

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



[www.cea.fr](http://www.cea.fr)

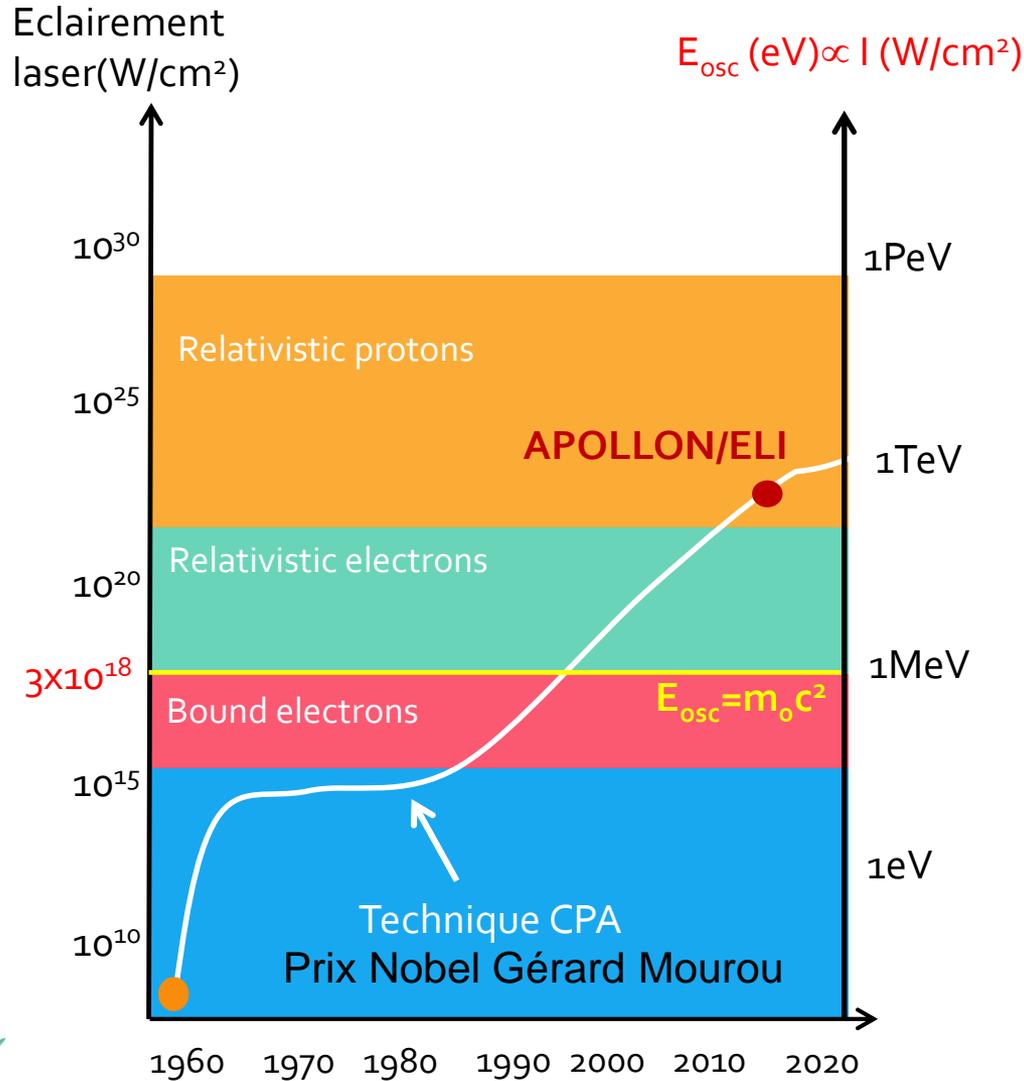
# L'accélération d'électrons relativistes par interaction laser intense – matière

S. Dobosz Dufrénoy

Groupe de Physique à Haute Intensité



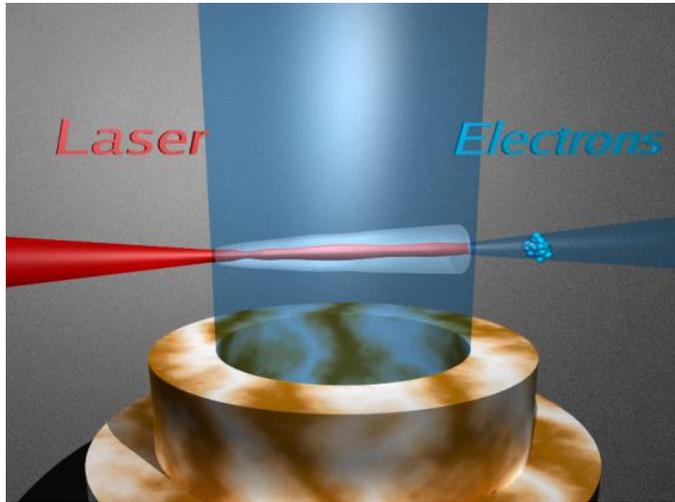
# Evolution de l'intensité laser disponible sur cible



Propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu → création d'un plasma

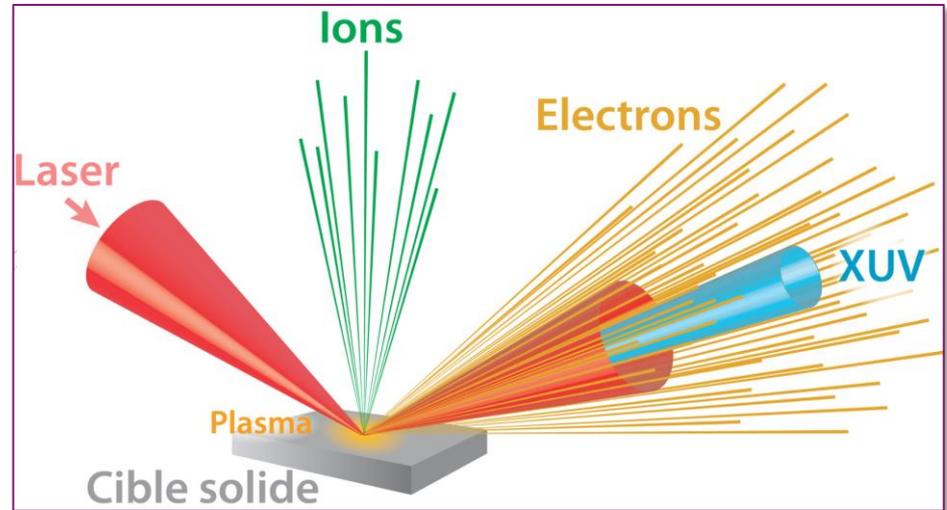
$$N_c = \omega^2 m_e \epsilon_0 / e^2 \sim 1,11 \times 10^{21} (\lambda / \mu\text{m})^{-2} (\text{cm}^{-3})$$

Plasma sous critique



Propagation laser en milieu gazeux

Plasma sur critique



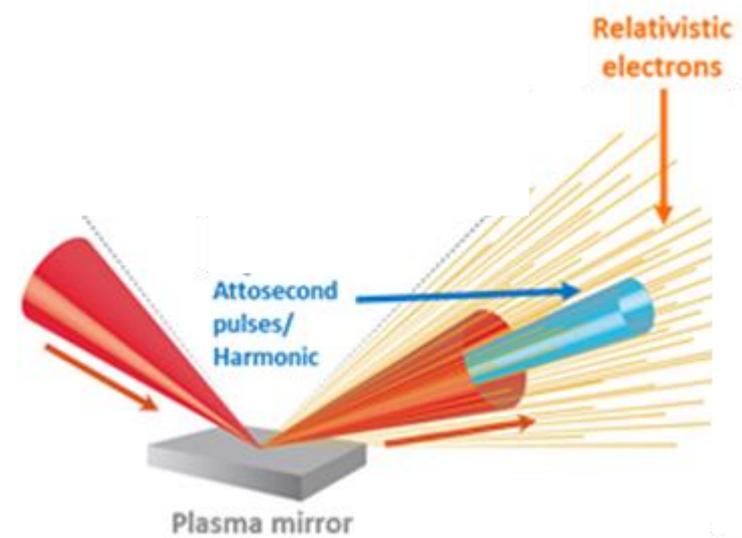
Réflexion spéculaire sur miroir plasma



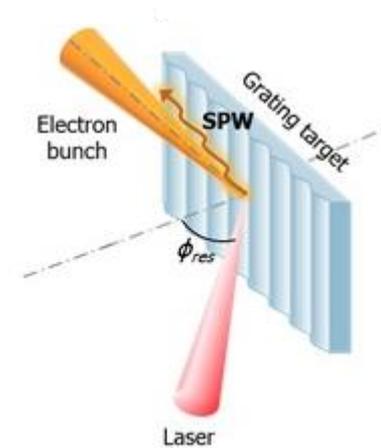
Accélérateurs compacts d'électrons de quelques MeV à quelques GeV

## Accélération d'électrons relativistes

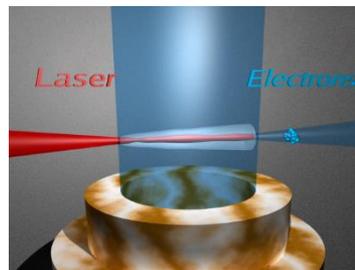
- 1/ sur cible solide - miroir plasma



- cible structurée sous forme de réseau



- 2/ dans un milieu gazeux



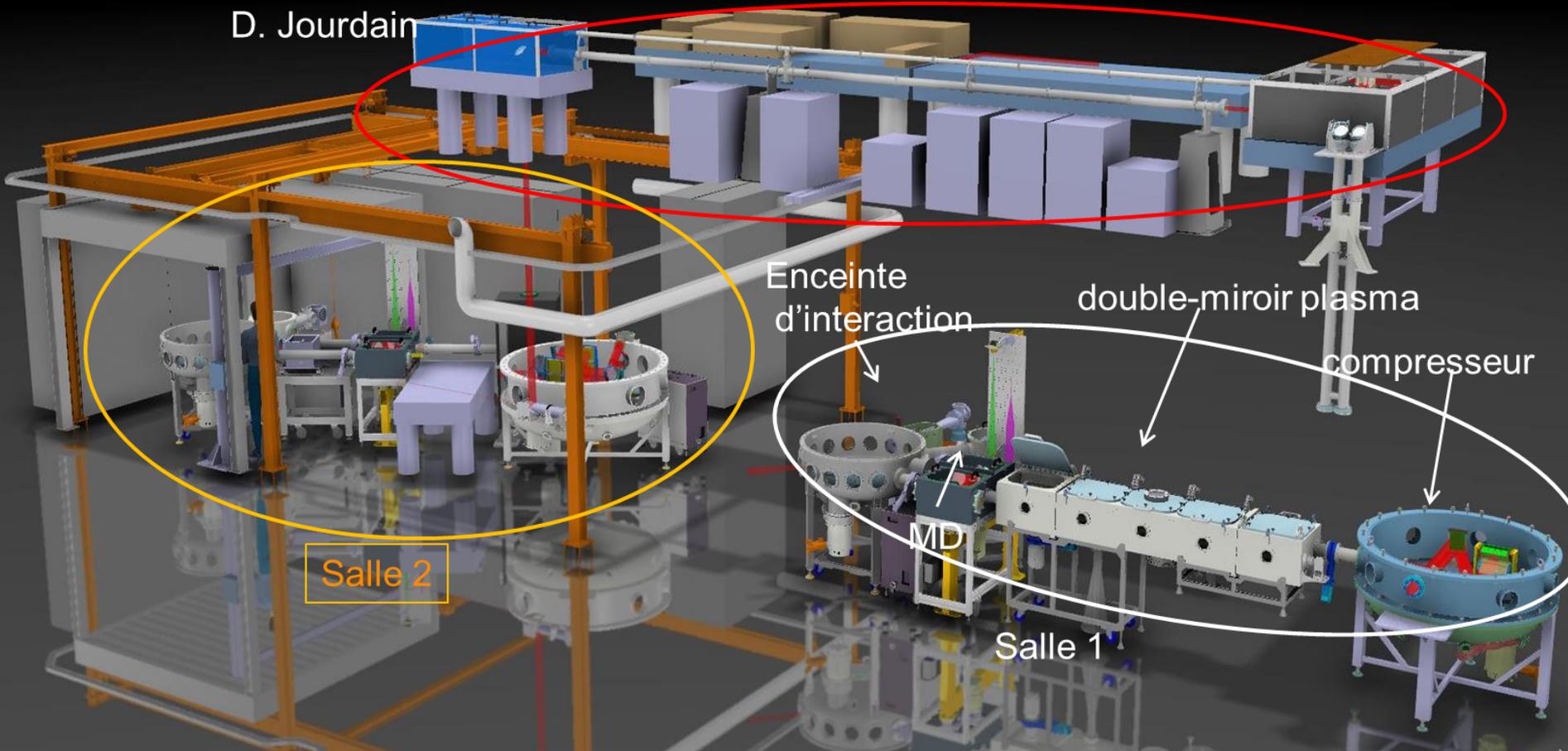
Equipe SLIC

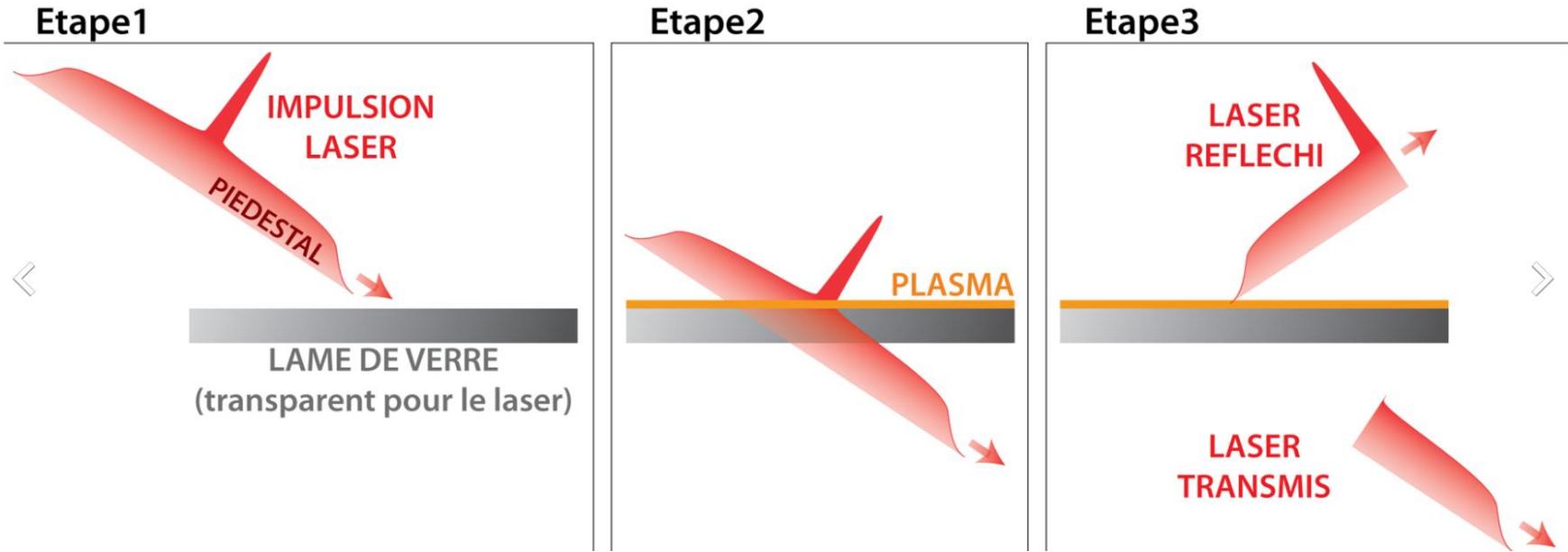
F. Réau

D. Jourdain

UHI100

$P = 100 \text{ TW}$  -  $E = 2.5 \text{ J}$  -  $\tau = 25 \text{ fs}$  -  $10 \text{ Hz}$





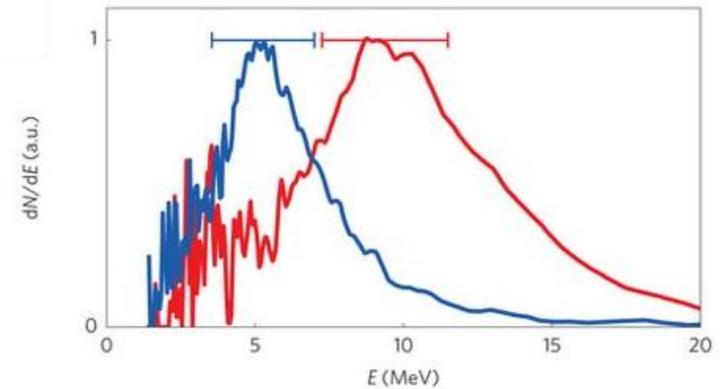
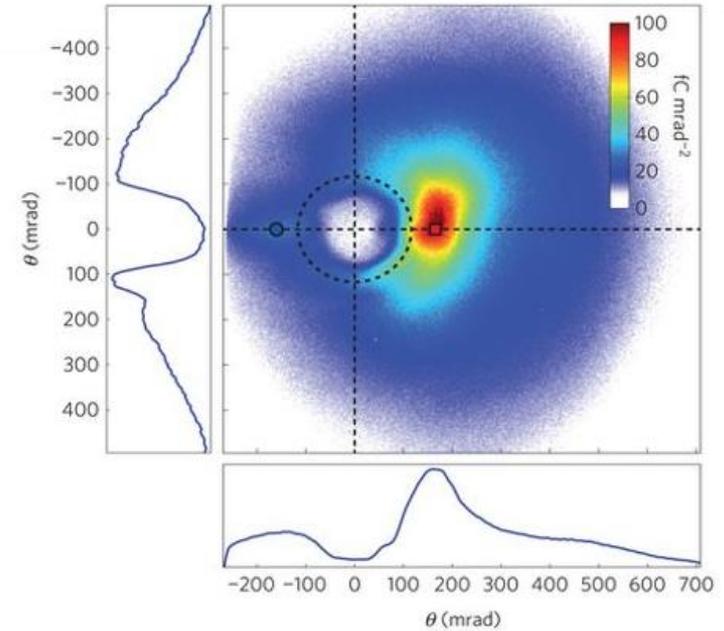
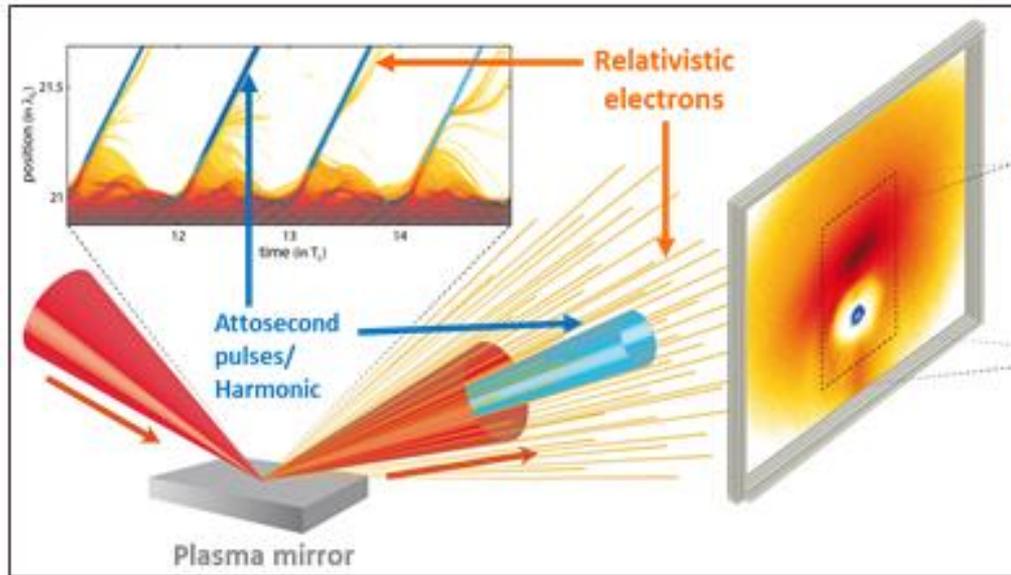
Miroir plasma



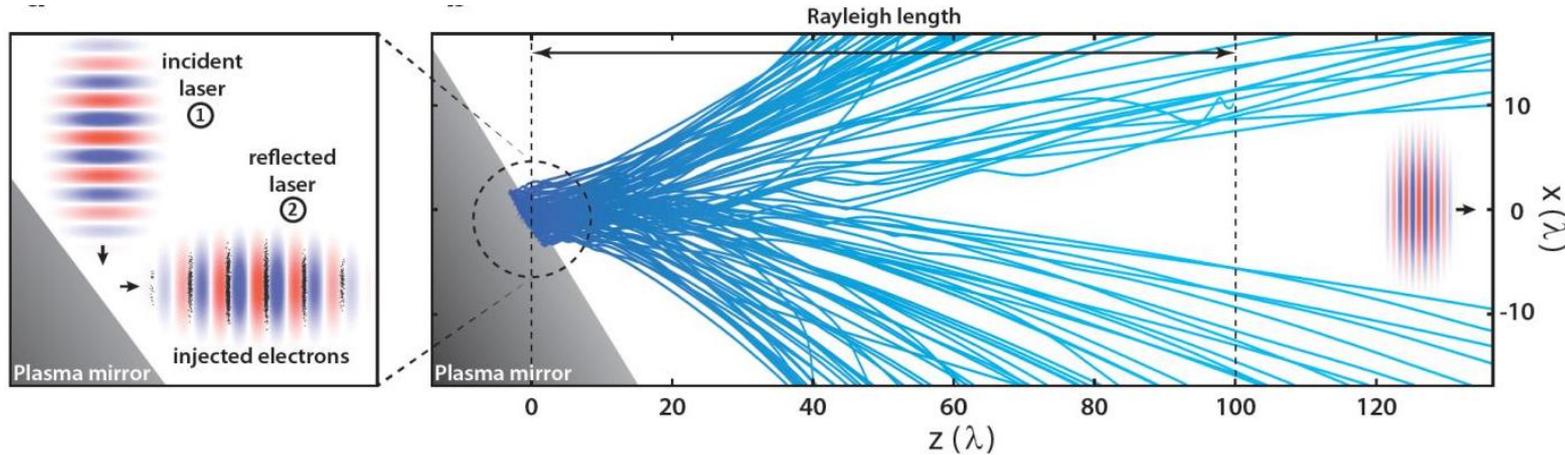
Contraste temporel du laser accru



Interaction laser intense – cible solide et pas un plasma détendu



# Le miroir plasma comme injecteur d'électrons relativistes accélérés par laser dans le vide (Vacuum Laser Acceleration)



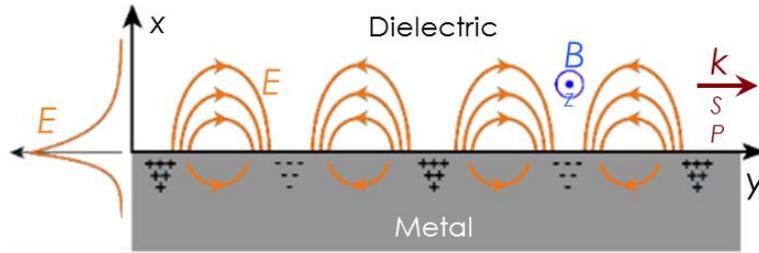
*M. Thevenet, Nat. Phys. (2016) 12 , 355*

Champ accélérateur  $\sim 100\text{GV/m}$  comparable à l'accélération par onde de sillage dans les plasmas

- 10MeV sur  $100\mu\text{m}$
- 10nC
- Source attoseconde

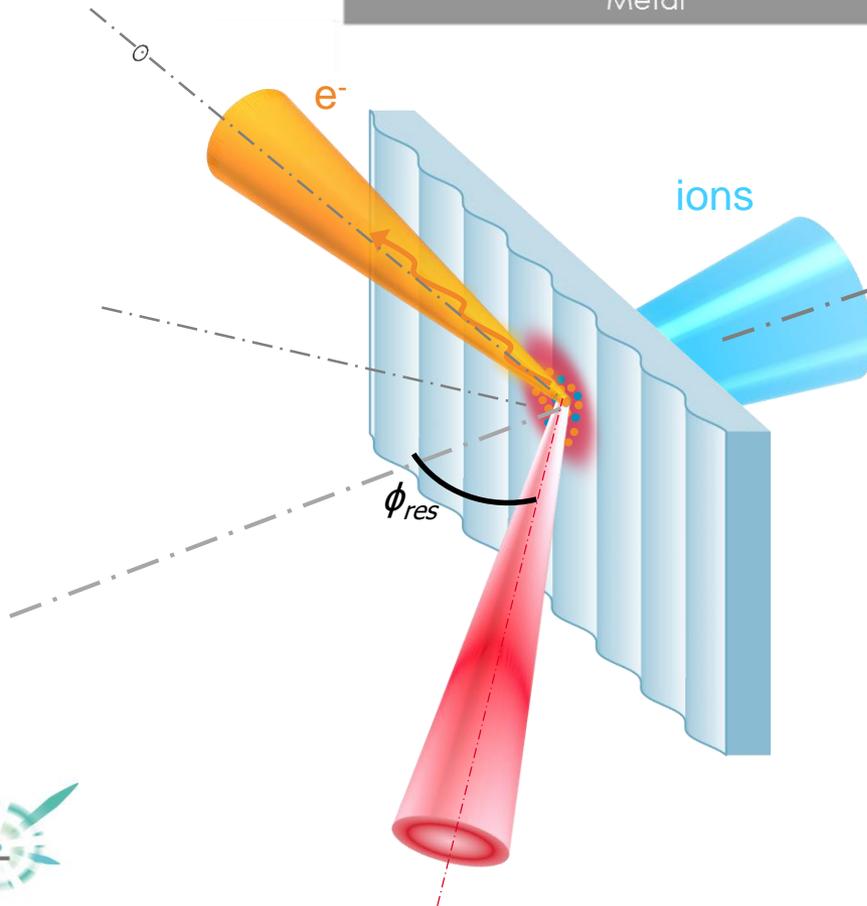


**Accélérateur compact !**

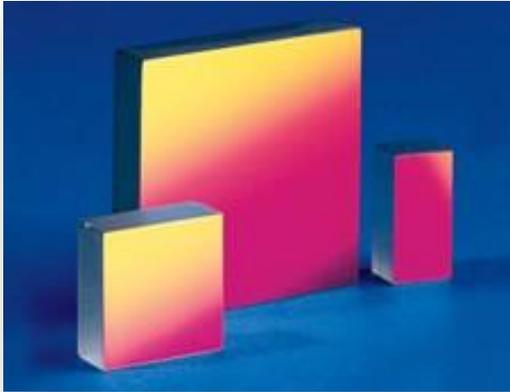


$$\sin \phi_{res} + m \frac{\lambda}{d} \simeq 1 + \frac{1}{2} \frac{n_c}{n_e}$$

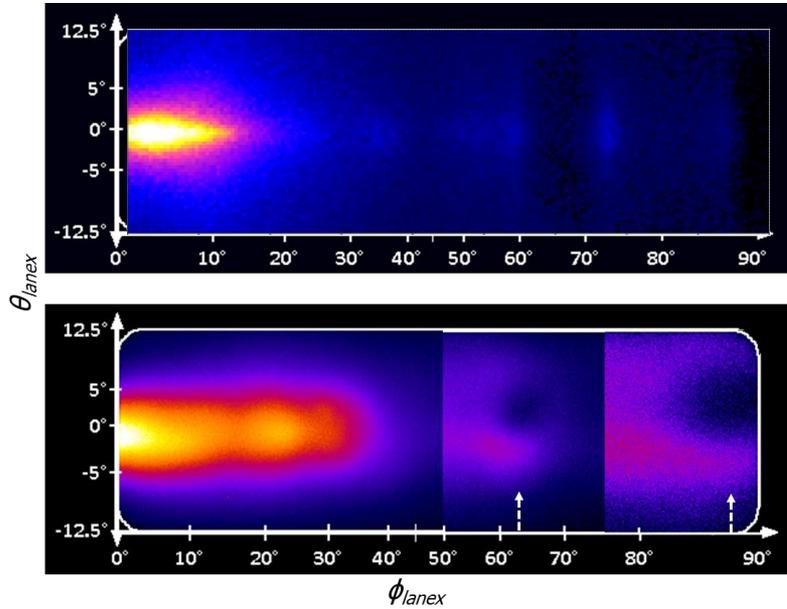
Excitation de plasmons de surface pour  $\phi_{res}$  sur cible structurée en réseau



# Caractéristiques spatiales / spectrales de la source

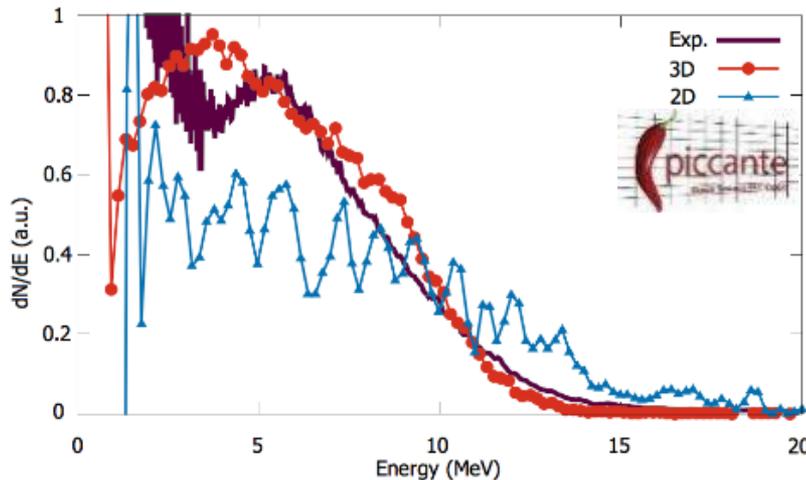


Commercial blazed gratings



3D simulation

Experimental



**angular divergence FWHM (deg)**      **5.4**

charge in the bunch (pC)      600

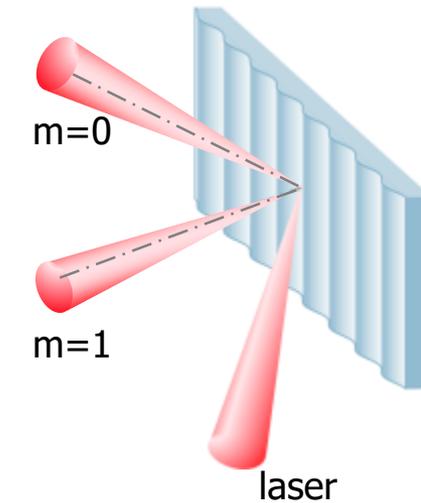
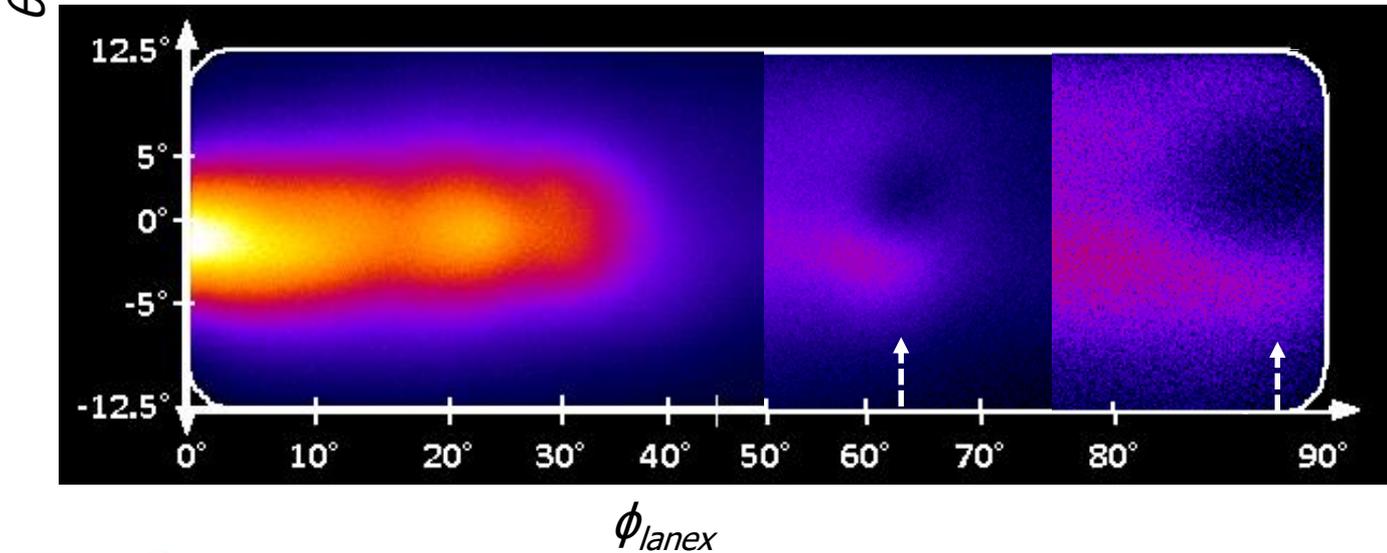
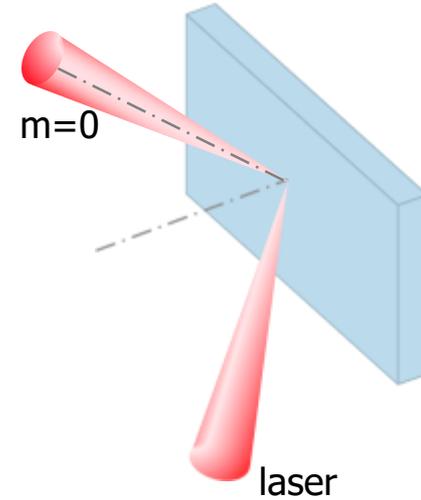
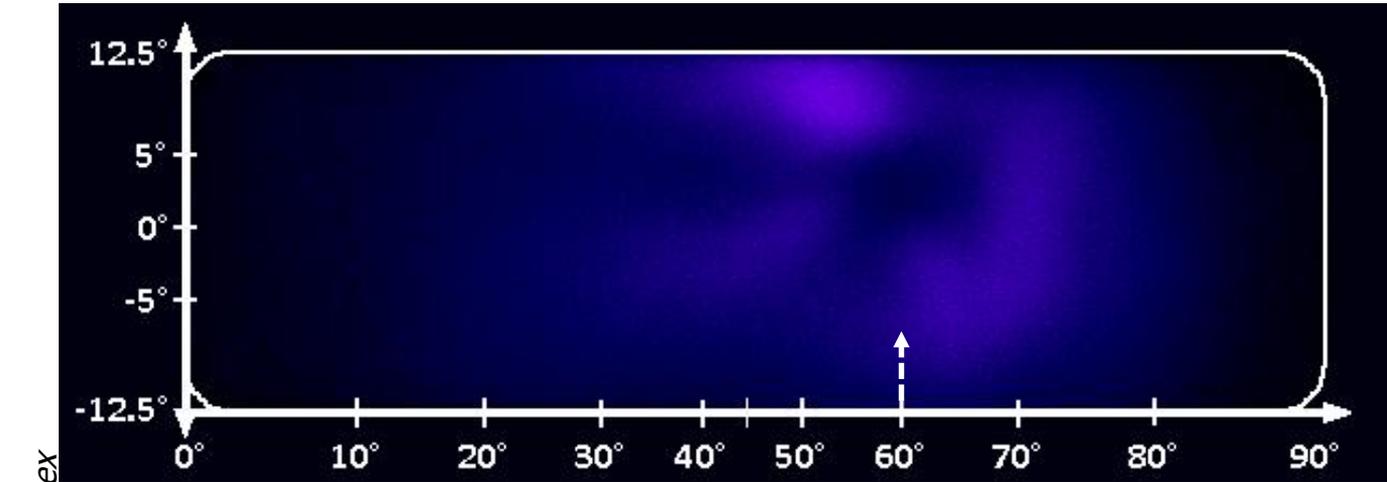
maximum energy (MeV)      18

L. Fedeli et al., PRL **116**, 015001 (2016)

G. Cantono et al., PoP **25**, 031907 (2018)

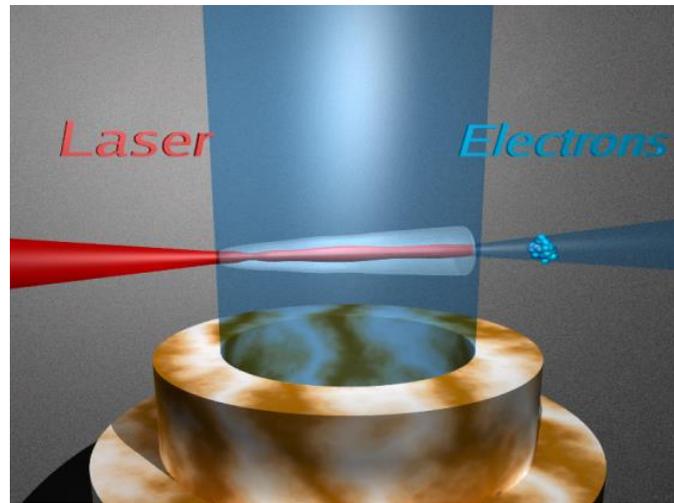
G. Cantono et al., PRL **120**, 264803 (2018)

# Première démonstration expérimentale de l'accélération d'électrons relativiste par plasmons de surfaces



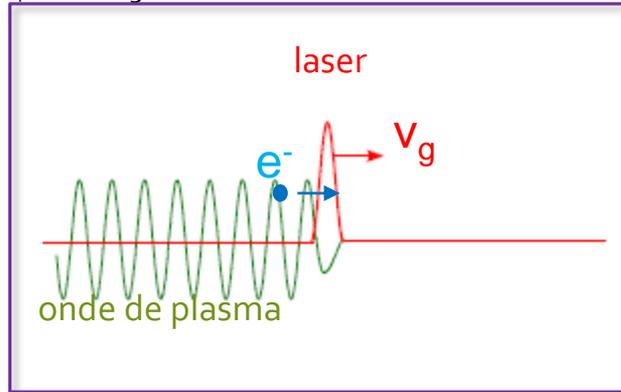
Conservation de la structure réseau grâce au haut contraste temporel laser

# Accélération laser-plasma

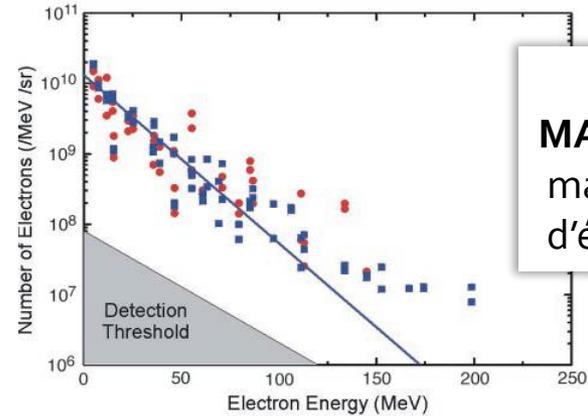


# Accélérateur laser-plasma

- Principe (1979- Tajima et Dawson): convertir le champ électrique du laser en une onde électrostatique telle que  $v_{\text{onde}} = v_{\text{glaser}} \sim c$



➤ En pratique ... de 1995 à 2004

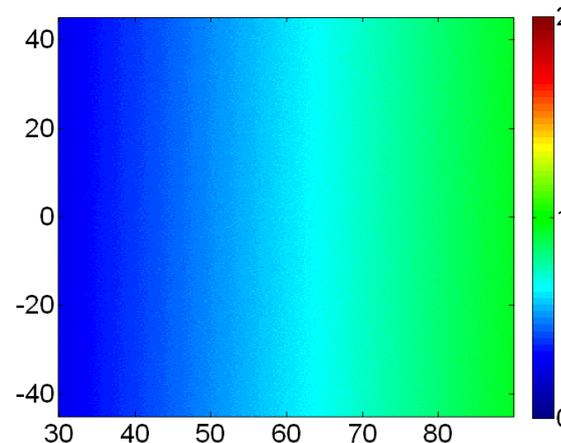


**MAIS** faisceau majorité d'électrons < 10 MeV

V. Malka, Science(2002)

2004

Une mini-révolution: la découverte du régime de la bulle



Faisceaux d'électrons quasi-monocinétiques!

😊 **Source compacte**, record à **7,8GeV** sur 20cm

😊 **Source brève** <10 fs

😊 **Synchrone** du laser générateur

☹️ **Instable** car processus très non linéaire

### Axes de recherche

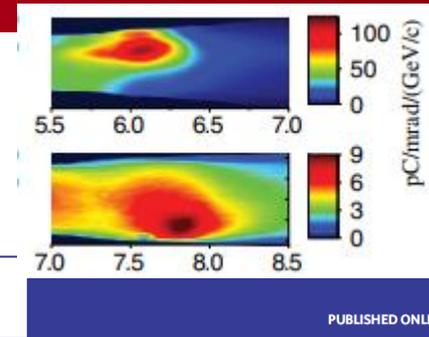
- **injection** pour stabiliser le processus

- **course vers les hautes énergies** (physique des hautes énergies)

- électrons pour **source de rayonnement ultra-court**  
(rayonnement bétatron émis par les électrons aux trajectoires oscillantes dans l'onde de plasma / source d'électrons + onduleur)

(H. Schlenvoigt, Nat. Phys. 2008 / K. Ta Phuoc, PoP 2007)

- **Applications** .... (diffraction électronique, imagerie par contraste de phase.....)



PRL, 122 (2019) 084801

nature  
physics

LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 9 JANUARY 2011 | DOI: 10.1038/NPHYS1872

### Few femtosecond, few kiloampere electron bunch produced by a laser-plasma accelerator

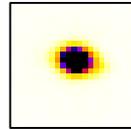
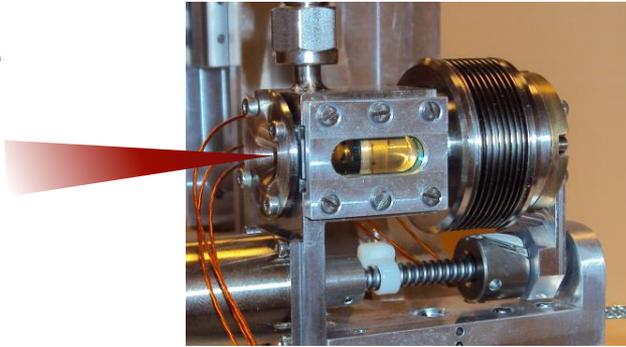
O. Lundh<sup>1\*</sup>, J. Lim<sup>1</sup>, C. Rechatin<sup>1</sup>, L. Ammoura<sup>1</sup>, A. Ben-Ismaïl<sup>2</sup>, X. Davoine<sup>3</sup>, G. Gallot<sup>4</sup>, J-P. Goddet<sup>1</sup>, E. Lefebvre<sup>3</sup>, V. Malka<sup>1\*</sup> and J. Faure<sup>1</sup>

$H_2 + 1\% N_2$   
( $n_e = 2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )

Mécanisme d'injection par  
ionization ( $Q \nearrow$ , divergence  $\nearrow$ )

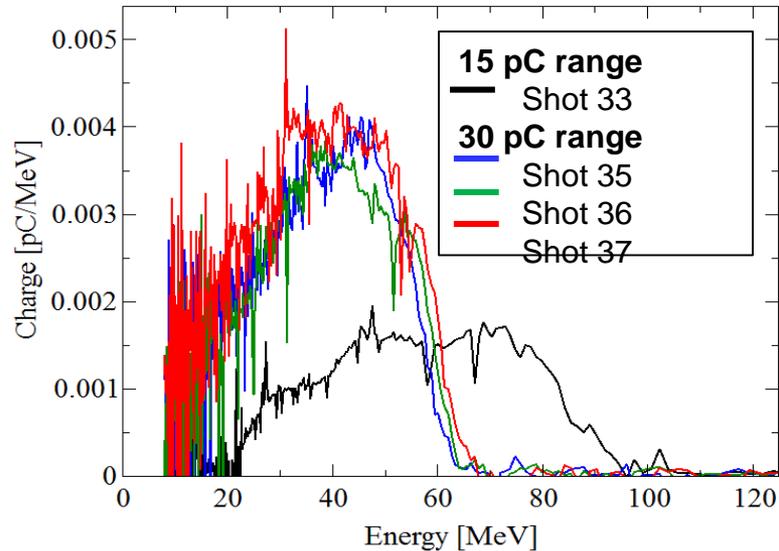
Laser pulse

$n_c = 1.7 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$



Charge = 30 +/- 10 pC  
Divergence = 1.4 mrad  
Pointing stability = 1/2  
diameter FWHM

coll. with LPGP

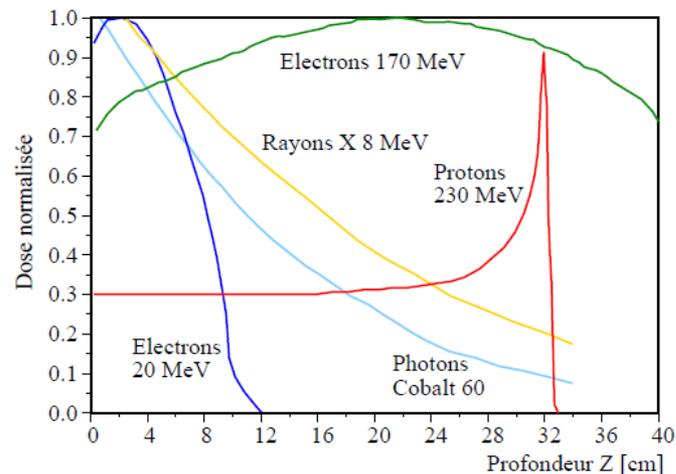


# Source d'électrons pour la radiothérapie



→ **Détruire les tumeurs tout en préservant les tissus sains exposés**

Dépôt de dose en fonction du type de particules



## Contexte:

### RADIATION TOXICITY

**Ultrahigh dose-rate FLASH irradiation** increases the differential response between normal and tumor tissue in mice

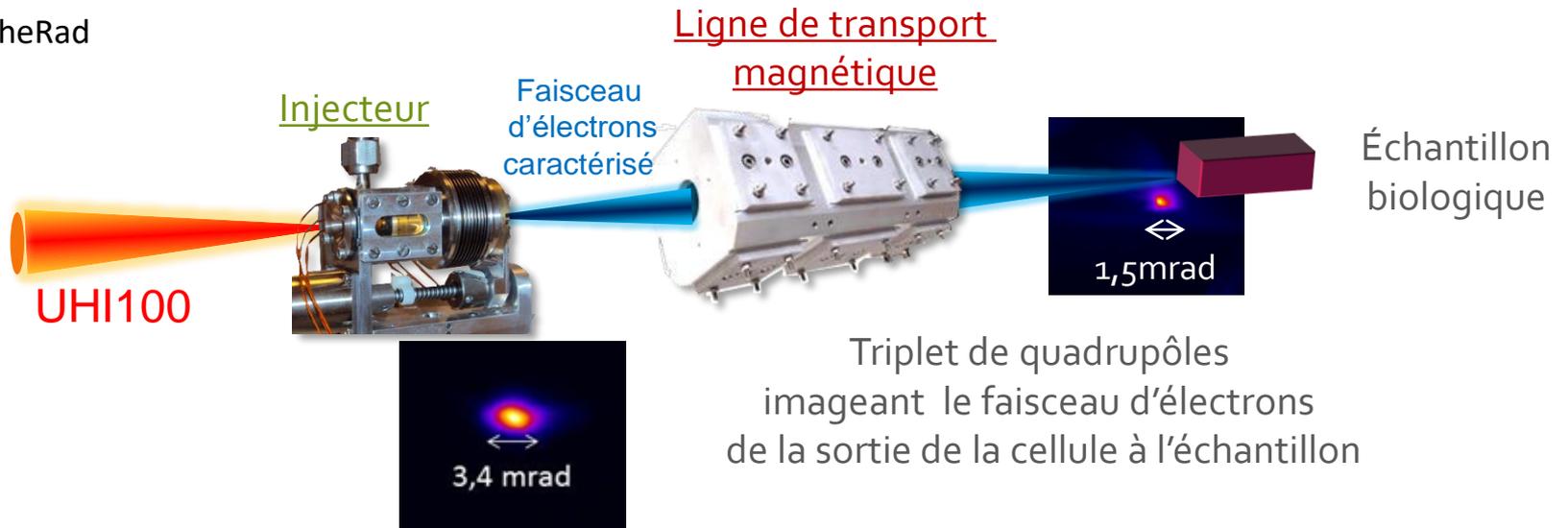
Vincent Favaudon,<sup>1,2\*</sup> Laura Caplier,<sup>3†</sup> Virginie Monceau,<sup>4,5‡</sup> Frédéric Pouzoulet,<sup>1,2§</sup>  
 Mano Sayarath,<sup>1,2¶</sup> Charles Fouillade,<sup>1,2</sup> Marie-France Poupon,<sup>1,2||</sup>  
 Isabel Brito,<sup>6,7</sup> Philippe Hupé,<sup>6,7,8,9</sup> Jean Bourhis,<sup>4,5,10</sup> Janet Hall,<sup>1,2</sup>  
 Jean-Jacques Fontaine,<sup>3</sup> Marie-Catherine Vozenin<sup>4,5,10,11</sup>

→ **Préservation des tissus sains accrue** grâce aux traitements à **Haut débit de dose (40Gy/s)** (traitement conventionnel ~ 0,02 à 0,05Gy/s)

**source d'électrons LPA ⇒ sources brèves (<1Gy/10fs → 10<sup>14</sup>Gy/s!!)**



IRS NanoTheRad



Coll. S. Chevillard/J. Delic (IRCM/SREIT)

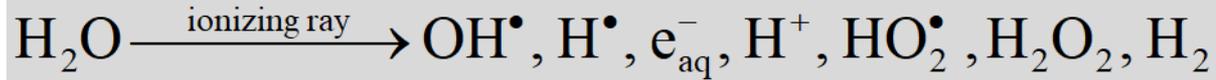


Etude qui nécessite une dosimétrie adaptée

Coll. G. Baldacchino (DICO – LIDYL)

Système de dosimétrie chimique dans de l'eau (milieu biologique)

Eau soumis à des radiations :



	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
G =	2,67	0,55	2,66	2,76	0	0,72	0,45	X 10 <sup>-7</sup> mol/J

Espèces radicalaires telles que **OH<sup>•</sup>** peuvent être orientées pour réagir avec des sondes moléculaires spécifiques telles que l'Amplex Red pour former du Resorufin.

Principes de la dosimétrie :

C étant la concentration des radicaux ou molécule formée (en mol/L)

d étant la dose reçue par la solution (en Gy = J/kg)

ρ étant la densité de la solution (en kg/L, ρ = 1 pour l'eau)

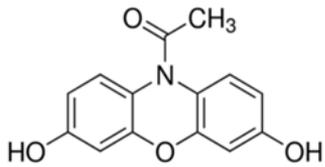
G étant le rendement de production des espèces (en mol/J)

Quand G est connu:  $d = \frac{C}{G}$

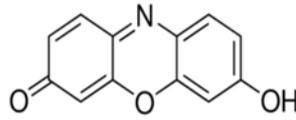
Définition du rendement G :  $\lim_{d \rightarrow 0} \frac{C}{d}$

# Détermination des rendements radiolytiques des espèces issues de l'irradiation de l'eau avec la source LPA

Amplex Red®



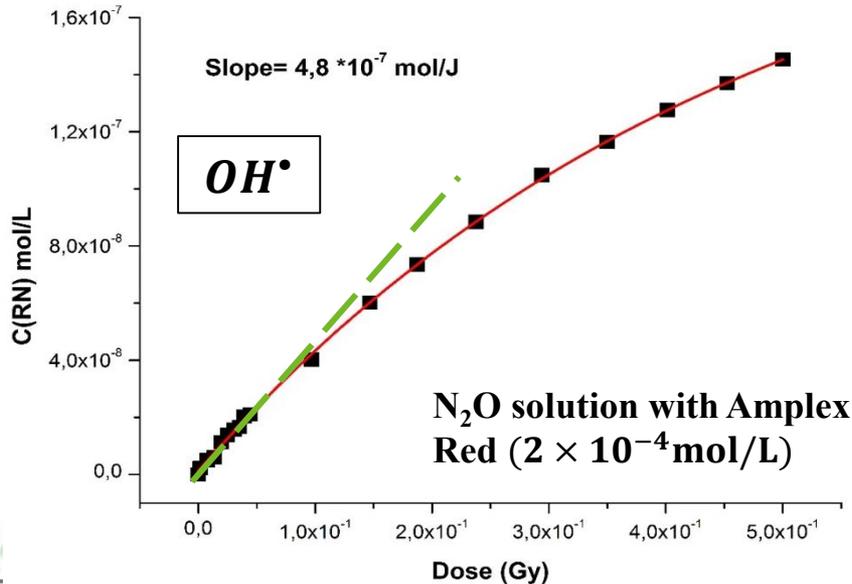
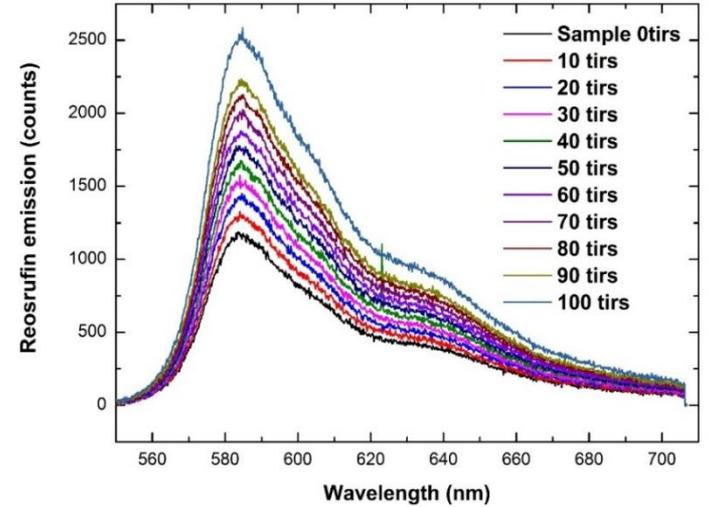
Resorufin



Fluorescence  
@ 580 nm

Excitation @ 532 nm

Poster G. Baldacchino



➤ Sources d'électrons relativistes accélérés par laser

- sources compactes ( $\sim 100\text{GV/m}$ )
- propriétés dépendantes du mode de production

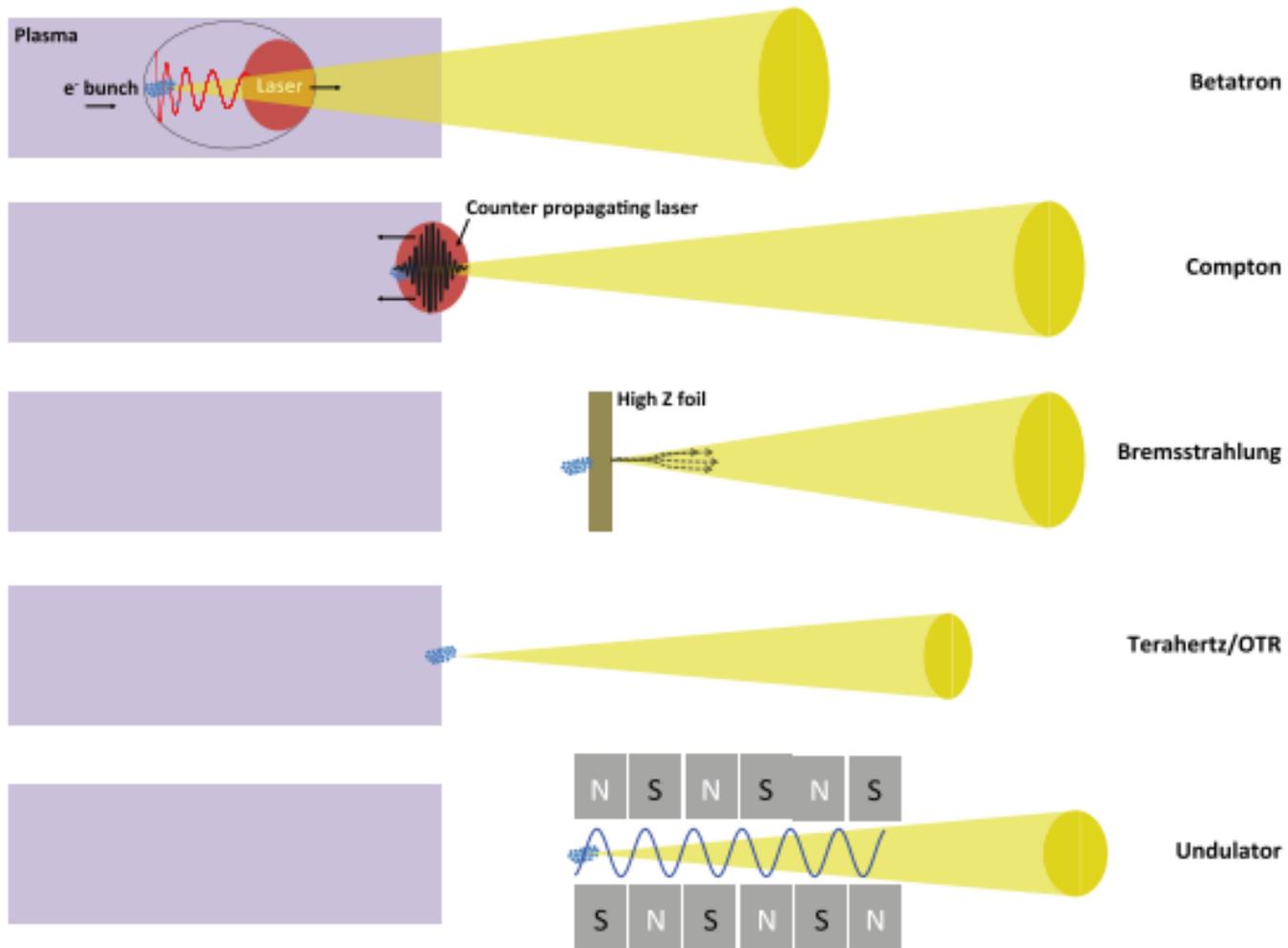
$\tau_{\min}$             accélération VLA (source as)

$\text{div}_{\min}$             sources LPA ( $\sim \text{mrad}$ )

$Q_{\max}$             électrons sur cible solide (nC)

...

      La plus étudiée = source LPA → applications



- Tiberio Ceccotti, F. Quéré, H. Vincenti, P. Forestier-Colleoni, A. Maitrallain, G. Cantono, L. Chopineau, Pascal Monot, Pierre Schumacher



- Gérard Baldacchino, Houda Kacem, Jean Daniel Ahui



- Fabrice Réau, Dephine Guillaumet, Sylvain Foucquart, André Fillon

- J. Delic, S. Chevillard

**Institut de  
biologie  
François Jacob  
IRCM**

- T. Audet, B. Cros, G. Maynard

