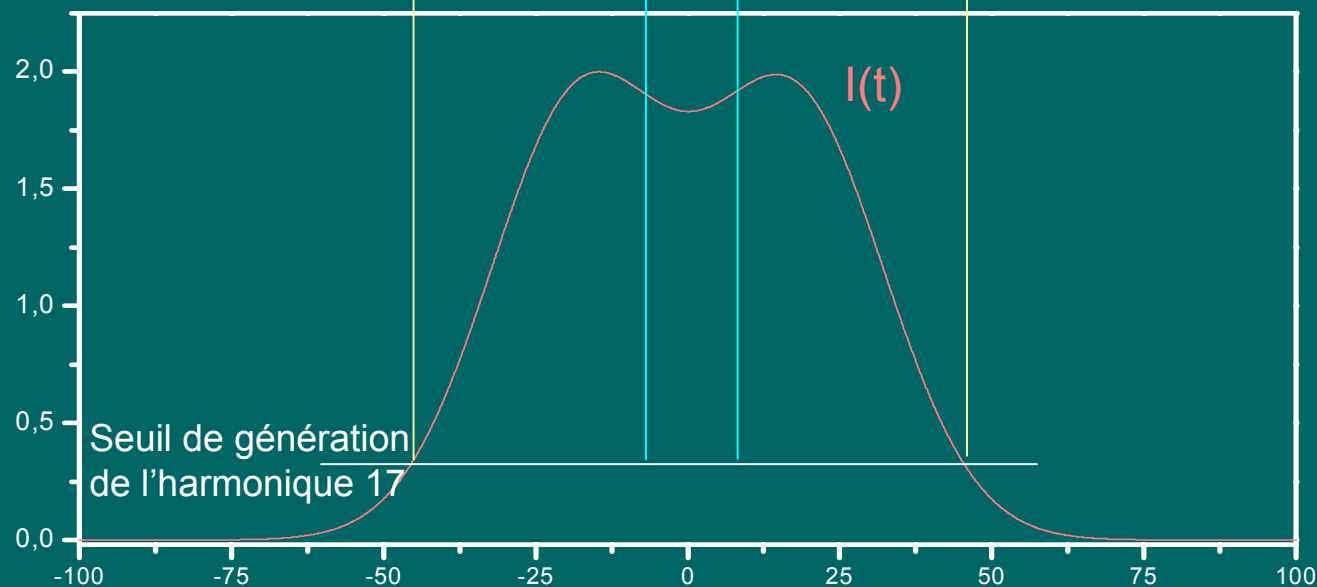


Porte large  $\Delta E = 2,4 \text{ eV}$



Porte étroite  $\Delta E = 0,6 \text{ eV}$

Effet du confinement



# Estimation de l'élargissement par confinement

I Génération  
d'harmoniques  
d'ordres  
élevés

II Confinement  
temporel de  
l'émission VUV

III Conclusion  
Perspectives

Pour une harmonique de la coupure

$$\Delta E_{PE} = \sqrt{\Delta E_{PL}^2 + \Delta E_{conf}^2}$$

**Porte étroite**  
 $\Delta E_{PE} = 400 \text{ meV}$

**Porte large**  
 $\Delta E_{PL} = 300 \text{ meV}$



$$\Delta E_{conf} = 260 \text{ meV}$$

Valeur consistante avec un confinement temporel de 7 fs

$\Delta E(\text{eV}) \cdot \Delta \tau(\text{fs}) = 1,8$  pour une impulsion Gaussienne

# Récapitulatif des résultats

I Génération  
d'harmoniques  
d'ordres élevés

II Confinement  
temporel de  
l'émission VUV

III Conclusion  
Perspectives

## Mesure indirecte du confinement temporel de l'émission VUV

- harmonique plateau ( $\tau_2$ ): confinement → Réduit le rôle de la phase atomique  
Rétrécissement spectral
- harmonique coupure : confinement →  
Élargissement spectral

Signature spectrale consistante avec un confinement temporel de 7 fs.

- Expérience complémentaire réalisée en collaboration avec le CEA Saclay (Paris) a confirmé l'effet du confinement dans le domaine spectral [1].

Nécessité d'une mesure directe dans le domaine temporel

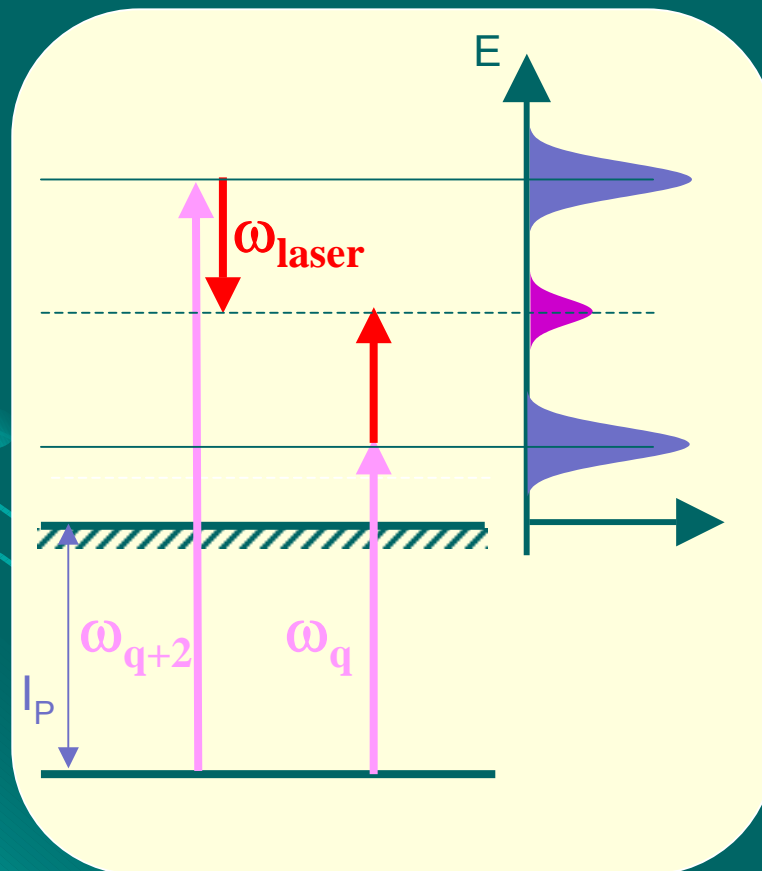
# Mesure temporelle - Intercorrélation

But : Mettre en évidence le confinement dans le domaine temporel

I Génération  
d'harmoniques  
d'ordres élevés

II Confinement  
temporel de  
l'émission VUV

III Conclusion  
Perspectives



En Régime perturbatif :

$$I_{BL}(\tau) = \int I_{IR}(t'-\tau)I_{VUV}(t')dt'$$

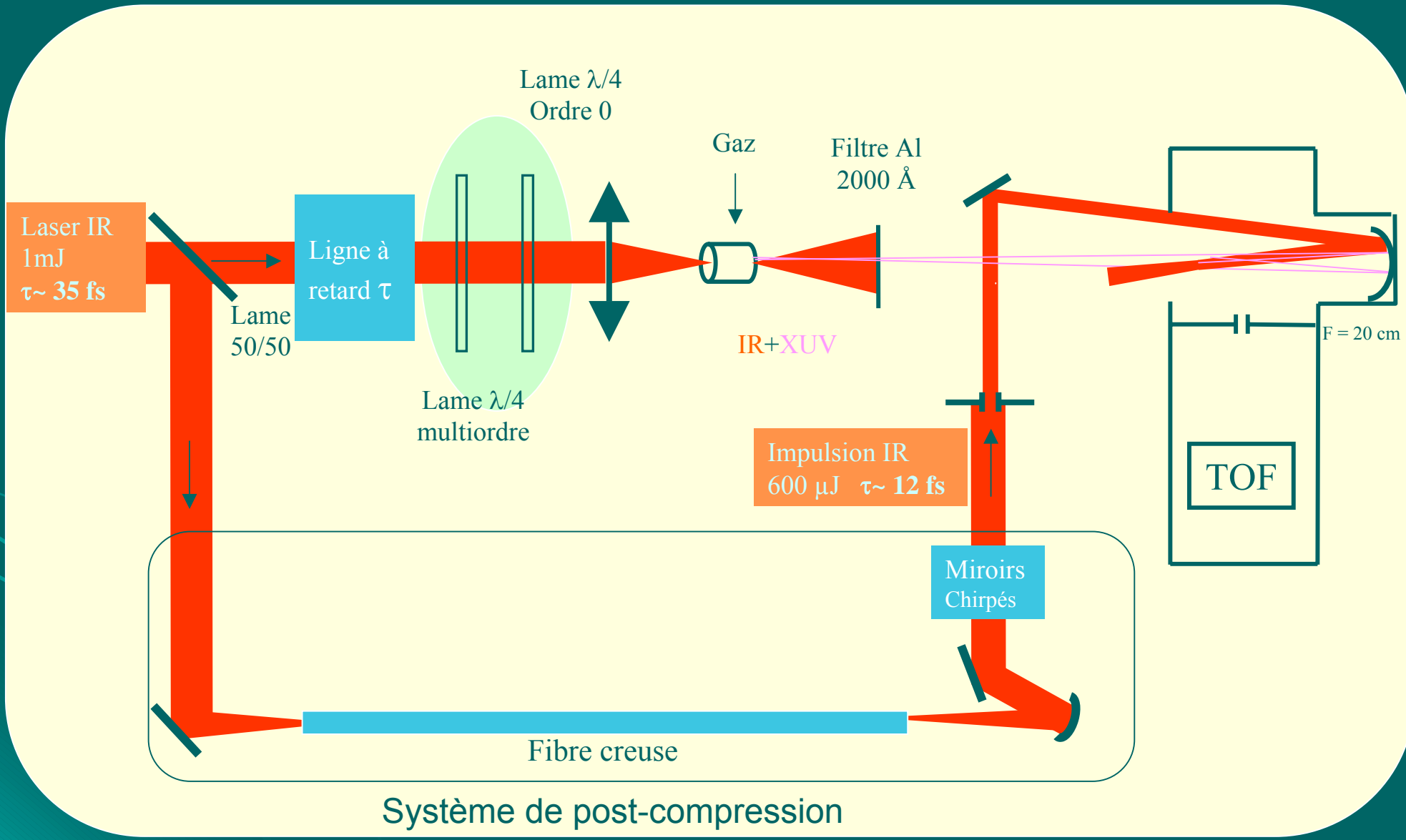
Par déconvolution, on mesure la durée de l'impulsion VUV.

Dans le cas d'impulsions Gaussiennes :

$$\tau_{BL} = \sqrt{\tau_{IR}^2 + \tau_{VUV}^2}$$

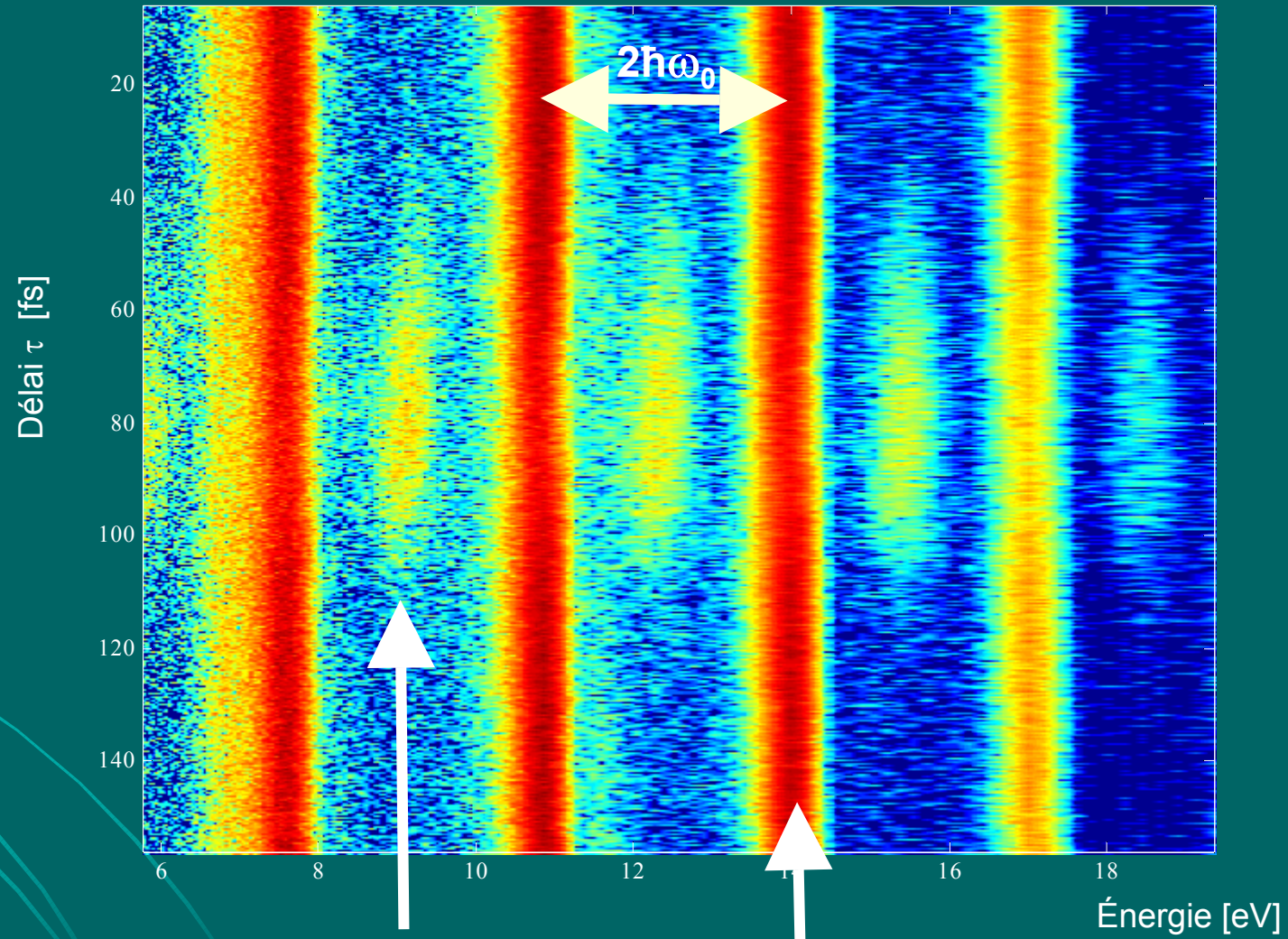
# Dispositif expérimental

- I Génération d'harmoniques d'ordres élevés
- II Confinement temporel de l'émission VUV
- III Conclusion Perspectives



# Spectre en énergie des photoélectrons

- I Génération d'harmoniques d'ordres élevés
- II Confinement temporel de l'émission VUV
- III Conclusion Perspectives

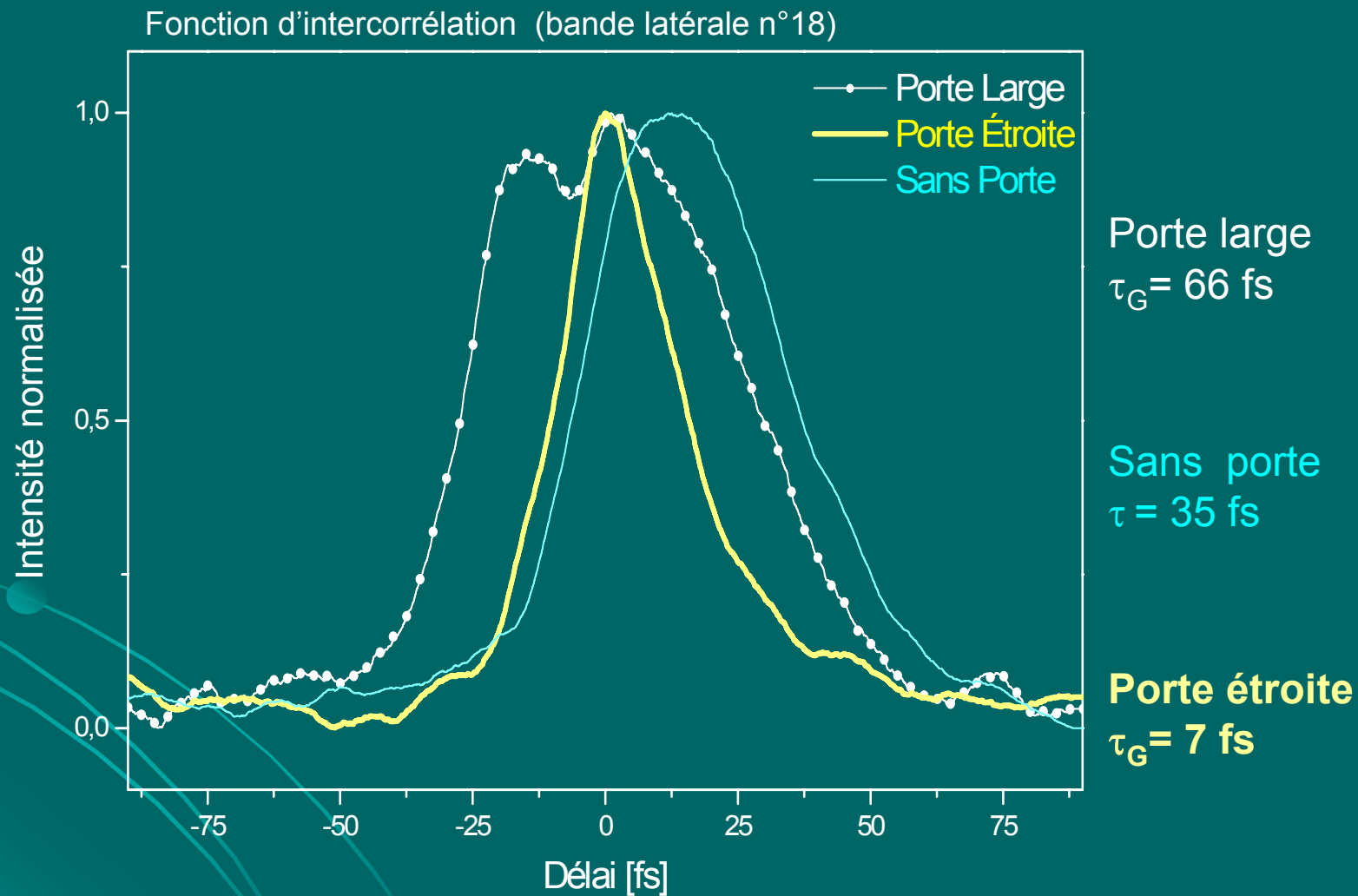


# Fonction d'intercorrélation $I_{BL}(\tau)$

I Génération  
d'harmoniques  
d'ordres élevés

II Confinement  
temporel de  
l'émission VUV

III Conclusion  
Perspectives



Durée de la fonction  
d'intercorrélation  $\tau_{BL}$

57 fs

Porte large  
 $\tau_G = 66$  fs

44 fs

Sans porte  
 $\tau = 35$  fs

26 fs

Porte étroite  
 $\tau_G = 7$  fs

Preuve directe du confinement de l'émission VUV

# CONCLUSION

I Génération  
d'harmoniques  
d'ordres élevés

II Confinement  
temporel de  
l'émission VUV

III Conclusion  
Perspectives

- **Réalisation d'une porte d'ellipticité, avec 2 lames  $\lambda/4$ , contrôlable continûment de durée minimale 7 fs.**
- **Observation de signatures spectrales consistantes avec un confinement temporelle de l'émission harmonique.**
- **Mesure directe du confinement dans le domaine temporel par une méthode intercorrélation.**



I Génération  
d'harmoniques  
d'ordres élevés

II Confinement  
temporel de  
l'émission VUV

III Conclusion  
Perspectives

## ● Étude de la génération harmonique avec la porte d'ellipticité.

- La porte d'ellipticité peut se déplacer dans le profil temporel en intensité de l'impulsion laser.

## ● Isolation d'une impulsion attoseconde.

- $\tau_G = 7 \text{ fs} \rightarrow$  5-6 impulsions attosecondes
- $\tau_G < T_0/2 \rightarrow$  UNE impulsion attoseconde UNIQUE

$$\text{Porte étroite: } \tau_G = \tau^2 / (5 \times t_e)$$

$$\tau = 10 \text{ fs} - t_e = 13 \text{ fs}$$
$$\tau_G = 1,45 \text{ fs}$$

$$\tau = 8 \text{ fs} - t_e = 10 \text{ fs}$$
$$\tau_G = 1,20 \text{ fs}$$

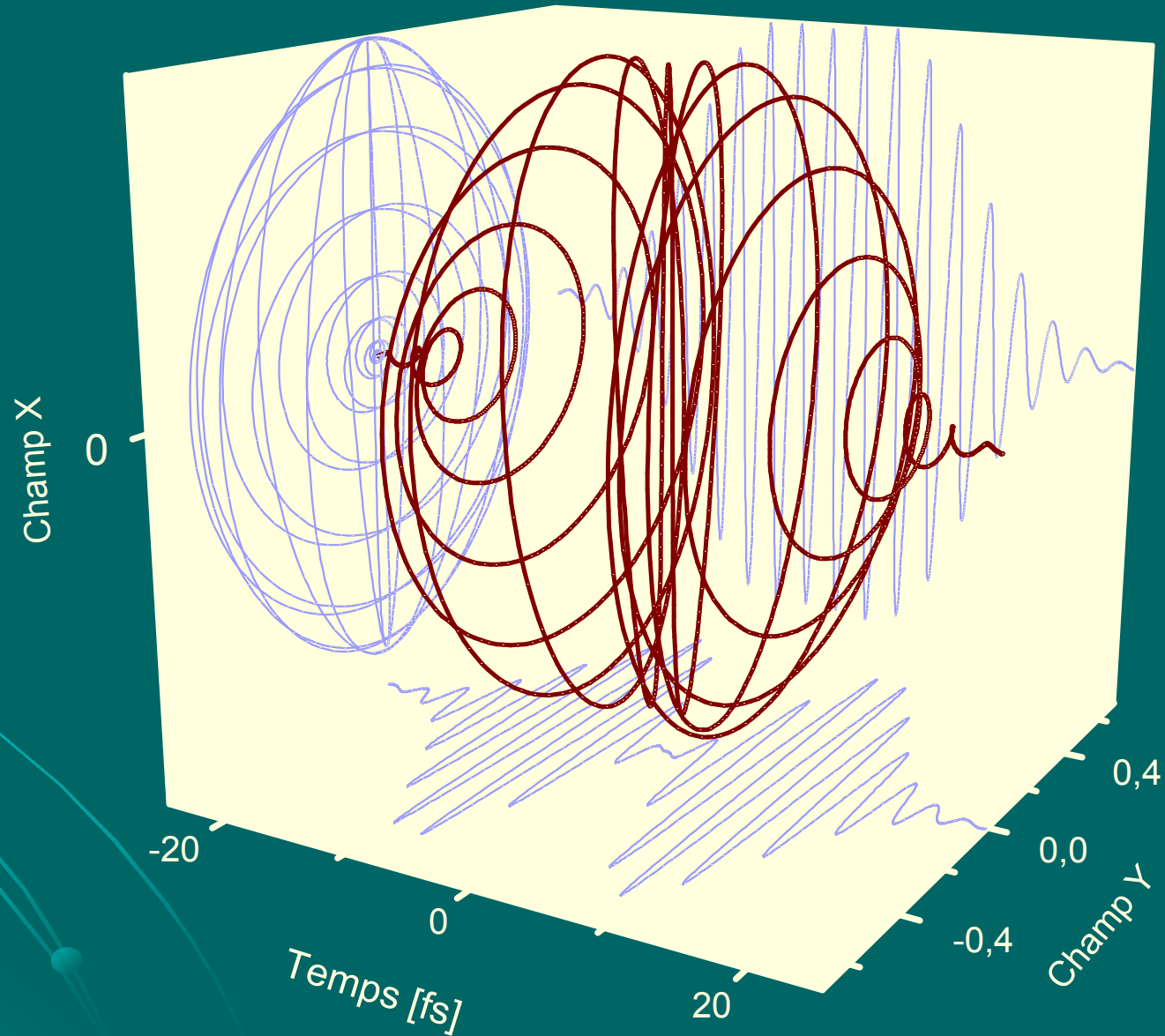
# Champ électrique 3D



I Génération  
d'harmoniques  
d'ordres élevés

II Confinement  
temporel de  
l'émission VUV

III Conclusion  
Perspectives



$\tau = 10 \text{ fs}$   
 $t_e = 13 \text{ fs}$

# Vers des impulsions sub-100 as ?

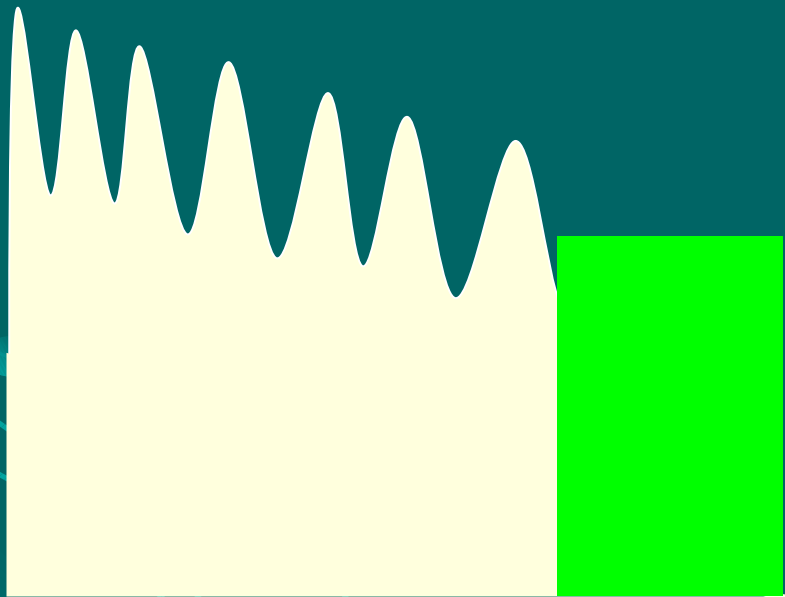
I Génération d'harmoniques d'ordres élevés

II Confinement temporel de l'émission VUV

III Conclusion Perspectives

Impulsion ultracourte

Modulation temporelle de la polarisation



$\Delta E=10 \text{ eV} \rightarrow \Delta\tau=180 \text{ as}$



$\Delta E=100 \text{ eV} \rightarrow \Delta\tau < 100 \text{ as}$

# Remerciements

M. Kovacev  
Y. Mairesse  
E. Priori  
H. Merdji  
P. Monchicourt  
P. Breger  
P. Salières  
B. Carré  
P. Agostini

CEA Saclay

R. Lopez-Martens  
J. Mauritsson  
P. Johnsson  
A. L'Huillier

Lund Laser Center

... et toutes les personnes du laboratoire