

FR 8903HH6

CEA-N-2607

- Note CEA-N-2607 -

Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay  
Institut de Recherche Fondamentale  
Département de Physique Nucléaire  
Service de Physique Nucléaire à Haute Energie

**ETUDE SUR LES DIAGNOSTICS DE FAISCEAUX D'ELECTRONS**

par

**Paul GARGANNE**

- Août 1989 -

## CLASSIFICATION DES RAPPORTS, NOTES ET BIBLIOGRAPHIES CEA

(Classification du système international de documentation nucléaire INIS  
de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique)

A 11	Physique théorique générale et physique mathématique	C 50	Santé, radioprotection et environnement
A 12	Physique atomique et physique moléculaire	C 60	Radiologie et médecine nucléaire
A 13	Physique de l'état solide et physique des fluides	D 10	Isotopes et sources de rayonnements
A 14	Physique des plasmas et réactions thermonucléaires	D 20	Applications des isotopes et des rayonnements
A 15	Astrophysique et cosmologie, rayonnement cosmique	E 11	Thermodynamique et écoulement des fluides
A 16	Conversion directe d'énergie	E 13	Structures mécaniques et équipements
A 17	Physique des basses températures et cryogénie	E 14	Explosions nucléaires
A 20	Physique des hautes énergies	E 15	Manutention des matériaux radioactifs
A 30	Physique neutronique et physique nucléaire	E 16	Accélérateurs
B 11	Analyse chimique et isotopique	E 17	Essais des matériaux
B 12	Chimie minérale, chimie organique et chimie-physique	E 20	Réacteurs à fission (généralités)
B 13	Radiochimie et chimie nucléaire	E 30	Types spécifiques de réacteurs à fission et centrales associées
B 14	Chimie des rayonnements	E 40	Instrumentation
B 16	Combustibles nucléaires	E 50	Gestion des déchets
B 22	Métaux et alliages	F 10	Sociologie et sciences économiques
B 23	Céramiques et cermets	F 20	Droit
B 24	Autres matériaux	F 30	Documentation nucléaire
B 30	Sciences de la terre	F 40	Garanties nucléaires et contrôle de vérification
C 10	Tous les effets et aspects variés de l'irradiation externe en biologie	F 50	Méthodes mathématiques et codes pour ordinateur
C 20	Effets et cinétique des radioisotopes	F 60	Divers
C 40	Sciences de la vie appliquées		

Note CEA-N-2607

*Cote-matière de cette note : E40*

### **MOTS CLEFS** (extraits du thesaurus INIS)

*en français*

LASERS A ELECTRONS LIBRES  
MONITEURS DE FAISCEAUX  
CONDUCTEURS ELECTRIQUES  
JUGES DE DEPLACEMENT  
PROPRIETES MECANIKUES  
CHOC THERMIQUE  
RAYONNEMENT DE TRANSITION

*en anglais*

FREE ELECTRON LASERS  
BEAM MONITORS  
ELECTRIC CONDUCTORS  
DISPLACEMENT GAGES  
MECHANICAL PROPERTIES  
THERMAL SHOCK  
TRANSITION RADIATION

**NOTE CEA-N-2607 - Paul GARGANNE**

**"ETUDE SUR LES DIAGNOSTICS DE FAISCEAUX D'ELECTRONS"**

**Sommaire** - Ce rapport résume les résultats d'une étude sur les diagnostics de faisceaux utilisant des analyseurs de profil à fils de carbone et des moniteurs optiques à rayonnement de transition.

*L'accent est mis sur le choix des matériaux utilisés compte tenu de leurs propriétés thermiques et de leur action sur le faisceau.*

**1989**

**Commissariat à l'Energie Atomique - France**

**NOTE CEA-N-2607 - Paul GARGANNE**

**"ELECTRON BEAM DIAGNOSTICS STUDY"**

**Summary** - This paper summarizes the results of a study on beam diagnostics, using carbon wire scanners and optical transition radiation (DTR) monitors. The main consideration consists in the material selection, taking their thermal properties and their effect on the beam into account.

**1989**

**Commissariat à l'Energie Atomique - France**

- Note CEA-N-2607 -

**Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay  
Institut de Recherche Fondamentale  
Département de Physique Nucléaire  
Service de Physique Nucléaire à Haute Energie**

**ETUDE SUR LES DIAGNOSTICS DE FAISCEAUX D'ELECTRONS**

**par**

**Paul GARGANNE**

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier MM. MEJANE et FEUILLATRE du département d'études mécaniques et thermiques du CEN de Saclay, pour leur aimable collaboration en ce qui concerne les calculs de refroidissement des feuilles minces.

## TABLE DES MATIERES

CHAPITRE I	- INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE II	- MONITEURS DE PROFILS A FILS - PRINCIPES GENERAUX.....	3
II.1	- Principe - Mode de détection du signal.....	3
II.2	- Mesure de la position des fils.....	4
II.3	- Choix de la matière constituant le fil.....	5
CHAPITRE III	- ETUDE THERMIQUE ET MECANIQUE (Théorie et expérience)....	9
III.1	- Calcul de l'échauffement du fil.....	9
III.2	- Calcul du refroidissement par rayonnement.....	11
III.3	- Tableau comparatif des propriétés thermiques du tungstène et du carbone.....	12
III.4	- vérification expérimentale des propriétés thermiques....	12
III.5	- Propriétés mécaniques des matériaux utilisés.....	14
CHAPITRE IV	- TRAITEMENT DES SIGNAUX - VISUALISATION.....	17
IV.1	- Processus de traitement des signaux.....	17
IV.2	- Ensemble à double scrutation (ERATO).....	19
CHAPITRE V	- RESULTATS EXPERIMENTAUX.....	21
V.1	- Essai du système ERATO sur la ligne de faisceau HE3a....	21
V.2	- Visualisation tridimensionnelle du faisceau.....	21
CHAPITRE VI	- DIAGNOSTICS OPTIQUES.....	25
VI.1	- Position du problème.....	25
VI.2	- Rappel des propriétés du rayonnement de transition.....	25
VI.3	- Problèmes thermiques.....	26
VI.4	- Résultats expérimentaux sur plusieurs matériaux.....	31
CONCLUSION.....		39
REFERENCES.....		41

## Chapitre I

### INTRODUCTION

Cette étude entre dans le cadre de la réalisation de l'onduleur POOPO (\*), qui s'insère lui-même dans l'ensemble du projet de laser à électrons libres (LEL) CLIO (\*\*\*) [1], schématisé en fig. I.1.

Le but est d'acquérir des informations permettant, d'une part de déterminer avec précision les coordonnées du centre de gravité du faisceau, et d'autre part d'obtenir une figure représentant la distribution en densité des électrons dans le plan transversal.

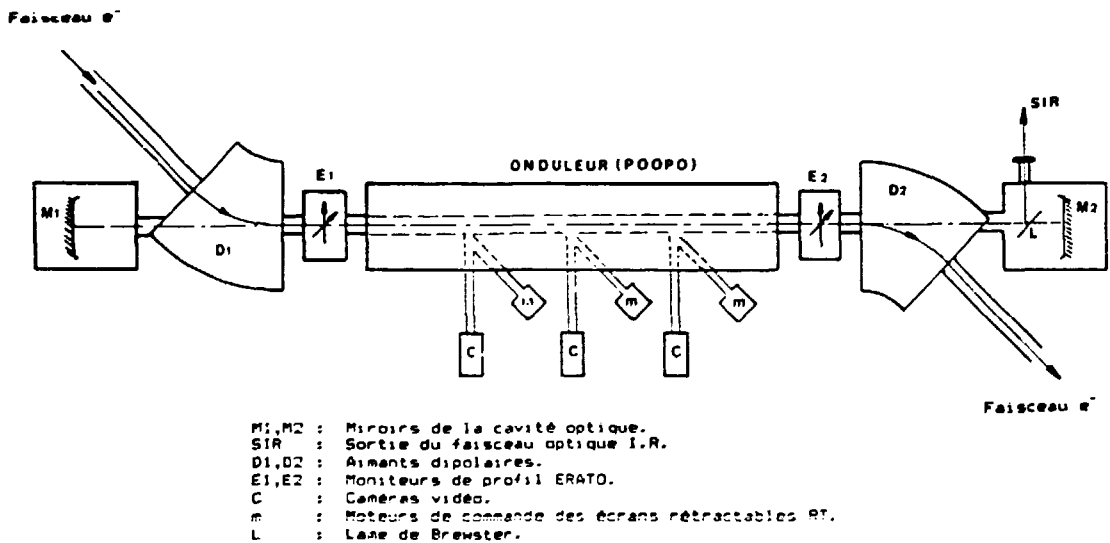


Fig. I.1 : Schéma de la partie optique du projet CLIO

Un LEL nécessite un faisceau d'électrons qui, outre une faible dispersion en énergie, doit posséder d'autres qualités essentielles qui sont :

- Un courant élevé de quelques centaines d'ampères dans la microimpulsion (10 ps), ce qui entraîne dans le cas de CLIO quelques centaines de mA dans la macroimpulsion (10  $\mu$ s).

- Des dimensions transversales réduites ( $\sigma = 0,5$  mm).

La conjonction de ces deux propriétés conduit donc à une densité de particules très élevée.

En conséquence, nous avons besoin d'un système à haute résolution spatiale. Pour cela, nous avons choisi, en amont et en aval de l'onduleur, un moniteur de profil à fils (diamètre = 30  $\mu$ m) dont le principe a déjà été mis en application dans plusieurs laboratoires [2,3,4,5].

Nous présentons les problèmes rencontrés au cours de cette étude, notamment ceux concernant la tenue aux chocs thermiques, et les améliorations apportées dans le système ERATO (\*\*\*) , par rapport aux installations existantes.

En outre, il est apparu nécessaire, au cours de l'étude de ce projet, de connaître la position du faisceau au centre de l'onduleur ; mais l'exiguïté de la chambre à vide à cet endroit (8 x 15 mm) ne permet pas d'y introduire un moniteur à fils.

Nous avons opté ici pour un système d'écrans rétractables, utilisant le rayonnement de transition [7,8,9], associés à des caméras vidéo. Nous présentons quelques résultats expérimentaux préliminaires de l'utilisation de ce principe, obtenus à l'ALS sur la voie HE3A.

\* Premier Onduleur de l'Orme Pour Orsay.

\*\* Collaboration pour un Laser Infrarouge à Orsay.

\*\*\* Elément de Réglage et d'Analyses Transversales à Orsay.



## Chapitre II

### MONITEURS DE PROFILS A FILS - PRINCIPES GENERAUX

#### II.1 - Principe - Mode de détection du signal

Un ensemble de deux fils conducteurs orthogonaux H et V représenté en fig. II.1) se déplace transversalement dans un faisceau de particules dans la direction  $\alpha$   $\alpha'$ , entre les positions (1) et (2). On connaît à tous les instants les positions des deux fils par rapport à un repère orthonormé XY. Au cours du déplacement, les fils interceptent une partie de ce faisceau, et l'on obtient un signal proportionnel au nombre de particules interceptées, qui peut être, soit un signal d'électrons secondaires, dont l'amplitude est mesurée directement sur les fils après un conditionnement (amplificateur + convertisseur analogique numérique), soit un signal produit par un détecteur de photons, captant le rayonnement de freinage émis vers l'avant, dans la direction suivie par le faisceau.

D'une manière générale, et particulièrement dans notre application, la méthode des électrons secondaires est préférable pour plusieurs raisons.

1. Plus grande facilité de mise en oeuvre.
2. Dynamique de mesure très étendue (courant crête allant de quelques nA sur un diamètre de 20 mm en positrons, à quelques centaines de mA sur un diamètre de l'ordre du mm en électrons).
3. Excellent rapport signal/bruit, même aux courants les plus faibles.

La méthode du rayonnement de freinage nécessite un détecteur annexe dans un environnement très riche en sources de bruit. Le niveau de radiations est, dans certains cas, suffisamment élevé pour entraîner la destruction rapide des détecteurs de photons (scintillateurs). Mais elle peut toutefois rendre de précieux services dans certaines applications, telles

que la mesure simultanée des profils de deux faisceaux incidents dans un collisionneur (p et  $\bar{p}$  sur le S P S au CERN). Dans ce cas, la mesure du courant d'électrons secondaires ne permet pas de discerner les actions respectives des deux faisceaux, à moins que ceux-ci ne soient pas encore en coïncidence spatiale [6], alors que les gerbes de photons sont détectées séparément, puisqu'elles sont émises dans des directions opposées.

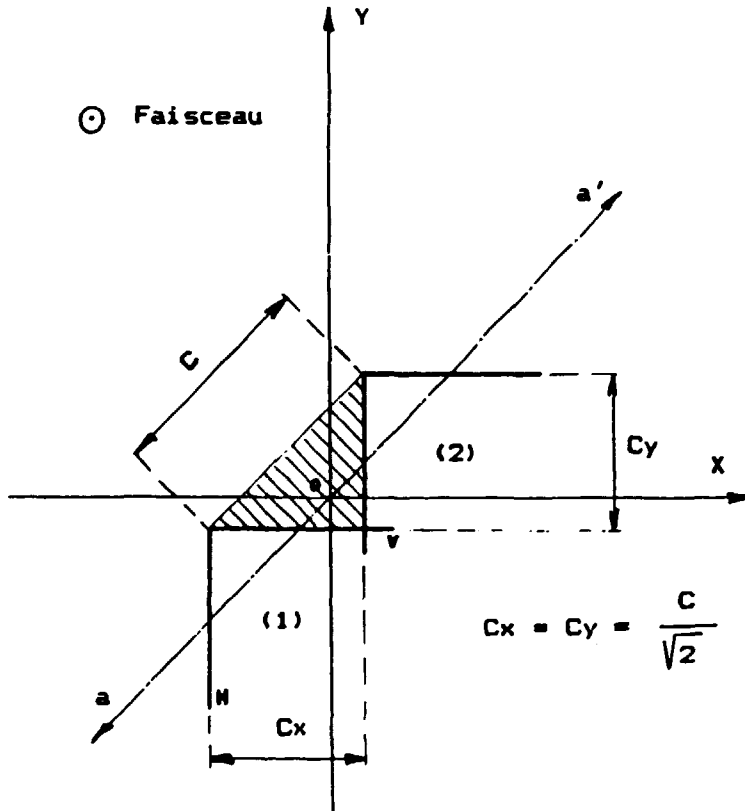


Fig. II.1 : Principe du moniteur de profil à fils.

## II.2 - Mesure de la position des fils

Les positions X et Y des fils doivent être connues avec précision à chaque pas de mesure (1 par impulsion de l'accélérateur), pendant la durée de la scrutation, de façon à pouvoir obtenir un histogramme du signal  $V_e = f(X \text{ ou } Y)$ .

Plusieurs types de capteurs peuvent être utilisés pour ces mesures. Les capteurs optoélectroniques (règles optiques), sont ceux qui délivrent les mesures les plus précises, les plus fiables et les plus reproductibles.

Mais malheureusement, leur mauvaise tenue aux radiations interdit leur emploi sur un accélérateur, la dose létale étant de quelques milliers de rads.

Nous avons donc choisi des capteurs à transformateurs différentiels (LVDT)\*, qui, étant des systèmes analogiques, ne peuvent pas offrir la même sécurité de fonctionnement que les précédents, mais leur insensibilité aux rayonnements justifie leur choix. Un échantillon ayant été soumis à une dose de 120 mégarads ne présentait aucune variation significative de ses caractéristiques à la suite de ce test.

### II.3 - Choix de la matière constituant le fil

Il est déterminé en fonction de plusieurs critères :

1. Type de détection du signal (électrons secondaires ou rayonnement de freinage).

Si le rayonnement de freinage est envisagé, un corps lourd sera préféré à un corps léger.

Les fig. II.2a et II.2b montrent la disposition expérimentale et les histogrammes de signaux de rayonnement de freinage obtenus respectivement avec un fil de tungstène ( $\phi = 20 \mu\text{m}$ ), et un fil de carbone ( $\phi = 30 \mu\text{m}$ ), montés sur le même support, au cours d'une même scrutation. Le détecteur de photons est situé à 0,6 m du fil, à un angle de 18 degrés par rapport à l'axe du faisceau.

Cette expérience montre un net avantage en faveur du tungstène ( $Z=74$ ) sur le carbone ( $Z=6$ ).

Le rapport des surfaces des pics est :

$$\frac{\sum_w}{\sum_c} = \frac{11704}{1854} = 6,3$$

Si l'on admet que, dans cette géométrie, la plus grande partie des photons de freinage détectés est située dans une bande d'énergie inférieure à 20 MeV, un calcul sommaire donne :

$$\frac{\int_5^{20 \text{ MeV}} \sigma_w(E) dE x_w}{\int_5^{20 \text{ MeV}} \sigma_c(E) dE x_c} = 5,7$$

$\sigma_w, \sigma_c$  = sections efficaces de freinage pour le tungstène et le carbone.  
 $x_w, x_c$  = nombres d'atomes de tungstène et de carbone dans le faisceau.

Cette valeur est compatible avec le précédent résultat expérimental.

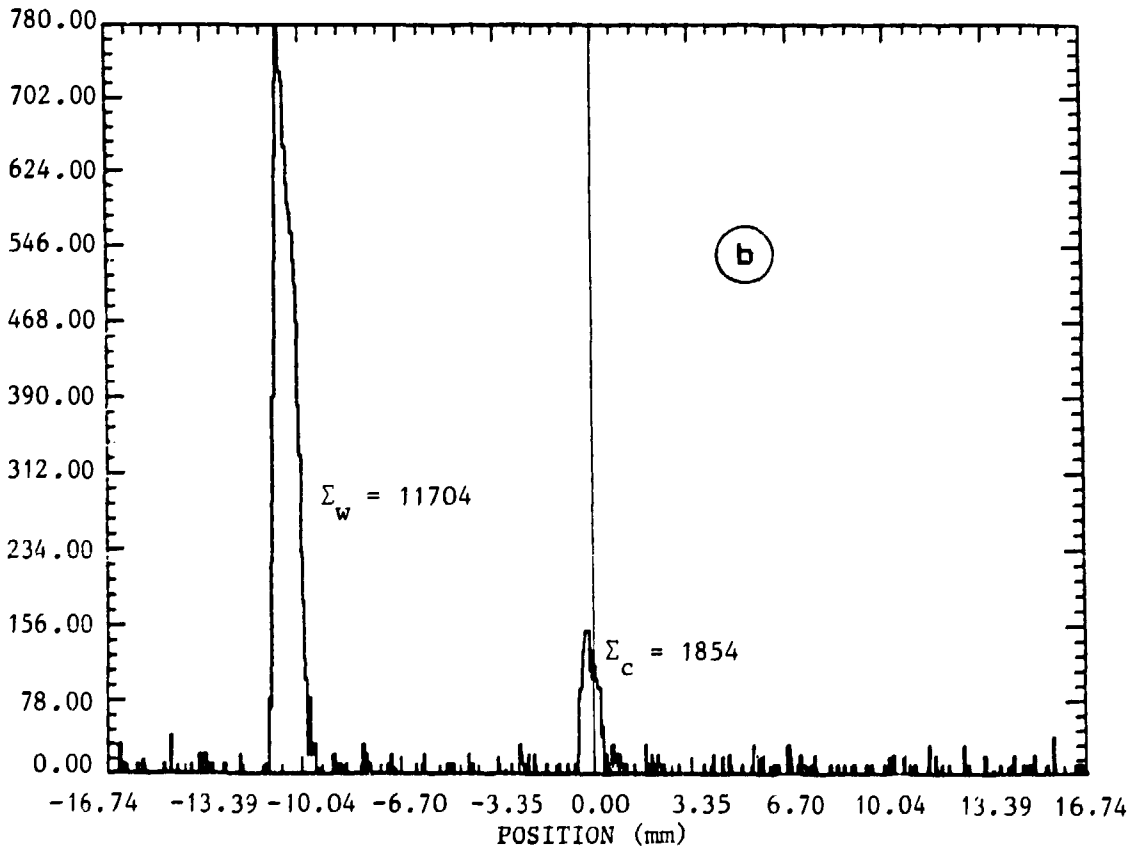
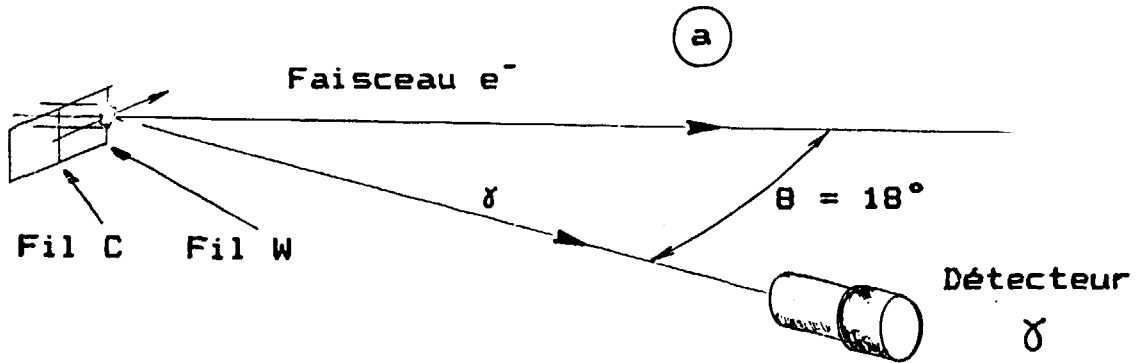


Fig. II.2 - Utilisation du rayonnement de freinage

## 2. Action sur l'émittance du faisceau

-----

Dans certaines applications, particulièrement dans le cas des anneaux, où il est important de préserver l'émittance du faisceau, il sera préférable de choisir, contrairement au cas précédent, un corps léger, ainsi qu'un diamètre aussi faible que possible, (même si la résolution spatiale n'est pas primordiale).

## 3. Tenue en température

-----

Nous arrivons ici au critère déterminant, du moins dans le cas des lasers à électrons libres. En effet, nous pouvons dans ce type d'application, avoir des densités de courant élevées, c'est-à-dire plusieurs centaines d'ampères dans des dimensions transversales inférieures au mm, qui provoquent de fortes élévations de température, pouvant entraîner la fusion des fils. Nous allons examiner plus précisément ce problème dans la section suivante.

\*Linear Variable Differential Transformer.

## Chapitre III

### ETUDE MECANIQUE ET THERMIQUE (THEORIE ET EXPERIENCE)

#### III.1 - Calcul de l'échauffement du fil

Pour simplifier le raisonnement, nous supposons que nous avons un faisceau à section circulaire, et à densité uniforme ; la température calculée correspond aux conditions d'interception maximum, lorsque le fil se trouve au centre du faisceau.

A chaque macroimpulsion, la portion de fil se trouvant dans le faisceau absorbe une énergie :

$$W_i = \frac{1,6 \cdot 10^{-13} \cdot N \cdot d^2 \cdot \rho \cdot \left( \frac{dE}{dX} \right)}{\phi} \quad (1)$$

Où :

$N$  = nb d'électrons par macroimpulsion.

$d$  = diamètre du fil. (cm)

$\rho$  = masse volumique. (g/cm<sup>3</sup>)

$\phi$  = diamètre du faisceau. (cm)

$\frac{dE}{dX}$  = perte d'énergie des électrons par ionisation (MeV.cm<sup>2</sup>/g).

(pour le tungstène: 1,37 MeV.cm<sup>2</sup>/g, pour le carbone : 1,89 MeV.cm<sup>2</sup>/g).

Cette énergie déposée produit une élévation de température :

$$\Delta T = \frac{W_i}{m C_p} \quad (K) \quad (2)$$

Où :

$m$  = masse du fil dans le faisceau.

$C_p$  = capacité thermique massique.

Remarque : dans le cas du carbone,  $C_p$  varie fortement avec la température, et l'équation (2) devient :

$$\Delta T = \int_0^{W_i} dW / m C_p(T)$$

Pendant les intervalles entre deux macroimpulsions et compte tenu des puissances incidentes, et donc des températures obtenues, le fil se refroidit partiellement par conduction, et principalement par rayonnement. La fig. III.1 montre les variations de température calculées pendant les 4 premières impulsions, d'un fil de tungstène dont le diamètre est 20  $\mu\text{m}$ , soumis à l'action d'un faisceau dont les paramètres sont les suivants :

$E = 50 \text{ MeV}$ ,  $I = 200 \text{ mA}$ ,  $t = 10 \text{ }\mu\text{s}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$   $\phi = 1 \text{ mm}$

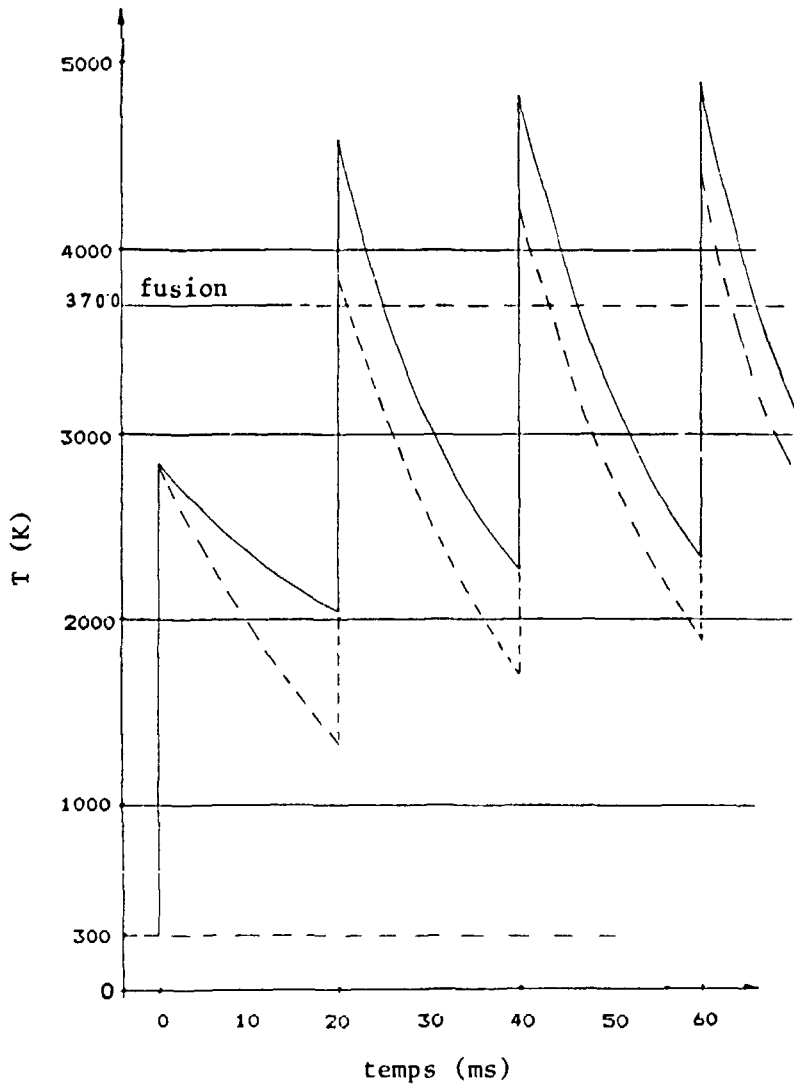


Fig. III.1 - Température calculée du fil W. ----- Rayonnement + Conduction  
———— Rayonnement seul

La courbe pleine ne tient compte que du rayonnement thermique, la courbe en pointillé tient compte également de la conduction. On constate que l'écart de température entre les deux courbes va en diminuant avec le temps, et qu'il est devenu assez faible après quelques impulsions. Aussi, dans les exemples qui vont suivre, nous ne considérerons que la fraction d'énergie rayonnée.

### III.2 - Calcul du refroidissement par rayonnement

La puissance rayonnée est donnée par la formule de Stéfán :

$$Pr (T) = \epsilon \sigma s T^4$$

$\epsilon$  = coefficient d'émissivité ( $\epsilon_w = 0,3$ ,  $\epsilon_c = 0,8$ )

$\sigma$  = constante de Stéfán =  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ w. m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  (MKS)

$s$  = surface de rayonnement

$T$  = température absolue

Pour une fréquence de 50 hZ, on obtient entre deux impulsions d'électrons, un refroidissement :

$$\Delta T = \frac{1}{m} \int_{t=0}^{t=20\text{mS}} \frac{Pr (T) \cdot dt}{C_p (T)}$$

et une température moyenne du fil en régime d'équilibre :

$$T = \left( \frac{\overline{Pr}}{\epsilon \sigma s} \right)^{1/4} \text{ avec } \overline{Pr} = W_i \times 50$$

Le résultat de ce calcul (fig. III.1) montre que pour le tungstène de diamètre = 20  $\mu\text{m}$ , la température de fusion (3700 K) est dépassée pendant 1 à 2 ms à partir de la deuxième macroimpulsion.

Par contre, dans le cas du carbone (fig. III.2) et dans les mêmes conditions de faisceau, la température moyenne s'établit à la valeur de 1720 K, ce qui est bien inférieur à la température de sublimation qui est de 3900 K.

Donc, dans le cas du projet CLIO, le choix du carbone est impératif du seul point de vue thermique.



III.3 - Tableau comparatif des propriétés de W et C

	W	C
T fusion (K)	3700	3900
Cp(J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	130	700-2000
ε	0,3	0,8
Energie déposée (J) *	2.10 <sup>-3</sup>	7.10 <sup>-4</sup>

\*Dans les conditions nominales du projet CLIO : I = 200 mA, t = 10μs

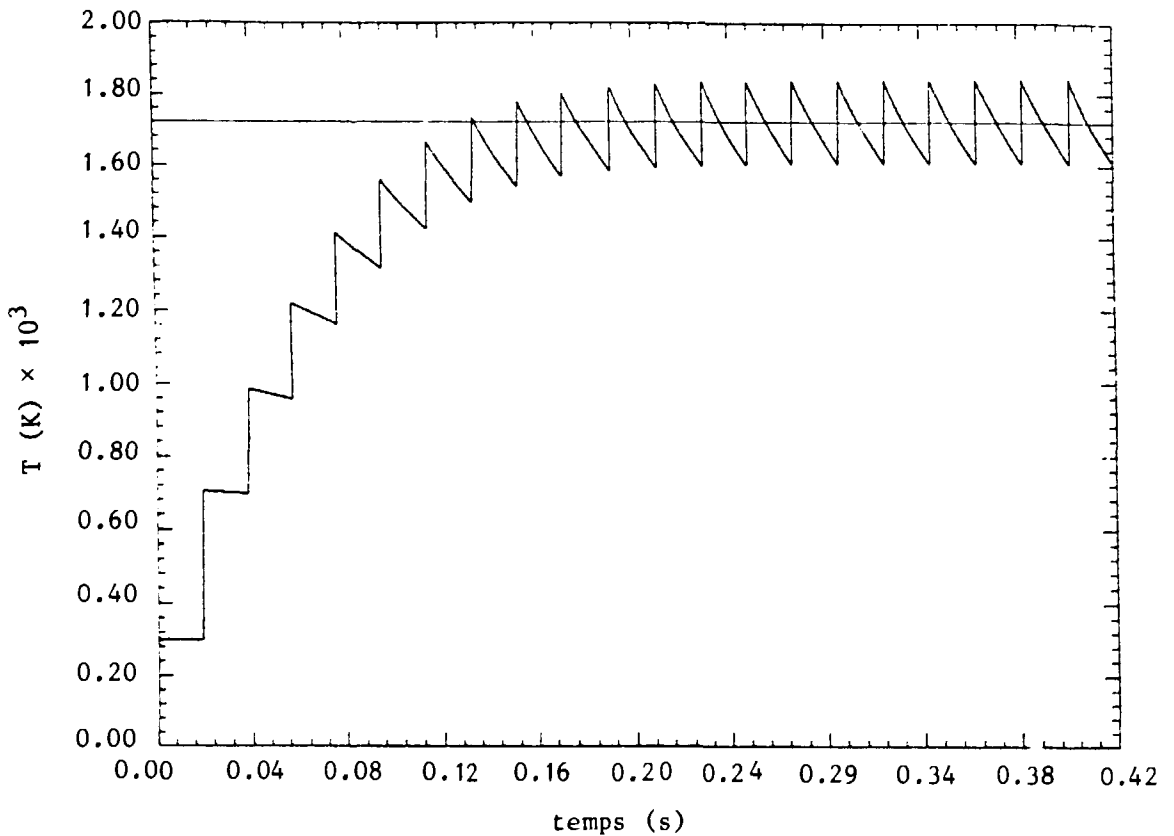


Fig. III.2 - Température calculée du fil C.

III.4 - Vérification expérimentale des propriétés thermiques

Afin de vérifier la crédibilité des calculs qui précèdent, nous avons voulu compléter cette étude par une expérience. Mais, ne disposant pas d'un faisceau ayant les caractéristiques prévues pour CLIO, nous avons simulé, avec des électrons de basse énergie (50 keV), des énergies déposées équiva-

lentes. La fig. III.3 montre le schéma du dispositif expérimental installé sur un canon de l'ALS, où trois fils, dont deux en W de diamètre = 20  $\mu\text{m}$ , et le troisième en C de diamètre = 30  $\mu\text{m}$ , sont tendus sur un cadre et reliés électriquement à un circuit extérieur permettant de mesurer le courant intercepté. Le faisceau peut être dirigé sur l'un des trois fils par le jeu de la bobine de déviation, et le courant non intercepté est mesuré sur le capteur. Les paramètres de ce canon (intensité, émittance), ont été mesurés consécutivement aux travaux de J.M. JOLY [10].

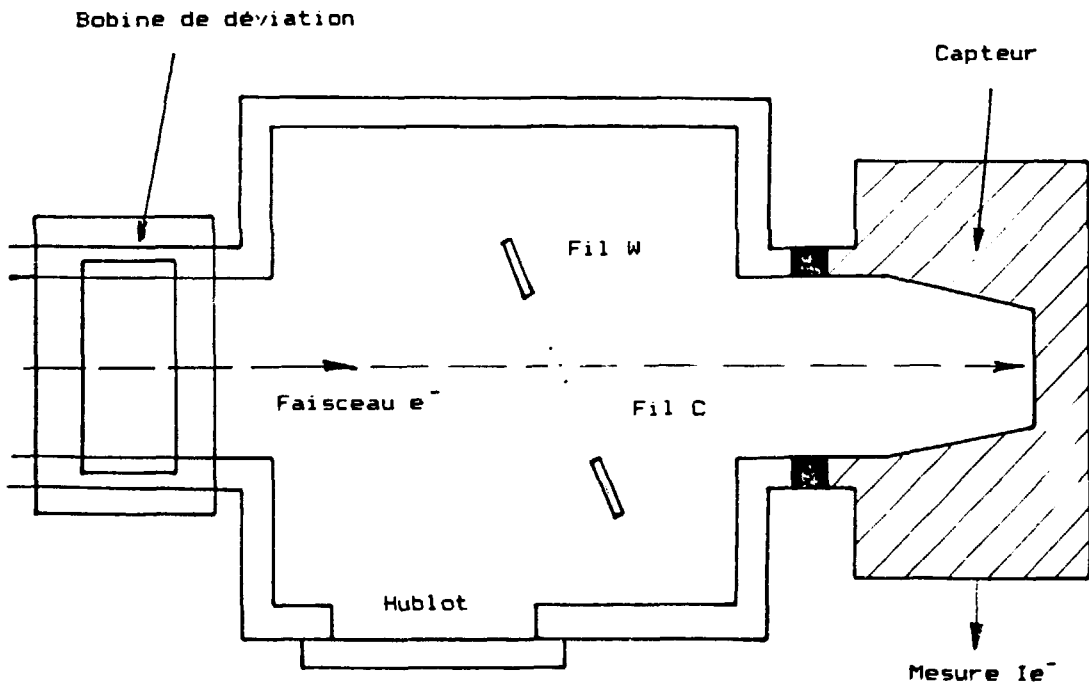


Fig. III.3 - Dispositif d'évaluation de la tenue des fils aux chocs thermiques

Valeurs expérimentales :

$E = 50 \text{ keV}$     $I_{\text{crête}} = 80 \text{ mA}$     $\phi \text{ faisceau} = 1 \text{ mm}$   
 $f = 50 \text{ Hz}$     $I_{\text{intercepté}} = 1,5 \text{ mA}$

On considère que toute l'énergie des électrons est absorbée dans l'épaisseur du fil.

L'énergie interceptée à simuler pour le tungstène est  $2 \cdot 10^{-3}$  joule ce qui définit, compte tenu des paramètres précités, une largeur d'impulsion :

$$t = \frac{W}{E \cdot I} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^3 \times 1,5 \cdot 10^{-3}} = 2,66 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

Pour simuler le nombre d'interceptions du fil par le faisceau de CLIO, nous avons déclenché des trains de 15 impulsions définies précédemment ( $t = 27 \mu s$ ), ce qui a entraîné la fusion du tungstène au bout de quelques tirs.

Le fil de carbone a très bien supporté ces mêmes conditions, bien qu'elles représentent une énergie déposée 4 à 5 fois supérieure aux conditions de CLIO. On avait dans ce cas un courant intercepté de 2,3 mA, d'où une énergie déposée de 3,06 mJ par macroimpulsion, alors que la valeur correspondant aux conditions de CLIO est de 0,7 mJ. Le diagramme de température calculé dans ce cas est donné par la fig. III.4.

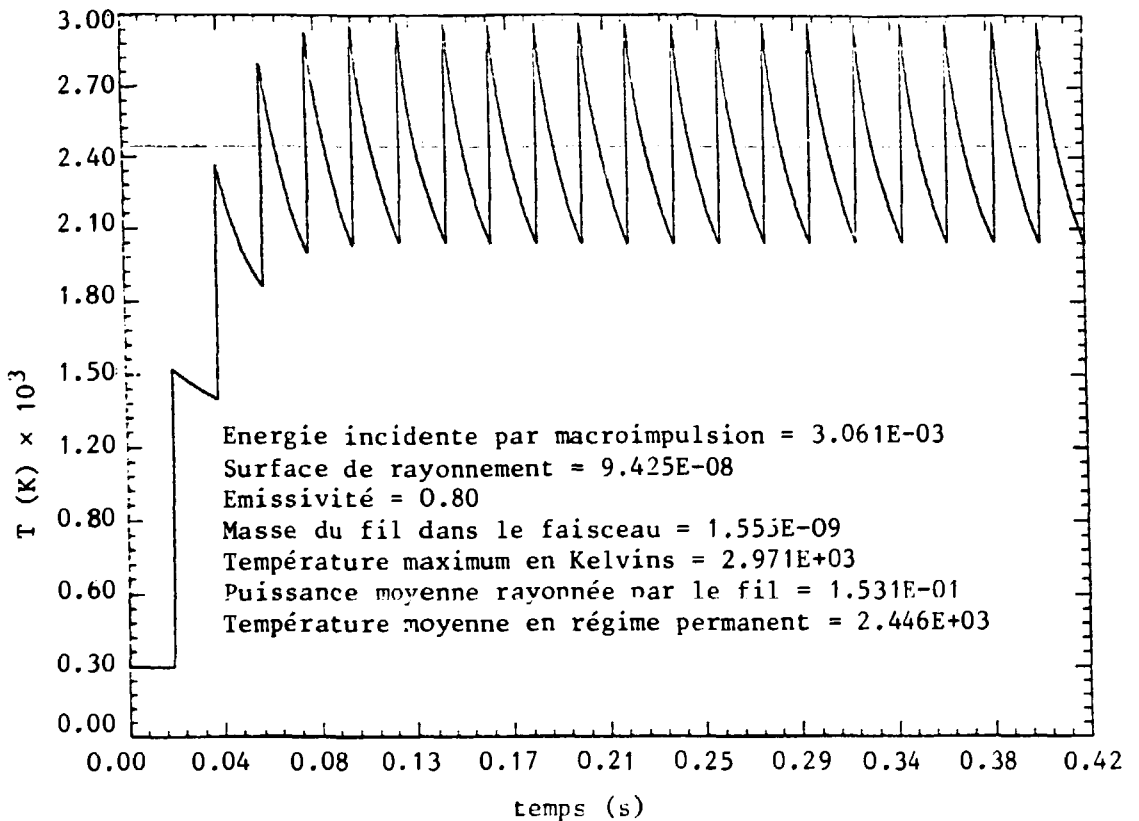


Fig. III.4 - Température calculée du fil C dans les conditions de simulation à basse énergie.

### III.5 - Propriétés mécaniques des matériaux utilisés

Outre les propriétés thermiques, nous devons aussi considérer certaines propriétés mécaniques des matériaux et en particulier l'élasticité. Les fils doivent être tendus avec une force telle qu'elle produise un allongement élastique suffisant pour compenser celui dû à la dilatation, lors de la traversée du faisceau.

Comme nous ne possédons aucune donnée concernant le fil de carbone utilisé, nous avons dû mesurer son élasticité. Les résultats de mesure sont illustrés par la fig. III.5, qui permet de chiffrer un coefficient d'allongement élastique de  $2,56 \cdot 10^{-4} / g$ .

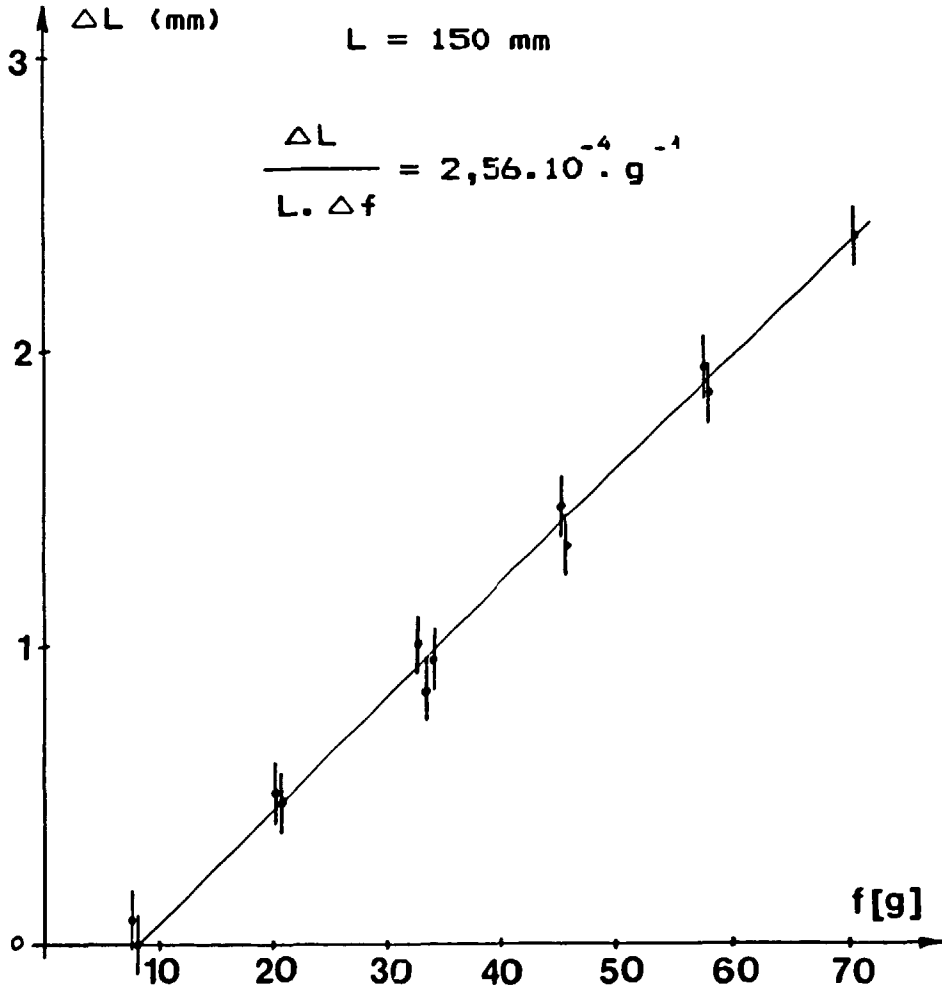


Fig. III.5 - Courbe d'élasticité du fil de carbone.

Une autre propriété intéressante, et qui renforce le choix du carbone, est la résistance à la traction. Les réseaux de courbes des fig. III.6a et III.6b [11], montrent que, contrairement au tungstène, le carbone offre des résistances qui croissent avec la température. Ceci ne peut constituer qu'un critère de fiabilité supplémentaire.

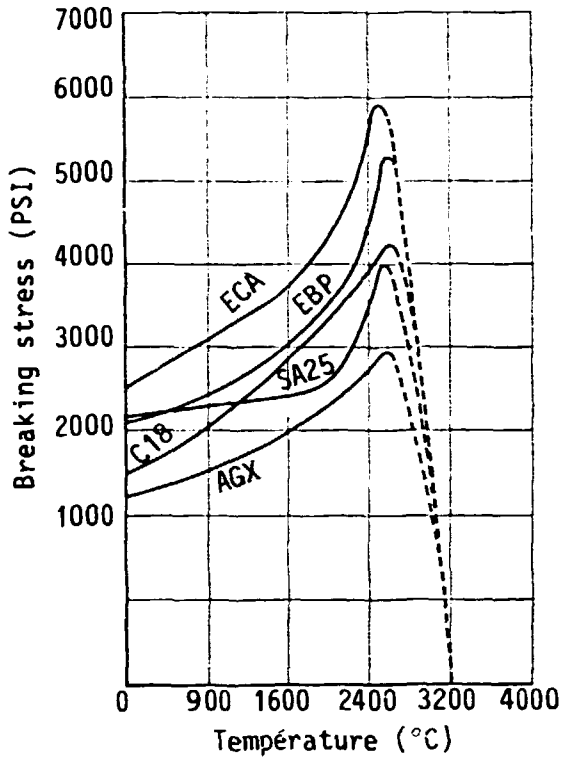


Fig. III.6a  
Carbone

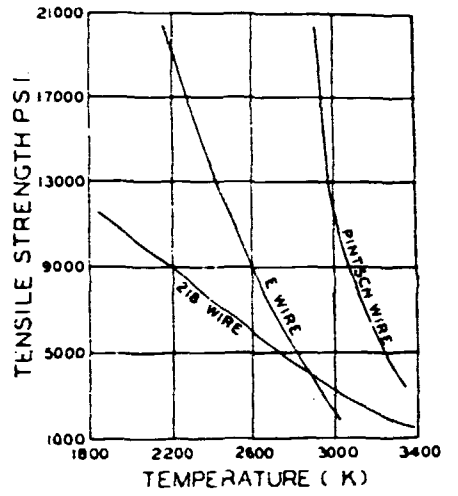


Fig. III.6b  
Tungstène

## Chapitre IV

### TRAITEMENT DES SIGNAUX-VISUALISATION

#### IV.1 - Processus de traitement des signaux

La fig. IV.1 montre le processus de traitement des signaux d'électrons secondaires, qui consiste d'abord à obtenir l'histogramme  $I_{\text{sec}} = f(V)$  ;  $V$  représentant les positions  $X$  ou  $Y$  des fils dont nous avons parlé au paragraphe II.2.

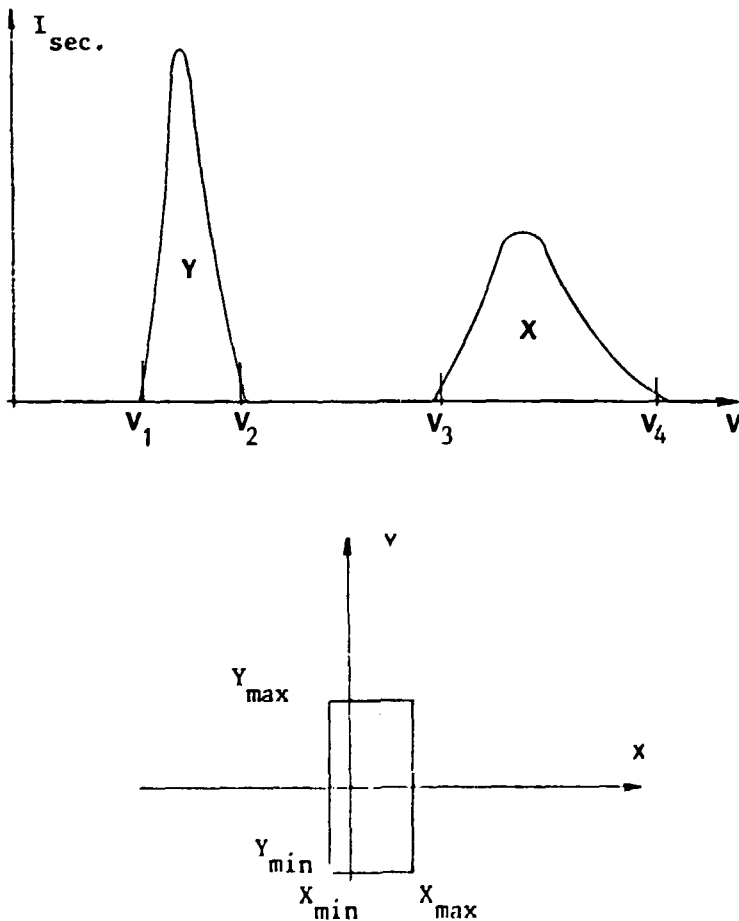


Fig. IV.1 - Processus de traitement des signaux ERATO.

Les deux pics qui apparaissent sur cet histogramme, de surfaces égales et proportionnelles au courant du faisceau, représentent successivement les scrutations suivant l'axe vertical Y, et l'axe horizontal X.

Les valeurs particulières V1, V2, V3, V4, sont transposées en valeurs de  $X_{\min}$ ,  $X_{\max}$ ,  $Y_{\min}$ ,  $Y_{\max}$ , qui permettent d'obtenir une image représentant l'encombrement maximum dans les directions X et Y, du faisceau qui s'inscrit dans le quadrilatère obtenu.

Les conditions de bon fonctionnement du système sont :

1 - Le faisceau doit être inclus dans le triangle hachuré représenté dans la fig. II.1 du paragraphe II.1.

2 - Un seul fil doit intercepter le faisceau à un instant donné, car les deux fils X et Y sont sur un circuit de mesure commun.

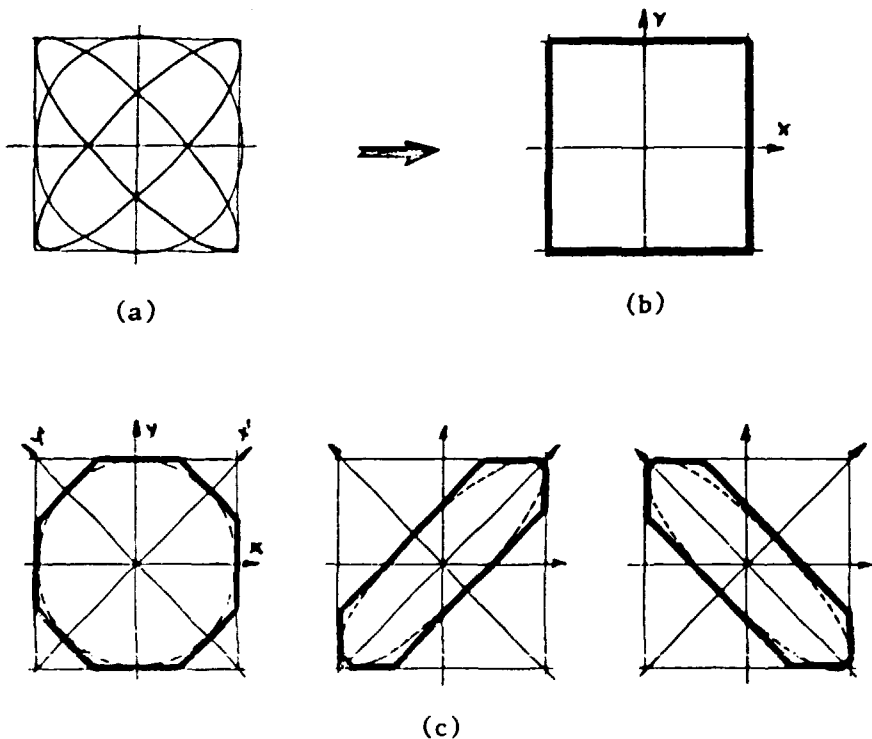


Fig. IV.2 - Lever du doute par double scrutation

- a) Profils
- b) Visualisation en simple scrutation
- c) Visualisation en double scrutation

## IV.2 - Ensemble à double scrutation (ERATO)

Le système que nous avons décrit jusqu'à maintenant, ne permet pas de faire la distinction entre un faisceau à section circulaire et elliptique (fig. IV.2a) puisqu'ils peuvent avoir la même figure d'encombrement (fig. IV.2b).

Pour remédier à ce défaut, nous avons adopté un montage à double scrutation dans deux repères orthonormés XY et X'Y', décalés de 45 degrés qui nous apporte les informations complémentaires nécessaires pour lever le doute (fig. IV.2c).

Le schéma synoptique de cet ensemble est représenté sur la fig. IV.3a, montrant les deux équipages mobiles XY et X'Y', leurs vérins de commande et leurs capteurs de position associés.

Les vérins actionnés par des moteurs pas à pas, et leurs circuits de puissance, sont fabriqués par la Société Française MICROCONTROLE ; les circuits de commande, ainsi que les convertisseurs analogique-numérique destinés à la mesure de  $I_{sec}$  et de  $V$ , ont été intégrés dans un système VME.

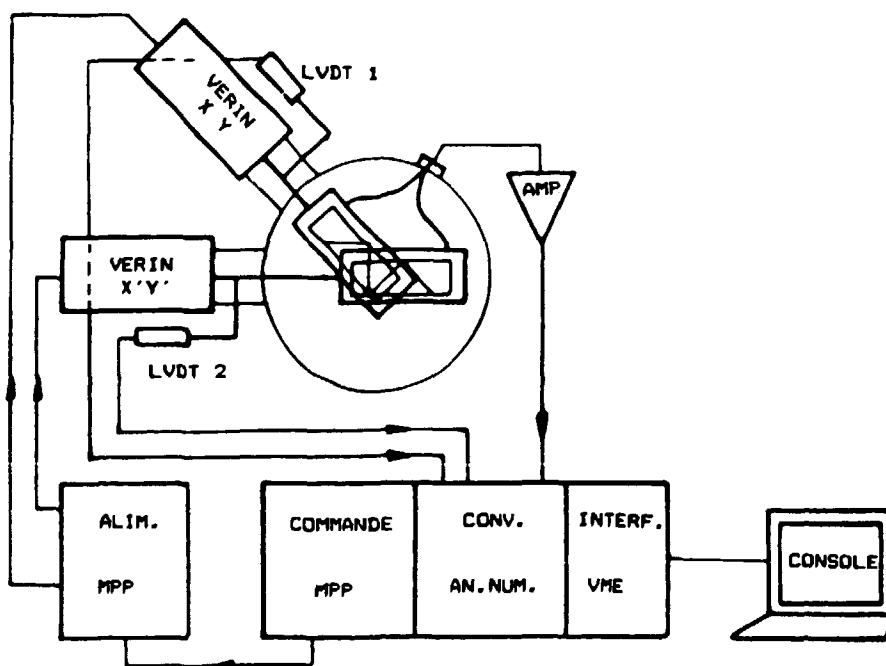


Fig. IV.3a - Schéma synoptique du système de contrôle commande.



Cet ensemble de contrôle-commande (fig. IV.3a) ainsi que le logiciel de traitement, ont été élaborés par J.L. FALLOU.

La fig. IV.3b représente le montage de l'amplificateur du signal d'électrons secondaires, dont le composant principal est un amplificateur opérationnel type 3554 AM de chez BURR-BROWN. Le gain de conversion  $V_s/I_{sec}$ , peut être réglé par la valeur de  $R_e$ .

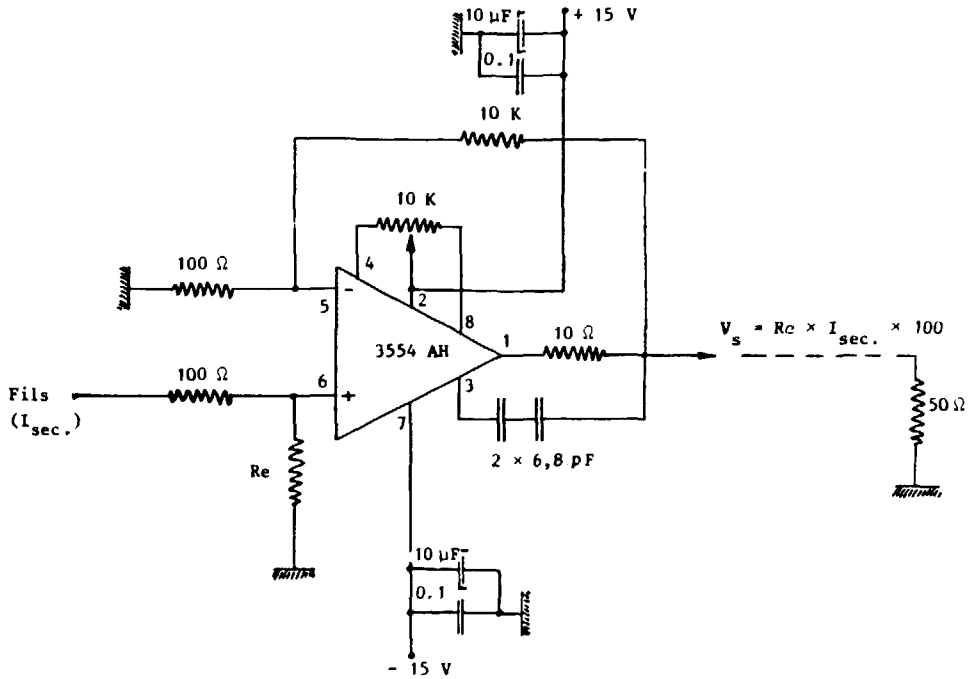


Fig. IV.3b - Amplificateur du signal d'électrons secondaires. ( $I_{sec}$ )

## Chapitre V

### RESULTATS EXPERIMENTAUX

#### V.1 - Essai du système ERATO sur la ligne HE3A à l'ALS

Un prototype du système ERATO, équipé de fils de tungstène de  $\phi = 20 \mu\text{m}$ , a été testé en octobre 1988.

Les caractéristiques du faisceau étaient les suivantes :

$$E = 325 \text{ MeV} \quad I_c = 5 \text{ à } 15 \text{ mA} \quad t = 18 \mu\text{s} \quad f = 50 \text{ Hz.}$$

Les figs V.1 et V.2 illustrent deux cas de mesure de la position et de l'encombrement du faisceau, et montrent respectivement sur les fig. V.1a et V.2a les histogrammes  $I_{\text{sec}} = f(V)$ , et sur les fig. V.1b et V.2b les visualisations d'encombrement correspondantes, le faisceau étant situé à l'intérieur de la partie commune aux deux rectangles. D'autres cas expérimentaux seront mentionnés dans la section VI, consacrée aux moniteurs optiques.

#### V.2 - Visualisation tridimensionnelle du profil du faisceau

Il est possible, partant des histogrammes  $I_{\text{sec}} = f(X,Y)$  (fig. V.1a et V.2a) préalablement lissés et traités, de former outre les visualisations brutes des fig. V.3-1a et V.3-2a, un réseau de courbes de niveaux qui représentent le contour correspondant à un pourcentage donné de l'intensité du faisceau. La seule hypothèse faite dans le programme de traitement, mis au point par A. LEPRETRE est que les courbes de niveaux soient des ellipses.

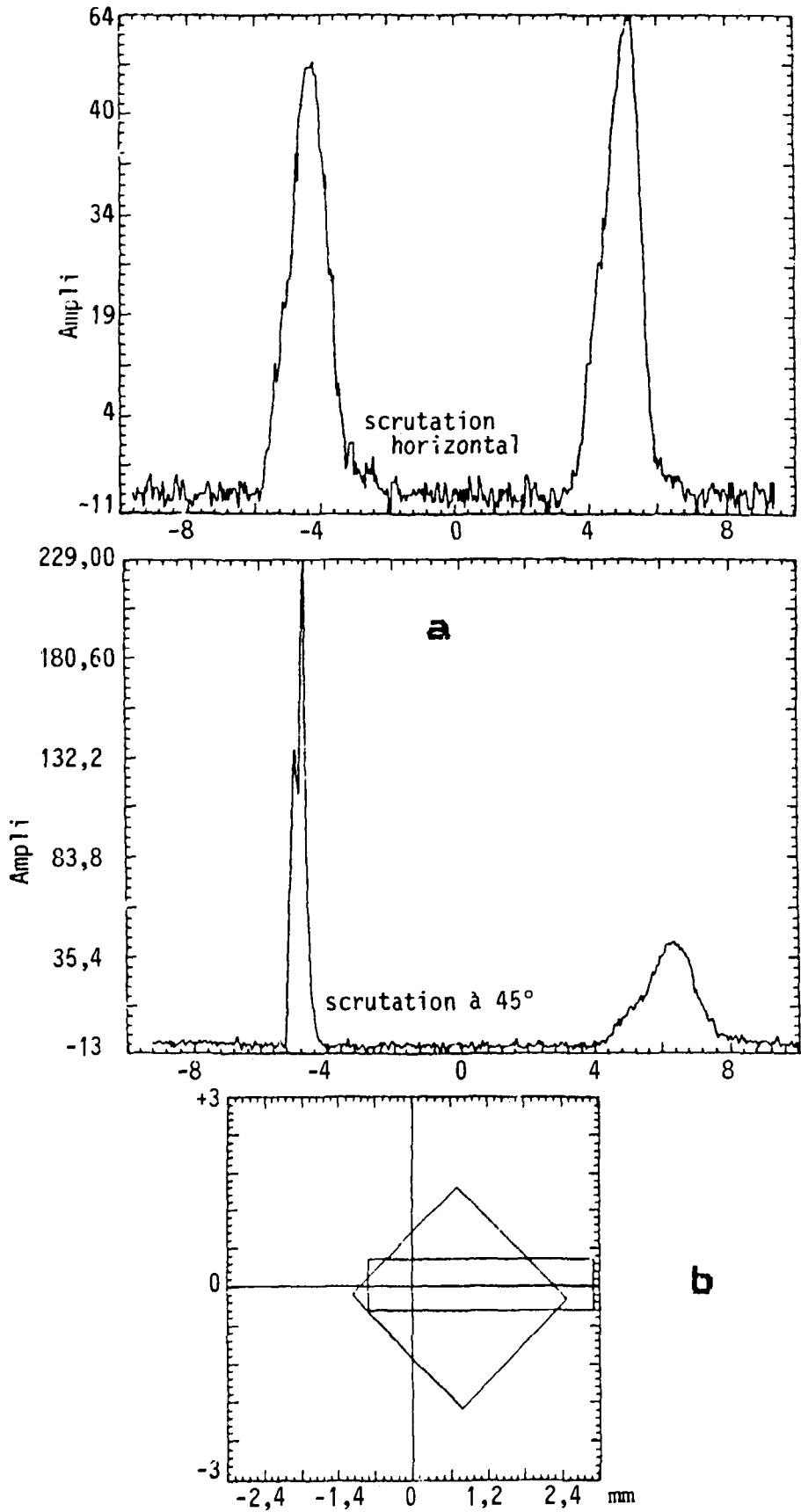


Fig. V.1

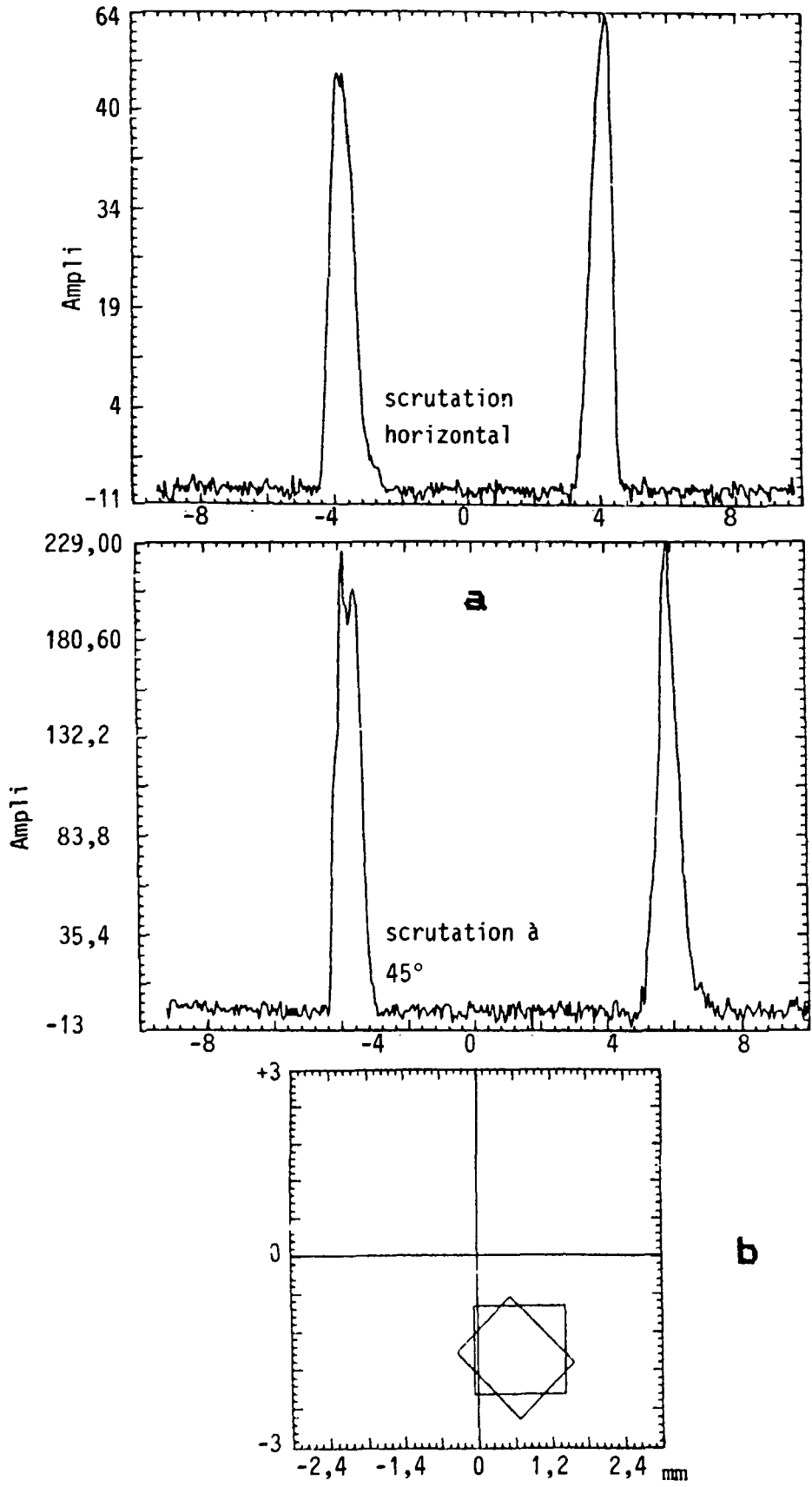


Fig. V.2

Ces réseaux de courbes obtenus à partir de ce traitement, sont représentés sur les fig. V.3-1b et V.3-2b.

L'ellipse de plus grande dimension représente le contour à l'intérieur duquel se trouve 90 % de l'intensité du faisceau, le pas des courbes est de 10 %.

Ces résultats ont été obtenus sur la ligne de faisceau HE3A.

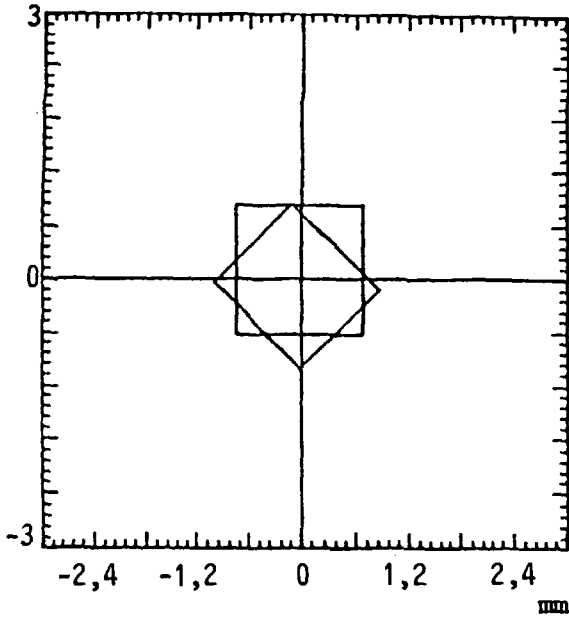


Fig. V.3-1a

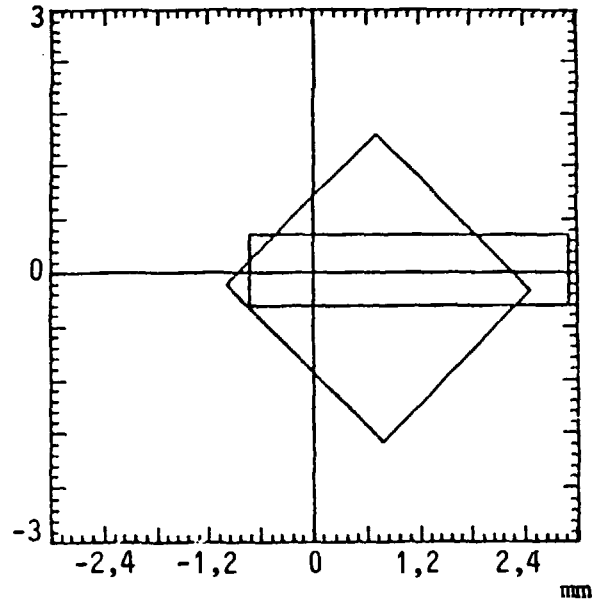


Fig. V.3-2a

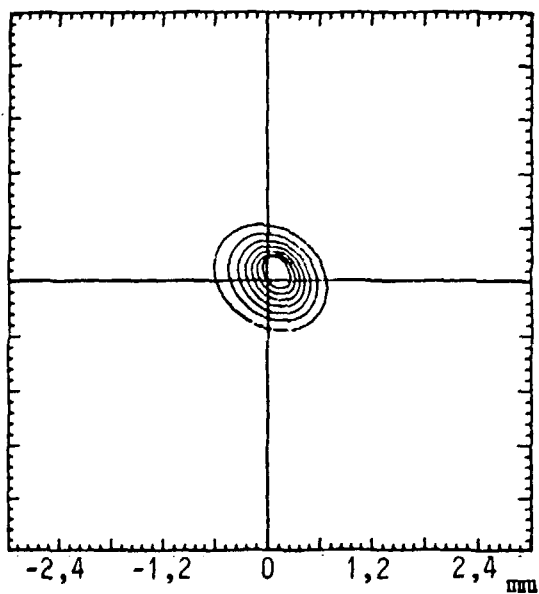


Fig. V.3-1b

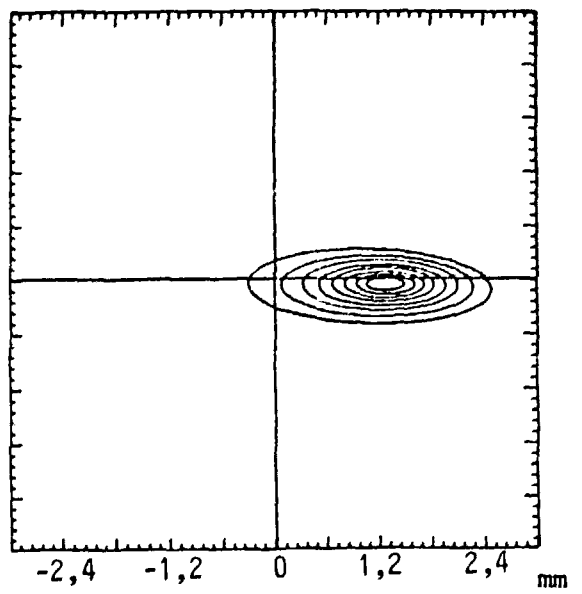


Fig. V.3-2b

## Chapitre VI

### DIAGNOSTICS OPTIQUES

#### VI.1 - Position du problème

Il s'agit de déterminer la position du faisceau d'électrons au centre de l'onduleur.

La principale difficulté réside ici dans le fait que l'espace disponible est très réduit. En effet, l'entrefer magnétique minimum imposé par les caractéristiques du LEL, est de 10 mm : ce qui implique une chambre à vide dont les dimensions intérieures seront de l'ordre de  $8 \times 15 \text{ mm}^2$ . Un ensemble tel que ERATO est donc inadaptable à cet endroit.

Nous envisageons donc d'utiliser un phénomène intéressant lié aux faisceaux d'électrons, qu'est le rayonnement de transition [7, 8, 9], et qui permet d'obtenir d'une part, la forme de la tache du faisceau incident sur un radiateur convenablement disposé, et d'autre part une information sur l'énergie des électrons.

Dans notre application au projet CLIO, nous nous intéressons uniquement à la forme et à la position de la tache, que nous voulons comparer à celle d'un laser d'alignement, dont le faisceau aura été préalablement ajusté sur l'axe de la cavité optique du LEL. Ainsi, le radiateur constitué d'une lame métallique escamotable, servira également d'écran pour former l'image du faisceau laser de référence. Nous pourrions ainsi aligner l'axe de la cavité optique, sur celui du faisceau d'électrons.

#### VI.2 - Rappel des propriétés du rayonnement de transition

Le rayonnement de transition, dont le spectre s'étend des micro-ondes aux rayons X, est produit lorsqu'une particule chargée franchit la frontière entre deux milieux de constantes diélectriques différentes.

Si une lame de constante diélectrique  $\epsilon \neq \epsilon_0$  (fig. VI.1a et b), est insérée sur le parcours d'un électron, on constate l'émission de rayonnement vers l'avant, dans le sens de la trajectoire de la particule (transition milieu-vide), et vers l'arrière (transition vide-milieu). Dans ce second cas, la direction moyenne du rayonnement est celle de la particule image, (fig. VI.1b) c'est-à-dire la direction de la réflexion spéculaire. Ce rayonnement possède deux composantes polarisées (parallèle et perpendiculaire au plan d'incidence).

Le diagramme d'émission, en fonction de l'angle par rapport à la direction de la réflexion spéculaire, a l'allure de la fig. VI.1c. Pour des particules d'énergie E, l'angle du maximum d'émission a pour valeur :

$$\theta_m = \frac{1}{\gamma} = \frac{m_0 c^2}{E} \quad \text{où } m_0 c^2 = 0,511 \text{ MeV}$$

La mesure de cet angle est donc une information sur l'énergie des particules incidentes.

### VI.3 - Problèmes thermiques

Ils se posent de la même manière que dans le cas des fils sur le moniteur ERATO ; une succession d'impulsions à forte intensité, et très focalisées sur une feuille mince, peut entraîner rapidement la destruction de celle-ci.

Les fig. VI.2a, b, c, d, montrent pour différents matériaux les températures calculées, de la partie du radiateur interceptant les électrons pendant la durée de 4 macroimpulsions. Les calculs montrent que le refroidissement s'effectue principalement par conduction.

#### Fig. VI.2a : Tungstène ép. 0,1 mm

On note une forte montée en température, due à la faible capacité thermique ( $C_p = 130 \text{ J/kg/K}$ ), mais la bonne conductivité ( $\lambda = 150 \text{ W/m/K}$ ), maintient une température moyenne relativement basse.

#### Fig. VI.2b : Acier inox ép. 0.1 mm

Malgré un point de fusion plus élevé que celui de l'aluminium, on voit que celui-ci peut être franchi à la quatrième impulsion, ceci étant dû à la mauvaise conductivité thermique ( $\lambda = 20 \text{ W/m/K}$ ).

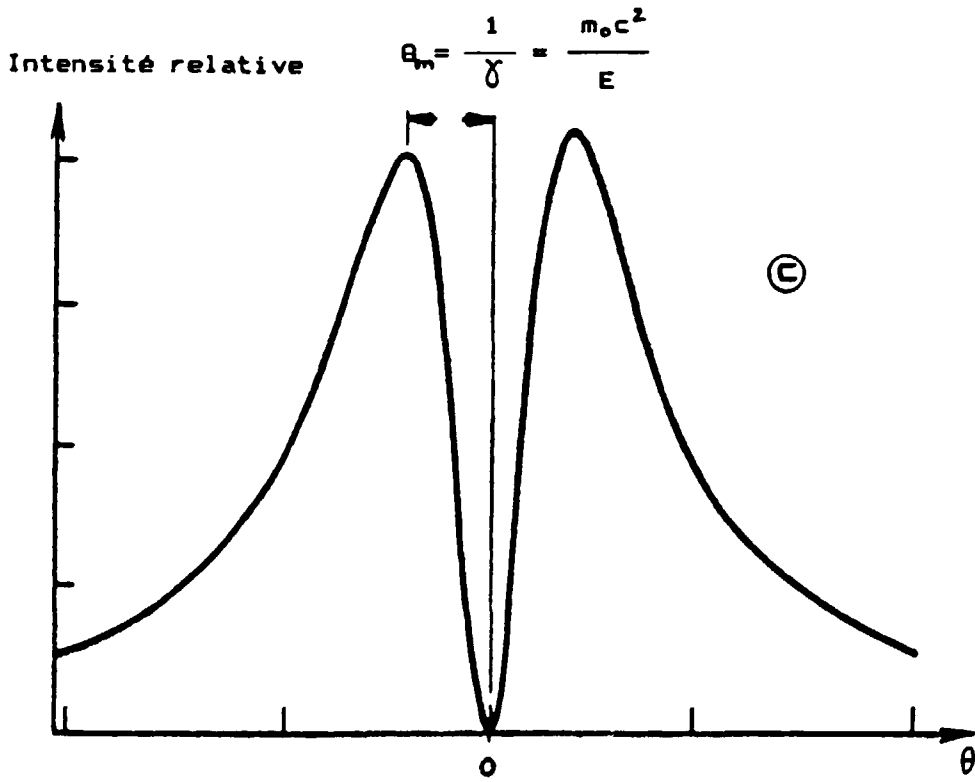
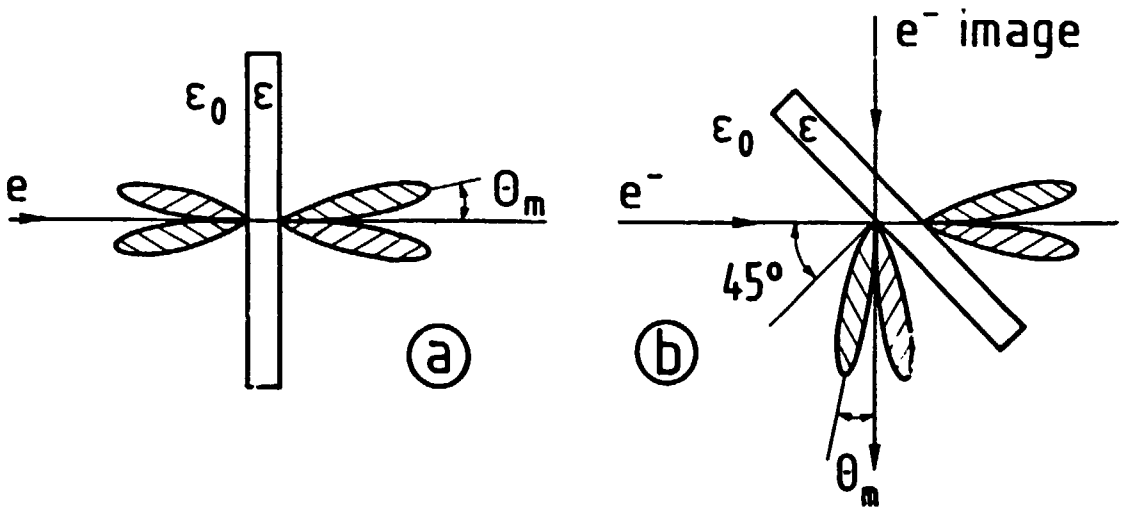


Fig. VI.1 - Radiation de transition : loi d'émission



Fig. VI.2c : Graphite ép. 0,15 mm

L'intérêt des propriétés thermiques du carbone est moins évident ici, du fait que le refroidissement s'effectue principalement par conduction, alors que le fait qu'il présente une émission élevée ( $\epsilon = 0,8$ ) et une capacité thermique augmentant sensiblement avec la température ( $C_p = 700$  à  $2000$  J/kg/K) le rend indispensable à haute température dans le cas des fils sur ERATO.

Fig. VI.2d : Aluminium ép. 0,1 mm

Ce corps présente des propriétés thermiques favorables ( $C_p = 1000$  J/kg/K, et  $\lambda = 230$  W/m/K), qui le rendent particulièrement intéressant, malgré un point de fusion assez bas ( $660^\circ\text{C}$ ).

Le tableau suivant résume les résultats des calculs thermiques effectués sur ces 4 radiateurs types, ainsi que leurs énergies déposées (collisions), et rayonnées sous forme de rayonnement de freinage, pour chaque macroimpulsion.

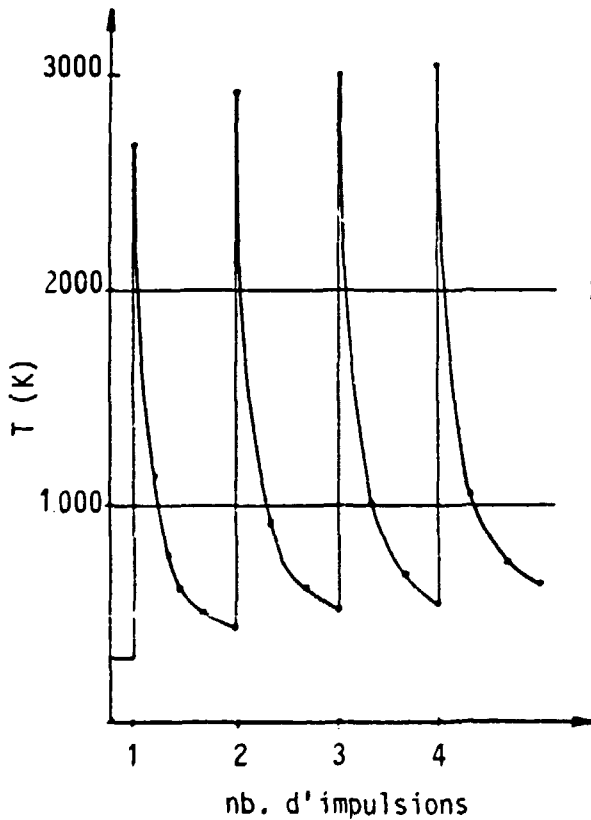


Fig. VI.2a - Tungstène 0,1 mm

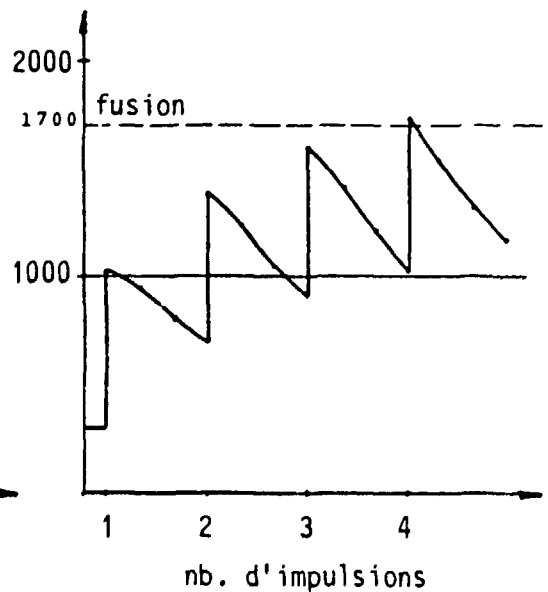


Fig. VI.2b - Acier inox 0,1 mm

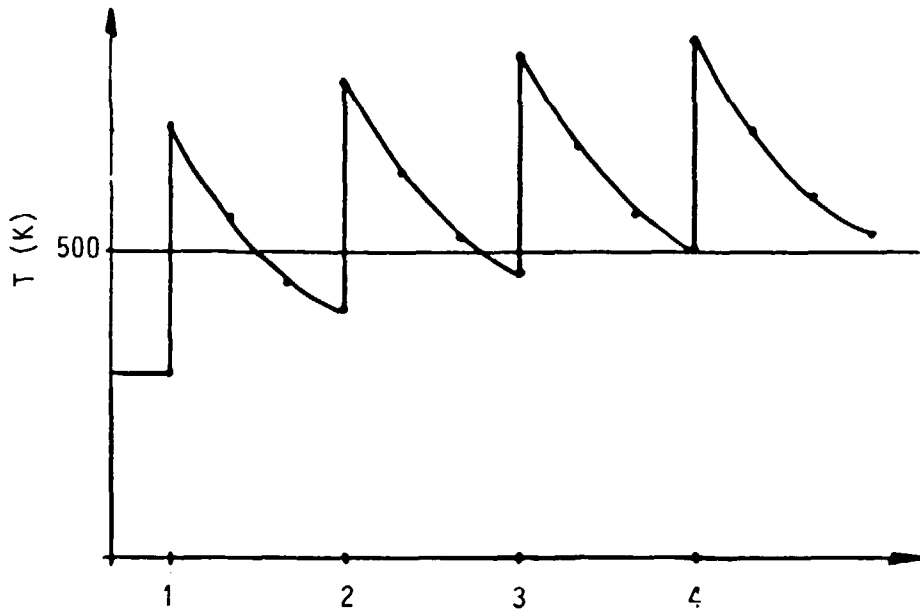


Fig. VI.2c - Graphite 0,15 mm

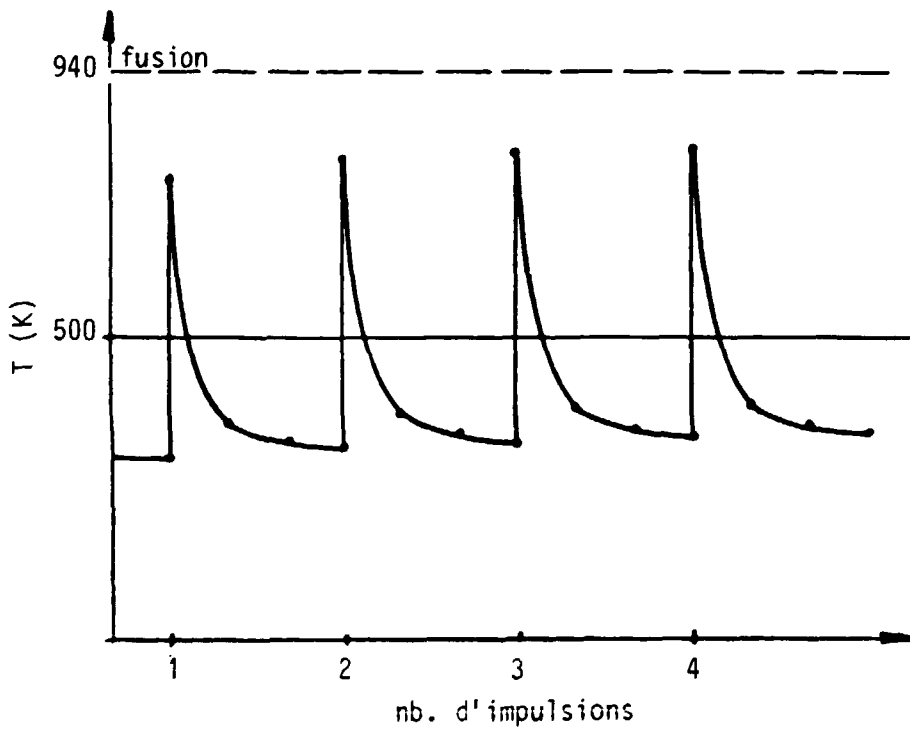


Fig. VI.2d - Aluminium 0,1 mm

Tableau VI.1

	Temps. max. 4ème imp. (°C)	pt. de fus. (°C)	W déposée Collisions (J)	W rayonnée Ray.freinage (J)
Tungstène 0,1 mm	2775	3400	0,526	2,5
Graphite 0,15 mm	575	3600	0,124	0,062
Aluminium 0,1 mm	532	660	0,097	0,095
Acier inox 0,1 mm	1467	1427	0,238	0,45
Beryllium 0,05 mm	243	1280	0,031	0,011

Cette énergie rayonnée est un paramètre qui doit être pris en considération car il faudra limiter au minimum possible, la dose de rayonnements reçue par les aimants de l'onduleur, afin de préserver la stabilité de leur champ magnétique. Ainsi, on peut éliminer d'emblée le tungstène qui absorbe et rayonne beaucoup d'énergie. L'acier inox est plus favorable, mais le point de fusion est rapidement atteint. Le choix définitif est à fixer entre le graphite, l'aluminium, et éventuellement le béryllium, éléments légers, qui apporteront le minimum de perturbations au faisceau d'électrons.

Les résultats précédents montrent que dans les 5 cas étudiés. les températures de fusion ne sont pas atteintes lors de la première impulsion, mais le seront plus ou moins rapidement selon le cas, après quelques impulsions, ce qui interdit un fonctionnement à la fréquence nominale de 50 Hz. Mais, grâce à l'effet de persistance des tubes de prises de vues TV, il apparaît possible de former une image exploitable, à partir d'une seule macroimpulsion d'électrons. En effet, une expérience de radiation de transition a récemment été réalisée à l'ALS par M. JABLONKA avec une fréquence de répétition de 6,25 Hz, et les images obtenues ont été enregistrées sur magnétoscope.

L'examen de la bande montre que chaque image claire est séparée par 7 images au niveau du noir. La fig. VI.3 montre les variations de l'amplitude du signal vidéo pendant la durée de quelques images.

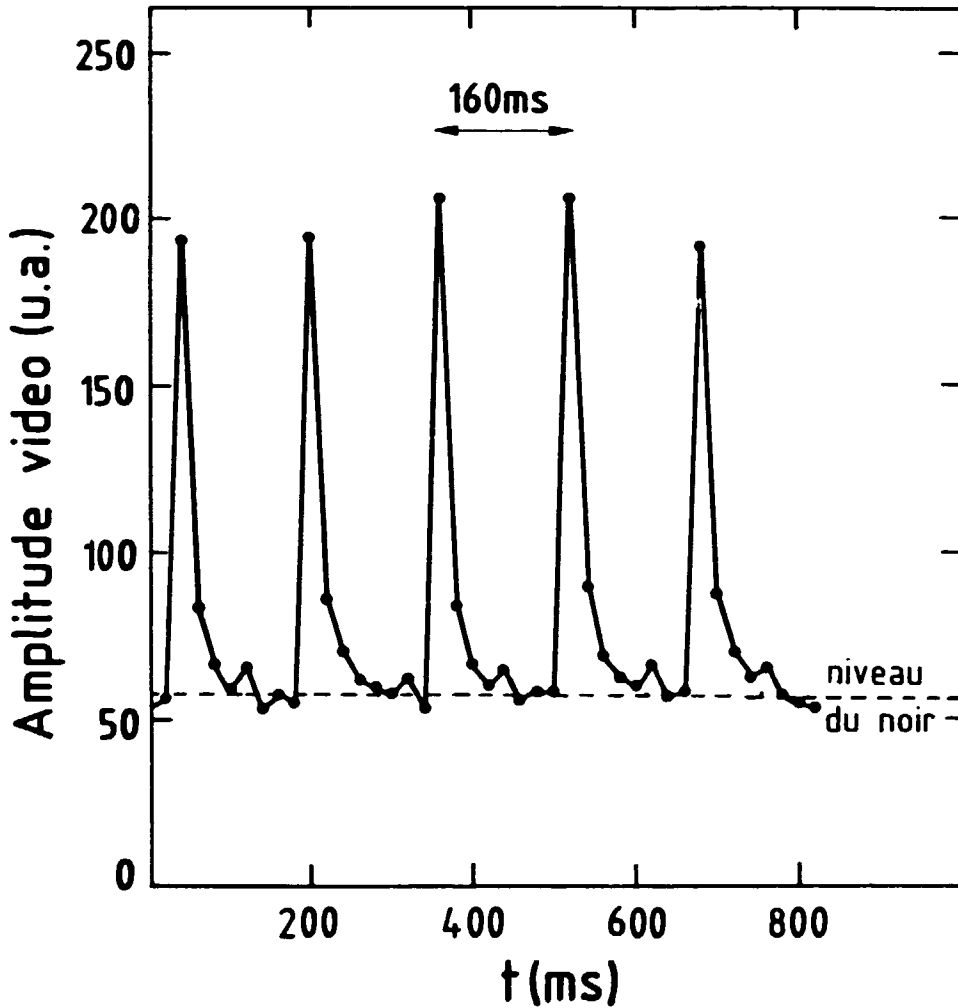


Fig. VI.3 - Amplitude du signal vidéo en fonction du temps (expérience ALS)

VI.4 - Résultats expérimentaux sur divers matériaux

Conditions faisceau :

$$E = 300 \text{ MeV} \quad I_c = 15 \text{ mA} \quad t = 20 \text{ } \mu\text{s} \quad f = 50 \text{ Hz}$$

Ces valeurs correspondent du point de vue énergie déposée dans le radiateur, aux conditions initiales prévues dans le projet CLIO.

Nous avons d'abord disposé des radiateurs perpendiculaires à l'axe du faisceau, en incidence normale, avec  $\alpha = 0^\circ$ . La disposition géométrique est détaillée dans la fig. VI.4a, qui montre que la caméra vidéo regarde le radiateur sous un angle  $\beta = 30^\circ$ , c'est-à-dire hors de la réflexion spéculaire qui est dans ce cas dirigée vers l'arrière à  $0^\circ$ . La lumière reçue ne

peut donc être que de la lumière diffusée ; et il est intéressant de noter qu'effectivement, les surfaces les moins polies sont celles qui présentent le plus de luminosité.

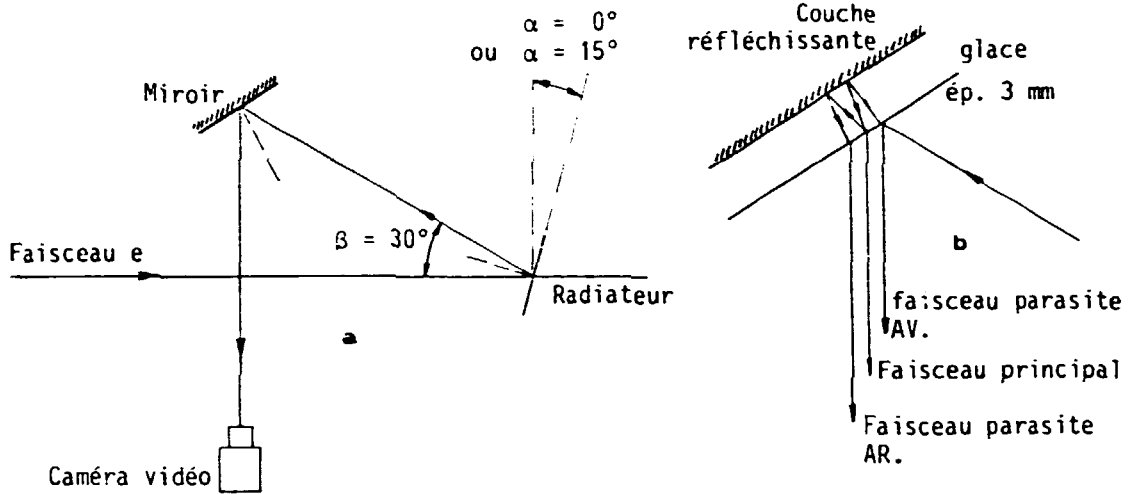


Fig. VI.4 - Disposition expérimentale de prise de vue.

Les images obtenues dans ces conditions sont traduites par les photographies des fig. VI.5a, b, c, d, e, f.

Les fig. VI.6a et VI.6b ont été réalisées avec un faisceau déformé par l'action d'un quadripole ; les images observées sont comparées avec les figures correspondantes, fournies simultanément par le système ERATO.

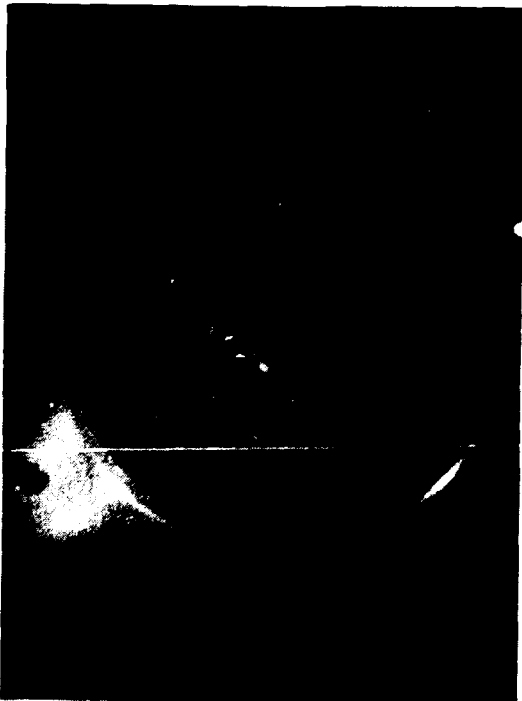
Nous avons ensuite monté deux radiateurs sur un support pivoté de  $15^\circ$  de manière à avoir le maximum d'émission lumineuse correspondant à la réflexion spéculaire, dans la direction de prise de vue de la caméra.

La fig. VI.7a montre le résultat obtenu avec une feuille d'acier inox, légèrement dépolie, la fig. VI.7b avec une feuille d'aluminium polie, et donc très peu diffusante.

Ces deux images permettent d'apprécier un gain de luminosité considérable, si on les compare aux précédentes. On note au passage la formation d'images parasites de part et d'autre de l'image vraie, due à des réflexions successives sur la lame de verre, supportant la couche réfléchissante du miroir, celle-ci étant déposée sur la face arrière de la lame (fig. VI.4b).



a  
Feuille de carbone



b  
Lame de graphite tronçonnée

Fig. VI.5a et b



c  
Feuille d'Al. très diffusante



d  
Feuille d'Al. type Alu ménager

Fig. VI.5c et d



e  
Al. déposé par évaporation sur  
un support en mylar



f  
Feuille de tungstène

Fig. VI.5e et f



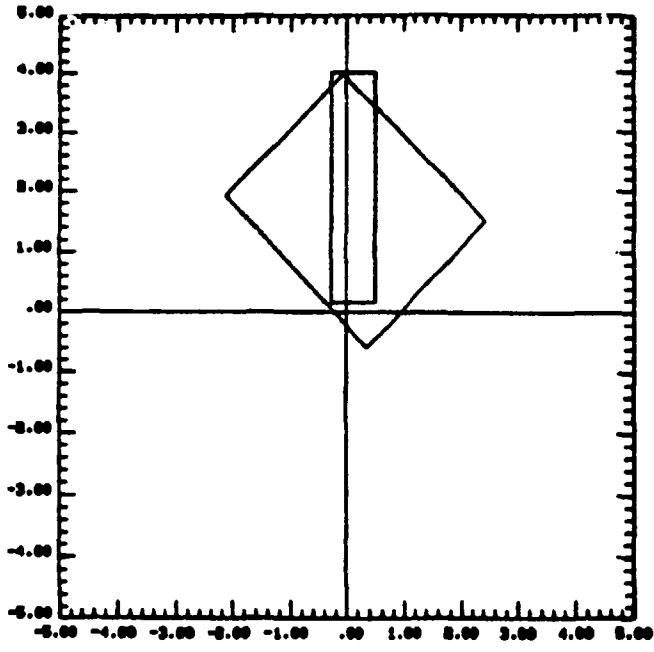


Fig. VI. 6a

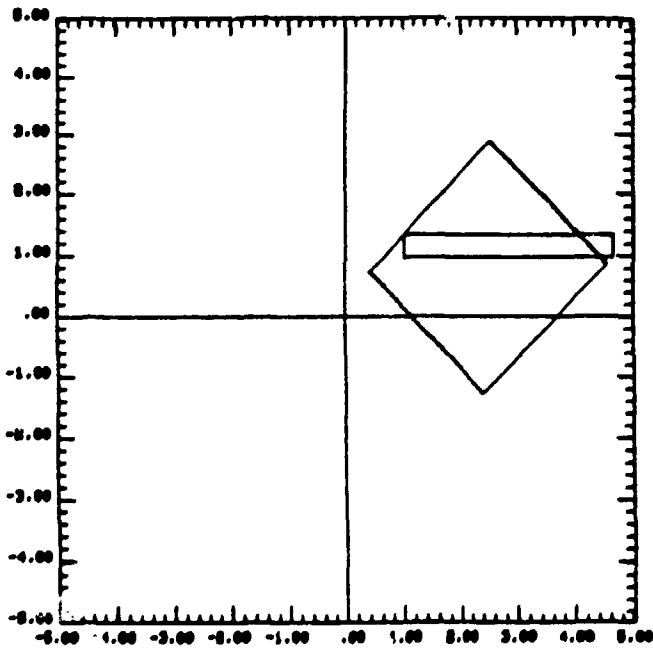
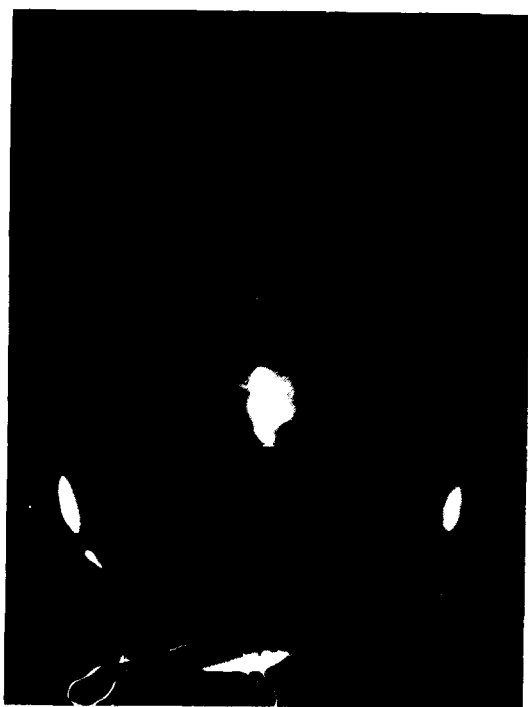


Fig. VI. 6b



a  
Feuille d'acier inox  
légèrement dépolie  $\alpha = 15^\circ$



b  
Feuille d'Al. polie  $\alpha = 15^\circ$

Fig. VI.7a et b

## CONCLUSION

Les moniteurs de profil à fils constituent à l'heure actuelle les dispositifs les plus performants en ce qui concerne :

1 - La précision dans la localisation du faisceau, qui n'est limitée que par celle des éléments mécaniques constituant le système, qui est donc dans notre cas quelques dizaines de  $\mu\text{m}$ .

2 - La résolution transversale (limitée par le diamètre du fil) permettant de déterminer les profils de densité sur des faisceaux de faibles dimensions transversales ( $\leq 1 \text{ mm}$ ).

3 - La grande dynamique d'utilisation de l'ordre de  $10^6$  (courant crête allant de quelques nA avec  $\phi = 20 \text{ cm}$  à quelques centaines de mA avec  $\phi = 1 \text{ mm}$ )

Les moniteurs optiques utilisant le rayonnement de transition semblent être les plus indiqués pour localiser le faisceau d'électrons dans la chambre à vide de l'onduleur, par suite de leur possibilité de dimensions réduites. De plus ils nous offrent l'avantage, (indispensable dans le cas de CLIO) si leur surface est légèrement diffusante, de pouvoir obtenir l'image de la tache du laser d'alignement de la cavité optique, afin de la faire coïncider avec celle du faisceau d'électrons.

Ces deux types de moniteurs, associés à un système de télécommande et d'acquisition de données (système VME), seront implantés sur l'onduleur du projet CLIO.

## REFERENCES

- 1 - J.M. Ortega et al., Proceedings Xth FEL Conf. (Jérusalem 1988)
- 2 - Bosser et al., CERN-SPS 86/26 (MS)
- 3 - C. Fisher, LEP note 563, (1986)
- 4 - Cutler et al., IEEE Tr. Nucl. Sc. Vol. NS 30 n° 4, (1983)
- 5 - R. Jung, R.J. Colchester, Part. Acc. Conf. Vancouver (Canada), mai (1985)
- 6 - R. Fulton et al., Nuclear Instruments and Methods A274 (1989) 37-44
- 7 - L. Wartski, Thèse Univ. Paris-Sud (1976) (non publié)
- 8 - A.H. Lumpkin, Proceedings for AIAA, XIXth fluid dynamics, plasma dynamics and laser conference, Honolulu, Hawaii, (1987)
- 9 - X.K. Maruyama, R.B. Fiorito and D.W. Rule, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A272 (1988) 237
- 10 - J.M. Joly, Thèse CNAM, Paris (1984)
- 11 - W.H. Kohl, Materials and techniques for electron tubes. Reinhold Publishing Corp. New-York (1980)

*Manuscrit reçu le 27 juin 1989*

ISSN 0429 - 3460

*La diffusion des rapports et bibliographies du Commissariat à l'Energie Atomique est assurée par le Service de Documentation, CEN-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cédex, (France)*

*Reports and bibliographies of the Commissariat à l'Energie Atomique are available from the Service de Documentation, CEN-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cédex, (France)*

*Edité par*  
*le Service de Documentation*  
*Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay*  
*91191 GIF-sur-YVETTE Cédex (France)*