

1. Congrès européen de cinéradiographie par photons
ou particules.
Paris, France - 19 - 21 Mai, 1981.
CEA - CONF 5732

FR8101548

CINEMATOGRAPHIE ULTRA RAPIDE DANS LE DOMAINE SPECTRAL X
DESTINEE AUX EXPERIENCES D'INTERACTION LASER-MATIERE

C. CAVAILLER, N. FLEUKOT, M. ROSTAING, R. SAUNEUF

Commissariat à l'Energie Atomique, Centre d'Etudes de Limeil

B.P. n° 27, 94190, Villeneuve-Saint-Georges, FRANCE

I - INTRODUCTION

L'interprétation des expériences d'interaction laser-matière nécessite l'enregistrement dynamique des phénomènes mis en oeuvre dans le plasma créé lors de l'irradiation de la cible.

L'analyse de la gamme spectrale X notamment, et plus particulièrement la zone 1 - 10 keV dans un premier temps, s'est révélée d'un intérêt certain pour étudier l'émission propre du plasma ou pour en effectuer la radiographie à l'aide d'une source X annexe. Nous avons donc été amenés à développer différents détecteurs permettant d'enregistrer l'évolution spatio-temporelle de ces émissions X avec des résolutions dans la gamme picoseconde et de visualiser une image à deux dimensions du plasma avec un temps de pose inférieur à 300 ps.

Nous décrivons ici les étapes successives qui nous ont permis d'atteindre ces objectifs, tant sur le plan de la résolution temporelle (30 ps à 3 ps) que sur celui de la résolution spatiale (3 à 15 μm^{-1}) dans la gamme spectrale X 1 - 10 keV ; puis son extension jusque vers 200 eV.

Nous présentons ensuite le tube OBTURATEUR LEP 300 ps qui permet de réaliser une imagerie X à deux dimensions et qui est actuellement en cours d'essais au Centre d'Etudes de Limeil.

II - IMAGERIE X SPATIO TEMPORELLE

II.1. EVOLUTION DES CAMERAS A BALAYAGE DE FENTE

II.1.1. Le mode standard

Vers la fin des années 60 la Société TH-CSF élaborera en collaboration avec le C.E.A. la première caméra opto-électronique à balayage de fente TSN 503 ; Cette caméra pouvait fonctionner :

- soit en balayage de fente dans les domaines μs et ns ,
- soit en mode obturateur (images intégrales jusqu'à 100 ns).

La figure 1 résume les limitations observées sur cette caméra qui fonctionne avec un tube convertisseur d'images RCA 73435 : nous y notons une résolution temporelle limitée à 100 ps et une résolution spatiale d'environ 10 pl. mm^{-1} pour une dynamique en éclairissement très faible.

II.1.2. Le mode picoseconde

En augmentant le champ d'extraction des photo-électrons de ce tube convertisseur (3 kV.cm^{-1}) et en amplifiant l'image de la caméra /1/, /2/ nous avons pu obtenir une résolution temporelle de 10 ps ; mais ce mode de fonctionnement affecte considérablement le comportement de l'optique électronique de la caméra, aussi est-il nécessaire de faire un choix entre :

- une limitation spatio temporelle de 3 pl. mm^{-1} et 10 ps,
- ou - une limitation spatio temporelle de 8 pl. mm^{-1} et 50 ps.

En contre-partie, la dynamique en éclairissement a été améliorée (10 à 100 selon la durée de l'impulsion). Cependant, il apparaît clairement qu'aucun progrès significatif ne peut maintenant être espéré d'une optique électronique définie il y a 40 ans. C'est la raison pour laquelle nous avons développé avec le LEP le tube convertisseur d'image P 600 X /3/ /4/.

II.1.3. Extension des domaines spectraux

Les travaux dont nous venons de parler ont été réalisés dans le domaine spectral visible (tube convertisseurs d'images à photocathodes S20). Mais simultanément il est apparu nécessaire (Figure 2) d'étendre ce domaine spectral :

- à l'infra-rouge,
- à l'ultra-violet,
- au domaine spectral X 1,5 - 10 keV avec des tubes scellés munis de fenêtres de beryllium utilisant des photocathodes d'or ou de CsI,
- au domaine X mous 200 eV - 1 keV avec une caméra utilisant un tube "ouvert" à photocathode d'or.

II.2. GAMME SPECTRALE 1 - 10 keV

II.2.1. Domaine spatio temporel 3 - 6 pl. mm^{-1} , 10 - 50 ps (Caméras TSN 503 et 505)

Un tube convertisseur d'image sensible aux rayons X dans la bande spectrale 1,5 - 10 keV a été développé en 1974 à partir d'un tube RCA 73435

standard (P 500 X). Construit avec une photocathode d'or pouvant être remplacée, ce tube scellé travaille en transmission. Il est maintenant commercialisé par la Société RTC et peut être monté soit dans une caméra TSN 503 X soit dans une caméra TSN 505 X (Figure 3).

La TSN 503 X utilise un tube P 500 X dont le signal photonique est amplifié par un amplificateur de luminance ITT 40 mm plaqué fibre à fibre sur l'écran de sortie.

La TSN 505 X utilise un tube P 500 FX qui assure directement l'amplification interne à l'aide d'une galette de microcanaux intégrée dans le tube /5/.

La figure 4 présente les principales performances de ces caméras et la figure 5 montre les mêmes émissions X des deux plasmas induits par deux impulsions laser séparées de 100 ps enregistrées simultanément par une TSN 503 X et une TSN 505 X. Les résultats obtenus avec ces caméras sont assez équivalents ; notons cependant que le gain lumineux de la TSN 503 X est plus important que celui de la TSN 505 X.

La figure 6 nous montre un exemple de diagnostic X utilisant une TSN 503 X /6/. La compression hydrodynamique d'un plasma peut être étudiée simplement en couplant une caméra à balayage de fente à une fente disposée parallèlement à l'axe temporel de la caméra. Sur le film l'écart temporel des émissions X de coeur et de couronne du plasma peuvent être déterminées ainsi que leurs durées et leurs extensions spatiales.

II.2.2. Domaine spatio-temporel 20 pl.mm⁻¹, 3 ps (Caméra P 600)

Les performances de ces caméras restant limitées, nous avons demandé l'étude par le L.E.P. d'un tube convertisseur d'images de type nouveau, appelé P 600 /7/ destiné à résoudre simultanément 1 à 3 ps et 10 pl.mm⁻¹. Cet objectif conduit à définir une optique électronique possédant les qualités suivantes :

- utilisation d'un champ d'accélération très intense sur la photocathode pour éliminer les effets de charge d'espace sur le faisceau électronique et les effets de dispersion de temps de transit entre photocathode et écran,

- séparation des fonctions de focalisation spatiale et temporelle afin de réduire la dimension de l'élément résolu.

II.2.2.1. Caméra P 600 U.V.

Un tube de test à photocathode d'iodure de Cesium (CsI) déposée sur une fenêtre de quartz et sensible dans la gamme spectrale 150 à 200 nm a été contrôlé sur la caméra à balayage de fente P 600 U.V. réalisée au C.E.L. /4/.

Nous avons pu ainsi démontrer en 1979 une résolution spatiale meilleure que 100 μm sur sa photocathode et un temps de montée voisin de 1 à 2 ps.

II.2.2.2. Caméra P 600 X

Profitant de la haute qualité de l'optique électronique ainsi testée nous avons demandé au L.E.P. de réaliser un tube similaire (mais corrigé des défauts du tube de test) dont la sensibilité soit adaptée au domaine

spectral X 1 - 10 keV.

Les principales caractéristiques de son optique électronique (Figure 7) sont les suivantes :

- Photocathode de 0,35 μm d'or scellée par 25 μm de béryllium fonctionnant en transmission.
- Champ d'accélération des photo-électrons de 45 kV cm^{-1} .
- Electrode d'accélération située à 2,5 mm de la photocathode.
- L'image est formée directement sur l'écran P11 (pour éliminer la perte de résolution liée à la galette de microcanaux constatée lors des essais du tube P 600 U.V.) puis couplée par fibres optiques à l'intensificateur de luminance externe.

En ce qui concerne la caméra (Figure 8) nous pouvons remarquer en D la présence d'un éclateur miniature déclenché photoniquement par laser. Il génère une impulsion de 15 kV (largeur à mi-hauteur 15 ns, temps de montée 250 ps). Son retard au déclenchement et son jitter valent respectivement 3 ns et 200 ps pour une impulsion laser de 500 μJ à 1,06 μm . Un symétriseur à câble permet d'obtenir deux impulsions symétriques dont les fronts de montée sont mis en forme par les modules E et F avant d'être appliqués aux plaques de déflection.

Les performances statiques obtenues sur source X continue (générateur CGR et tube X DIFFRACTOMIX GC 343) sont les suivantes :

- grandissement spatial (photocathode écran) : 2 selon l'axe spatial ox,
- résolution selon l'axe spatial (axe ox - figure 9) : meilleure que 40 μm (25 pl.mm^{-1}),
- réponse spatiale selon l'axe temporel (axe oy - figure 10) : 60 μm .

La caméra P 600 X est actuellement étalonnée sur une source X impulsionnelle (5 J - 50 ps) en vue de déterminer ses performances dynamiques.

La réponse de la caméra selon l'axe spatial est meilleure que 16 pl.mm^{-1} (valeur essentiellement limitée par l'amplificateur de luminance utilisé : ITT \varnothing 25 mm). Sa réponse selon l'axe temporel reste inférieure à 80 μm pour une dynamique de plusieurs centaines. Il faut noter qu'il n'y a pratiquement pas de dégradation par rapport à la réponse statique quoique tous les effets de charge d'espace soient présents (impulsion de 50 ps).

La mise en oeuvre de l'éclateur et du formeur d'impulsions devraient nous permettre d'obtenir en mode balayé les caractéristiques suivantes :

- résolution spatiale : \approx 15 pl.mm^{-1} ,
- résolution temporelle : meilleure que 3 ps,
- dynamique en éclaircissement : jusqu'à 1000.

II.3. GAMME SPECTRALE 200 eV - 10 keV : CAMERA P 550 X

Nous venons de développer avec le L.E.P. un tube convertisseur d'image sensible aux rayons X mous dans la bande spectrale 200 eV - 10 keV. Pour ce faire un tube P 500 X classique a été modifié de telle sorte que la photocathode, constituée d'un voile d'or de 300 Å d'épaisseur et évaporée sur une couche de 1200 Å de polypropylène, travaille en transmission dans le vide de la chambre d'expérience.

Une vanne tiroir (Figure 11) permet de mettre le tube en communication directe avec la chambre d'interaction au moment de l'expérience.

Un porte fente, qui peut se déplacer sous vide, permet dans un premier temps de réaliser un alignement X correct en l'absence de caméra ; Une fois le système fixé sur la chambre d'expérience il permet alors de positionner la fente de la caméra au contact du convertisseur (position travail). Un groupe de pompage auxiliaire (pompe turbomoléculaire) est nécessaire pour maintenir un vide correct dans le tube lors des expériences et pour le pomper en circuit fermé lors de son stockage.

La figure 12 présente cette caméra P 550 X montée sur une source X continue pour les essais statiques. Elle a démontré vers quelques keV des performances tout à fait voisines de celles obtenues par les TSN 503 X et TSN 505 X.

Les performances dynamiques de cette caméra sont actuellement déterminées sur une source X impulsionnelle et devraient être les mêmes, vers 200 eV, que celles des caméras à tubes scellés.

III - IMAGERIE X A DEUX DIMENSIONS : TUBE OBTURATEUR L.E.P. 300 ps

L'intérêt essentiel de ce dispositif réside dans sa capacité à prendre une "photographie" en deux dimensions du plasma, avec un temps de pose pouvant être aussi bref que 300 ps ; ceci permet de s'affranchir des phénomènes hydrodynamiques pouvant précéder ou suivre l'espace de temps découpé par le tube obturateur qui brouillent inévitablement l'image obtenue. La Société L.E.P. a étudié en collaboration avec le C.E.A. et réalisé ce tube obturateur (Figure 13) sensible dans la gamme spectrale 1 à 10 keV ; sa structure est très voisine de celle d'un amplificateur de brillance à microcanaux dont la fenêtre en verre serait remplacée par une feuille de béryllium de 12 μm et dont le convertisseur constitué de 0,35 μm d'or déposé sur 12 μm de béryllium est appliqué directement sur l'entrée de la galette de microcanaux. L'impulsion électrique haute tension de commande (7 kV) est générée par un éclateur déclenché par laser et transite dans la ligne adaptée 50 Ω constituée par l'ensemble photocathode-galette-écran du tube. Sur la longueur utile 25 mm, 5 images de 5 mm peuvent ainsi être enregistrées, avec un décalage temporel voisin de 20 ps correspondant à la vitesse de transmission de l'onde dans la ligne, et avec un temps de pose déterminé par la longueur de la ligne de formation associée à l'éclateur (10 ns à 300 ps actuellement).

Nous avons effectué les premiers contrôles de fonctionnement de cette caméra 5 images à l'aide de notre source X impulsionnelle de durée 50 ps. Le temps de pose utilisé dans ces essais préliminaires est de 10 ns pour simplifier les problèmes de synchronisation (jitter \approx quelques centaines de ps).

Les figures 14 et 15 montrent que :

- La résolution spatiale peut atteindre 10 pl.mm^{-1} ($100 \text{ }\mu\text{m}$).
- L'ouverture s'effectue en moins de 5 images (soit environ 100 ps avec le formeur 10 ns actuel) ce qui doit permettre d'atteindre une durée de pose extrêmement brève avec un générateur H.T. optimisé.
- La détectabilité est très élevée puisqu'un plasma créé à l'aide d'une impulsion laser de 20 mJ permet, à travers $50 \text{ }\mu\text{m}$ de béryllium de saturer le film d'enregistrement de sensibilité 400 ASA (H.P. 4).

Un tel dispositif permettra ainsi de visualiser sur 5 canaux spectraux différents, définis à l'aide d'absorbants adaptés, l'extension et la forme du plasma créé pendant l'interaction laser-matière avec un temps de pose inférieur à 300 ps.

IV - CONCLUSIONS

Durant ces 10 dernières années un effort considérable a été fait en cinématographie ultra rapide. Les performances temporelles des caméras à balayage de fente ont évolué de la nanoseconde à la picoseconde, la densité d'informations exploitables sur l'écran est passée de quelques centaines à plusieurs dizaines de milliers.

Le domaine spectral visible a été étendu de l'infrarouge au domaine X en passant par l'U.V., ce qui permettra sous peu aux expérimentateurs d'observer les plasmas avec une large gamme spectrale et notamment une résolution temporelle très améliorée dans la bande X 200 eV à 1 keV.

Parmi toutes les personnes qui ont collaboré à ces études nous tenons à remercier MM. J.P. GEX et J. LAUNSPACH pour les discussions que nous avons eues, Mme MILLERIOUS pour la mise au point du tube OBTURATEUR, MM. B. BOUTRY et R. VERRECCHIA pour le développement des caméras P 600 X et P 550 X, MM. PRUVOT, COCHET, LEPLEY et leurs équipes pour leur assistance technique.

REFERENCES

- /1/ "The LLL Compact 10 ps Streak Camera"
S.W. THOMAS, J.W. HOUGHTON, G.R. TRIPP, L.W. COLEMAN
Proc. Xith Congress on High Speed Photography - LONDON 1974
- /2/ "Diagnostic d'impulsion laser avec une caméra ultra-rapide"
C. CHANCEL, N. FLEUROT, F. GARAUDE, J.P. GEX
Proc. Xith Congress on High Speed Photography - LONDON 1974
- /3/ "Une nouvelle optique électronique pour une caméra à balayage de fente picoseconde"
G. CLEMENT, C. LOTY, J.P. ROUX, C. CHANCEL
Proc. Xith Congress on High Speed Photography - LONDON 1974
- /4/ "Performances dynamiques de la caméra à balayage de fente à optique bilamellaire"
B. BOUTRY, C. DELMARE, N. FLEUROT
I.E.E.E. International Conference on Plasma Science - MONTREAL 1979

- /5/ "Analyse des performances d'une nouvelle caméra à balayage de fente
picoseconde"
N. FLEUROT, G. JEAN FRANCOIS
Proc. XIIIth Int. Congress on High Speed Photography and Photonics -
TOKYO 1978
- /6/ "Fast Electron Preheating in Exploding Pusher Experiment"
C. BAYER, D. BILLON, M. DECROISSETTE, D. JURASZEK, D. LAMBERT,
J. LAUNSPACH, M. LOUIS-JACQUET, J.L. ROCCHICCIOLI, D. SCHIRMANN
Vth Workshop on Laser Interaction with Matter - ROCHESTER 5-9 Nov.1979
- /7/ "Picosecond Streak Camera with a Lamellar Optics Image Converter Tube"
B. BOUTRY, C. DELMARE, N. FLEUROT
XIIIth Congress on High Speed Photography and Photonics - TOKYO 1978

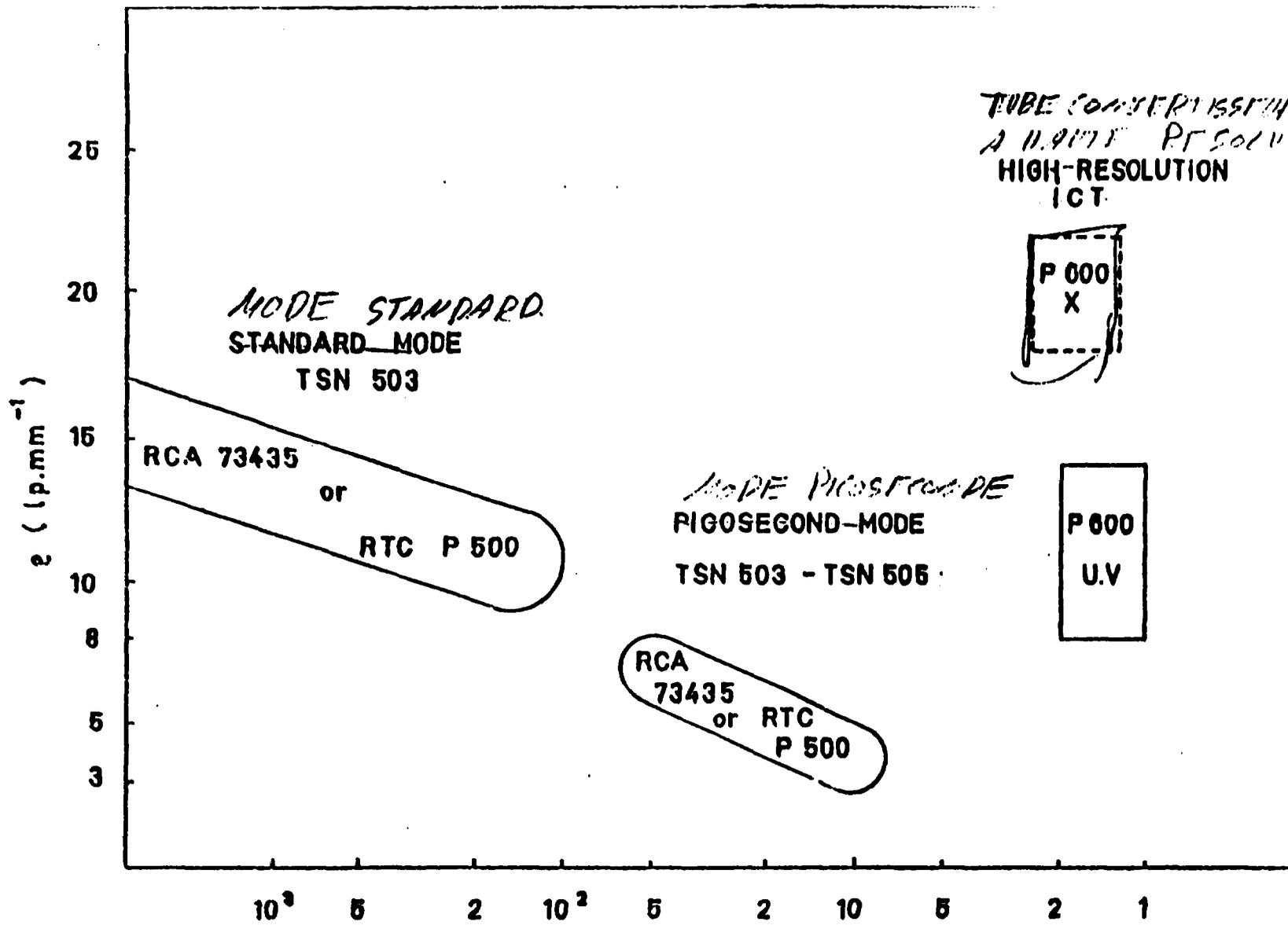


FIGURE 1

RESOLUTION SPATIALE EN FONCTION DE LA RESOLUTION TEMPORELLE
 SPATIAL-RESOLUTION-OF-I.C.T. VERSUS TIME RESOLUTION
 DES TUBES CONVERTISSEURS D'IMAGE.

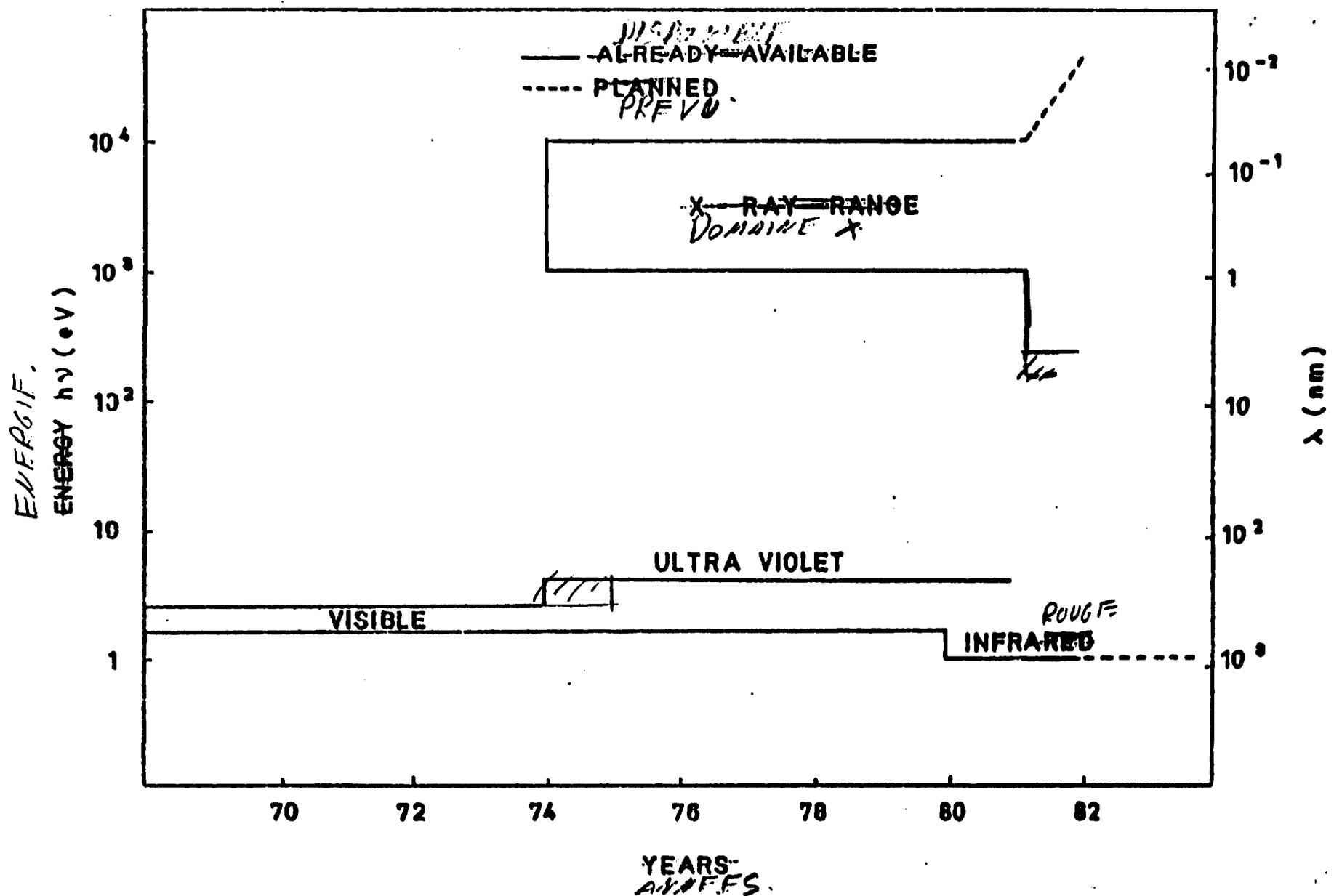
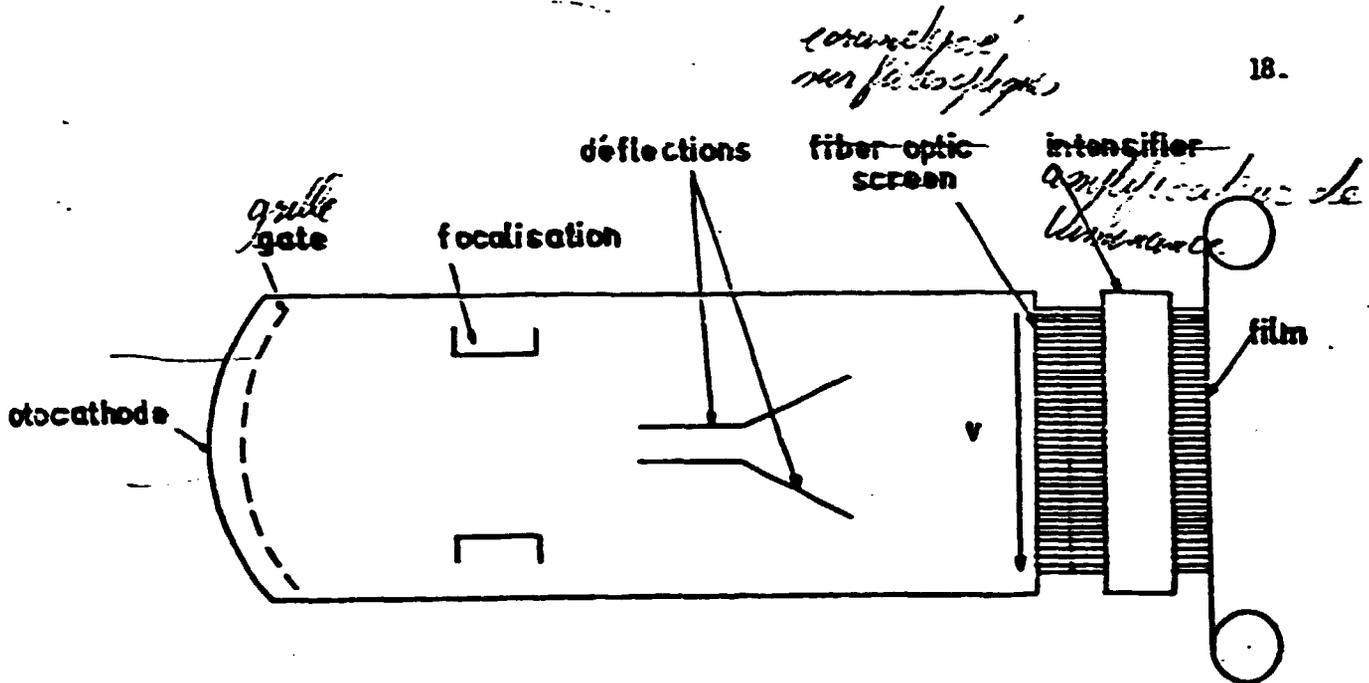
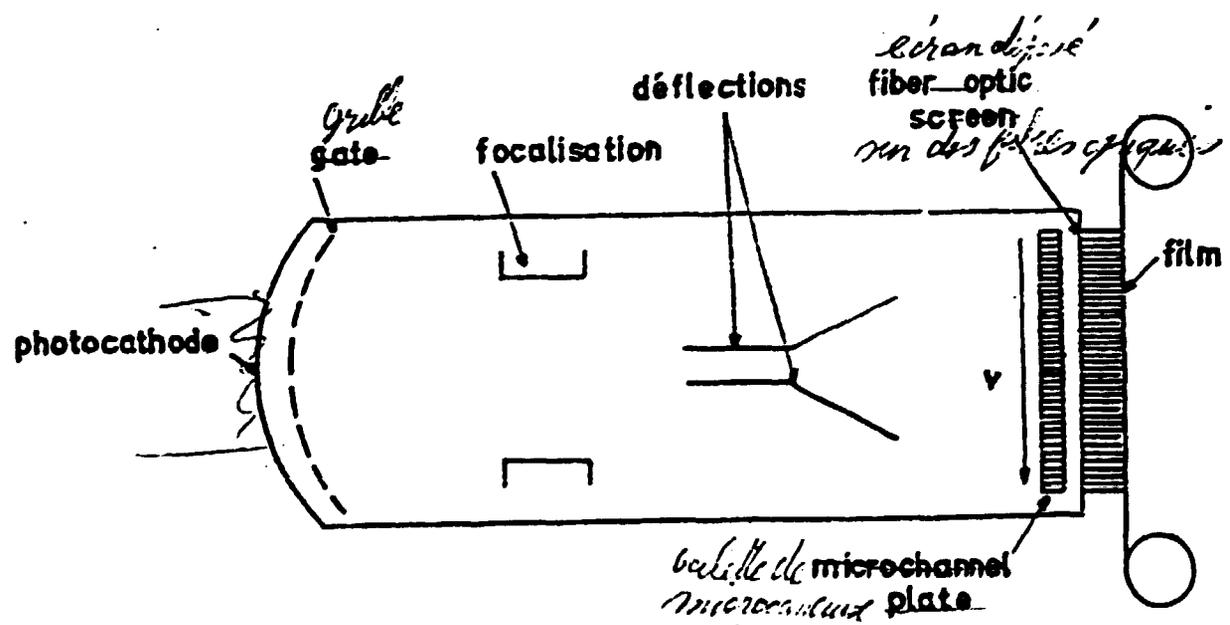


FIG. 4. DEVELOPMENT OF SPECTRAL RANGE FOR PICOSECOND-STREAK CAMERAS.

FIG. 2. Evolution du domaine spectral des cameras a fente de fente.



Tube convertisseur d'images P500X (TSN 503X)
 RCA 73435 ICT (TSN 503)



Tube convertisseur d'images P500FX (TSN 505X)
 RTC XX 1370 or P 500 F ICT (TSN 505)

FIG. 2 - SCHEMATIC DIAGRAM OF TSN 503 AND TSN 505 CAMERAS.

Figure 3: Diagramme schématique des CAMÉRAS TSN 503X et TSN 505X

	TSN 303 X	TSN 505 X
PHOTOCATHODE	GOLD 0.35 μm BE 25 μm CR	GOLD-0.35 μm BE 25 μm CR
GAIN THEORIQUE THEORETICAL-GAIN (ph/ph)	20000	2000
RESOLUTION TEMPORELLE TIME RESOLUTION (ps)	< 30	< 30
DYNAMIQUE DYNAMIC-RANGE	> 40	> 40
RESOLUTION TEMPORELLE SPATIAL RESOLUTION <small>pour une optimisation temporelle</small> FOR A TEMPORAL OPTIMIZATION ($v^{-1} = 40 \text{ ps} \cdot \text{mm}^{-1}$)	3 $\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ ^{pour} FOR 30 ps	2 $\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ ^{pour} FOR 30
RESOLUTION SPATIALE SPATIAL RESOLUTION <small>pour une optimisation spatiale</small> FOR A SPATIAL OPTIMIZATION ($v^{-1} = 40 \text{ ps} \cdot \text{mm}^{-1}$)	8 $\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ ^{pour} FOR 50 ps	6 $\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ ^{pour} FOR 80 ps
<small>linéarité différentielle</small> DIFFERENTIAL LINEARITY	$\pm 13 \%$	$\pm 9 \%$

~~FIG. 2~~ MAIN PERFORMANCES OF PICOSECOND X-RAY STREAK CAMERAS

Fig 4 - Principales performances des caméras X à échelle de femtoseconde

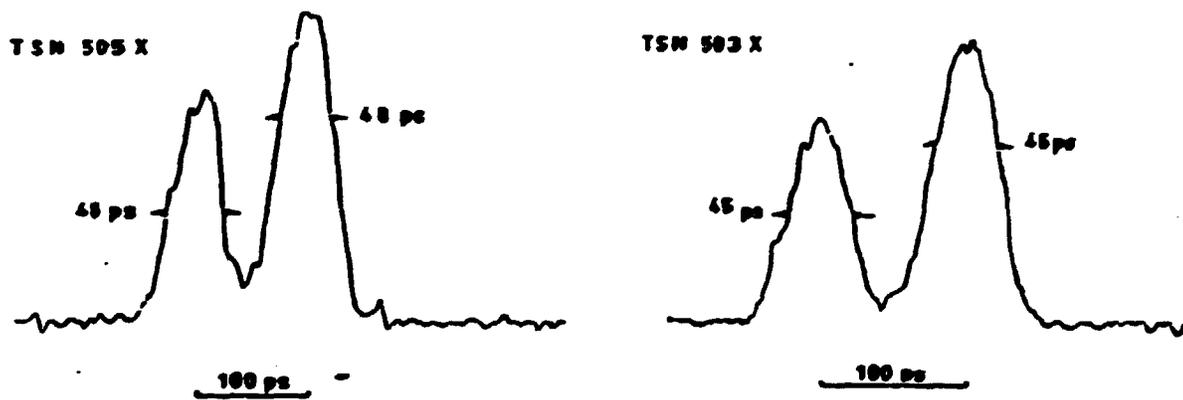
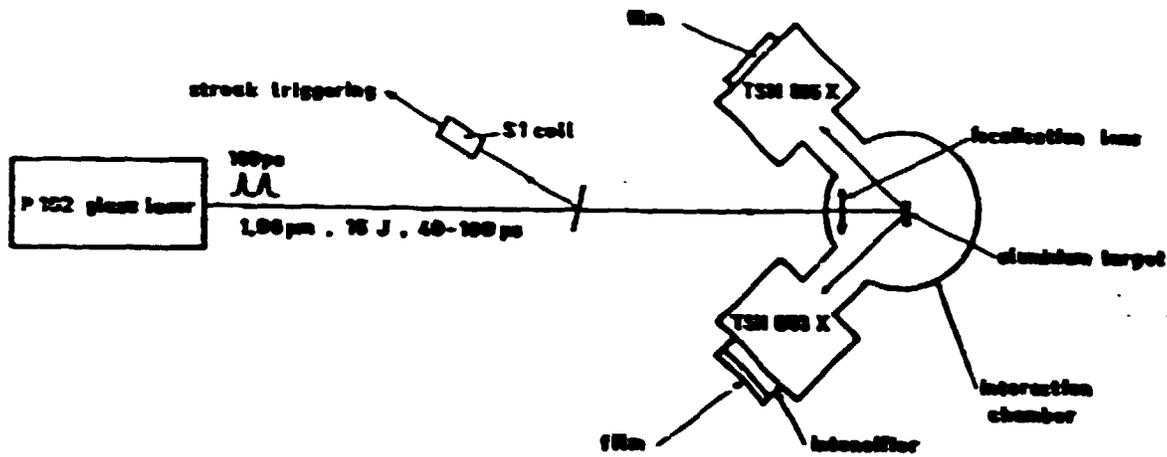


FIG 5: TIME RESPONSE OF TSN 503 AND TSN-505 TO THE SAME X-RAYS EMISSIONS OF P102 LASER INDUCED PLASMA

Reponses temporelles d'une TSN 503 x et d'une TSN 505x aux memes émissions x des plasmas ^(neg) induits par laser

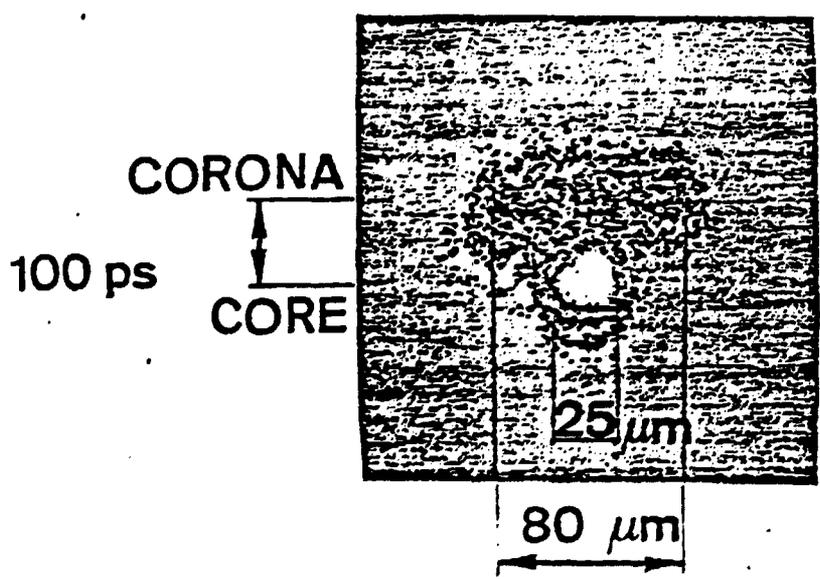
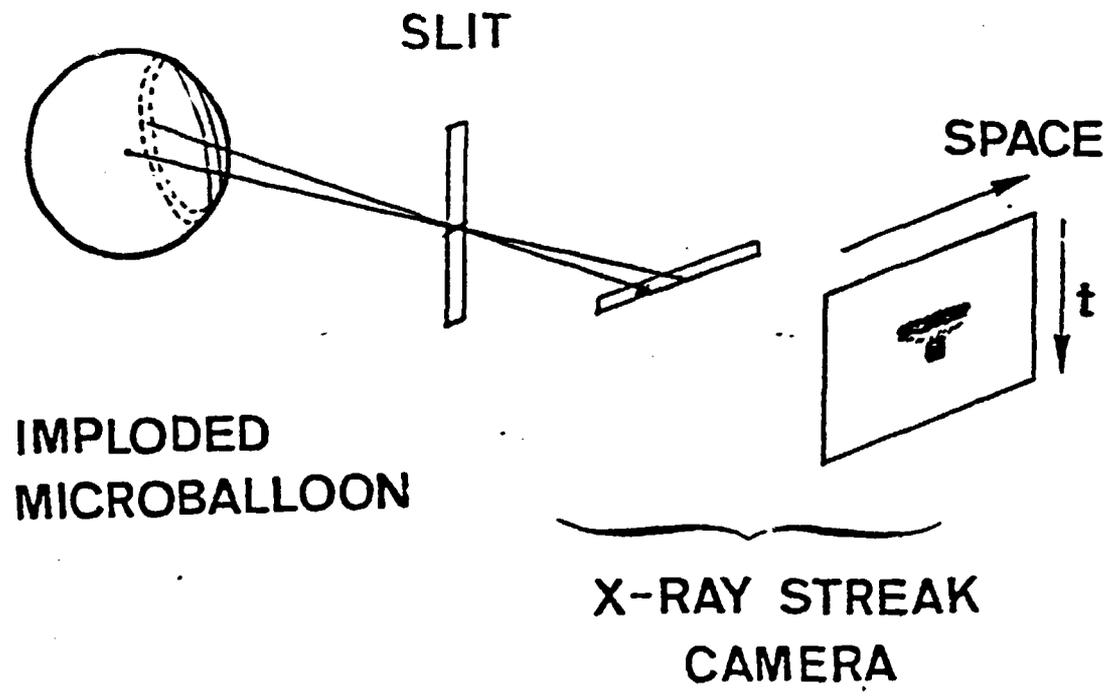


FIG. 8 *Visualisation d'une compression Hydrodynamique*
VISUALISATION OF HYDRODYNAMIC COMPRESSION
OF A GLASS MICROBALLOON
d'un microballon de verre.

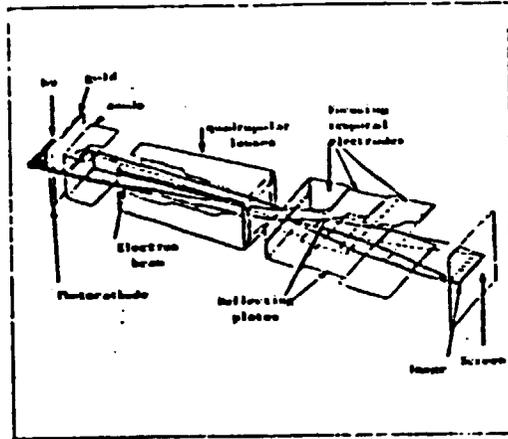


Fig. 7 : Optique électronique du P 600 x

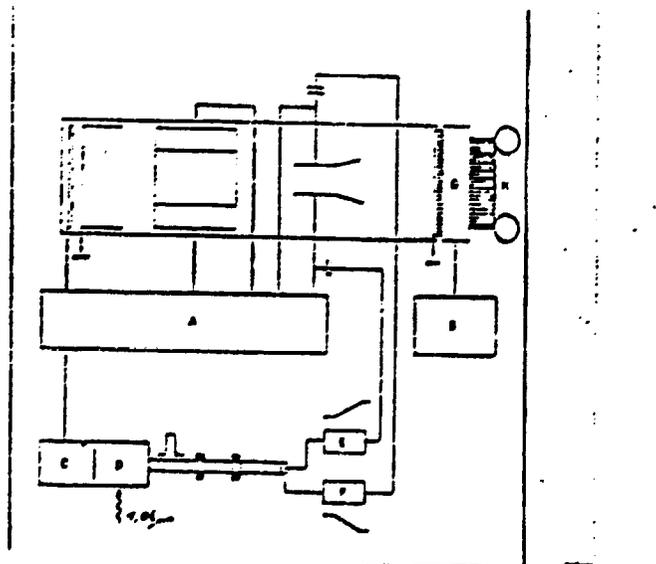


Fig. 8 : Synoptique synthétique de la caméra P 600 x

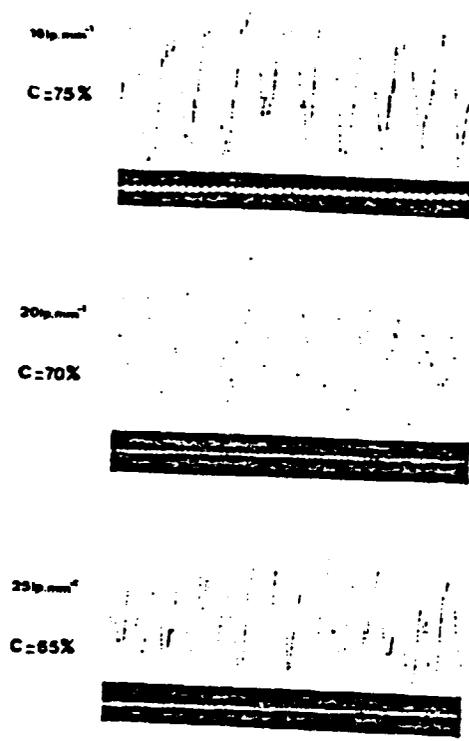


Fig. 9 : Résolution spatiale du P 600x

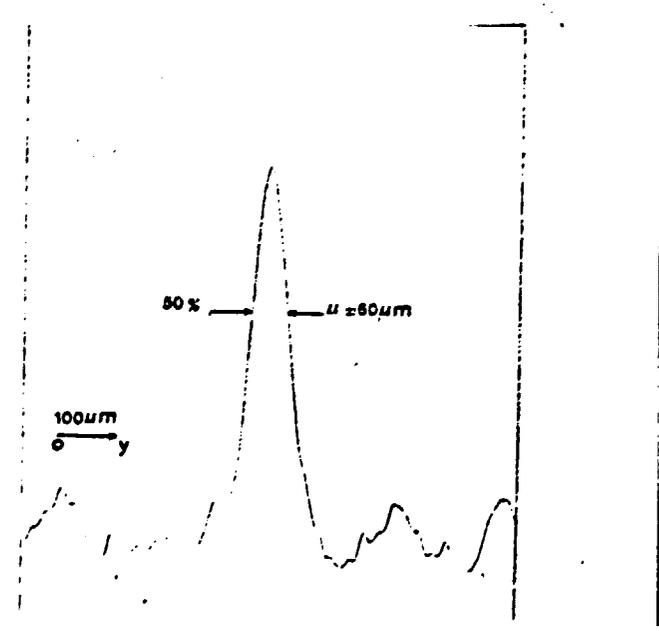


Fig. 10 : Résolution selon l'axe temporel.

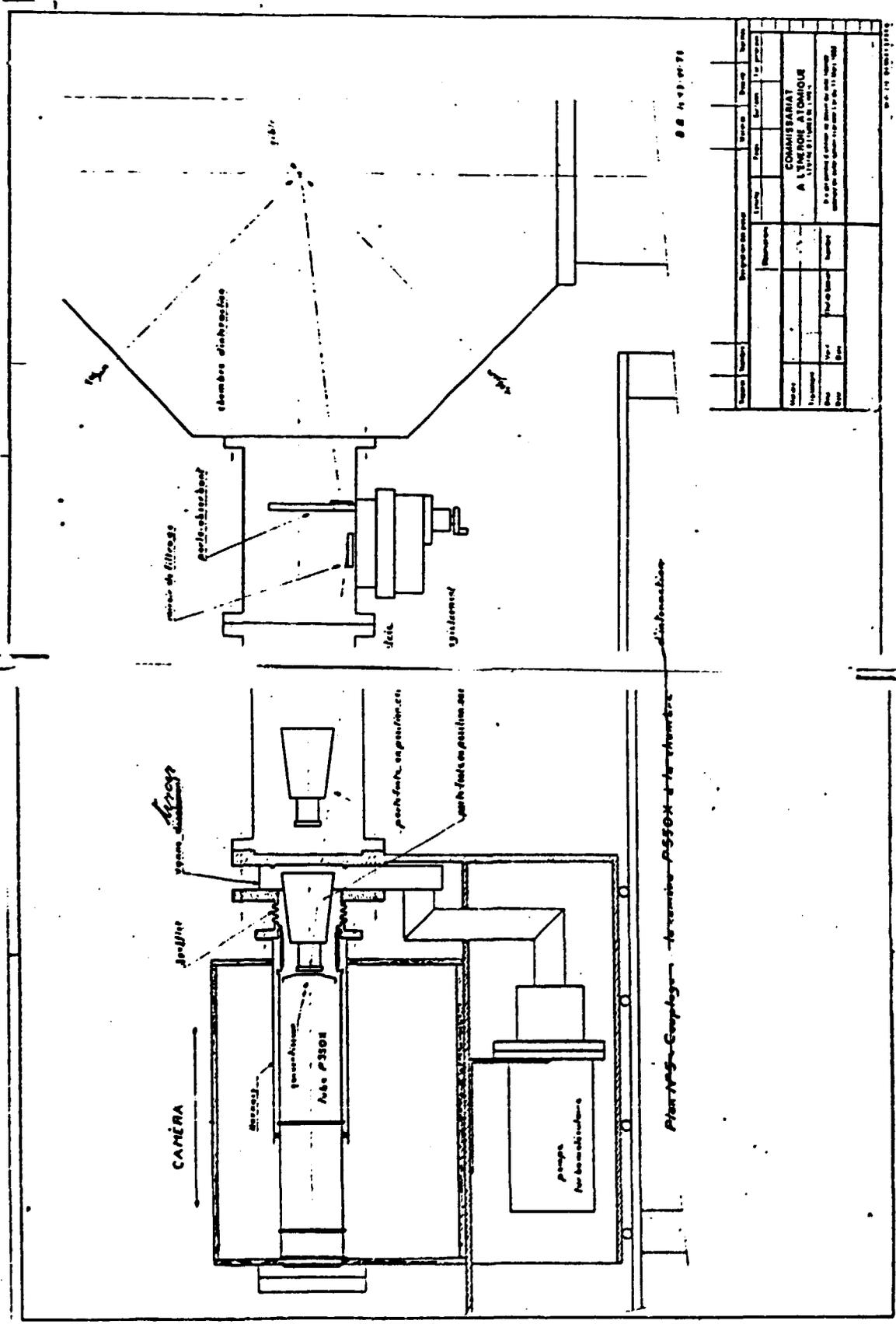
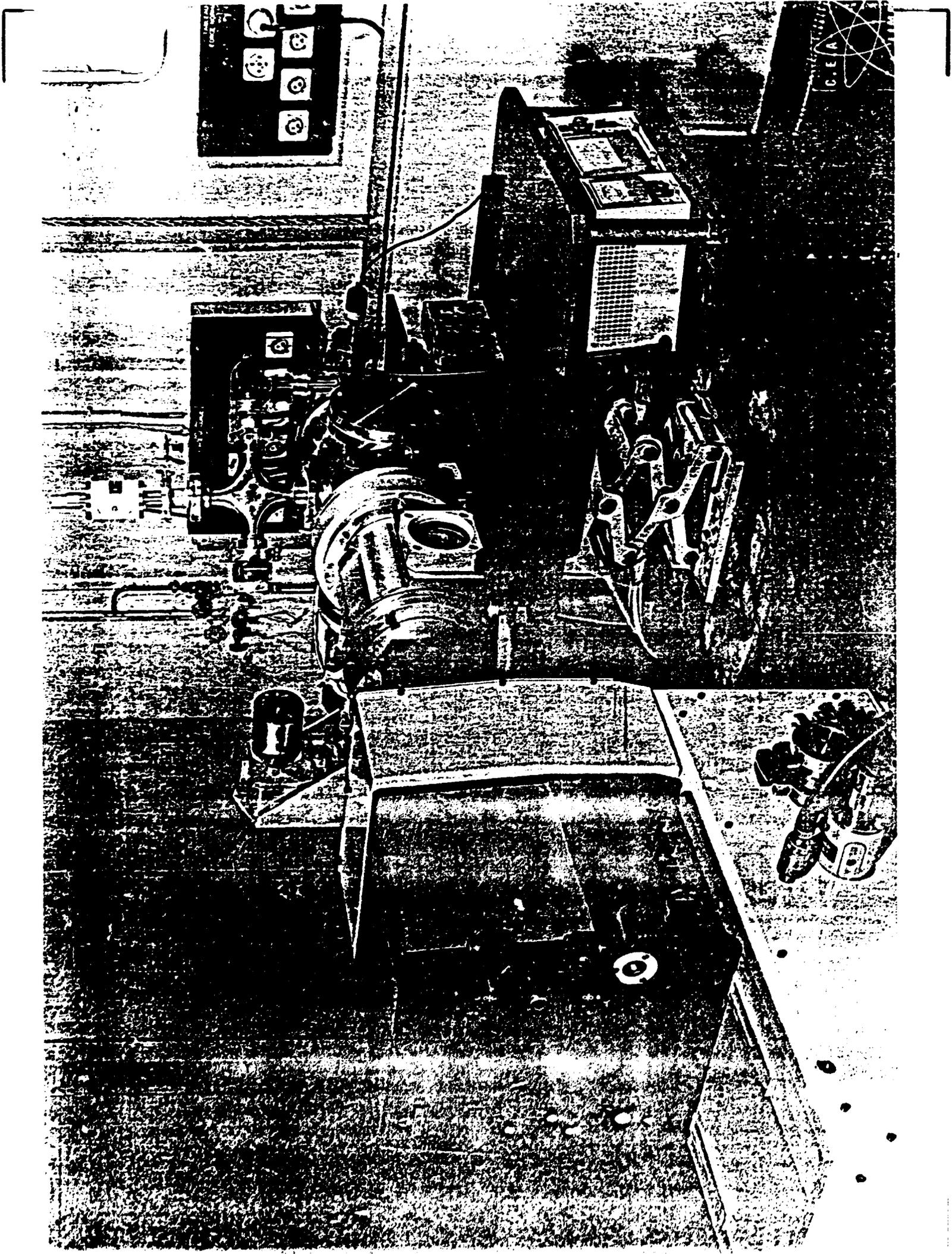


Fig 11 Couplage de la camera P550X à la chambre d'hypos



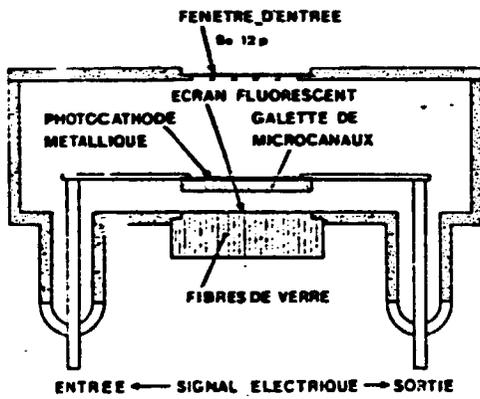


Fig 13 - Schema de principe du tube obturateur

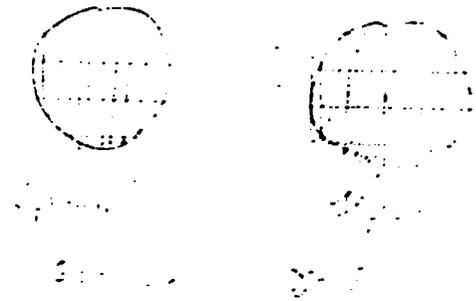


Fig 14 - Resolution spatiale -

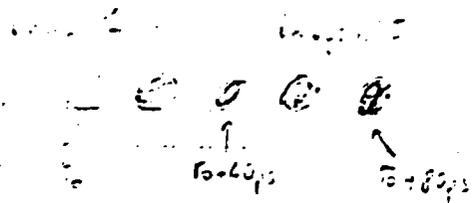


Fig 15 - Fonction d'ouverture du tube obturateur

