

FR80 01962

Conference europeenne d'optique 1980: Horizon de l'optique.

Pont à mousson, France, 22 - 25 Avril 1980.

CEA - CONF 5176

DIAGNOSTICS ULTRA-RAPIDES ASSOCIES AUX EXPERIENCES D'INTERACTION LASER-MATIERE

N. FLEUROT

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

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

Le Centre d'Etudes de Limeil possède plusieurs lasers à verre dopé au néodyme ($\lambda = 1,06 \mu\text{m}$) de très haute puissance afin d'étudier les plasmas créés lors de l'interaction laser-matière dans la gamme de durée 50 ps à 1 ns. Pour mener à bien ce programme, il a été nécessaire de développer des moyens de diagnostic nouveaux qui permettent d'effectuer :

- le contrôle et la métrologie indispensable de l'impulsion laser ;
- les mesures physiques autour de l'expérience d'interaction elle-même.

Nous allons décrire quelques uns des moyens nouveaux maintenant mis en place autour des expériences et des lasers.

I - METROLOGIE D'UNE IMPULSION LASER

Rappelons qu'une caractéristique fondamentale des lasers de puissance est leur faible cadence de tir (1 tir toutes les quelques minutes dans le meilleur des cas). Les techniques d'échantillonnage qui permettent l'accès aux résolutions temporelles élevées ne sont donc pas utilisables et il est nécessaire d'améliorer les résolutions des dispositifs d'acquisition travaillant en monocoup.

Dans ce domaine les réponses temporelles des cellules photoélectriques et les photomultiplicateurs rapides sont limités à des durées allant de 60 ps à quelques centaines de picosecondes. Ceci explique l'effort important que nous avons consenti dans le domaine des caméras à balayage de fente qui sont actuellement les seuls instruments capables d'atteindre des résolutions temporelles comprises entre 1 à 100 ps.

I-1. Développement des caméras à balayage de fente

Figure 1 : Les tubes convertisseurs d'image standard ont une résolution temporelle limitée vers 100 ps :

- par leur faible gain lumineux qui ne permet pas d'augmenter la vitesse de balayage au delà de quelques 10^8 cm.s⁻¹ ;
- par la dispersion des temps de transit.

Pour pallier ces inconvénients nous avons poursuivi deux approches parallèles :

1. Caméra TSN 503-04

La figure 2 montre le couplage par fibres optiques d'un amplificateur de lumière externe sur le tube classique précédent. Nous avons simultanément :

- augmenté la vitesse de balayage qui atteint 2.10^9 cm.s⁻¹ (durée 2 ns) ;
- augmenté le champ d'extraction des photo-électrons sur la photocathode pour limiter la dispersion des temps de transit.

2. Caméra TSN 505

La figure 3 montre que cette fois l'amplificateur de micro-canaux a été intégré dans la structure du tube défecteur. Cette technologie développée par le L.E.P. a également été adoptée par la société HAMAMATSU.

La figure 4 présente une vue générale de la caméra TSN 505 avec son bloc optique et son panneau de commande.

Cette génération de caméras constitue la base du matériel opérationnel autour des expériences de notre laboratoire.

Les figures 5 à 7 présentent quelques caractéristiques générales de ces caméras notamment :

- la réponse temporelle ;
- la dynamique en éclairnement pour des impulsions de durée 8 ps ;
- la dynamique en éclairnement pour des impulsions de durée 25 ps.

Exemple de métrologie sur un laser monochaine

Ce type de caméra est utilisé pour mesurer le profil et la durée des impulsions délivrées par la source laser de puissance.

La figure 8 montre le profil temporel de l'impulsion du laser OCTAL analysée à l'aide d'un étalon de Fabry-Perot qui génère une série d'impulsions à partir de l'impulsion mère, destinées à réaliser en fait un auto-étalonnage en éclairnement et en temps de la caméra à balayage de fente.

Cette technique très puissante permet de déceler instantanément tout défaut de fonctionnement de l'appareil et améliore considérablement la précision des mesures lors du dépouillement.

I-2. Réalisation de tubes convertisseurs à haute résolution spatio-temporelle

Nous avons vu les limitations des matériels actuels qui sont principalement dues au fait qu'ils ont été étudiés il y a bientôt 40 ans en ce qui concerne les tubes image, et en dehors de la perspective d'une utilisation avec balayage de fente.

Nous avons donc confié à la société L.E.P. l'étude d'un nouveau tube convertisseur d'image, dénommé P600, et spécialisé dans ce mode de fonctionnement. La figure 9 nous en présente le fonctionnement.

L'originalité de l'optique électronique de ce tube repose sur l'utilisation de deux lentilles électroniques différentes pour la focalisation spatiale et temporelle.

La figure 10 montre la caméra prototype à photocathode sensible en U.V. (150 à 200 nm) réalisée au C.E.L. et l'éclateur à déclenchement photonique associé.

La figure 11 présente le temps de montée obtenu avec cette caméra :

- . entre 10 et 90 % il est de l'ordre de 1 ps ;
- . entre 1 et 10 % il passe à 4 ps ;
- . entre 1% et 1 % il est de 7 ps environ.

La résolution spatiale est simultanément meilleure que 10 pl mm^{-1} .

On constate que ces performances (obtenues simultanément) représentent une amélioration considérable par rapport à la génération TSN 503/TSN 505. Une telle caméra P 600 est en cours d'adaptation au domaine spectral X 1 à 10 keV.

I-3. Acquisition et traitement automatique des images de caméra

L'exploitation des caméras à balayage de fente est rendue très lourde du fait de la nécessité de réaliser des enregistrements sur film négatif.

Nous avons donc substitué au film photographique une caméra de télévision qui permet l'acquisition et le stockage de l'image sous forme numérique après un pré-traitement.

La figure 12 montre comment il est possible de découper sur la photocathode de la caméra à balayage de fente quatre canaux différents. Ces canaux sont analysés par la caméra de télévision puis traités séparément par quatre blocs distincts. Un écran de visualisation permet de présenter chaque profil temporel enregistré.

Il est nécessaire de souligner l'intérêt d'un tel dispositif qui réalise en fait une fonction analogue à celle de quatre oscilloscopes de bande passante équivalente à 30 Ghz au moins.

La figure 13 présente la maquette à quatre voies réalisée à Limeil.

La figure 14 présente la version prototype étendue à 32 canaux et réalisée par les sociétés SEIN et Thomson-CSF (dispositif DATAIC).

La figure 15 montre les principaux résultats obtenus avec la maquette CEL. Ce dispositif est actuellement en exploitation sur le laser OCTAL et permet pour la première fois le contrôle instantané des profils d'impulsions délivrées aux expérimentateurs.

Diagnostiques spécifiques des lasers multichaînes

Lors de l'utilisation d'un laser multichaîne (OCTAL en possède huit), il est nécessaire, avant d'aborder une expérience, de contrôler le parfait synchronisme des huit faisceaux sur la cible et ce à mieux que 10 ps près (même dans le cas d'impulsions durant 100 ps ou plus). Pour ce faire, deux voies sont possibles .

La première utilise un commutateur photorésistant (figure 16) qui délivre sur sa sortie un échelon de tension dont le temps de montée est approximativement celui de l'impulsion laser.

Si l'on associe deux commutateurs polarisés en sens inverse ($D_1 : -V$ et $D_2 : +V$) comme l'indique la figure 17 et déclenchés par deux impulsions laser provenant de deux chaînes successives il est possible de former une impulsion électrique dont la durée dépend du décalage temporel entre les deux impulsions laser. En déplaçant le détecteur D_1 de chaîne en chaîne on peut mesurer et corriger les décalages respectifs ; cette méthode nous a permis d'assurer le synchronisme des 8 chaînes d'OCTAL à mieux que ± 6 ps près (Figure 18).

Ce processus quoique suffisamment précis pour nos besoins constitue une méthode de mesure statistique, donc longue à mettre en oeuvre. Nous avons la possibilité d'utiliser maintenant (figure 19) un chronomètre à 8 voies mis au point par Thomson-CSF et dont le jitter est inférieur ou égal à une picoseconde. Les mêmes détecteurs silicium photoconducteurs étant utilisables pour déclencher la voie de déclenchement et les 8 voies d'arrêt du chronomètre, nous pourrions synchroniser les chaînes laser avec la même précision que précédemment, mais le contrôle sera possible à chaque tir sur les 8 voies simultanées.

II - DIAGNOSTICS ASSOCIES AUX EXPERIENCES

Ils permettent d'enregistrer les phénomènes observés lors de la formation du plasma sur la cible. Les données expérimentales que l'on en déduit sont confrontées aux descriptions théoriques ou aux résultats de simulations numériques.

La figure 20 montre les deux types de diagnostic possible :

- l'observation directe de l'émission de la cible (photons, particules) constitue un diagnostic passif ;
- par opposition, l'observation de la cible à l'aide de faisceaux sonde traversant le plasma constitue un diagnostic actif (interféromètre, ombroscopie).

Cette analyse peut s'effectuer :

- selon deux dimensions spatiales (mode obturé ou intégral) ;
- selon une dimension spatiale et avec résolution temporelle (mode balayage de fente).

Nous limiterons notre exposé aux techniques d'analyse les plus récentes dans le domaine du rayonnement X, plus particulièrement pour la gamme spectrale allant de 1 à 10 Å, quoique de nombreux dispositifs développés au C.E.L. fonctionnent également dans le domaine visible aux U.V. (imagerie, interférométrie).

La mise en oeuvre de ces techniques est liée à la nécessité d'analyser le comportement interne de la cible. Ceci n'est rendu possible que par l'utilisation d'un rayonnement suffisamment dur pour ne pas être absorbé par les parois du microballon irradié.

Nous avons donc adapté nos moyens de diagnostic à ces longueurs d'onde. Un détecteur photoélectrique bien adapté est l'or évaporé sur un substrat de béryllium de faible épaisseur (25 μm environ). La figure 21 montre son rendement quantique en fonction de l'énergie des photons X.

Il a été ainsi possible de modifier des composants commerciaux pour les adapter au spectre X ; citons ainsi les tubes développés au L.E.P. :

- les cellules photoélectriques XVHR06 de temps de montée $t = 90$ ps ;
- les photomultiplicateurs HR 305X de gain 10^3 ;
- les caméras à balayage de fente TSN 503 et TSN 505 X ;
- un tube obturateur X à 5 images et temps de pose 300 ps.

De ces quatre moyens de diagnostic, la caméra à balayage de fente se révèle encore être le plus puissant puisqu'elle permet à la fois de former une image spatialement et d'obtenir une résolution temporelle élevée. Le tube développé à cet effet est le tube P 500 FX dont la photographie est donnée en figure 22.

La figure 23 montre l'enregistrement d'une mire de résolution, de pas 170 μm , éclairée par une impulsion de rayon X de durée 80 ps.

Le passage au microdensitomètre de cet enregistrement révèle un taux de modulation de 35 %.

La figure 24 présente deux impulsions X créées par laser, de durée 45 et 38 ps qui sont bien résolues par la caméra TSN 505 X dont la résolution théorique est voisine de 20 ps.

La figure 25 montre une expérience d'étalonnage de la vitesse de balayage de la caméra réalisée sur l'expérience.

Exemples de diagnostics d'expériences

1. Diagnostic X passif

Le laser C6 est capable d'irradier une cible sphérique à l'aide de 4 faisceaux. Celle-ci s'échauffe et émet donc un rayonnement X. Si l'on projette cette image X à l'aide d'une optique à sténopé sur la fente d'une caméra à balayage de fente, nous pouvons observer l'évolution spatiale d'un diamètre de la cible au cours du temps (figure 26). Il est possible d'observer une évolution spatiale des deux parois de la coquille qui, distantes de 120 μm à l'instant origine, tendent à se rapprocher l'une de l'autre durant l'irradiation par le laser.

La figure 27 nous présente un diagnostic analogue réalisé en régime picoseconde et en cible sphérique : 92 ps séparent le début de l'irradiation de la couronne de la phase finale comprimée qui montre un coeur de 25 μm de diamètre environ.

On comprend maintenant tout l'intérêt de tels diagnostics qui permettent une visualisation directe de l'évolution spatio-temporelle des phénomènes d'interaction laser-matière.

Il faut ajouter qu'une analyse spectrale X simultanément possible si l'on effectue un filtrage spectral en modifiant la nature et l'épaisseur du détecteur et de l'absorbant qui lui sert de support.

CONCLUSION

Ces quelques exemples, quoique très limités, exposent une partie des efforts de développement des matériels nouveaux qui ont été entrepris à Limeil pour atteindre la maîtrise des mesures dans le domaine des temps brefs (1 à 100 ps) et des domaines spectraux visible, U.V. et X.

Ces efforts restent à poursuivre pour améliorer encore la qualité des performances déjà obtenues ainsi que pour explorer le domaine spectral X 100 eV à 1 keV également intéressants pour une interprétation correcte des phénomènes physiques mis en jeu dans nos expériences d'interaction laser-matière.

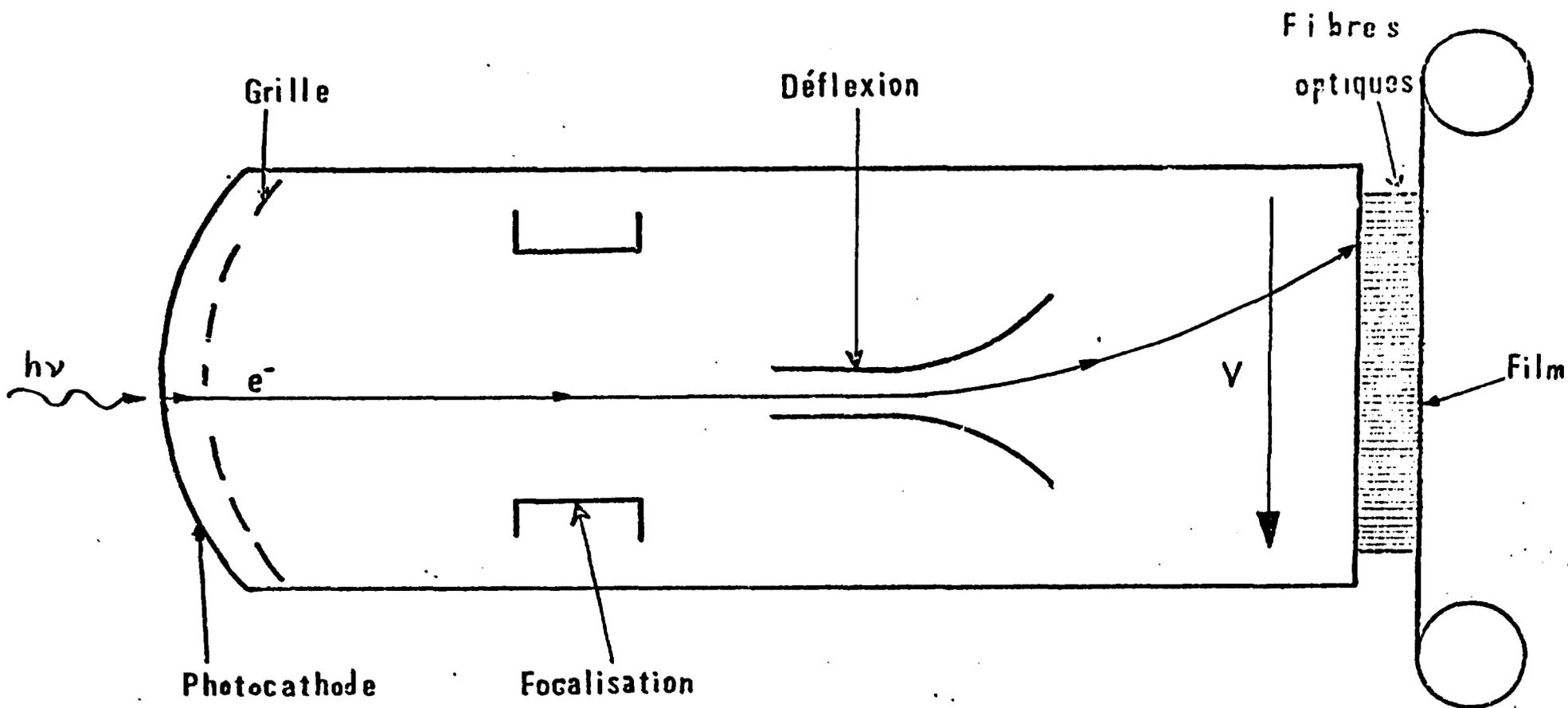


Figure 1 : Tube convertiseur d'image standard pour une caméra à balayage de fente

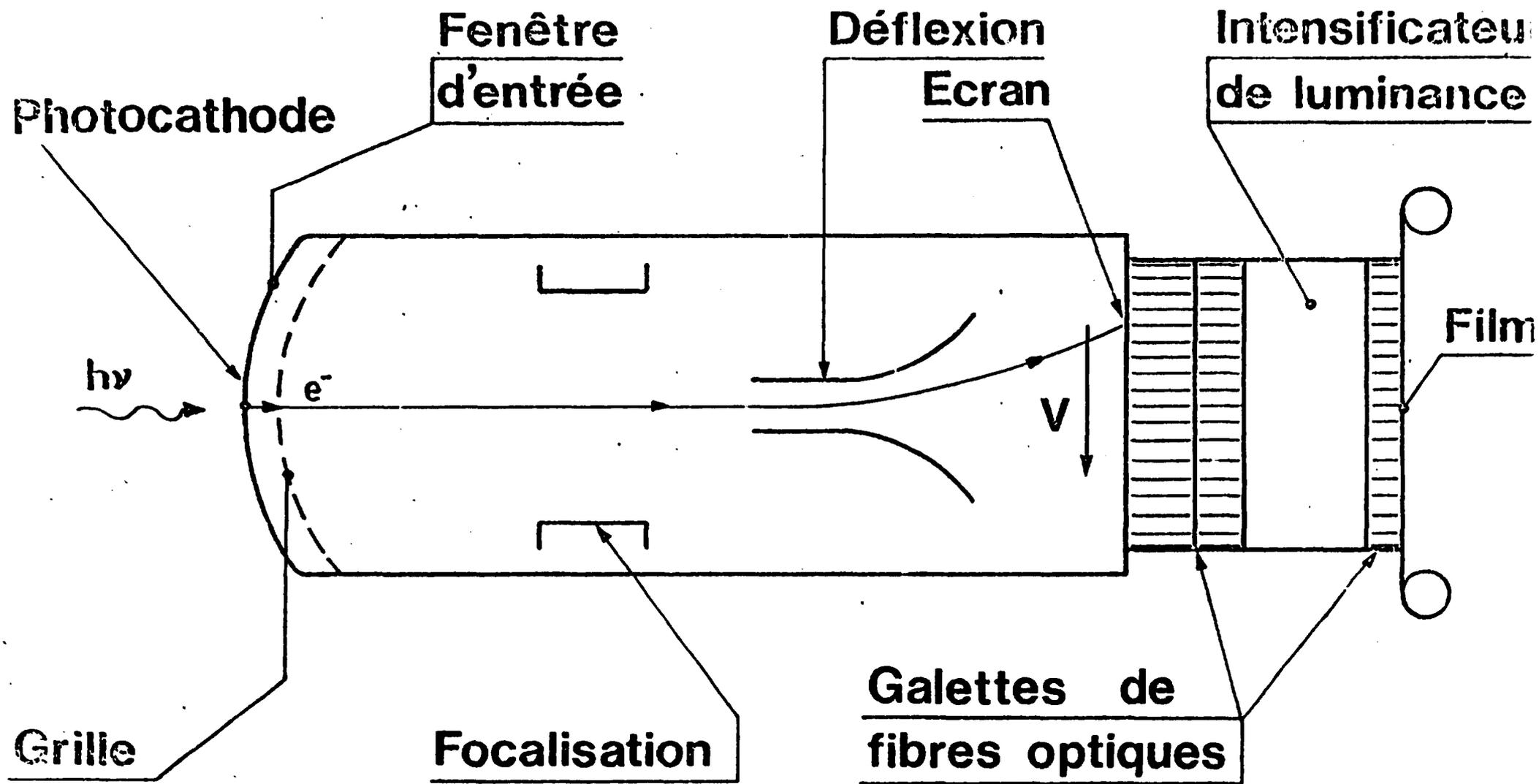


Figure 2 : Couplage d'un tube convertisseur d'images à un amplificateur de brillance

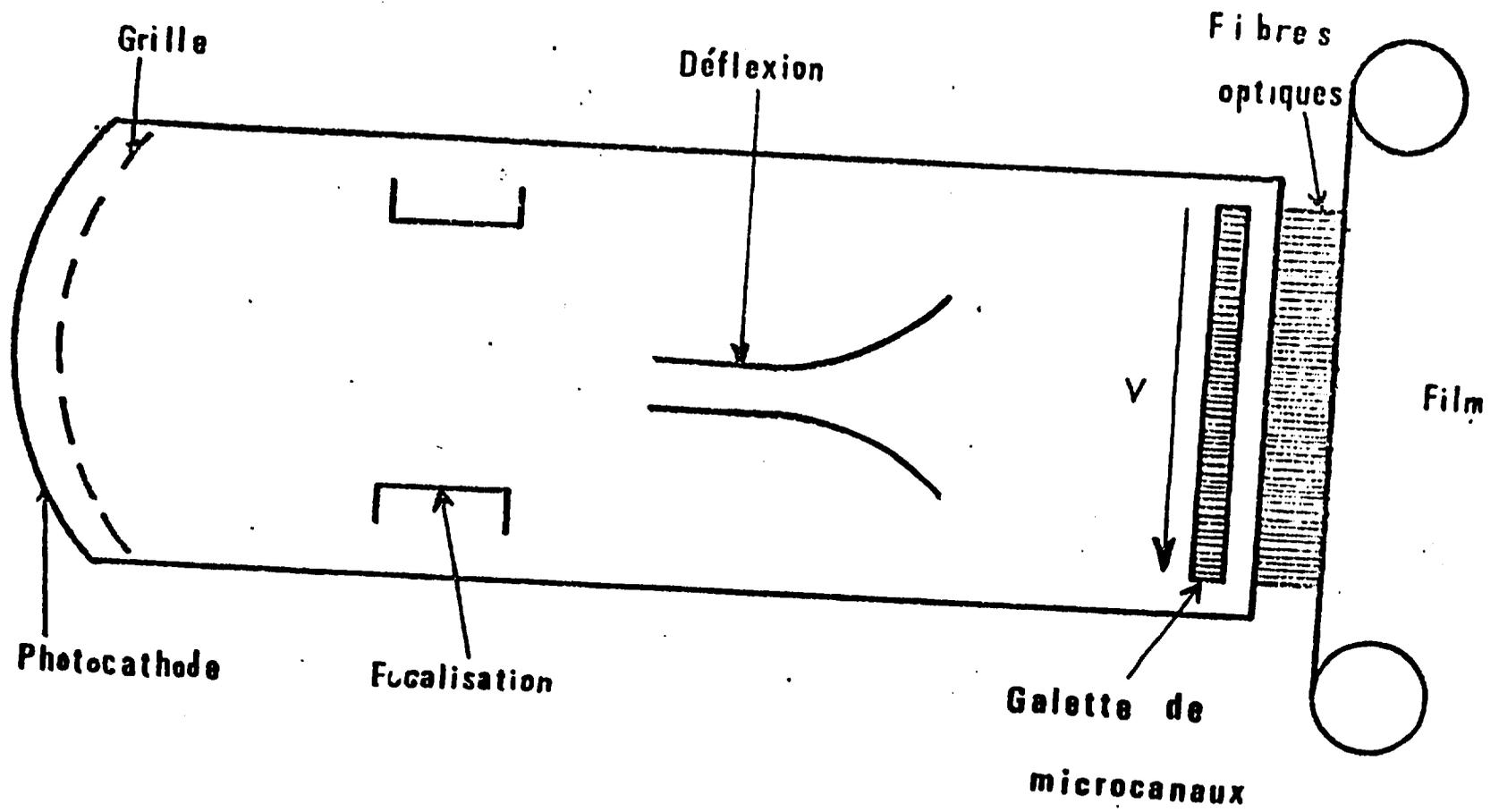


Figure 3 : Convertisseur d'images à amplificateur intégré (galette de microcanaux)

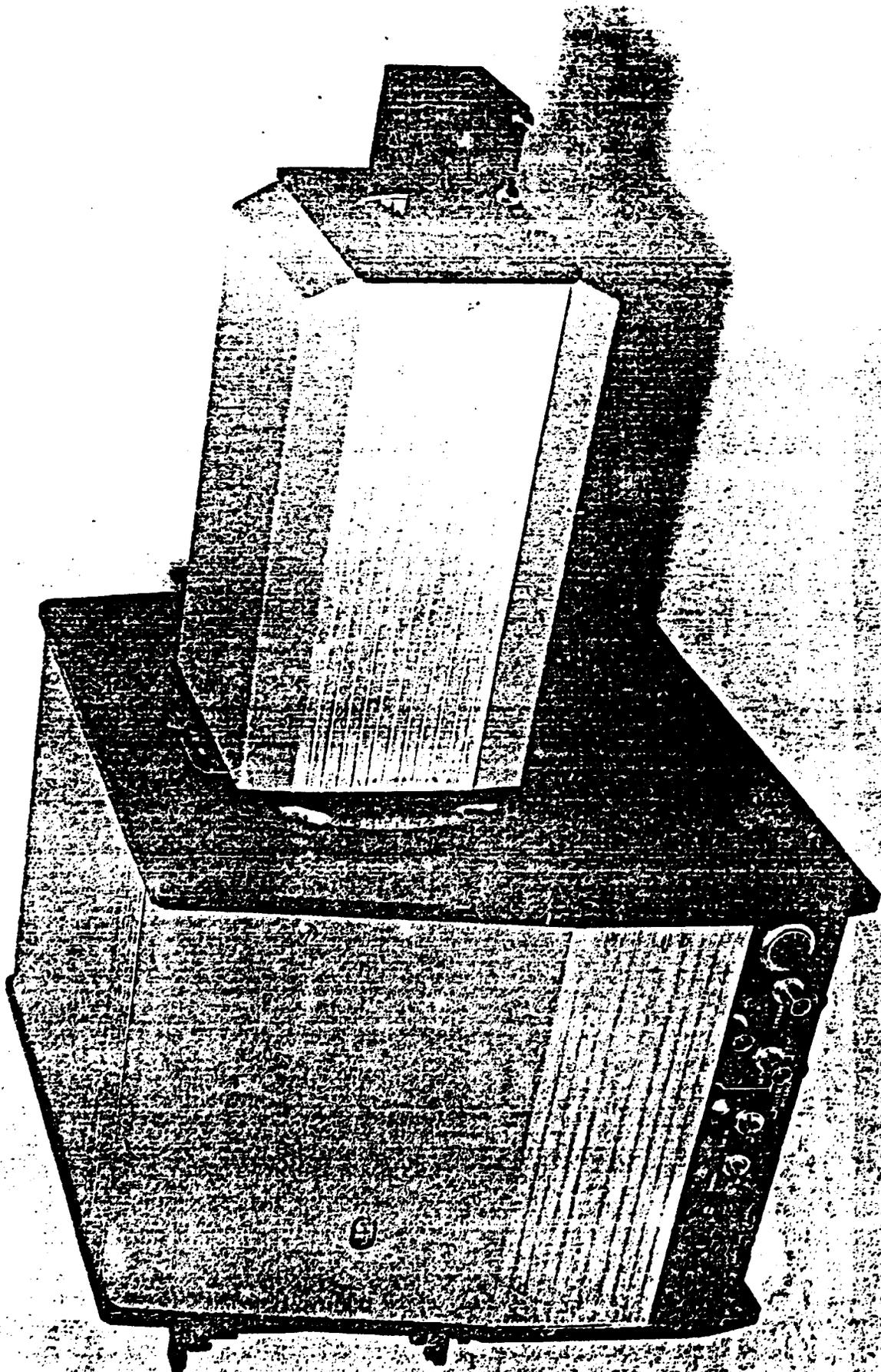


Figure 4 : Caméra ISN 505

TSN 505

$T = 2 \text{ ns}$

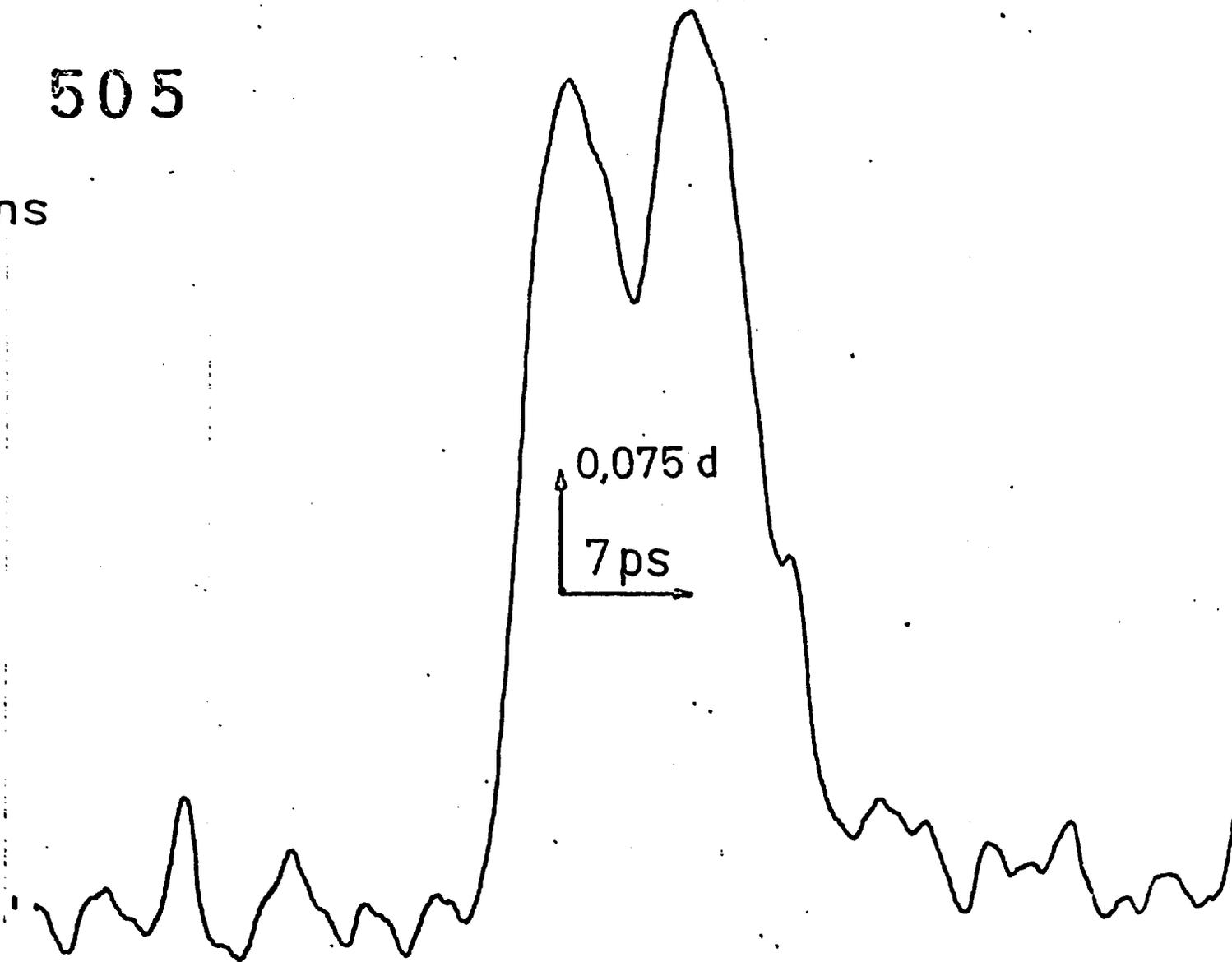


Figure 5 : Réponse temporelle de la caméra TSN 505

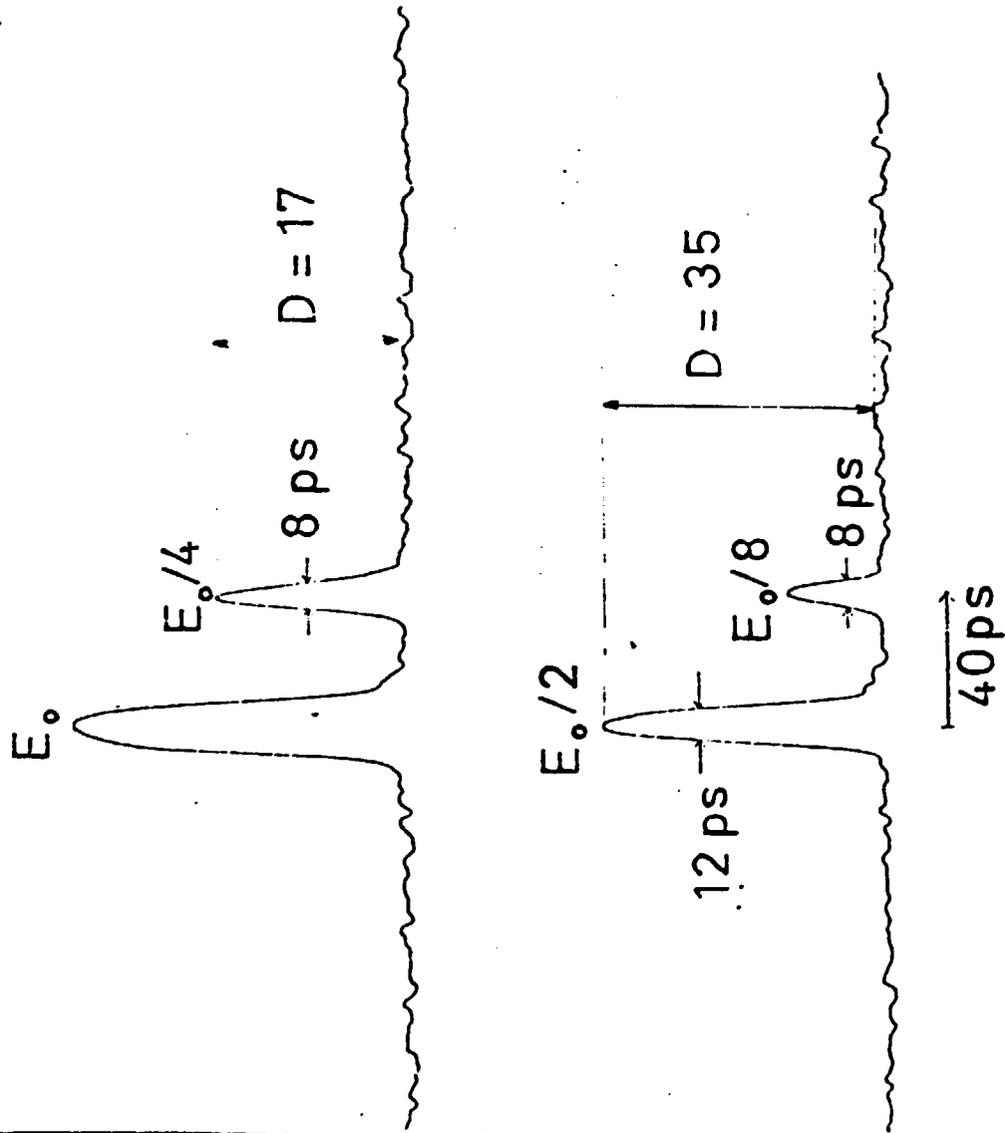
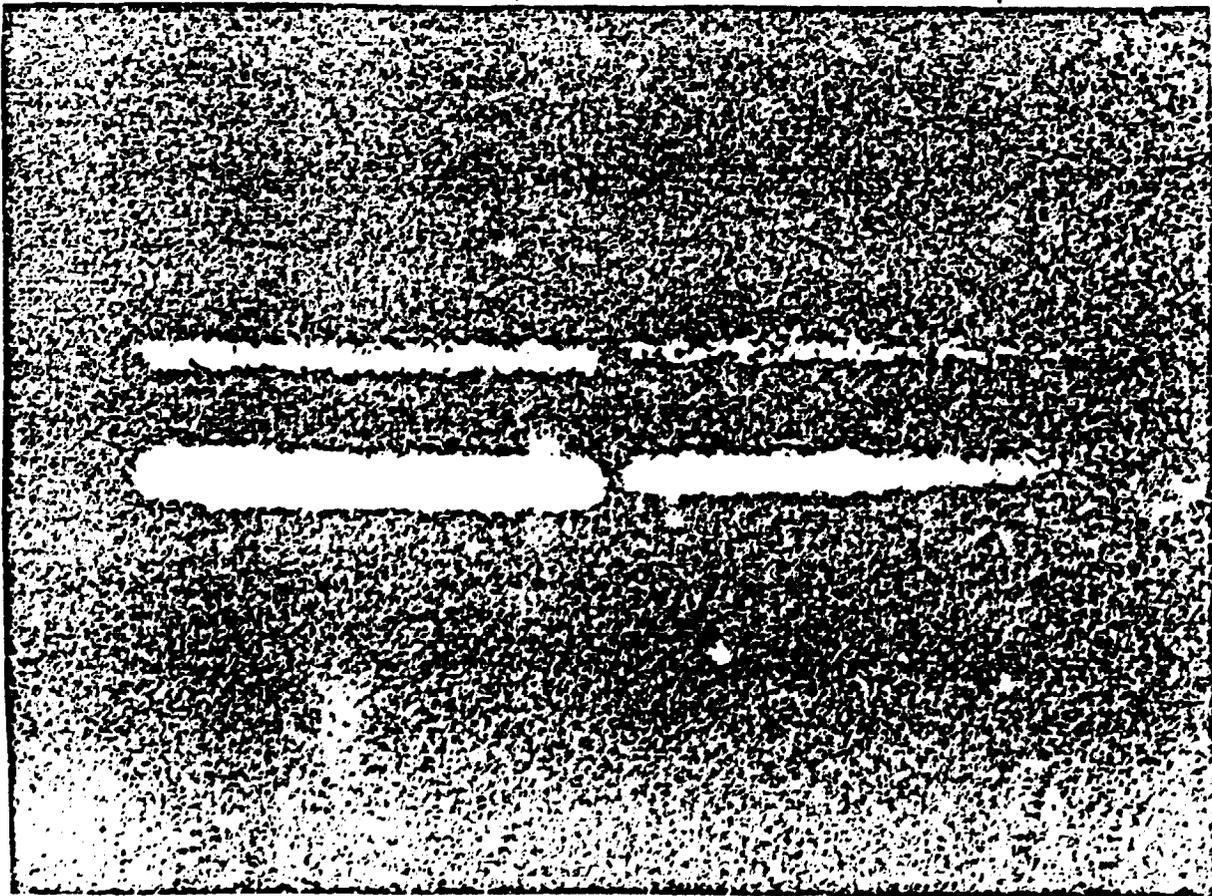


Figure 6 : Dynamique en éclairement ($T = 8$ ps) d'une caméra TSN 505

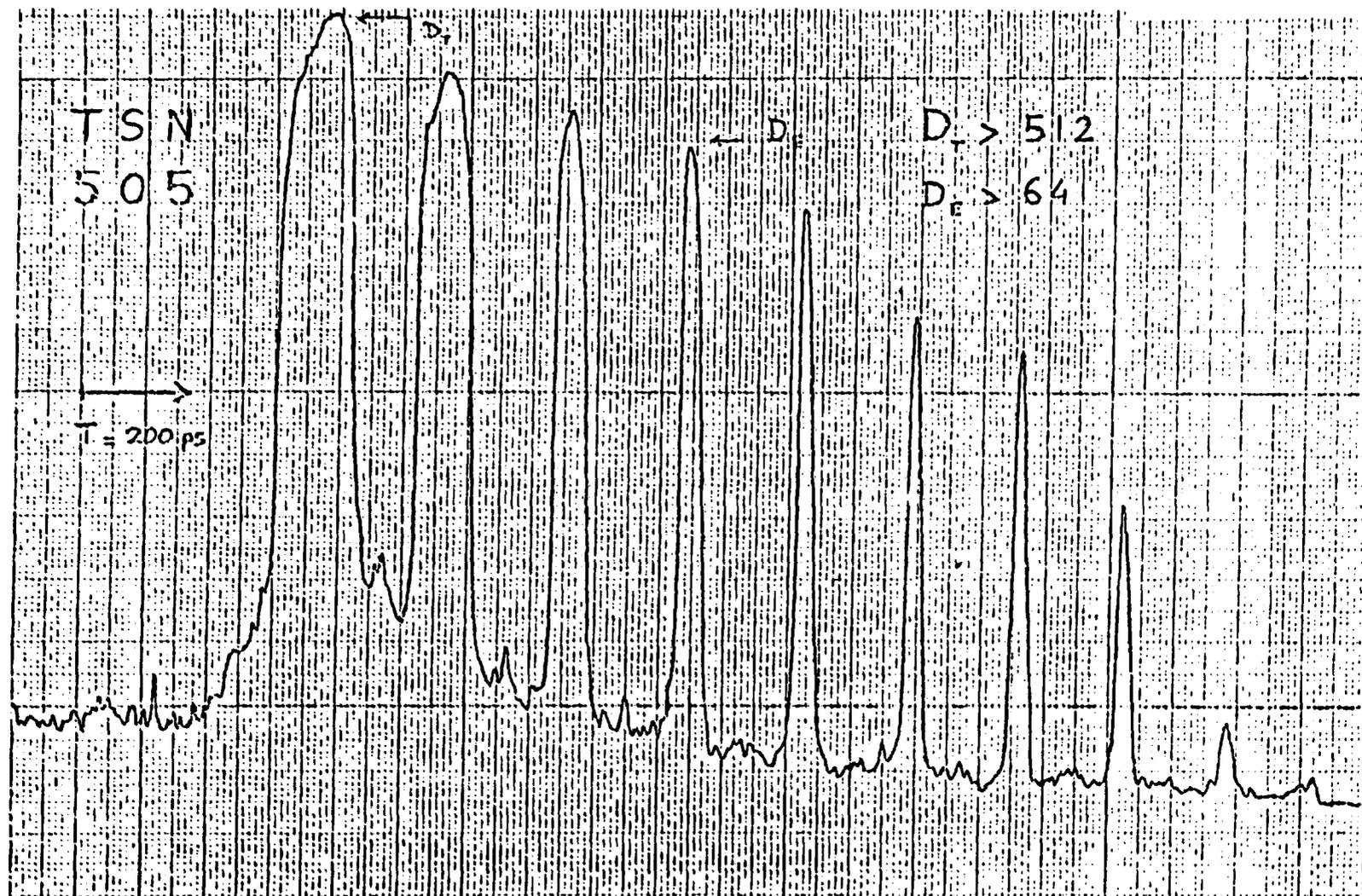


Figure 7 : REPONSE DENSITOMETRIQUE DE L'ENREGISTREMENT D'UN TIROIR D'IMPULSIONS PAR CAMERA TSN.505 AU DATAYAGE 2 ns

LASER OCTAL - PILOTE B - IMPULSIONS OBTENUES
A L'AIDE D'UN FABRY PERROT DE CALIBRAGE -

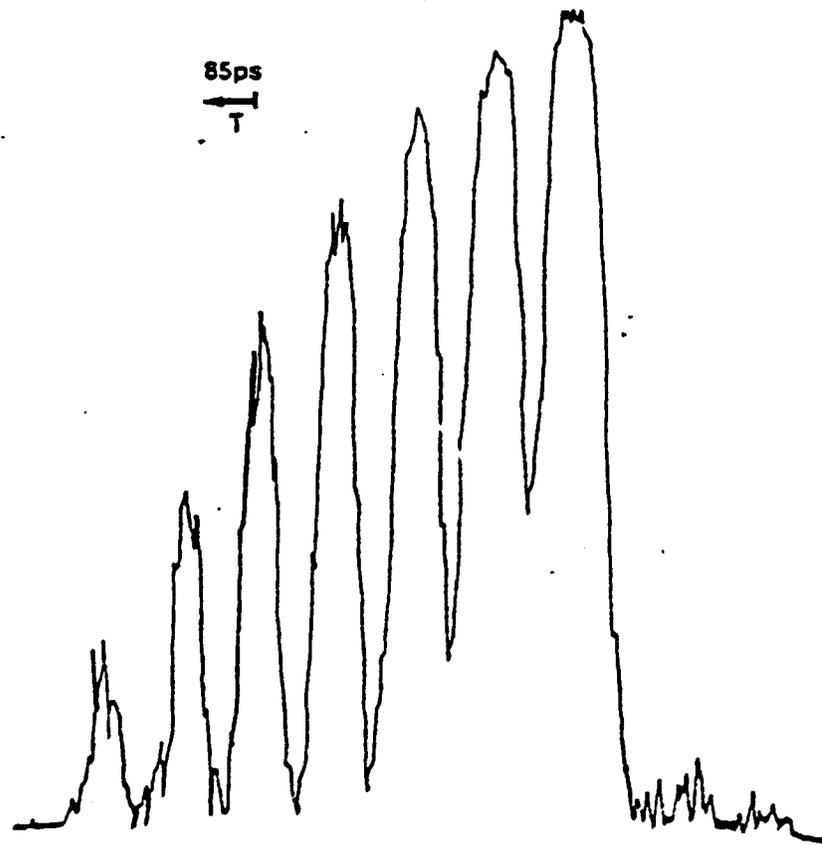


Figure 8 : Mesure de durée d'impulsion (Laser OCTAL)

SCHEMA DE PRINCIPE DU T.C.I. A OPTIQUE BILAMELLAIRE

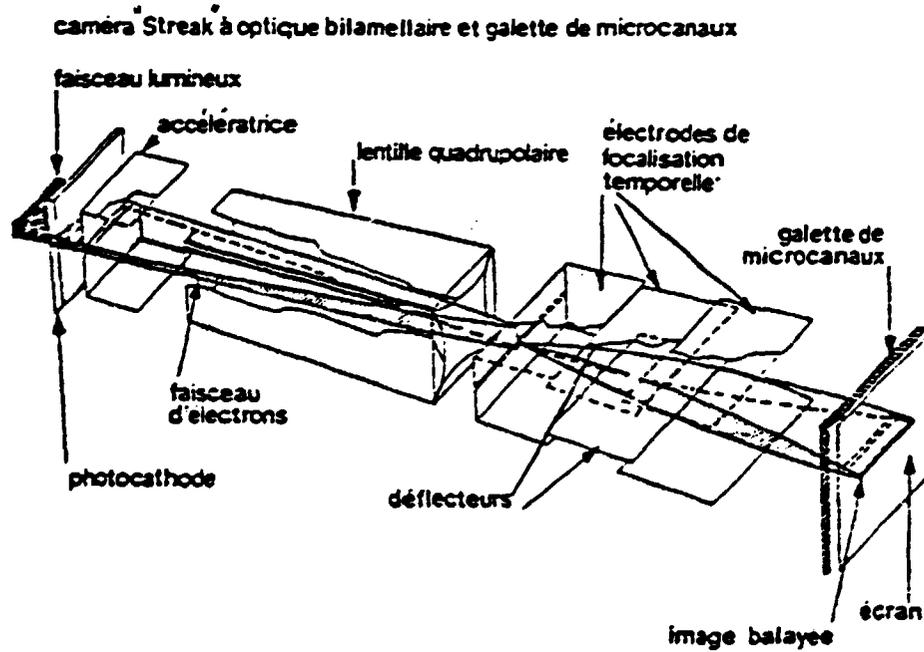


Figure 9 : Structure du tube P 600 U.V.

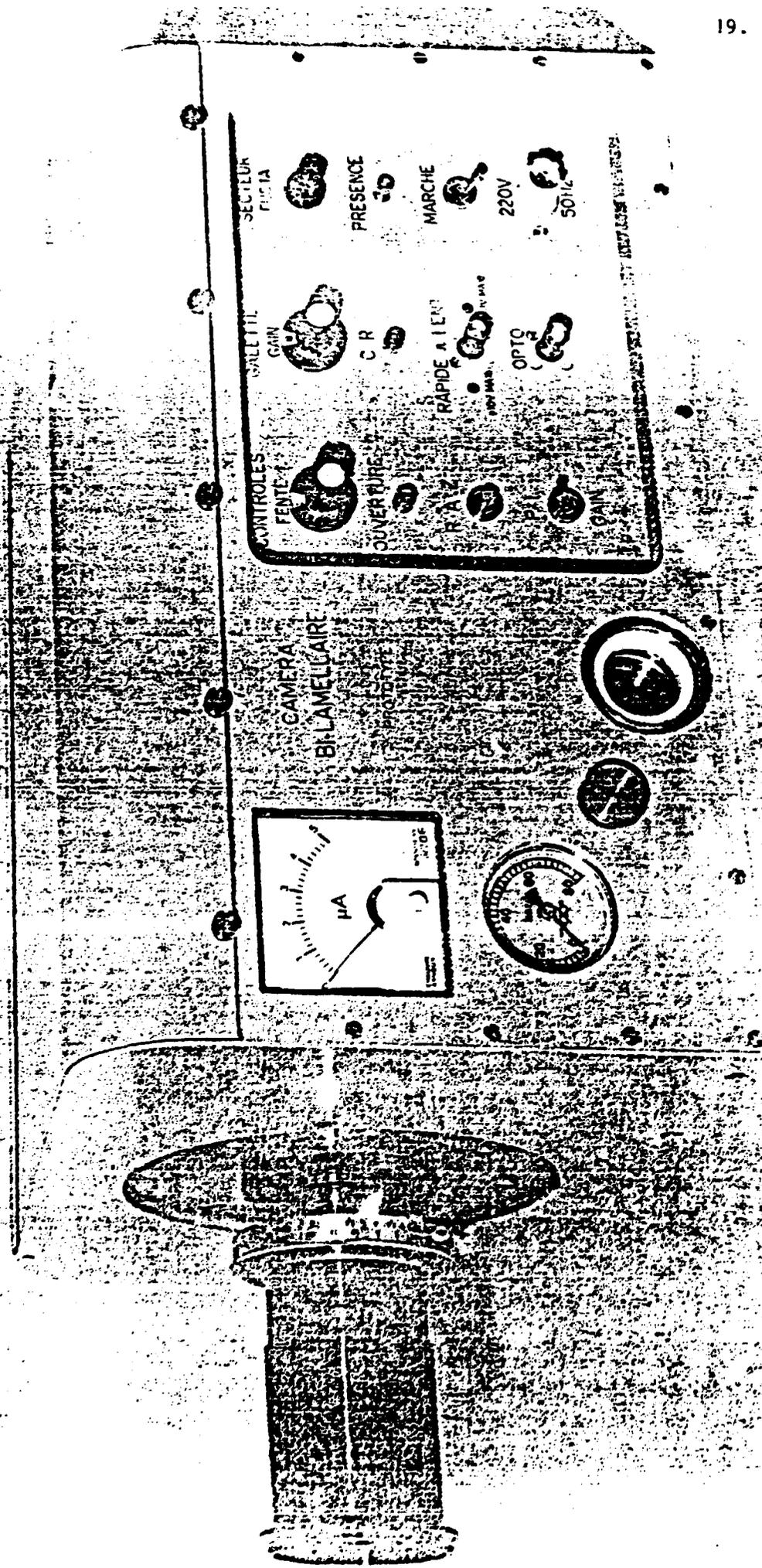


Figure 10 : Caméra P. 600 U.V.

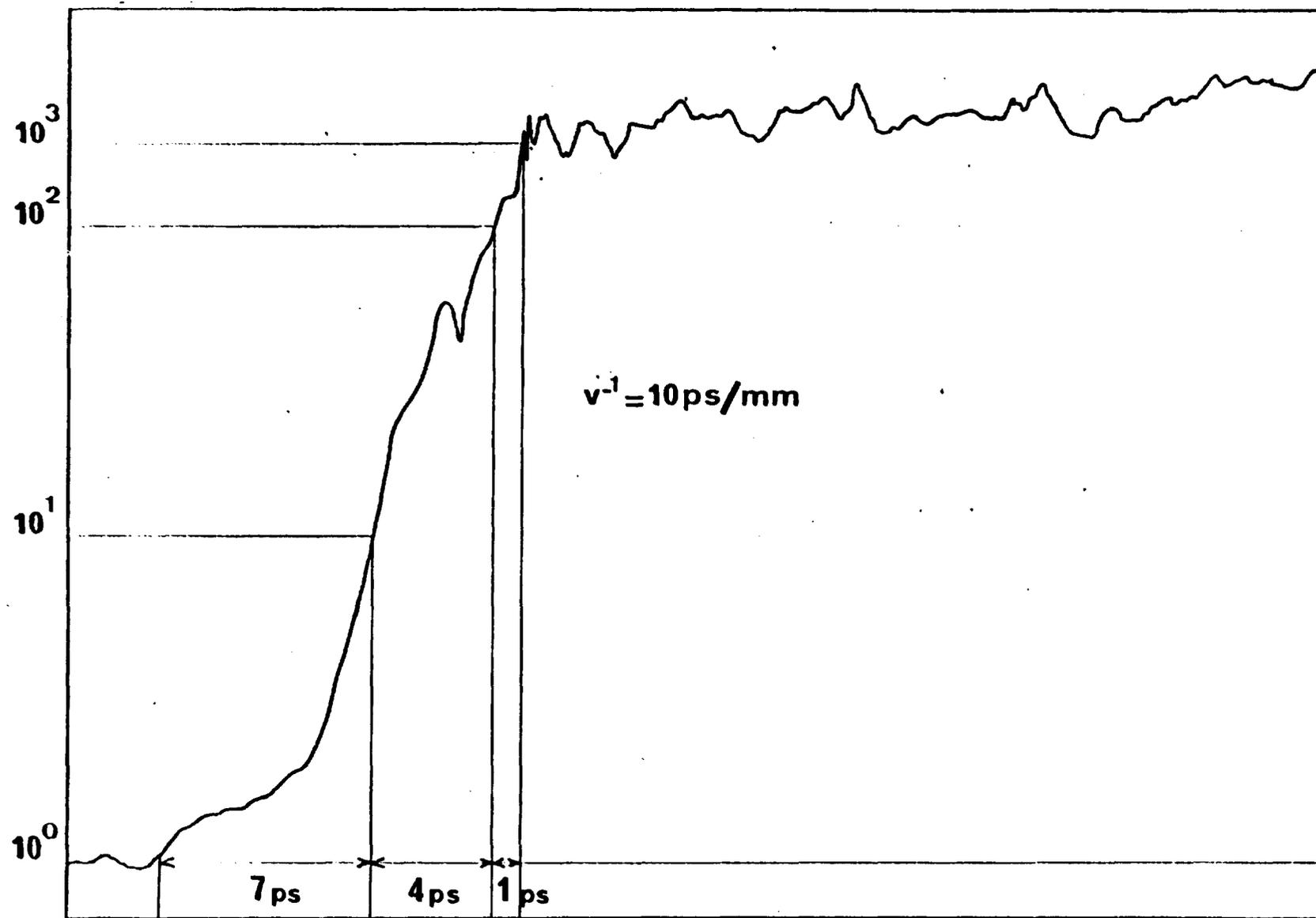


Figure 11 : Temps de montée du tube P 600 U.V.

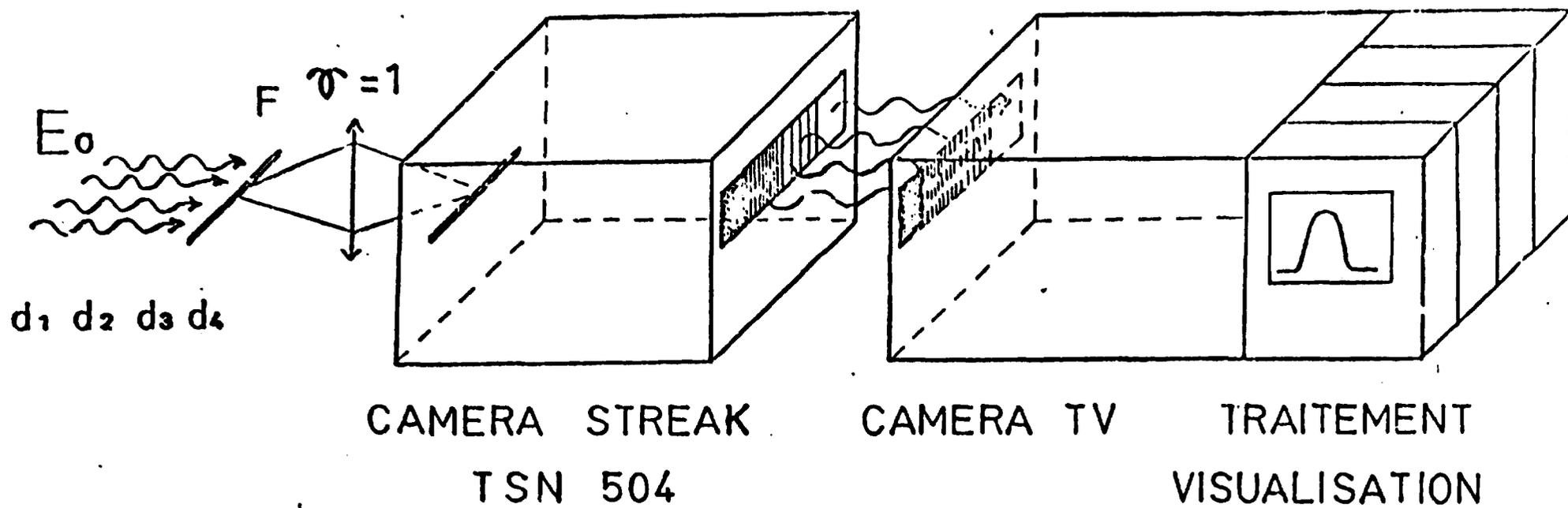


Figure 12 : Dispositif DATAIC

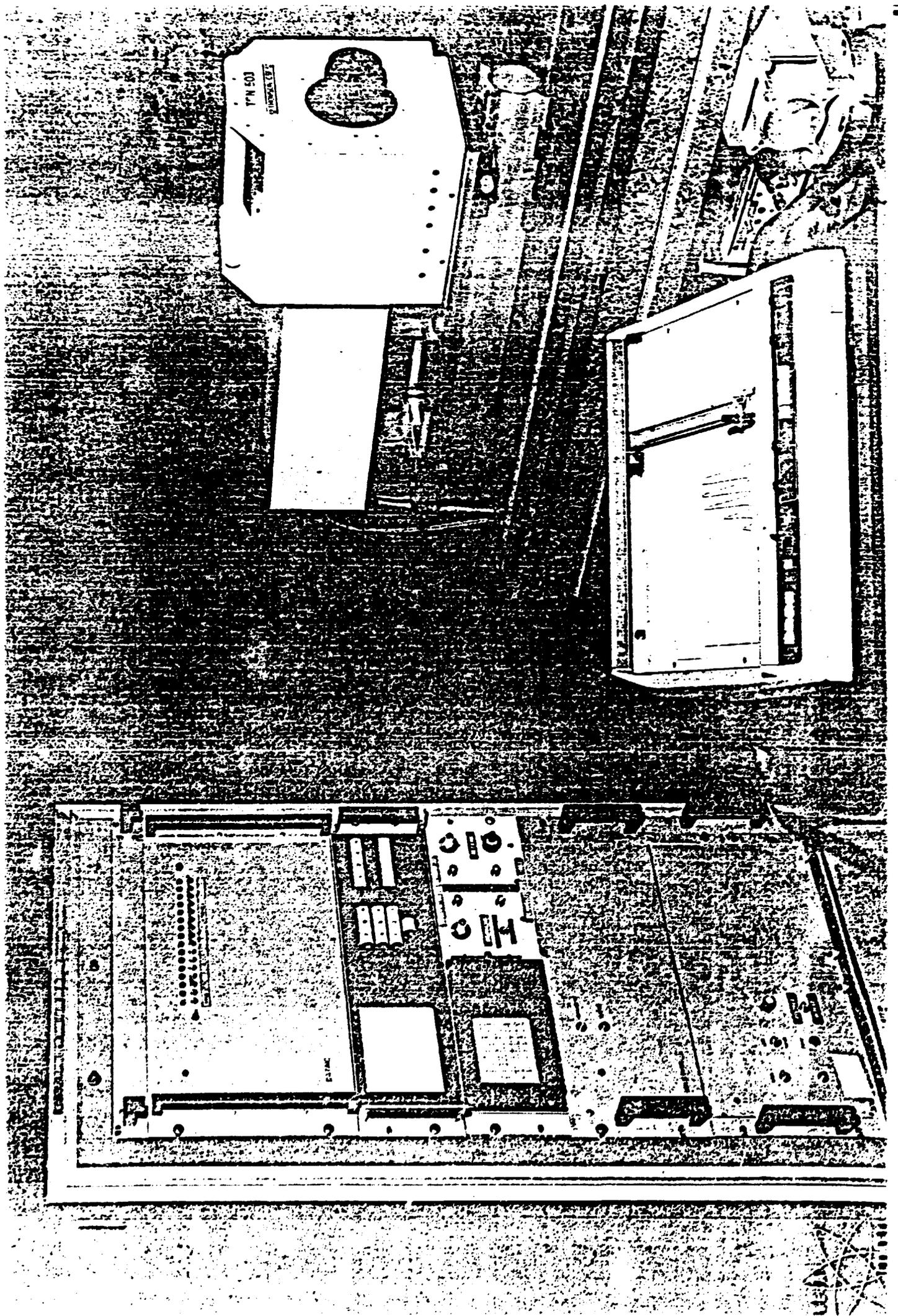
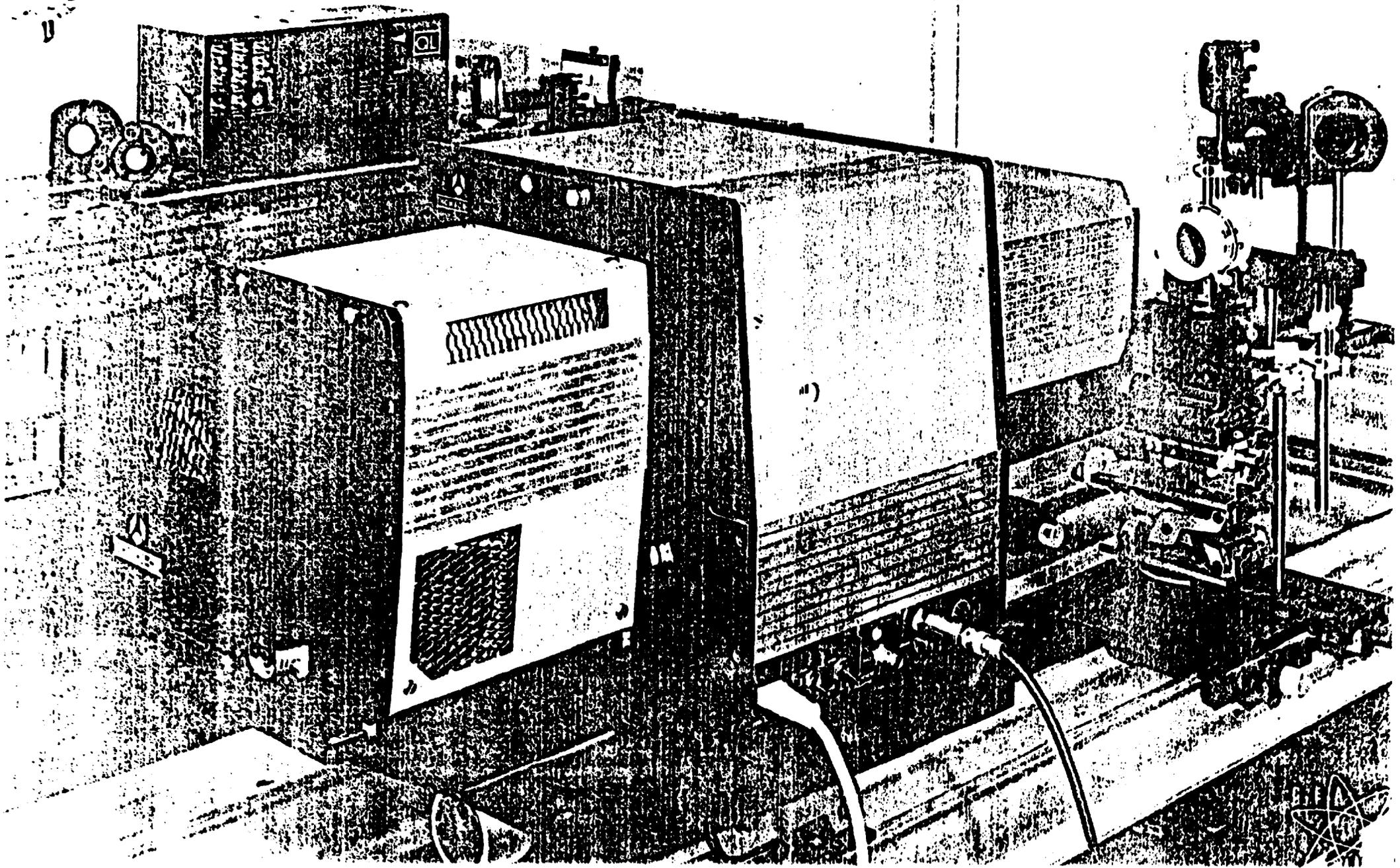


Figure 14 : DATAIC PROTOTYPE



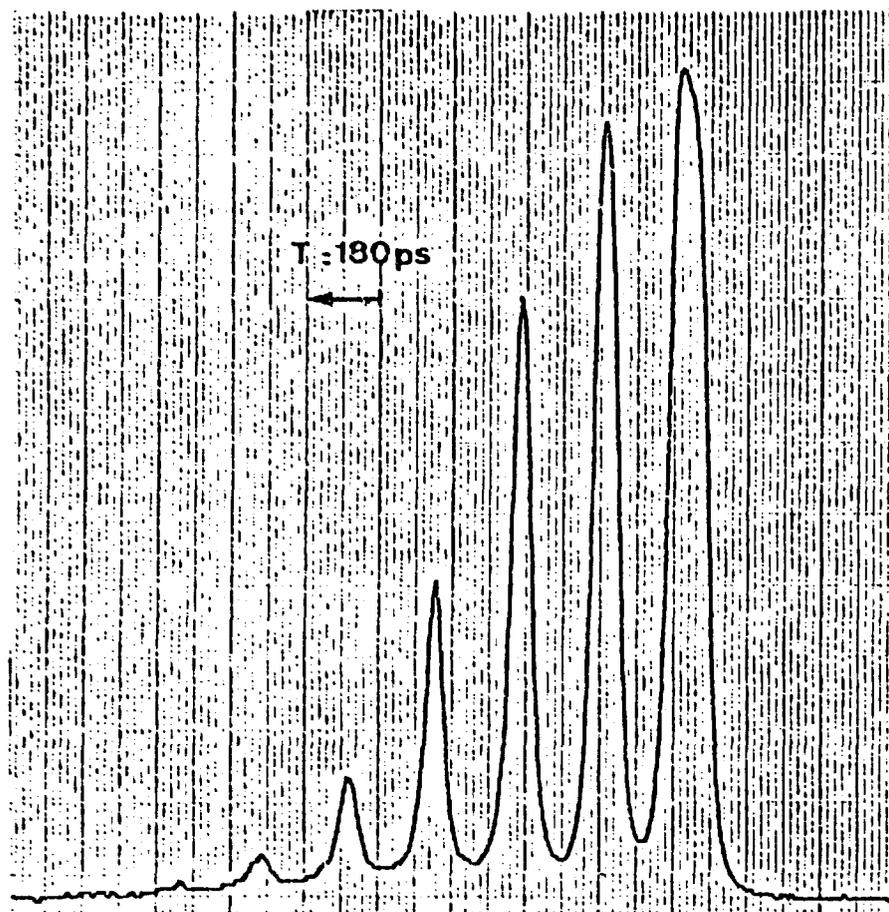


Figure 15 : Performances de l'ensemble DATAIC

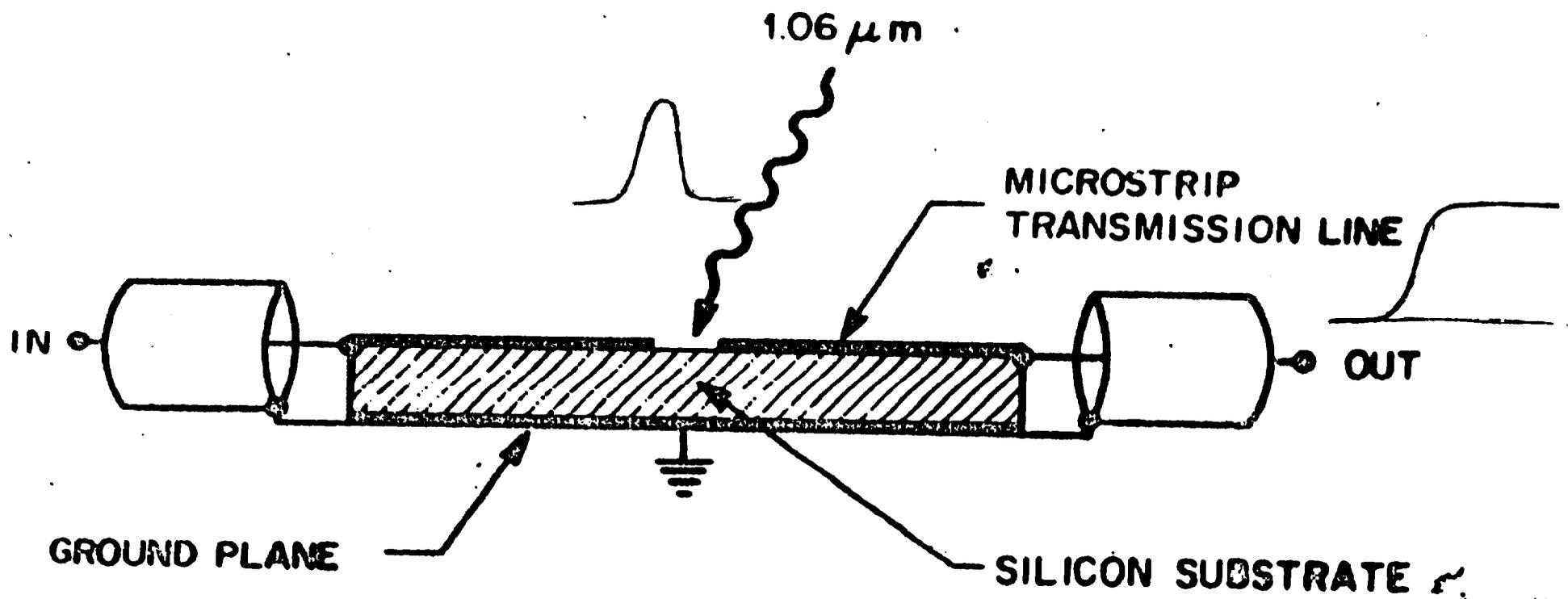
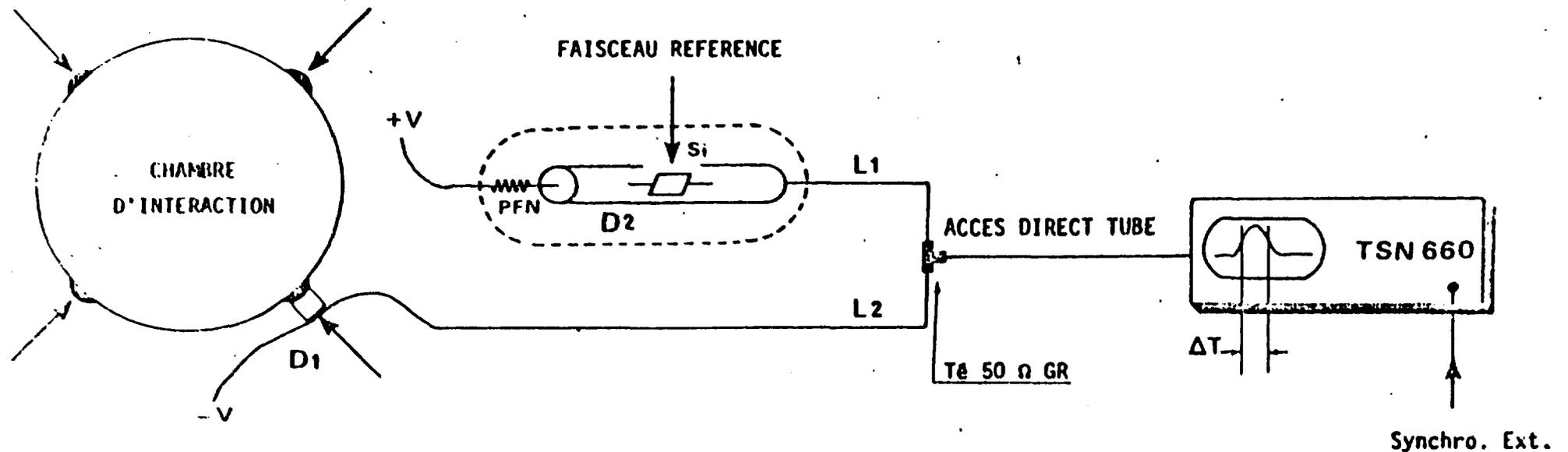


Figure 16 : Commutateur photorésistant



FAISCEAUX LASERS 1 à 8
 λ 50 à 100 ps

Figure 17 : Dispositif de formation d'impulsion

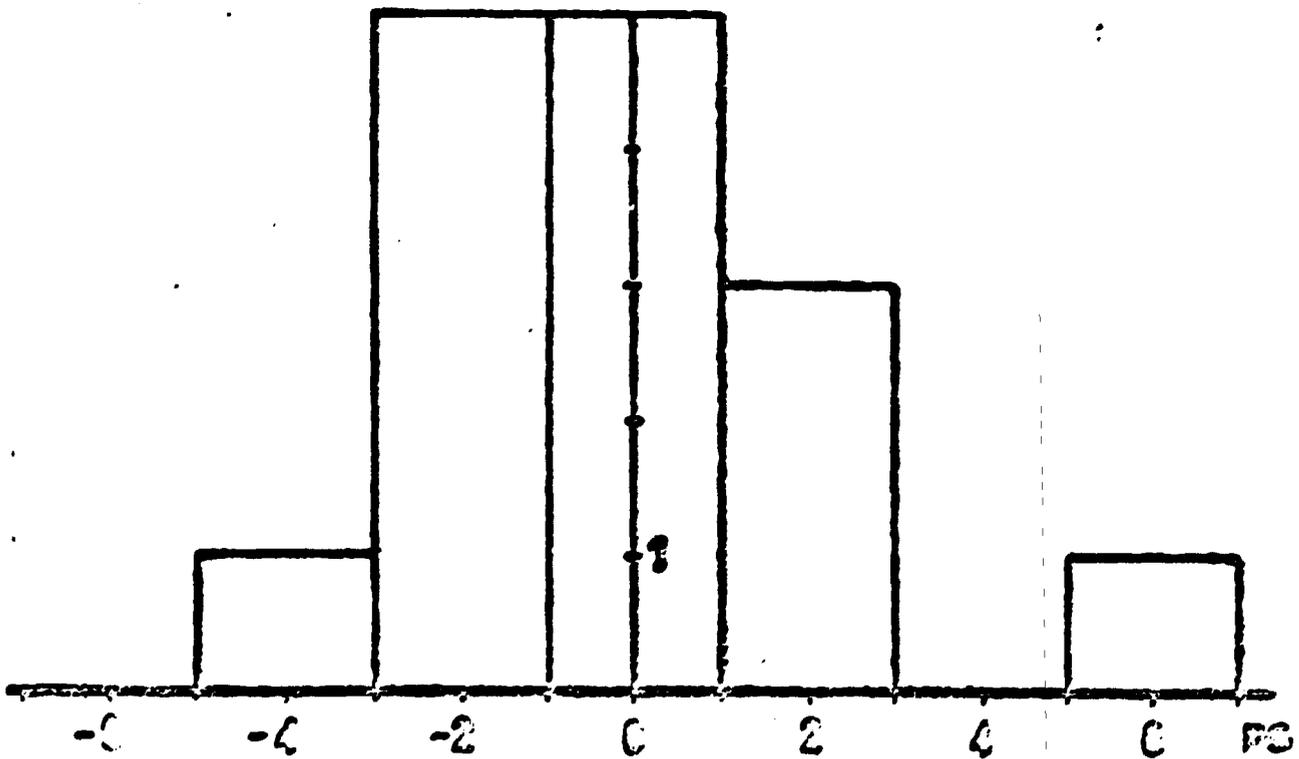
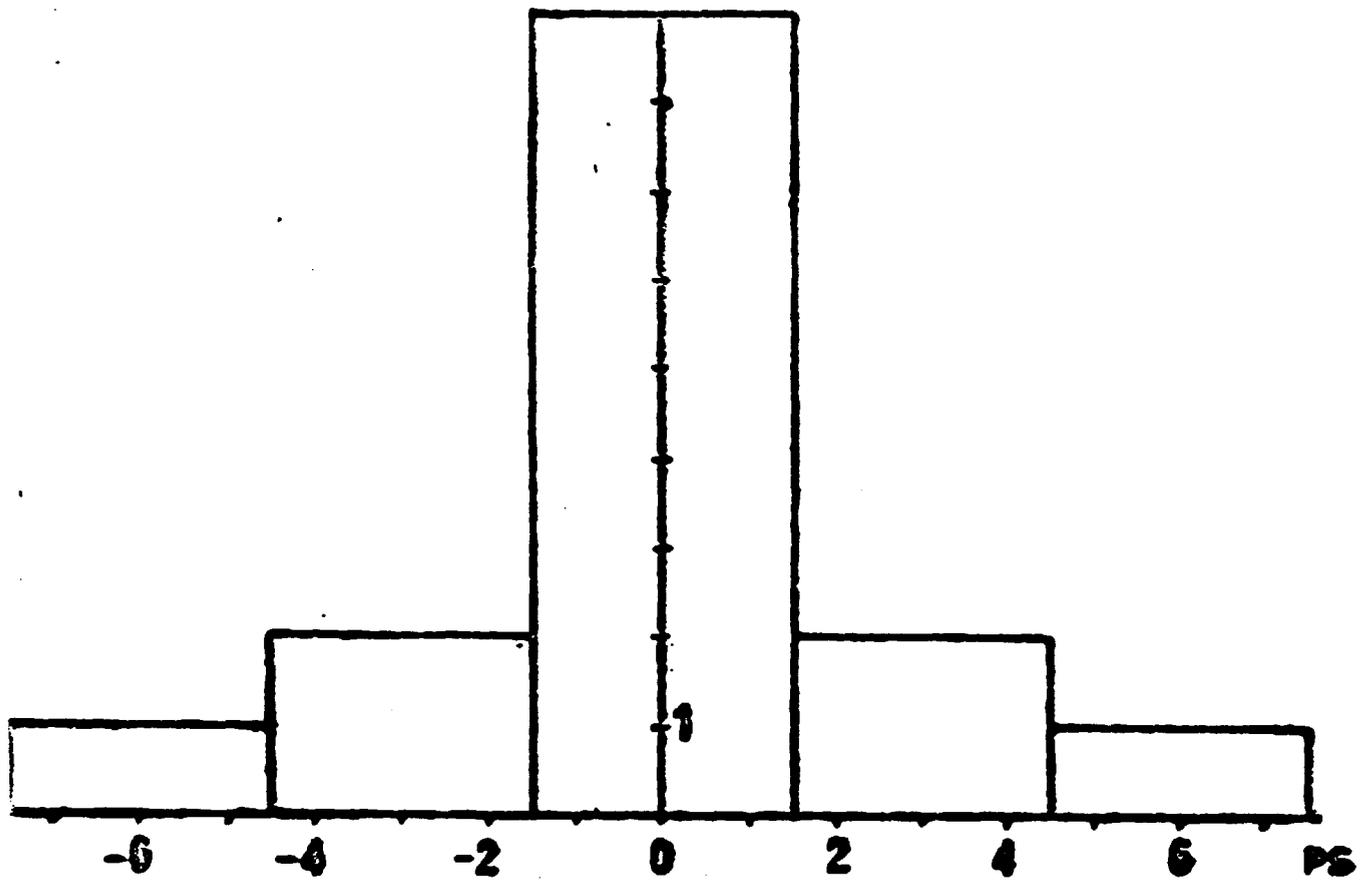
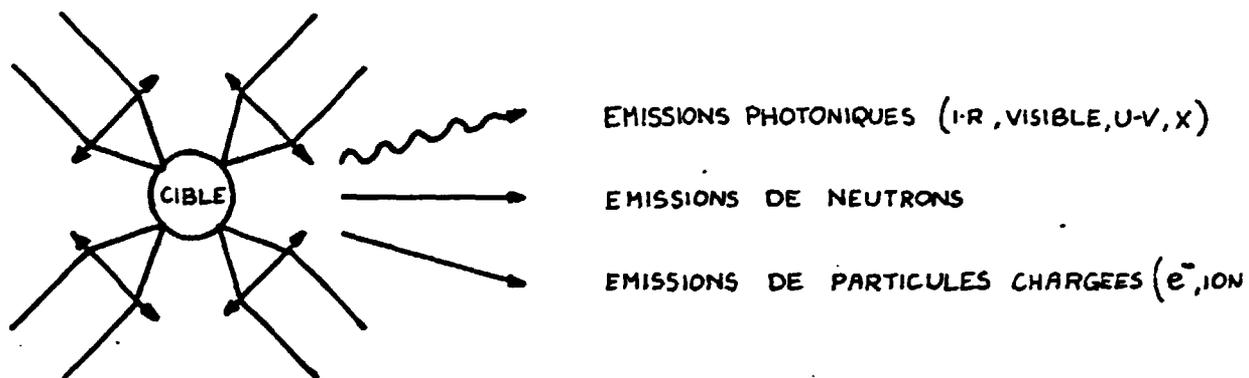
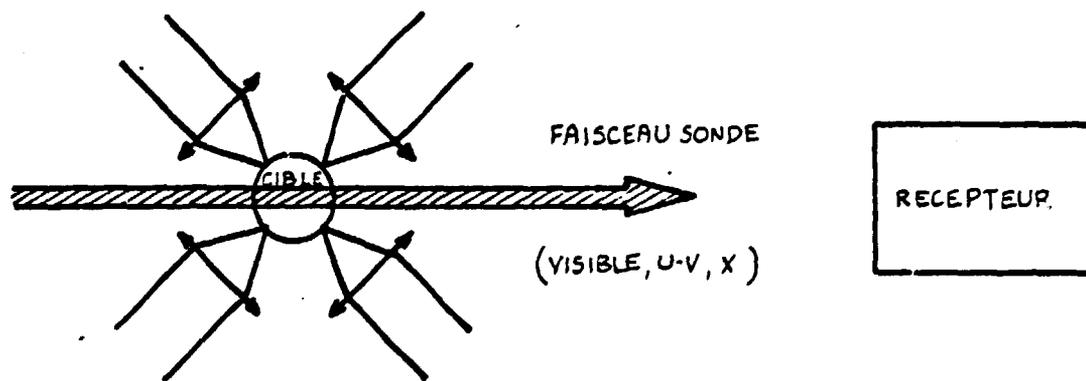


Figure 18 : Dispersion statistique des mesures effectuées sur deux couples de

FAISCEAUX D'INTERACTION



1. DIAGNOSTICS "PASSIFS" DE L'INTERACTION



2. DIAGNOSTICS "ACTIFS" DE L'INTERACTION

Figure 20 : Différents types de diagnostics

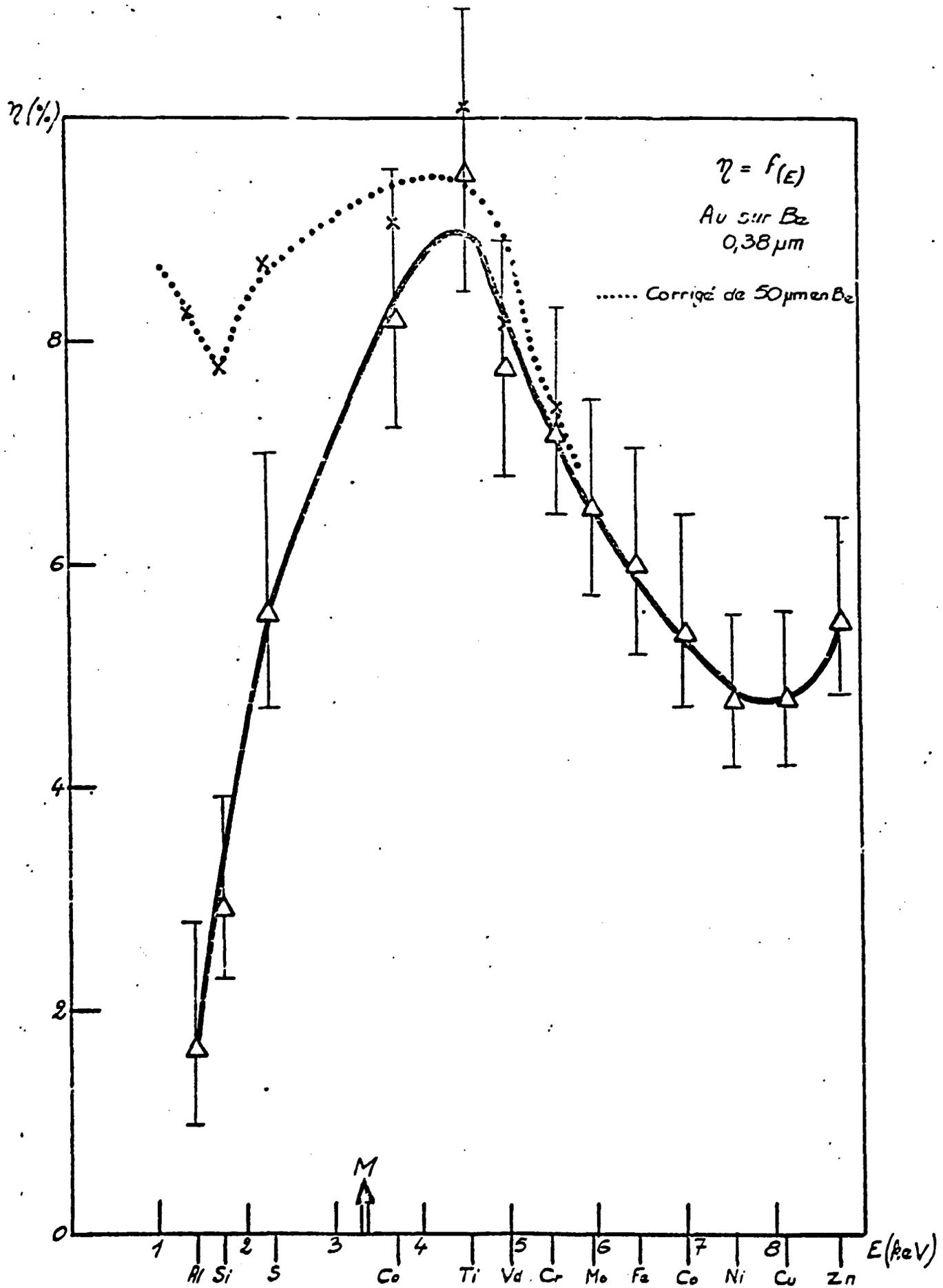


Figure 21 : Rendement quantique d'une photocathode d'or déposée sur Béryllium

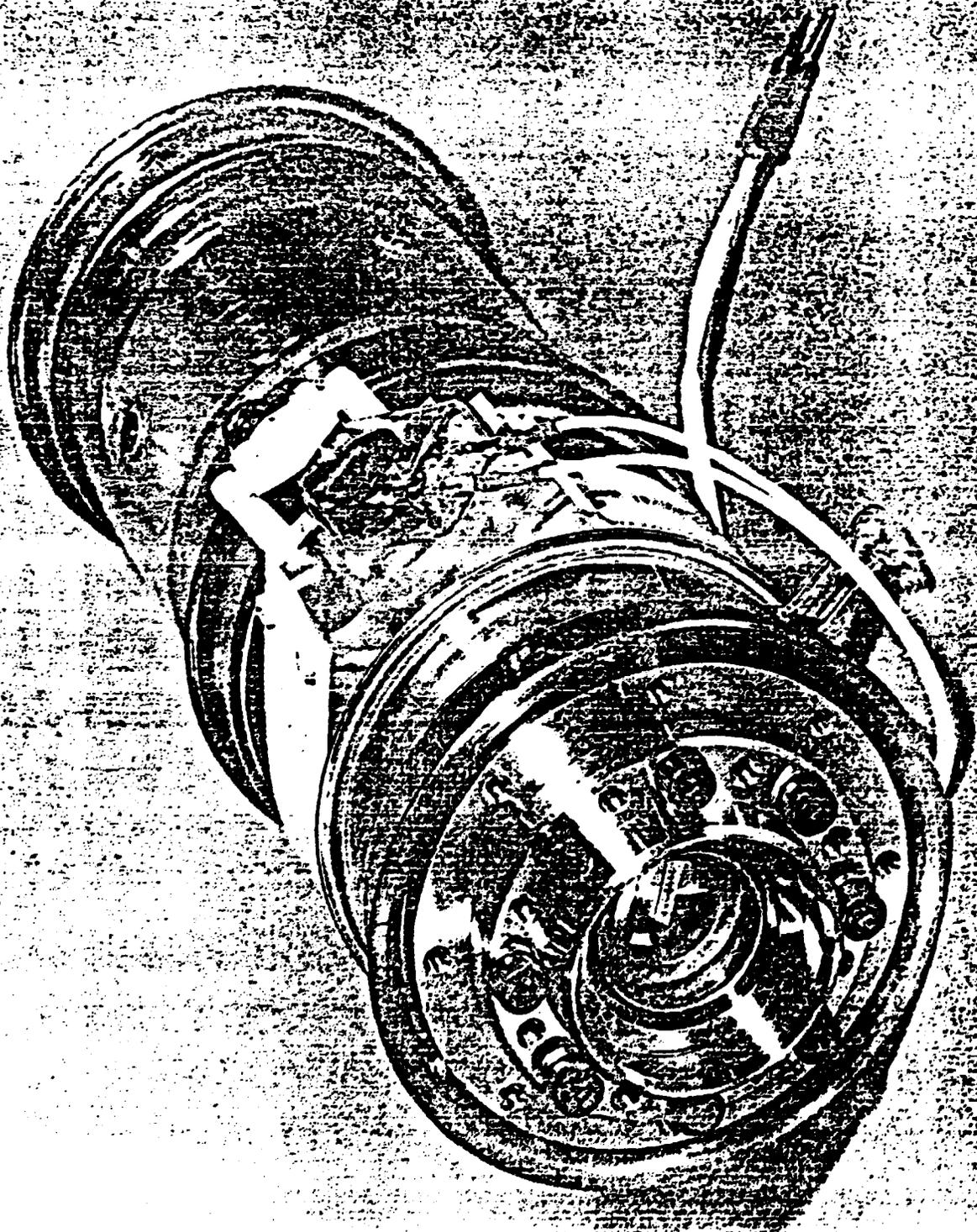


Figure 22 : Tube P 500 X pour caméra à balayage de fente

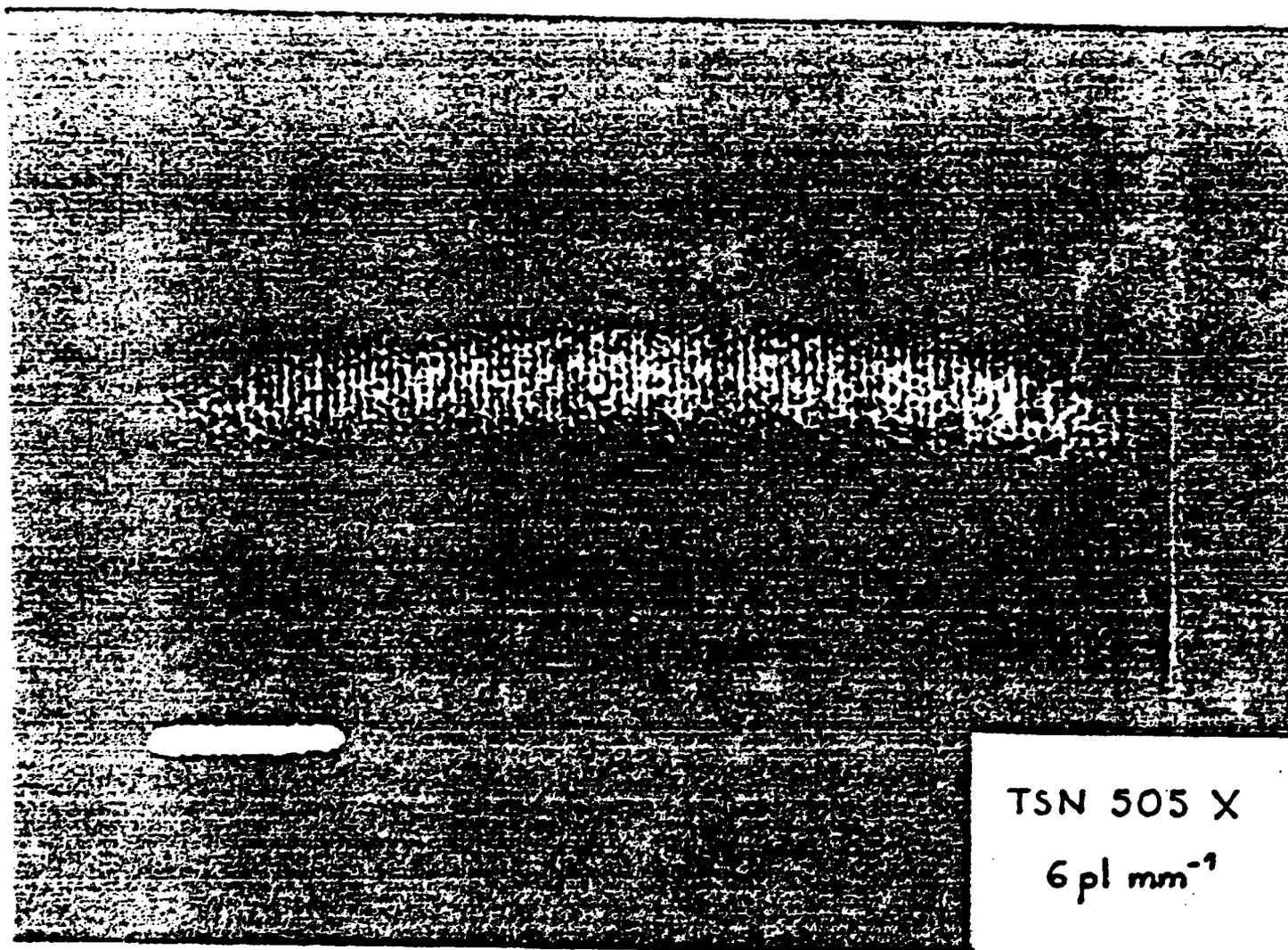


Figure 23 : Caméra TSN 505 X - Enregistrement d'une mire de résolution
au pas de 170 μm

TSN 505 X

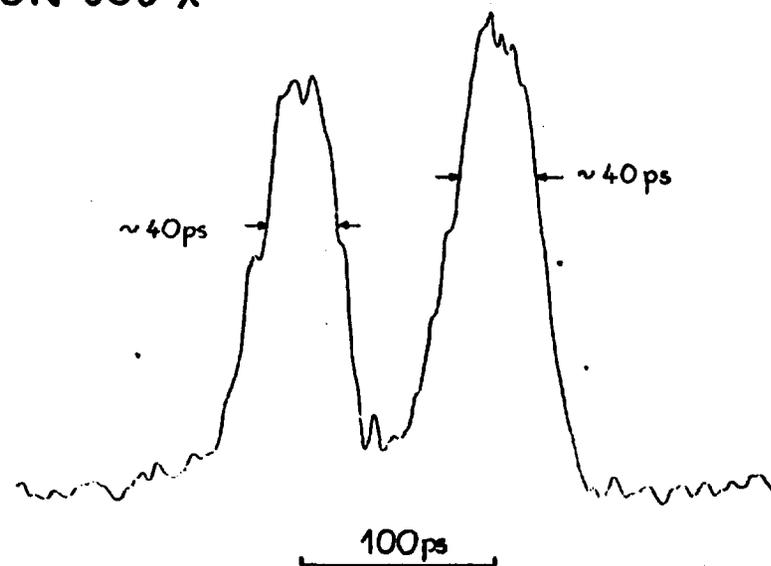


Figure 24 : Réponse temporelle de la caméra TSN 505 X

VIEWGRAPH 5

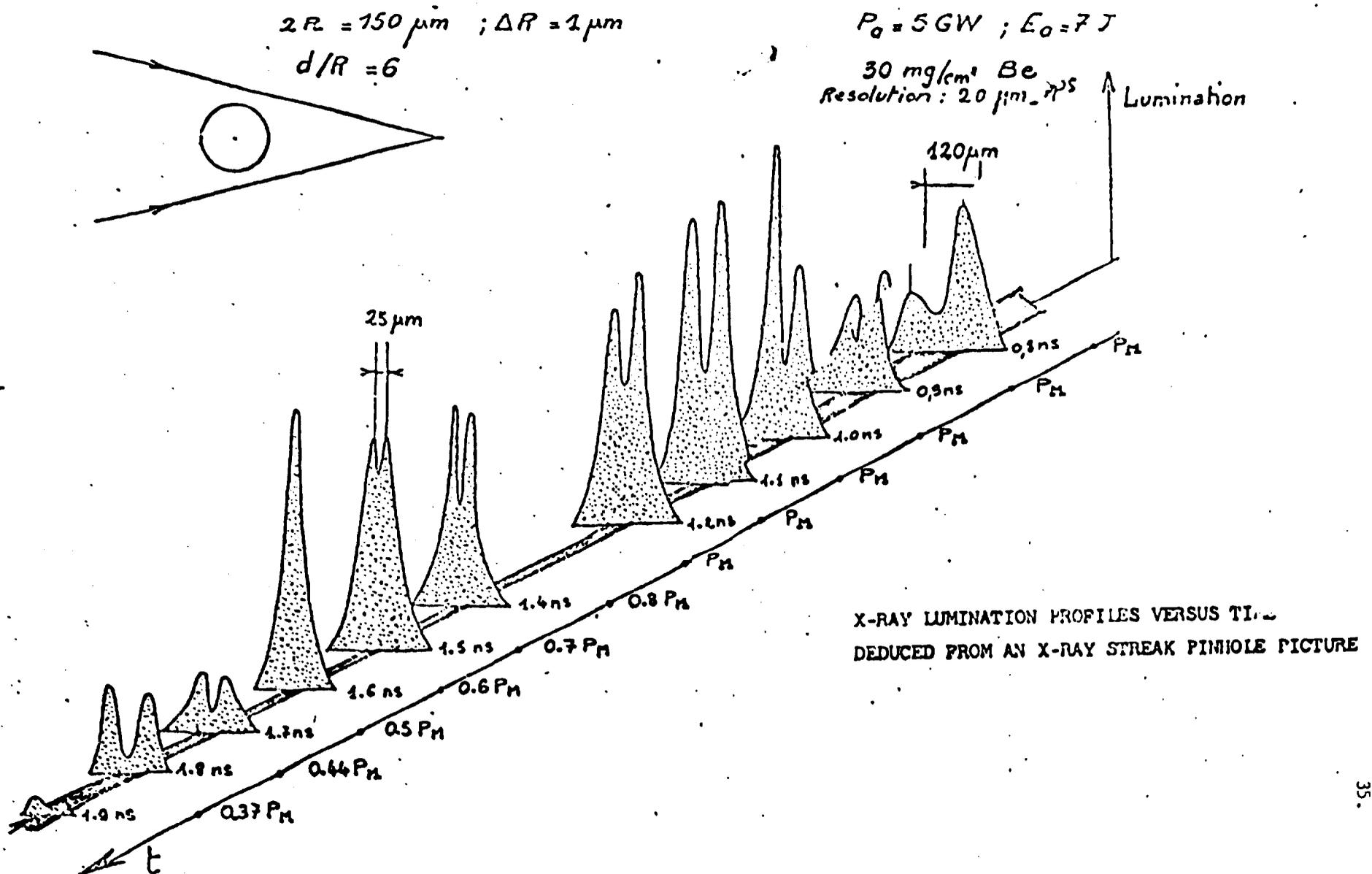


Figure 26 : Enregistrement de l'évolution spatio-temporelle de l'émission X d'un plasma créé par laser

