

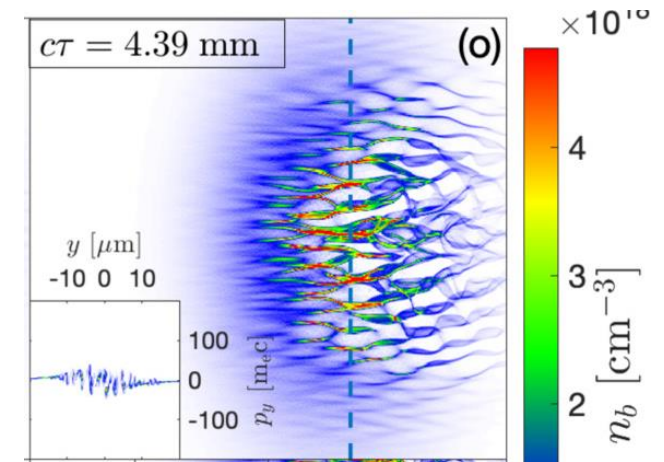
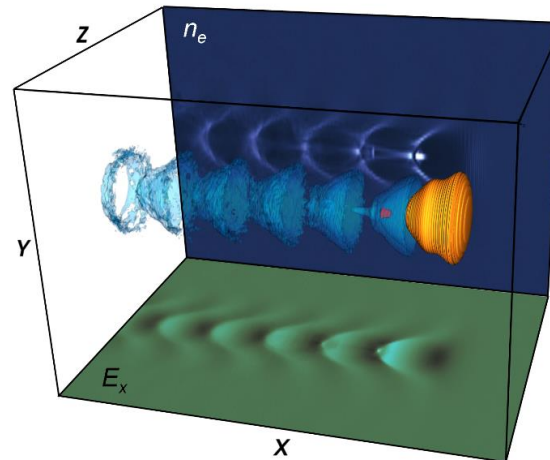
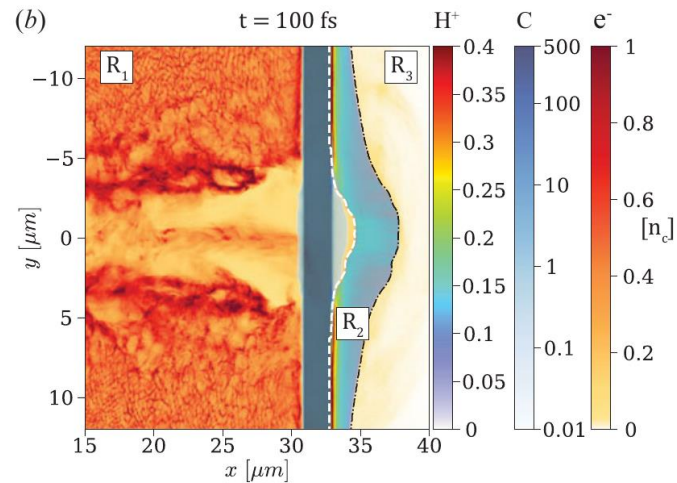
Simulation plasma avec le code PIC CALDER : de la production à l'utilisation de faisceaux accélérés



X. Davoine

CEA, DAM, DIF, 91297 Arpajon, France

Université Paris-Saclay, CEA, LMCE, 91680 Bruyères-le-Châtel, France



We acknowledge the "Grand Equipement de Calcul Intensif" GENCI-TGCC for granting us access to the supercomputer IRENE under the project No. A0110512993

Demande : un exposé sur la **modélisation de l'accélération laser plasma** relatant l'état de l'art et les perspectives des outils numériques, la **complémentarité simulation expériences**, et la **complémentarité entre accélération laser plasma et accélération conventionnelle**.

Plan

1. Quelques considérations sur l'accélération plasma

Complémentarité entre accélérateur conventionnel et plasma
Exemples d'utilisation d'accélérateurs plasma

2. Accélération d'électrons pour sonder des champs sur des échelles fs et micrométriques

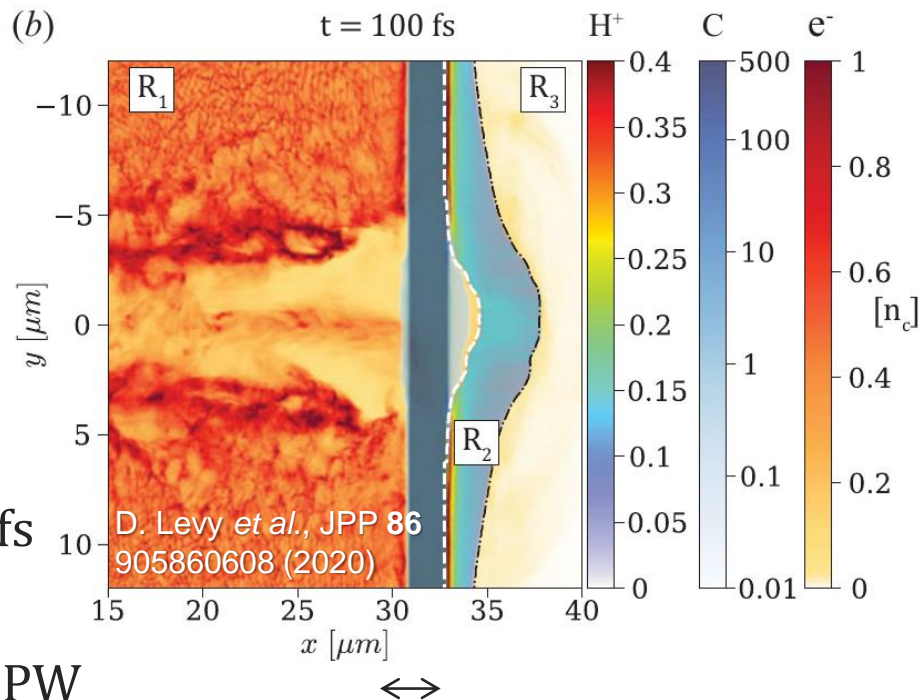
3. Accélération de protons et source de neutrons

4. Applications : simulation PIC d'interactions faisceau-plasma

Instabilités faisceau-plasma, source γ , QED en champ fort, XFEL...

Accélérateurs plasma

- Accélération d'ions sur cible solide :
 - TNSA (*Target Normal Sheath Acceleration*)
 - protons : ~ 150 MeV (actuellement)



Laser:

durée: \sim ps à fs

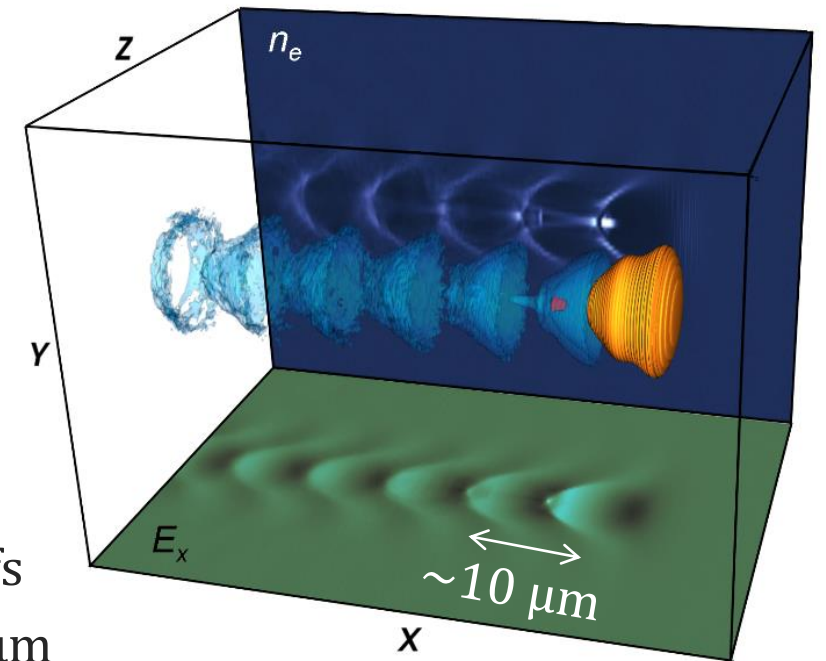
tache $\sim \mu m$

10 TW à > 10 PW

$\sim 10^{18}$ à 10^{23} W/cm²

~ 10 nm à $\sim 10 \mu m$

- Accélération d'électrons sur cible gazeuse :
 - LWFA (*Laser WakeField Acceleration*)
 - ~ 10 GeV en qqm cm (actuellement)



Laser:

durée: ~ 30 fs

tache $\sim 10 \mu m$

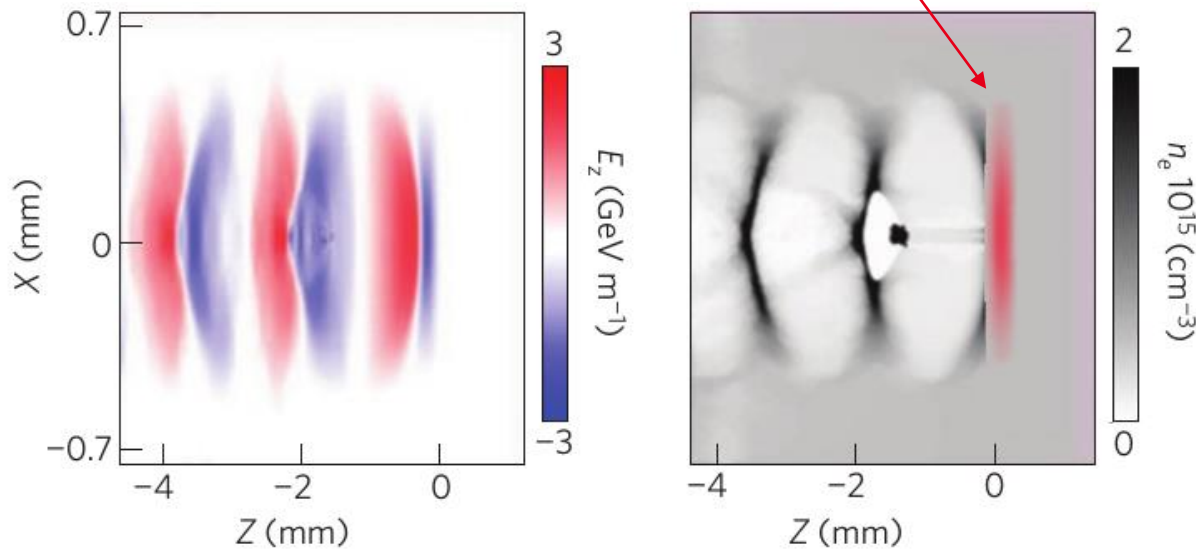
$\sim 10^{19}$ W/cm²

10 TW à > 10 PW

Accélérateurs plasma

- PWFA (*Plasma WakeField Acceleration*)

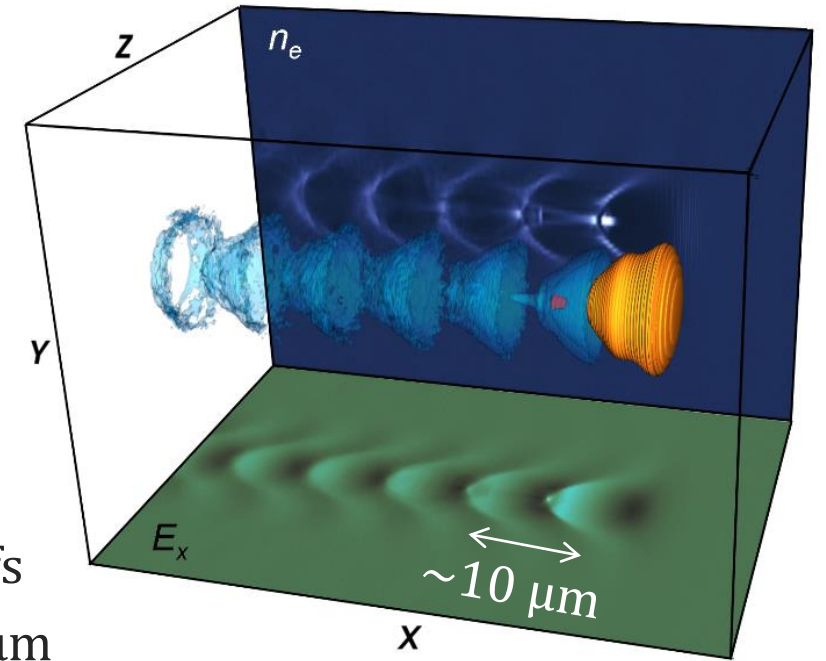
Faisceau pompe :
protons ou électrons
relativistes.



A. Caldwell *et al.*, Nature Physics 5 363 (2009)

- Accélération d'électrons sur cible gazeuse :

- LWFA (*Laser WakeField Acceleration*)
- ~ 10 GeV en qqs cm (actuellement)



Laser:

durée: ~ 30 fs

tache $\sim 10 \mu\text{m}$

$\sim 10^{19}$ W/cm²

10 TW à > 10 PW

Accélérateur conventionnel vs. plasma



■ Accélérateurs conventionnels

- Grande cadence, grande puissance moyenne, forte charge
- Technologie maîtrisée et fiable depuis de nombreuses années
- Qualité de faisceau
- Stabilité
- Haute énergie

■ Accélérateurs laser-plasma

- Compacte, moins coûteux
- Durée fs (électrons) et ps (ions) + μm \Rightarrow grande résolution, grande brillance
- Synchronisation avec d'autres sources laser (expérience pompe-sonde, etc.)
- Grande versatilité de la même installation (e.g. accélération d'électrons ou d'ions avec le même système laser)

Accélérateur conventionnel vs. plasma

■ Accélérateurs conventionnels

- Grande cadence, grande puissance moyenne, forte charge
- Technologie maîtrisée et fiable depuis de nombreuses années
- Qualité de faisceau
- Stabilité
- Haute énergie

■ Accélérateurs laser-plasma

- Compacte, moins coûteux
- Durée fs (électrons) et ps (ions) + μm \Rightarrow grande résolution, grande brillance
- Synchronisation avec d'autres sources laser (expérience pompe-sonde, etc.)
- Grande versatilité de la même installation (e.g. accélération d'électrons ou d'ions avec le même système laser)

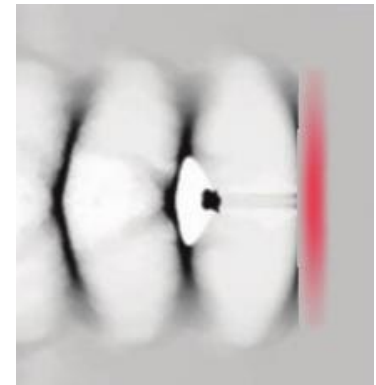
Caractéristiques assez éloignées

\Rightarrow Applications actuelles assez différentes

\Rightarrow Solutions plus complémentaires que concurrentes

Accélérateur conventionnel vs. plasma

- Accélérateurs conventionnels
 - Grande cadence, grande puissance moyenne, forte charge
 - Technologie maîtrisée et fiable depuis de nombreuses années
 - Qualité de faisceau
 - Stabilité
 - Haute énergie
- Accélérateurs laser-plasma
 - Compacte, moins coûteux
 - Durée fs (électrons) et ps (ions) + μm \Rightarrow grande résolution, grande brillance
 - Synchronisation avec d'autres sources laser (expérience pompe-sonde, etc.)
 - Grande versatilité de la même installation (e.g. accélération d'électrons ou d'ions avec le même système laser)
- Accélérateur **d'électrons** faisceau-plasma
 - Basé sur un accélérateur conventionnel :
 - \Rightarrow Plus proche des avantages/limites d'un accélérateur conventionnel que d'un accélérateur laser-plasma.



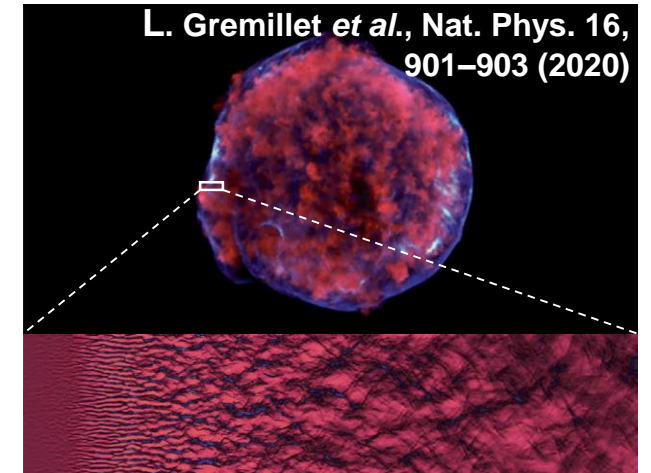
Accélération d'ions: exemples d'applications

- Radiographie protonique de cibles plasma
 - Mesure de fluctuation de densité ou de champ
 - Instabilités plasma
 - Astrophysique de laboratoire
- Chauffage isochoire (étude de la matière dense et chaude)

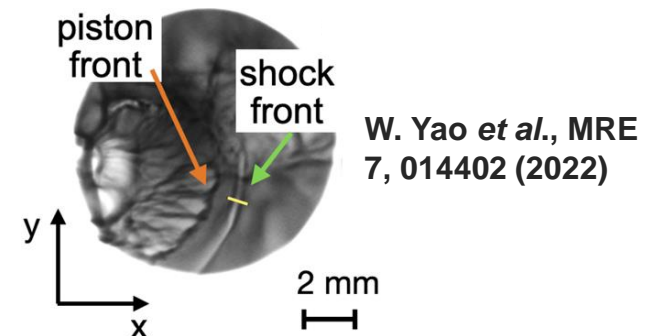
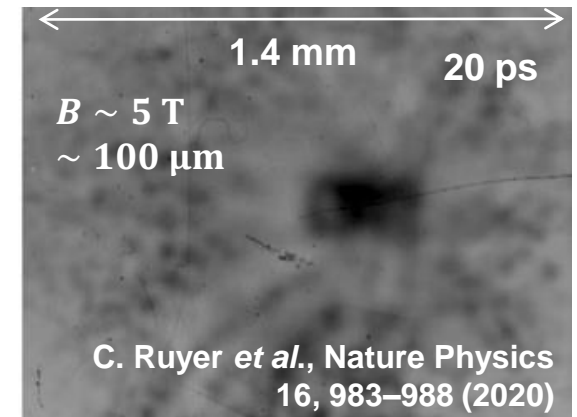
A. Mancic *et al.*, *Picosecond Short-Range Disordering in Isochorically Heated Aluminum at Solid Density*, PRL **104** 035002 (2010)
- Radiobiologie, applications médicales

E. Bayart *et al.*, *Fast dose fractionation using ultra-short laser accelerated proton pulses can increase cancer cell mortality, which relies on functional PARP1 protein*, Scientific Reports **9** 10132 (2019)

F. Kroll *et al.*, *Tumour irradiation in mice with a laser-accelerated proton beam*, Nature Physics **18** 316–322 (2022)
- Source de neutrons – physique nucléaire (voire partie **3.**)



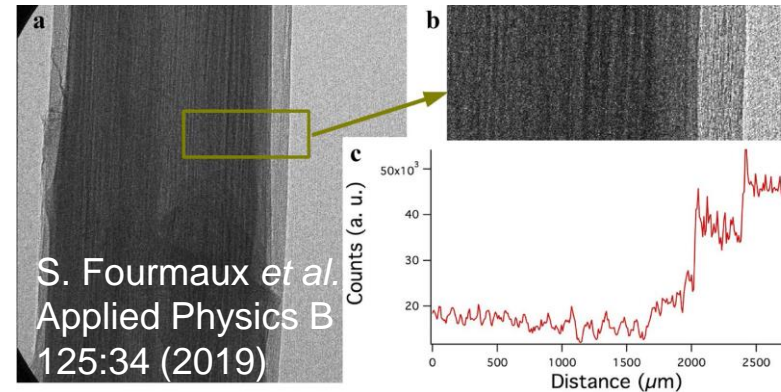
Supernovae Tychos, Credit: X-ray image, NASA / CXC / Rutgers / K.Eriksen *et al.*



Accélération d'électrons: exemples d'applications

- Sources secondaires (fs, $\sim \mu\text{m}$)
 - X, γ (bêtatron, Compton, Bremsstrahlung, FEL)
 - Imagerie à haute résolution
 - Spectroscopie X résolue en temps

Bêtatron @ 50 keV : tige de peuplier



Bêtatron @ 500 keV
CoReLS, Corée



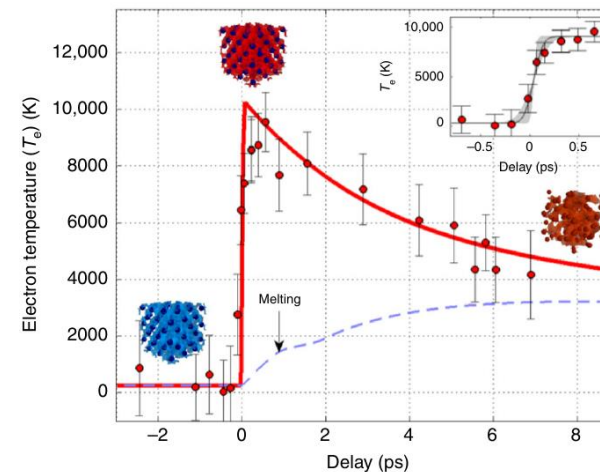
- Etude de la QED en « champ fort »
(voir partie 4.)

J. M. Cole *et al.*, Experimental Evidence of Radiation Reaction in the Collision of a High-Intensity Laser Pulse with a Laser-Wakefield Accelerated Electron Beam, PRX 8 011020 (2018)

- Radiobiologie

- Mesure de champ à haute résolution spatio-temporelle (fs – μm) voir partie 2.

B. Mahieu *et al.*, Nat. Comm. 9 3276 (2018)



Plan

1. Quelques considérations sur l'accélération plasma

Complémentarité entre accélérateur conventionnel et plasma

Exemples d'utilisation d'accélérateurs plasma

2. Accélération d'électrons pour sonder des champs sur des échelles fs et micrométriques

3. Accélération de protons et source de neutrons

4. Applications : simulation PIC d'interactions faisceau-plasma

Instabilités faisceau-plasma, source γ , QED en champ fort, XFEL...

Mesure de micro-champs : principe



LOA: S. Corde, M. Gilljohann,
A. Knetsch, O. Kononenko,
Y. Mankovska, A. Matheron,
P. San Miguel Claveria,
CEA: L. Gremillet, S. Passalidis

Instabilités plasma:

Champ magnétiques \sim kT, \sim μm , \sim fs – ps

1.5 J
10 μm (fwhm)
30 fs (fwhm)
 $1.7 \cdot 10^{19} \text{ Wcm}^{-2}$

Laser pompe

feuille

buse

Jet de gaz

LWFA laser

1.2 J
30 μm (fwhm)
30 fs (fwhm)

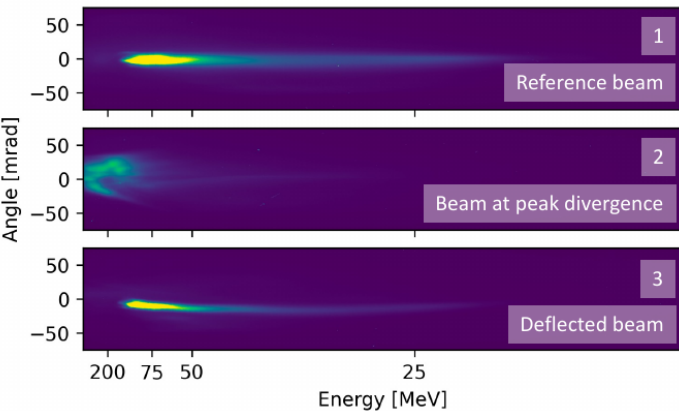
1mm

Mesure de micro-champs : principe

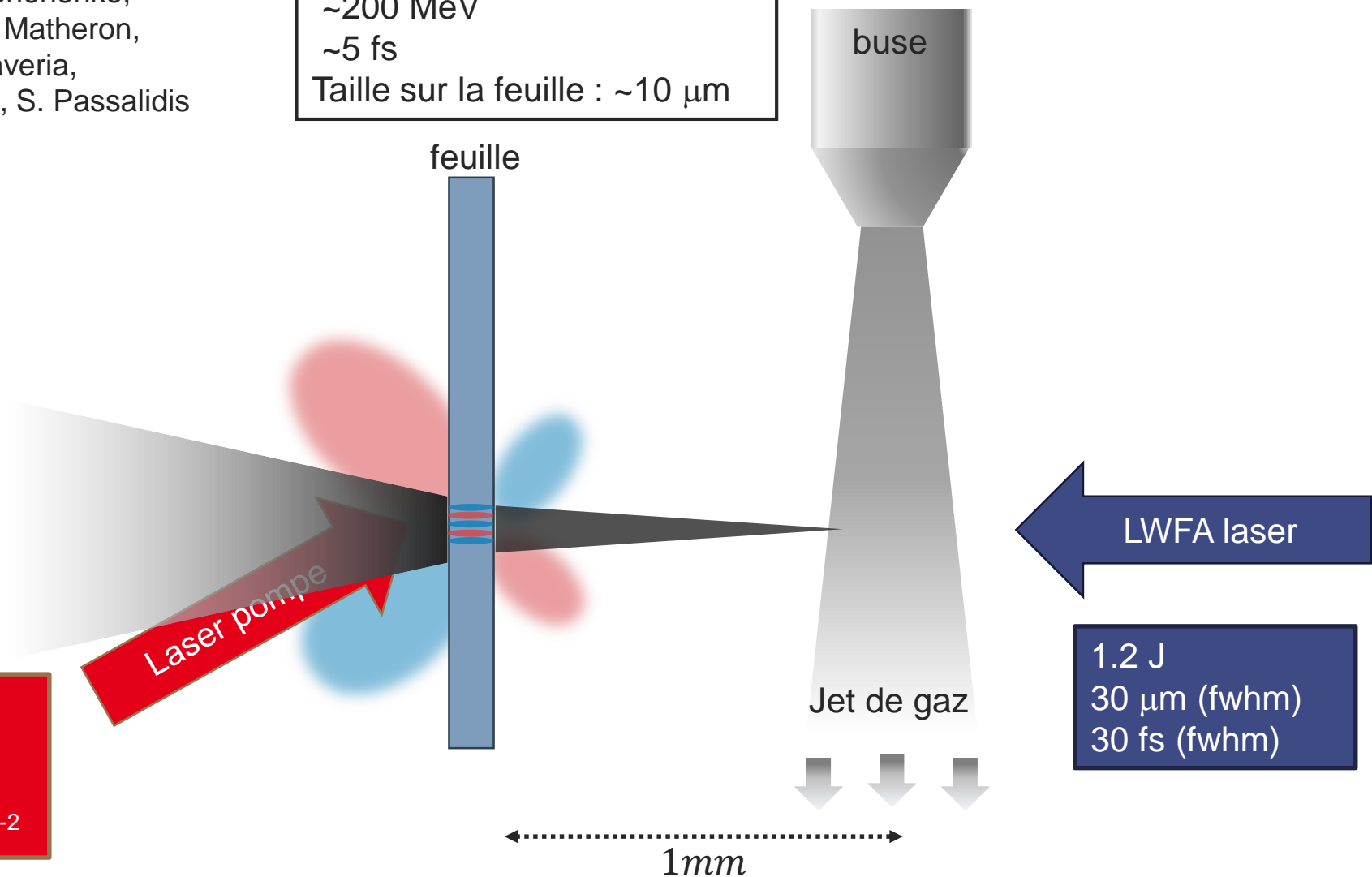


LOA: S. Corde, M. Gilljohann,
A. Knetsch, O. Kononenko,
Y. Mankovska, A. Matheron,
P. San Miguel Claveria,
CEA: L. Gremillet, S. Passalidis

Faisceau d'électrons:
~100 pC
~200 MeV
~5 fs
Taille sur la feuille : ~10 μm



1.5 J
10 μm (fwhm)
30 fs (fwhm)
 $1.7 \cdot 10^{19} \text{ Wcm}^{-2}$



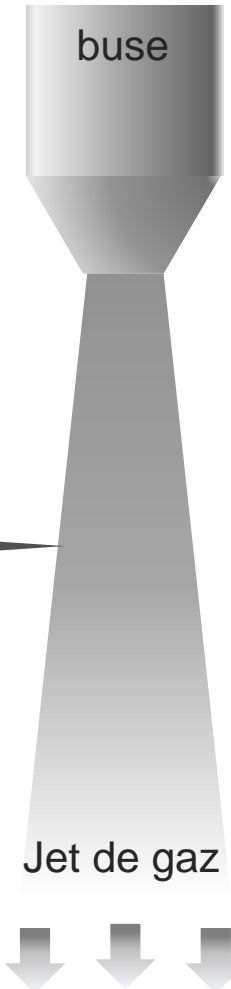
Mesure de micro-champs : principe



LOA: S. Corde, M. Gilljohann,
A. Knetsch, O. Kononenko,
Y. Mankovska, A. Matheron,
P. San Miguel Claveria,
CEA: L. Gremillet, S. Passalidis



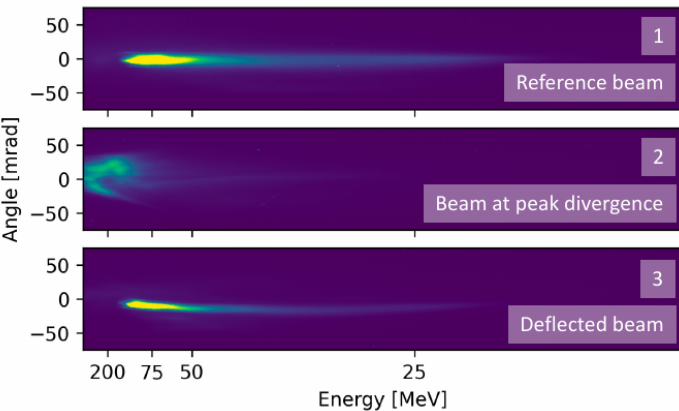
Faisceau d'électrons:
~100 pC
~200 MeV
~5 fs
Taille sur la feuille : ~10 μm



LWFA laser

1.2 J
30 μm (fwhm)
30 fs (fwhm)

1.5 J
10 μm (fwhm)
30 fs (fwhm)
 $1.7 \cdot 10^{19} \text{ Wcm}^{-2}$

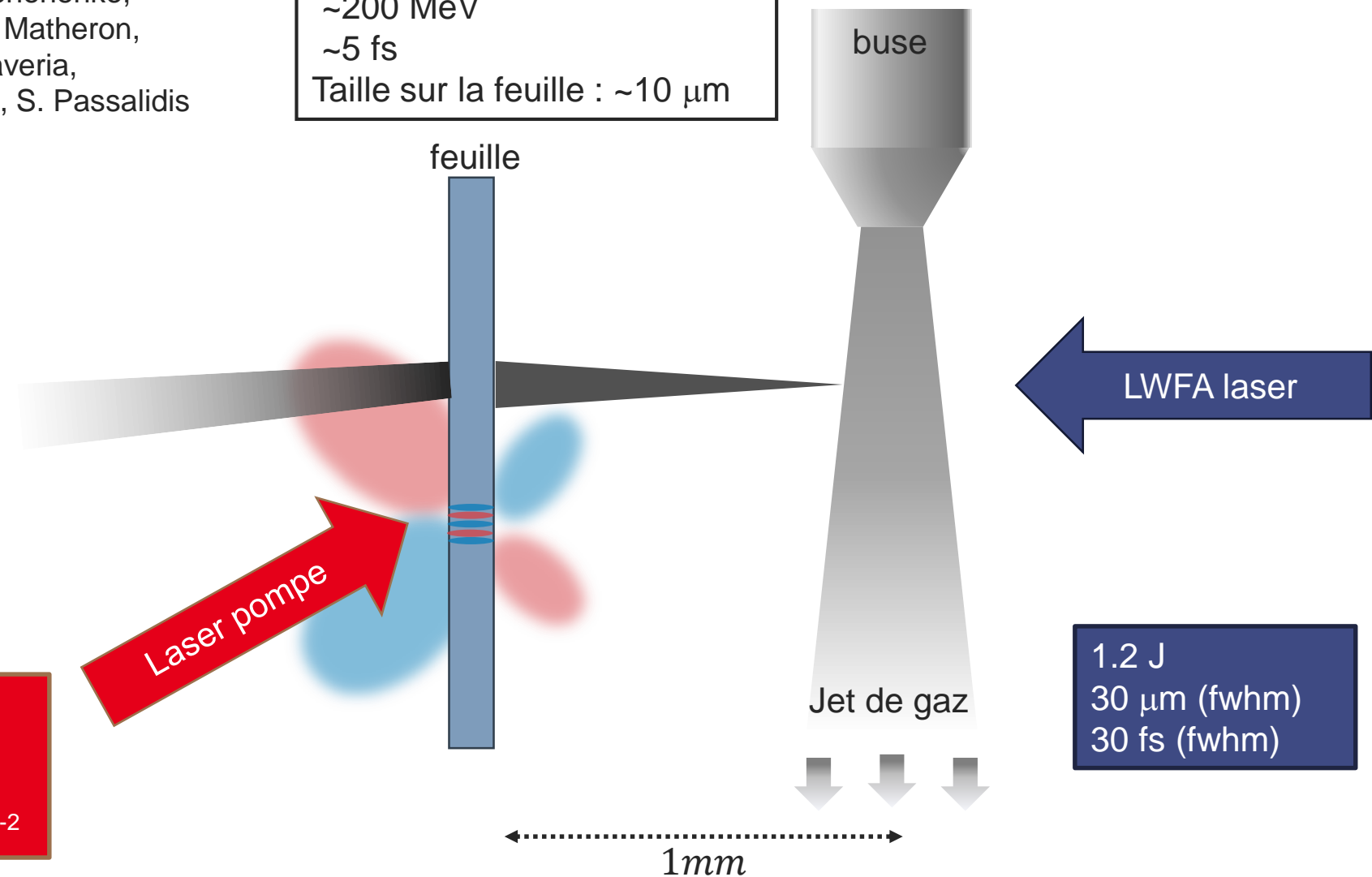
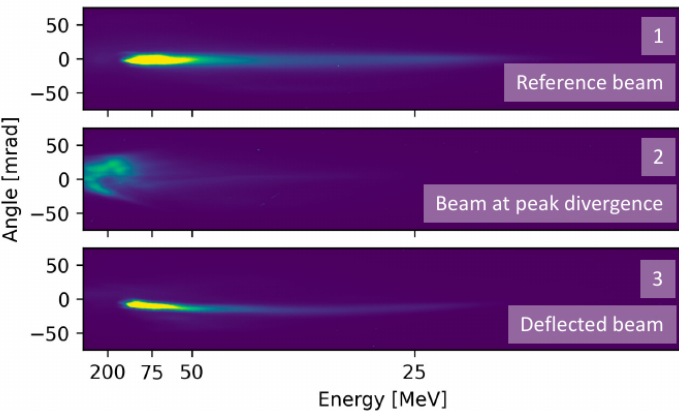


Mesure de micro-champs : principe



LOA: S. Corde, M. Gilljohann,
A. Knetsch, O. Kononenko,
Y. Mankovska, A. Matheron,
P. San Miguel Claveria,
CEA: L. Gremillet, S. Passalidis

Faisceau d'électrons:
~100 pC
~200 MeV
~5 fs
Taille sur la feuille : ~10 μm

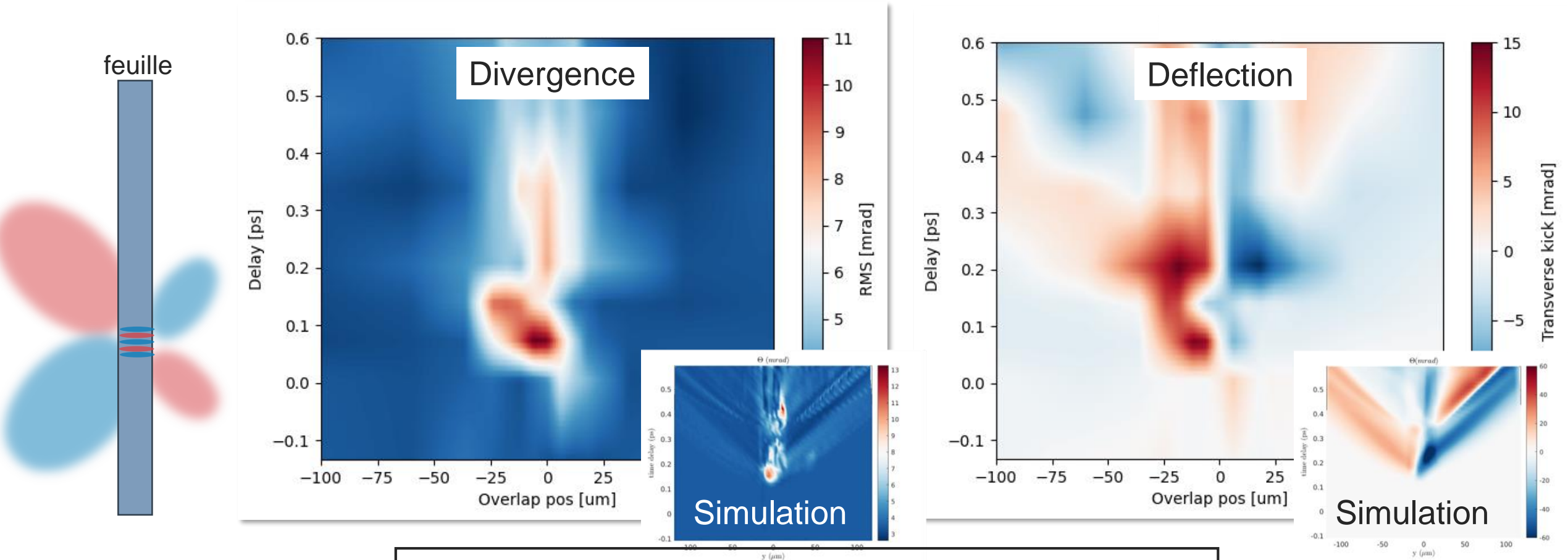


1.5 J
10 μm (fwhm)
30 fs (fwhm)
 $1.7 \cdot 10^{19} \text{ Wcm}^{-2}$

1.2 J
30 μm (fwhm)
30 fs (fwhm)

Mesure de micro-champs : résultats

- Analyse en cours, mais accélérateur LWFA capable de sonder des processus $\sim \mu\text{m}$ et fs.



~ 20 mesures selon y
~ 20 mesures en temps (Variation du délais)
~ 10 tirs par mesures
⇒ ~ 4000 tirs pour une carte

Plan

1. Quelques considérations sur l'accélération plasma

Complémentarité entre accélérateur conventionnel et plasma

Exemples d'utilisation d'accélérateurs plasma

2. Accélération d'électrons pour sonder des champs sur des échelles fs et micrométriques

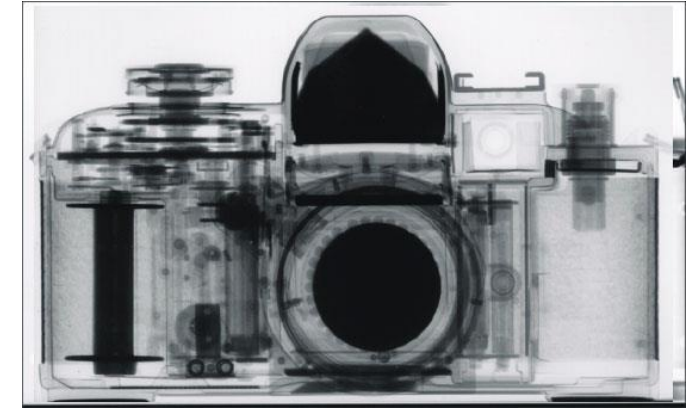
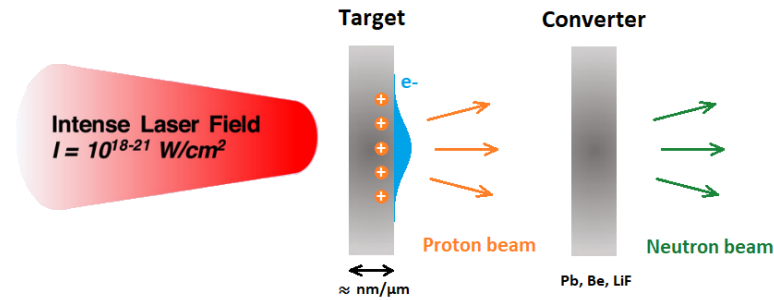
3. Accélération de protons et source de neutrons

4. Applications : simulation PIC d'interactions faisceau-plasma

Instabilités faisceau-plasma, source γ , QED en champ fort, XFEL...

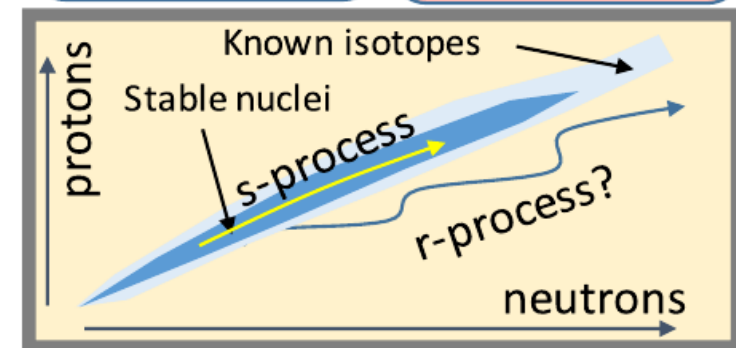
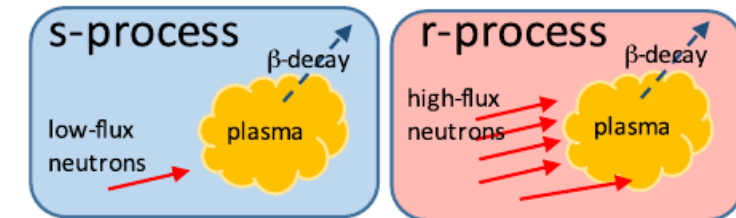
Motivation

Pitcher-catcher technique



- Propriétés uniques :
 - Source neutronique ultra courte (ns) and intense ($> 10^{20} \text{ n/cm}^2/\text{s}$)
 - Production de neutrons rapides ($> \text{MeV}$)
 - Peut être couplé à d'autres faisceaux lasers/cibles plasma

- Applications potentielles :
 - Radiographie neutronique
 - Radiothérapie
 - Application à la physique nucléaire
 - ...
 - Astrophysique: étude du r-process ?
V. Horny et al., arXiv:2304.05981v1 (2023)



Expériences : installations laser

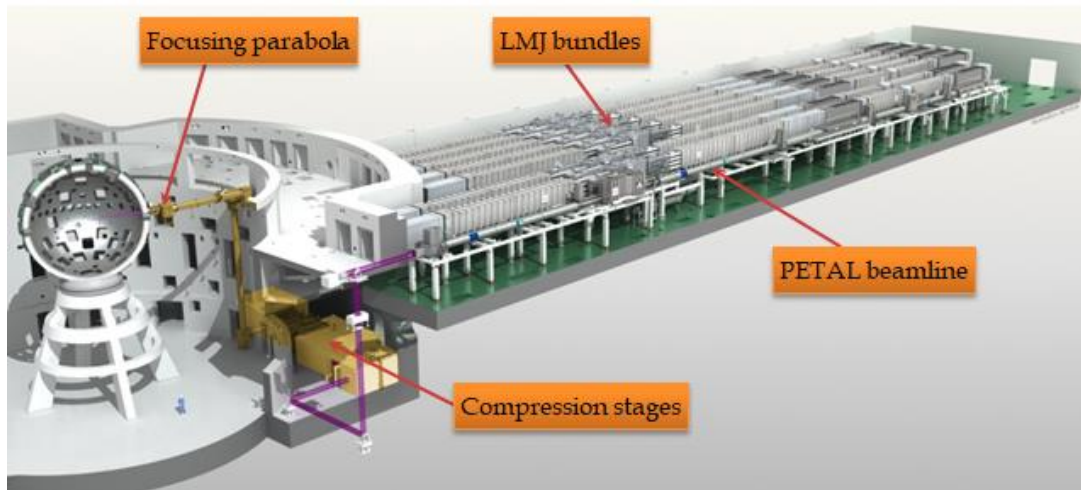
J. Fuchs, R. Lelièvre (LULI) et al.

LMJ-PETAL (CEA CESTA)

PETAL (1 PW): ~ 400 J, ~ 700 fs, ~ 50 μm

~ 5×10^{18} W/cm²

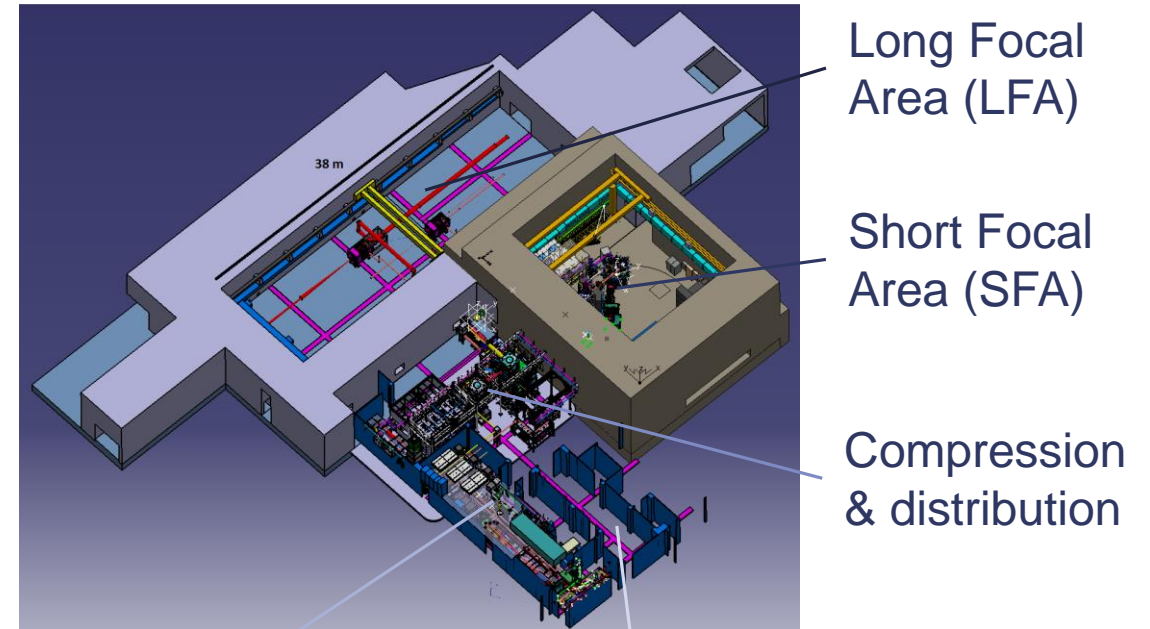
~ 5 tirs / campagne



APOLLON¹ (Saclay)

F1 (3 PW): ~ 40 J, ~ 22 fs, ~ 10^{22} W/cm²

~ 1 tir / minute



Amplification

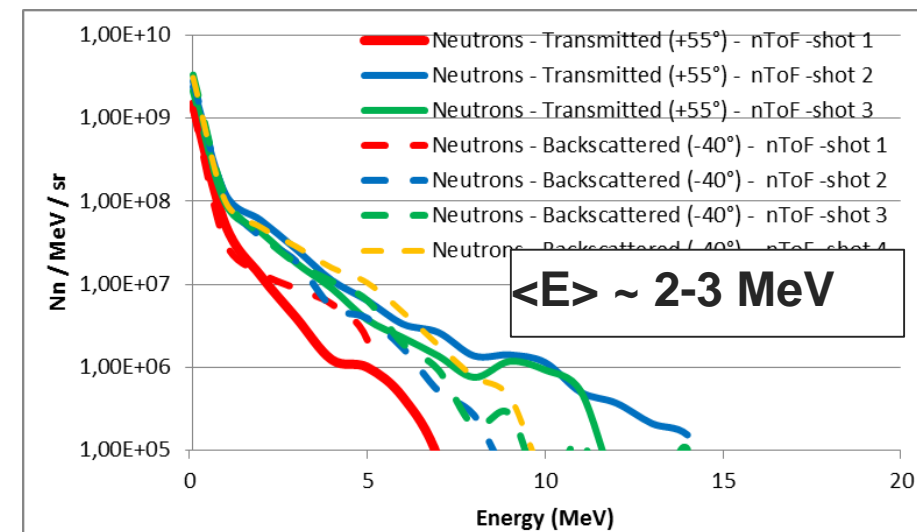
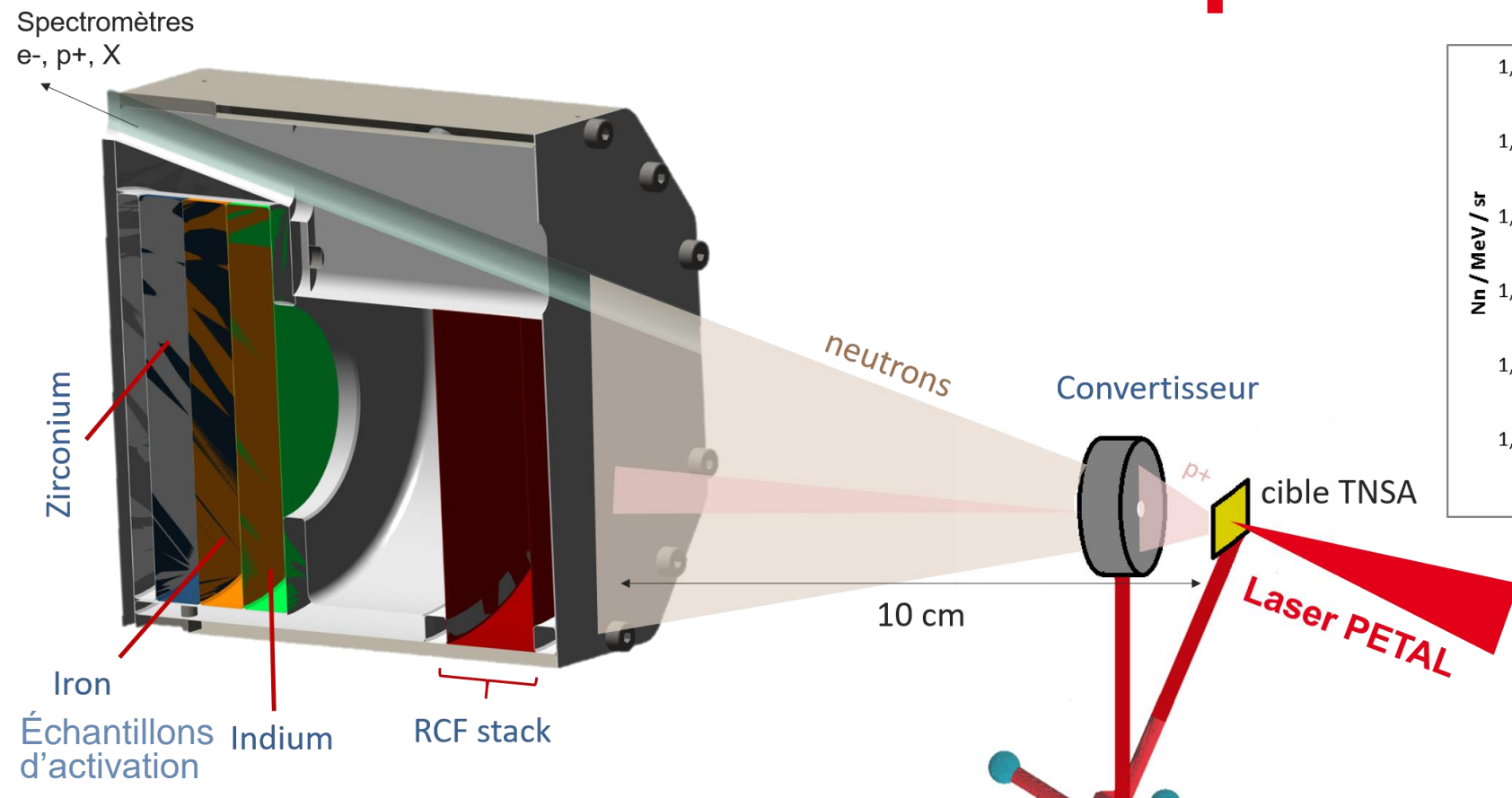
Front end



European Research Council

[1] K. Burdonov et al., MRE 6, 064402 (2021)

PETAL : résultats expérimentaux



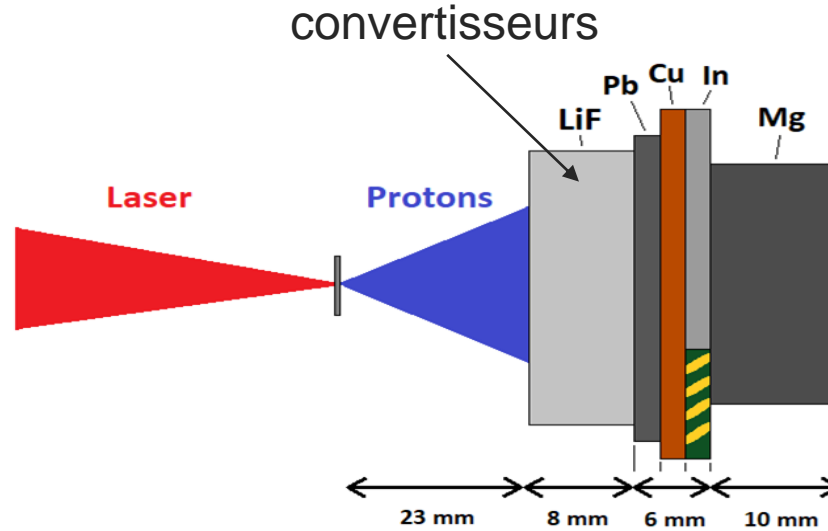
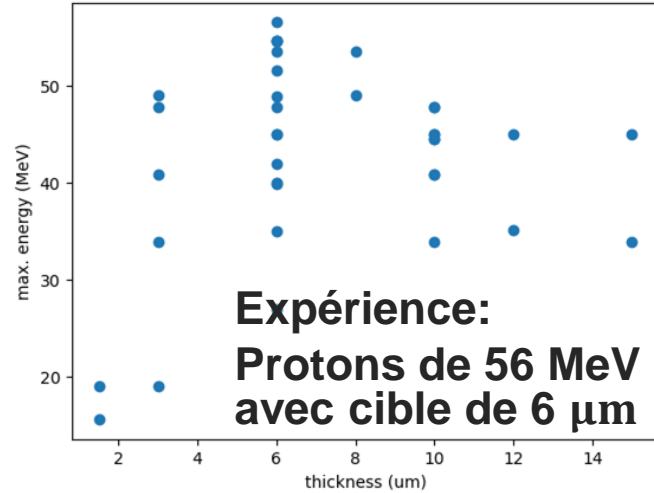
nToF à différents angles

En accord avec les premières simulations

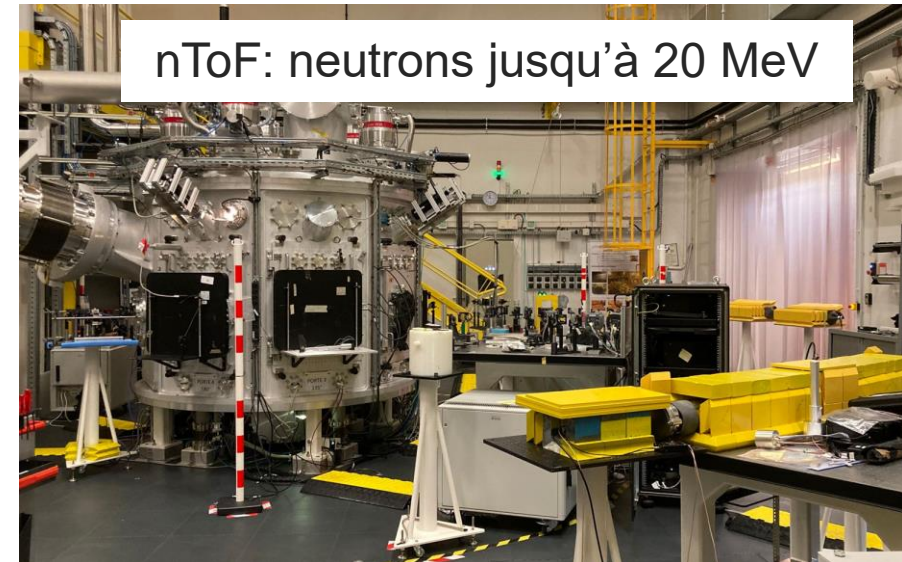
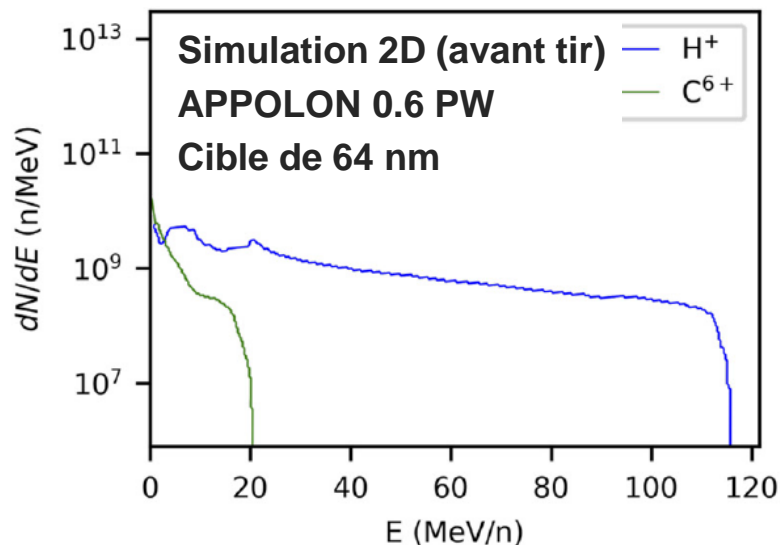
Énergie laser	Durée laser	énergie protons	convertisseur	Neutrons [1-10 MeV]
347 J	1 ps	30 MeV	Pb (2mm)	$4.7 \times 10^7 \text{ n/sr}$
358 J	1 ps	25 MeV	LiF (4 mm)	$3.5 \times 10^8 \text{ n/sr}$
345 J	0.8 ps	28 MeV	LiF (1mm) + Pb (1.5 mm)	$4.3 \times 10^8 \text{ n/sr}$
340 J	0.63 ps	35 MeV	LiF (1mm) + Pb (1.5 mm)	$6.4 \times 10^8 \text{ n/sr}$

APPOLON (mise en service du faisceau 3 PW) : accélération de protons et génération de neutrons

Laser : 40 J, 22 fs, $\sim 10^{22}$ W/cm²



- Échantillons d'activation
 - Dosimètres à bulles
 - Spectromètres à bulles
- $\Rightarrow \sim 3 \times 10^8$ neutrons/tir



Plan

1. Quelques considérations sur l'accélération plasma

Complémentarité entre accélérateur conventionnel et plasma

Exemples d'utilisation d'accélérateurs plasma

2. Accélération d'électrons pour sonder des champs sur des échelles fs et micrométriques

3. Accélération de protons et source de neutrons

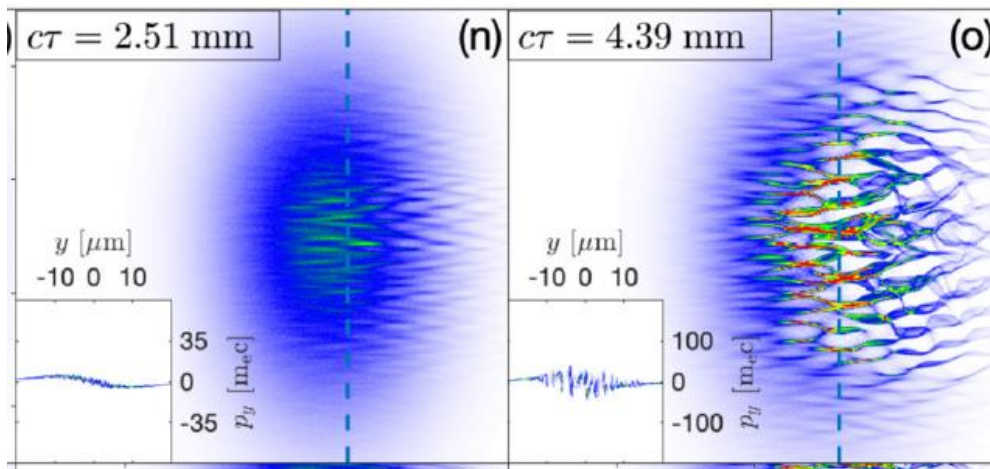
4. Applications : simulation PIC d'interactions faisceau-plasma

Instabilités faisceau-plasma, source γ , QED en champ fort, XFEL...



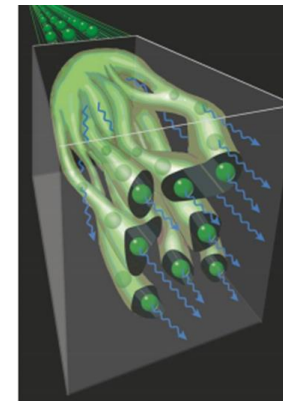
Etude d'instabilités faisceau-plasma à l'aide d'accélérateurs conventionnels

- Expérience E305 au SLAC (PI: S. Corde, LOA):
 - Propagation du faisceau du SLAC (10 GeV, 2 nC, $\sim \mu\text{m}$) dans un gaz ionisé ou une cible solide.
 - Étude fondamentale sur la propagation de faisceau dans un plasma
 - Etude des instabilités faisceau-plasma

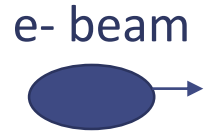


P. San Miguel Claveria *et al.*, PRR 4 023085 (2022)
Simulation PIC CALDER

- Source γ de grande brillance : A. Benedetti *et al.*, Nat. Phot. 12 319–323 (2018)



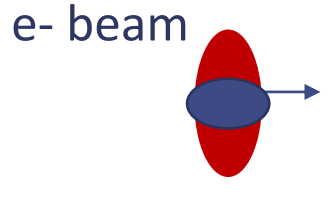
Etude de la QED en champ fort



M. Lobet *et al.*, PRAB
20 043401 (2017), ...

■ Motivation:

- Etude fondamentale de ce régime extrême
- Source γ énergétique et intense
- Source de paires e-/e+.



Beam self-field

V. Yakimenko *et al.*, PRL
122, 190404 (2019)

■ Collision faisceau multi-feuilles.

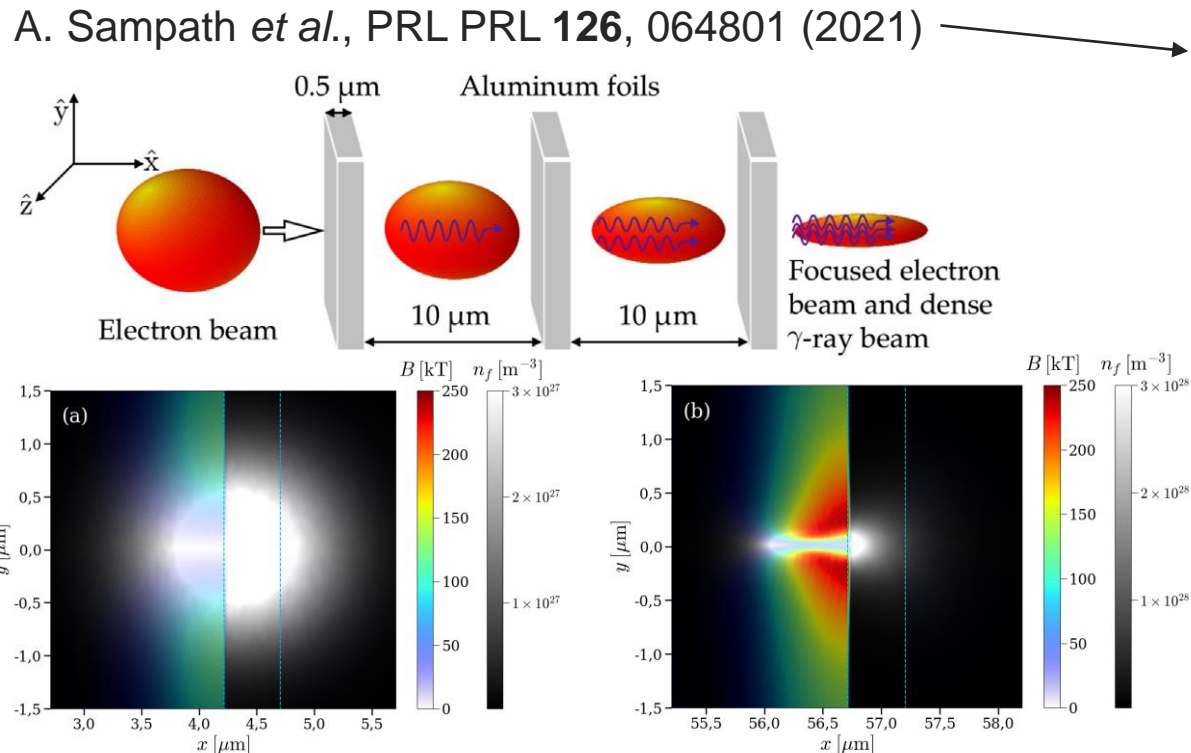
- Expérience E336 au SLAC, et envisagée sur un LWFA.

+ Interaction faisceau – cible structurée :

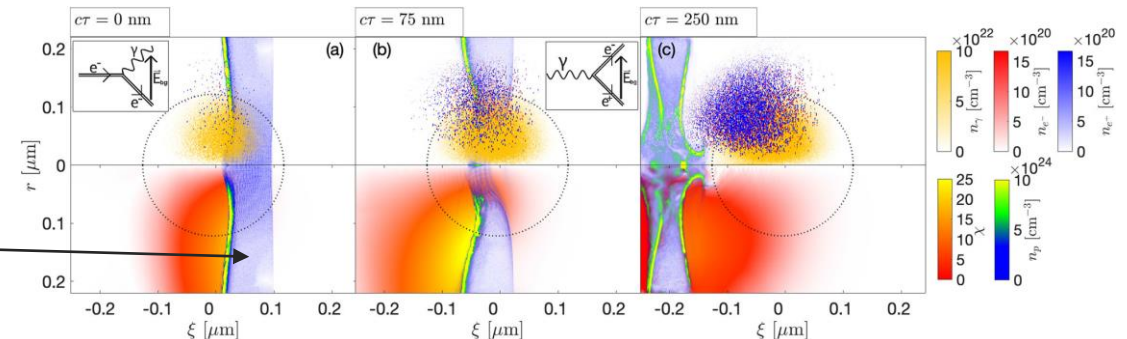
R. Ariniello *et al.*, arXiv:2203.07459v1 (2022)

- Plus prospectif (10 GeV, 2 nC, $\sigma = 55$ nm) :

A. Matheron *et al.*, Communications Physics 6 141(2023)



Cible en or

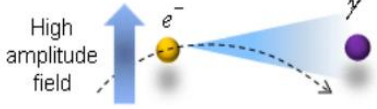




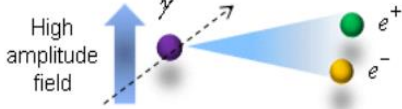
Ajout de physique dans CALDER

intérêt pour l'interaction laser-plasma et accélérateur conventionnel

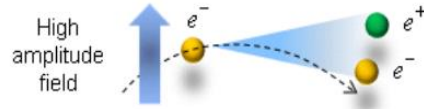
Nonlinear inverse Compton



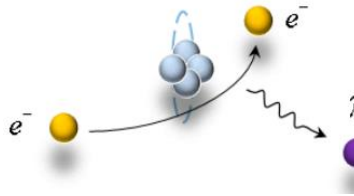
Nonlinear Breit-Wheeler



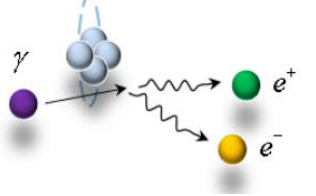
Electromagnetic Trident



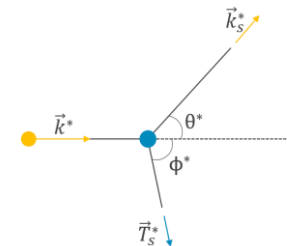
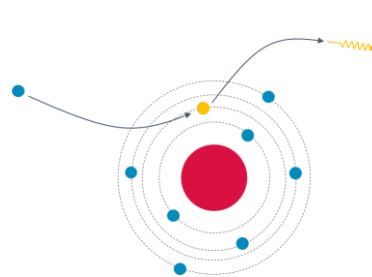
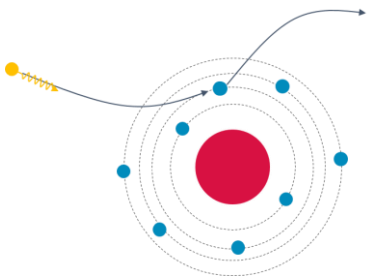
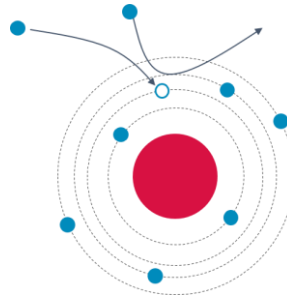
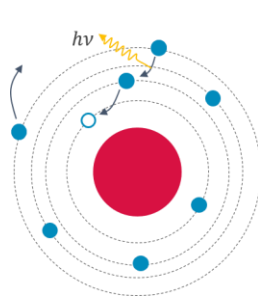
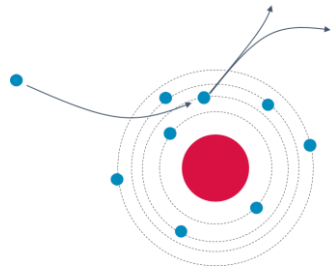
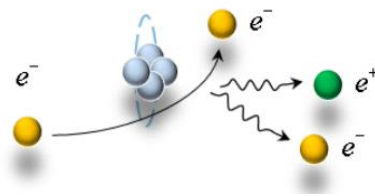
Bremsstrahlung



Bethe-Heitler



Coulomb Trident

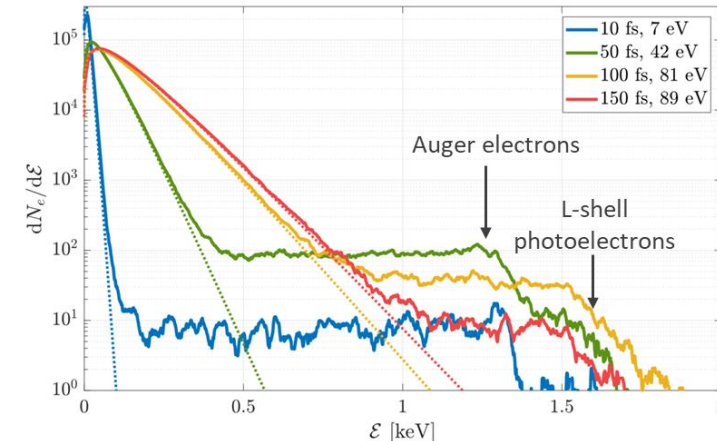


■ Processus radiatif, QED ou atomique dans CALDER :

- Compton inverse non linéaire, Breit-Wheeler NL, Trident
- Bremsstrahlung, Bethe-Heitler, Trident Coulombien
- Ionisation collisionnelle et par champ
- Désexcitation atomique
- Recombinaison à 3 corps
- Photoionisation (par des photons X)
- Recombinaison radioactive
- Diffusion compton
- IPD (*Ionization potential depression*)

■ Application à l'interaction d'une impulsion XFEL avec un solide

D. Tordeux, PhD, Université Paris-Saclay (2022)
 R. Royle *et al.*, Phys. Rev. E **95**, 063203 (2017).



Conclusions

- Accélérateurs conventionnels vs. laser-plasma
 - Points forts / points faibles assez différents
 - ⇒ plus complémentaires que rivaux ?
 - Alternative : accélération faisceau-plasma
- Accélération plasma : déjà des applications concrètes
- Exemple de succès / exemple de cas difficiles
- 😊 Applications : synergie entre les communautés « plasma chauds » et « accélérateurs »
- ☹️ 3 GDR (UP, LEPICE, Accélérateurs) pour une communauté française travaillant sur l'accélération plasma qui reste assez petite...

