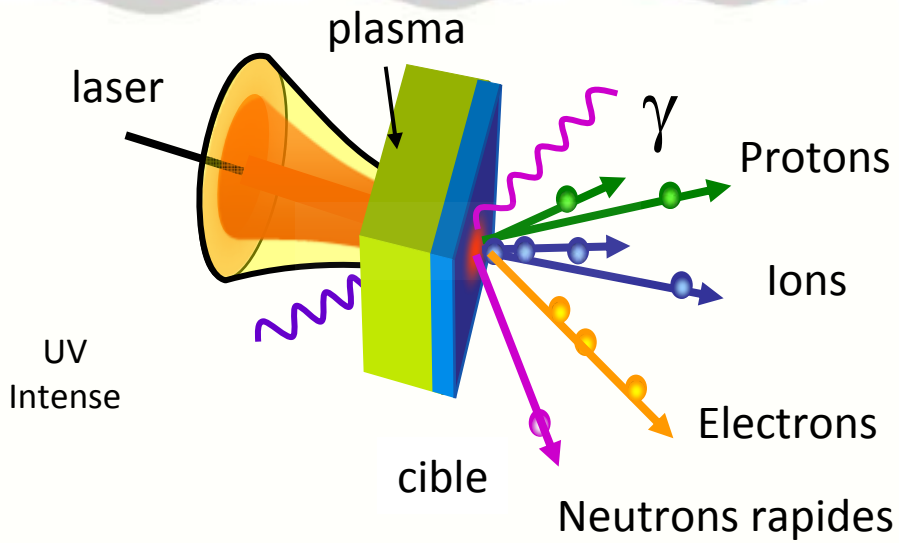
Dosimétrie autour d'un laser de Ultra Haute Intensité

J.M. Fauquant CEA/DSM/UPSE/SPR/SRL

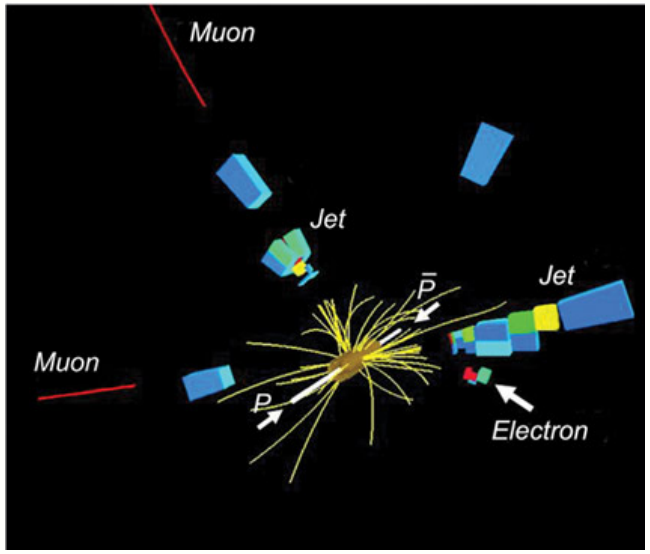
P. Monot CEA/DSM/IRAMIS/SPAM/ Groupe de physique à haute Intensité

Congrès SFRP du 15 et 16 novembre 2011

Interaction laser-matière à ultra-haute intensité



= physique des particules



Etude de l'émission secondaire

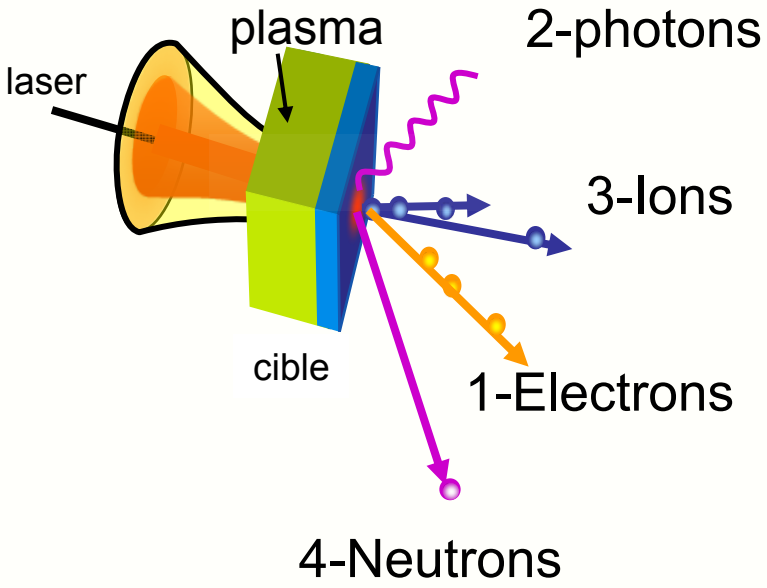
⇓

Exploration des mécanismes primordiaux de l'interaction

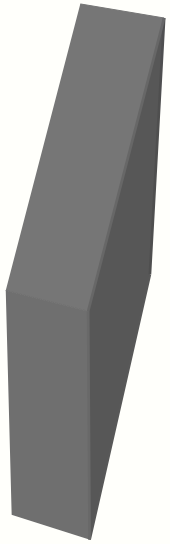
Les faisceaux de particules héritent des propriétés du laser générateur : brièveté, puissance, cohérence, dimension spatiale

⇒ Applications: radiothérapie, radiolyse…

Sources secondaires intenses ⇒ radioprotection



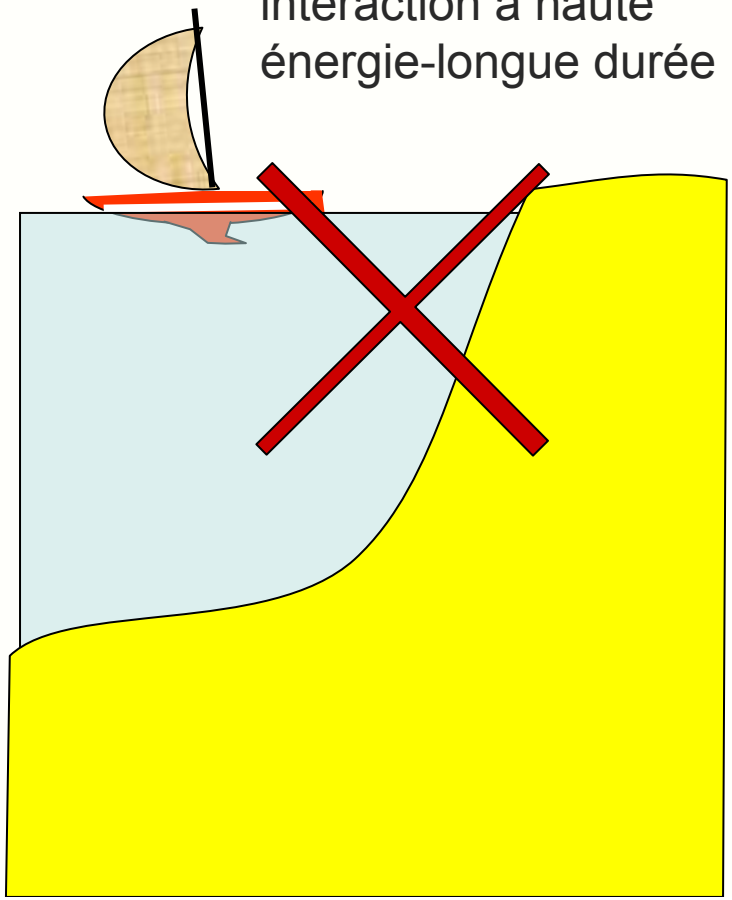
Radioprotection



Vous risqueriez la vie de ce jeune physicien inconnu en train de tester une théorie relativement générale ?

Témoigne de l'efficacité des sources secondaires

interaction à haute énergie-longue durée



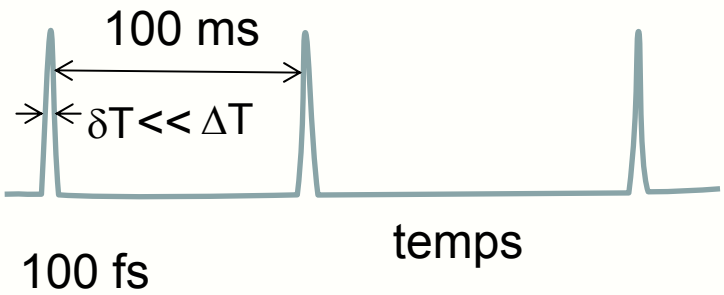
interaction forte puissance – courte durée

L'outil laser

Puissance 100TW , durée t ≤ 25 fs, intensité 10^{20} W/cm^2

(Eclairement à la surface du soleil = 10^4W/cm^2)

> 10 x capacité mondiale de production de puissance électrique



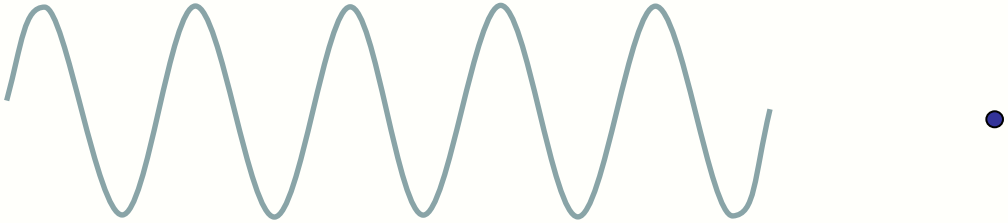
Un laser qui tient dans votre poche !

Un laser qui tient dans votre voiture !

Un laser qui tient dans votre salon !

Caractéristiques de l'interaction UHI

-Mouvement classique d'oscillation d'un électron dans un champ laser



Onde électromagnétique du laser

électron

$$m\frac{d(\vec{V})}{dt} = q\vec{E}$$

E_{osc} (eV)=1.7x10^{-13}x I (W/cm^2)xλ^2(µm)

→ *Relation directe entre éclairement et énergie communiquée aux électrons du milieu*

>10 MeV pour I=10^{20} W/cm^2

Accélération d'électrons

Plasma issu de gaz

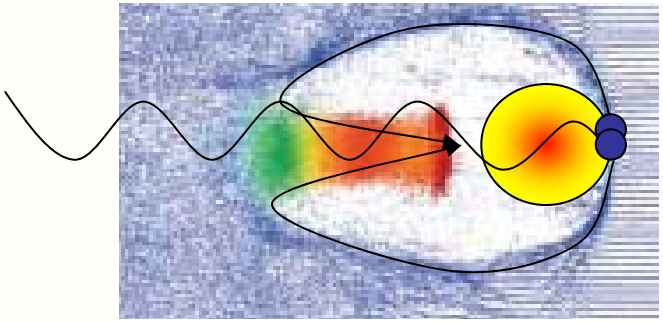
« Sillage laser »

Excitation d'une onde plasma électronique

-combinaison d'effets radiaux et longitudinaux

J. Faure et al., Nature 431, 541 (2004)

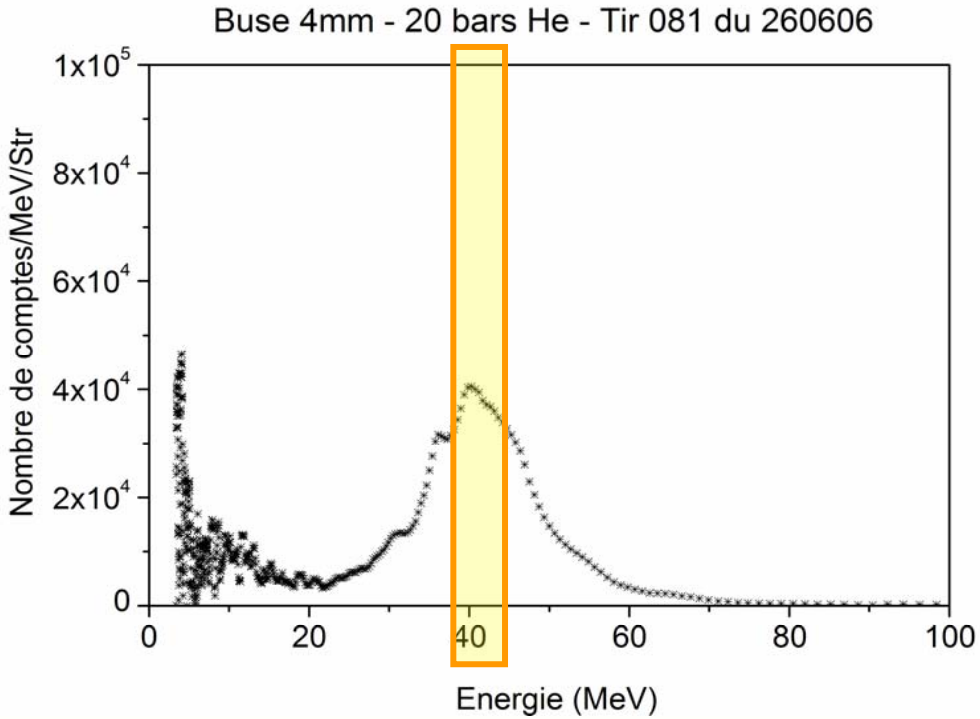
S.P. Mangles et al., Nature 431, 535 (2004)

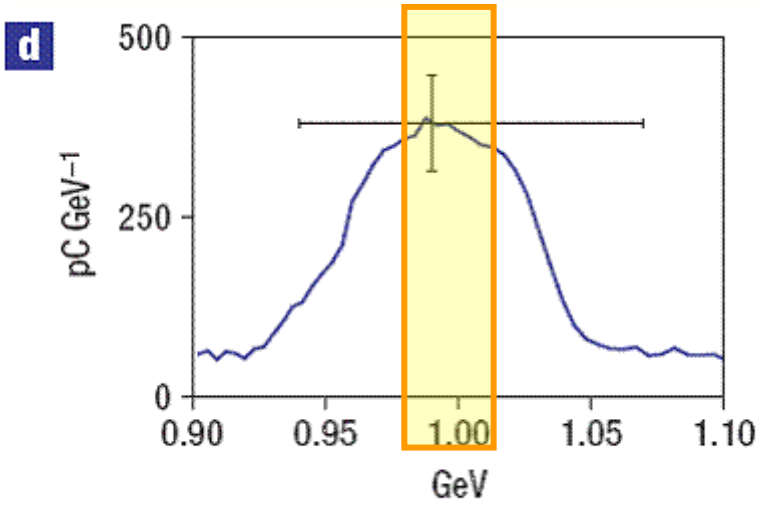


Champ accélérateur :100GV/m:
100 MeV sur 1 mm

(accélérateur conventionnel qq10 MV/m)

Exemples de Spectres électroniques



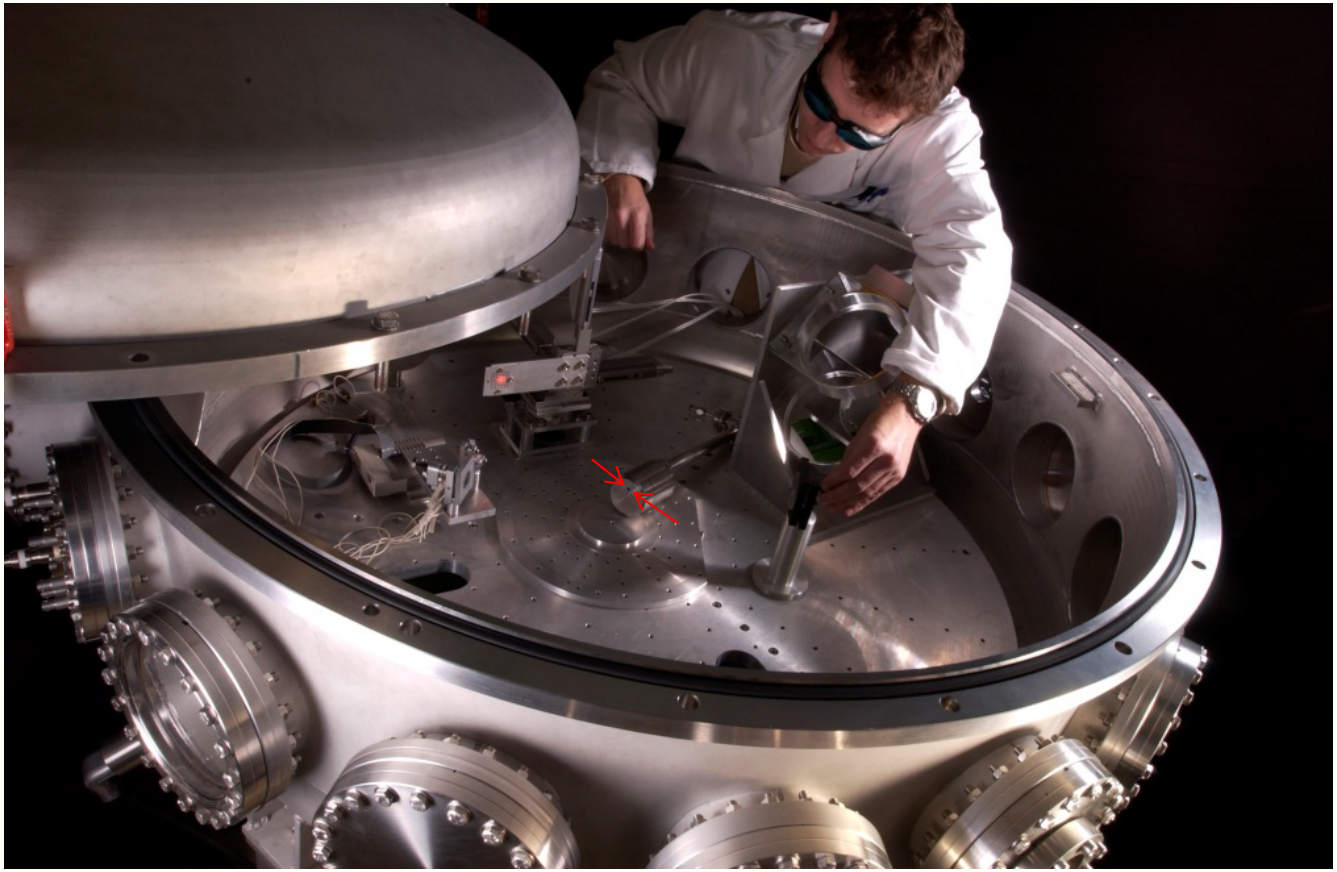


W.P. Leemans et al,
Nature physics 2, 696 (2006)

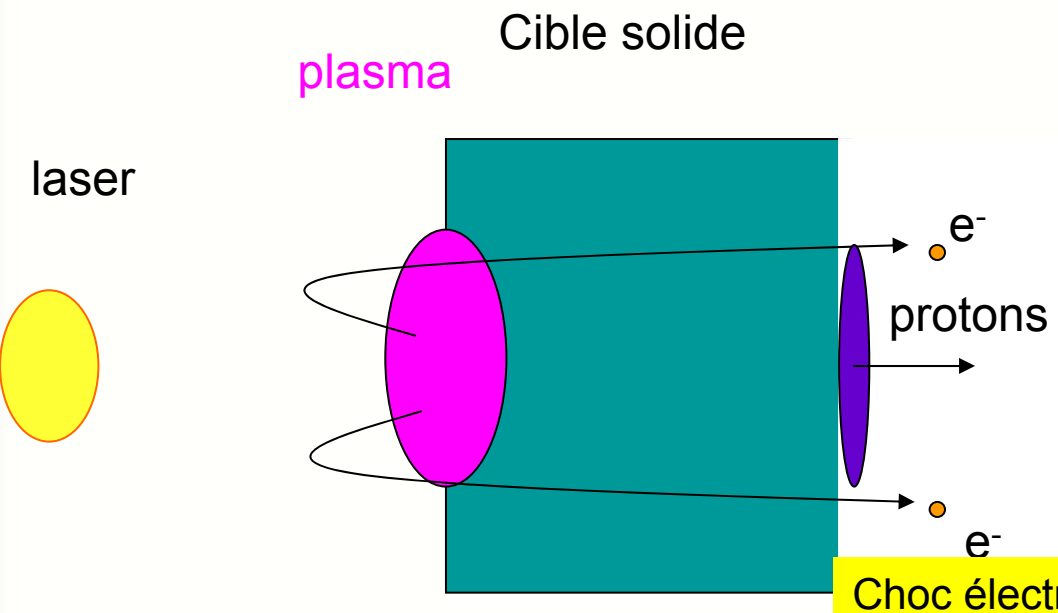
Très grande sensibilité aux paramètres de l'interaction (puissance laser, durée de l'impulsion, densité et composition du gaz …)

Lois d'échelle : W. Lu *et al*., *Phys. Rev. ST AB* 10, 061301 (2007)

Accélération d’électrons

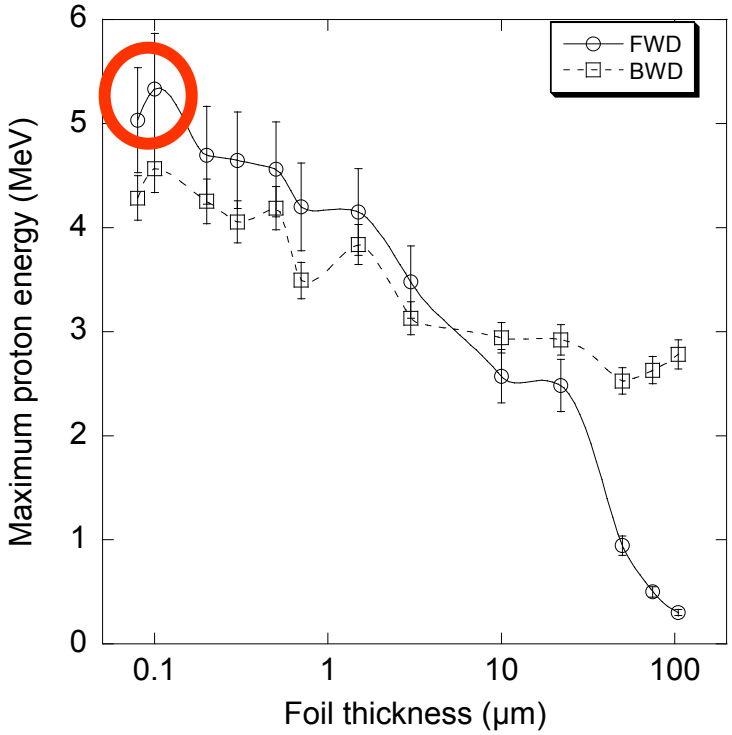


Accélération d'ions



Choc électrostatique à la discontinuité de matière

accélération d'ions



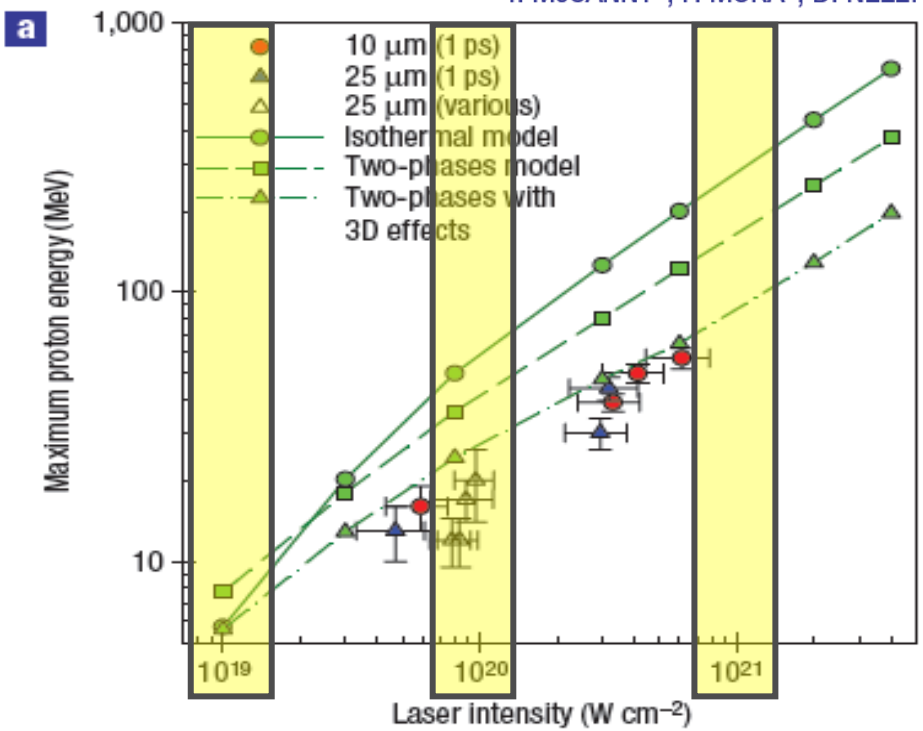
Record aujourd'hui= 120 MeV

Lois d'échelle

Scaling of proton acceleration driven by petawatt-laser–plasma interactions

L. ROBSON[1,2], P. T. SIMPSON[3], R. J. CLARKE[1,4], K. W. D. LEDINGHAM[1,2], F. LINDAU[5], O. LUNDH[5], T. McCANNY[1], P. MORA[6], D. NEELY[4], C.-G. WAHLSTRÖM[5], M. ZEPF[3] AND P. McKENNA[1,4]*

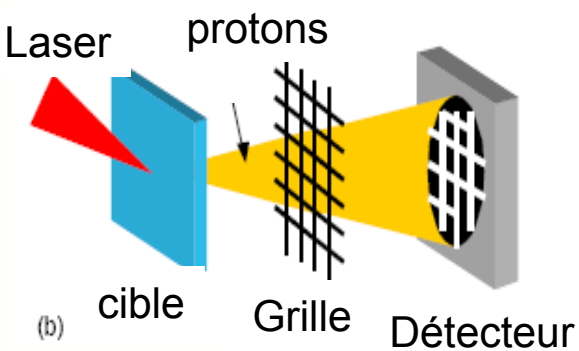
nature physics | VOL 3 | JANUARY 2007 |

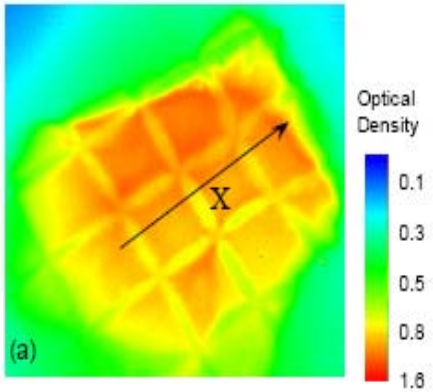


1-10 TW 10-100 TW 100-1000 TW

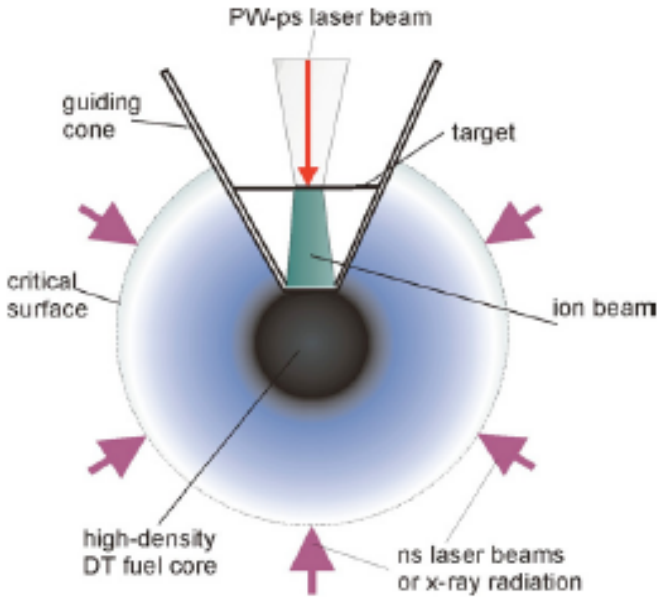
Applications des protons rapides

Radiographie de solides à haute résolution



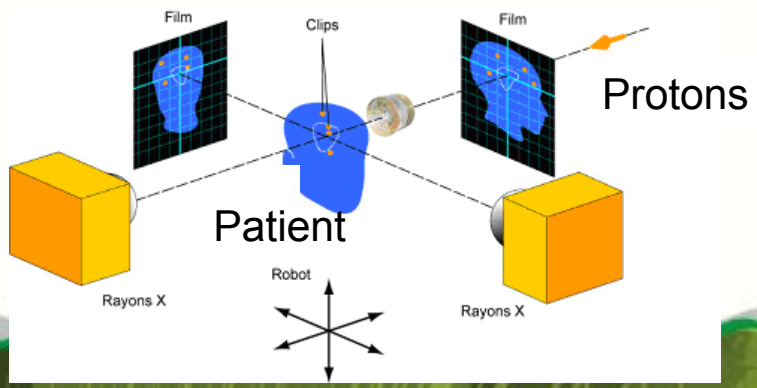


Allumage rapide pour ICF



Applications médicales

-Traitement des tumeurs par prontonthérapie



nature physics

Science

nature

Aspects dosimétriques

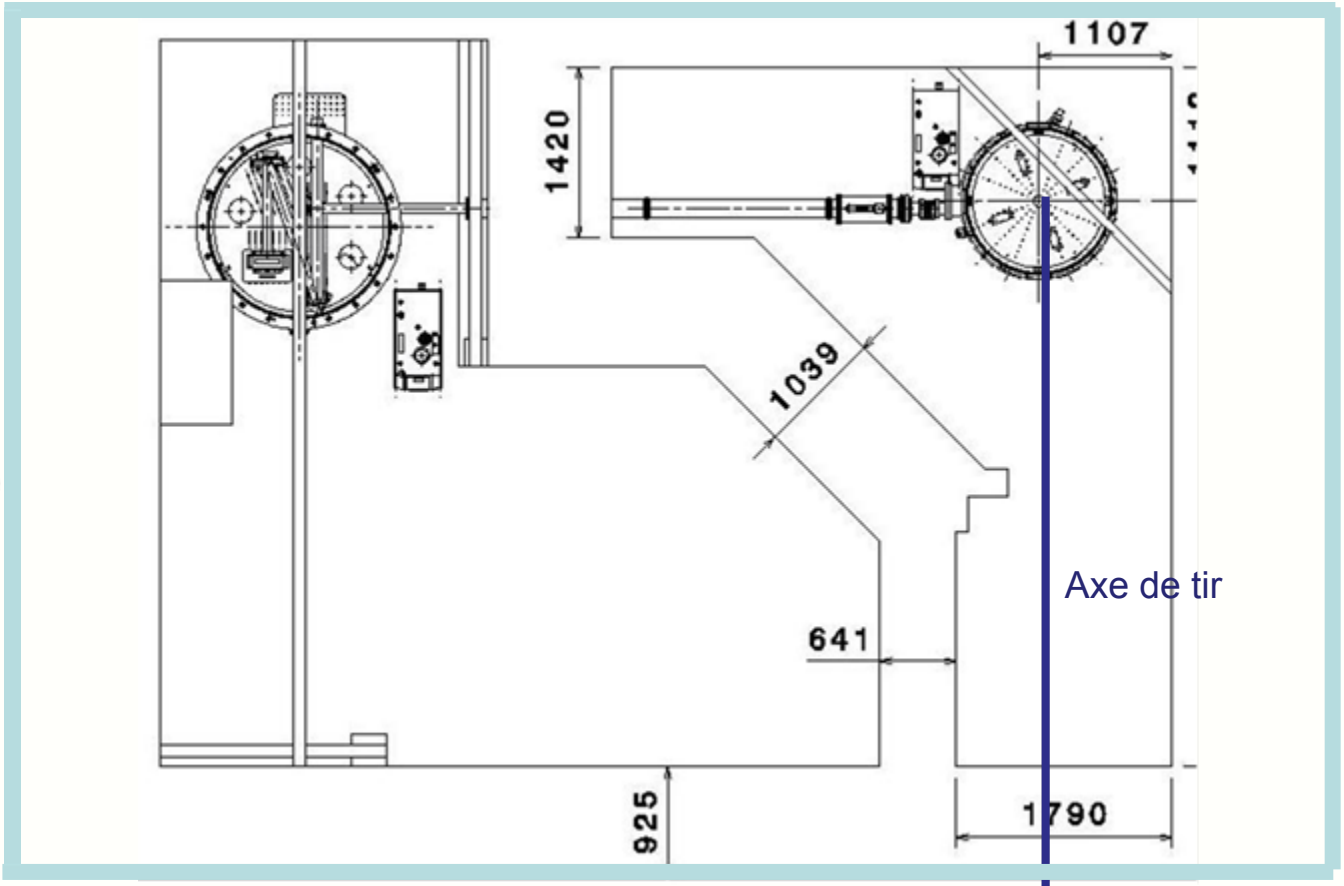
- Nombreux paramètres
  - Energie transmise par le laser /La longueur d'onde du laser
  - L'éclairement (W/cm²)
  - La durée du tir (qq 10 fs)
  - Fréquence des tirs (Hz)
  - Les cibles primaires (production e- ou H+)
  - Les cibles secondaires (Z,ép) /tertiaire
  - …

→ UHI 10

UHI 10 : L'installation

Terre

Zone inaccessible



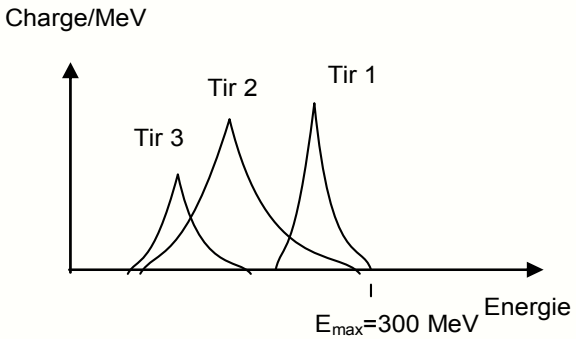
Zone inaccessible

Couloir

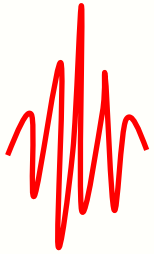
Les termes sources

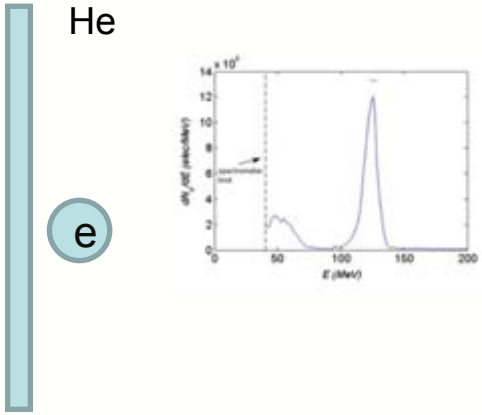
Conditions d'expérience

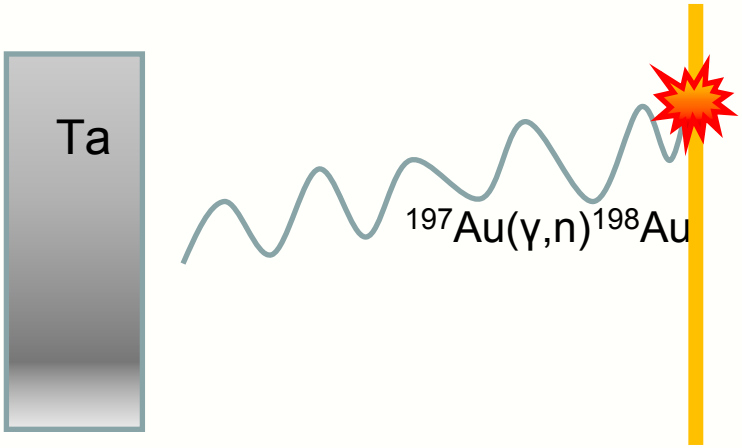
- 400 tirs
- Durée de l'impulsion : 60 fs
- Intensité : 10^{19} W/cm²
- Longueur d'onde : 800 nm



Au



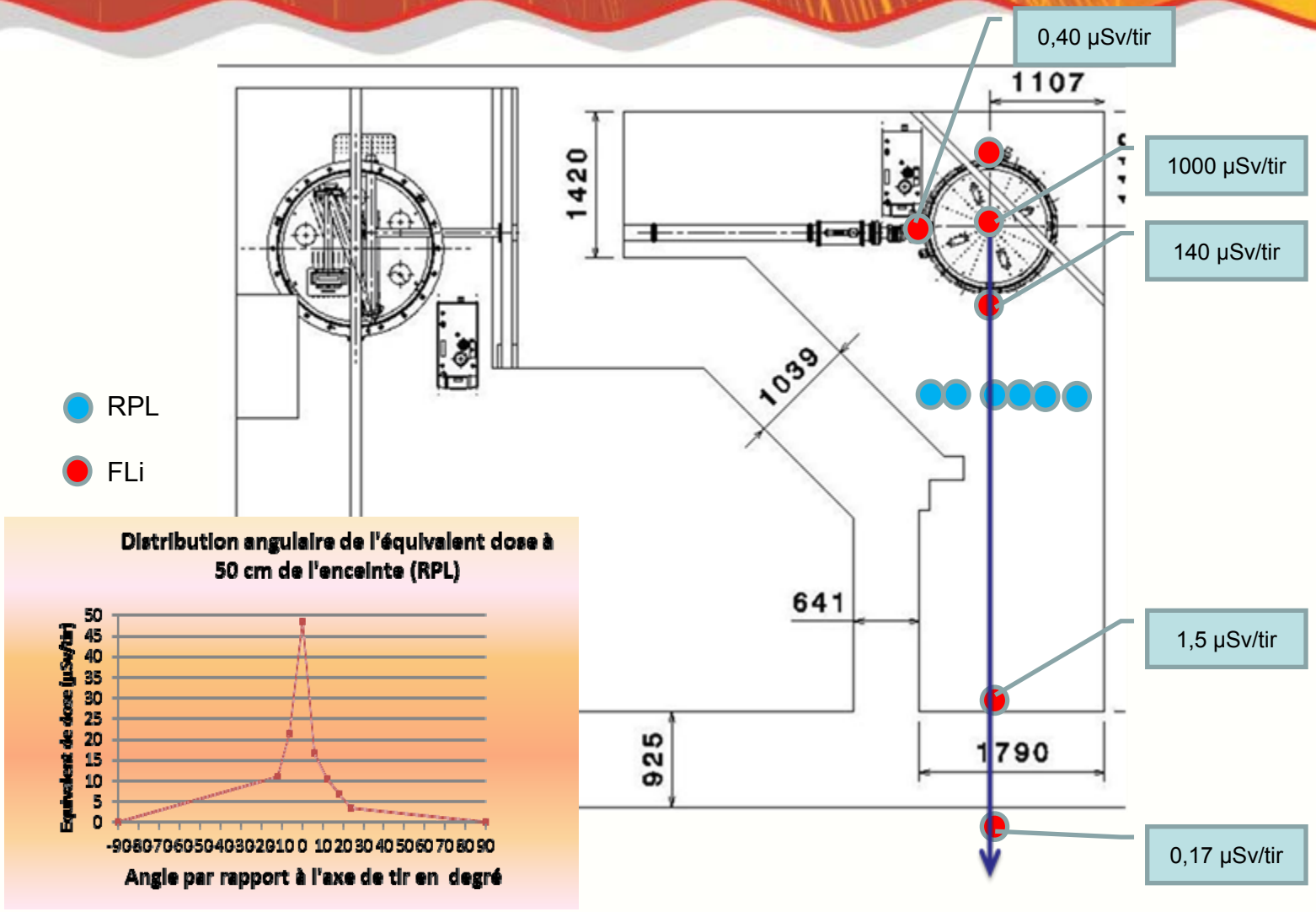




3 10^{10} e- /tirs E [30;100] MeV

3 10^{8} X/tirs E [8;17] MeV

Résultats dosimétriques



Interprétation des résultats

- A l'extérieur de la casemate
  - 0,17 µSv est une dose intégrée à chaque tir
    - Si tir non pulsé : 80 µSv atteint pour 470 tirs
    - Si tir pulsé à 10 Hz : 80 µSv atteint en 47 s (6 mSv/h)
      - Zone contrôlée orange
      - Atténuation nécessaire d'un facteur 1000
  - 0,17 µSv est la dose intégrée sur 60 fs
    - Débit équivalent dose instantané ≈ 10^{10} Sv/h
      - zone interdite rouge

- A l'intérieur de la casemate
  - si pulsé à 10 Hz : DED entre 54 mSv/h et 36 Sv/h
  - Activation (SG)
  - Flux de particules très directif (60°)

Dimensionnement(1)

Le débit de dose instantané

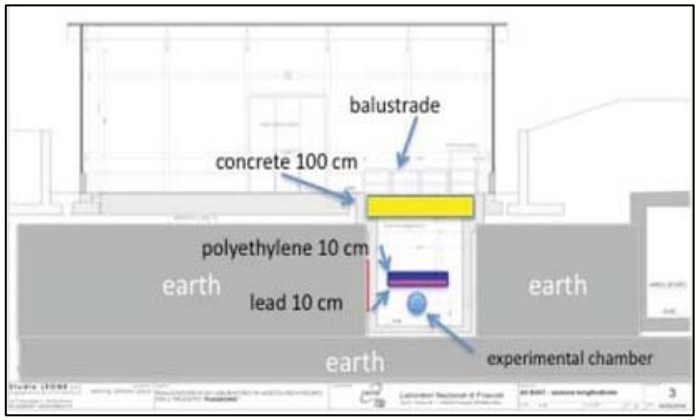
- Peu pris en compte à la conception
- Ecran très épais (ex : 10 m de béton)
- Cout prohibitif – limite a l'implantation

– Doit on en tenir compte ?

- Respect de la réglementation
- Effets des rayonnements

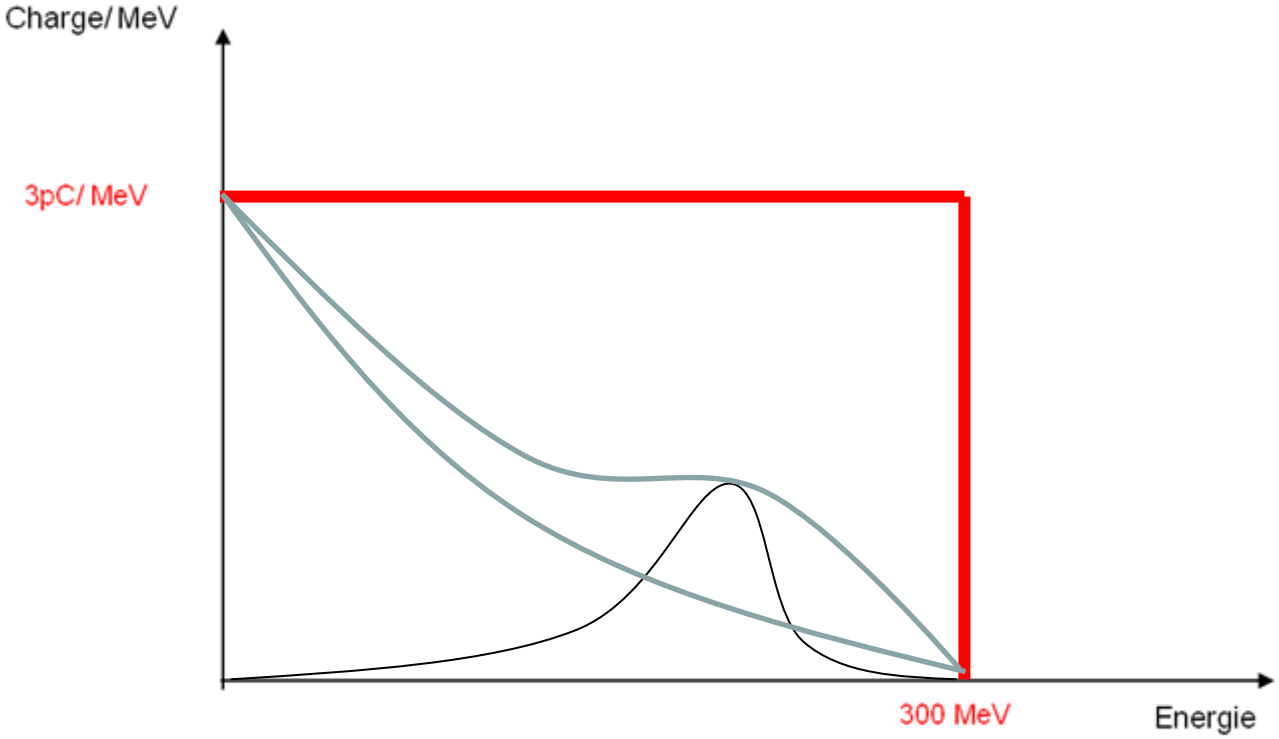
–Des solutions

- Enterrer les salles d'expérience
- Diriger le faisceau vers la terre



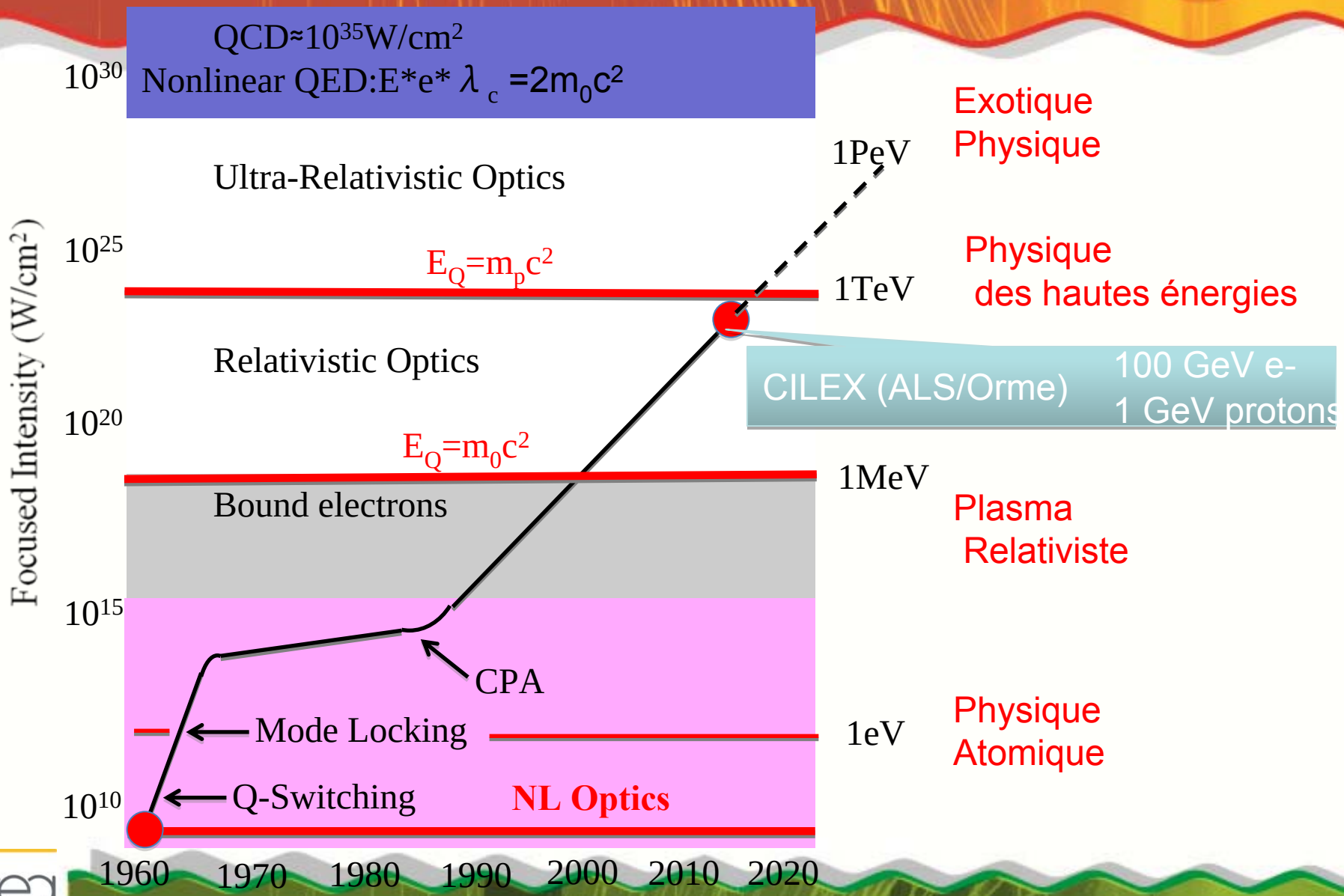
Installation FLAME – Esposito et Al

Dimensionnement(2)

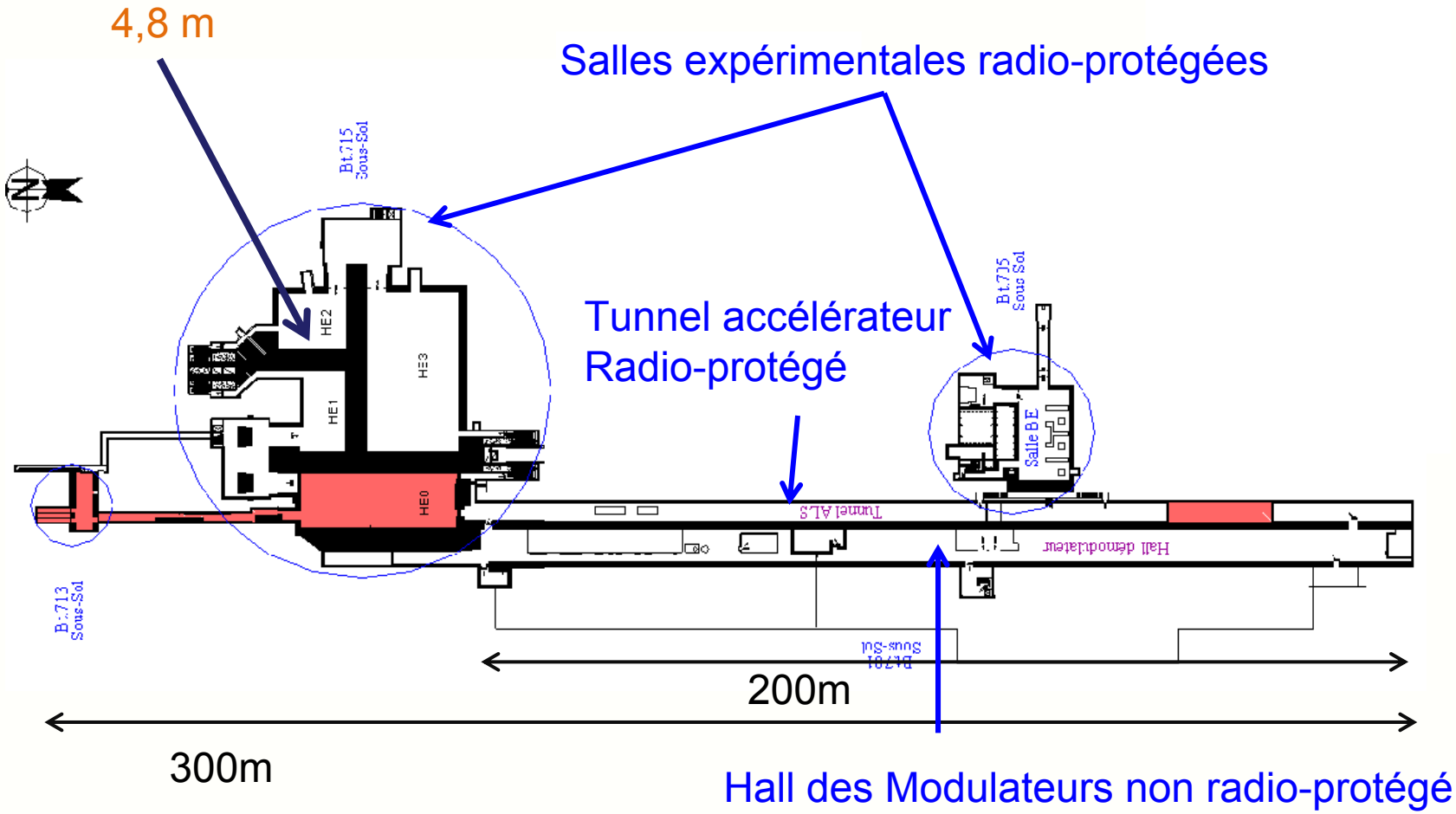


Démarche d'optimisation

Perspectives

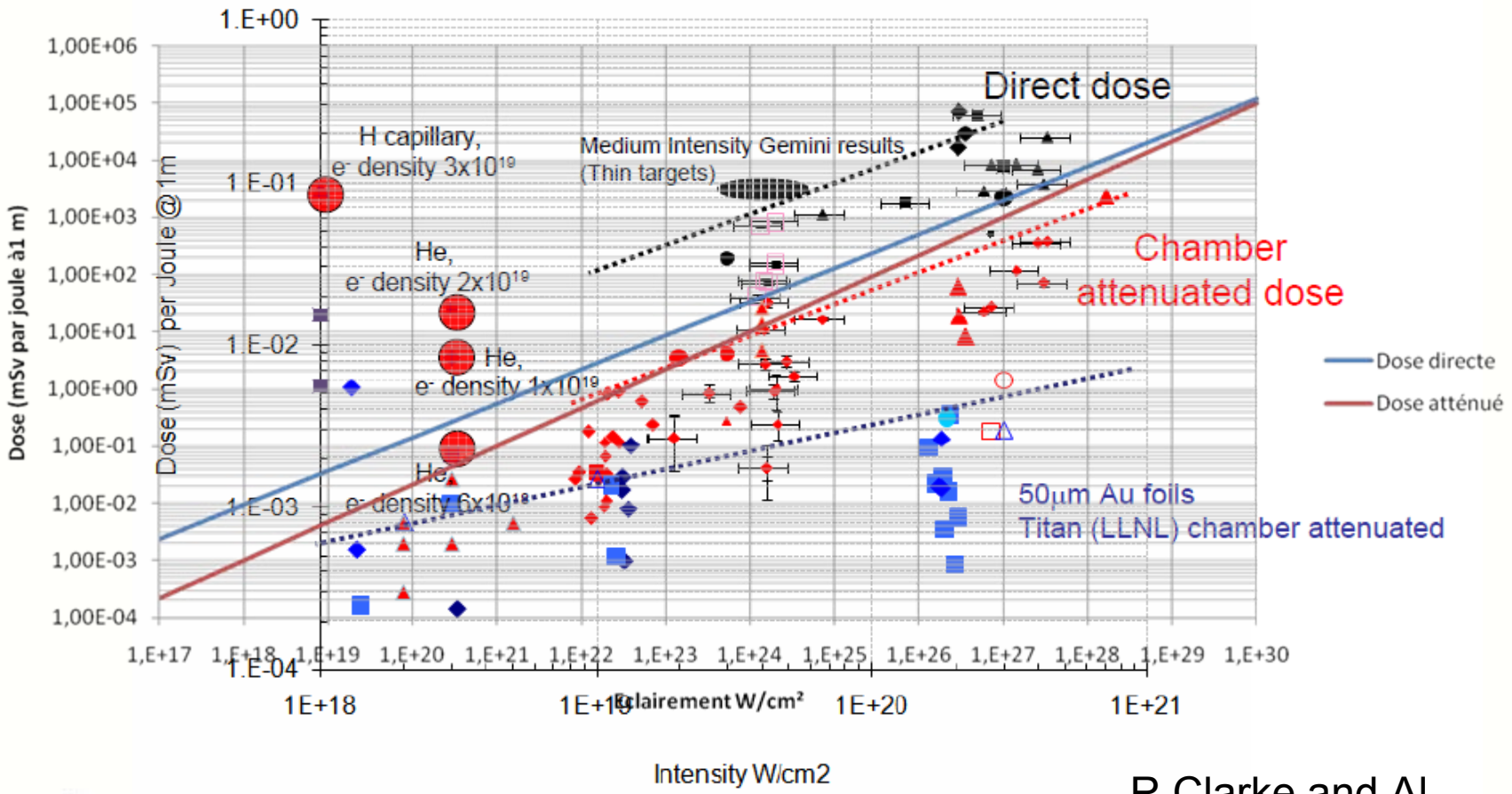


Une installation vaste, stable et dotée d'une radioprotection lourde sur le site de l'orme des Merisier sur le Campus Paris-Saclay



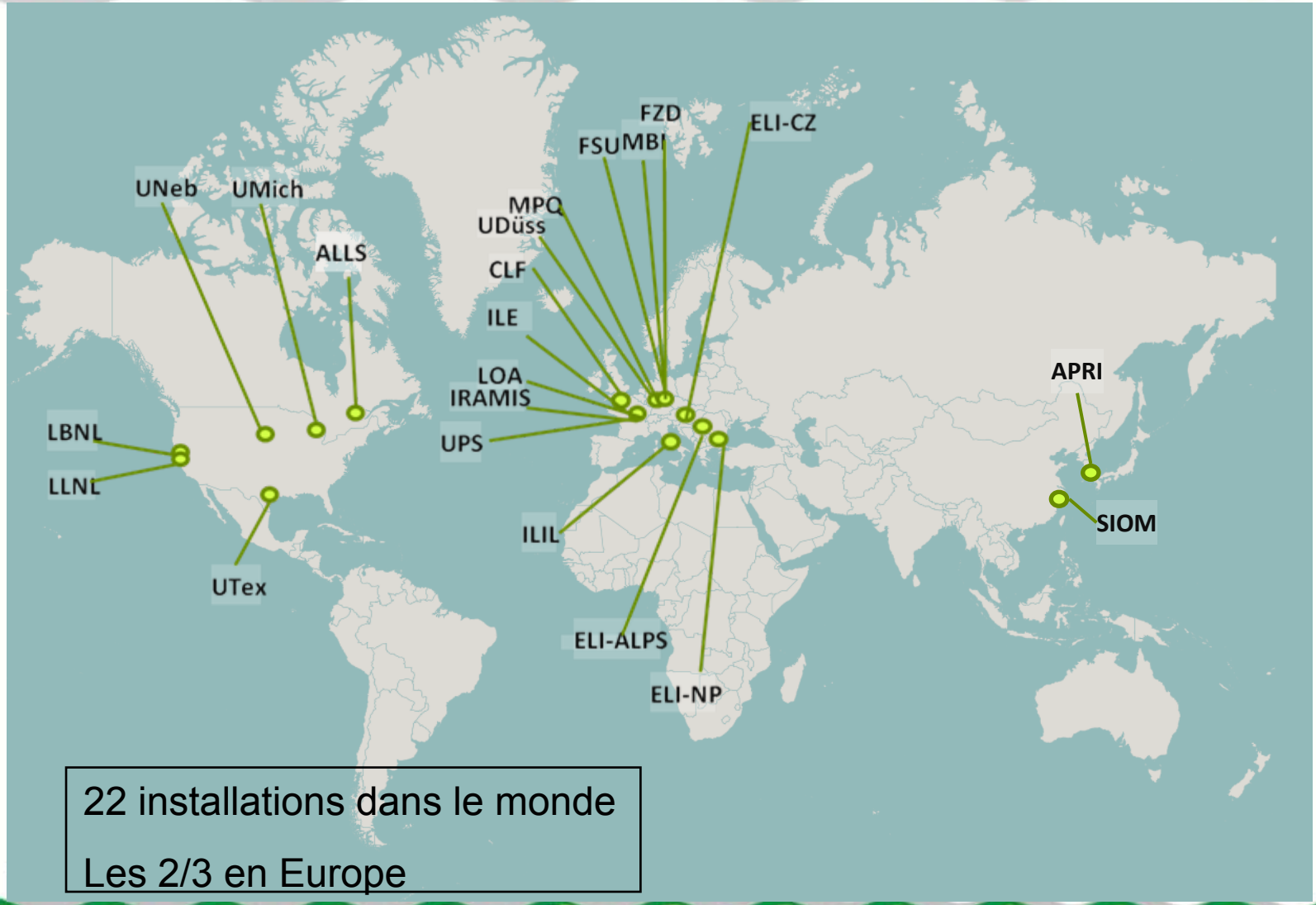
Synthèse des niveaux d'exposition autour des chambres d'expérience

CILEX : Eclairement de 10^{24} W/cm² soit 4,5 Sv/tir



R,Clarke and Al

Lasers UHI dans le monde (Puissance >100 TW)



22 installations dans le monde

Les 2/3 en Europe

FIN

Exploitation

- Contrôle technique d'ambiance
  - Contrôle continue
    - Non pulsé : non possible actuellement
    - Pulsé : Chambre ionisation à haut flux
  - Contrôle différée
    - Réponse en énergie
    - Réponse angulaire
- Surveillance individuelle : classique

Est-ce si simple d'atteindre 10^{19} W/cm^2?

Milieu amplificateur : seuil de dommage~ GW/cm^2

Refroidir le milieux en volume entre deux tirs, faire croître les cristaux $\Rightarrow \Phi$~cm

Focalisation: cm$\rightarrow$10 µm

1GW/cm^{2}x10^6$\Rightarrow$10^{15} W/cm^2

Pompage (flashes, laser…)

Limite « naturelle »

Comment amplifier une impulsion sans détruire les milieux amplificateurs ?
Comment délivrer un éclairement élevé sur une cible, en maintenant un éclairement faible dans les milieux amplificateurs ?

Principe de l'amplification d'impulsions à dérive de fréquence

Impulsion brève
de faible énergie 30 fs nJ

Etirement temporel ($x10^4$) 300 ps, nJ

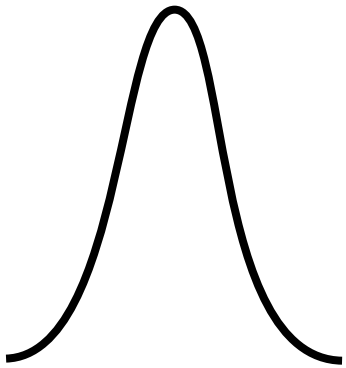
Amplification ($X10^9$) 100 ps 3 J

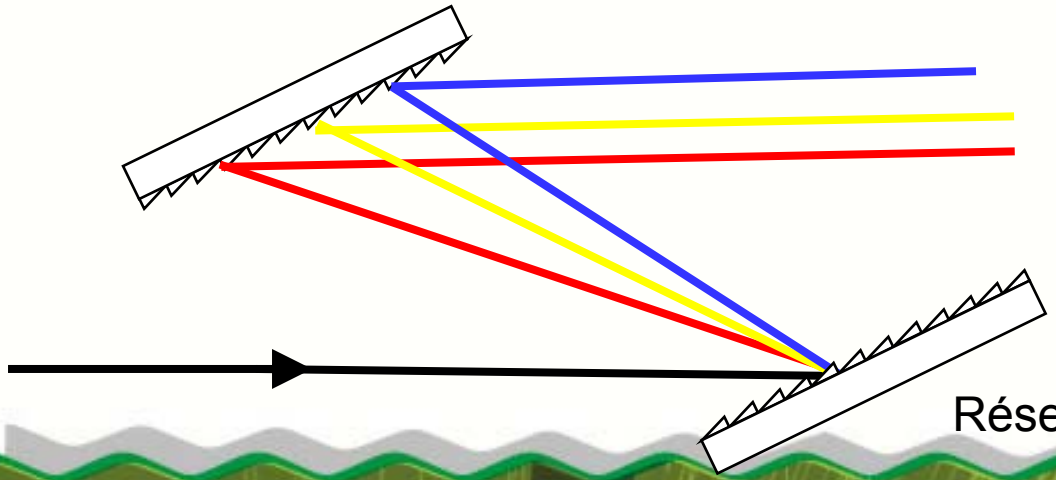
Compression temporelle($/10^4$) 25 fs, 2,5J

Compression spatiale ($/10^6$) 25 fs, 2,5 J, ϕ=10 µm, I=10^{19} W/cm^2

Comment étirer une impulsion laser ?:

⇒ On impose une différence de marche entre les composantes spectrales



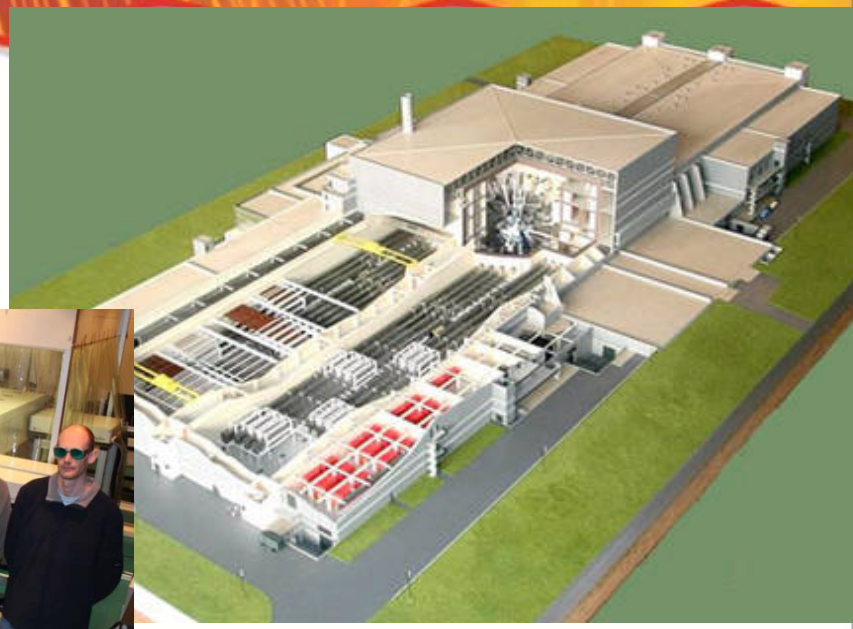


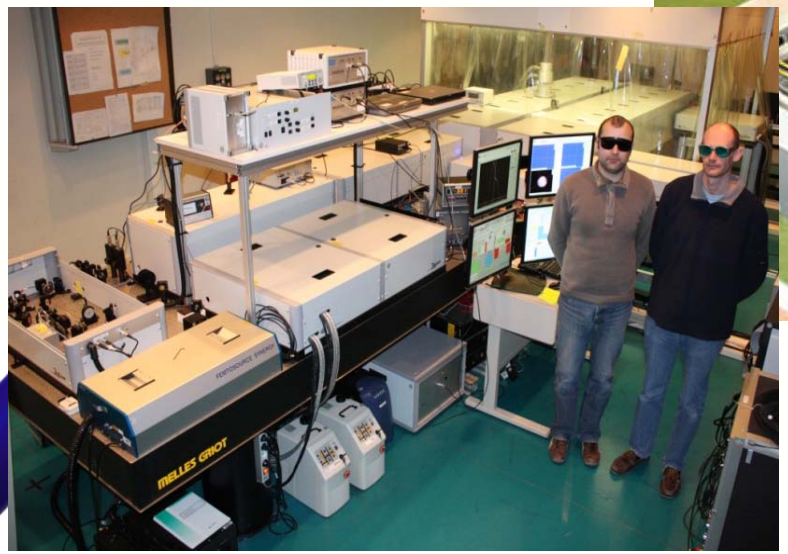
$x10^3 \rightarrow x10^6$

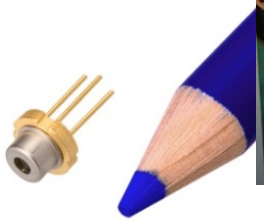
Réseaux de diffraction

Typical laser sizes

LMJ / NIF
A lot of Energy / Long pulses
Plasma Physics/ Ignition







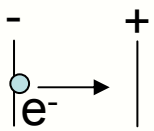
UHI T3 lasers : small Energy / ultra-short pulses

Laser diode
(telecom)

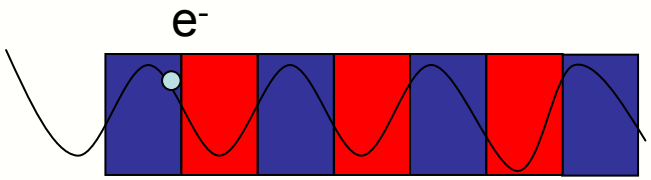
Suitable for particle generation !

Accélération d'Electrons

Principe de l'accélération d'électrons:
Jusqu'à qq MeV: champ électrostatique



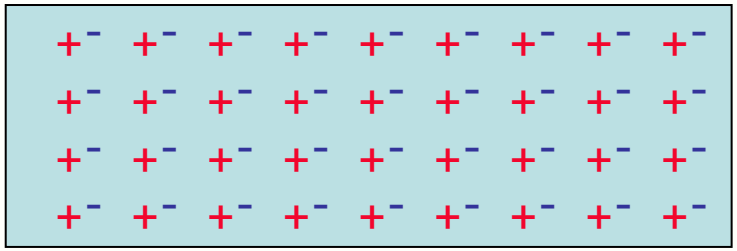
Au-delà: champ électrique alternatif
haute fréquence



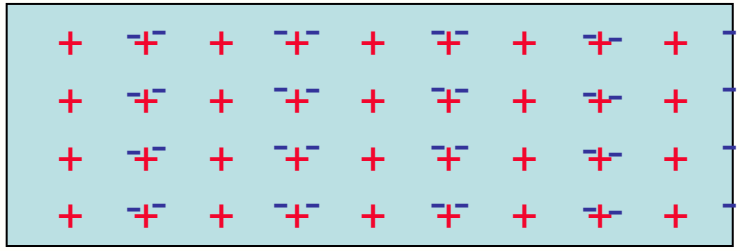
Alternative: champ électrique progressif $V\phi=V_e$

Accélération d'électrons : Principe de l'accélération dans une onde plasma

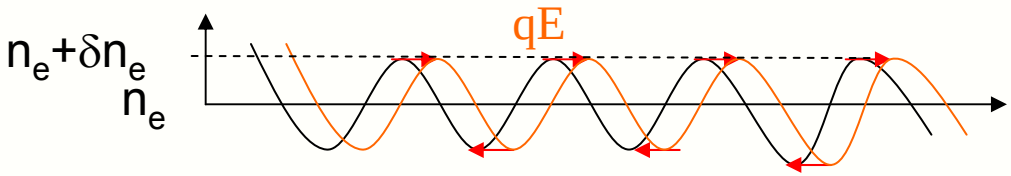
plasma



On module la densité électronique (facile car durée brève :Les ions sont immobiles)



Densité électronique



$E_{max}(GV/m)=0.3x(\delta n_e/n_e)(\%)x(n_e)^{1/2}$ *(10^{17} cm^{-3})**

- Création d'un champ électrostatique intense

δn_e=50%, n_e=5x10^{18} cm^{-3} $\Rightarrow$ 100GV/m: 100 MeV sur 1 mm,

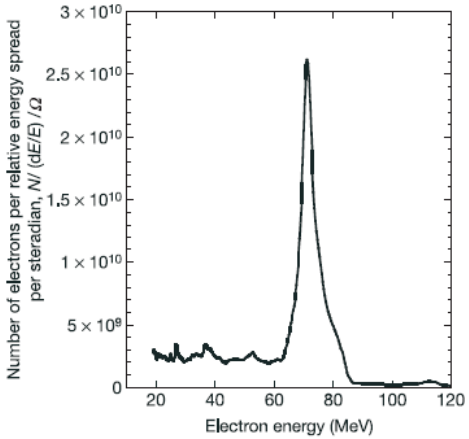
Champ ultra-intense car milieu « claqué »

(accélérateur conventionnel qq10 MV/m)

*Fabien Dorchies thèse de doctorat de l'école polytechnique-1998

Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser–plasma interactions

S. P. D. Mangles[1], C. D. Murphy[1,2], Z. Najmudin[1], A. G. R. Thomas[1], J. L. Collier[2], A. E. Dangor[1], E. J. Divall[2], P. S. Foster[2], J. G. Gallacher[3], C. J. Hooker[2], D. A. Jaroszynski[3], A. J. Langley[2], W. B. Mori[4], P. A. Norreys[2], F. S. Tsung[4], R. Viskup[3], B. R. Walton[1] & K. Krushelnick[1]



NATURE | VOL 431 | 30 SEPTEMBER 2004

Figure 3 Measured electron spectrum at a density of $2 \times 10^{19}\,cm^{-3}$. Laser parameters: $E = 500\,mJ$, $\tau = 40\,fs$, $I \approx 2.5 \times 10^{18}\,W\,cm^{-2}$. The energy spread is ±3%. The energy of this monoenergetic beam fluctuated by ~30%, owing to variations in the laser parameters.

High-quality electron beams from a laser wakefield accelerator using plasma-channel guiding

C. G. R. Geddes[1,2], Cs. Toth[1], J. van Tilborg[1,3], E. Esarey[1], C. B. Schroeder[1], D. Bruhwiler[4], C. Nieter[4], J. Cary[4,5] & W. P. Leemans[1]

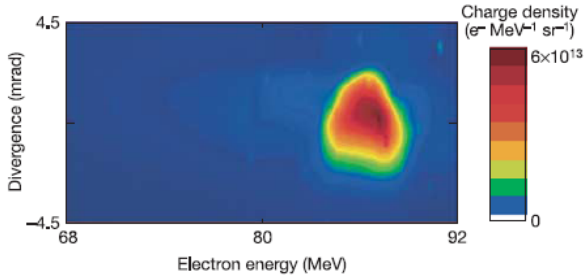


Figure 3 Single-shot electron beam spectrum and divergence of the channel-guided accelerator, showing a bunch containing 2×10^9 electrons in a narrow distribution at 86 ± 1.8 MeV and 3 mrad divergence FWHM with contrast >10:1 above background. This distribution is qualitatively different from the exponential distribution obtained in past (unchannelled) laser acceleration experiments. The magnetic spectrometer consists of a slit 82 cm from the gas jet, a bend of 55° in a dipole magnet to provide dispersion, and a phosphor screen (LANEX Fast backed by an aluminium foil to reject laser light) imaged by a CCD camera. Single-shot energy range is ±15% about a central value selectable from 1 to 80 MeV, and resolution is $dE/E = \pm 2\%$. The vertical beam size is obtained in the undispersed direction, allowing the simultaneous determination of (vertical) divergence and energy. Since electron beams observed on the phosphor before the magnet were typically round in shape, this vertical divergence measurement is representative.

NATURE | VOL 431 | 30 SEPTEMBER 2004 |

A laser–plasma accelerator producing monoenergetic electron beams

NATURE | VOL 431 | 30 SEPTEMBER 2004

J. Faure[1], Y. Glinec[1], A. Pukhov[2], S. Kiselev[2], S. Gordienko[2], E. Lefebvre[3], J.-P. Rousseau[1], F. Burgy[1] & V. Malka[1]

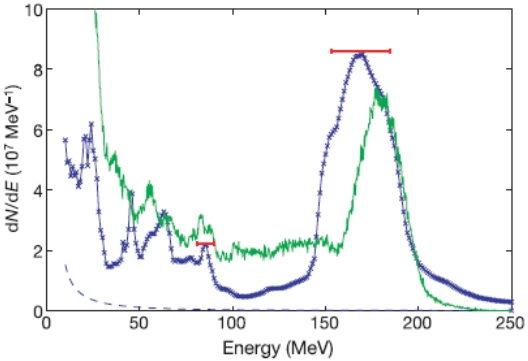


Figure 3 Experimental and simulated electron spectra. Blue line with crosses, electron spectrum corresponding to Fig. 2b, after deconvolution. Dashed line, estimation of the background level. Red horizontal error bars, resolution of the spectrometer. Green line, electron spectrum obtained from 3D PIC simulations. dN/dE is the number of electrons per MeV (E is the electron energy in MeV).

Origine de l'efficacité du transfert d'énergie en régime relativiste

$$\frac{d(\gamma m\vec{V})}{dt} = q\vec{E} + q\vec{V}\times\vec{\mathbf{B}}$$

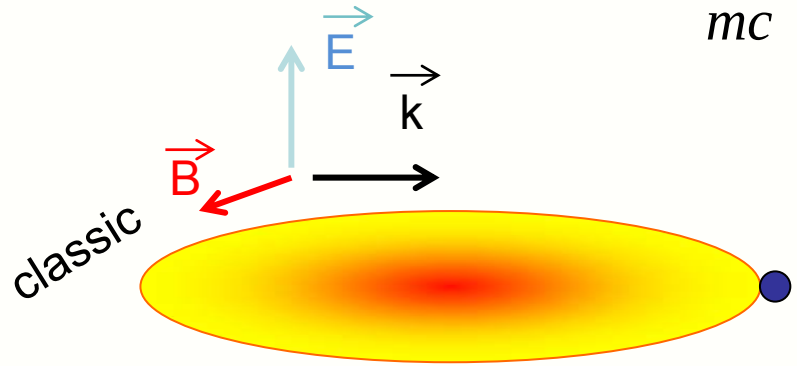
A= vector potential

k= laser wave vector

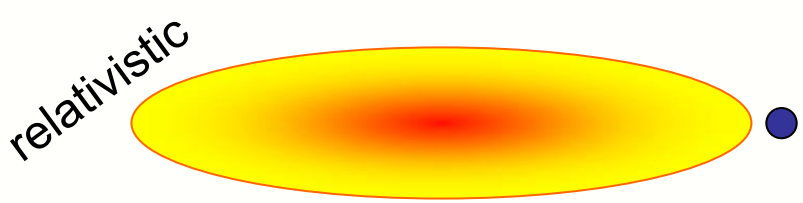
Solution for plane waves

$$\frac{\gamma m\vec{V}}{mc} = -\frac{q\vec{A}}{mc} + \frac{\vec{k}}{k}\frac{q^2A^2}{2m^2c^2}$$

Longitudinal drift



Transverse motion: electrons escape from the laser



Much more energy transfert when F//p

ARRETE ZONAGE

Art. 7. − A l'intérieur de la zone contrôlée, le chef d'établissement délimite, s'il y a lieu, les zones
spécialement réglementées ou interdites suivantes :

a)Les zones spécialement réglementées, désignées zones contrôlées jaunes, où la dose efficace susceptible d'être reçue en une heure reste inférieure à **2 mSv** et où la dose équivalente (mains, avant-bras, pieds, chevilles) susceptible d'être reçue en une heure reste inférieure à **50 mSv**. Pour l'exposition externe du corps entier, le **débit d'équivalent de dose ne doit pas dépasser 2 mSv/h ;**

b) Les zones spécialement réglementées, désignées zones contrôlées orange, où la dose efficace susceptible d'être reçue en une heure reste inférieure à **100 mSv** et où la dose équivalente (mains, avant-bras, pieds, chevilles) susceptible d'être reçue en une heure reste inférieure à **2,5 Sv**. Pour l'exposition externe du corps entier, **le débit d'équivalent de dose ne doit pas dépasser 100 mSv/h** ;

c) Les zones interdites, désignées zones rouges, où les doses efficaces ou équivalentes susceptibles d'être reçues en une heure ou le débit d'équivalent de dose sont égaux ou supérieurs à l'une des valeurs maximales définies pour les zones orange.