

Devoir maison 2 pour le jeudi 19 Octobre

S. Benhajlahsen



I Quelques enjeux de la fusion thermonucléaire (centrale PSI 2009)

Rappel : Pour une lentille conjuguant un objet A et une image A' , on rappelle la relation de conjugaison de Descartes :

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'} \quad \text{et} \quad \gamma = \frac{OA'}{OA} = \frac{A'B'}{AB}$$

et la relation de Newton :

$$\overline{FA} \cdot \overline{F'A'} = -f^2 = -f'^2$$

Les réserves des principaux combustibles fossiles sont limitées. L'impact environnemental de l'utilisation de ces combustibles fossiles ne peut plus être ignoré. Il est désormais impératif de multiplier les efforts pour développer l'unique option actuelle de production d'énergie à long terme, qui puisse satisfaire les besoins énergétiques de nos sociétés à l'avenir : la fusion de noyaux légers.

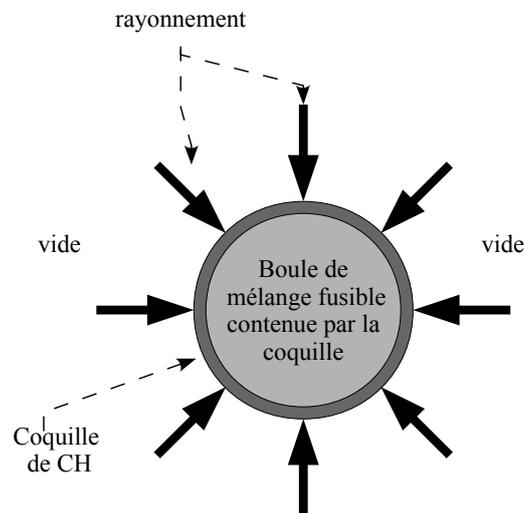


FIGURE 1 – Irradiation du microballon

La production d'énergie par fusion thermonucléaire non-contrôlée (explosive) est une technologie maîtrisée depuis 1952. L'obtention de la fusion thermonucléaire contrôlée fait l'objet de recherches intenses depuis les années 60. Une des méthodes étudiées actuellement est le confinement inertiel laser, qui consiste simplement à effectuer une micro-combustion d'un micro-ballon rempli de mélange fusible, relativement peu destructrice. Le choix d'une faible quantité de mélange fusible, de l'ordre de la dizaine de milligrammes, permet de préserver relativement l'environnement immédiat de la cible. Ce type d'expérience permet dans un premier temps de supprimer totalement les essais nucléaires, la physique de la combustion d'un micro-ballon étant extrapolable à celle d'un engin militaire. La récupération de l'énergie dégagée par fusion pourra intervenir par la suite. Des recherches actives dans ce sens, dont le projet HIPER (High Power Laser Energy Research), sont en cours. Le Laser MégaJoule (LMJ) du Commissariat à l'Énergie Atomique, en construction près de Bordeaux, et le National Ignition Facility en construction en Californie, sont prévus pour atteindre la fusion dès 2011. Le principe sur lequel reposent ces grands instruments (Cf. figure 1) est d'envoyer une grande quantité d'énergie sur un matériau fusible contenu dans un micro-ballon (mélange Deutérium Tritium (DT)) pour le comprimer à haute température, de sorte à permettre sa fusion, selon la réaction ${}^2D + {}^3T \rightarrow \alpha(3,5 \text{ MeV}) + n(14 \text{ MeV})$.

Observation des phénomènes au sein du micro-ballon

Le rayonnement très important par l'explosion de la microcible exerce des pressions de plusieurs centaines de milliers de bars, et les neutrons de fusion induisent à plusieurs mètres des flux d'énergie neutronique de plusieurs mégajoules par

mètre carré. L'explosion des microballons de fusion par confinement inertiel est effectuée dans une chambre à vide au centre de laquelle on focalise des faisceaux laser très intenses, sur le microballon. On étudie ici le problème de l'observation des phénomènes qui se produisent à l'intérieur du plasma. Cette observation ne peut donc se faire qu'à distance, parce que les instruments de mesure trop proches seraient détruits du fait des conditions d'irradiation extrêmes. Ainsi un des diagnostics utilisés consiste à imager un plan du plasma résultant de l'ablation de la coquille sur un capteur CCD (charge-coupled device), au moyen d'un système de lentilles collectant et canalisant la lumière ré-émise par le plasma irradié par un faisceau laser. On ne tiendra pas compte des effets de diffraction sauf indication contraire.

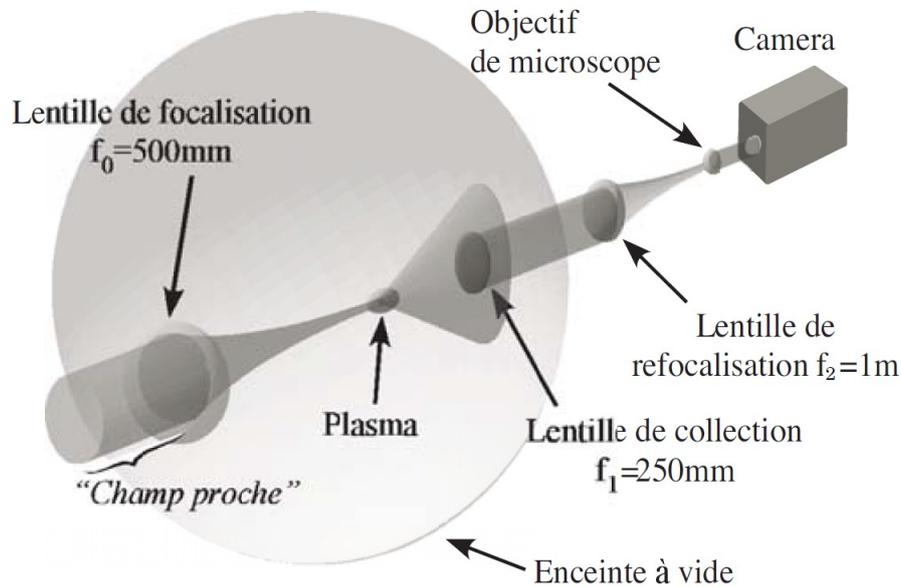


FIGURE 2 – Dispositif expérimental

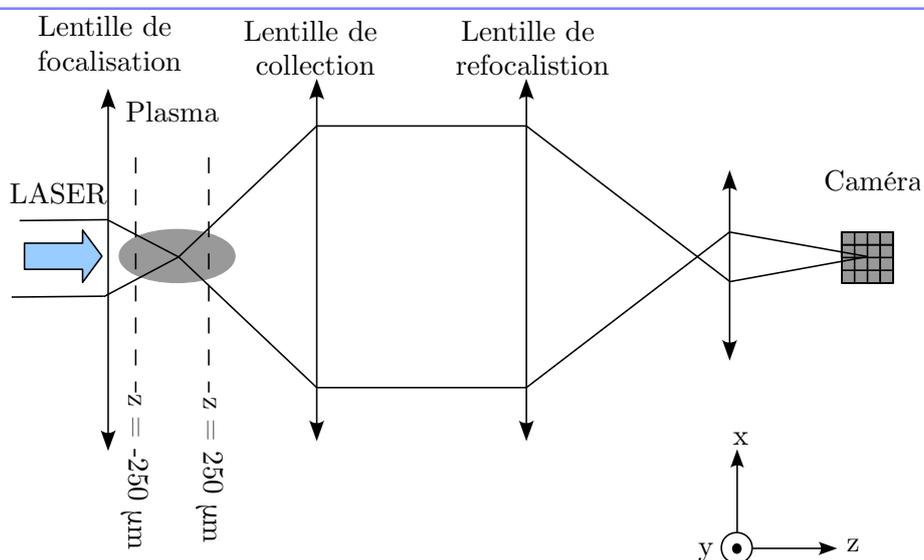


FIGURE 3 – Modèle du diagnostic optique

Le schéma global du dispositif expérimental est donné sur la figure 2. Son équivalent dans un plan contenant l'axe optique est donnée figure 3. Le plasma étudié s'étend selon l'axe optique sur une longueur de l'ordre du millimètre. Un faisceau laser parallèle de même direction que l'axe optique, de diamètre $\Phi_0 = 30,00$ mm, entre dans la chambre à vide, puis est focalisé sur le plasma à l'aide d'une lentille (dite de focalisation) de distance focale $f_0 = 500,000$ mm (précision micrométrique sur les distances focales).

Remarque : Le sujet de concours dont est tiré ce problème note les distances focales images par f et non f' . On adoptera cette notation dans toute la suite.

Le nombre d'ouverture du faisceau est, par définition, le rapport de la distance focale au diamètre de la lentille focalisante soit

$$N_0 = \frac{f_0}{\Phi_0} \approx 16,67$$

Le centre du plasma, qui est en première approximation un ellipsoïde de révolution, est schématisé figure 3 par une ellipse, dont on a très précisément placé le centre sur l'axe optique au micron près, à une distance f_0 de la lentille de focalisation, à l'aide d'actionneurs pas à pas de grande précision. La lentille L_1 de collection, de distance focale $f_1 = 250,000$ mm et de diamètre $\Phi_{1\max} = 30,00$ mm est placée au micron près à f_1 du centre du plasma. La lumière sort ensuite de l'enceinte à vide (faisceau quasi-parallèle) et se propage sur une distance $D_1 = 2050,000$ mm vers une zone de faible encombrement à l'extérieur de l'enceinte, où on a pu placer le système de capture d'image. On refocalise le faisceau quasi-parallèle au moyen d'une lentille L_2 placée à la distance D_1 de L_1 , et de distance focale $f_2 = 1000,000$ mm. L_2 donne ainsi une image du plasma au voisinage du système de capture d'image. À $D_2 \approx 1022$ mm de cette dernière lentille, on place un objectif de microscope, modélisé par une lentille mince L_3 de distance focale $f_3 = 16,900$ mm. Enfin, on place un capteur CCD à la distance D_3 après L_3 .

I.A Collection de l'information

Question 1 : Faire un schéma analogue à celui de la figure 3 repérant f_0 , L_0 , le plasma, f_1 , L_1 , D_1 , L_2 , D_2 , L_3 , D_3 et le capteur CCD.

Question 2 : Si on fait fonctionner le dispositif sans plasma, quel est le diamètre du faisceau entre L_1 et L_2 ? Justifier.

Question 3 : Quels sont les nombres d'ouverture N_1 de la lentille de collection de lumière avec et sans plasma? Les comparer au nombre d'ouverture du faisceau incident N_0 . Le plasma est un milieu qui, aux fortes intensités lumineuses, n'est plus transparent, la lumière ne s'y propage pas en ligne droite. Quel peut être l'intérêt de la différence éventuelle entre N_0 et N_1 ?

I.B Objectif de microscope

Question 4 : On règle l'ensemble L_3 - CCD de sorte à avoir $D_3 = 11f_3$. On observe ainsi nettement un objet situé dans un plan en avant de L_3 . Quelle est la distance entre ce plan d'observation et L_3 ? Quel est le grandissement transverse γ_3 correspondant?

Question 5 : Calculer le grandissement transverse γ_{12} du dispositif entre le plan focal objet de L_1 et le plan focal image de L_2 .

Question 6 : En déduire le grandissement transverse global entre le plan focal objet de L_1 et le plan du capteur CCD.

Question 7 : application numérique : On mesure qu'un déplacement $\Delta x_0 = 10 \mu\text{m}$ de l'objet induit un déplacement de 10 pixels sur l'image donnée par le CCD. En déduire la taille des pixels (carrés) du capteur CCD.

I.C Grandissement longitudinal

Question 8 : On place un objet A_1 sur l'axe au voisinage du foyer objet de L_1 . Soient F_i et F'_i les foyers principaux objets et images des lentilles. On note $\Delta z_0 = \overline{F_1 A_1}$ et $\Delta z_i = \overline{F'_2 A_2}$, A_2 étant l'image de A_1 par L_1 et L_2 . Établir la relation donnant Δz_i fonction de Δz_0 .

Question 9 : Application numérique : sachant que l'objet observé A_1 appartient au plasma, en déduire une relation approchée du grandissement longitudinal $\gamma_{\parallel} = \frac{\Delta z_i}{\Delta z_0}$, uniquement fonction de f_1 et f_2 .

Question 10 : On appelle "avant" du plasma la zone en amont de $F'_0 = F_1$ caractérisée par $\Delta z_0 < 0$ et "arrière" la zone $\Delta z_0 > 0$. La zone $\Delta z_i > 0$ correspond-elle à l'avant ou l'arrière de l'image du plasma?

On fait en sorte que la lentille L_2 soit réglable en position le long de l'axe optique, au moyen d'une vis micrométrique. La distance séparant L_1 de L_3 reste constante, égale à $D_1 + D_3$.

Question 11 : Si l'on avance la lentille d'une distance d (algébrique) (on l'éloigne donc du plasma si $d > 0$), que se passe-t-il pour l'image du plasma au voisinage de F'_2 ?

Question 12 : Comme L_3 ne bouge pas, un tel mouvement de L_2 permet-il d'observer sur le CCD un plan situé en avant ou en arrière du plasma ?

Question 13 : Donner la plage de variation nécessaire pour la vis micrométrique positionnant L_2 de sorte à pouvoir observer le plasma sur 1 mm de part et d'autre de $F'_0 = F_1$.

I.D Profondeur de champ

Question 14 : Expliquer qualitativement, en se limitant à un système simple à une seule lentille, pourquoi le fait de choisir une lentille de grand diamètre permet de restreindre l'observation à une tranche de plasma de faible épaisseur.

Question 15 : Quel peut être l'avantage de refroidir le capteur CCD, à l'azote liquide par exemple ? On donne sur la figure 4 des images obtenues avec un tel dispositif.

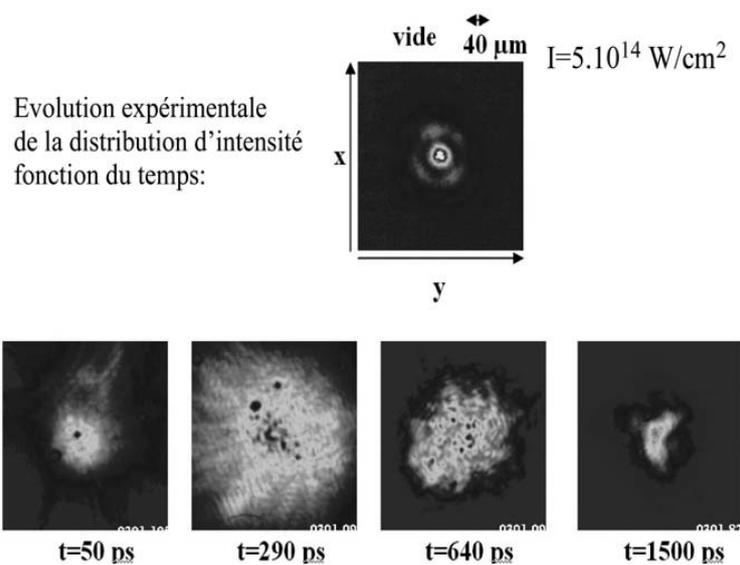


FIGURE 4 – Image du rayonnement transmis par le plasma