



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

# ANR SILAMPA 2013-2016 : Simuler en laboratoire des écoulements de plasmas magnétisés pour l'astrophysique

J. Fuchs<sup>1</sup> , J. Beard<sup>2</sup>, A.Ciardi<sup>3</sup>, E. d'Humières<sup>4</sup>

<sup>1</sup>LULI, École Polytechnique, CNRS, CEA, UPMC, 91128 Palaiseau, France

<sup>2</sup> LNCMI, UPR 3228, CNRS-UFJ-UPS-INSA, 31400 Toulouse, France

<sup>3</sup> LERMA, Observatoire de Paris, CNRS UMR 8112, Paris France

<sup>4</sup> CELIA, Université Bordeaux 1, CNRS UMR 5107, Talence France



Journée processus d'accélération en  
astrophysique - 3-5 octobre 2012 - IAP

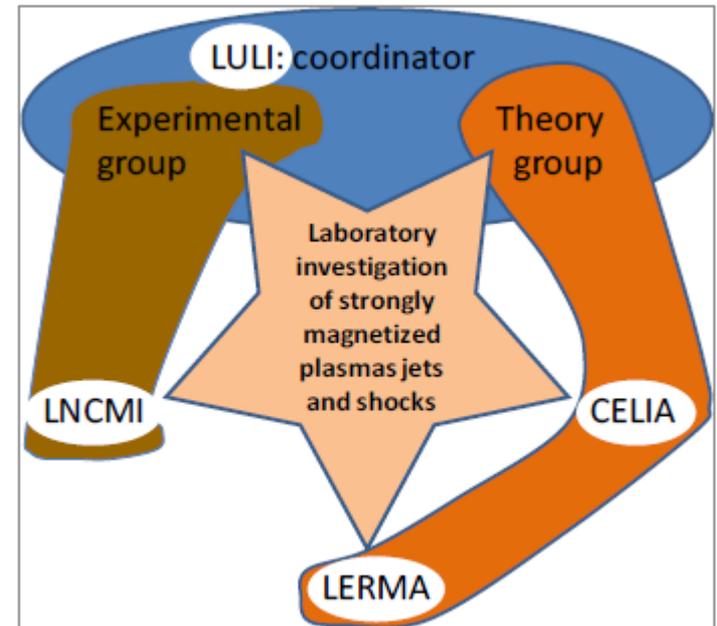
# Motivation

**Quel intérêt pour l'ajout d'un fort champ magnétique externe à des plasmas produits par laser ?**

- 1 Astrophysique de laboratoire** : se rapprocher des conditions présentes dans l'Univers
- 2 Confinement par Fusion Inertiel** : par exemple pour le contrôle des pertes de chaleur électronique radiale ou pour une meilleure exploration du schéma MTF (Magnetized Target Fusion)
- 3 Accélération de particules** : production de particules énergétiques et de rayonnement dans la collision de jets de forte énergie, amélioration du piégeage

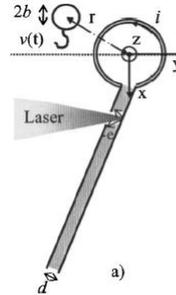
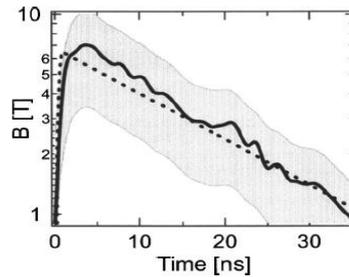
# SCIENTIFIC PROGRAM, PROJECT STRUCTURE of the ANR project

- ❑ Task 1 – Project coordination
- ❑ Task 2 – Generation of 40 T magnetic fields in a laser experiment-compatible fashion
- ❑ Task 3 – Study of plasma outflow collimation
- ❑ Task 4 – Study of particle acceleration and radiation generation in collisionless shock



# Très peu d'expériences couplant un champ magnétique externe et un laser de forte puissance ont été réalisées

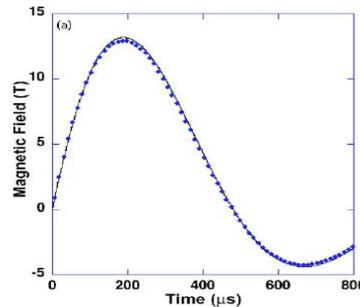
## - Expérience sur VULCAN



**Design restrictif,  
limitation de  
l'amplitude de champ  
magnétique**

[C.Courtois et al., JAP 98 054913 (2005)]

## - Expérience au LLNL



**Limitation de l'amplitude  
du champ magnétique**

[B.B Pollock et al., Rev. Sci. Instru. 77 114703 (2006)]

## - Expérience sur Oméga



**Risque de contamination de la chambre  
par la destruction de la bobine**

[O.V. Gotchev et al., Phys. Rev. Lettr, 103, 215004 (2009)]

# Système pour la génération d'un fort courant

## Générateur de courant :

**HZDR**

- construit par le HZDR
- 5 capacités de 50  $\mu\text{F}$ , C=250  $\mu\text{F}$
- ignitron 25 kV
- **énergie disponible : 32 kJ**
- courant maximum : 250 kA
- temps de montée court ( $\sim\mu\text{s}$ )

 HELMHOLTZ  
ZENTRUM DRESDEN  
ROSSENDORF



## Dimensionnement de la bobine LNCMI :

- la durée très courte de l'expérience nous permet d'envisager des temps très courts ( $\sim\mu\text{s}$ ) pour la durée du champ magnétique
- accès laser + accès transverse pour les diagnostics
- éviter le passage sous vide du courant (problème d'arc électrique entre la chambre et les lignes de transmission)
- 40 T au maximum



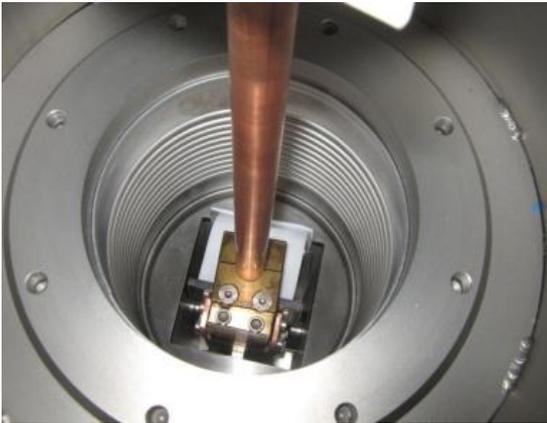
**LNCMI**

Journée processus d'accélération en  
astrophysique - 3-5 octobre 2012 - IAP

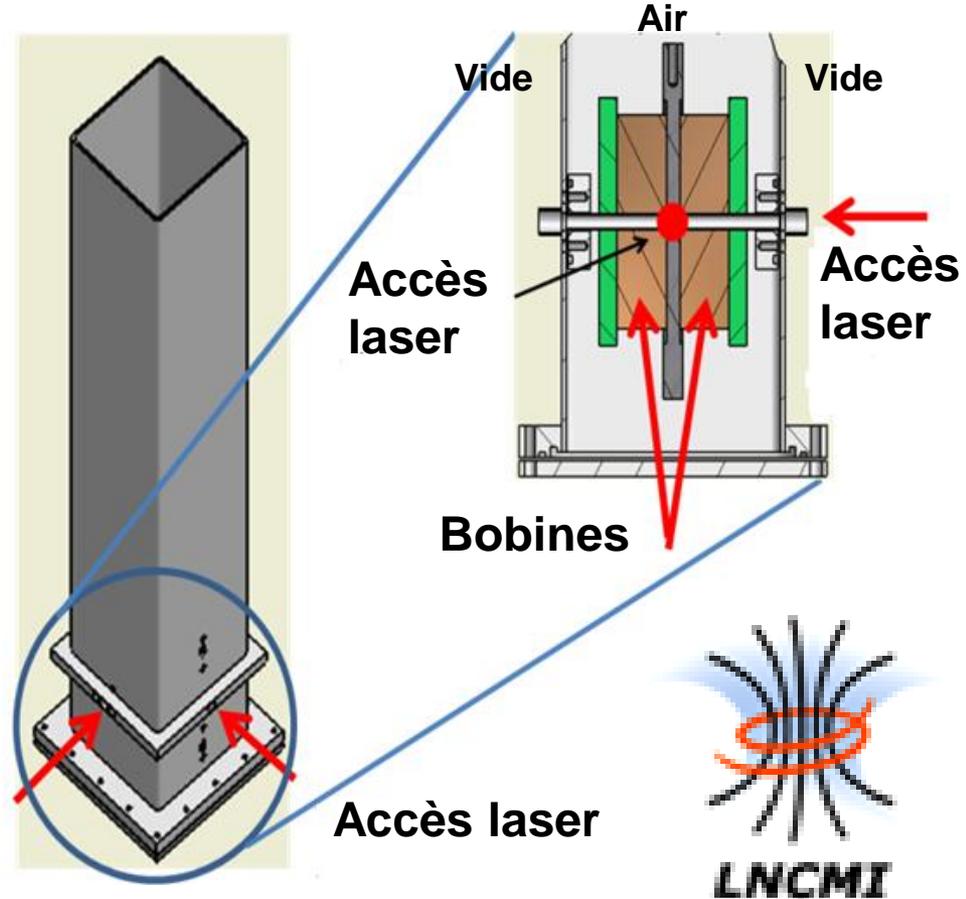
# Conception de la bobine LNCMI

## Caractéristique de la bobine :

- Bobine de type Helmholtz
- Accès radial de 5 mm pour les diagnostics
- Pas de passage sous vide du courant

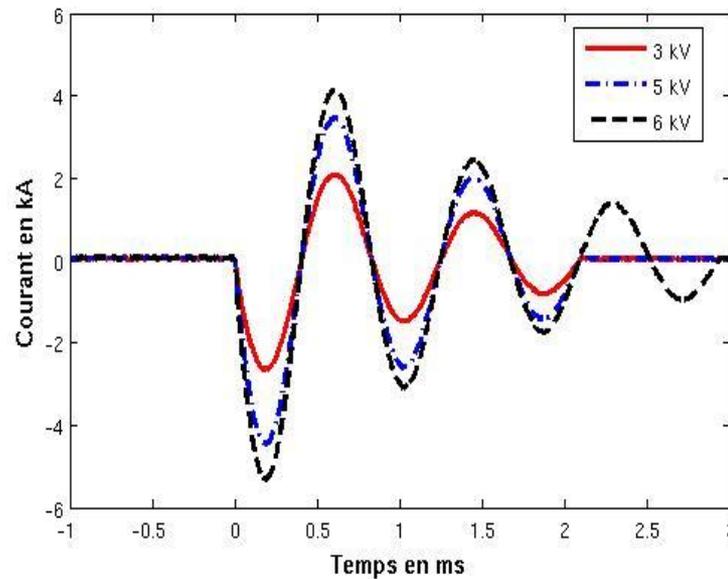


Accès laser



## Génération du champ magnétique (1/3)

Exemple typique de décharge sans limiteur de courant pour une tension d'entrée de 3, 5 et 6 kV:

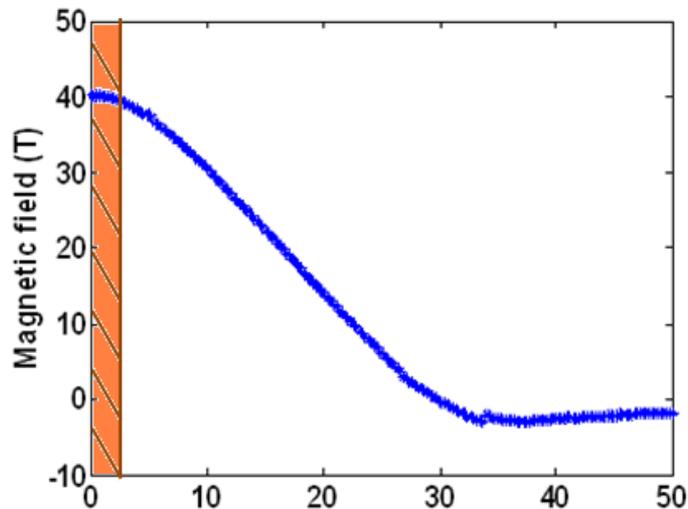


**Temps de montée au premier pic :  $\sim 176 \mu\text{s}$   
 $I/B \sim 300 \text{ A/T}$ , pour  $40 \text{ T} \rightarrow I_{\text{max}} \sim 12 \text{ kA}$**

Journée processus d'accélération en  
astrophysique - 3-5 octobre 2012 - IAP

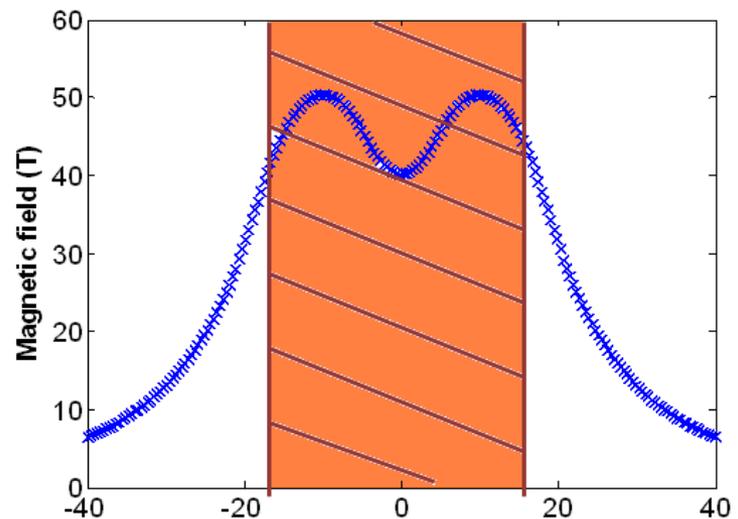
## Génération du champ magnétique (2/3)

**Profil du champ B dans la direction radiale :**



**Profil transversal/radial (mm)**

**Profil du champ B dans la direction longitudinale:**



**Profil longitudinal/axial (mm)**

**Champ constant sur 5 mm dans la direction radiale qui est la taille de notre ouverture**

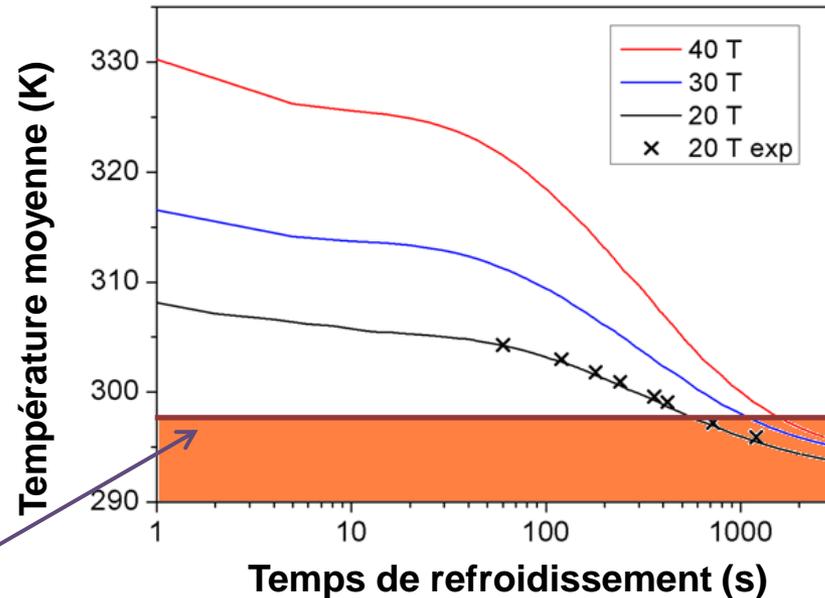
**Champ constant sur 30-40 mm dans la direction longitudinale**

## Génération du champ magnétique (3/3)

### Evaluation du taux de répétition de façon expérimentale à 20 T et comparaison avec les calculs théoriques :

Mesure de température moyenne effectuée par une mesure de la résistance de la bobine.

Tir suivant : attendre que la bobine ait une température moyenne  $< 298$  K, afin d'éviter les effets cumulatifs

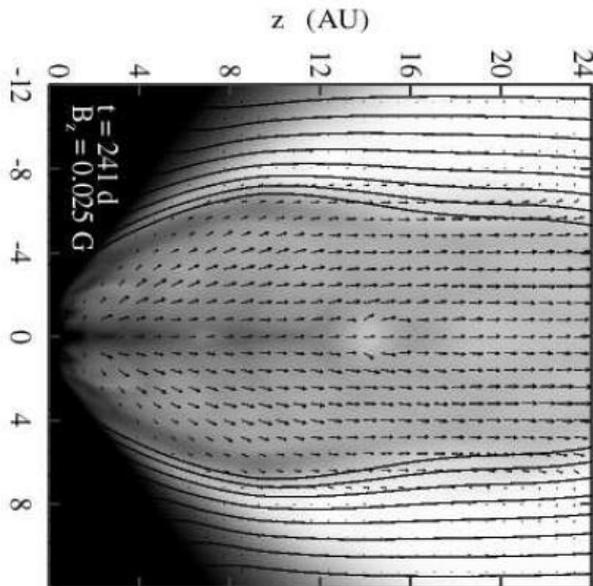


**Taux de répétition de l'ordre de 10-15 min à 20 T et de 30-45 min à 40 T : comparable à un système laser de puissance**

# Application 1 du projet ANR: Etude de la collimation de jets plasma d'intérêt pour l'astrophysique

Collimation déterminée par l'addition d'une composante de champ toroidal  $B_\theta$  et d'une composante de champ poloidal  $B_{pol}$ :

$$F_\perp = \underbrace{-\frac{B_\theta}{\mu_0 r} \nabla_\perp (r B_\theta)}_{\text{Dans notre cas} = 0} + \underbrace{j_\theta B_{pol}}_{\text{Effet que l'on désire étudier}}$$



Dans notre cas = 0

Effet que l'on désire étudier

[S. Matt et al., Mont. Not. R. Astron. Soc. 000, 1-8 (2002)]

Ici, nous sommes intéressés uniquement au cas  $B_\theta = 0$  et l'effet de  $B_{pol}$

# Une première expérience a déjà été effectuée au LULI en mars 2012 - Configuration expérimentale

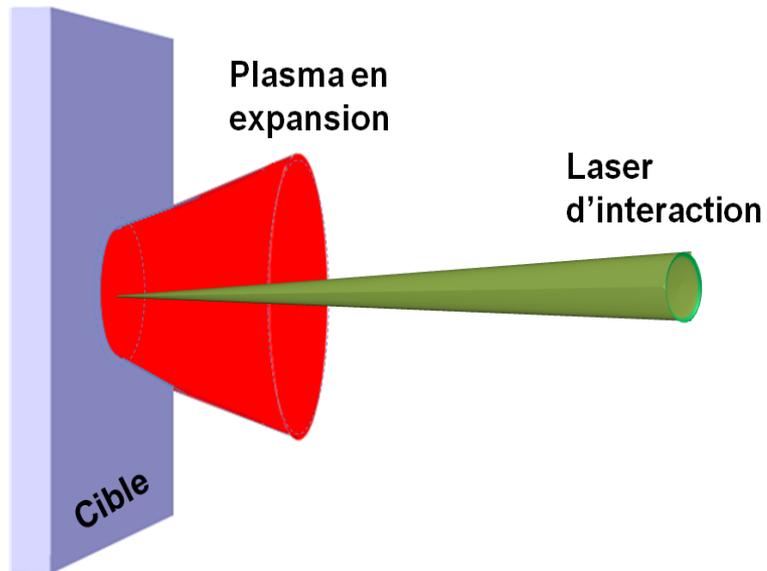
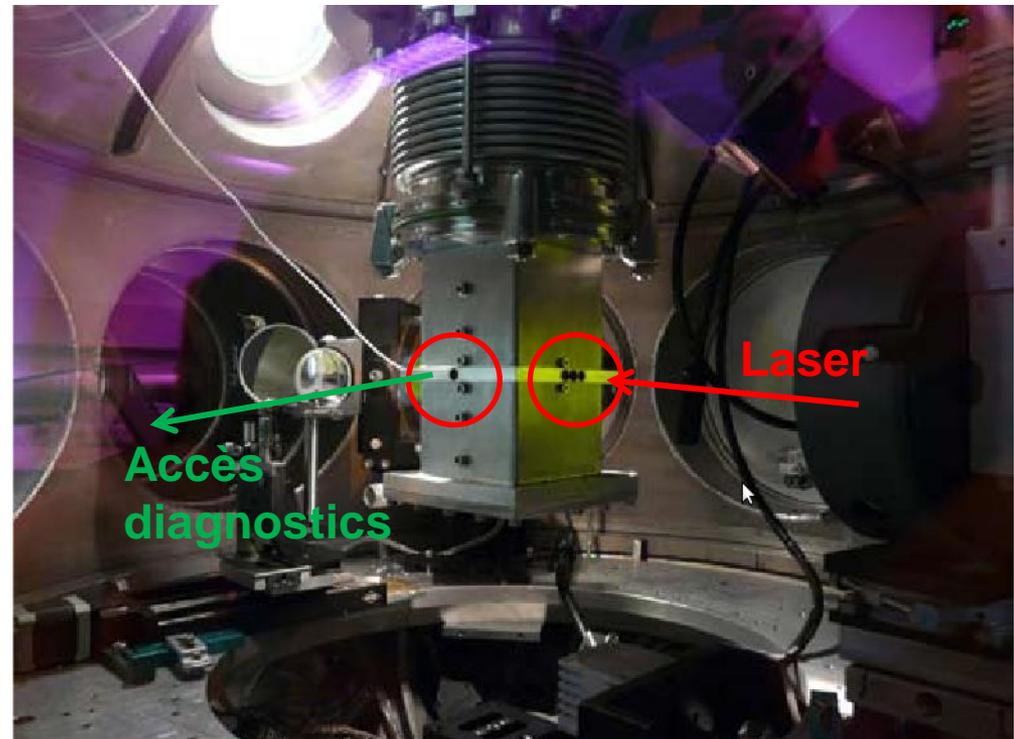
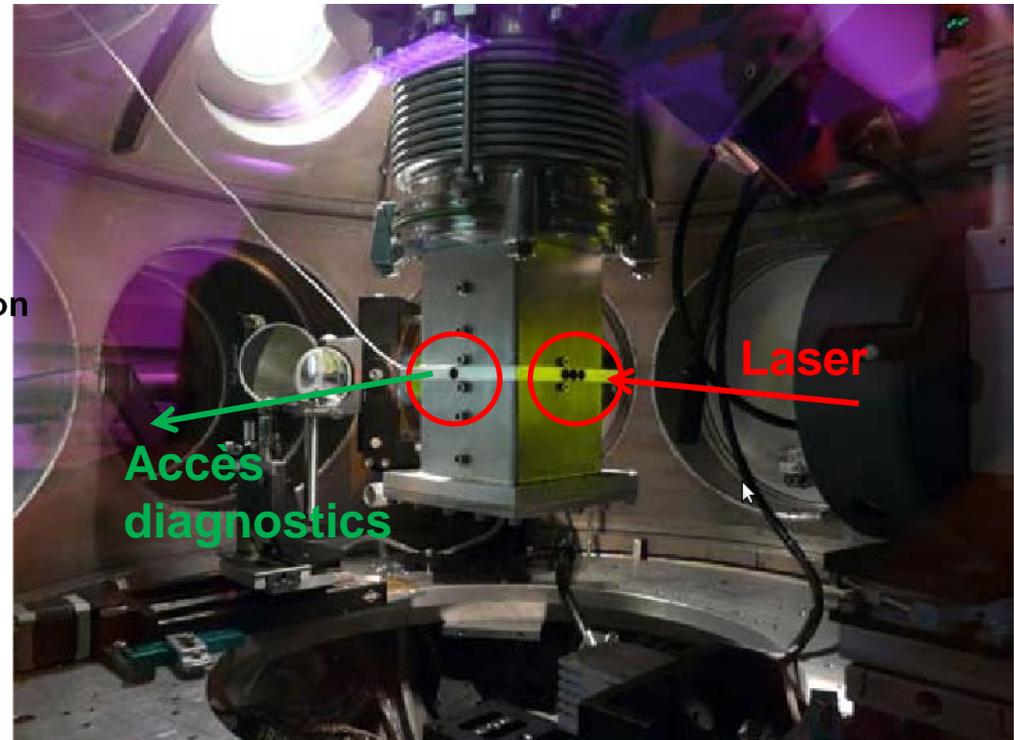
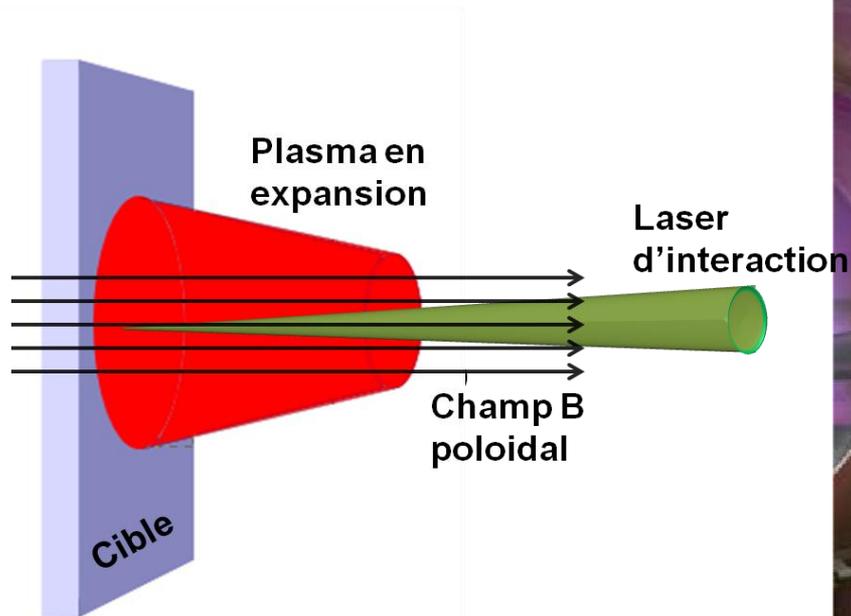


Photo de la chambre expérimental



# Une première expérience a déjà été effectuée au LULI en mars 2012 - Configuration expérimentale

Photo de la chambre expérimental



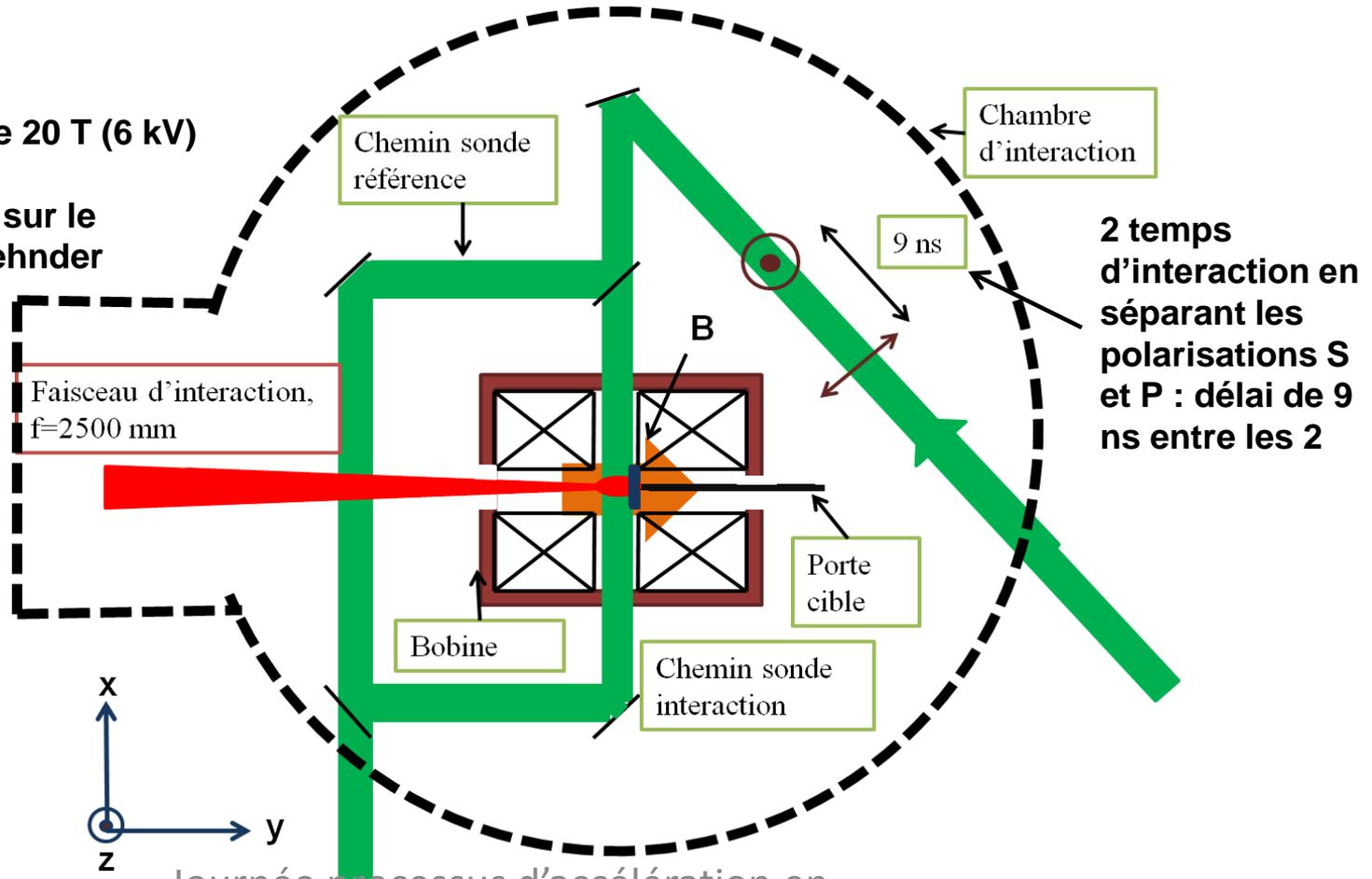
# Montage expérimental

Longue focale pour interaction :  $f=2500$  mm

50 J, 500 ps FWHM

Champ magnétique de 20 T (6 kV)

Interférométrie basée sur le principe d'un Mach Zehnder



# Lien avec l'astrophysique : paramètres sans dimensions pour ELFIE

Quantity	CH	YSO
	$I=10^{14} \text{ W/cm}^2$	
Peclet	14	1.0e11
Reynolds	1.5e5	1.0e13
Reynolds magnétique	~ 200	1.0e15
Mach (ratio $v_{\text{jet}}$ sur $c_s$ )	4.5	10-50
Mach (ratio $v_{\text{jet}}$ sur $v_a$ )	7	
vitesse d'Alfven (m/s)	5.6e4	
vitesse acoustique ionique (m/s)	8.9e4	
vitesse magnéto-acoustique (m/s)	1.05e5	
Champ magnétique (G)	2e5	1.0e-4
Densité ( $\text{cm}^{-3}$ )	5e18	10-10 <sup>5</sup>

$P_e > 1$  : proche de 1, la conduction thermique va alors jouer un petit rôle

$R_e \gg 1$  : effet de viscosité très petit

$R_{em} > 1$  : les lignes de champs sont advecté avec l'écoulement fluide

$M > 1$  : le jet est supersonique

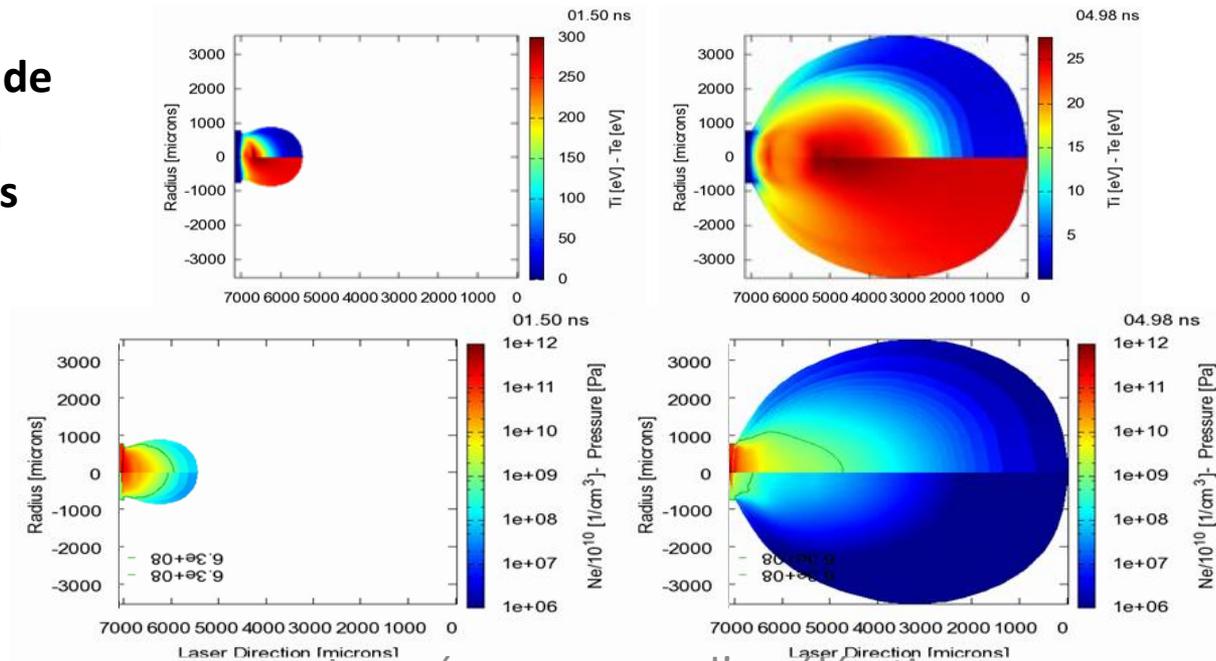
# Simulations : couplage entre DUED et GORGON

Simulations : couplage entre DUED (code 2D laser) et GORGON (code 3 D hydro radiatif)

Paramètres de sortie hydrodynamique de DUED = température, pression, densité sans B

Injection des paramètres de sortie de DUED dans GORGON afin d'avoir une évolution de la plume plasma avec ou sans ajout de champ B

**Simulation de  
l'expansion  
plasma sans  
champ B**

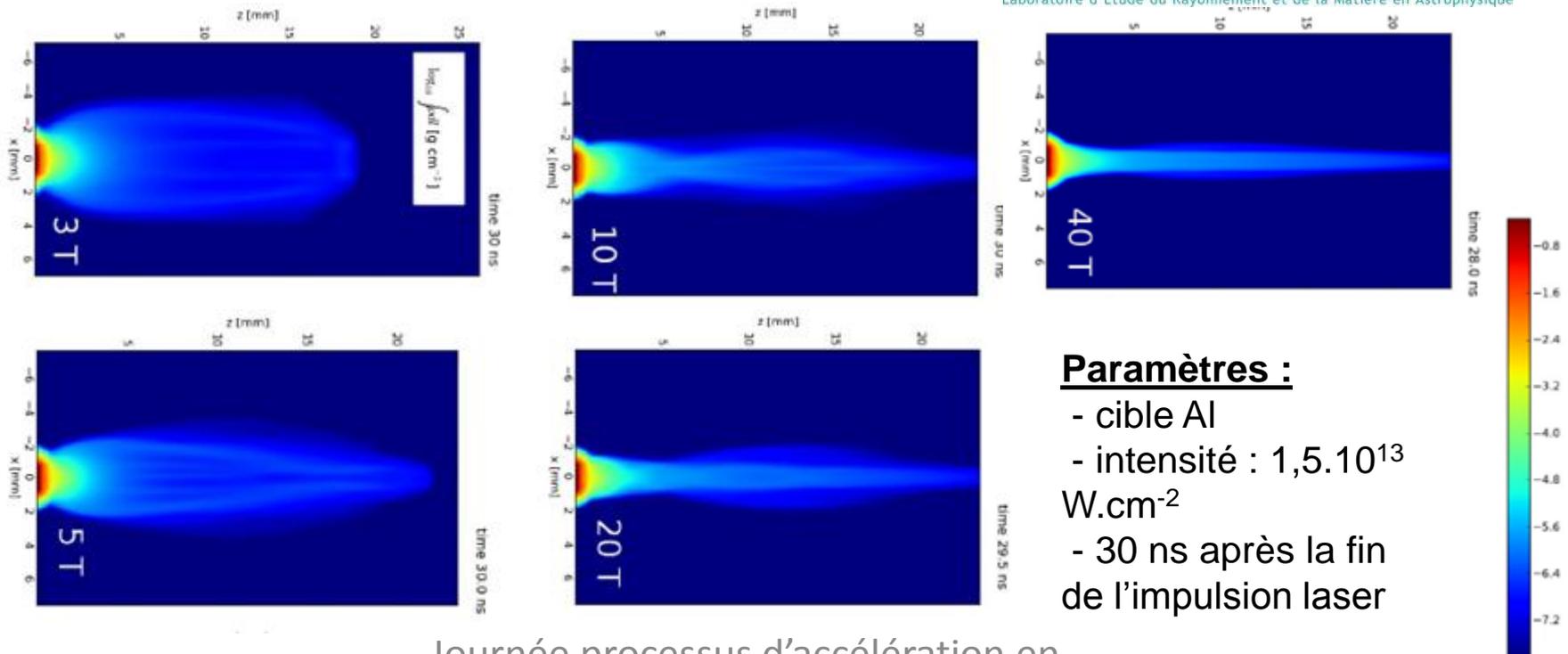


# Exemple de simulation GORGON : Effet du champ magnétique sur la collimation du jet

- Collimation du jet pour un champ supérieur à 3 T
- Au dessus de 5 T, le champ est capable de rediriger le choc vers l'axe
- Au dessus de 20 T, le jet est collimaté



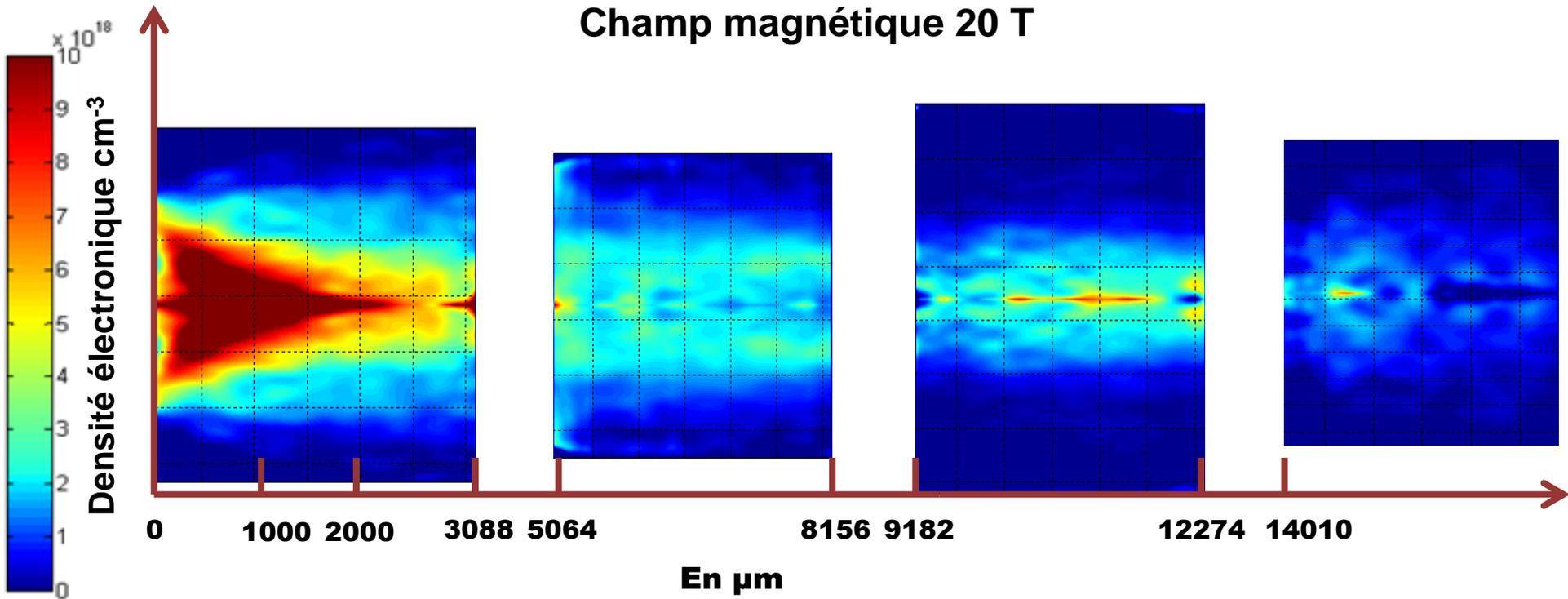
Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique





# Reconstruction d'un jet complet

$I \sim 10^{12} \text{ W/cm}^2$  , Cible CH 41 ns après le début de l'interaction  
Champ magnétique 20 T



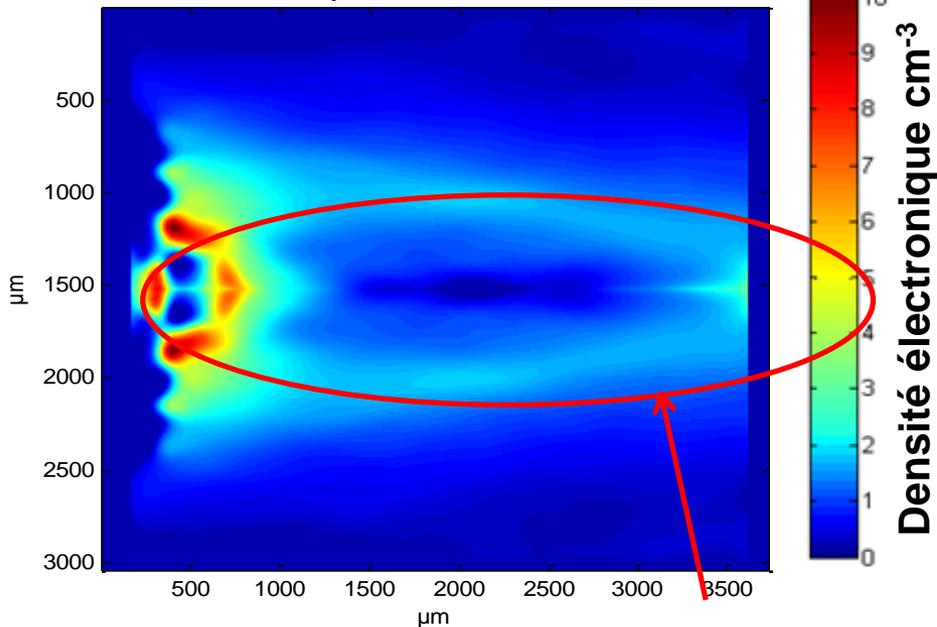
Observation : jet s'étendant sur plus de 1.5 cm, **forte collimation par le champ magnétique**

Journée processus d'accélération en  
astrophysique - 3-5 octobre 2012 - IAP

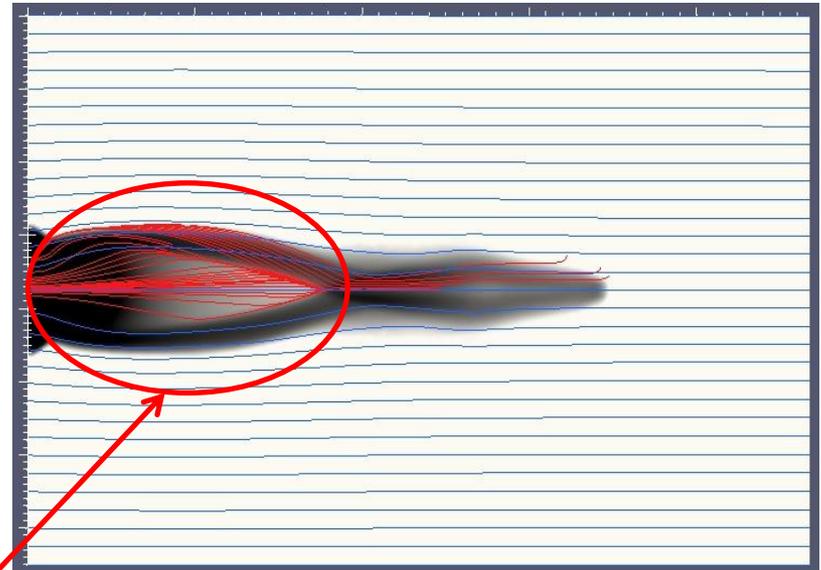
# Etude de l'évolution du jet : Un bon accord expérience/simulation

$I \sim 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> , Cible CH 10 ns après le début de l'interaction  
Champ magnétique 20 T

Expérience



Simulation

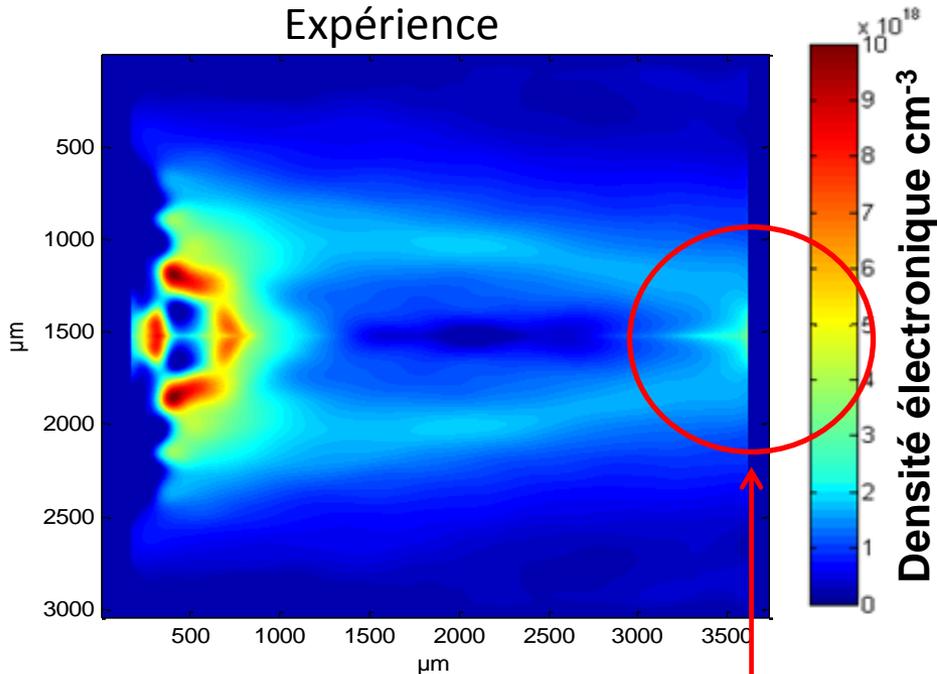


- Formation d'une cavité
- Compression du plasma

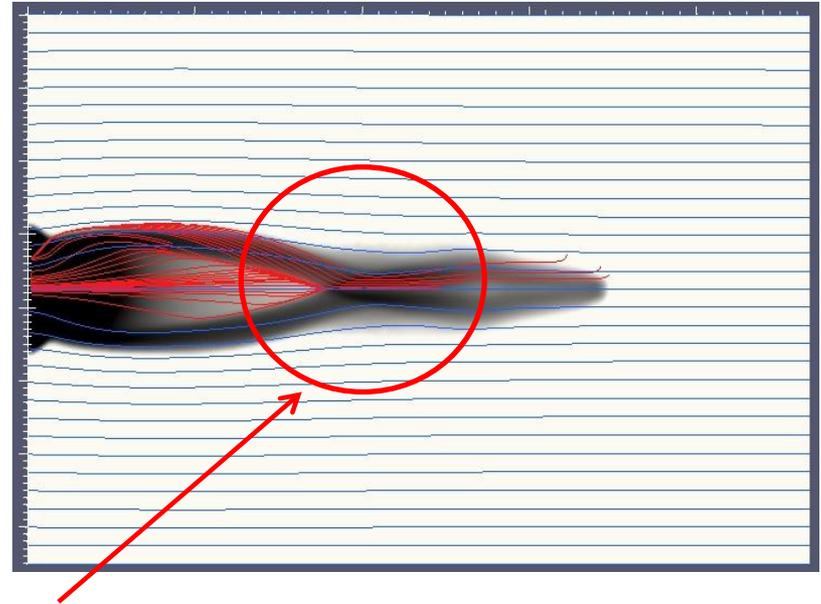
# Etude de l'évolution du jet : Un bon accord expérience/simulation

$I \sim 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> , Cible CH 10 ns après le début de l'interaction  
Champ magnétique 20 T

Expérience



Simulation

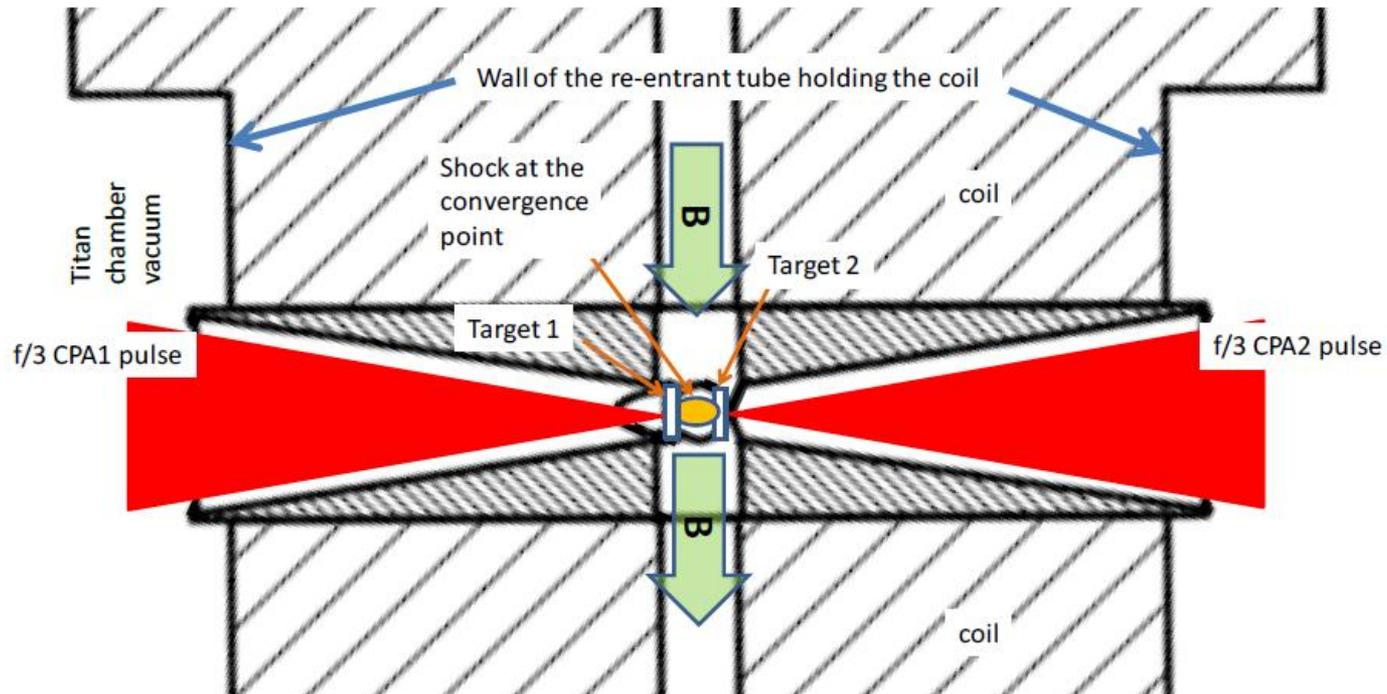


- Formation d'une cavité
- Compression du plasma

# Application 2 du projet ANR:

## Etude de chocs sans collisions et accélération de particules

Une expérience a été proposée pour être réalisée sur l'installation TITAN (LLNL) aux Etats-Unis

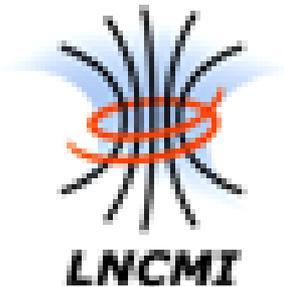




# Conclusions



- Un nouvel outil expérimental pour explorer un vaste champ d'étude-programme ANR 2012-2015 (LULI, LNCMI, CELIA, LERMA)
- Première expérience en régime magnétisé fort (20 T) avec un fort taux de répétition et une grande durabilité de la bobine (plus de 70 tirs)
- Observation d'une très forte collimation du plasma par le champ magnétique externe
- Les paramètres expérimentaux permettent une mise à l'échelle des phénomènes d'astrophysiques





# Perspectives



- Mécanisme de collimation du jet par un champ magnétique poloidal
- Interaction du jet avec un milieu ambiant
- Choc d'accrétion magnétisé
- Etude de chocs non-collisionnels et accélération de particules
- Accélération d'électrons
- Etude du schéma MTF (Magnetized Target Fusion)



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

Journée processus d'accélération en  
astrophysique - 3-5 octobre 2012 - IAP

**Merci pour votre attention !**