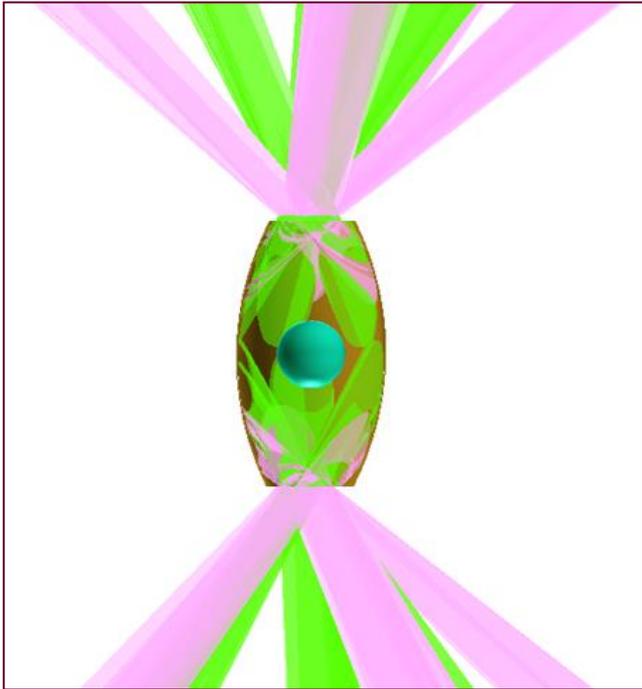


DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Première campagne expérimentale de fusion par confinement inertiel en attaque indirecte sur le LMJ

S. Liberatore, P. Gauthier, J.L. Willien, P.-E. Masson-Laborde
F. Philippe, X. Vaisseau, O. Landoas

Les premières expériences de production de neutrons sur le LMJ en attaque indirecte ont eu lieu du 16/10 au 21/11/2019.

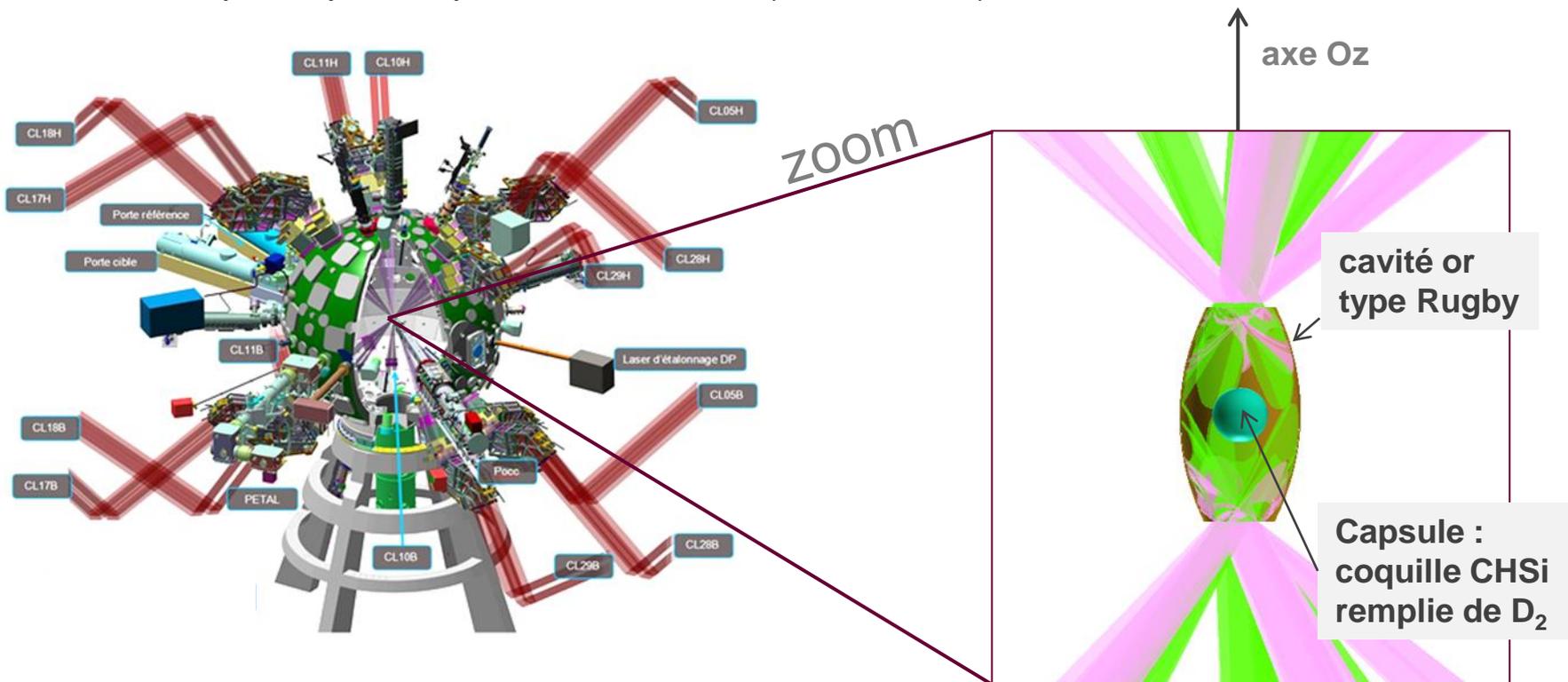


- ❑ Schéma de principe : **implosion d'une capsule gazeuse** de rayon $\sim 1\text{mm}$ (remplie au deutérium D_2) placée dans une **cavité en or**, vide.
- ❑ Objectifs :
 - Une **production neutronique mesurable**, avec une cible pertinente pour nos programmes (attaque indirecte).
 - Démontrer une **bonne capacité de prévision de nos simulations**.
 - **Améliorer nos outils de simulation** pour les futures expériences.

1. Configuration et contraintes expérimentales
2. Fonctionnement des capsules gazeuses
3. Dimensionnement des cibles : entre robustesse et performance
4. Interprétation

1. Configuration et contraintes expérimentales
2. Fonctionnement des capsules gazeuses
3. Dimensionnement des cibles : entre robustesse et performance
4. Interprétation

LASER : 12 quadruplets répartis sur 2 cônes (49° et 33.2°)

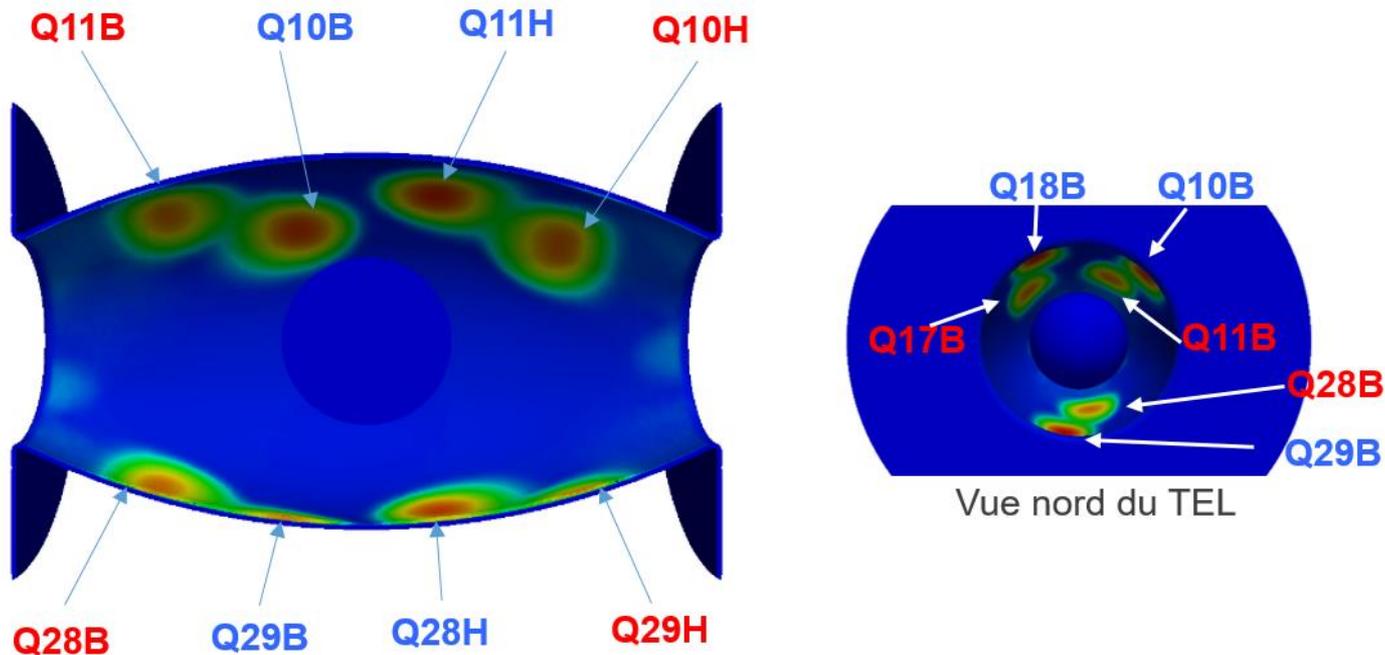


Une puissance laser crête d'environ 55 TW pour 150 kJ sur 3 ns

Irradiation 3D

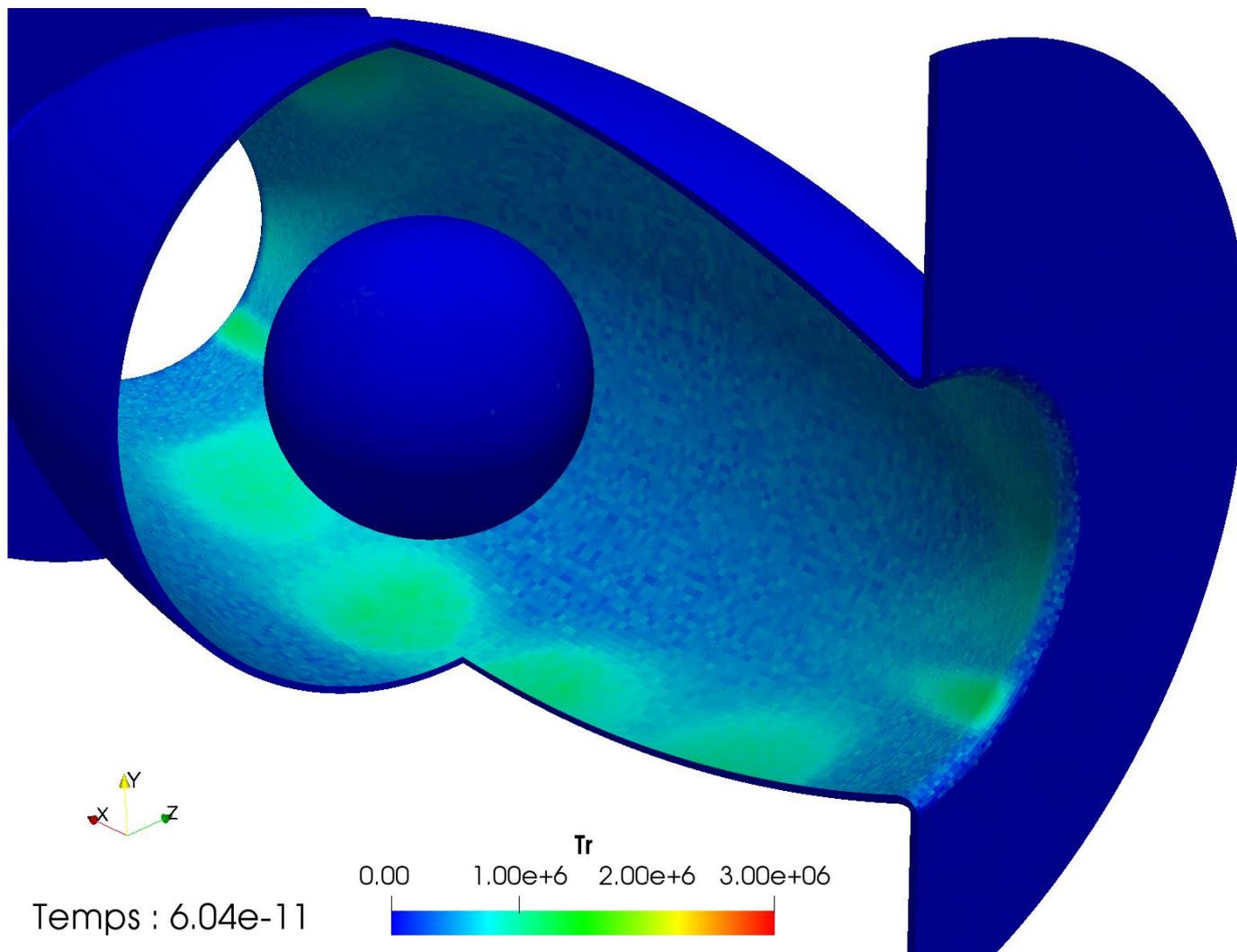


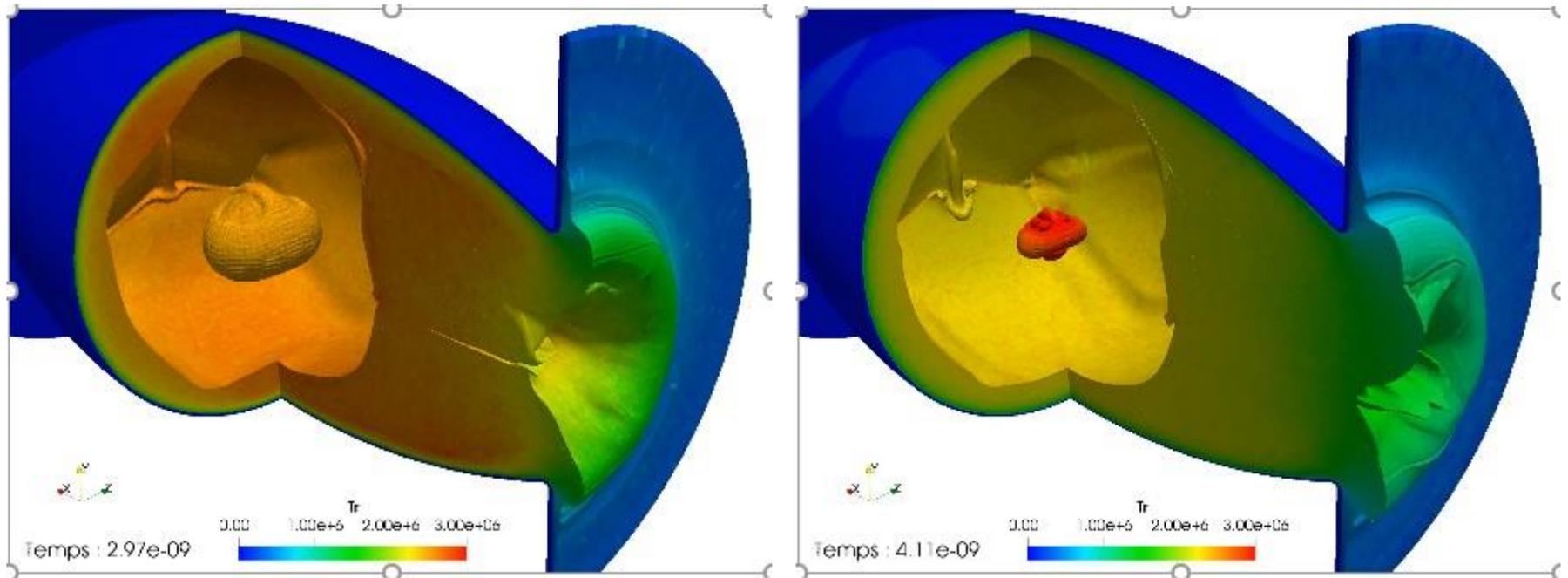
Une implosion 3D de la capsule



Le nom des quadruplets visibles est indiqué ; B pour ceux venant du bas de la chambre et H pour ceux venant du haut. En rouge les externes (49°) en bleu les internes (33.2°)

Exemple : film montrant cette configuration 3D,
on ne montre que le gaz de capsule et la cavité



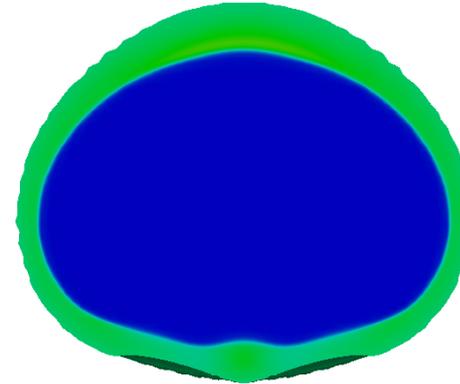
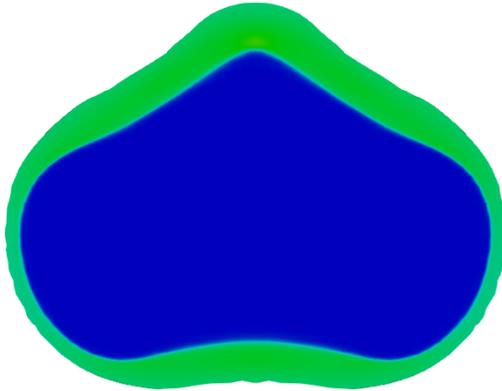
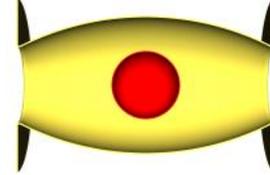


Exemple : film montrant cette configuration 3D, coupes équatoriale et longitudinale (module de la vitesse)

équatoriale



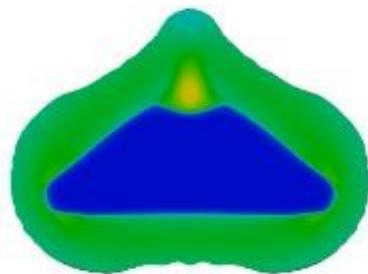
longitudinale



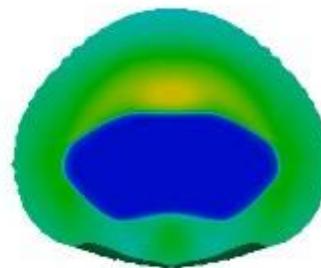
Combustible
D₂ : vitesse.



Temps : 2.70e-09



3 ns



4 ns

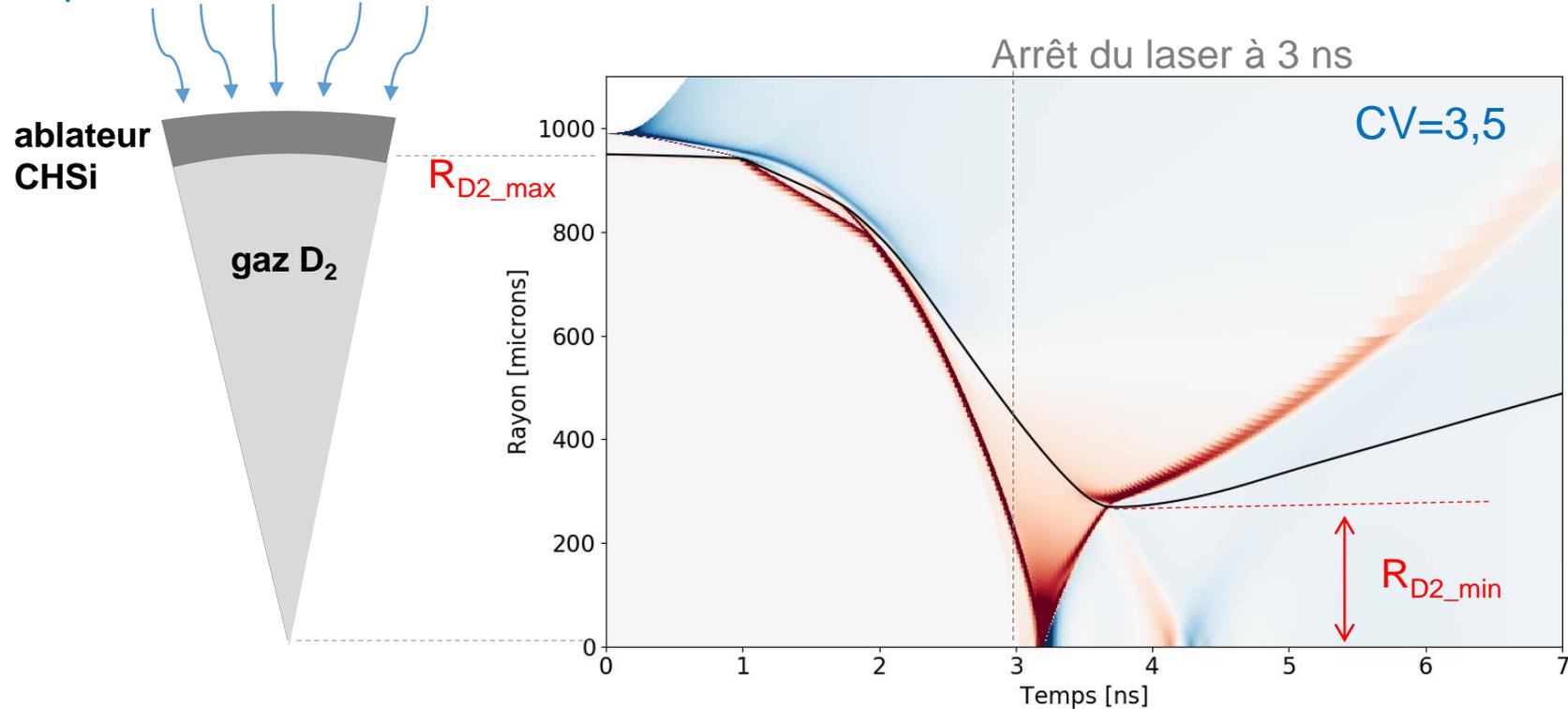


1. Configuration et contraintes expérimentales
2. Fonctionnement des capsules gazeuses
3. Dimensionnement des cibles : entre robustesse et performance
4. Interprétation

Fonctionnement¹ de nos capsules gazeuses : on limite l'implosion en générant un choc fort

Flux X (F_x) produit par la cavité
Température radiative T_r : $F_x \propto T_r^4$

CV : rapport de convergence = R_{D2_max} / R_{D2_min}



Exemple :

Rayon combustible $R_{D2} = 950 \mu\text{m}$

Épaisseur ablateur $e_{abl} = 40 \mu\text{m}$

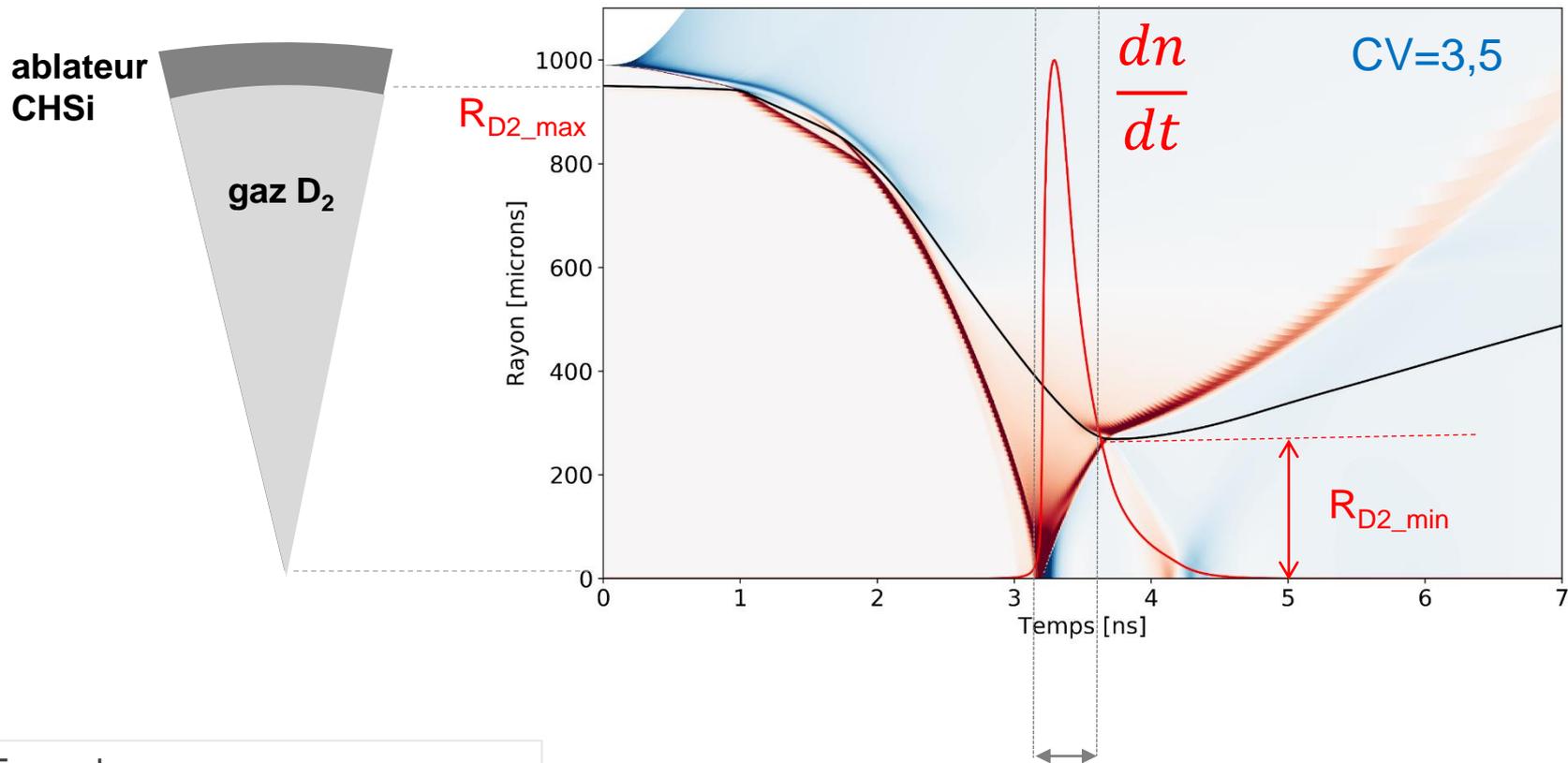
$T_{rmax} = 220 \text{ eV}$

¹ S. Le Pape et al PRL, 112, 225002 (2014) ;
J. Lindl et al POP, 21, 020501 (2014)

Fonctionnement de nos capsules gazeuses : neutrons produits surtout au passage du choc rebond

CV : rapport de convergence = R_{D2_max} / R_{D2_min}

Nombre de neutrons produits : n

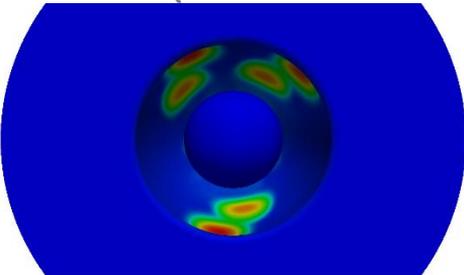


Exemple :

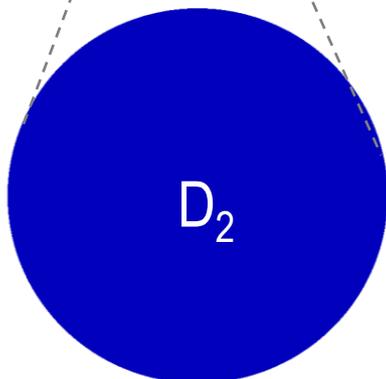
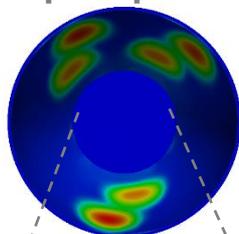
Rayon combustible $R_{D2} = 950 \mu\text{m}$
 Epaisseur ablateur $e_{abl} = 40 \mu\text{m}$
 $T_{rmax} = 220 \text{ eV}$

Production de neutrons surtout durant le passage du choc rebond : « neutrons de choc » (84% de 2×10^{11} neutrons pour cet exemple).

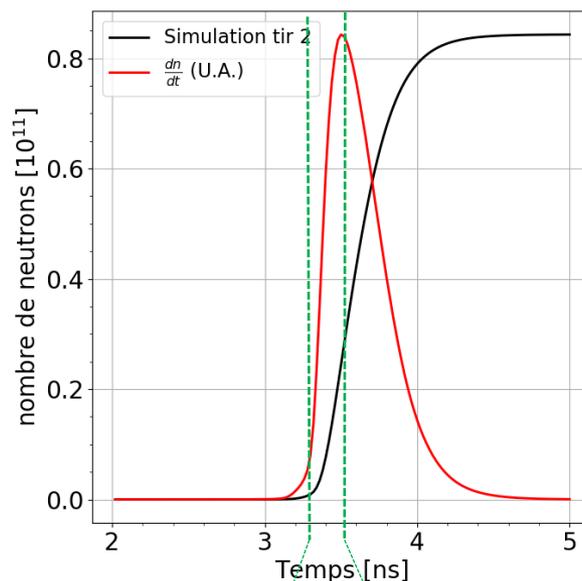
Vue TEL (ablateur non montré)



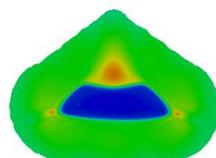
Coupe équatoriale



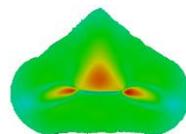
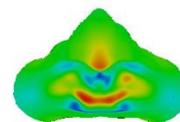
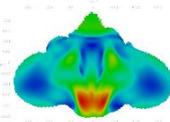
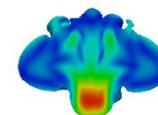
coupe équatoriale

Cavité A, $R_{D_2} = 950 \mu\text{m}$, $e_{abl} = 40 \mu\text{m}$

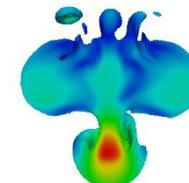
Un « jet » de D_2
 entraîne l'arrêt de la
 production neutronique.

CV $\sim 3,5$ 

3,2ns

3,32 ns
focalisation3,5 ns
Bang Time3,75ns
volumes min

4 ns



5 ns

Représentation onde de choc par la vitesse (typiquement entre 450 et 850 km/s à la focalisation)

1. Configuration et contraintes expérimentales
2. Fonctionnement des capsules gazeuses
3. Dimensionnement des cibles : entre robustesse et performance
4. Interprétation

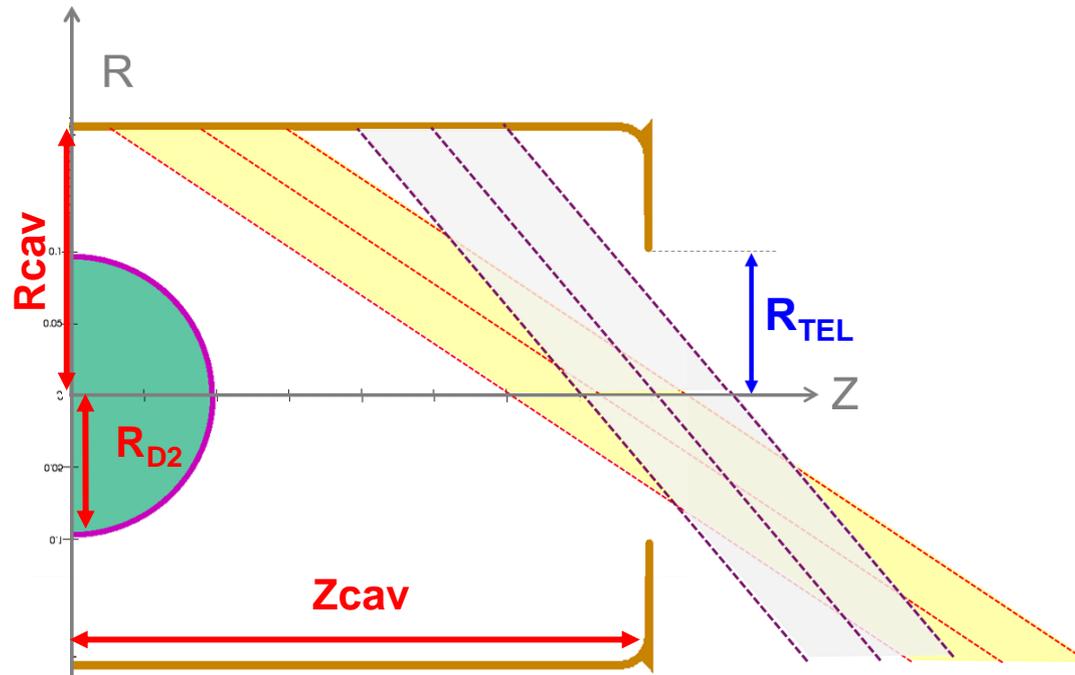
Pré-dimensionnement 2D : quelles sont les Tr accessibles pour quelles cibles ?

❑ Contraintes pour dimensionner la cible :

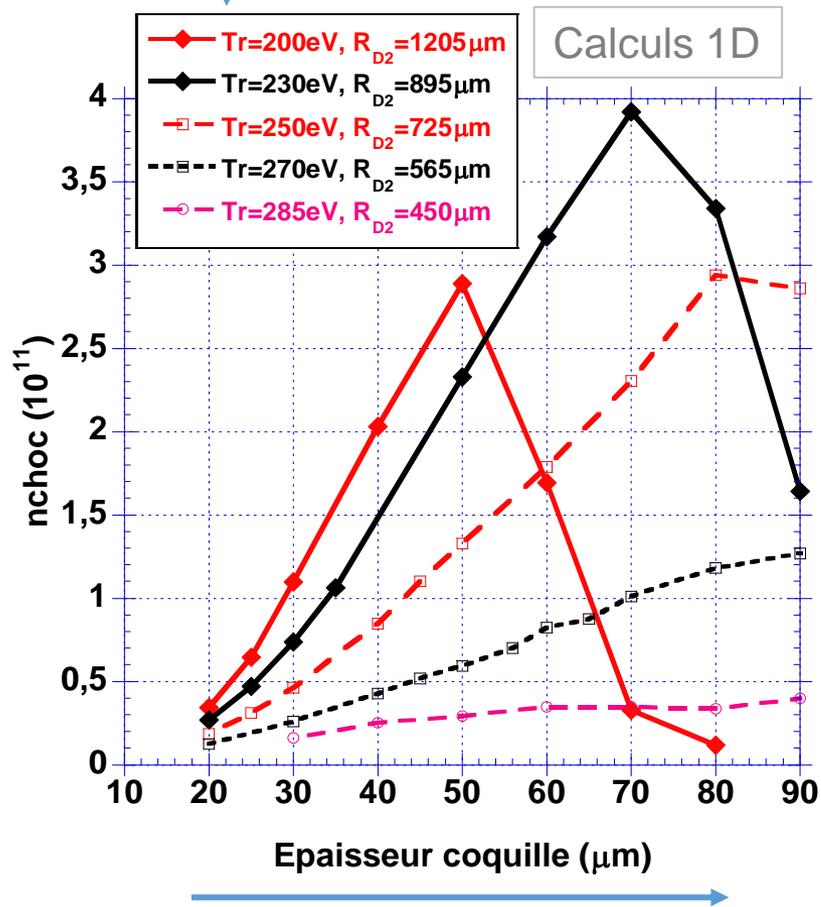
- ✓ Energétique : énergie et puissance laser limités.
- ✓ Géométrique :
 - passage dans la cavité des quadruplets laser, d'un diamètre donné, limité par la taille du Trou d'Entrée Laser (TEL) et de la capsule.
 - Irradiation X de la capsule la plus uniforme possible contraint la position des quads (coordonnées de la tache focale).

❑ Objectif : quelles Tr accessibles pour quelles cibles ?

Coupe
longitudinale
d'une demi-cible
cylindrique



Température
maximum atteinte



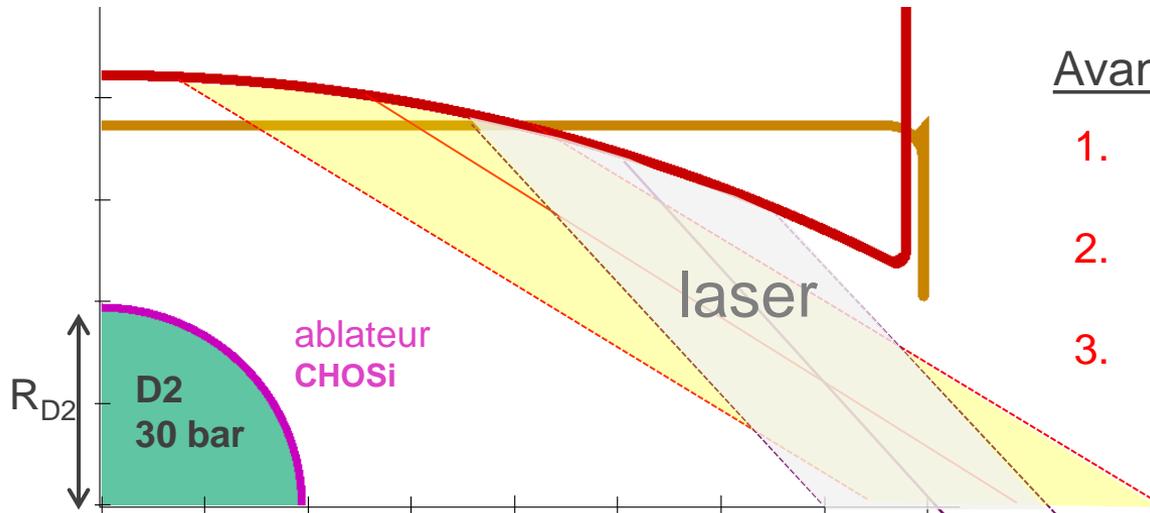
Rapport de convergence (CV) croissant
(de 3 à 7.5 pour le cas 230 eV ; max à CV=5.5)

Production de neutrons de choc optimisée pour $R_{D2}=895 \mu\text{m}$ et $Tr_{\text{max}}=230 \text{ eV}$.

- Ces capsules offrent le meilleur compromis Tr/R_{D2} :
- Large intervalle de choix d' e_{abl} ;
 - Nombre neut. de choc le plus élevé.

- Choix proche de capsules disponibles rapidement au CEA/Valduc (fabrication des cibles) dont les rayons internes sont : $R_{D2}=825 ; 950 \text{ et } 1040 \mu\text{m}$.

La géométrie de cavité de type « Rugby¹ » donne des possibilités supplémentaires pour optimiser le dimensionnement



Avantages de la géométrie Rugby :

1. Ouvrir le TEL pour sécuriser le passage des faisceaux.
2. Conserver les performances énergétiques ($Tr(t)$).
3. Rayon équatorial plus grand : favorise le passage des faisceaux et la symétrie d'irradiation.

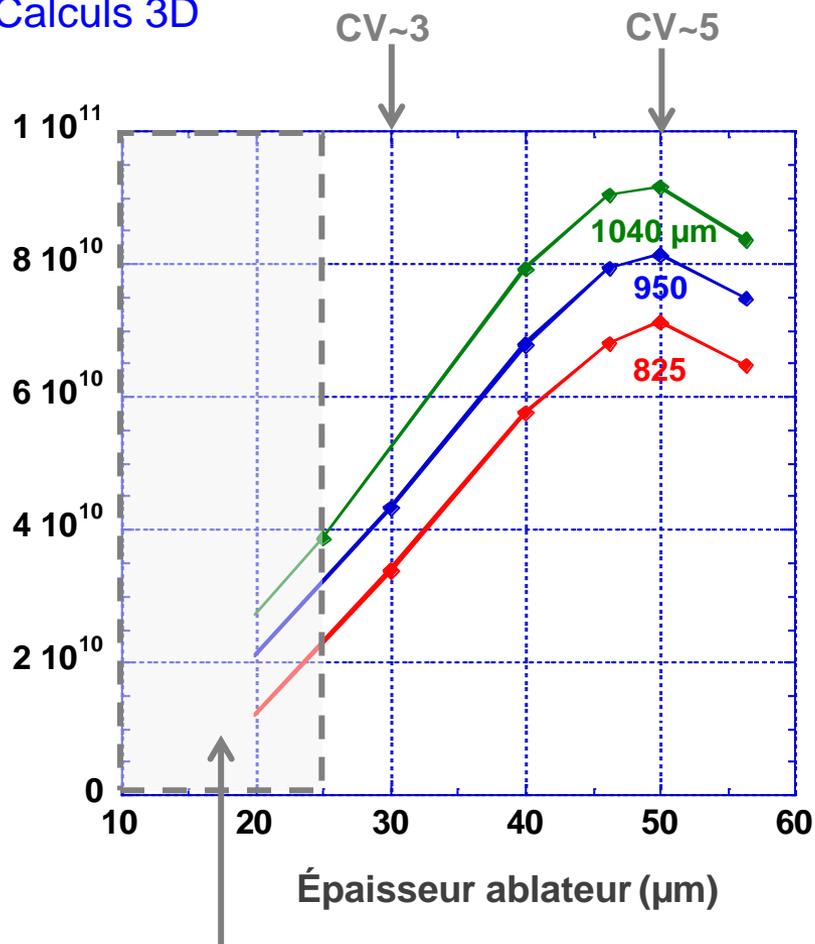
CAS	Trmax (eV)	Neutrons ($\times 10^{11}$)
CYLINDRE	224	1,91
RUGBY	222	1,97

Calculs 2D axisymétriques

Capsule:
 $R_{D2} = 950 \mu\text{m}$
 $e_{abl} = 40 \mu\text{m}$

¹M.Vandenboomgaerde et al, PRL 99, 065004 (2007)

Nombre de neutrons
Calculs 3D



*Limite technologique de tenue
en pression des capsules*

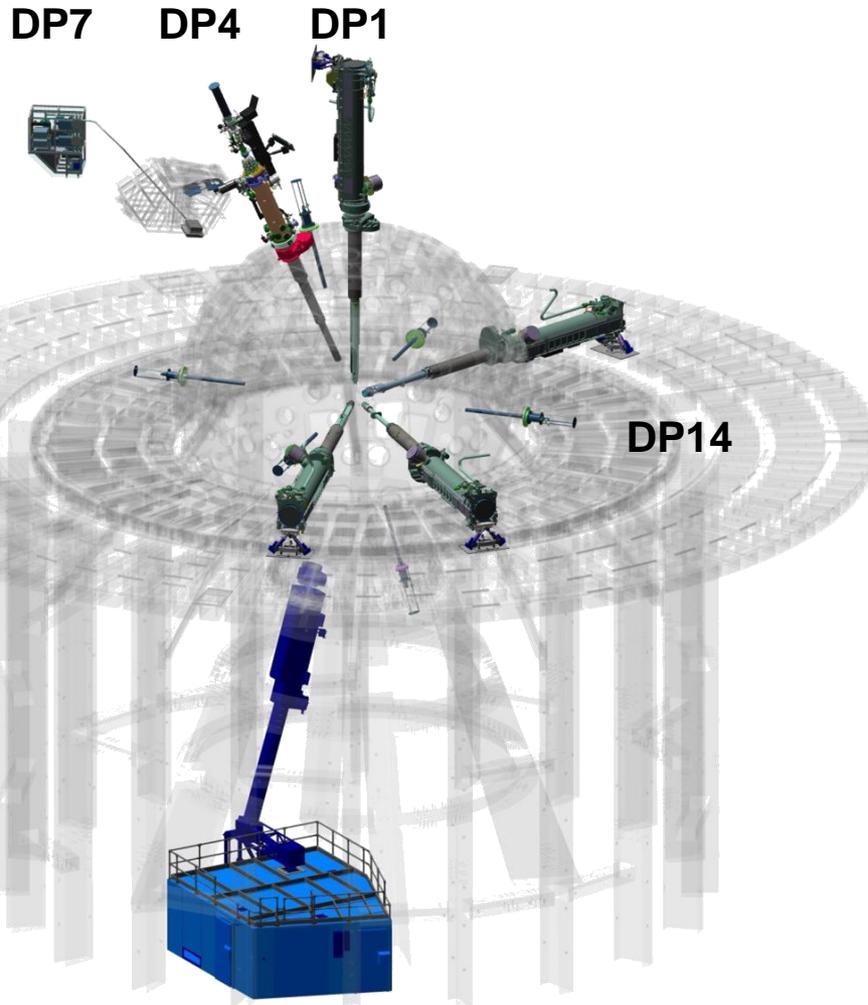
- Compromis trouvé : R_{D2} relativement élevé (~900 μm) pour des Tr modérées :
 $Tr_{max} \sim 200-225$ eV

➔ Capsules retenues correspondent au savoir-faire de VA/DTRI/SMCI :
 $R_{D2} = 825 ; 950 ; 1040^* \mu\text{m}$.

- Épaisseur d'ablateur pour la production neutronique 3D limitée :
 $e_{abl} = 25-55 \mu\text{m}$

*la valeur de ce rayon est passé à 1010 μm

1. Configuration et contraintes expérimentales
2. Fonctionnement des capsules gazeuses
3. Dimensionnement des cibles : entre robustesse et performance
4. **Interprétation**



Diagnostics

DP14 (Pack Neutrons) :

Ensemble de 6 détecteurs neutrons à temps de vol
Rendement neutrons, *bang time*, T_i

DP4 (DMX) : spectromètre large bande

$\theta=24^\circ, \varphi=99^\circ$

Température de cavité, imagerie TEL, spectre

DP1 (IXDCM2t) : imagerie X dur champ moyen

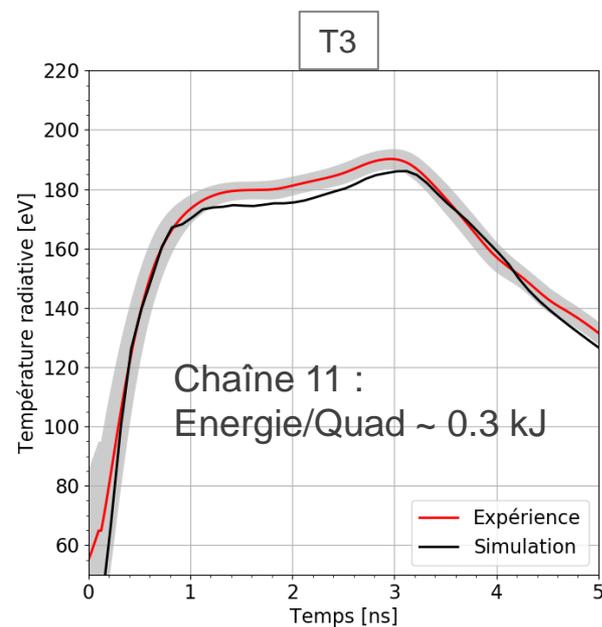
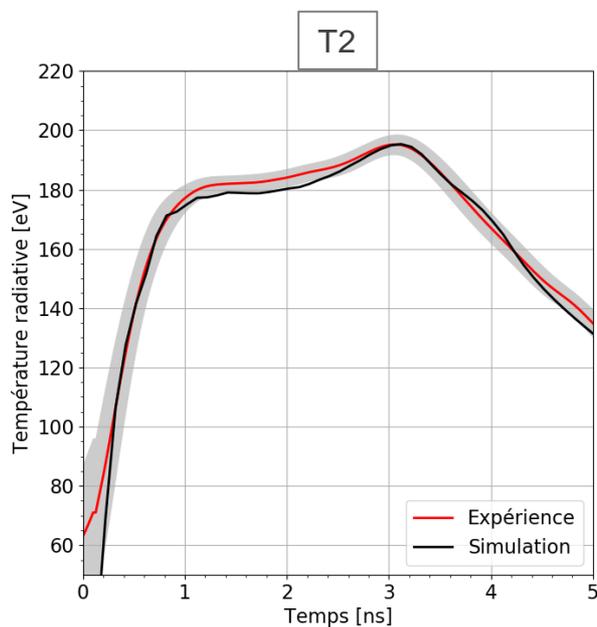
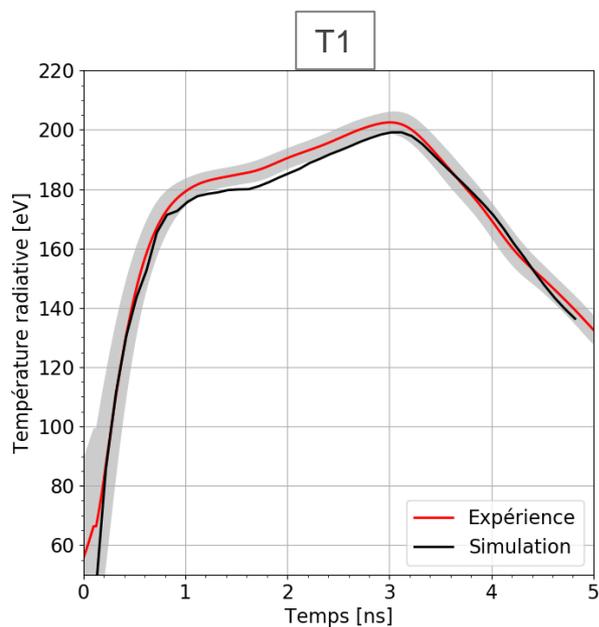
$\theta=0^\circ, \varphi=0^\circ$

Imagerie résolue en temps (130 ps) de l'émission du plasma

DP7 (FABS = Full Aperture backscattering Station) : Puissance rétrodiffusée mesurée sur un seul quadruplet

DP4 (DMX : $\theta=24^\circ, \varphi=99^\circ$) : très bon accord simulation/expérience pour les plus petites capsules

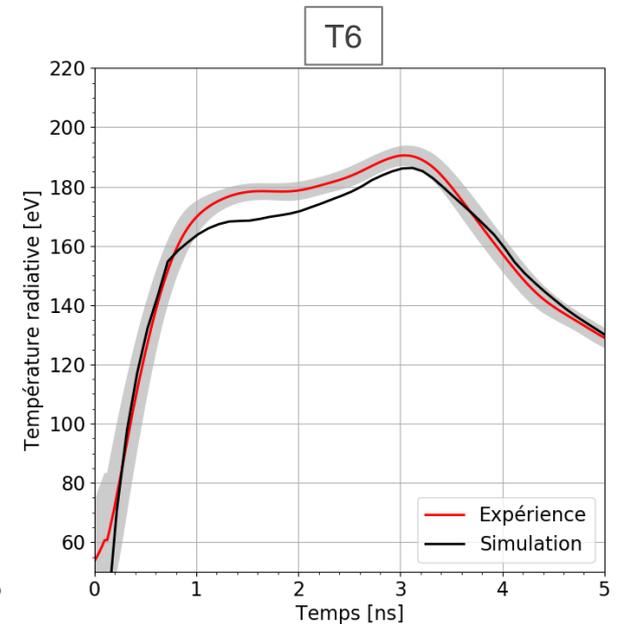
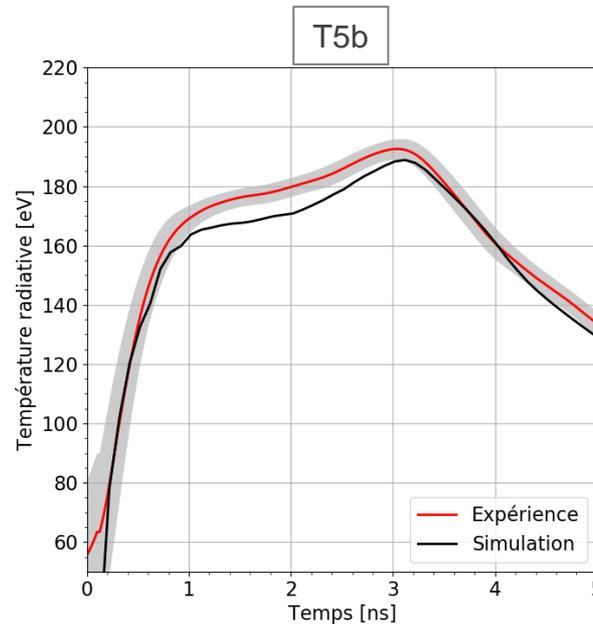
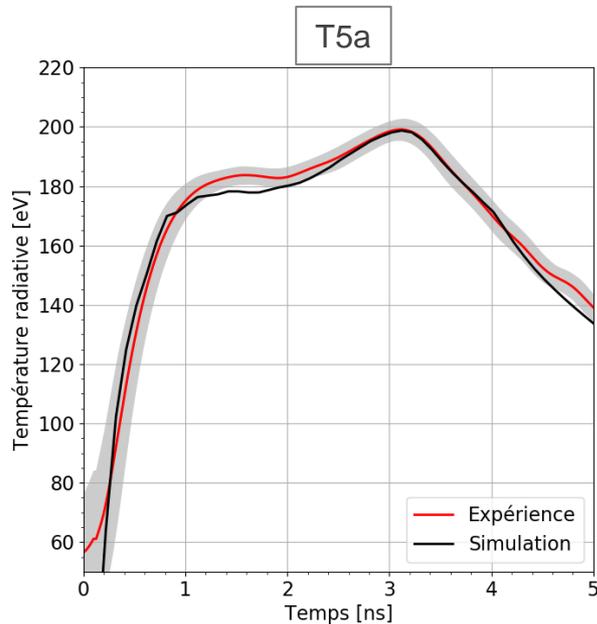
CCR: rapport du rayon de la cavité sur celui de la capsule = R_{cav}/R_{caps}
CCR \approx 2.4



Tir	T1	T2	T3
$R_{D2} + e_{abl}$ (μm)	831 + 25	827 + 41	837 + 45

Energie laser incidente : 142 kJ \pm 8%

CCR \approx 2.1

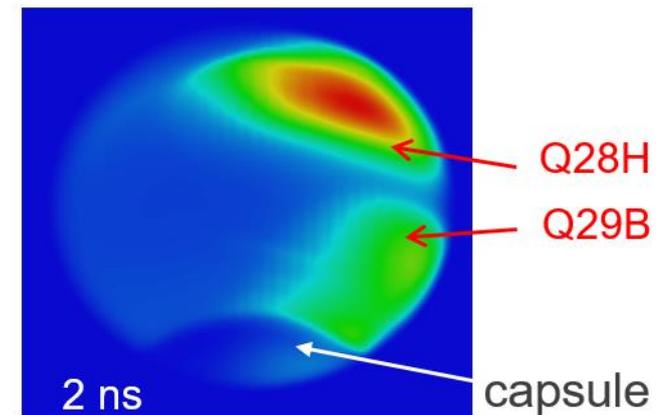
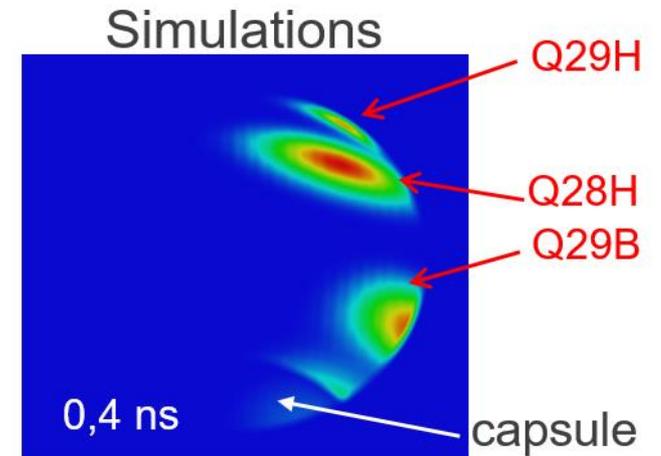
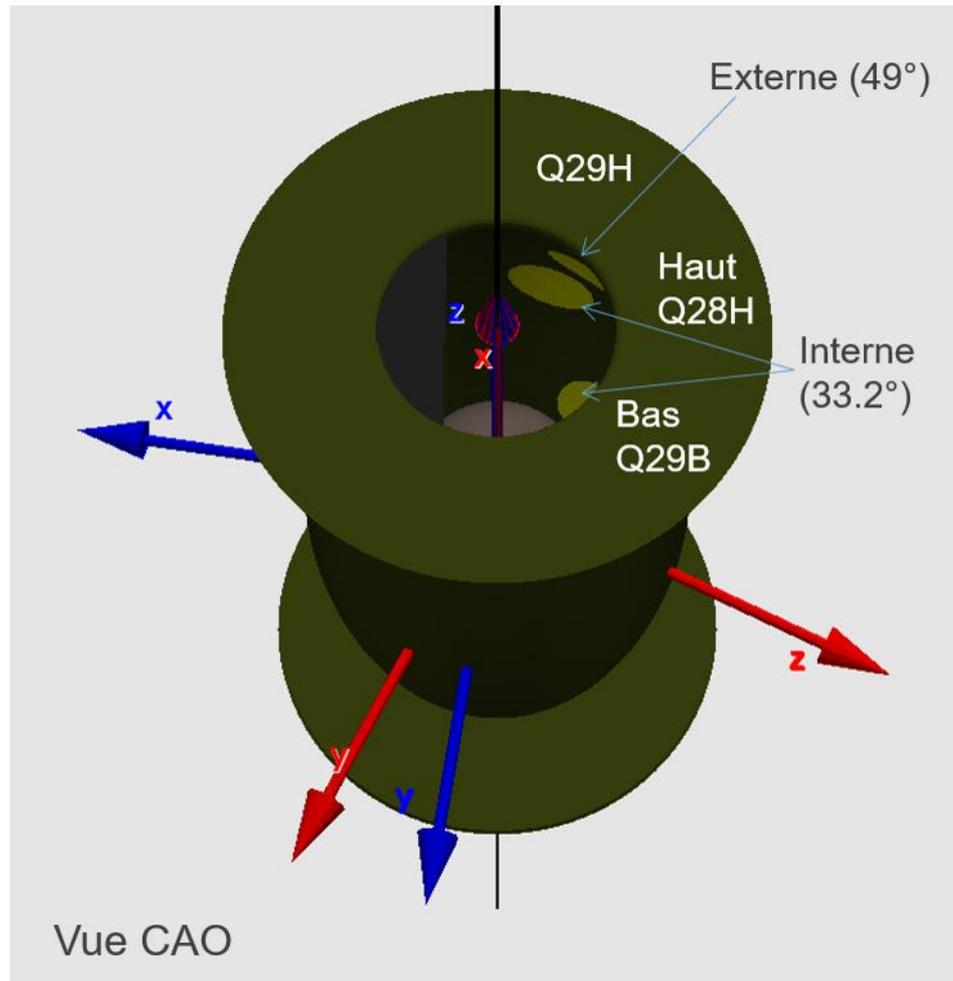


Energie chaîne 29 divisée par 2
Q29B visible du DMX

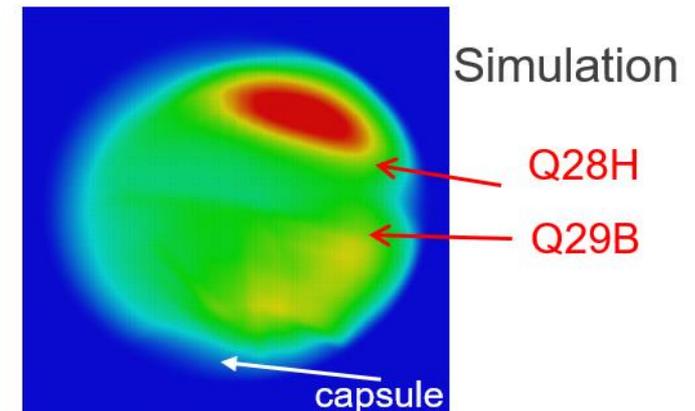
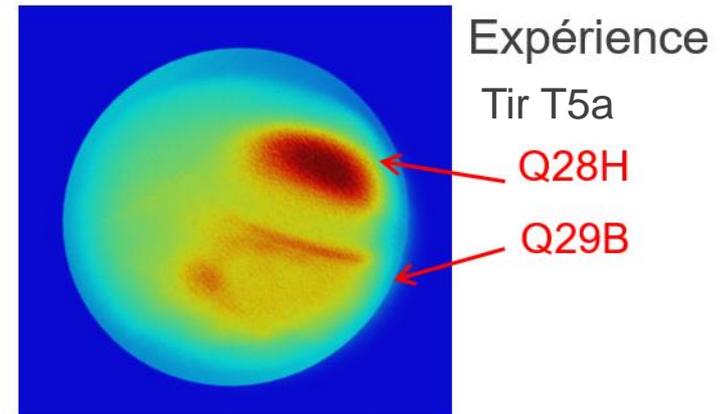
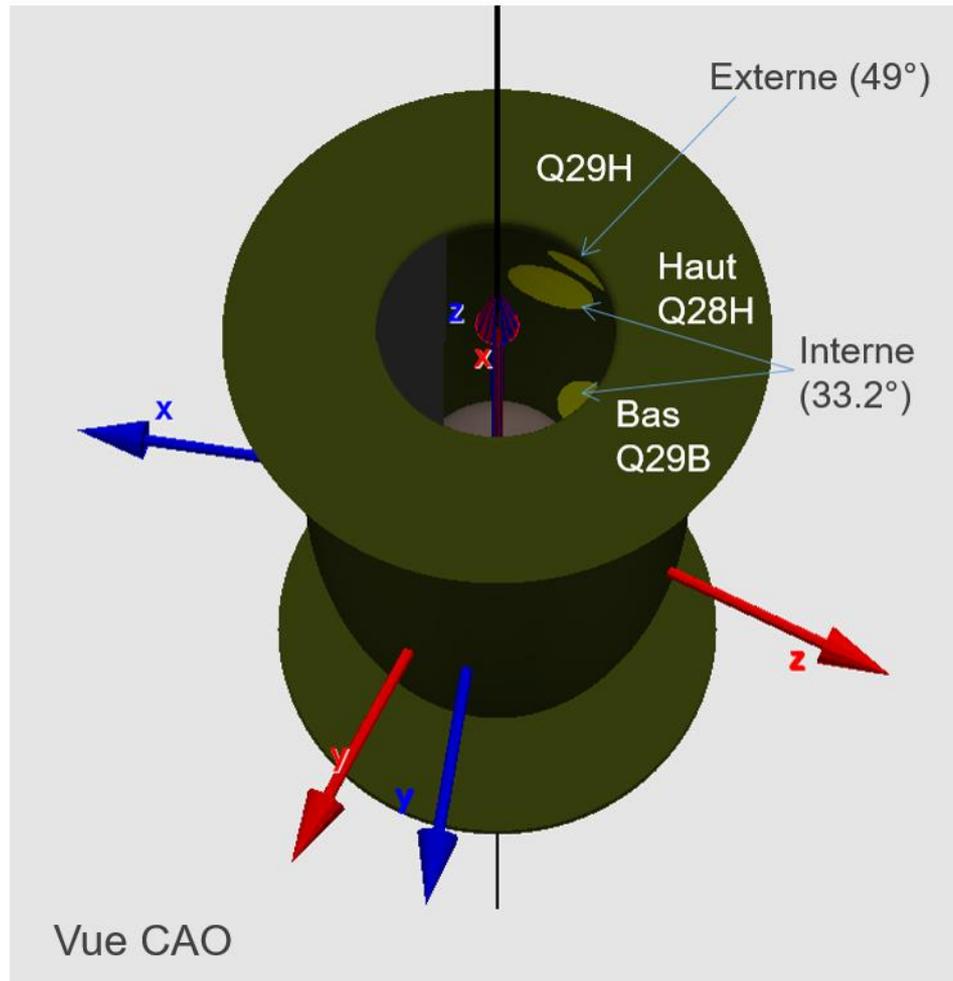
Energie chaîne 28 divisée par 2
Q28H visible du DMX

Tir	T5a	T5b	T6
$R_{D2} + e_{abl}$ (μm)	927 + 38	946 + 38	940 + 50

Energie laser incidente : 144 kJ \pm 8%



On distingue l'impacte des quadruplets visibles du DMX



- L'imagerie du trou d'Entrée Laser intégré en temps montre des structures attendues.

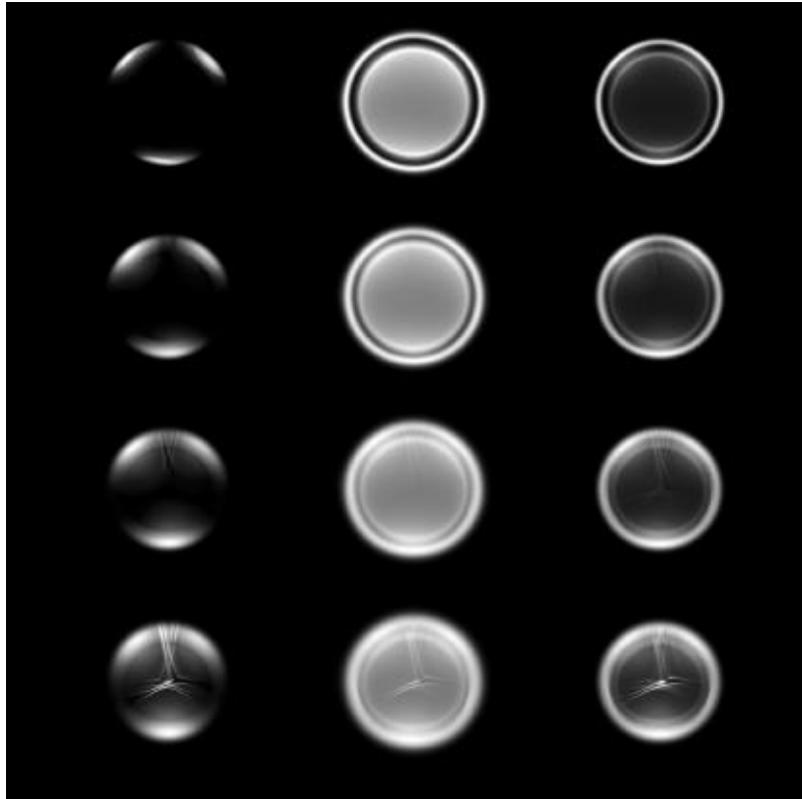
DP1 (direction nord $\theta=0^\circ, \varphi=0^\circ$) : la comparaison simulation/expérience montre des structures similaires

Résolution temporelle : 130 ps

Tir T2

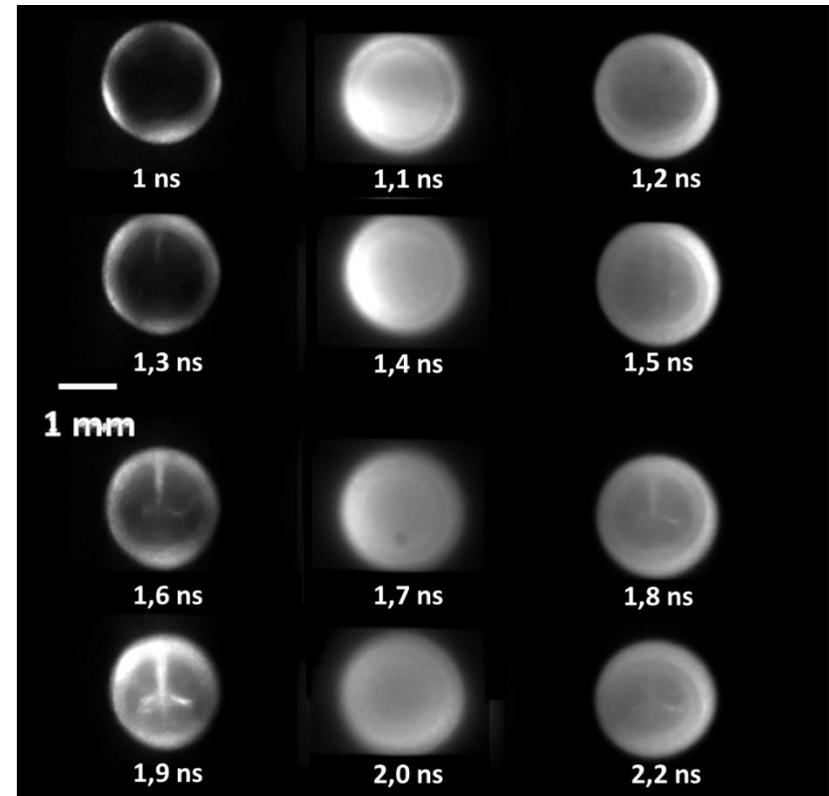
Simulation

(post-processeur calcul hydro-radiative 3D)



DP1

Images Expérimentales (TEL Nord)



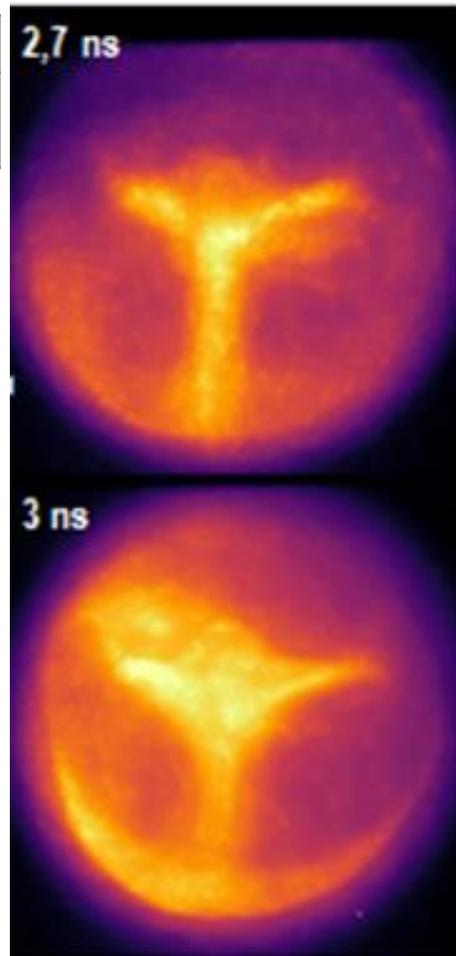
Filtre : Titane
Épaisseur : 10 μm

sans filtre
-

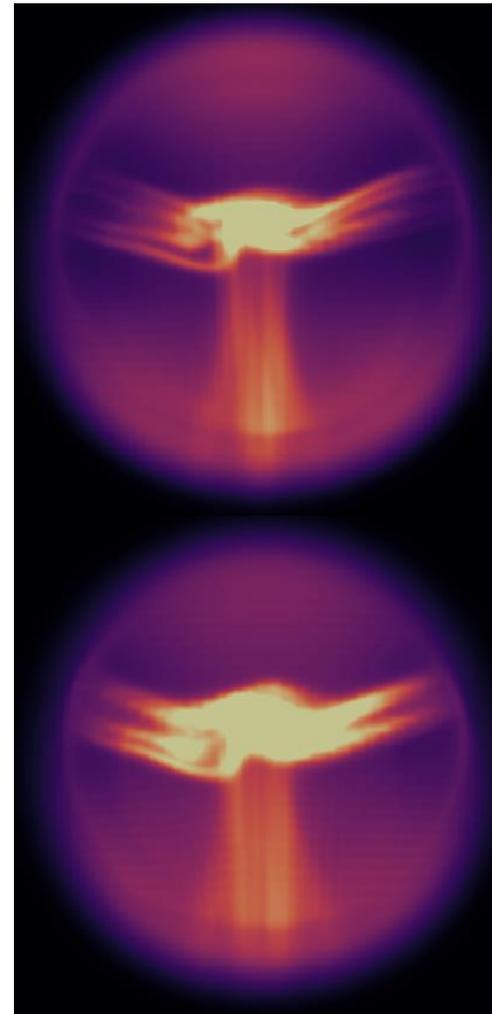
Aluminium
6 μm

- Des structures similaires à l'expérience sont observées dans nos simulations :
 - Collisions des bulles d'or externes, entre 1.6 et 1.9 ns.
 - La capsule au début de son implosion.

Tir	T5a
$R_{D_2} + e_{abl}$ (μm)	927+38



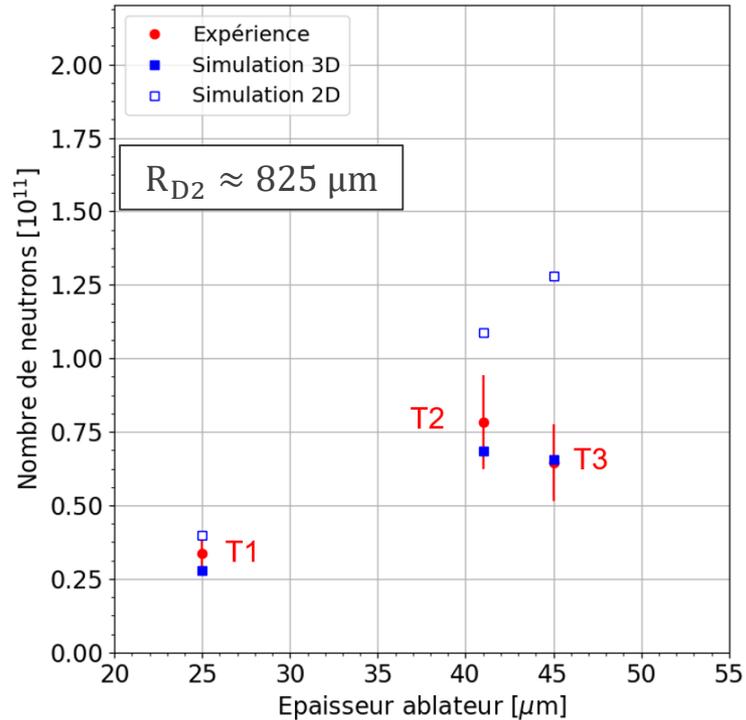
Images DP1



simulation

Nombre de neutrons : très bon accord dans le cas des plus petites capsules.
Comme prévu, les effets 3D sont plus fort avec les ablateurs plus épais.

On montre expérimentalement l'existence d'un optimum de production de neutron



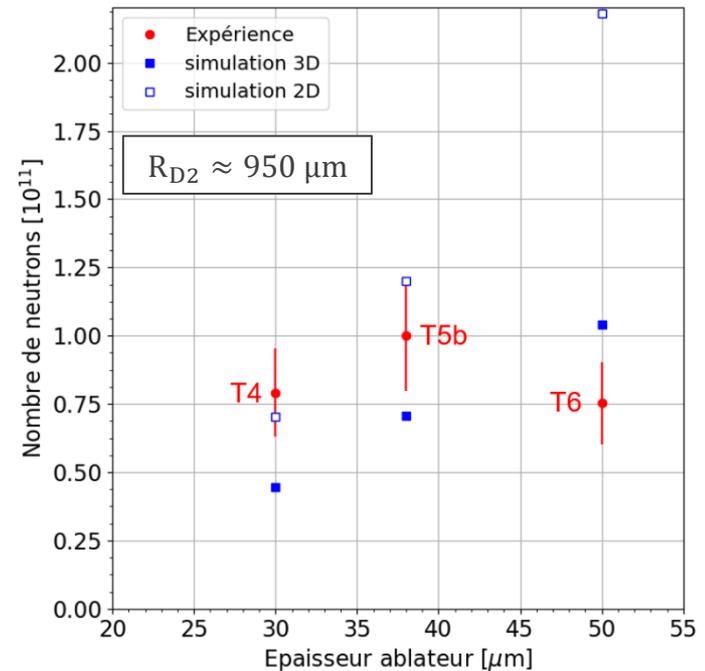
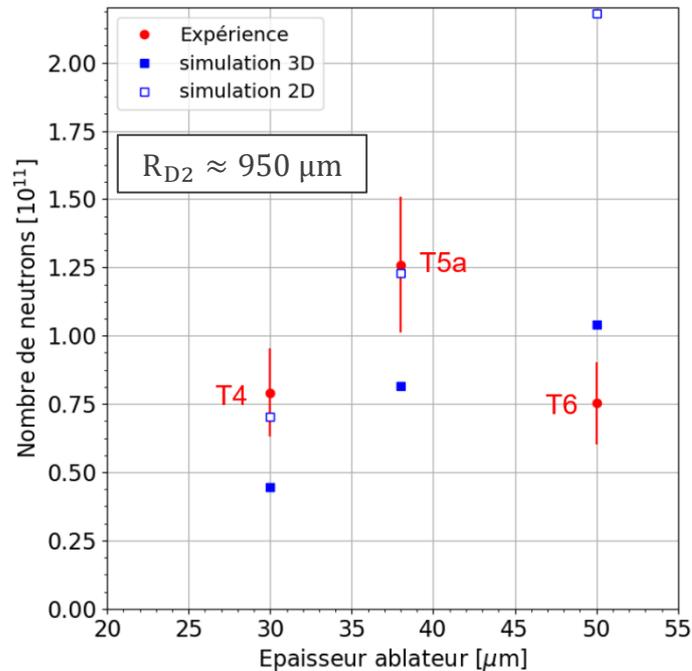
CCR: rapport du rayon de la cavité sur celui de la capsule
= R_{cav}/R_{caps}

CCR ≈ 2.4

Tir	T1	T2	T3
$R_{D2} + e_{abl} (\mu\text{m})$	831 + 25	827 + 41	837 + 45

Energie laser incidente : 142 kJ \pm 8%

Avec les plus grosses capsules, l'accord simulation/expérience reste bon : le rapport du nombre de neutron est inférieur à 2



CCR \approx 2.1

Tir	T4	T5a	T5b	T6
$R_{D2} + e_{abl} (\mu\text{m})$	936+30	927 + 38	946 + 38	940 + 50

Energie laser incidente : 144 kJ \pm 8%

- La première campagne de production neutronique en attaque indirecte a atteint ses objectifs : produire des neutrons, de l'ordre de 10^{11} , et un bon accord avec les simulations.

- ❑ Une stratégie de dimensionnement basée sur la robustesse et la performance a été mise au point. Elle a contribué à sécuriser la campagne expérimentale.

- ❑ Les températures radiatives, le nombre de neutrons et l'imagerie du TEL sont bien restitués.

- ❑ Des simulations 3D ont été nécessaires pour dimensionner et interpréter ces expériences. Elles ont constitué une des principales difficultés dans la conceptions de ces cibles.

- ❑ Un calcul 3D typique est réalisé avec 1024 processeurs et 5 millions de mailles. Le temps effectif pour une simulation est d'environ 10 jours.