

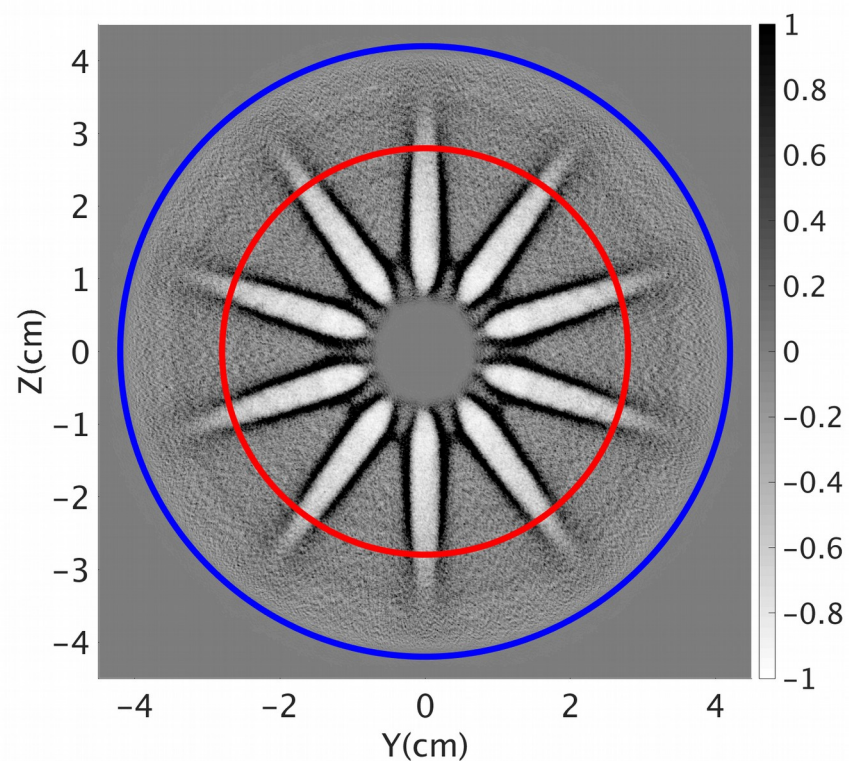
DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



Radiographie Proton : Intérêt pour la HEDP

-

R. Riquier, P.E. Masson-Laborde, S. Laffite (CEA)
C. K. Li (MIT), S. Wilks (LLNL)
G. Kluth, O. Morice and V. Tassin (CEA)



I – La radiographie par proton, c'est quoi ?

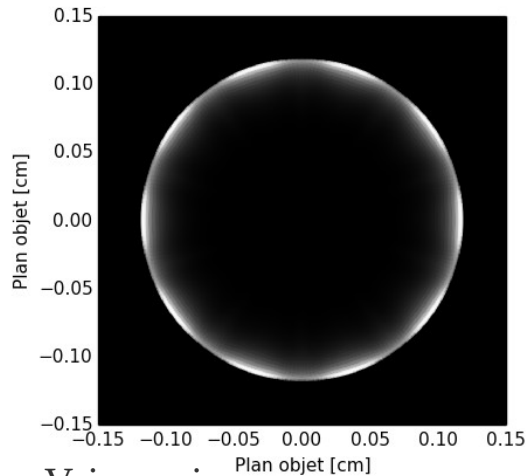
- La radiographie par proton est complémentaire des diag. d'imagerie.
- Deux méthodes de génération de protons : TNSA et PEX.
- On mesure des modulations de dose, fonction des gradients de champ E-M.
- On utilise ILZ, un code de trajectographie, pour simuler le diagnostic.
- Les applications sont très variées.

II – Exemple : interprétation d'une expérience de détente de paroi

- Contexte et principe expérimental.
- Estimer des champs E-M sans module MHD ?
- Le champ E donné par le code reproduit dans les grandes lignes la mesure...
- ... Mais est visiblement sous estimé par le code.
- On peut “bricoler” un champ **B**, mais cela ne remplace pas un module MHD 3D.

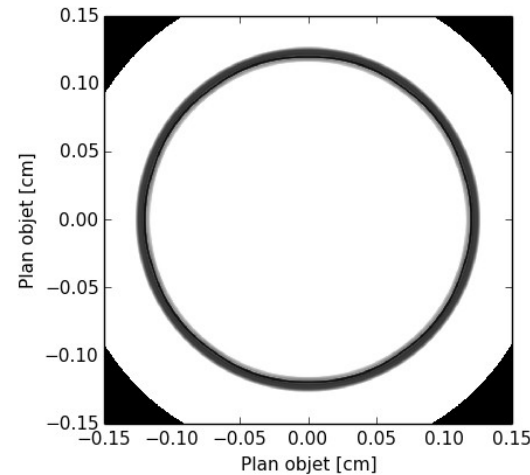
I - Pourquoi faire de la radiographie par protons ?

Voir différemment

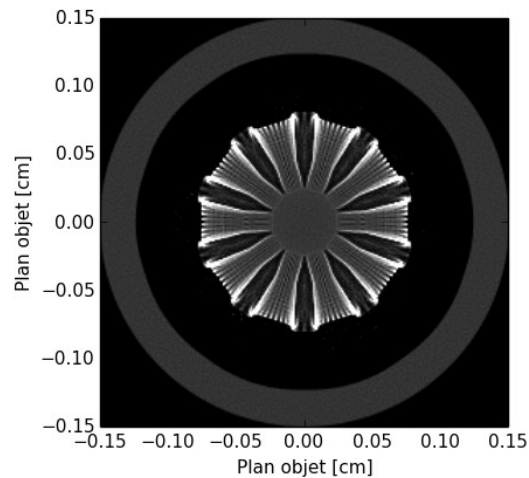


Imagerie X “durs”
Filtre Be (>2 keV)
Rep. XRFC (Omega)

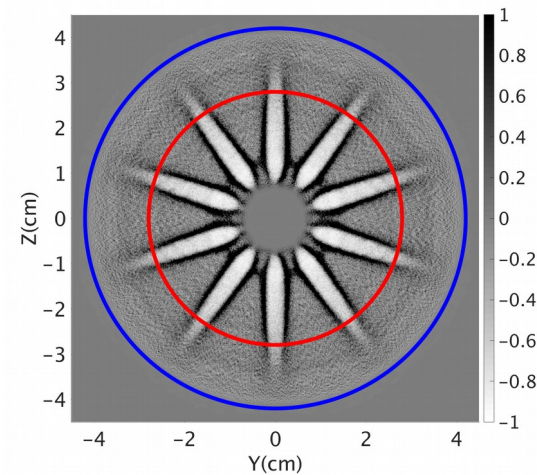
Voir aussi :
Huser, PoP **16**, 032703 (2009)



Radiographie X
Source 5,2 keV (V)
Filtre Be + V
Rep. XRFC (Omega)



Ombroscopie
Faisceau sonde 4ω



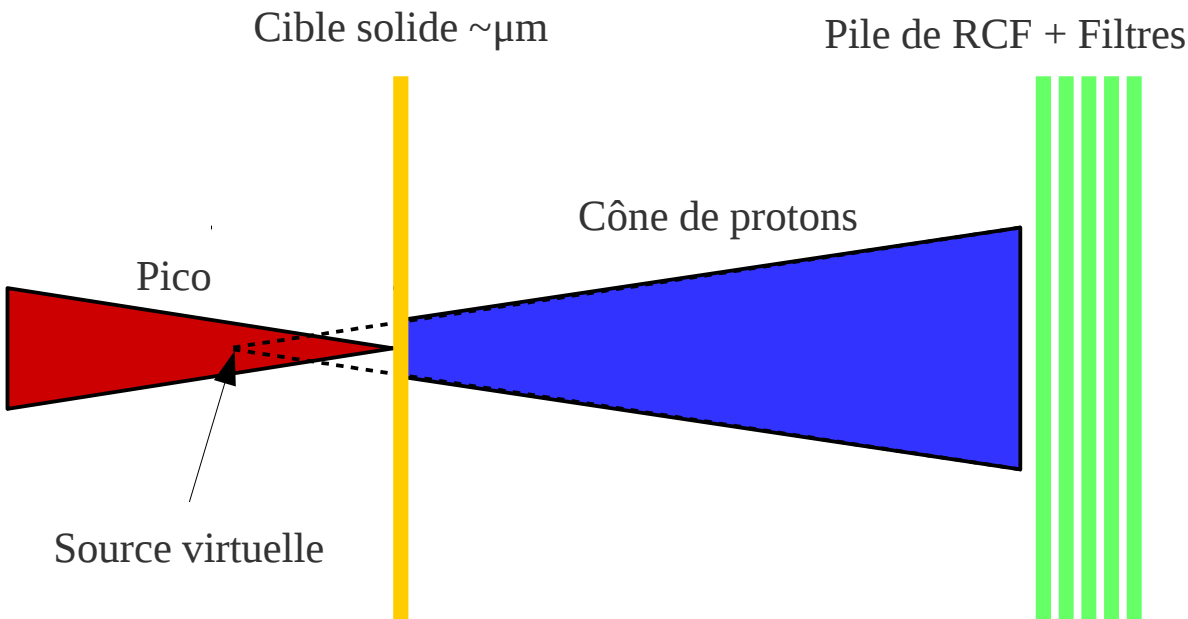
Radiographie protons
14,7 MeV

I - Deux options pour générer des protons :

1- Par TNSA

Où ? :

- Pico2000, LMJ-Petal, NIF-ARC, Orion, Omega-EP, ELFIE, Phelix, JLF-Titan, etc.



Avantages :

- Source virtuelle très petite (μm)
→ Bonne résolution spatiale
- Génération rapide (ps)
→ Bonne résolution temporelle
- Dose de proton importante
→ mesure sur RCF
- Spectre large
→ Mesure à différents instant, par temps de vol
→ énergie potentiellement $>20 \text{ MeV}$

Inconvénients :

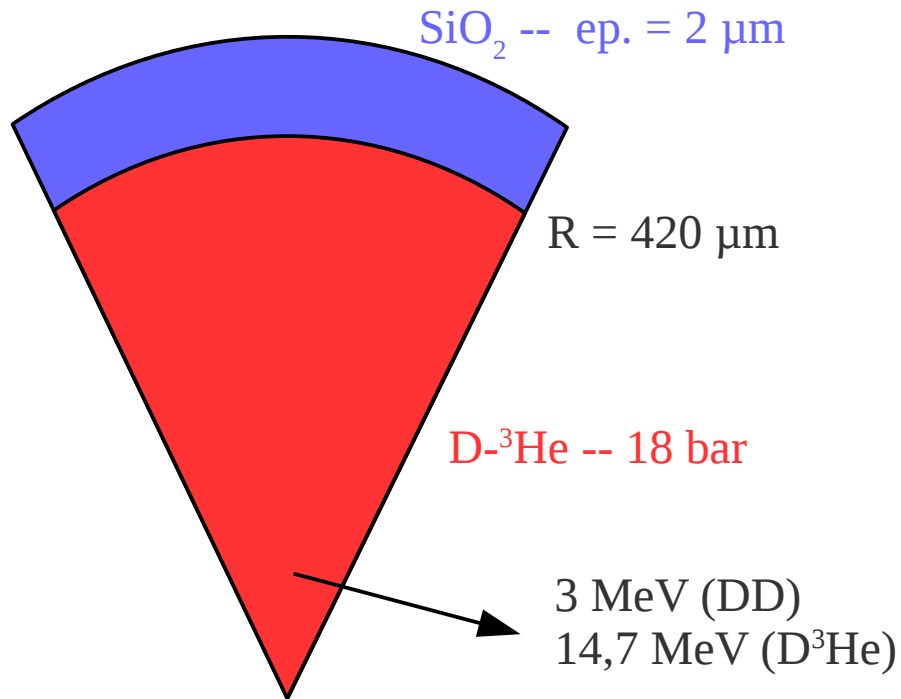
- Spectre large
→ superposition des “énergies”
- Dose anisotrope
→ inhomogénéités dans la référence
- Qualité “laser dépendante”
→ variations tir à tir
- Sensible au rayonnement X
→ le rayonnement de l'objet étudié ne doit pas ablater la cible source !

I - Deux options pour générer des protons :

2- *Par pousseur explosé*

Où ? :

- Omega, NIF, LMJ



Avantages :

- Très bonne reproductibilité
→ fonctionnement très robuste
- Source isotrope
→ et homogène
- Spectre discret
→ différentiel 3 – 14,7 MeV
→ pas de mélange des “énergies”

Inconvénients :

- Grosses installations
- Très faible dose
→ Mesure sur CR39 ...
- Source large (~ 100 μm)
→ taille du point chaud
- Génération lente (~ 100 ps)
→ durée de combustion
- Énergie max limitée à 14,7 MeV
→ réactions nucléaires

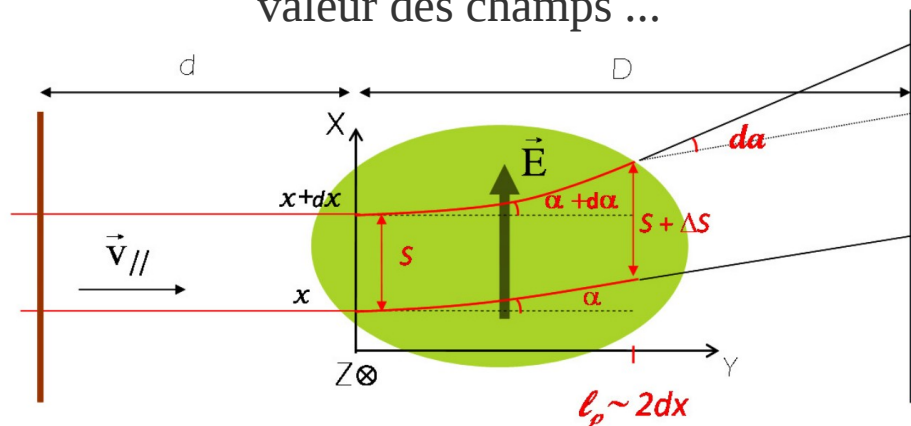
I - On observe des **modulations** de la dose de proton, à cause des **variations** des champs E-M

Les protons sont défléchis
par les champs **E** et **B** ...

$$\alpha = \frac{v_{\perp}}{v_{\parallel}} = \frac{eE_{\perp}l_p}{m_p v_{\parallel}^2} = \frac{1}{m_p v_{\parallel}^2} \int eE_{\perp} dy$$

$$\alpha = \frac{v_{\perp}}{v_{\parallel}} = \frac{eB_{\wedge}l_p}{m_p v_{\parallel}} = \frac{1}{m_p v_{\parallel}} \int eB_{\wedge} dy$$

... Plus ou moins selon la
valeur des champs ...



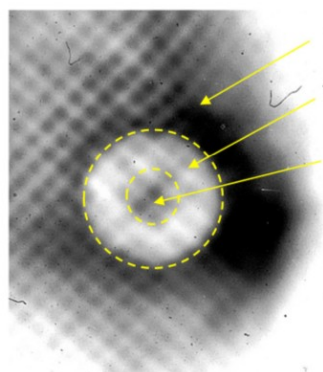
... Ce qui entraîne une
modulation de la dose.

$$\frac{\Delta n}{n} = -\frac{D}{M} \frac{d\alpha}{dx} = -\frac{D}{M} \frac{e l_p}{m_p v_{\parallel}^2} \frac{dE_{\perp}}{dx}$$

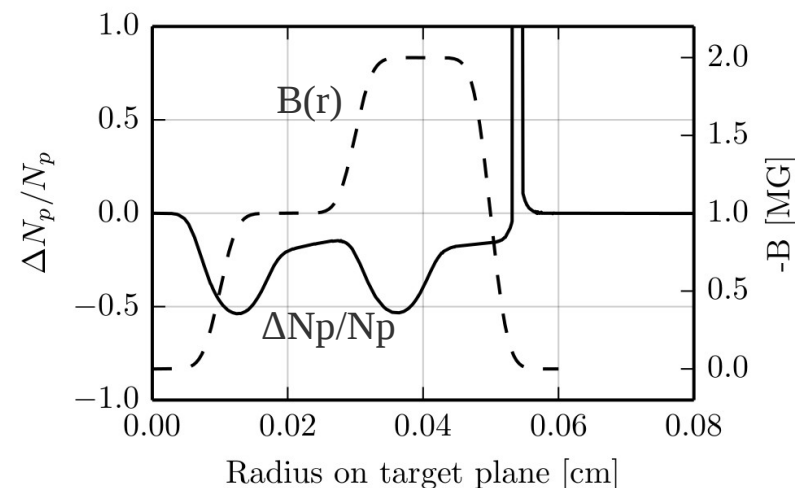
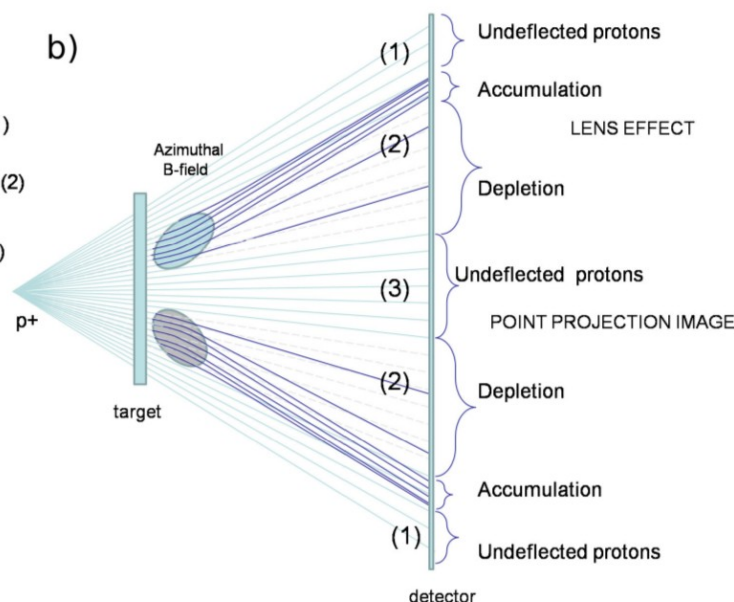
$$\frac{\Delta n}{n} = -\frac{D}{M} \frac{e l_p}{m_p v_{\parallel}} \frac{dB_{\wedge}}{dx}$$

Exemples :

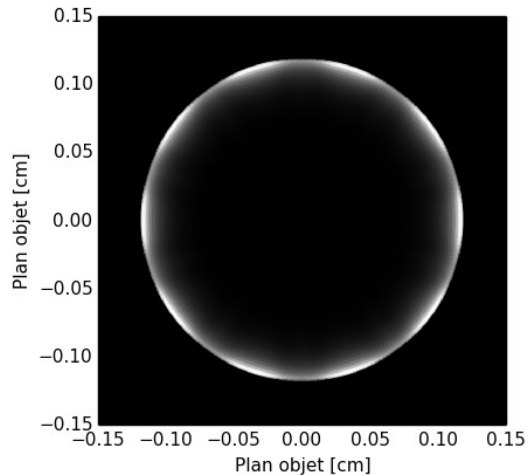
a)



b)

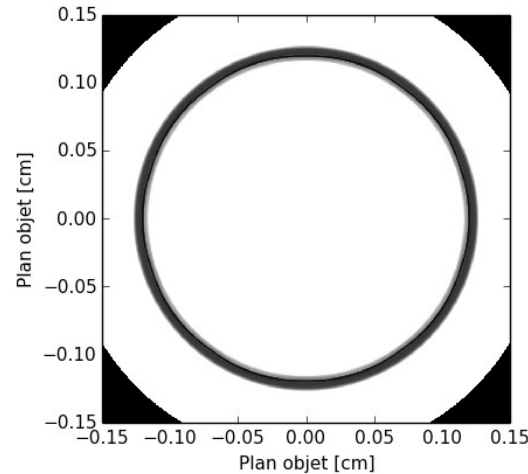


I - La radiographie proton mesure les **variations spatiales** des **champs E et B**, relativement **profondément** dans la matière.



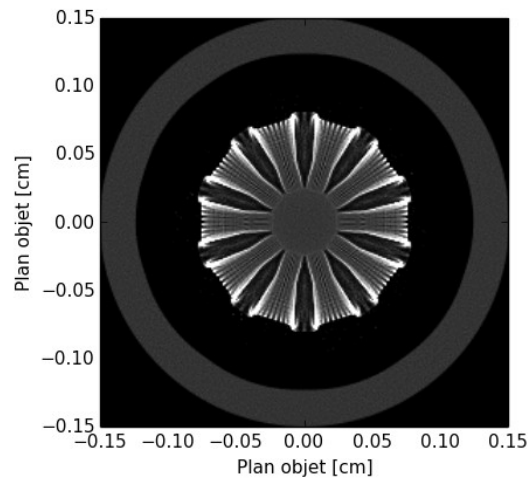
Imagerie X “durs”
Filtre Be
Rep. XRFC (Omega)

Émissivité(x,y)



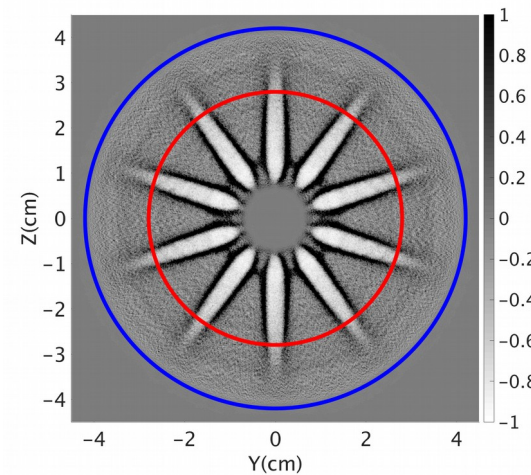
Radiographie X
Source 5,2 keV (V)
Filtre Be + V
Rep. XRFC (Omega)

Opacité(x,y)



Ombroscopie
Faisceau sonde 4ω

Absorption(x,y)

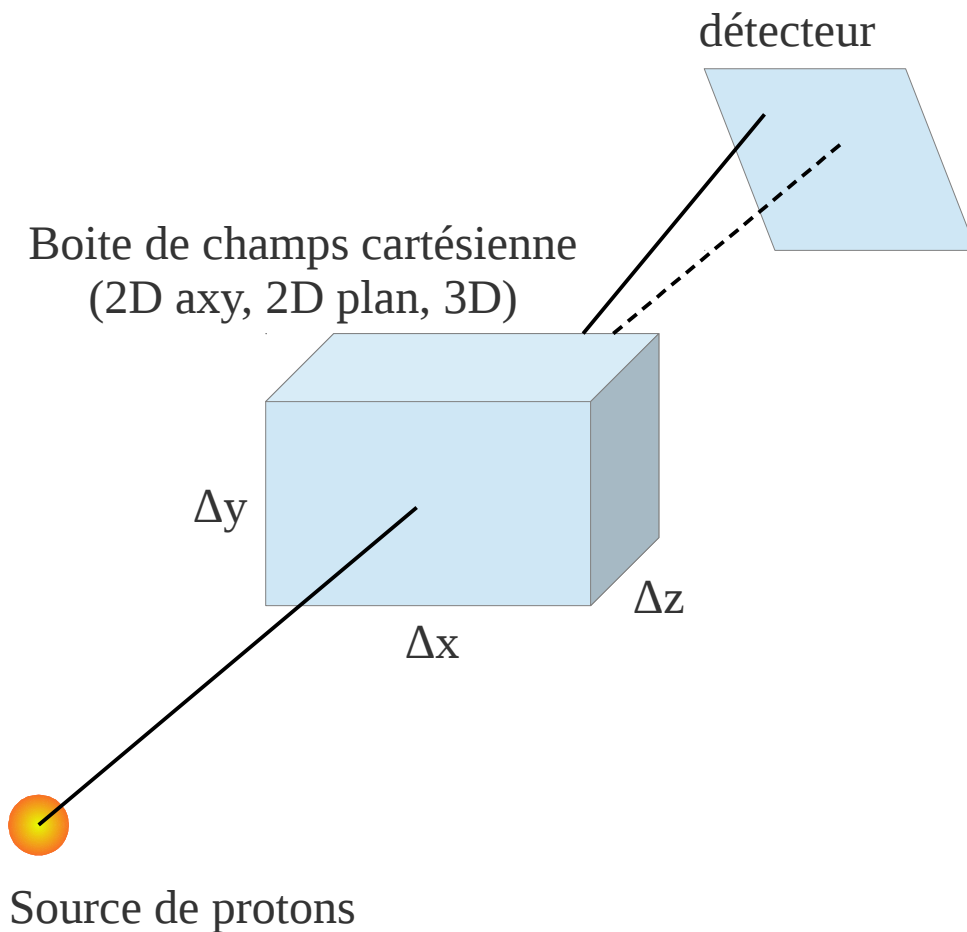


Radiographie protons
14,7 MeV

Gradient E ou B (x,y)

I - La déconvolution de mesures est complexe

On préfère convoluer des champs simulés / analytiques

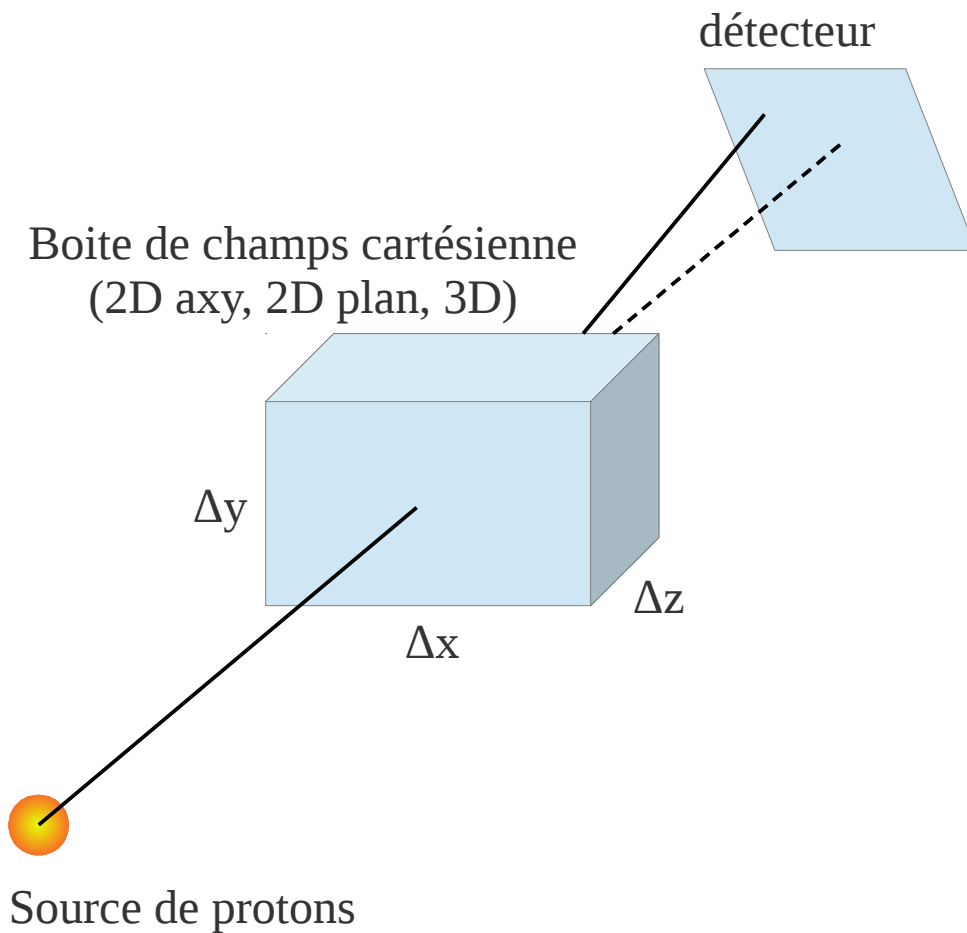


ILZ est un squelette de code PIC :

- 1) Les ions sont initialisés sur une source ponctuelle ou étendue.
- 2) Ils sont projetés sur la boîte de champs E et B.
- 3) A chaque itération :
 - On **interpole les champs** E et B à la position de chaque ion (ordre 0, 1 ou 2).
 - Les ions sont déplacés par un **pousseur électromagnétique** classique (méthode de Boris).
- 4) Lorsque tous les ions sont sortis :
 - trajectoire balistique sur le plan du détecteur.
- 5) La **dose** de chaque ion est déposé par **interpolation** dans les cellules du détecteur (~ assignation de charge d'un code PIC)

I - La déconvolution de mesures est complexe

On préfère convoluer des champs simulés / analytiques



Pourquoi un code séparé / « hors ligne » :

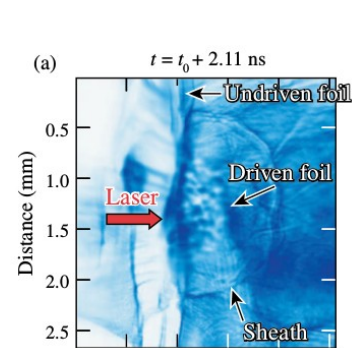
- Indépendant de ce qui génère les champs :
 - Hydro Lag
 - Hydro Euler
 - PIC
 - Hybride
 - Analytique
- On peut facilement manipuler les champs

Ce qu'il ne fait pas / Qu'il faut coder :

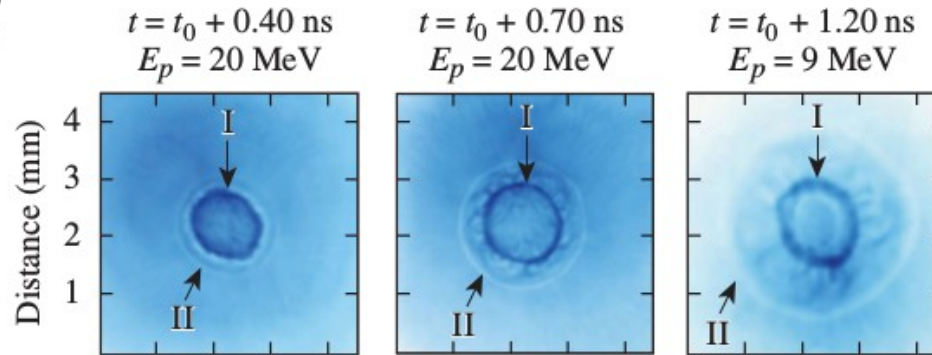
- Interaction avec la matière :
 - Diffusion des ions
 - Ralentissement des ions
- Source spectrale / pile de RCF
- On suppose un champ **stationnaire**

I - Des applications très variées

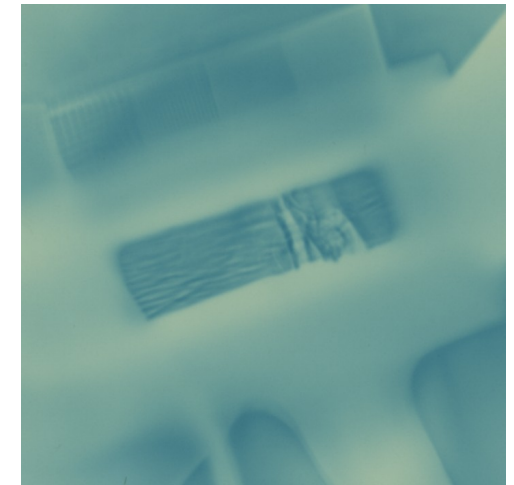
Gao – PRL **109**, 115001 (2012)



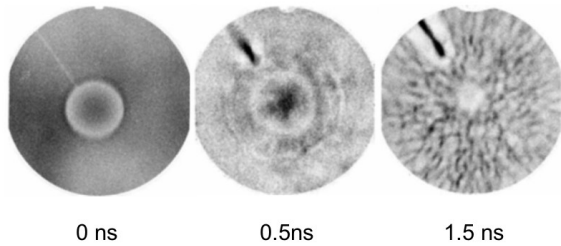
Gao – PRL **114**, 215003 (2015)



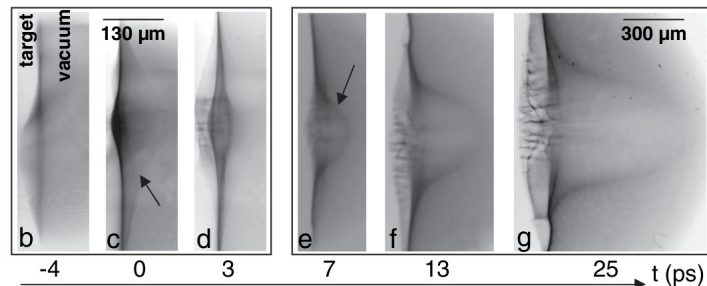
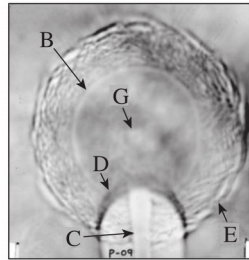
Courtois, Rousseaux, Loiseau à
Omega-EP



Li – PoP **16**, 056304 (2009)

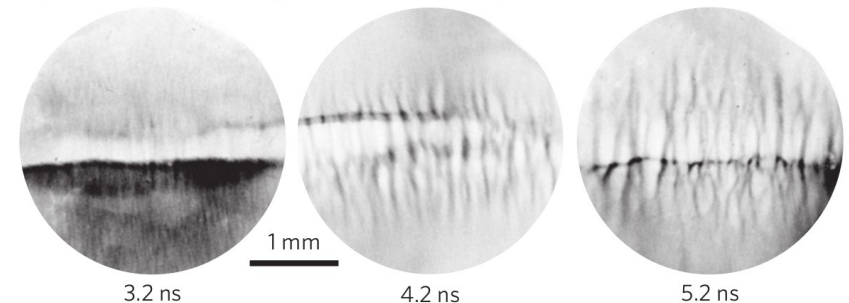


Igumenshchev – PoP **21**, 062707 (2014)



Romagnani
PRL **95**, 195001 (2005)

Huntington - Nat. Phys. **11**, 173 (2015)
Experimental proton radiographs from 14.7 MeV ($D-^3He$) protons



II - Contexte FCI : *interprétation d'une expérience de détente de paroi*

Motivations :

- En FCI, la **détente des bulles** externes est problématique. Qu'en est il des effets **3D** ?
- Plusieurs mesures de radio protons ont été effectuées par le groupe du MIT dans des **cylindres** (Au et CH, vide et remplis de gaz, **différents éclairagements**).

Notre apport :

- Hypothèse : les structures observées sont attribuées au **champ électrique** dû au gradient de pression.
- Notre chaîne de calcul **TROLL 3D + ILZ** nous permet de simuler l'expérience et le diagnostic.

Conclusions :

- La détente des bulles est toujours 3D, même avec un nombre important de faisceaux.
- Les structures observées peuvent être reproduites uniquement avec le champ **E**.
- Un module de MHD en 3D est nécessaire pour prendre correctement en compte le champ **B**.

II - Schéma expérimental (Omega) : *différents éclairagements*

Représentation :

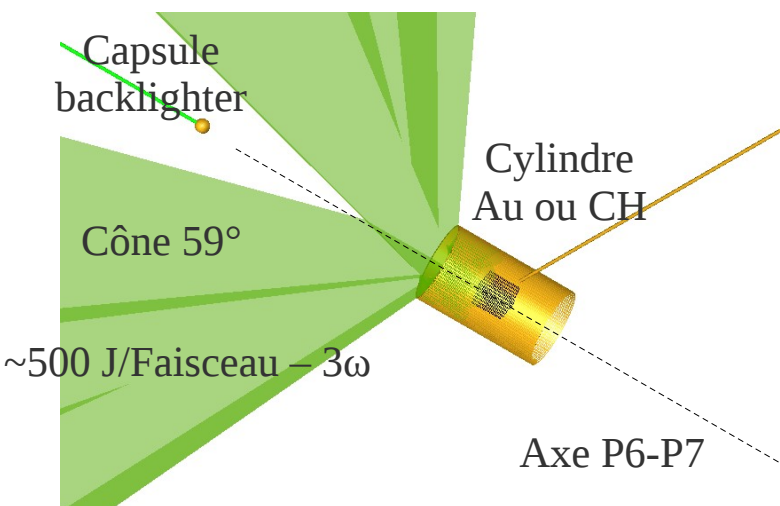
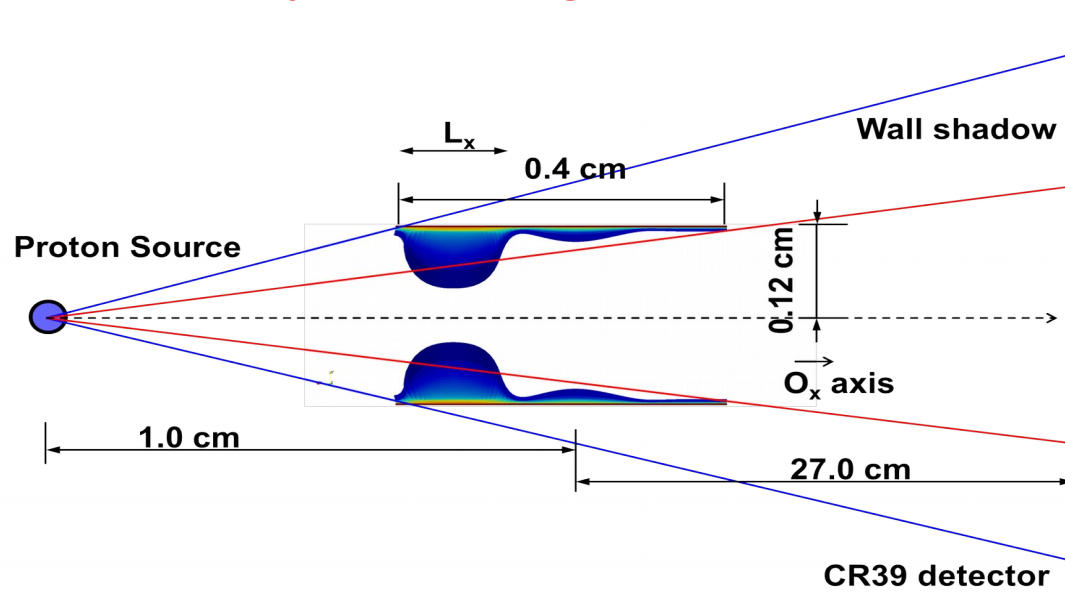
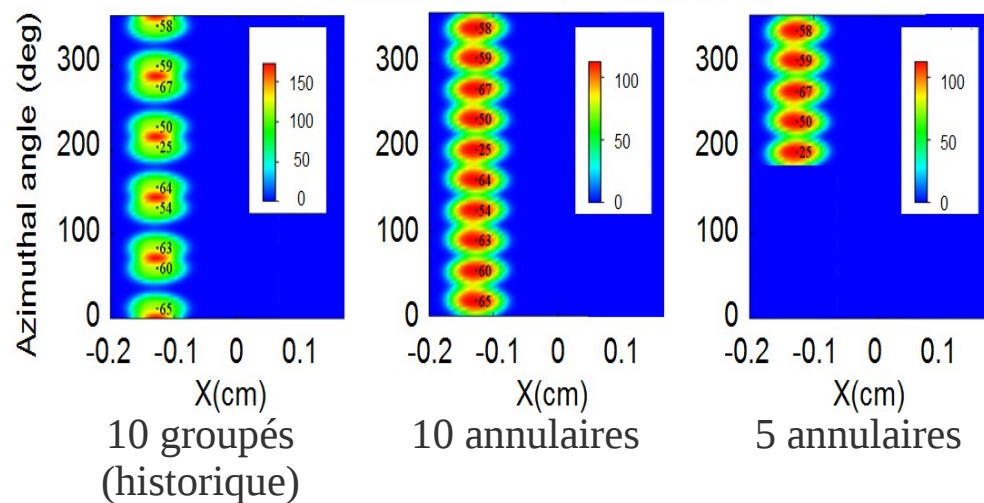


Schéma du système d'imagerie :



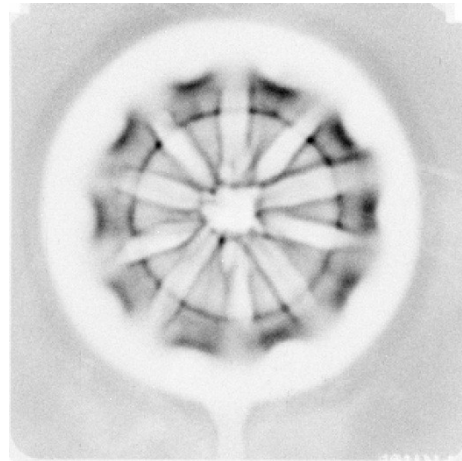
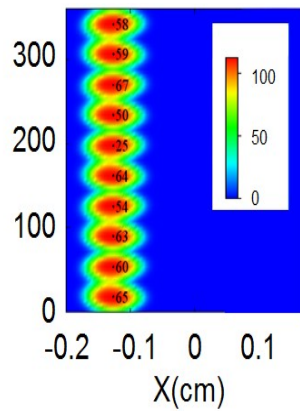
Trois éclairagements :

Total Laser power deposited (TW/cm²)



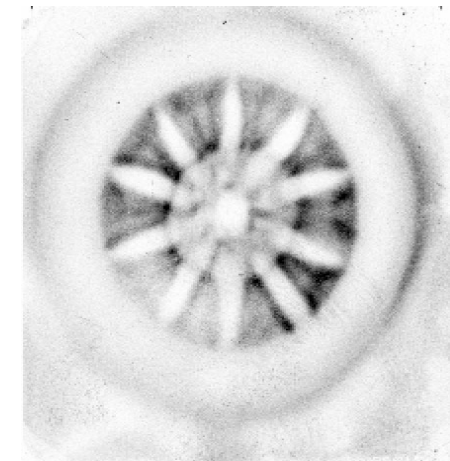
II - Résultats typiques

10 annulaires :



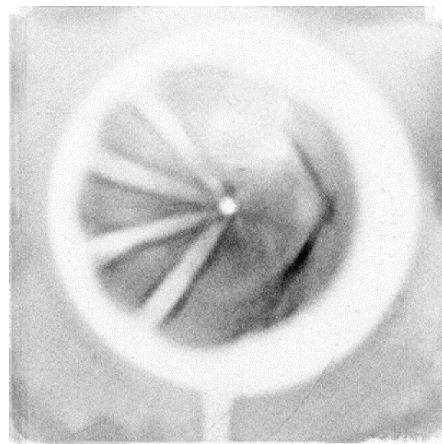
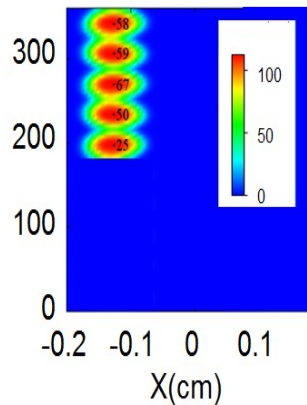
Au $t = 1,3$ ns

et



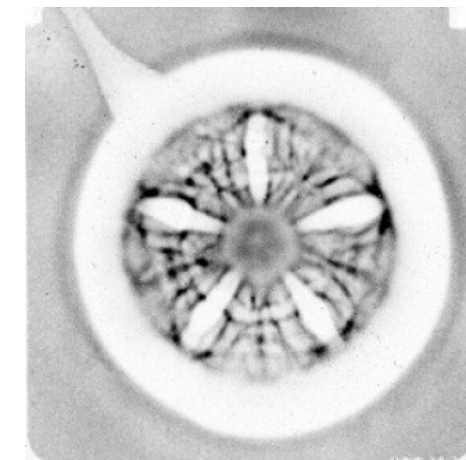
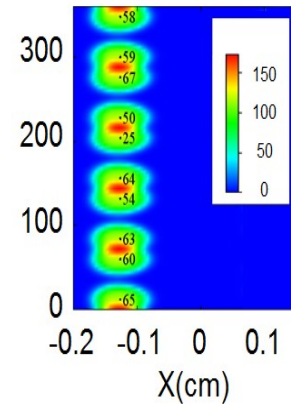
CH $t = 0,8$ ns

5 annulaires :



Au $t = 1,3$ ns

10 groupés :



Au $t = 1,0$ ns

II - D'où viennent nos champs électro-magnétiques ?

Loi d'Ohm généralisée :

$$\mathbf{E} = -\underbrace{\frac{\nabla p_e}{en_e}}_{\text{Source thermo-electrique}} - \underbrace{\frac{\bar{\beta} \cdot \nabla T_e}{e}}_{\text{Nernst}} - \underbrace{\mathbf{v} \times \mathbf{B}}_{\text{Advection par le fluide}} + \underbrace{\frac{\bar{\alpha} \cdot \nabla \times \mathbf{B}}{\mu_0}}_{\text{Diffusion résistive}} + \underbrace{\frac{(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}}{en_e \mu_0}}_{\text{Effet Hall}}$$

$\mathbf{E}_{\text{Spitzer-Härm}}$

Loi de Faraday :

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E}$$

B pose problème !

→ Il dépend de l'historique de l'interaction

Dans un premier temps : $\mathbf{E} = -\frac{\nabla p_e}{en_e}$

→ Peut il expliquer à lui seul les radiographie mesurées ?

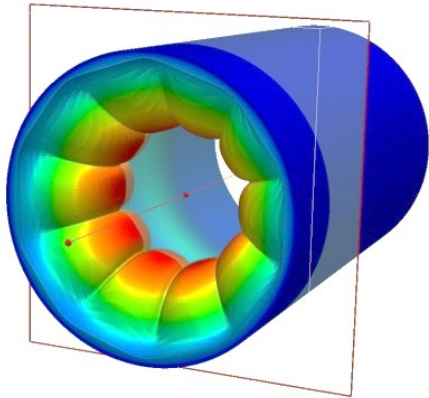
II - Simulations hydro. 3D : Le code TROLL

Des sur-densités se forment entre les bulles

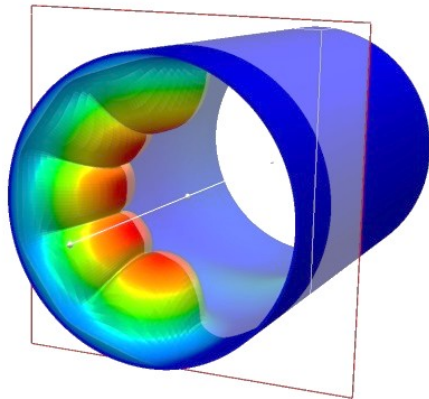
Troll est notre code d'hydrodynamique radiative 3D :

- Lagrange (+ ALE), Maillages structurés / non-structurés, Transport radiatif, HETL, etc.

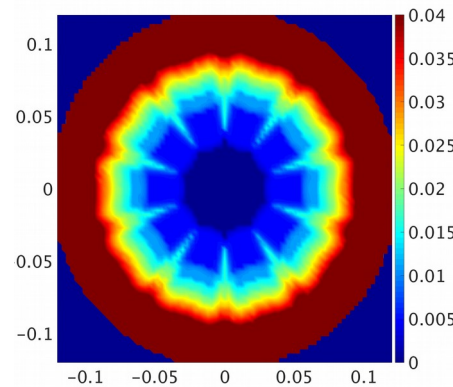
Vitesse fluide



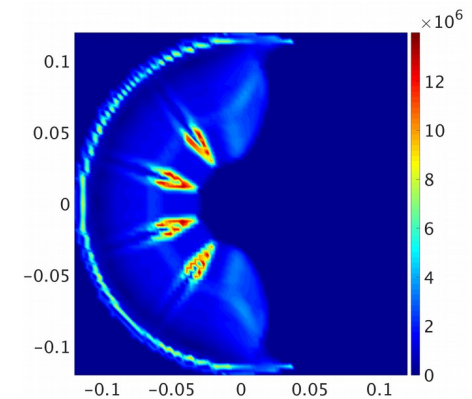
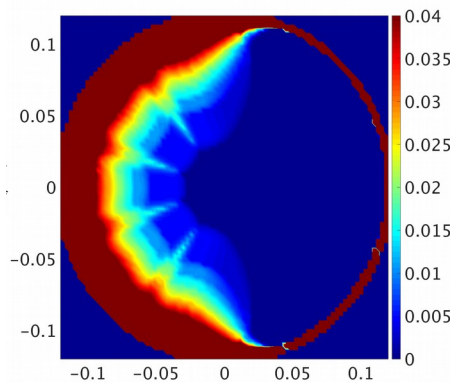
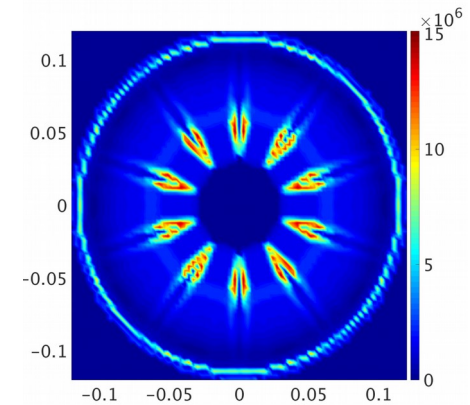
Au $t = 1,2 \text{ ns}$



Ne



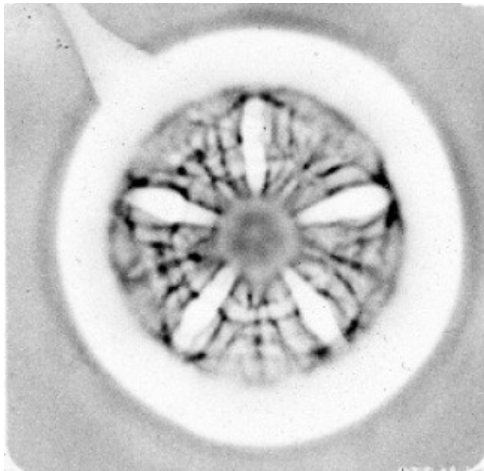
E transverse



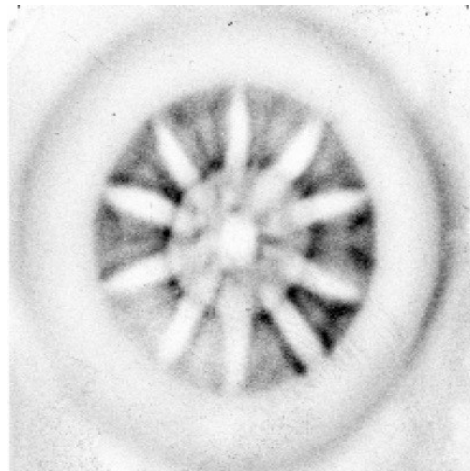
II - Simulations ILZ en post-processeur : *la topologie est reproduite avec ces champs E*

On reproduit qualitativement les structures ...

Au $t = 1,0$ ns

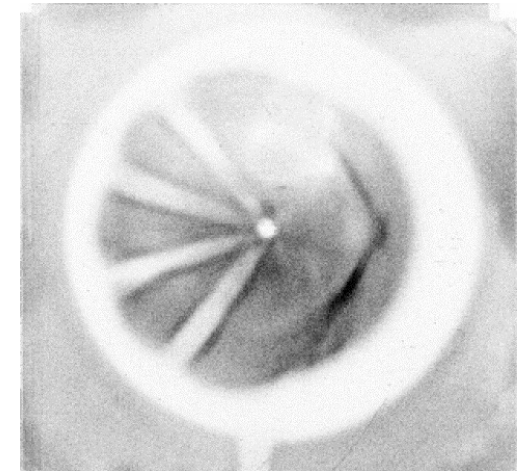


CH $t = 0,8$ ns



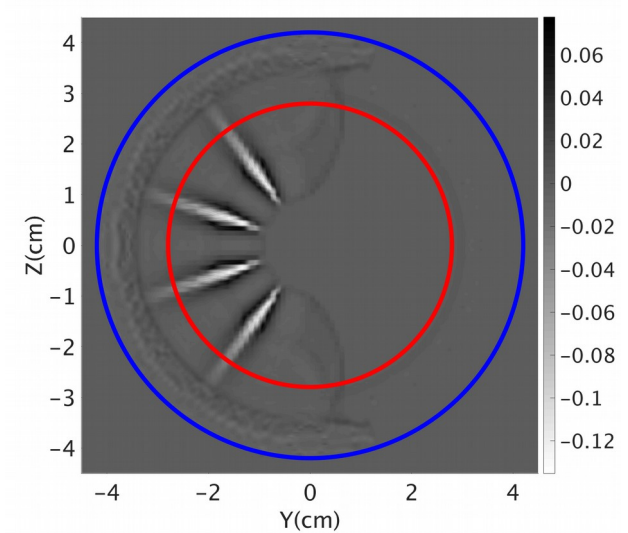
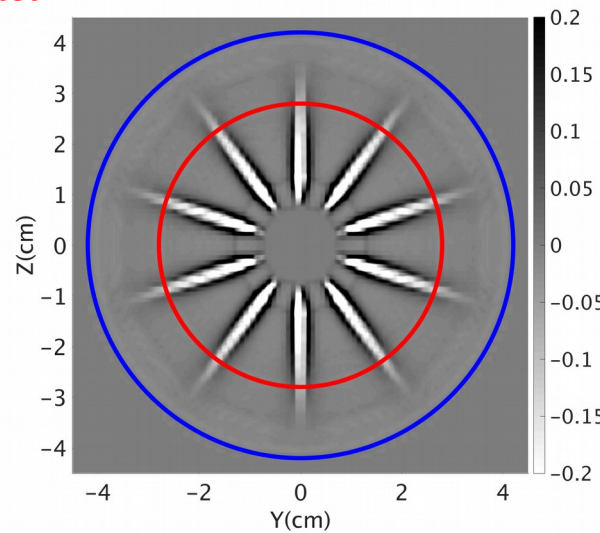
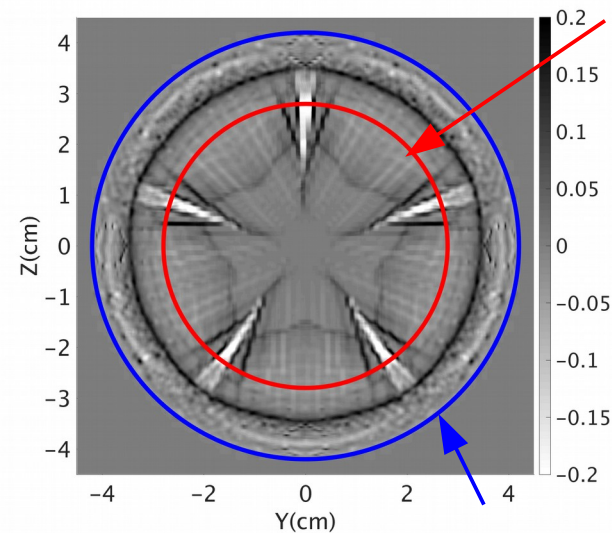
... mais pas leur taille

Au $t = 1,3$ ns



TEL détecteur

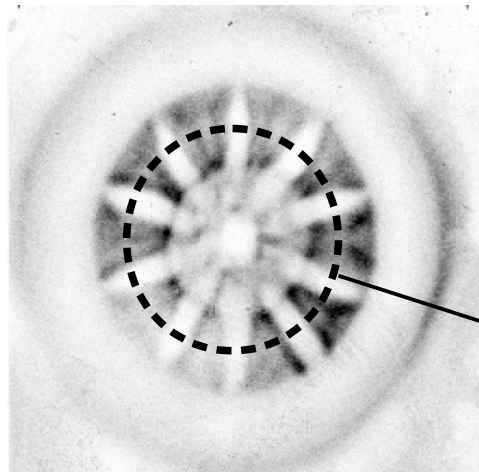
TEL source



II - Le champ E peut être estimé expérimentalement

$$E_{\text{exp}} \sim 10 \times E_{\text{sim}}$$

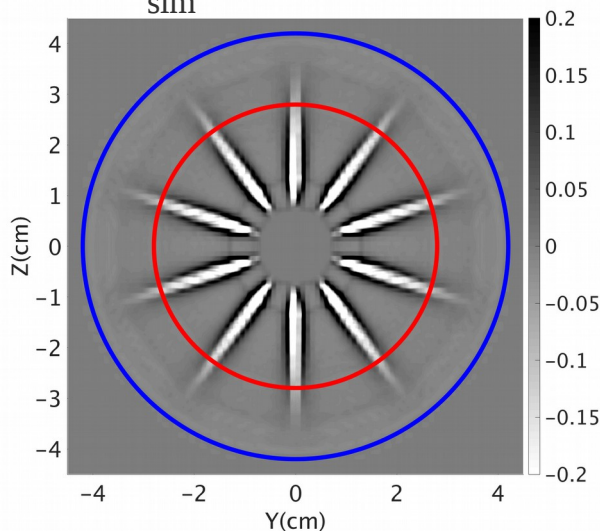
CH $t = 0,8 \text{ ns}$



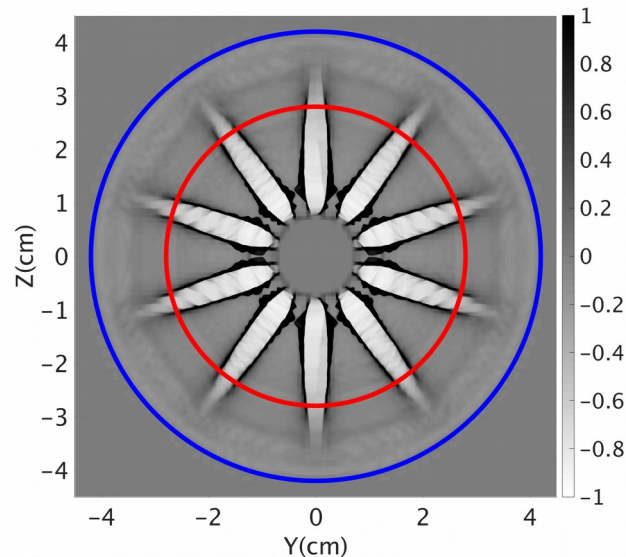
$$\frac{\delta n}{n_p}(\theta)$$

$$|\nabla_{\perp} \cdot \mathbf{E}_{\perp}| = \frac{2\epsilon_P M}{e D L_x} \left| \frac{\delta n}{n_p} \right| \xrightarrow{\sim 0,8} \xrightarrow{\sim 200 \mu\text{m}} \mathbf{E}_{\text{exp}} \sim 4.10^8 \text{ V/m}$$

$E_{\text{sim}} \sim 5.10^7 \text{ V/m}$



$E \times 10$



La **taille** et l'**amplitude** des modulations sont restituées

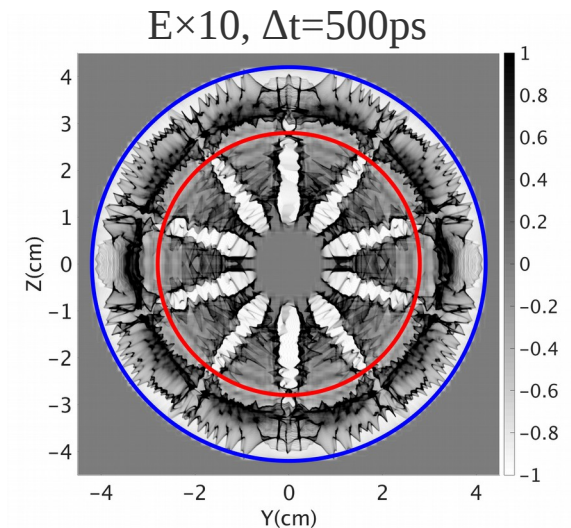
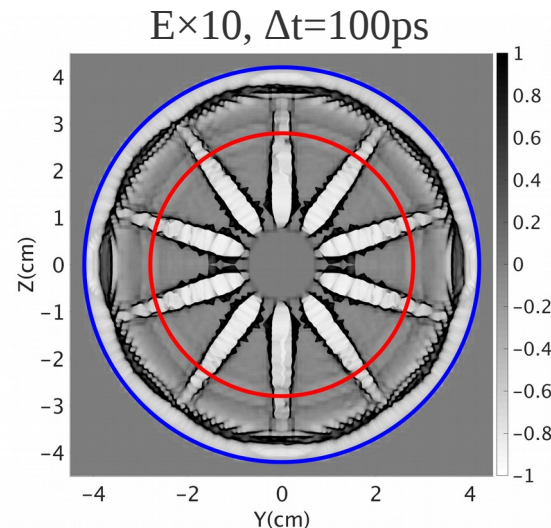
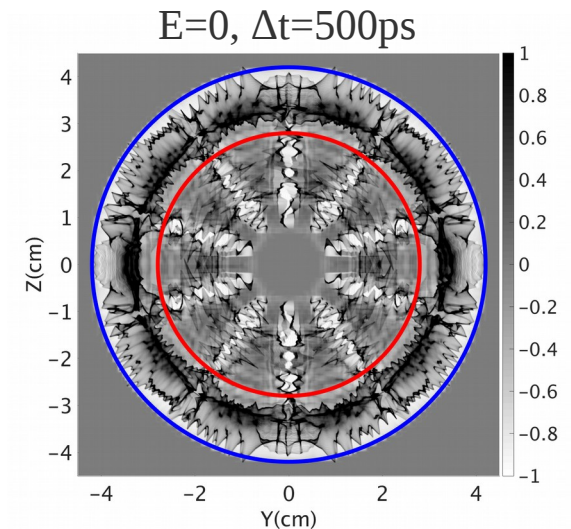
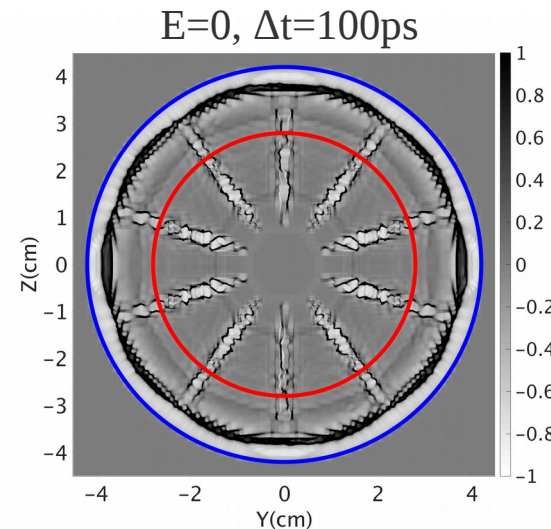
II - Une estimation très grossière du champ B

Source auto-générée (biemann battery) :
$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times \left(\frac{\nabla p_e}{en_e} \right)$$

Deux hypothèses drastiques :

- Le champ B n'est pas transporté
- Le temps d'intégration ?

Un module MHD en 3D est indispensable pour faire une étude plus rigoureuse !



I – La radiographie par proton, c'est quoi ?

- La radiographie par proton est complémentaire des diag. d'imagerie.
- Deux méthodes de génération de protons : TNSA et PEX.
- On mesure des modulations de dose, fonction des gradients de champ E-M.
- On utilise ILZ, un code de trajectographie, pour simuler le diagnostic.
- Les applications sont très variées.

II – Exemple : interprétation d'une expérience de détente de paroi.

- Contexte et principe expérimental.
- Estimer des champs E-M sans module MHD ?
- Le champ E donné par le code reproduit dans les grandes lignes la mesure...
- ... Mais est visiblement sous estimé par le code.
- On peut “bricoler” un champ **B**, mais cela ne remplace pas un module MHD 3D.

