

DEVELOPPEMENTS LIES A LA CONSTRUCTION DES DEFLECTEURS
ELECTROSTATIQUES

M. Thivent

TABLE DES MATIERES

	<u>Pages</u>
Introduction	1
<u>A. ETUDE GENERALE</u>	
<u>1. LE VIDE COMME ISOLANT</u>	5
1.1 Tension disruptive	5
1.1.1 La tension disruptive est une fonction de la pression	5
1.2 Isolation sous vide	8
1.2.1 Courant continu permanent - émission de champ	8
1.2.2 Disruption consécutive à l'émission de champ	11
1.2.3 Disruption par microparticule	12
1.2.4 Temps de recouvrement	12
<u>2. PRINCIPE DU SEPTUM ELECTROSTATIQUE</u>	13
2.1 Déflexion d'une particule chargée traversant un champ électrique	13
2.2 Application en physique des hautes énergies	15
2.2.1 Système d'unités utilisé	15
2.2.2 Nouvelles équations	16
2.2.3 Calcul de β connaissant p et m_0	16
2.2.4 Application numérique	17
2.3 Utilisation du septum électrostatique	17
2.4 Intéraction du faisceau avec le septum	18
<u>3. MATERIAU CONSTITUANT LE SEPTUM</u>	20
3.1 Epaisseur et propriétés physiques	20
3.2 Septum constitué d'une feuille	22
3.2.1 Déformation sous l'action du champ électrique	22
3.2.2 Application numérique	23
3.3 Septum à fils	24
3.3.1 Champ électrique de fuite	26
3.3.1.1 Fils infiniment longs	26
3.3.1.2 Fils d'une hauteur h	27
3.3.1.3 Calcul du champ de fuite	28
3.3.2 Inconvénients résultant du champ de fuite et remède	30
3.3.3 Flèche des fils due au champ électrique	31
3.4 Solution mixte	32
3.4.1 Usinage de la feuille	34
3.4.2 Champ de fuite	34
3.4.3 Compensation du champ de fuite	35
3.4.4 Amélioration de l'efficacité et protection d'un septum constitué d'une feuille.	36

4. <u>ELECTRODES HAUTE TENSION</u>	40
4.1 Influence de l'anode	40
4.2 Influence de la cathode	40
4.2.1 Cathode métallique	41
4.2.2 Cathode oxydée	41
4.2.2.1 Oxydation sulfurique	41
4.2.2.2 Oxydation chromique	43
4.3 Conditionnement des électrodes	43
4.4 Déconditionnement	44

B. REALISATIONS

5. <u>SEPTA UTILISES DANS LE SYNCHROTRON A PROTONS DE 28 GeV</u>	45
5.1 Caractéristiques communes aux deux septa du PS	45
5.1.1 Electrode haute tension	46
5.1.2 Septum	47
5.1.3 Isolateurs et déflecteurs associés	48
5.1.4 Traversée haute tension et résistance d'amortissement	50
5.1.5 Ecrans minces pour stopper les ions secondaires	50
5.2 Septum utilisé pour l'éjection lente	53
5.2.1 Paramètres liés à l'éjection lente	53
5.2.2 Construction	53
5.2.3 Résultats haute tension obtenus	53
5.2.4 Limites permises pour l'opération	55
5.3 Septum utilisé pour le transfert continu	57
5.3.1 Paramètres relatifs au transfert continu	57
5.3.2 Construction	57
5.3.3 Résultats haute tension obtenus	57
6. <u>SEPTUM ELECTROSTATIQUE UTILISE DANS LE LEAR</u>	60
6.1 Introduction	60
6.2 Cahier des charges	60
6.2.1 Caractéristiques du LEAR	60
6.2.2 Spécifications du septum SEH 11	62
6.3 Contraintes	62
6.3.1 Double polarité	62
6.3.2 Vide très poussé	62
6.3.3 Encombrement	64
6.3.4 Système de contrôle	64

	<u>Pages</u>
6.4 Choix des électrodes	65
6.4.1 Essais en petites dimensions - choix du matériau	65
6.4.1.1 Procédure	67
6.4.1.2 Résultats	67
6.4.2 Effet des jonctions du septum	70
6.4.3 Effet des écrans	72
6.4.4 Géométrie retenue	73
6.5 Choix des isolateurs et déflecteurs associés	73
6.6 Traversée haute tension et résistance d'amortissement	76
6.7 Déplacement des électrodes	76
6.8 Réalisation	77
6.8.1 Choix des matériaux et mise en oeuvre	77
6.8.2 Joints utilisés et système de pompage	78
6.8.3 Présentation de l'ensemble	80
6.9 Performances obtenues	80
6.9.1 Résultats haute tension	80
6.9.2 Homogénéité du champ électrique	84
6.9.3 Pression résiduelle obtenue	84
6.9.4 Capacité équivalente du septum	90
6.10 Contrôle	91
6.10.1 Structure générale	91
6.10.2 Alimentations haute tension	91
6.10.3 Déplacements	95
Conclusion	99
Remerciements	101
Annexes	
1 Programme pour le calcul de la déflexion électrostatique	103
2 Découpe chimique d'une feuille de molybdène	105
3 Composition chimique des alliages	107
4 Principales caractéristiques des accélérateurs utilisés au CERN	109
5 Usinage et nettoyage des éléments exposés à l'ultra-vide	111
6 Carte du champ électrique - septum SEH 11	113
7 Etat de surface des électrodes.	117
Références	121

PRINCIPALES NOTATIONS UTILISEES

e	Charge de l'électron - épaisseur du septum
c	Vitesse de la lumière
T	Température en K
ϕ	Travail de sortie du métal
m	Masse de la particule
v	Vitesse de la particule
β	Vitesse de la particule exprimée en fonction de c ($v = \beta.c$)
p	Pression résiduelle - quantité de mouvement
d	Distance entre électrode
E_o	Champ électrique moyen ($E_o = U/d$)
η	Facteur d'accroissement du champ électrique
E	Champ électrique local ($E = \eta.E_o$)
E_f	Champ électrique de fuite
E_{cin}	Energie cinétique
L_1	Longueur active des électrodes
h	Hauteur du septum
b	Profondeur du support de septum
V_g	Potentiel de grille
a	Intervalle entre fils consécutifs
ϕ_f	Diamètre des fils
f	Flèche due au champ électrique
σ	Contrainte mécanique
ln	logarithme népérien
lg	logarithme décimal

Introduction

Un déflecteur électrostatique fonctionnant dans un accélérateur de particules utilise naturellement le vide comme diélectrique. Pour donner un ordre de grandeur des problèmes notons qu'il faut un champ électrique de 100 kV/cm pour défléchir de 1 mrad des protons dont l'énergie cinétique est égale à 9 GeV, en utilisant des électrodes de 1 m de longueur.

Pour obtenir des champs électriques aussi élevés il est nécessaire de connaître les processus conduisant à la disruption sous vide afin de mieux comprendre les paramètres liés aux électrodes.

Un déflecteur électrostatique peut être utilisé pour partager un faisceau de particules : dans ce cas on crée deux zones (figure 2.4).

- l'une sans champ électrique où les particules ne sont soumises à aucune force (faisceau circulant)
- l'autre avec un champ électrique où les particules sont déviées (faisceau éjecté).

L'électrode qui sépare ces deux régions est appelée "septum", elle est de faible épaisseur et elle est mise à la masse de l'enceinte à vide.

La partie du faisceau interceptée par le septum lors du partage subit des interactions dans la matière du septum; elle est généralement perdue à cause d'une trop grande perte d'énergie ou d'une diffusion trop importante. Il faut minimiser cette perte qui réduit l'efficacité de l'éjection et crée une émission de rayonnement dangereux pour les personnes et les matériaux qui constituent le déflecteur.

L'objectif fixé pour ce travail est d'étudier les divers aspects d'un déflecteur électrostatique utilisé comme septum en partant des connaissances de l'isolation sous vide afin d'aboutir à la réalisation d'appareils performants adaptés à une machine et soumis à des contraintes particulières.

L'exposé est divisé en deux parties.

a) Etude générale

L'isolation sous vide est située par rapport à l'isolation dans les gaz et nous décrivons les différents processus qui conduisent à la disruption (chap. 1).

Partant de la force exercée sur une masse ponctuelle chargée nous établissons les équations du mouvement des particules de haute énergie dans un déflecteur électrostatique; un système d'unités, mieux adapté à la physique des hautes énergies, est introduit. Le déflecteur, utilisé comme septum pour le partage d'un faisceau est ensuite présenté (chap. 2).

Le matériau constituant le septum est choisi en fonction de ses propriétés physiques.

Un septum réalisé avec une feuille mince permet d'obtenir une bonne planéité et il ne perturbe pas le faisceau circulant.

Si l'on utilise une rangée de fils à la place de la feuille on réduit l'interaction du faisceau avec le septum mais il existe un champ électrique côté faisceau circulant qu'il faut compenser.

Une solution intermédiaire est envisagée, elle permet de diminuer le champ électrique de fuite tout en conservant une bonne efficacité (chap. 3).

Connaissant le processus conduisant à la disruption nous déterminons les paramètres à considérer pour des électrodes métalliques. Une amélioration sensible des performances haute tension peut être réalisée en employant une cathode oxydée.

Le conditionnement haute tension préalable est une phase indispensable si l'on recherche des champs électriques élevés. (chap. 4)

b) Réalisations

- Nous présentons les solutions retenues pour la construction de deux septa électrostatiques installés et perfectionnés sur le synchrotron à protons de 28 GeV au cours d'une dizaine d'années (chap. 5).

Ces projets ont bénéficié d'une longue expérience acquise auparavant sur les séparateurs électrostatiques

Certaines difficultés ont dû être surmontées pour arriver aux performances actuelles.

- Le septum électrostatique présenté au chapitre 6 est un nouveau projet qui vient de se terminer. Il comprend :
 - La réalisation d'un septum électrostatique à performances élevées devant fonctionner dans les deux polarités et à une pression résiduelle inférieure à 10^{-9} Pa
 - Le choix des alimentations haute tension
 - Le contrôle lié à l'équipement installé.

Partant d'un cahier des charges sommaire nous présentons les contraintes particulières qui en découlent (paragraphe 6.3).

Nous montrons la démarche suivie pour choisir les électrodes: elle s'appuie sur les résultats haute tension obtenus en utilisant des électrodes de petites dimensions (paragraphe 6.4).

Un étuvage et des sublimateurs à titane sont nécessaires pour atteindre une pression aussi faible : ils obligent respectivement à sectionner la feuille du septum, et à masquer les isolateurs par des écrans (paragraphe 6.4.2. et 6.4.3).

La brasure des déflecteurs haute tension sur les isolateurs permet de réduire les surfaces exposées au vide (paragraphe 6.5). Une résistance d'amortissement diminue l'énergie dissipée sur les électrodes lors d'un claquage (paragraphe 6.6).

L'équipement réalisé est présenté au paragraphe 6.8 et les performances obtenues avec ce septum sont données dans le paragraphe 6.9.

Un programme, utilisant la méthode des différences finies, permet l'étude du champ Laplacien dans la zone interélectrodes.

Le contrôle des alimentations et des positions des électrodes est abordé au paragraphe 6.10. Nous donnons la structure générale et les organigrammes relatifs à ce contrôle.

PREMIERE PARTIE

ETUDE GENERALE

- Chapitre 1 Le vide comme isolant
- Chapitre 2 Principe du septum électrostatique
- Chapitre 3 Matériau constituant le septum
- Chapitre 4 Electrodes haute tension

1. LE VIDE COMME ISOLANT

Dans ce chapitre nous considérerons des électrodes planes entre lesquelles règne un champ électrique constant produit par une différence de potentiel continue.

- Un déflecteur électrostatique, fonctionnant dans un accélérateur, utilise naturellement le vide comme diélectrique.

Le vide absolu, du fait de l'absence de molécule, semble être le matériau idéal puisque de polarisation nulle, et de rigidité diélectrique infinies.

- En pratique nous avons des électrodes pour créer un champ électrique, et le vide n'est technologiquement qu'imparfait car il y a un dégazage naturel des surfaces matérielles et la vitesse de pompage est limitée.

1.1 Tension disruptive

Si l'on fait croître la différence de potentiel appliquée entre deux électrodes placées sous vide nous constatons l'apparition d'un phénomène brutal lorsqu'est atteinte une valeur critique de la tension.

Cette limite est appelée tension disruptive V_d et elle est exprimée en volts. Lors de la disruption, un courant dont l'intensité n'est fonction que de la source, passe entre les électrodes.

Le courant est accompagné d'un rayonnement visible et intense dû à la présence d'un gaz (dégazage des électrodes, vaporisation des matériaux) et l'on peut s'interroger si nous ne sommes pas ramenés à l'étude d'une isolation sous gaz.

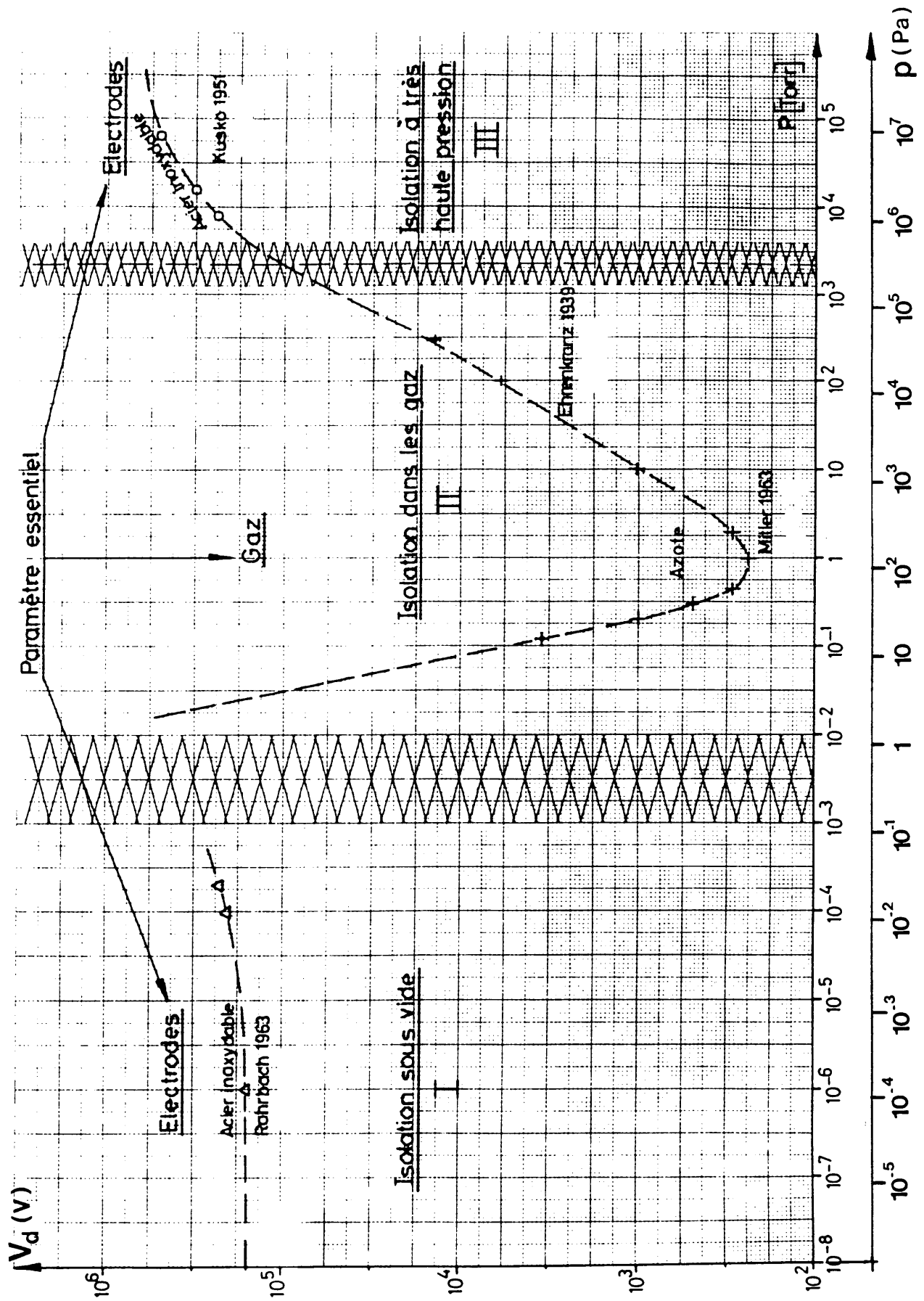
1.1.1 La tension disruptive est une fonction de la pression

La figure 1.1 indique la relation établie expérimentalement, entre la tension disruptive et la pression. Les électrodes utilisées sont en acier inoxydable, le champ électrique est constant et le gaz de l'azote. [1]*

Nous distinguons 3 régions:

région I Pour les pressions les plus faibles, nous constatons, sauf au voisinage de la zone de transition vers la région II,

* Références



134 Pa = 1Torr = 1mm Hg

Tension disruptive en fonction de la pression

Fig.1.1

l'indépendance de la tension disruptive par rapport à la pression.

Aux pressions considérées le libre parcours moyen λ_e d'un électron entre deux chocs est très grand vis à vis de la distance entre les électrodes et il faut beaucoup d'électrons quittant la cathode pour former une paire d'ions.

En considérant de l'air comme gaz résiduel nous avons :

$$\lambda_e = 4\sqrt{2} \cdot \lambda_{\text{air}} \quad \text{avec} \quad \lambda_{\text{air}} = \frac{67 \times 10^{-8}}{p} \quad [2]$$

pour une pression $p = 10^{-4}$ Pa nous obtenons $\lambda_e = 380$ m.

Pour des électrodes distantes de 1 cm il faut environ $3,8 \times 10^4$ électrons quittant la cathode pour former au plus une paire d'ions (tous les chocs ne sont pas ionisants).

C'est cette région appelée "le vide" qui est utilisée comme diélectrique pour les septa électrostatiques et nous en approfondirons l'étude au paragraphe 1.2.

région II

A température constante et pour un champ électrique homogène, la tension disruptive n'est fonction que du produit $p \cdot d$ (pression x distance entre électrodes).

La conduction électrique dans le gaz est liée au déplacement de ions positifs et d'électrons sous l'effet du champ électrique.

Lorsqu'un phénomène d'émission secondaire entraînant un phénomène d'avalanche apparaît, le courant augmente fortement.

La tension disruptive est donnée par la loi de Paschen $V_d = f(p \cdot d)$ qui peut être traduite par la relation [3]:

Eq. 1.1

$$V_d = \frac{C_1 \frac{p \cdot d}{T}}{\ln \left(C_2 \frac{p \cdot d}{T} \right) - C}$$

V_d tension disruptive en V

p pression Pa

d distance m

T température K

C, C_1, C_2 sont des constantes du gaz considéré.

région III

Aux pressions élevées, la loi de Paschen ne reste plus valable.

Pour une valeur constante du produit $p \cdot d$, la tension disruptive décroît lorsque la pression augmente.

Etant donné les valeurs élevées atteintes par le champ électrique à la surface des électrodes l'émission de champ apparaît comme un phénomène prépondérant.

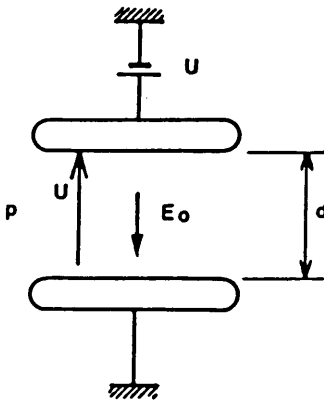
C'est l'isolation dans les gaz à hautes pressions.

1.2 Isolation sous vide

d = distance entre électrodes en m

$E_0 = U/d$ = champ électrique moyen V/m

p = pression du gaz résiduel Pa



Entre deux électrodes planes placées sous vide faisons croître la différence de potentiel, nous observons trois phases :

- un courant continu croissant avec la tension
- l'amorçage de l'étincelle et l'arc
- le retour aux propriétés isolantes après disruption

1.2.1 Courant continu permanent - émission de champ

Si l'on utilise deux électrodes métalliques, le premier phénomène décelable est l'apparition d'un courant continu dont l'intensité varie avec la différence de potentiel appliquée entre les électrodes.

Ce courant est accompagné, lors d'une première mise sous tension des électrodes, d'une remontée de la pression dans l'enceinte à vide.

Le courant est dû à l'émission d'électrons par des pointes microscopiques (hauteur de quelques μm) et qui créent un champ électrique E , η fois supérieur au champ électrique moyen E_0 ($E = \eta \cdot E_0$)

avec $10 < \eta < 100$

Pour des températures faibles (jusque vers 600 K) la formule de Fowler Nordheim décrit bien le phénomène.

$$\text{Eq. 1.2} \quad j = B_1 \frac{E^2}{\phi \cdot t^2(y)} \exp \left[- B_2 \cdot v(y) \cdot \frac{\phi^{3/2}}{E} \right]$$

- j densité de courant en A.m⁻²
- E champ électrique sur la pointe en V.m⁻¹ avec E = η.(U/d)
- φ travail de sortie du métal en eV
- B₁ = 1,54 x 10⁻⁶ en A.eV.V⁻²
- B₂ = 6,83 x 10⁹ en V.m⁻¹.(eV)^{-3/2}

v(y), t(y) sont deux fonctions sans dimensions de la variable y et elles sont données dans le tableau 1.2 [4] avec $y = 3,79 \cdot 10^{-5} \frac{\sqrt{E}}{\phi}$

Tableau 1.2

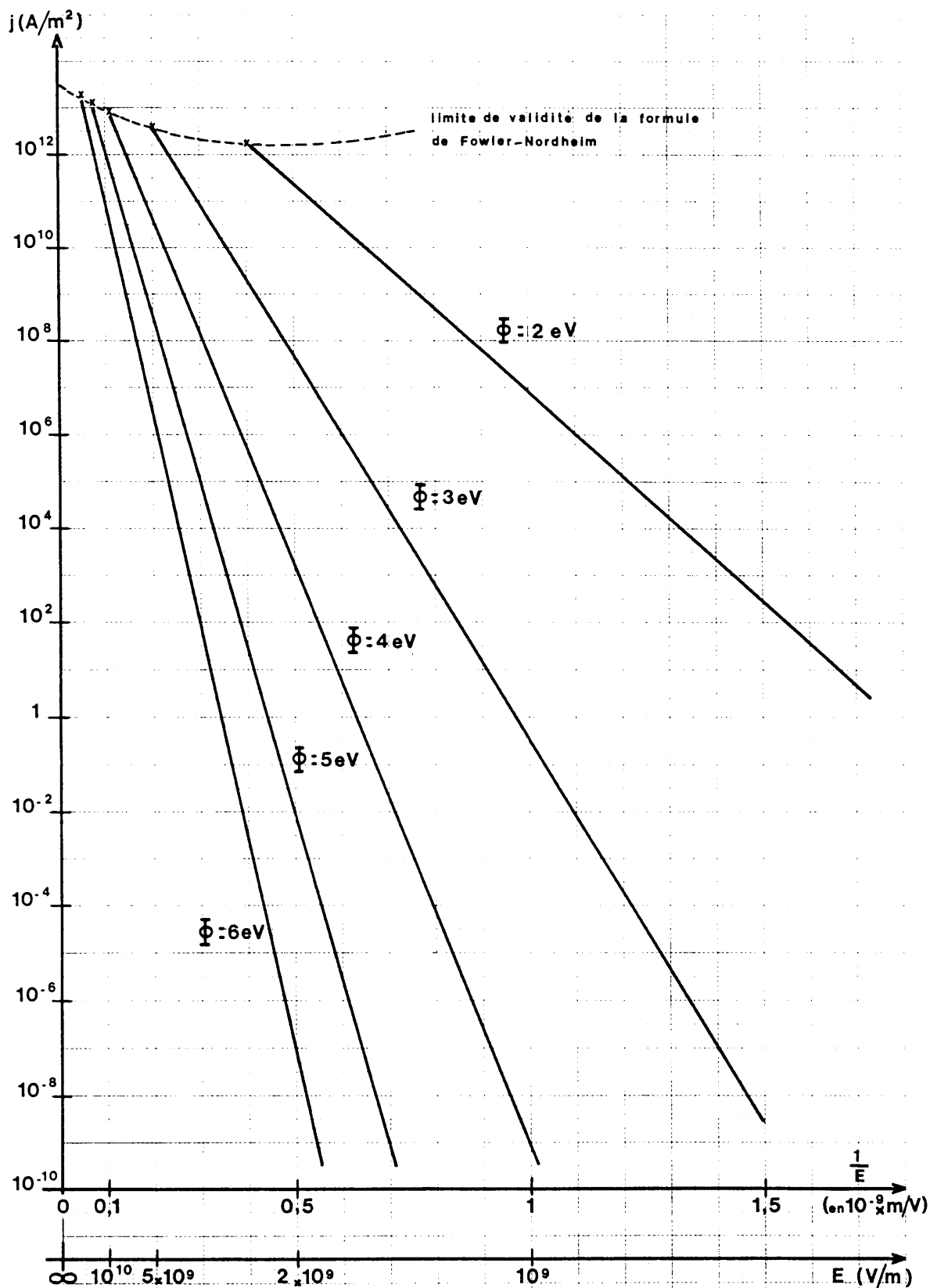
y	v (y)	t (y)	y	v (y)	t (y)
0	1,000	1,000	0,75	0,383	1,076
0,05	0,995	1,001	0,80	0,312	1,083
0,10	0,982	1,004	0,85	0,238	1,090
0,15	0,962	1,007	0,90	0,162	1,097
0,20	0,937	1,011	0,95	0,082	1,104
0,25	0,907	1,016	1	0,000	1,110
0,30	0,872	1,021	1,1	- 0,172	1,125
0,35	0,832	1,026	1,2	- 0,353	1,139
0,40	0,789	1,032	1,3	- 0,545	1,153
0,45	0,741	1,038	1,4	- 0,745	1,167
0,50	0,690	1,044	1,5	- 0,954	1,180
0,55	0,635	1,050	2	- 2,122	1,249
0,60	0,577	1,057	3	- 4,991	1,380
0,65	0,515	1,063	4	- 8,458	1,501
0,70	0,450	1,070	5	-12,438	1,615

La figure 1.3 nous donne j en fonction de E obtenu par la formule Fowler Nordheim pour différentes valeurs du travail de sortie φ.

Lors d'un essai haute tension nous mesurons le courant i et la tension U pour une distance entre électrode d nous avons donc :

i = s.j s étant la surface émissive de la pointe et exprimée en m²

et E₀ = $\frac{U}{d}$ avec η = E/E₀ s et η n'étant pas connus au départ



[1]

Emission de champ

Fig.1.3

l'équation 1.2 précédente peut s'écrire :

$$\ln (i/E_0^2) + \ln (\phi \cdot t^2(y)/s \cdot B_1 \cdot n^2) = (1/\eta \cdot E_0) \cdot (-B_2 \cdot v(y) \cdot \phi^{3/2})$$

il est intéressant d'établir la courbe suivante :

$$\lg (i/E_0^2) = f(1/E_0)$$

qui dans le cas d'une émission de champ est une droite si l'on suppose les fonctions $t(y)$ et $v(y)$ constantes.

1.2.2 Disruption consécutive à l'émission de champ - distances faibles

L'émission électronique partant d'une pointe cathodique a pour conséquences :

- échauffement de la pointe émissive sur la cathode
- échauffement de la zone anodique bombardée.

Si le courant d'émission dépasse un seuil critique la température de la pointe émissive ou de la zone anodique bombardée peut conduire à une vaporisation d'où une étincelle peut prendre naissance.

Lors d'un claquage cathodique consécutif à l'émission de champ la tension disruptive est proportionnelle à la distance entre électrodes
 $V_d = k \cdot d$
k étant une constante.

a) Claquage cathodique

Il est consécutif à l'échauffement de la pointe émissive et il est dû à :

- effet joule
Proportionnel à $\rho \cdot j^2$ où ρ est la résistivité du métal constituant la pointe et j la densité de courant dans la pointe.
- effet Nottingham
Proportionnel à la densité de courant dans la pointe il peut provoquer un échauffement ou un refroidissement selon la température de la surface émissive.

b) Claquage anodique

Si le bombardement électronique de l'anode dépasse un seuil critique il y a augmentation de sa température qui conduit à une vaporisation de sa surface d'où prend naissance une décharge électrique.

1.2.3 Disruption par microparticules (distances de l'ordre du cm)

Dès que la distance d entre les électrodes atteint ou dépasse le centimètre on constate :

- le courant continu prédisruptif diminue si d augmente;
- le champ disruptif n'est plus constant mais :

Eq. 1.3
$$V_d = K \cdot d^\alpha$$
 α étant un coefficient < 1 [5]
K une constante

Cranberg [7] puis Slivkov [8] proposent d'attribuer l'amorçage de l'étincelle à l'impact sur l'une des électrodes d'un fragment de matière chargé (microparticule).

Cette microparticule chargée est détachée de l'autre électrode puis accélérée par le champ électrique régnant entre les électrodes et elle peut amorcer une étincelle si sa vitesse et son énergie, au moment de l'impact, dépassent des valeurs critiques qui dépendent du matériau.

L'étincelle ne peut s'amorcer que si une bulle de gaz se forme au moment de la collision et Rohrbach [6] a donné comme fourchette probable :

$$600 \text{ m/s} < \text{vitesse critique} < 4 \text{ km/s}$$
$$10^{-9} \text{ J} < \text{énergie critique} < 10^{-6} \text{ J.}$$

1.2.4 Temps de recouvrement

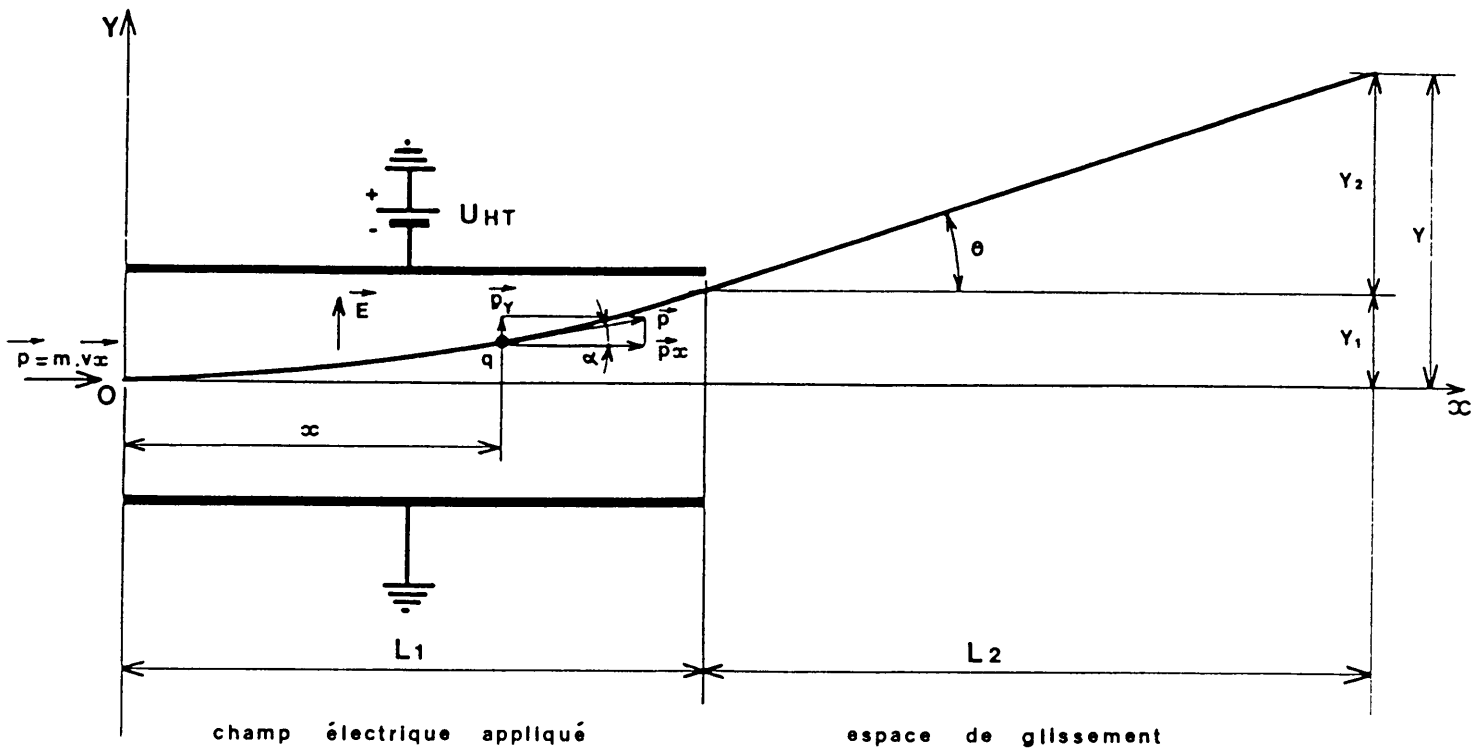
C'est le temps nécessaire pour que l'espace entre les électrodes retrouve la même rigidité diélectrique après une disruption caractérisée par un arc.

Pour des distances entre électrodes voisines du centimètre ce temps est de l'ordre de la microseconde dans le vide (1000 à 10000 fois plus faible que dans la plupart des gaz). [6]

2. PRINCIPE DU SEPTUM ELECTROSTATIQUE

2.1 Déflexion d'une particule chargée traversant un champ électrique (figure 2.1)

Soit une particule de charge q , de masse m et de vitesse v_x entrant dans une région où règne un champ électrique uniforme E . Considérons ce champ électrique appliqué entre deux électrodes planes et tel que v_x soit perpendiculaire à E à l'entrée.



Déflexion par le champ électrique

Fig. 2.1

Prenons les notations suivantes en employant le système d'unités SI

- | | | |
|-------|---|-----------|
| E : | champ électrique | en V/m |
| p : | quantité de mouvement de la particule | en kg.m/s |
| m : | masse de la particule | en kg |
| v : | vitesse de la particule | en m/s |
| d : | angle de déflexion de la particule | en rad |
| e : | charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ C | |

Si p est la quantité de mouvement initiale de la particule de charge q , celle-ci placée dans un champ électrique E subira une force F telle que :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

cette force F donne une quantité de mouvement transverse p_y à la particule :

$$F = \frac{dp_y}{dt} \quad \text{soit} \quad p_y = \int F \cdot dt$$

Le champ électrique est uniforme nous avons :

$$p_y = \int F \cdot dt = F \cdot \int \frac{dx}{v_x} = \frac{q \cdot E \cdot x}{v_x}$$

La déflexion étant faible ($p_y \ll p_x$) nous considèrerons que la masse m ne varie pas durant la trajectoire (effet relativiste) et nous avons :

$$p \approx p_x \quad \text{et} \quad v \approx v_x$$

La particule subit une déflexion angulaire α telle que :

$$\text{tg} \alpha = \frac{p_y}{p_x} \approx \frac{p_y}{p} = \frac{q \cdot E \cdot x}{p \cdot v}$$

et un déplacement

$$y = \int \frac{dy}{dx} dx = \frac{q \cdot E}{p \cdot v} \cdot \frac{x^2}{2}$$

après l'espace de glissement nous aurons :

Eq. 2.1	$\theta \approx \text{tg} \theta = \frac{q \cdot E \cdot L_1}{p \cdot v}$ $Y = Y_1 + Y_2 = \frac{q \cdot E}{p \cdot v} \left[\frac{L_1^2}{2} + L_1 \cdot L_2 \right]$	θ en rad
		q C
		E $V \cdot m^{-1}$
		p $kg \cdot m \cdot s^{-1}$
		v $m \cdot s^{-1}$
		L_1 et L_2 en m

2.2 Application en physique des hautes énergies

2.2.1 Système d'unité utilisé

- L'énergie de la particule est acquise par une différence de potentiel $W = q.U$ et sa charge exprimée en fonction de celle de l'électron $q = k.e$ avec $e = 1,602.10^{-19}$ C

l'énergie sera exprimée en eV.

- Aux vitesses élevées nous exprimons la vitesse en fonction de celle de la lumière $v = \beta.c$ avec $c = 3.10^8$ m.s⁻¹

la vitesse est exprimée en c

- La masse de la particule en mouvement m est donnée en fonction de sa masse au repos m_0 avec :

$$m = \gamma.m_0 \quad \text{pour } \gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$$

De $E_{\text{cin}} = (\gamma - 1).m_0.c^2$ et puisque E_{cin} est en eV
 m et m_0 sont données en eV.c⁻²

Par commodité nous adopterons des multiples de ces unités ainsi définies et le tableau 2.2 nous donne la correspondance entre le système international d'unités SI et ce système d'unités utilisé en physique des hautes énergies.

Tableau 2.2

	Unités système MKSA	Unités hors système utilisées en physique	Correspondance
Energie : W	J	GeV	1 eV = $1,602 \cdot 10^{-19}$ J 1 GeV = $1,602 \cdot 10^{-10}$ J 1 J = $6,242 \cdot 10^9$ GeV
Vitesse : v	m.s ⁻¹	c	$c = 3 \cdot 10^8$ m.s ⁻¹ $1 \text{ m.s}^{-1} = 3,33 \cdot 10^{-9} c$
Quantité de mouvement : p	m.kg.s ⁻¹	GeV/c	1 GeV/c = $5,34 \cdot 10^{-19}$ m.kg.s ⁻¹ $1 \text{ m.kg.s}^{-1} = 1,87 \cdot 10^{18} \text{ GeV.c}^{-1}$
Masse : m	kg	GeV/c ²	1 GeV.c ⁻² = $1,78 \cdot 10^{-27}$ kg 1 kg = $5,62 \cdot 10^{26} \text{ GeV.c}^{-2}$
Charge : q	C	e	1 e = $1,602 \cdot 10^{-19}$ C 1 C = $6,242 \cdot 10^{18} e$

Dans ce système la masse de l'électron au repos vaut : $m_{e_0} = 5,12 \cdot 10^{-4} \text{ GeV} \cdot c^{-2}$

et celle du proton : $m_{p_0} = 0,94 \text{ GeV} \cdot c^{-2}$

2.2.2 Nouvelles équations

En utilisant ce nouveau système d'unités et si nous exprimons :

E en $\text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$

L_1, L_2 en m

les équations 2.1 deviennent :

Eq. 2.2	$\theta \approx \text{tg } \theta = - \frac{k \cdot E \cdot L_1}{p \cdot \beta}$ $Y = - \frac{k \cdot E}{p \cdot \beta} \left(\frac{L_1^2}{2} + L_1 L_2 \right)$	<p>θ en mrad Y en mm L_1, L_2 en m p en GeV/c E en MV/m $k = q/e$ en e $\beta = v/c$ en c</p>
---------	---	--

2.2.3 Calcul de β connaissant p et m_0

Nous connaissons l'énergie cinétique ou la quantité de mouvement des particules et leur masse au repos.

nous avons les relations :

Eq. 2.3	$E_{\text{cin}} = (\gamma - 1) \cdot m_0 \cdot c^2$ $m = \gamma \cdot m_0$ $p = mv = \beta \cdot \gamma \cdot m_0 \cdot c$	<p>avec $v = \beta \cdot c$ $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$</p>
---------	--	--

connaissant p et m_0 nous avons $\beta \cdot \gamma = \frac{p}{m_0 \cdot c}$ et finalement :

Eq. 2.4	$\beta = \left[\left(\frac{p}{m_0 \cdot c} \right)^{-2} + 1 \right]^{-\frac{1}{2}}$
---------	---

2.2.4 Application numérique

Un programme pour ordinateur de table (HP 85) permet de faire ces différents calculs (annexe 1).

Tableau 2.3

Type de particules	p GeV.c ⁻¹	$\beta \cdot \gamma$	β	E MV.m ⁻¹	L ₁ m	L ₂ m	θ mrad	Y mm
Protons	10	10,64	0,996	6,5	1,85	0	1,2	1,12
Protons	26	27,66	0,999	8,8	0,78	0	0,26	0,1
Antiprotons	2	2,128	0,905	8	0,72	0	-3,18	-1,15
Antiprotons	0,2	0,213	0,208	0,25	0,72	0	-4,32	-1,56

Nota : Pour des protons ou des antiprotons avec une quantité de mouvement supérieure à quelques GeV.c⁻¹ l'erreur commise en prenant $\beta = 1$ est faible. (2% si p = 5 GeV.c⁻¹, 4,6% si p = 3 GeV.c⁻¹ mais 27% si p = 1 GeV.c⁻¹)

2.3 Utilisation du septum électrostatique

Dans un synchrotron à protons il est nécessaire d'éjecter le faisceau accéléré pour le répartir entre les différents utilisateurs extérieurs à la machine.

Dans l'accélérateur le faisceau est composé d'une suite de paquets de protons répartis sur la circonférence de la machine et l'éjection peut se faire selon deux modes :

- a) par paquets entiers dans le cas d'une éjection rapide;
- b) par fractionnement de chacun des paquets :
 - en quelques tours dans le cas d'une éjection multitours
 - d'une façon continue et pendant un temps de l'ordre de la seconde dans le cas d'une éjection lente.

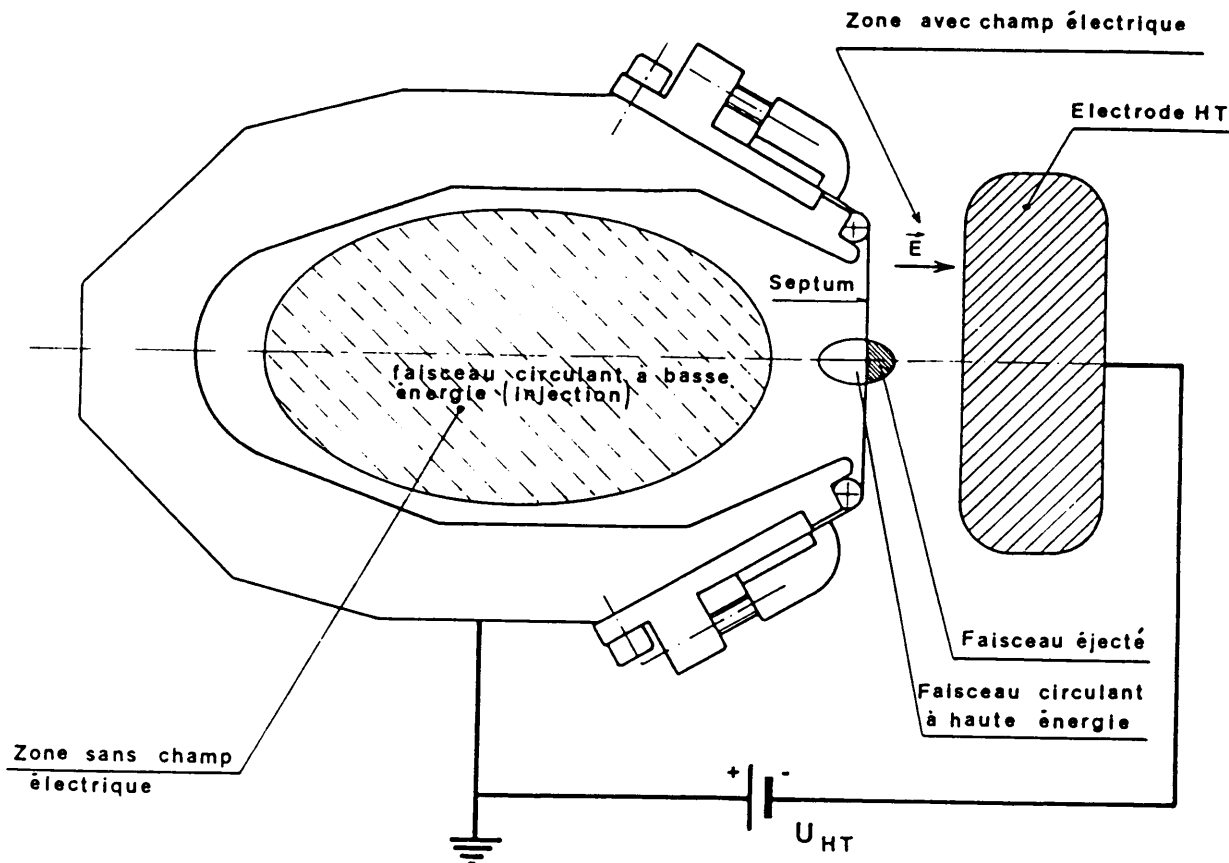
Pour le second mode nous utilisons un septum électrostatique :

Lors de son injection à basse énergie le faisceau remplit en grande partie la chambre à vide puis ses dimensions transversales se réduisent considérablement pendant l'accélération par amortissement adiabatique des oscillations.

Lors de l'éjection à haute énergie le faisceau de protons sera déplacé plus ou moins rapidement sur un élément mince appelé septum. (figure 2.4.)

Le septum délimite deux zones :

- à gauche une zone sans champ électrique où le faisceau n'est soumis à aucune force (faisceau circulant).
- à droite une zone où le champ électrique exerce une force transversale sur les particules et une déflexion calculée par les équations 2.4.

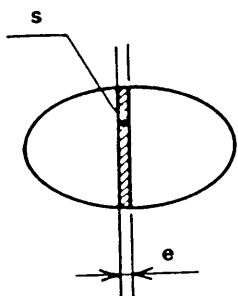


Principe du septum électrostatique

Fig.2.4

2.4 Interaction du faisceau avec le septum

Une partie du faisceau à haute énergie est interceptée lors de l'éjection par le septum d'épaisseur e .



Ces particules occupant la surface s subissent des interactions dans la matière du septum et en général seront perdues pour le faisceau à cause d'une trop grande perte d'énergie ou d'une déflexion trop importante.

Cependant sous certaines conditions une fraction restera dans la partie utile du faisceau.

Ces interactions du faisceau avec le septum ont deux inconvénients :

- elles diminuent l'efficacité : $\frac{\text{particules éjectées}}{\text{particules accélérées}}$
- le rayonnement émis endommage les matériaux et nécessite une protection des personnes.

Nous devons donc réduire la surface s en utilisant un septum d'une épaisseur e aussi faible que possible.

3. MATERIAU CONSTITUANT LE SEPTUM

3.1 Epaisseur et propriétés physiques

Pour les raisons mentionnées au paragraphe 2.3 nous devons avoir un champ nul ou très faible du côté faisceau circulant.

L'épaisseur du septum devra être aussi faible que possible pour avoir une interaction minimale du faisceau avec le septum.

Le choix du matériau constituant le septum se fera en fonction de ses propriétés physiques :

- module d'élasticité et résistance à la traction

Une tension suffisante est nécessaire pour obtenir une bonne planéité dont dépend l'épaisseur réellement vue par le faisceau de protons lors de l'éjection.

- température de fusion

L'interaction du faisceau avec le septum libère de l'énergie qui chauffe le septum.

Les décharges électriques (ou un courant localisé) entre les électrodes font croître également sa température.

L'élasticité du matériau devra être conservée pour des températures élevées pour éviter des déformations permanentes et à plus forte raison sa fusion.

- conductivité thermique

Sous vide le refroidissement n'est possible que par rayonnement ou conduction thermique.

Une bonne conductivité thermique réduira les échauffements localisés qui sont à l'origine des ondulations ou cloques sur le septum.

- constante d'extraction - résistivité

Pour des faibles distances entre électrodes et si le septum est de polarité négative par rapport à l'électrode haute tension :

- le courant dû à l'émission de champ varie en fonction du travail de sortie du matériau placé en cathode (équation 1.2).
- la résistivité électrique du matériau influe sur le rapport entre la température au sommet d'une pointe émissive et celle à sa base.

	Masse volumique kgm^{-3}	Module d'élasticité $\text{Pa} \times 10^7$	Contrainte de rupture (laminé) $\text{Pa} \times 10^6$	Coeff ^t de dilatation linéaire $\times 10^{-6}$	Résistivité $\Omega\text{cm} \times 10^{-8}$	Température de fusion $^{\circ}\text{C}$	Conductivité thermique $\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$	Chaleur massique $\text{Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}$	Constante d'extraction eV
Fer	7860	20 400	290	11,7-12,3	9,3-9,7	1527 1539	60-70	420 450	4,7
Acier Inox. 18/10	7900	19 600	600	17,3	70	1425	14,5	481	
Cuivre	8920 8930	4 600	250	16,2-16,7	1,69	1084	380	360-390	4,1
Beryllium	1850	30 000	450-550	12-14	≈ 4	1283	160-200	1800	
Aluminium	2700	7 000	160-210	23,8	2,66	659	200-230	840 900	3
Tungstène	19300	40 000	1500-4000	4,4	5,5	3390	160	157	4,52
Molybdène	10200	32 500	1000-2000	5,4	5,7	2610	130	271	4,3
Tantale	16600	19 000	300-1000	6,6	13,6	2997	53-75	135	4,1
Titane	4507	11 000	400	8,4-8,5	42	1670 1690	18	580	4
Titane Allié UTA 6V	4470	11 500	1000	10,3	172		7,7	670	

METAUX , PRINCIPALES CARACTERISTIQUES

tableau 3.1

- dilatation linéaire - dégazage

Pour certaines machines il est nécessaire d'obtenir un vide très poussé pour augmenter la durée de vie des particules, comme c'est le cas dans un accumulateur.

L'obtention de ces pressions inférieures à 10^{-8} Pa ($\approx 10^{-10}$ Torr) n'est possible qu'aux conditions suivantes :

- utilisation de matériaux à faible taux de dégazage
- étuvage aux alentours de 300°C de tous les éléments constituant la machine.

Le tableau 3.1 regroupe ces principaux paramètres pour quelques matériaux.

3.2 Septum constitué d'une feuille

Pour satisfaire aux exigences formulées précédemment la solution naturelle est l'utilisation d'une feuille mince.

Le matériau sera choisi en fonction de ses propriétés physiques énoncées au paragraphe 3.1.

3.2.1 Déformation sous l'action du champ électrique

La pression électrostatique est égale à :

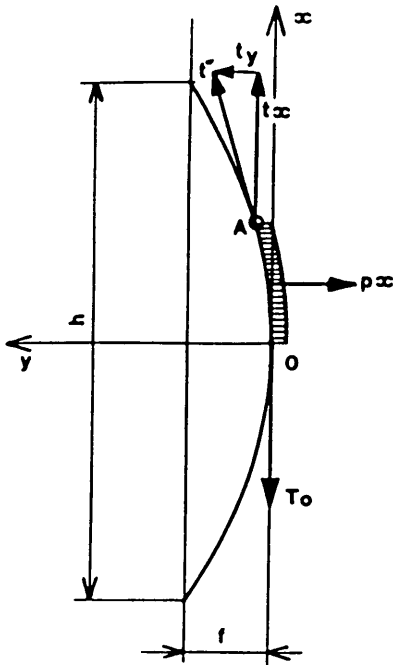
$$p = \frac{\Delta^2}{2\epsilon_0} \quad \begin{array}{l} p \quad \text{en Pa} \\ \Delta \quad \text{densité superficielle de charge en C.m}^{-2} \\ \epsilon_0 = 8,85.10^{-12} \text{ F.m}^{-1} \end{array}$$

Le champ moyen à la surface du septum est $E_0 = \frac{U}{d} = \frac{\Delta}{\epsilon_0}$ dans le cas d'un condensateur plan soit :

$$\text{Eq. 3.1} \quad \left| \quad p = \frac{\epsilon_0 \cdot E_0^2}{2} \right.$$

Considérons une section droite du septum (figure 3.2). La feuille étant de faible épaisseur (rigidité ≈ 0) nous pouvons écrire pour le segment OA et dans l'approximation des petites déformations qui nous intéressent :

$$\begin{array}{c} \longrightarrow \quad \longrightarrow \quad \longrightarrow \\ T_0 + p \cdot x + t = 0 \end{array}$$



T_0 : tension initiale par mètre en $N.m^{-1}$

p : pression électrostatique en Pa

x : hauteur du septum considérée depuis son centre en m.

t : tension résultante par mètre en $N.m^{-1}$

Au point A nous avons avec les axes orientés choisis :

Fig.3.2

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_A = \frac{t_y}{t_x} = \frac{p \cdot x}{T_0}$$

en intégrant nous obtenons le profil du septum :

$$y = \frac{p}{T_0} \cdot \frac{x^2}{2}$$

en remplaçant p par sa valeur trouvée par l'équation 3.2 nous obtenons

Eq. 3.2

$$y = \frac{\epsilon_0}{4 \cdot T_0} \cdot E_0^2 \cdot x^2$$

La flèche du septum est donnée pour $x = h/2$ soit :

Eq. 3.3

$$f = \frac{\epsilon_0}{16 \cdot T_0} \cdot E_0^2 \cdot h^2$$

f : flèche en m

$E_0 = U/d =$ champ électrique moyen $V.m^{-1}$

h : hauteur du septum m

ϵ_0 : $8,85 \cdot 10^{-12}$ $F.m^{-1}$

T_0 : tension par mètre de longueur $N.m^{-1}$

3.2.2 Application numérique

Calculons la flèche obtenue en utilisant différents matériaux de faible épaisseur et pour une contrainte admissible dans la feuille

nous prendrons $\sigma = \sigma_r / 5$ d'ou $T_o = \frac{\sigma_r \cdot e}{5}$

T_o = tension initiale de la feuille par mètre de longueur en N/m

σ = contrainte admissible en Pa

σ_r = contrainte de rupture en Pa donnée dans le tableau 3.1

e = épaisseur de la feuille en m

Tableau 3.3

Matériau	Epaisseur : e m	σ_r Pa	T_o N.m ⁻¹	E_o V.m ⁻¹	h m	f m x 10 ⁻⁶
Molybdène	10 ⁻⁴	10 ⁹	2.10 ⁴	10 ⁷	7.10 ⁻²	13,5
-	-	-	-	2.10 ⁷	-	54
-	5.10 ⁻⁵	-	10 ⁴	10 ⁷	-	27
-	-	-	-	2.10 ⁷	-	108
Tungstène	10 ⁻⁴	2.10 ⁹	4.10 ⁴	-	-	27
-	5.10 ⁻⁵	-	2.10 ⁴	-	-	54
-	-	-	-	-	2.10 ⁻¹	442
Cuivre	5.10 ⁻⁵	2,5.10 ⁸	2,5.10 ³	-	7.10 ⁻²	432

Pour un septum d'une hauteur $h = 7$ cm et avec les champs électriques considérés ($E = 100$ à 200 kV/cm) il apparaît que:

- la flèche d'une feuille en molybdène ou tungstène d'une épaisseur de 50 à 100 μ m est inférieure à 0,1 mm.
- si l'on utilise un matériau plus mou ou si l'on donne une hauteur h au septum trop grande ($h > 10$ cm) la flèche est considérablement augmentée.

3.3 Septum à fils

Compte tenu de la limitation pour l'épaisseur de la feuille et pour réduire davantage l'interaction du faisceau avec le septum Maschke [9] proposa l'utilisation d'une rangée de fils.

Un tel réseau de fils ne constitue plus un écran électrostatique parfait et il existe un champ électrique de fuite E_f dans la zone occupée par le faisceau circulant (fig. 2.4 et fig. 3.4).

Septum
à fils

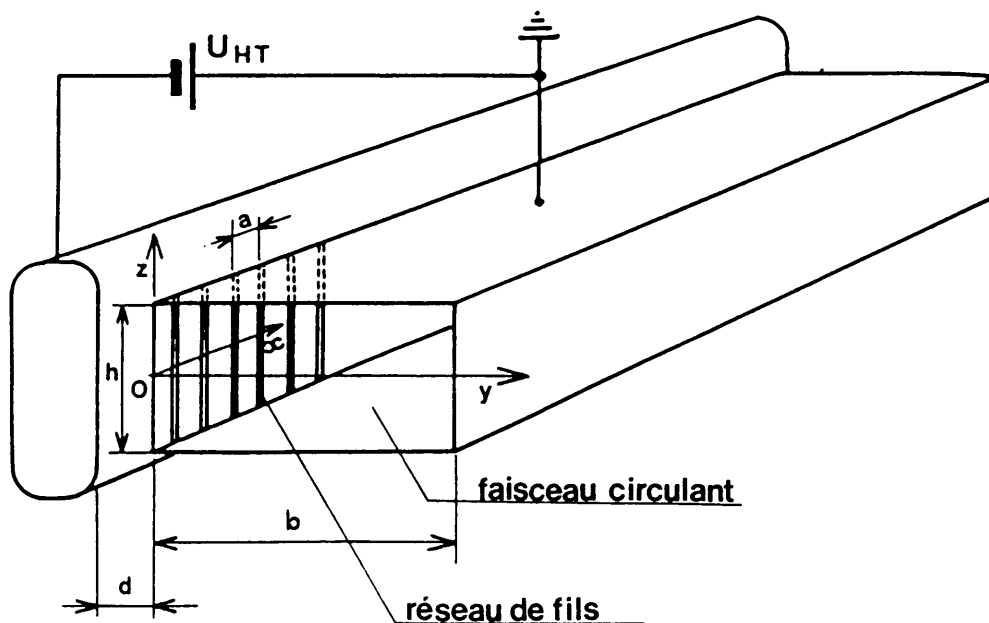


Fig.3.4

espace interélectrodes intérieur du support de septum

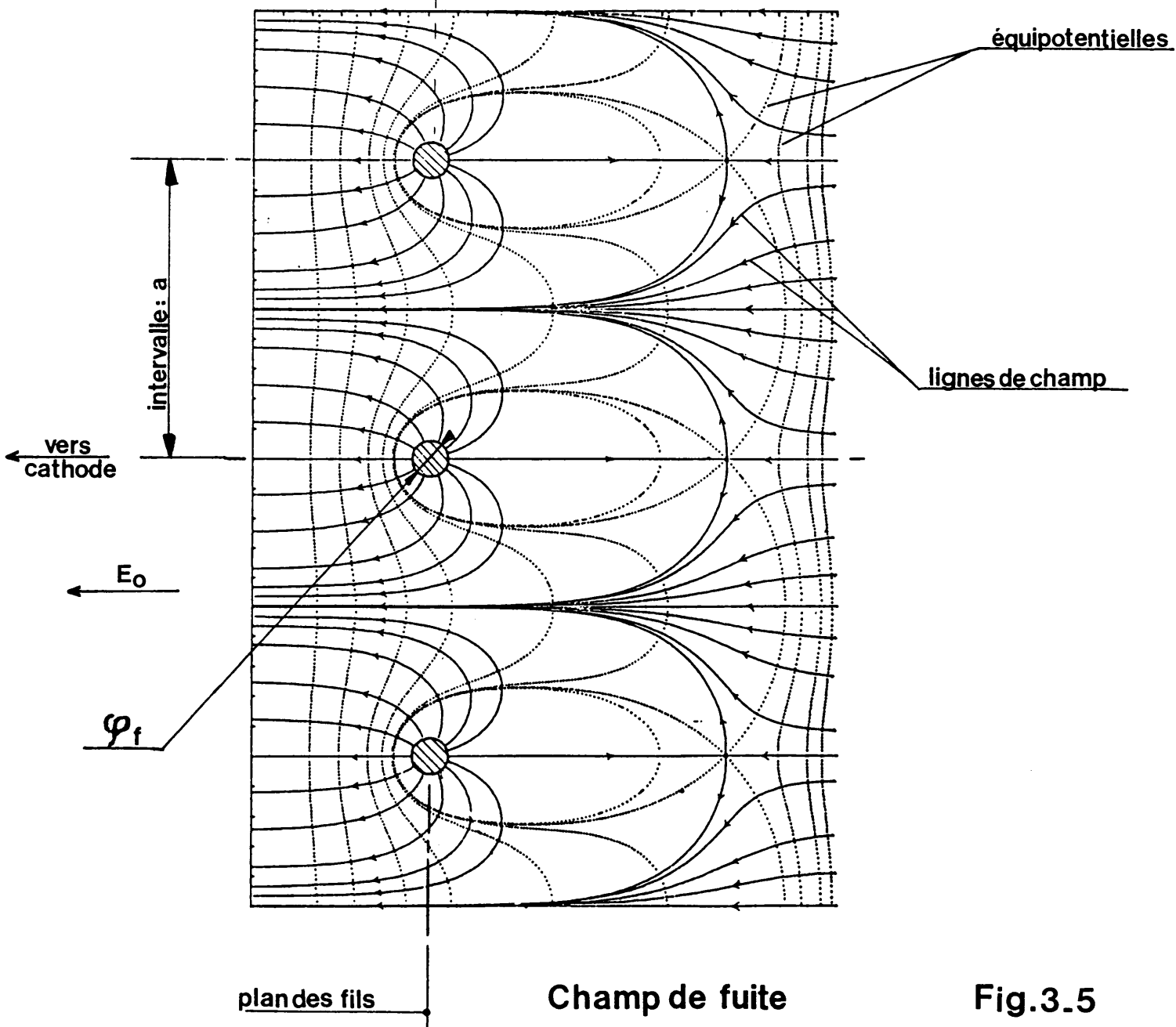


Fig.3.5

3.3.1 Champ électrique de fuite

3.3.1.1 Dans l'hypothèse de fils infiniment longs ($h \gg d$)

Les équipotentiellles et lignes de champ dans le plan horizontal (Ox, Oy) figure 3.4 sont représentées sur la figure 3.5

- A une distance au plan des fils supérieure à deux fois l'intervalle entre deux fils consécutifs les équipotentiellles sont planes et parallèles au plan (Oz, Ox)

Le champ électrique est le même que si le plan des fils était remplacé par un conducteur plan et continu porté à un "potentiel de grille V_g " tel que: [10]

Eq. 3.4

$$V_g = - \frac{E_o \cdot a \cdot \alpha}{2\pi} \cdot \ln \left[2 \sin \frac{\pi \varphi_f}{2a} \right]$$

$$\alpha = \left[1 - \frac{a}{2\pi d} \left(\frac{d}{b} + 1 \right) \cdot \ln \left(2 \cdot \sin \frac{\pi \varphi_f}{2a} \right) \right]^{-1}$$

φ_f = diamètre des fils
 a = intervalle entre fils consécutifs
 b = profondeur du support de septum
 d = distance entre électrodes

Dans le septum à fils $\varphi_f \ll a$, nous pouvons donc simplifier l'expression de V_g .

Nous avons :

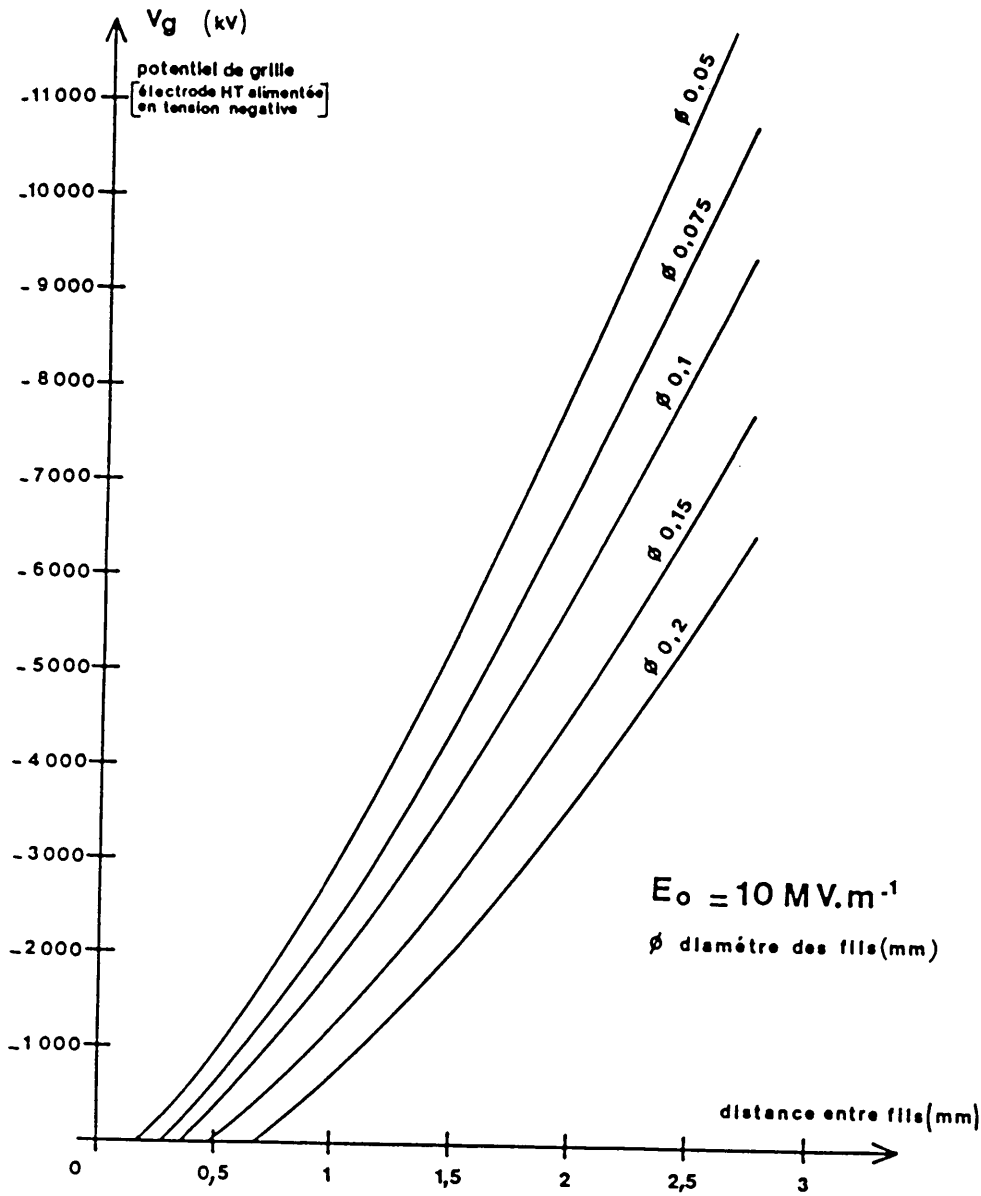
Eq. 3.5

$$V_g \approx - \frac{E_o \cdot a}{2\pi} \cdot \ln \frac{\pi \cdot \varphi_f}{a}$$

V_g : potentiel de grille en V
 $E_o = \frac{U}{d}$: champ électrique moyen $V \cdot m^{-1}$
 φ_f : diamètre des fils m
 a : distance entre fils consécutifs m

Si l'on prend $a = 2$ mm $d = 10$ mm $b = 140$ mm et $\varphi_f = 0,15$ mm nous obtenons α voisin de 1

La figure 3.6, par application numérique de la formule 3.5, nous donne $V_g = f(a, \varphi_f)$ pour un champ électrique standard de $10 \text{ MV} \cdot m^{-1} = 100 \text{ kV/cm}$.



Potentiel de grille

Fig. 3.6

Exemple: Pour un champ électrique nécessaire à la déflexion $E_0 = 150 \text{ kV/cm}$ si l'on utilise des fils d'un diamètre $\phi_f = 0,1 \text{ mm}$ espacés de $a = 2 \text{ mm}$, nous obtenons $V_g = -1,5 \times 5900 = -8850 \text{ V}$

3.3.1.2 Fils d'une hauteur $h =$ hauteur du septum

C'est un problème à trois dimensions qui peut se résoudre par une méthode numérique.

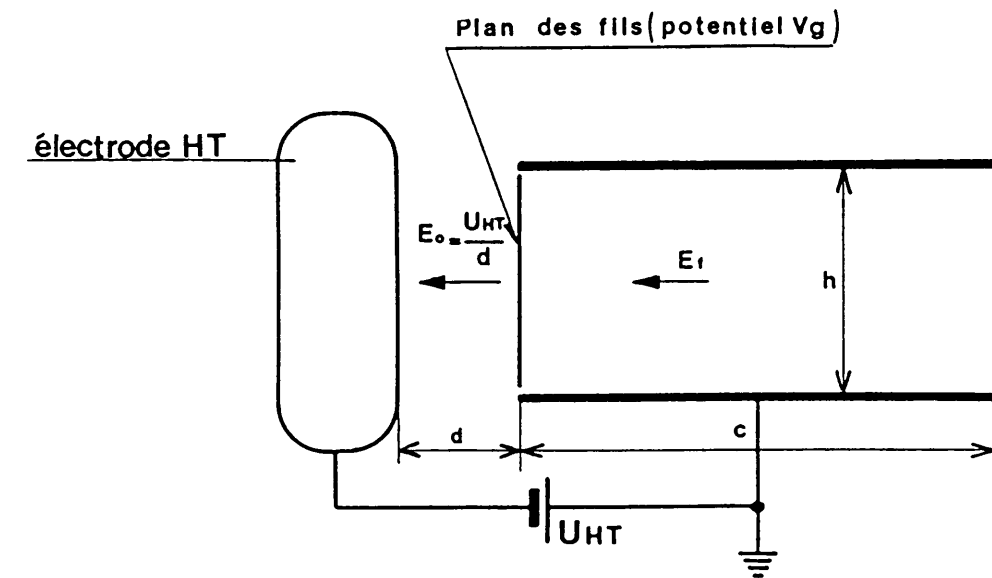
A. Durand [10], par deux méthodes numériques, l'une utilisant les différences finies et l'autre de Monte-Carlo basée sur un cheminement sphérique a montré que :

- a) En dehors de la région proche des fils ($y > 2a$) le potentiel à l'intérieur du support de septum n'est fonction que de y et de z ;
 $V = f(y, z)$.
- b) Le potentiel dans le support de septum, sauf dans la région proche des fils et pour une distance entre fils grande vis à vis de leurs diamètres ($a \gg \varphi_f$), peut être approximativement calculé en remplaçant le plan des fils par un conducteur continu porté au potentiel V_g calculé par l'équation 3.5.

3.3.1.3 Calcul du champ de fuite dans un support de septum

Partant des résultats donnés au paragraphe 3.3.1.2. le calcul du champ de fuite devient un problème bidimensionnel (pour $y > 2a$).

Connaissant le potentiel équivalent V_g du plan des fils nous pouvons déterminer les potentiels et lignes de champ à l'intérieur du support de septum par une méthode numérique, par approximations successives, basée sur les différences finies.



champ de fuite

Fig. 3-7

Ces potentiels sont proportionnels au potentiel de grille V_g et nous pouvons les normaliser en employant $u = V/V_g$ avec :

- V = potentiel en un point P à l'intérieur du support
- V_g = potentiel de grille calculé par l'équation 3.5
- u = potentiel normalisé au point P

Le calcul est fait pour une configuration donnée par la figure 3.7.

La figure 3.8 nous donne le tracé des équipotentielles et lignes de champ dans un support de septum

$h = 7 \text{ cm}$ = hauteur du septum

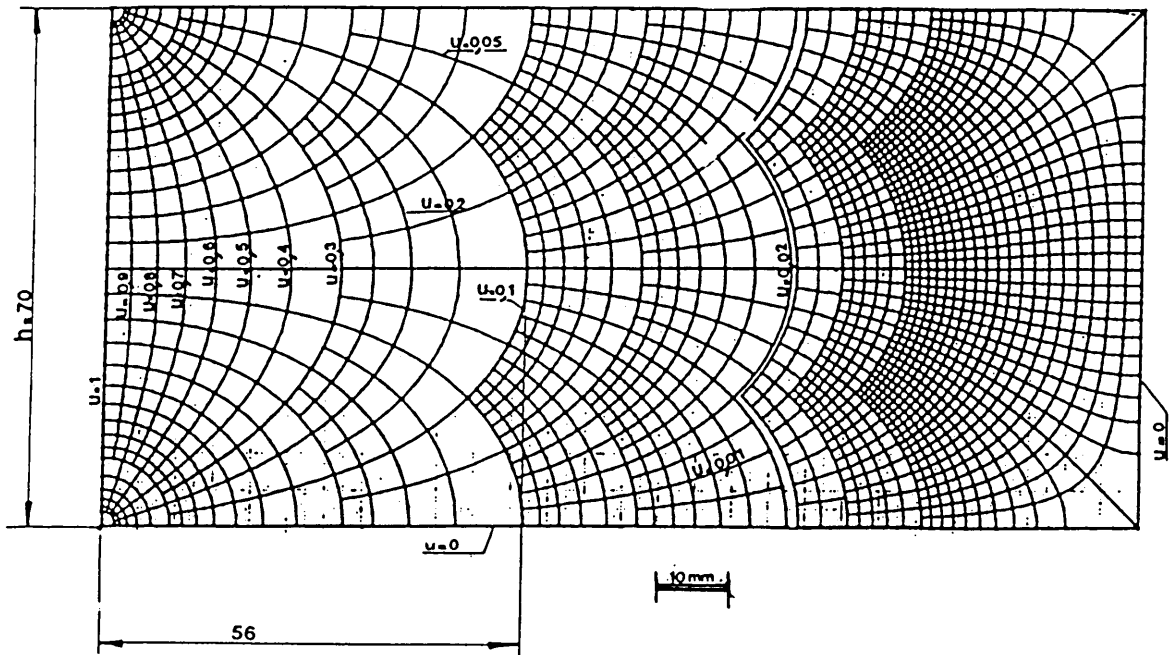
$b = 14 \text{ cm}$ = profondeur du support de septum

le septum étant constitué de fils (exemple précédent)

$\varphi_f = 0,15 \text{ mm}$ = diamètre des fils

$a = 2 \text{ mm}$ = distance entre deux fils consécutifs

pour un champ $E_0 = 150 \text{ kV/cm}$ nous avons trouvé $V_g = -8850 \text{ V}$



Septum à fils

Fig. 3.8

Sur l'axe horizontal et à 56 mm du plan des fils nous avons :

$$V = 0,1 V_g = -885 \text{ V}$$

le champ de fuite en ce point suivant \vec{Oy} est donnée par $\vec{E}_f = - \frac{dV}{dy}$

soit $\vec{E}_f \approx \frac{-8850 \cdot (0,15 - 0,1)}{9 \cdot 10^{-3}} = -4,9 \cdot 10^{-4} \text{ V.m}^{-1}$, avec le
 signe de E_0

3.3.2 Inconvénients résultant du champ de fuite

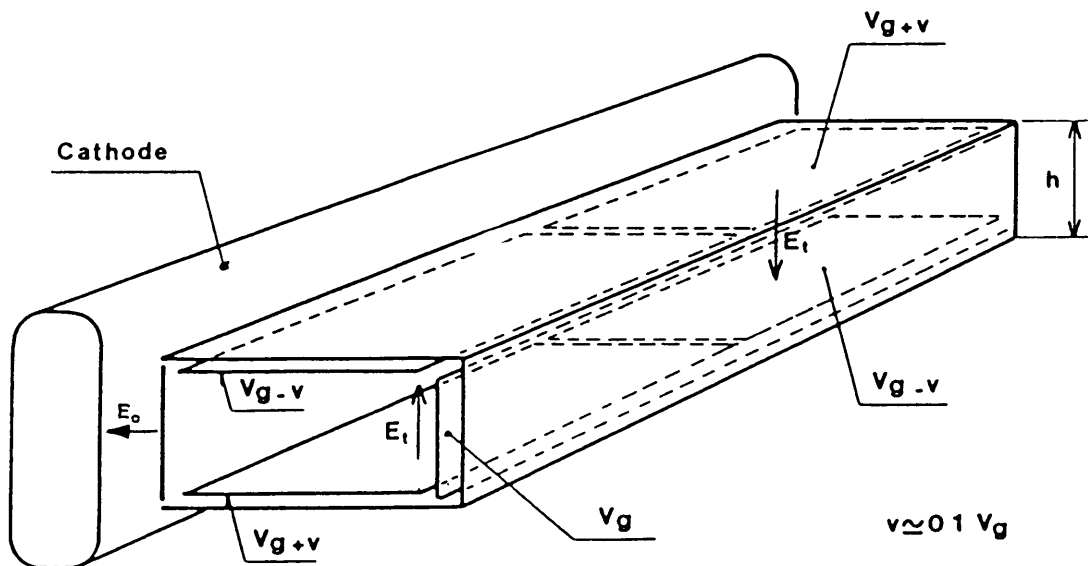
Ce champ de fuite présente deux inconvénients majeurs:

- Il perturbe le faisceau circulant à l'injection si celle-ci se fait à énergie trop basse.
- Il accélère vers l'électrode haute tension, si elle est cathode, les ions produits par collisions des protons du faisceau avec les molécules du gaz résiduel.

Ces ions dont le nombre est fonction du produit $I.p$ (intensité du faisceau X pression résiduelle) donnent naissance à un courant interélectrodes qui initie des claquages haute tension.

Remède

- Il faut réduire le champ de fuite E_f à une valeur compatible avec l'injection du faisceau circulant pour ne pas perturber ce dernier.
- Pour éviter que les ions, produits par le faisceau circulant, ne tombent sur la cathode, il faut créer un champ transverse E_t . Ce champ transverse accélère les ions vers les parois du support de septum. (piège à ions)



**compensation du champ de fuite
piège à ions**

Fig. 3.9

La fig. 3.9 donne le principe d'une telle réalisation:

- Par des électrodes nous portons l'intérieur du support au potentiel V_g calculé par l'équation 3.5.

- Pour créer un champ électrique transverse nous appliquons des potentiels différents entre les électrodes supérieures et inférieures mais dont la valeur moyenne est V_g soit $V_g + v$ et $V_g - v$ avec $v \approx 0,1 V_g$
- Pour ne pas modifier l'intégrale du champ électrique vu par le faisceau circulant nous changeons le sens du champ transverse E_t entre la première et la seconde moitié du septum:

$$E_t = -E'_t$$

3.3.3 Flèche des fils due au champ électrique

La pression électrostatique moyenne exercée sur le plan des fils est donnée par l'équation 3.1.

Chaque fil est approximativement soumis à une force électrostatique égale à celle qui serait appliquée à une bande métallique continue de largeur a et de hauteur h .

Si T'_0 est la tension initiale de chaque fil, nous aurons :

$$y_2 = \frac{\epsilon_0}{4T'_0} \cdot E_0^2 \cdot x^2 \cdot a \quad \text{et} \quad f_2 = \frac{\epsilon_0}{16T'_0} \cdot E_0^2 \cdot h^2 \cdot a$$

Considérons un fil de diamètre $\varphi_f = e$ (e = épaisseur de la feuille)

nous avons $T_0 = \frac{\sigma_r}{5} \cdot e$: tension par unité de longueur d'une feuille;

- si l'on admet une contrainte identique pour les fils, nous aurons :

$$T'_0 = \frac{\sigma_r}{5} \cdot \frac{\pi \cdot \varphi_f^2}{4}$$

$$\text{soit } f_2 = f \cdot a \cdot \frac{T_0}{T'_0} = f \cdot \frac{4a \cdot e}{\pi \varphi_f^2}$$

et pour $\varphi_f = e$

$$f_2 = \text{flèche pour un septum à fils} \quad \text{en m}$$

Eq. 3.6

$f_2 = f \cdot \frac{4a}{\pi \varphi_f}$	f = flèche pour une feuille d'épaisseur $e = \varphi_f$	m
	a = intervalle entre deux fils consécutifs	m
	φ_f = diamètre des fils	m

Application numérique

Fils de tungstène $\varphi_f = 0,1$ mm distants de 1 mm pour $h = 7$ cm et

$$E_o = \frac{U}{d} = 2.10^7 \text{ V.m}^{-1}$$

nous avons pour une feuille d'épaisseur $e = 0,1$ mm : $f = 27 \mu\text{m}$
avec le réseau de fils nous aurons :

$$f_2 = 27.10^{-6} \frac{4.10^{-3}}{\pi.10^{-4}} = 27 \times 12,7 \times 10^{-6} = 343 \mu\text{m}$$

- L'utilisation de fils conduit à des flèches beaucoup plus importantes (plusieurs fois le diamètre) dont nous devons tenir compte.

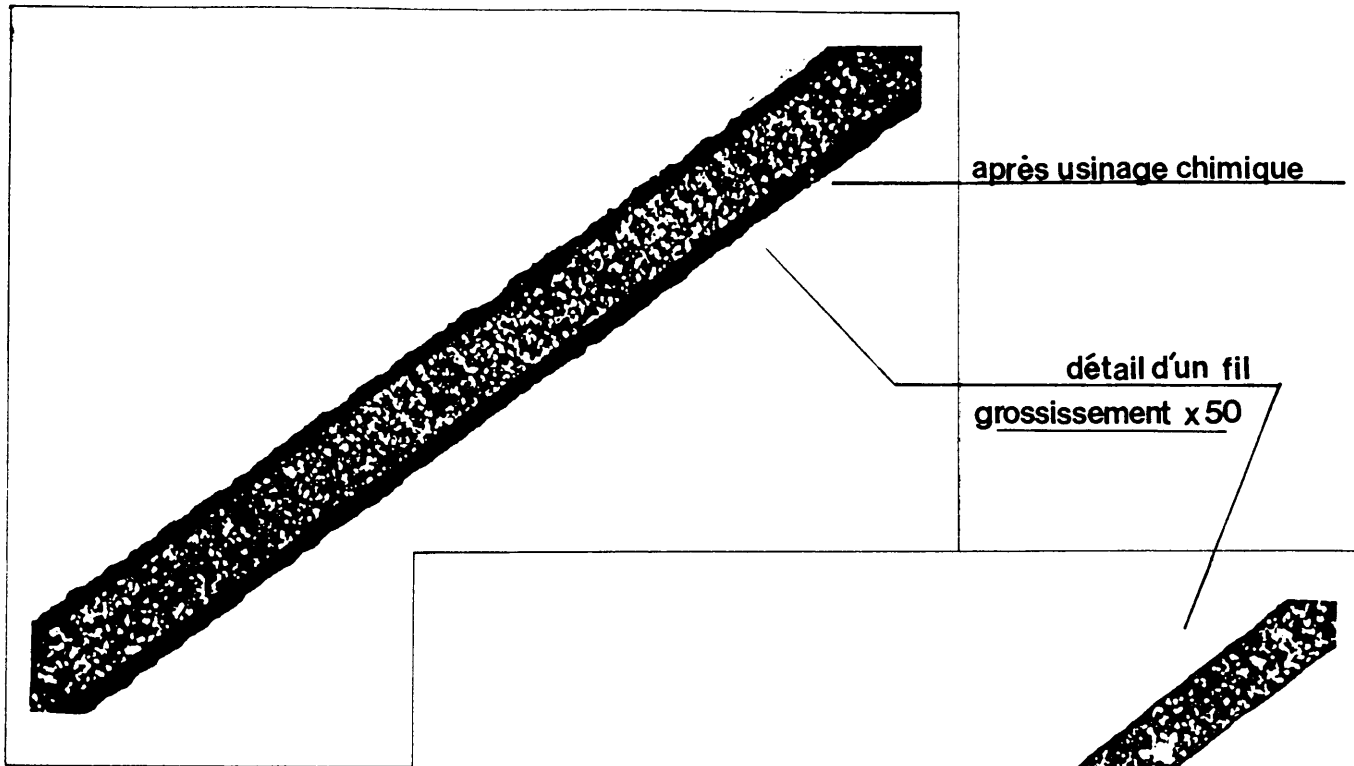
3.4 Solution mixte

Nous désirions concilier en partie, dans la construction d'un septum, les avantages d'une feuille pleine à ceux d'une rangée de fils.

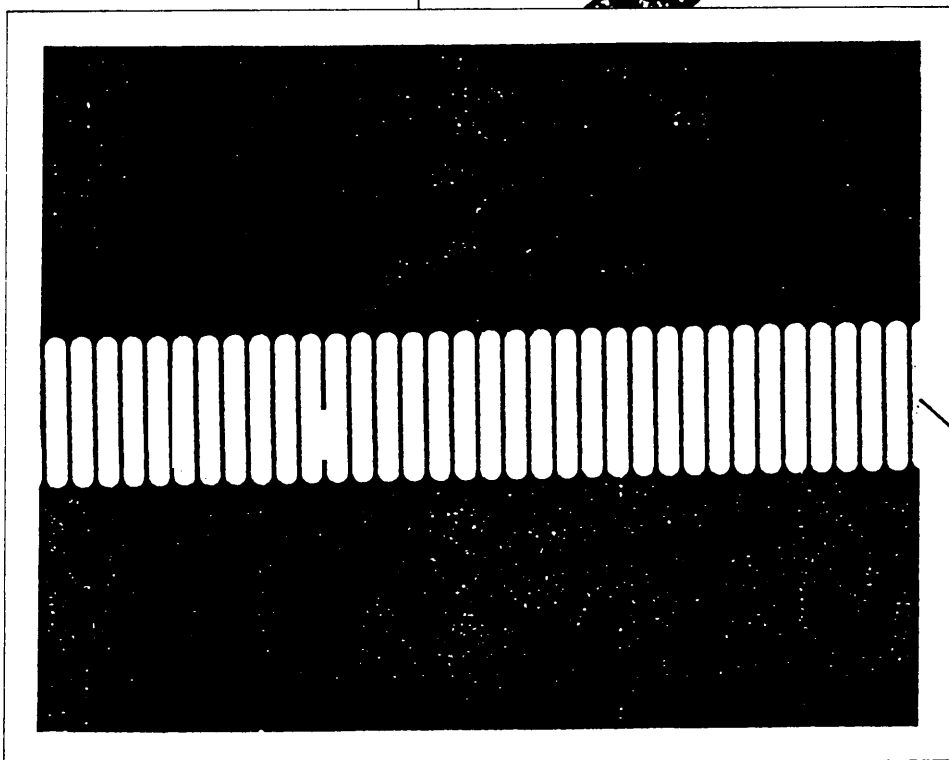
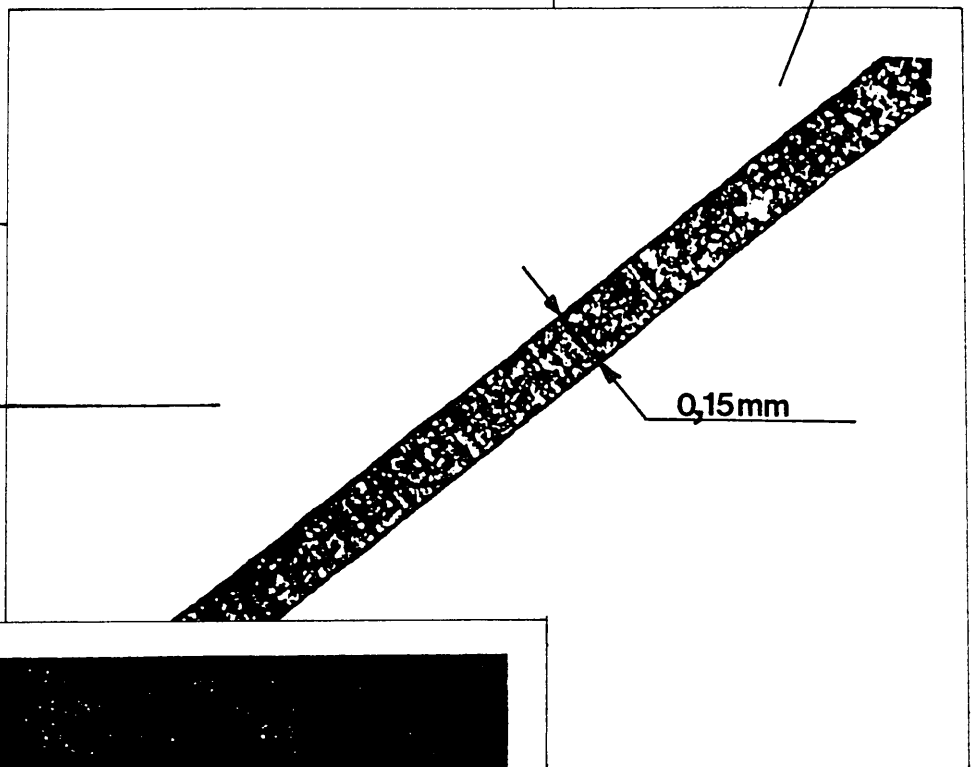
- Quand un faisceau de protons à haute énergie est intercepté par un septum (élément mince fixant la frontière entre le faisceau circulant et la part du faisceau éjecté) le rapport du nombre de protons défléchis par diffusion coulombienne à celui des protons faisant une interaction forte est plus grand pour un septum à fils que pour une feuille pleine. [12]

En effet, grâce à l'espacement des fils, la diffusion coulombienne peut écarter les particules hors du septum avant qu'elles aient traversé assez de matière pour donner lieu à une interaction nucléaire.

- Par contre, une rangée de fils présente un champ électrique de fuite, côté faisceau circulant, assez important (pararagraphe 3.3.1.3) avec ses inconvénients (paragraphe 3.3.2).
- Le faisceau à haute énergie, lors de son éjection, est de dimensions réduites (paragraphe 2.3) d'où l'idée d'utiliser une feuille mince avec usinage de sa partie centrale pour obtenir un réseau de fils seulement où le faisceau est le plus dense et conserver ailleurs une feuille pleine (voir photos 3.10).



avec polissage électrolytique



Solution mixte

photos 3.10

Nota: cette solution ne résoud qu'en partie les problèmes dus à l'emploi des fils car la flèche n'est pas réduite (contrainte admissible fixée par la partie découpée).

3.4.1 Usinage de la feuille

Après plusieurs essais en nos ateliers, une méthode similaire à celle utilisée pour la fabrication des circuits imprimés a été mise au point (annexe 2).

Après une protection partielle de la feuille à l'aide d'un "photo-resist" (verni que l'on peut détruire par exposition au rayonnement ultraviolet) nous faisons une attaque chimique.

Cette attaque chimique provoque une "sous gravure et présente des pointes émissives que l'on réduit par un usinage électrolytique (usinage préférentiel des pointes où la densité de courant est plus élevée).

Les photos 3.10 montrent les résultats obtenus avec une telle méthode.

3.4.2 Champ de fuite

Hypothèse: - Prenons comme potentiel équivalent pour le plan des fils (zone découpée) le potentiel V_g correspondant à des fils infiniment hauts (approximation paragraphe 3.3.1.2)
- Calculons les potentiels à l'intérieur du support de septum en remplaçant la zone découpée par un conducteur plan continu et porté au potentiel V_g .

Par une méthode numérique basée sur les différences finies, nous avons étudié un tel septum dont les paramètres sont:

- $h = 70 \text{ mm} =$ hauteur totale du septum
- $h_d = 10 \text{ mm} =$ partie découpée de la feuille
- $\varphi_f = 0,15 \text{ mm} =$ largeur des fils (section $0,1 \times 0,15 \text{ mm}^2$)
- $a = 1 \text{ mm} =$ distance entre deux fils consécutifs
- $b = 14 \text{ cm} =$ profondeur du support de septum

Pour $E_o = 10 \text{ MV.m}^{-1}$ nous avons par l'équ. 3.5 (ou figure 3.6)

$$V_g = - 1250 \text{ V}$$

En normalisant les tensions comme en 3.3.1.3 nous obtenons le tracé des équipotentiels et lignes de champ sur la figure 3.11

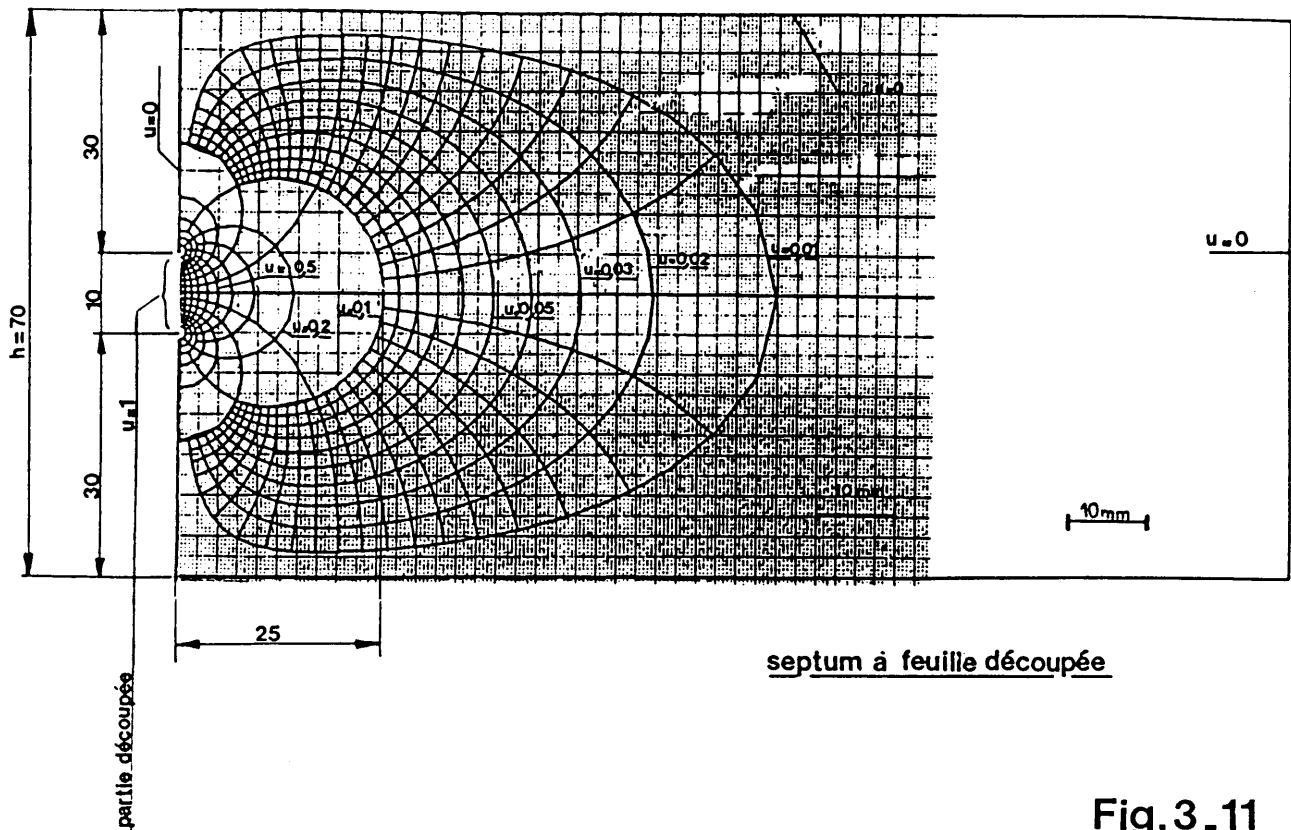


Fig.3.11

Le tableau 3.12 nous montre l'avantage obtenu sur la réduction du champ de fuite par l'utilisation d'une telle feuille découpée.

Tableau 3.12

Distance y depuis le septum	E_o	h	U en V		E_f en $V.m^{-1}$	
			Feuille découpée sur 10 mm	Fils	Feuille découpée sur 10 mm	Fils
25 mm	15 $MV.m^{-1}$	70 mm	187	3540	$1,8 \cdot 10^4$	$3,54 \cdot 10^5$
56 mm	-	-	47	885	$2,8 \cdot 10^3$	$4,9 \cdot 10^4$
70 mm	10 $MV.m^{-1}$	-	16	320	$8 \cdot 10^2$	$1,4 \cdot 10^4$

3.4.3 Compensation du champ de fuite

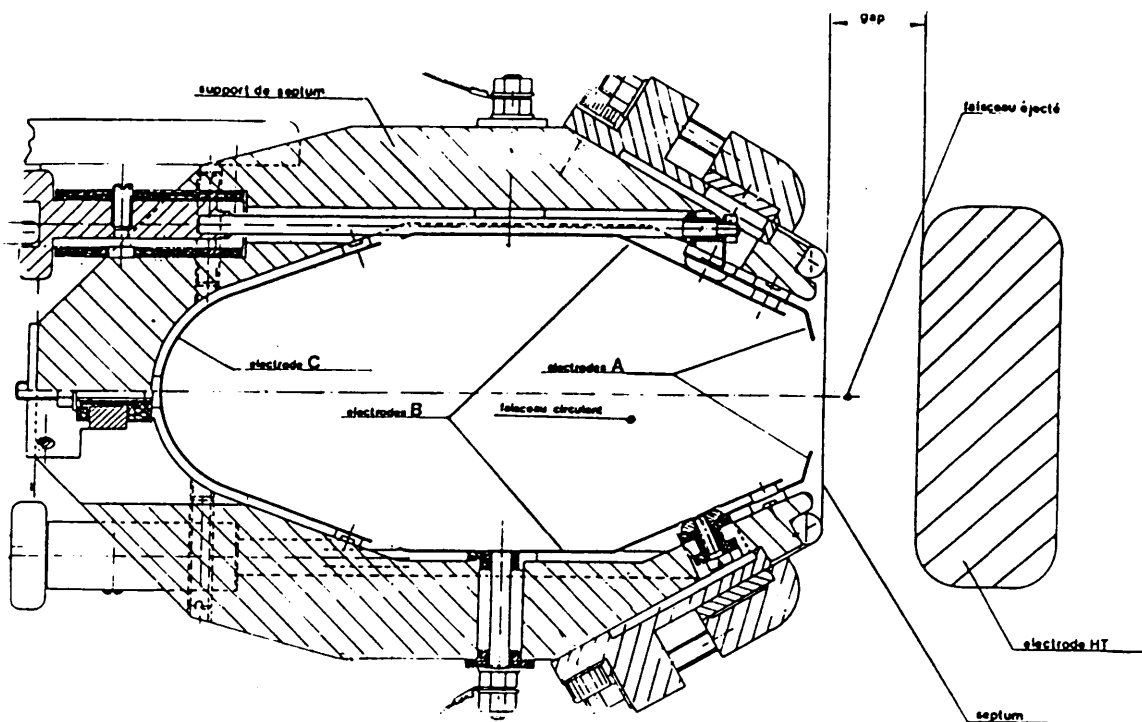
La figure 3.13 donne une disposition possible pour des électrodes placées à l'intérieur du support de septum.

- électrode C Elle est portée au potentiel V_g donné par l'équation 3.9.

Pour des fils de diamètre $\phi_f = 0,15$ mm distant de $a = 1$ mm et pour

$$E_o = 15 \text{ MV.m}^{-1} \text{ nous trouvons } V_g = -1875V$$

- électrode B suivant le principe énoncé au paragraphe 3.3.2 elles sont au potentiel moyen V_g avec création d'un champ transverse.



Electrodes de compensation

Fig. 3.13

Tableau 3.14

soit

	1 ^{ère} moitié	2 ^{ème} moitié
bas	-2200V ($V_g - 350V$)	-1500V
haut	-1500V ($V_g + 350V$)	-2200V

Nota: Le potentiel V_g et la hauteur des fils étant relativement faibles, il est possible de compenser en partie (sauf dans la région des fils) le champ de fuite en appliquant un potentiel positif aux électrodes A sans alimenter les électrodes B et C.

3.5 Amélioration de l'efficacité et protection d'un septum constitué d'une feuille

Pour éviter l'échauffement excessif de la feuille de molybdène constituant le septum, nous plaçons en amont un réseau de fils de tungstène.

Ce réseau de fils a pour effet de diffuser les protons de part et d'autre du septum. [11]

L'efficacité d'un tel diffuseur est donné par:

Eq. 3.7

$$\text{eff} = 1 - \frac{n_1 + n_2 + n_3}{n}$$

- eff = efficacité
- n_1 = nombre de protons subissant des interactions nucléaires dans le réseau de fils
- n_2 = nombre de protons subissant des interactions nucléaires dans la feuille
- n_3 = nombre de protons ayant perdu une quantité de mouvement $\Delta p/p > 2.10^{-3}$
- n = n_2 s'il n'y avait pas de fils en amont du septum.

Nous devons faire un compromis entre:

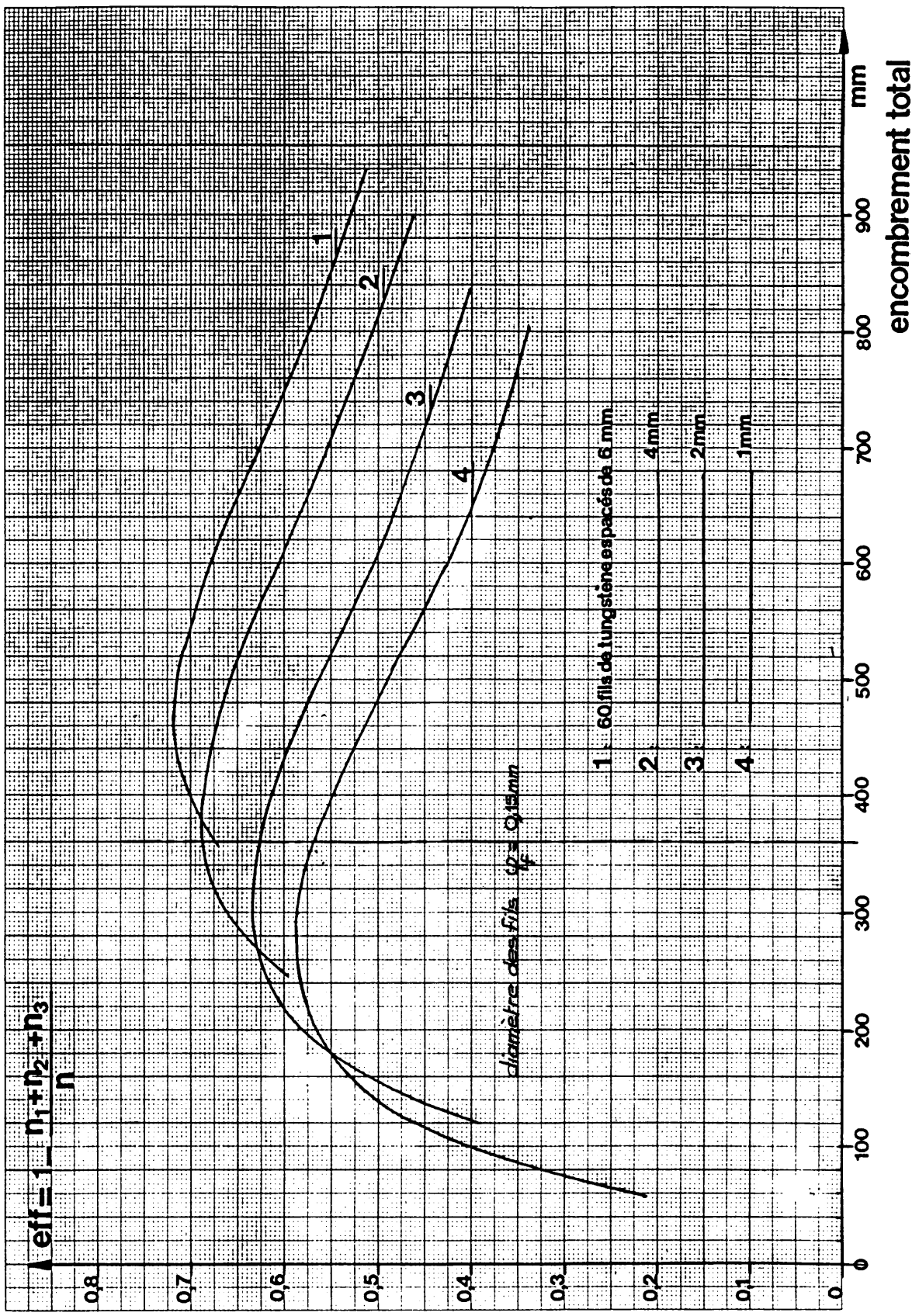
- le diamètre des fils
- l'espacement entre fils consécutifs
- la longueur du réseau de fils
- la distance entre le réseau de fils et la feuille du septum

A. Durand, pour un faisceau de protons à 12 GeV/c a déterminé l'efficacité d'un tel diffuseur en utilisant un réseau constitué de 60 fils de tungstène d'un diamètre de 0,15 mm. Figure 3.15. [12]

Pour un encombrement total donné de 360 mm (égal à la longueur du réseau de fils + distance entre les fils et la feuille) nous voyons que la meilleure efficacité sera obtenue en espaçant les fils de 4 mm.

Nota: Dans la réalisation de notre septum utilisé pour le transfert continu, nous avons choisi 50 fils espacés de 5 mm et un encombrement total de 370 mm.

Les photos 3.16 montrent une telle réalisation.



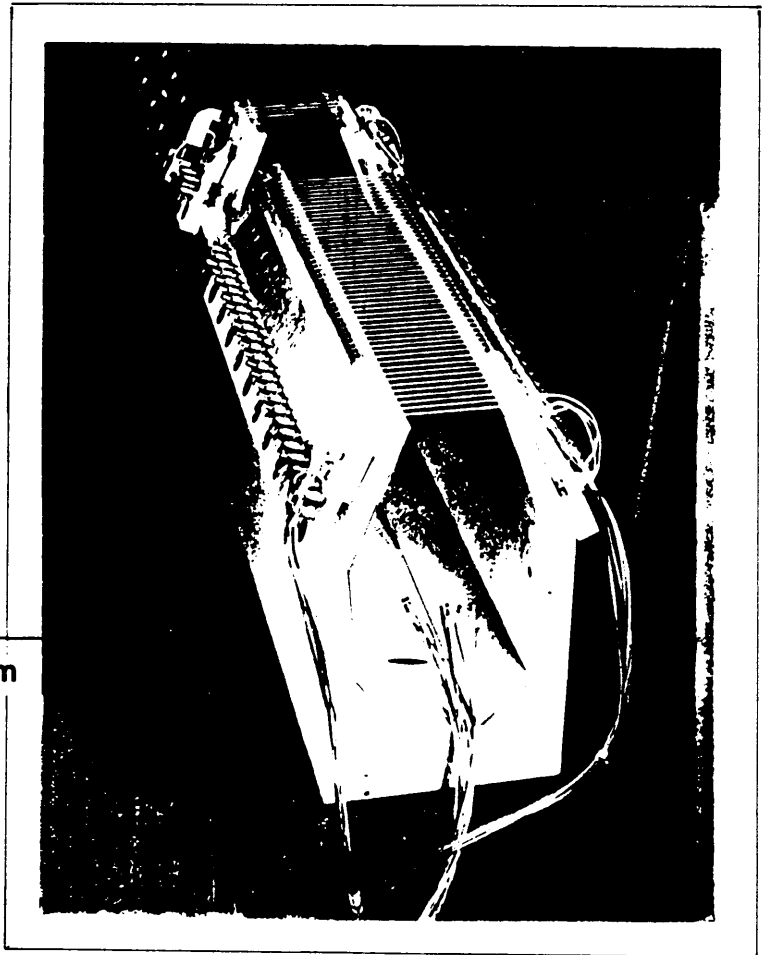
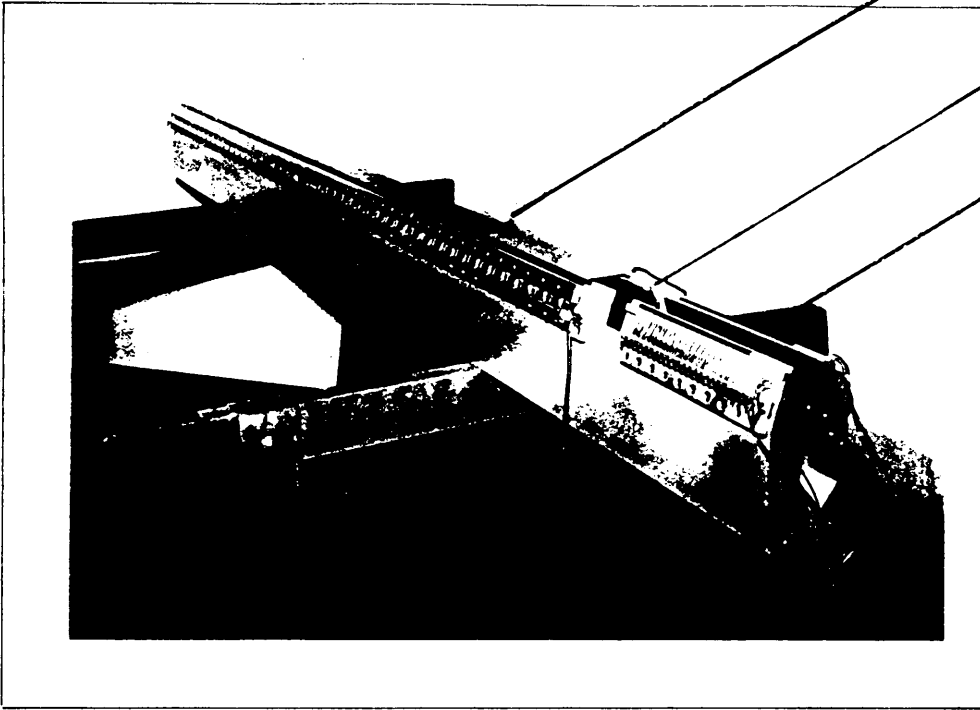
Efficacité du diffuseur

fig. 3.15

septum feuille Mo \varnothing ,1mm

espace de glissement

diffuseur
(fils)



détail du diffuseur

50 fils W \varnothing 0,15mm espacés de 5mm

Diffuseur

4. ELECTRODES HAUTE TENSION

La tension maximale que l'on peut appliquer entre deux électrodes placées sous vide dépend de plusieurs paramètres parmi lesquels:

- les matériaux utilisés
- la rugosité de la surface
- la préparation (usinage, polissage, nettoyage et conditionnement).

4.1 Influence de l'anode

Dans l'hypothèse d'un claquage anodique on considère que l'arc est consécutif à une vaporisation d'une zone de l'anode suite à un échauffement (paragraphe 1.2.2.b).

L'échauffement dépend de la densité d'énergie et de la dimension du faisceau incident, de sa durée d'application et du matériau de l'anode.

Les propriétés physiques du matériau d'anode à considérer seront sa chaleur massique, sa conductivité thermique et sa température de fusion (ces paramètres sont regroupés dans le tableau 3.1).

Lorsque l'anode est massive (épaisseur supérieure à quelques mm) les meilleurs résultats haute tension, pour une distance entre électrode de 1 cm, sont obtenus avec de l'acier inoxydable (304 L ou 316 L + N dont la composition est donnée en annexe 3) mais le titane, le tungstène et le molybdène donnent des résultats voisins.

Pour la construction d'un septum l'utilisation d'une feuille mince d'acier inoxydable conduit à des déformations importantes et même, sous certaines conditions (épaisseur de 0,05 mm et pour une énergie > 40 J), à sa fusion lors des claquages haute tension.

4.2 Influence de la cathode

Dans l'hypothèse d'un claquage consécutif à l'émission de champ (paragraphe 1.2.2) la tenue en tension est améliorée en utilisant une cathode dont l'émission électronique est la plus faible possible.

La densité de courant sur une pointe émissive est donné par l'équation 1.1. Dans cette formule :

- Le travail de sortie ϕ , pour les métaux pouvant convenir, est du même ordre de grandeur (4 à 4,5 eV).

- Le champ électrique E est donné sur la pointe émissive avec $E = \eta \cdot E_0$ et $E_0 = U/d =$ champ électrique moyen.

4.2.1 cathode métallique

Les paramètres physiques importants dont on devra tenir compte sont:

- la géométrie et la préparation de la cathode; il faut réduire le coefficient d'amplification du champ électrique η en diminuant les microaspérités.
- la résistivité du matériau et sa conductivité thermique dont dépend l'échauffement.
- le point de fusion du matériau.

4.2.2 cathode oxydée

La tension maximale, applicable à un système d'électrodes, a pu être considérablement augmentée par une oxydation de la cathode.

L'oxydation est réalisée en surface sur une cathode en aluminium ou d'un alliage tel que le péralumam PRE 30 (composition en annexe 3).

L'effet d'une telle couche d'oxyde peut être expliqué par:

- réduction du champ électrique grâce à la permittivité relative de l'oxyde isolant. [13].
- le meilleur état de surface, après oxydation et colmatage à l'eau, réduit la valeur de η .

Deux types d'oxydation sont réalisés au CERN par traitement d'une électrode d'aluminium (ou alliage) dans un bain électrolytique. La cathode à traiter est alimentée sous une tension positive dans ce bain.

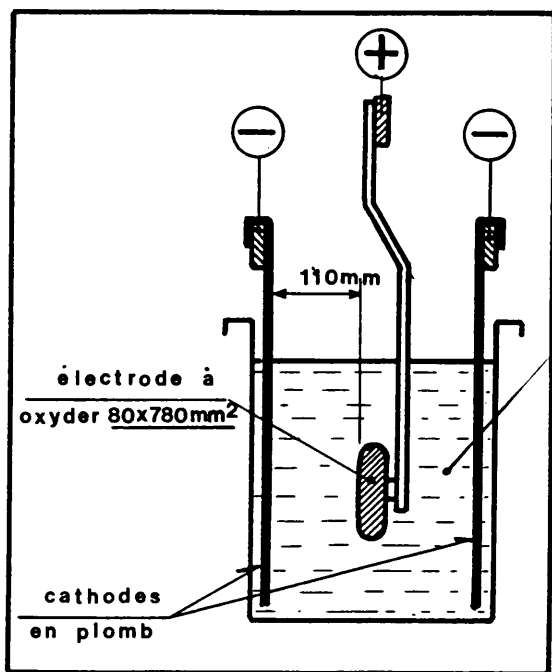
4.2.2.1 Oxydation sulfurique - préférable pour les distances entre électrodes de quelques centimètres.

Les meilleurs résultats étant obtenus pour:

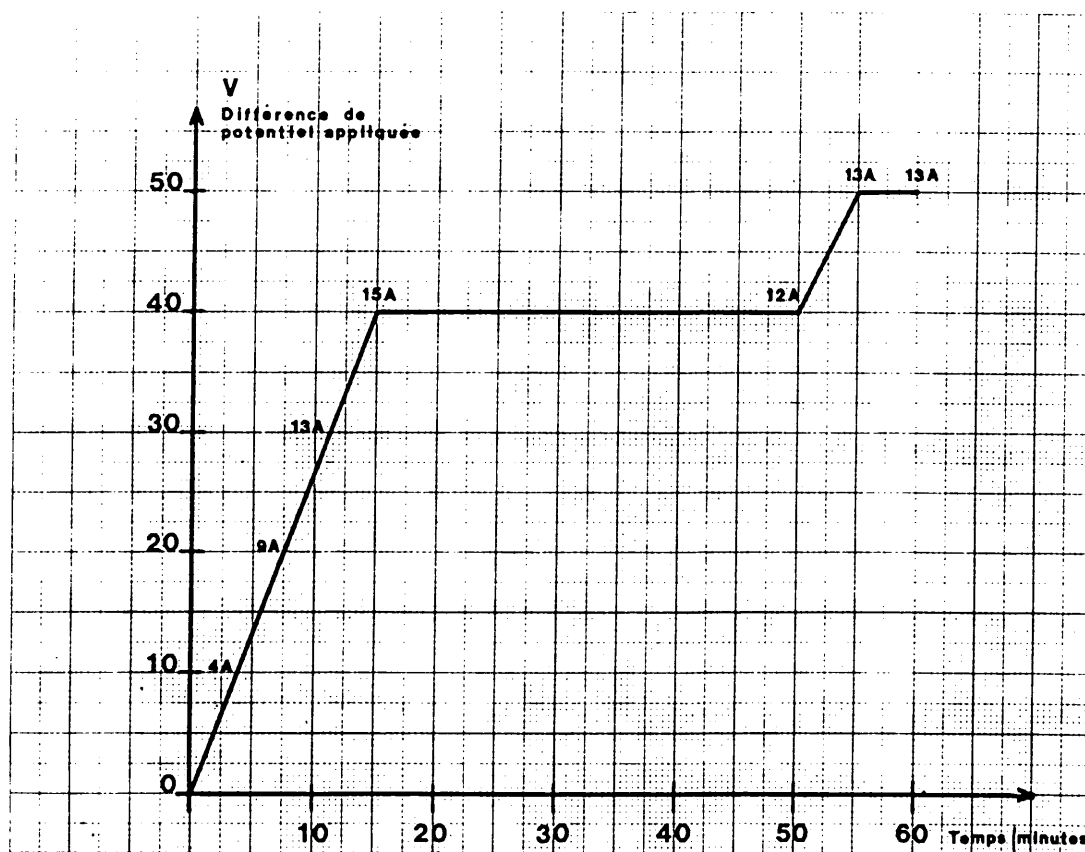
- bain d'acide sulfurique (concentration 20% en poids)
- densité de courant 1,5 à 2 A/dm²
- température du bain 18°C à 20°C
- couche obtenue 6 à 10 μ m

Pour ce type d'oxydation, les paramètres peuvent varier dans une fourchette assez large sans trop modifier la tension disruptive.

Après oxydation les pores sont colmatés par immersion de l'électrode dans de l'eau distillée à 90°C environ 30 min.



bain
eau déminéralisée
 $CrO_3 = 140 \text{ g/l}$
 $^{\circ}Bé = 12,5 \rightarrow 13$
 $38^{\circ}C \pm 2$
 $d = 1,095 \text{ à } 1,1 \text{ kg/dm}^3$
agitation par air
 $v = 350 \text{ litres}$



OXYDATION CHROMIQUE POUR CATHODE D'ALUMINIUM

Fig. 4.1

4.2.2.2 Oxydation chromique - préférable pour les faibles distances entre électrodes (2 à 20 mm). [13]

L'anodisation de l'électrode se fait ici en utilisant de l'acide chromique dans le bain.

Les paramètres lors de ce processus doivent être très bien contrôlés: la figure 4.1 nous renseigne sur le bain et le mode opératoire suivi. La couche d'oxyde obtenue varie de 6 à 8 μm .

Comme pour l'oxydation sulfurique l'électrode est ensuite colmatée par immersion dans l'eau distillée à 90°C durant 30 min.

4.3 Conditionnement des électrodes

Considérons deux électrodes planes et parallèles placées sous vide. En imposant un courant constant entre les électrodes alimentées sous une tension U (par variation de U) on constate :

- 1) la tension U augmente en fonction du temps selon une loi de forme exponentielle :

$$U = (U_o - U_{\max}) e^{-\alpha t} + U_{\max}$$

- 2) Puis cette tension devient constante après un temps t donné
- 3) Si l'on maintient le courant initial la tension peut diminuer.

La phase 1) est appelée formation ou conditionnement des électrodes et elle semble correspondre à une modification de l'état microscopique de la surface soumise à l'action du champ électrique par suite d'un dégazage, d'un polissage (vaporisation des micropointes) ou d'un nettoyage (impuretés faiblement liées arrachées de la surface).

Le temps nécessaire à cette formation dépend:

- de l'état initial des électrodes, des déflecteurs haute tension et de l'enceinte à vide (matériau, mise en oeuvre et nettoyage)
- de la surface des électrodes
- du gaz résiduel (nature et pression)
- du courant imposé: la rapidité de la formation augmente avec le courant mais il y a une valeur critique à ne pas dépasser sinon il peut se produire un échauffement plus ou moins localisé qui favorise l'émission de champ.

Pour nos septums électrostatiques, ce courant est de l'ordre de 10 à 20 microampères si l'on utilise des électrodes oxydées et la durée de formation est de quelques heures.

4.4 Déconditionnement

Faisons un conditionnement jusqu'à une tension U_{\max} pour une distance entre électrodes d et maintenons ensuite une tension $U < U_{\max}$ pour ce même écartement d .

Nous constatons, au bout de quelques jours, l'impossibilité d'obtenir à nouveau cette tension initiale U_{\max} sans reconditionnement préalable.

Ce processus de déconditionnement semble lié à l'adsorption de certains gaz par les électrodes et sa rapidité dépend fortement de la qualité du vide dans l'enceinte contenant les électrodes :

- elle est presque proportionnelle à la pression pour des gaz résiduels de même nature (même pompe et 10^{-7} Pa $<$ p $<$ 10^{-4} Pa)
- elle est très importante si le taux de vapeurs organiques est élevé. [14]
- elle est ralentie si ce gaz résiduel est de l'oxygène [15].

Partie B

REALISATIONS

5. Septa utilisés dans le synchrotron à protons de 28 GeV.
6. Septum utilisé dans le LEAR.

5. SEPTA UTILISES DANS LE SYNCHROTRON A PROTONS DE 28 GeV

Introduction

Le CERN possède différents accélérateurs de protons pour ses recherches en physique des hautes énergies.

Pour atteindre une énergie de 400 GeV quatre machines sont utilisées en cascade :

- | | | |
|----------------------------|------------|-----------|
| - un accélérateur linéaire | de 50 MeV | (Linac) |
| - un synchrotron injecteur | de 800 MeV | (Booster) |
| - un synchrotron | de 28 GeV | (PS) |
| - un synchrotron | de 400 GeV | (SPS) |

La figure 5.1 montre le complexe des machines dont les principales caractéristiques sont données en annexe 4.

Le PS reçoit des protons d'une énergie de 50 MeV venant du Linac ou d'une énergie de 800 MeV après accélération dans le Booster.

Dans le PS ces protons sont accélérés:

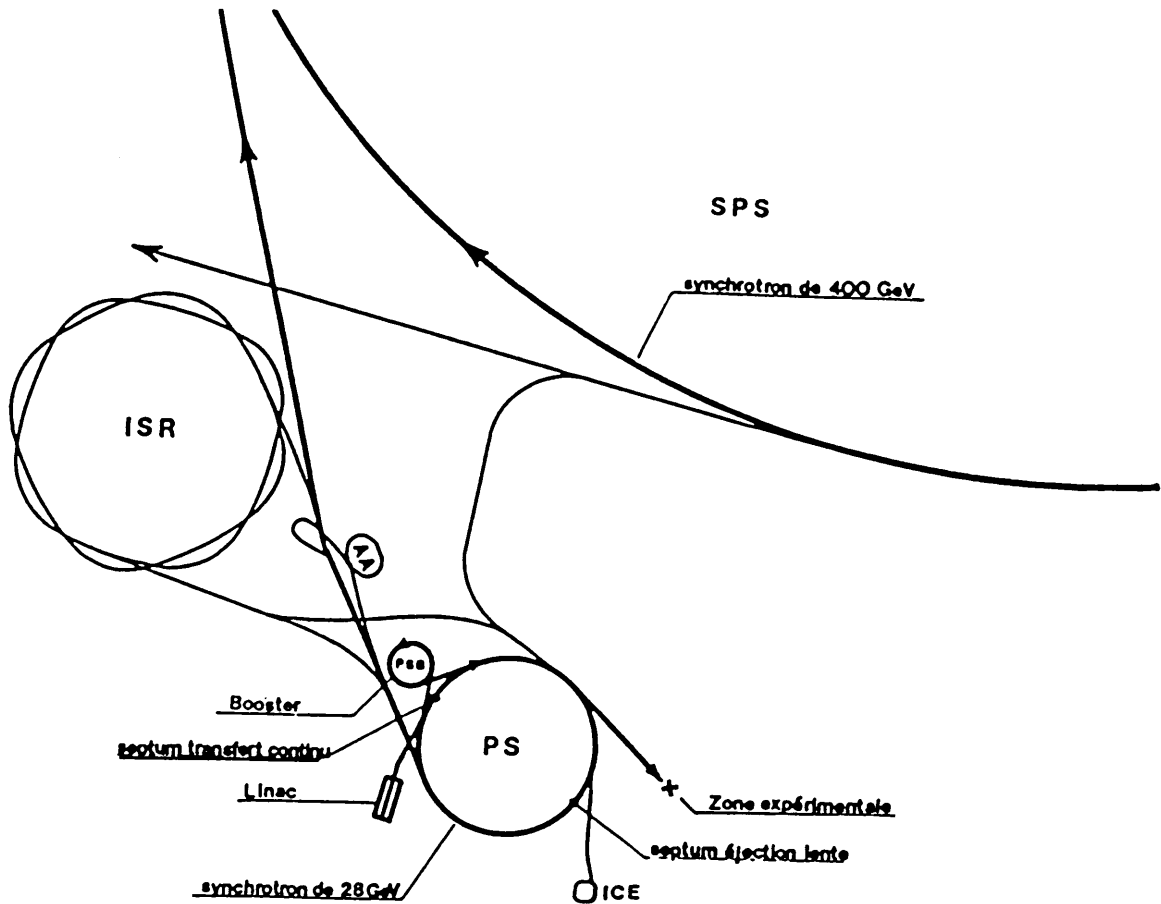
- à une énergie de 9 GeV puis envoyés vers le SPS après division du faisceau PS en 3 ou 5 parties. Cette opération est appelée transfert continu.
- à une énergie de 25 GeV puis éjectés d'une façon régulière, en quelques centaines de millisecondes, vers les zones expérimentales. Cette opération constitue l'éjection lente.
- avec cet ensemble de machines d'autres opérations, non-mentionnées ici, sont possibles.

Deux septa électrostatiques sont installés sur l'anneau du synchrotron de 28 GeV (PS). Ils sont utilisés comme premier élément d'éjection pour les opérations a) et b) décrites ci-dessus.

Le principe de fonctionnement du septum électrostatique a été présenté au paragraphe 2.3.

5.1 Caractéristiques communes aux deux septa du PS

Ces deux septa étant installés sur la même machine, certains problèmes sont communs et conduisent à des solutions semblables.



Complexe des machines

Fig. 5-1

- La pression totale résiduelle est comprise entre $5 \cdot 10^{-7}$ Pa et $1,5 \cdot 10^{-6}$ Pa; elle est obtenue à l'aide de pompes ioniques.
Cette pression correspond à un vide poussé mais son obtention ne nécessite pas un étuvage complet des éléments installés.
- La partie éjectée du faisceau ne passe qu'une fois dans la zone interélectrodes (zone avec champ électrique).
- Ces septa ne sont utilisés que pour défléchir des protons.

5.1.1 Electrode haute tension

- L'électrode haute tension est portée à un potentiel négatif.
- La distance entre l'électrode et le septum varie de 10 à 20 mm et nous désirons des champs électriques élevés.
- La pression résiduelle requise ne nécessite pas un étuvage de tous les éléments et un taux de dégazage assez faible des surfaces est acceptable.

Notre choix s'est naturellement porté sur une électrode oxydée. La couche d'oxyde obtenue est de 8 à 10 μm en utilisant un bain contenant de l'acide chromique (processus décrit au paragraphe 4.2.2.2.).

5.1.2 Septum

L'emploi d'un septum à fils crée un champ de fuite qui perturbe le faisceau lors de l'injection à 50 MeV (paragraphe 3.3.2).

L'utilisation d'une feuille mince ne crée aucun champ électrique de fuite mais l'épaisseur de cette feuille doit être aussi faible que possible (paragraphe 3.2).

Les matériaux possibles sont choisis en fonction de leurs propriétés physiques comme il a été vu au paragraphe 3.1 (tableau 3.1).

Des tests haute tension sur des électrodes de dimensions réduites (30 cm^2) et pour une distance interélectrodes de 15 mm, ont donné les résultats suivants : [16]

Tableau 5.2

Septum à la masse (feuille de 0,1mm d'épaisseur)	Electrode haute tension (Cathode)	Tension maximale de conditionnement	Tension de travail ($\tau = 10$ claquage/ heure)
Acier inoxydable	Alliage d'aluminium (PRE 30) oxydé chromique	400 kV	340 kV
Cuivre	-	330 kV	270 kV
Cuivre au béryllium	-	370 kV	280 kV
Tungstène	-	370 kV	330 kV
Molybdène	-	410 kV	350 kV
réseau de fils M_o $\varphi_f = 0,12$ mm distants de 0,5 à 2 mm	-	400 kV	290 kV

L'acier inoxydable, utilisé comme septum, donne de bons résultats mais sa mauvaise conductibilité thermique conduit à des déformations importantes lors d'un échauffement localisé (voir paragraphe 3.1).

Des mesures comparatives de déformation lors d'un échauffement provoqué par des claquages entre électrodes, pour une même tension et avec une même énergie, ont donné pour résultats :

Tableau 5.3

Matériau du septum (0,1 mm)	Nombre de claquages	Déformations
Acier inoxydable	3000	± 600 µm
Molybdène	10000	± 30 µm

Nous constatons, pour une feuille mince de même épaisseur (0,1 mm), que les déformations sont très réduites si l'on utilise du molybdène au lieu de l'acier inoxydable.

Cet avantage s'explique par :

- une meilleure conductivité thermique
- une limite élastique conservée à des températures plus élevées.

Le molybdène ayant une contrainte de rupture élevée (1 à $2 \cdot 10^9$ Pa) et un grand module d'élasticité ($3,25 \cdot 10^{11}$ Pa) permet d'obtenir une tension mécanique importante. La flèche de la feuille soumise au champ électrique est alors réduite (voir paragraphe 3.2.1).

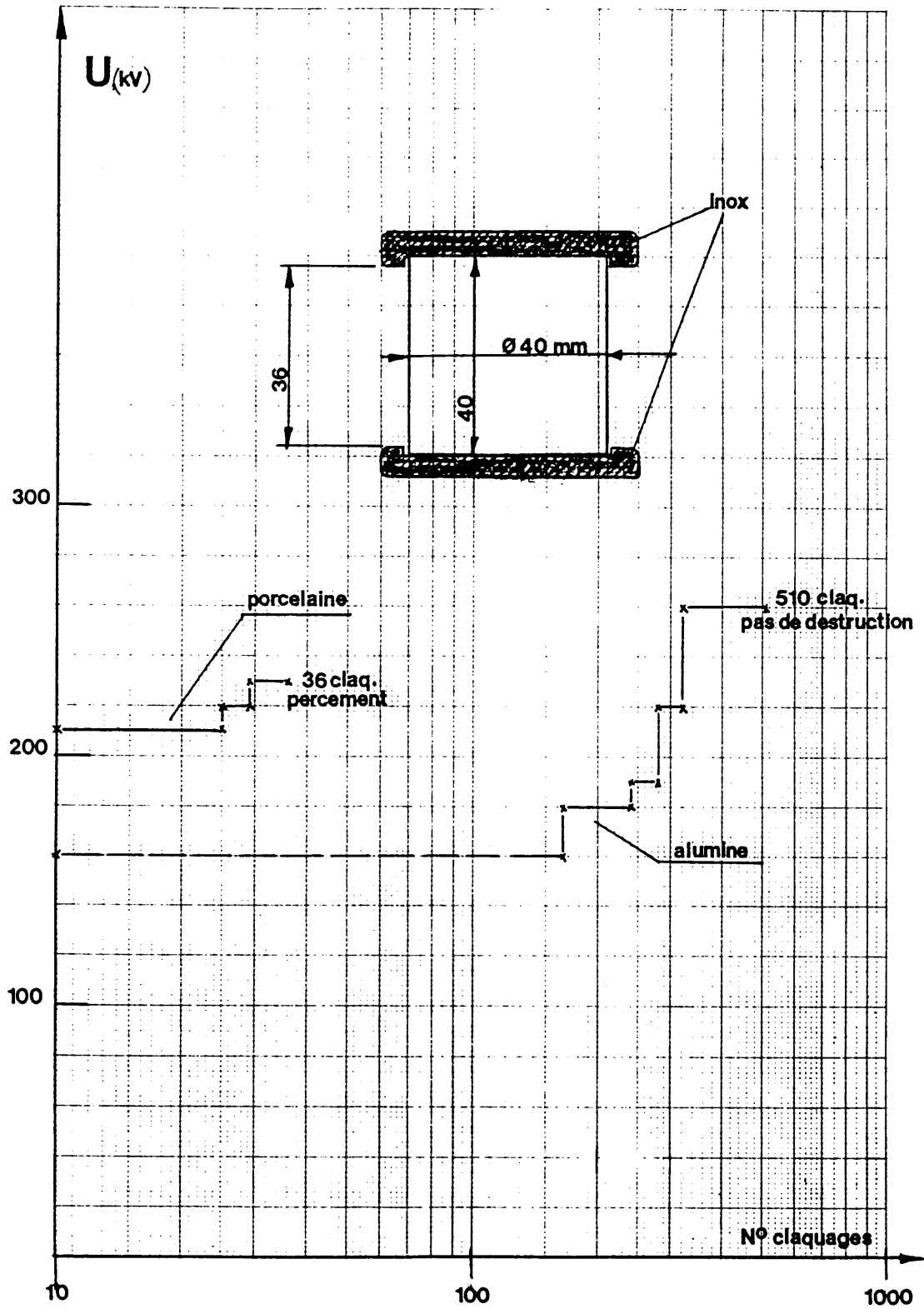
5.1.3 Isolateurs et déflecteurs associés

Des essais comparatifs de rigidité diélectrique sur des isolateurs d'une longueur de 4 cm ont montré que:

- Il faut un matériau très homogène (sans vacuoles ni canaux).
- La jonction isolateur-électrode (point triple isolant électrode vide) doit se trouver dans une zone où le champ électrique est faible. Des "déflecteurs" permettent de réduire le champ électrique dans cette région
- La surface de l'isolateur doit être propre et sans émailage (cheminements sous l'émail).

Les meilleurs résultats ont été obtenus avec de l'alumine (Al_2O_3) obtenue par frittage.

La figure 5.4 donne la tenue en haute tension de l'alumine comparée à celle d'une porcelaine de bonne qualité.



Isolateurs - résultats HT

Fig. 5.4

Les déflecteurs associés aux supports sont en acier inoxydable poli côté anodique et en péraluman (PRE 30) oxydé (bain sulfurique du paragraphe 4.2.2.1) côté cathodique.

La figure 5.5 montre la coupe d'un support isolant avec son cylindre d'alumine et ses déflecteurs associés.

5.1.4 Traversée haute tension et résistance d'amortissement

- La traversée haute tension est constituée d'un tube d'alumine de 86 mm de diamètre et de 240 mm de long (figure 5.6).

Le câble est maintenu dans une fiche en araldite et nous utilisons de l'huile pour transformateur (Diala C de Shell) comme diélectrique. Les déflecteurs associés sont en péraluman (PRE 30) oxydés dans un bain sulfurique.

- Lorsqu'on utilise une cathode oxydée il faut limiter l'énergie dissipée entre les électrodes lors des claquages. La figure 5.7 donne l'énergie maximale admissible. [17]

Une énergie trop grande endommage la couche d'oxyde et chauffe localement la feuille constituant le septum.

Une résistance d'amortissement, d'environ 400 ohms et réalisée avec un fil de constantan de 0,2 mm de diamètre, permet d'absorber l'énergie emmagasinée dans le câble d'alimentation en réduisant celle disponible dans l'étincelle.

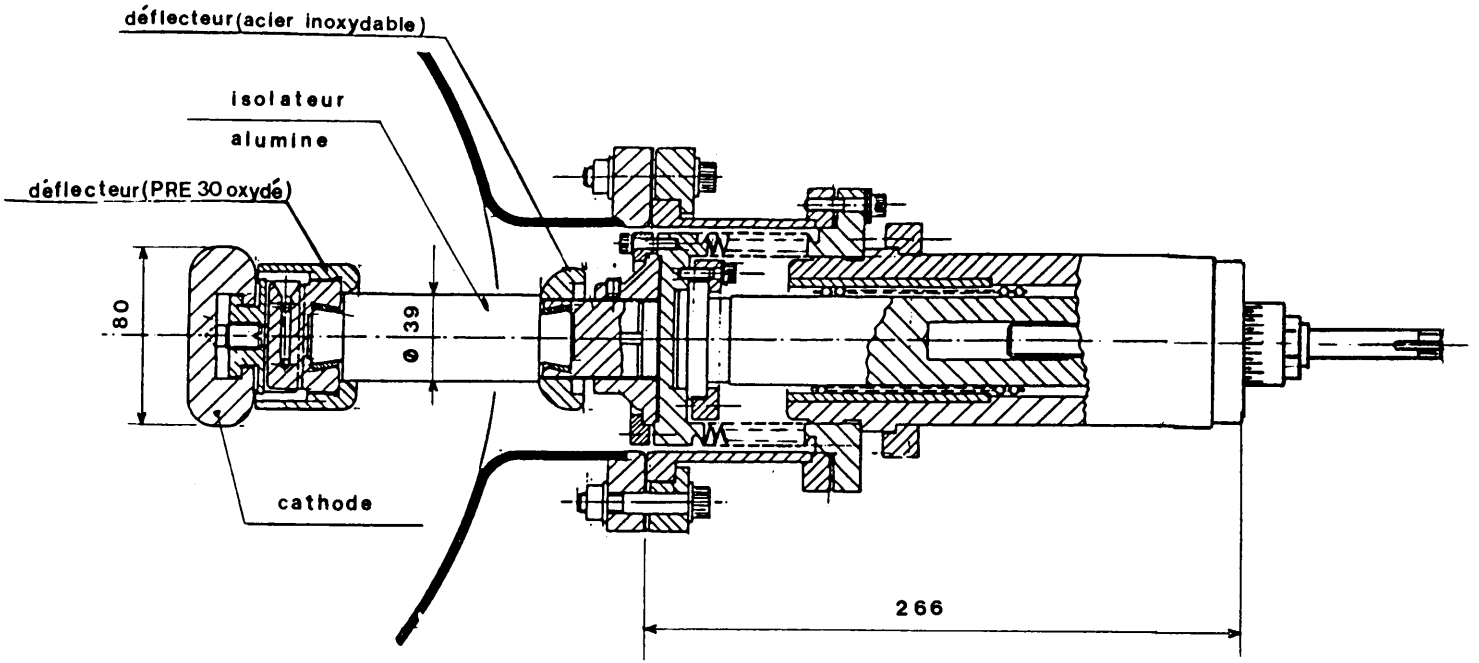
5.1.5 Ecrans minces pour stopper les ions secondaires

Le faisceau circulant crée des ions lors des collisions des protons avec les molécules du gaz résiduel de la chambre-à-vide.

Le nombre de ces ions est une fonction du produit $I \times p$ (I = intensité du faisceau et p : pression du gaz résiduel). Ces ions sont de faible énergie ($< 0,1$ eV) [16] mais, s'ils sont accélérés vers la cathode en nombre suffisant, ils provoquent des claquages entre les électrodes.

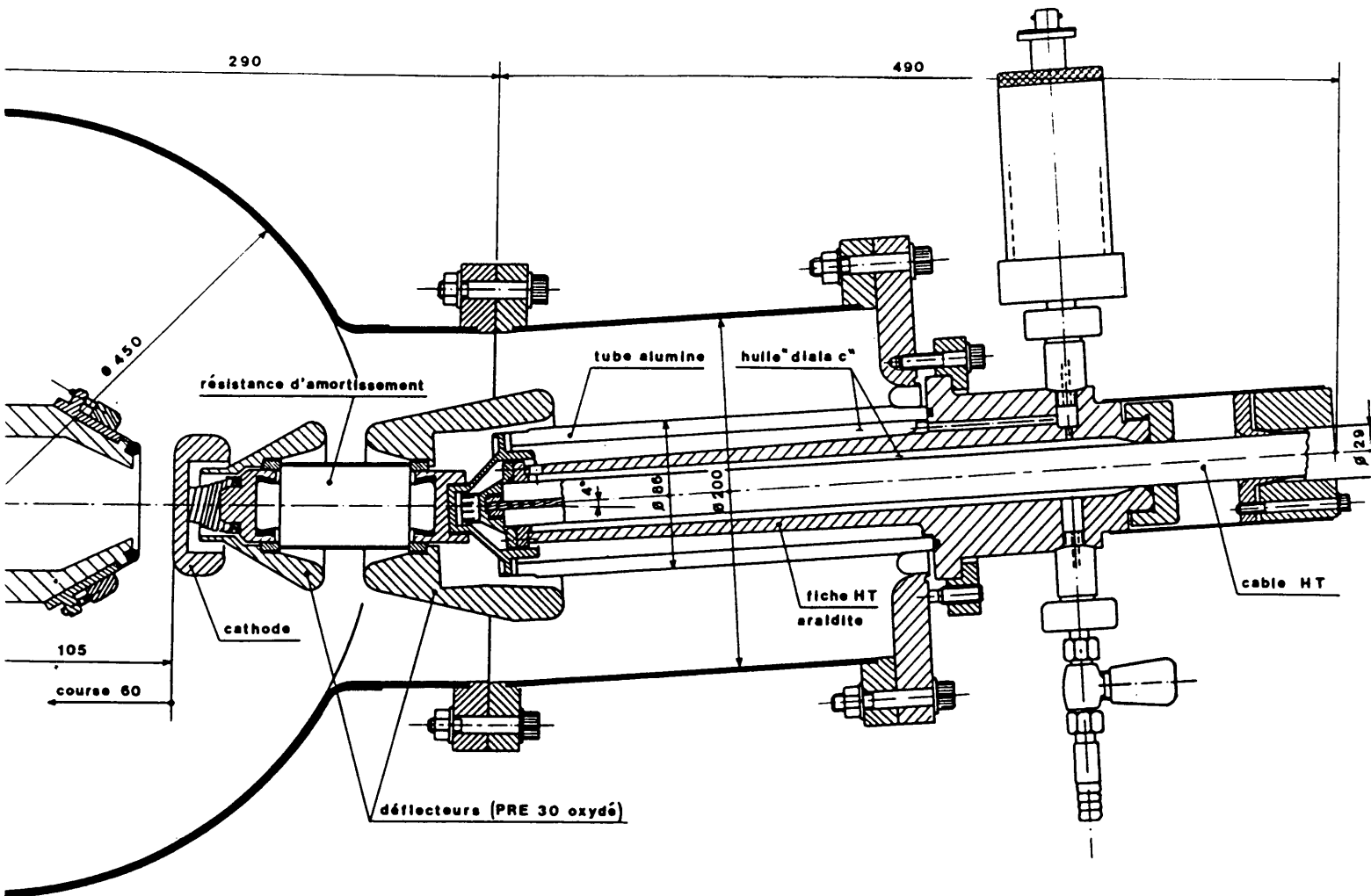
Le faisceau éjecté ne passant qu'une seule fois dans l'espace interélectrodes, avec des protons dont l'énergie cinétique est supérieure à 9 GeV, nous pouvons placer des écrans minces à chaque extrémité du septum pour stopper ces ions produits dans la chambre à vide.

Une feuille de 0,02 mm en aluminium suffit pour protéger la cathode contre cet effet parasite sans perturber le faisceau éjecté.



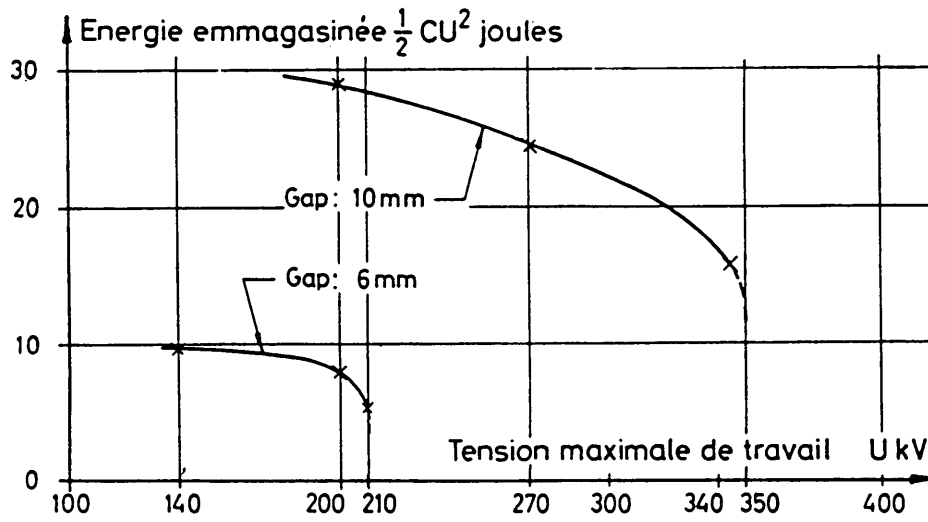
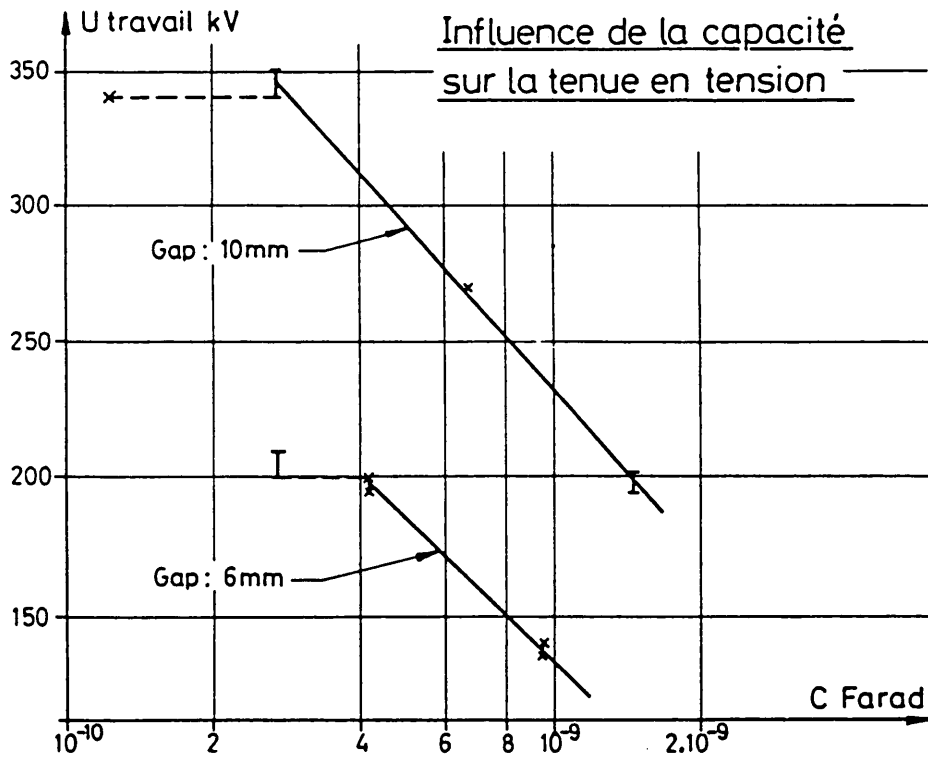
Support d'électrode

Fig. 5.5



Traversée haute tension

Fig. 5.6



Energie critique

Fig. 5.7

5.2 Septum utilisé pour l'éjection lente

5.2.1 Paramètres relatifs à l'éjection lente

Quantité de mouvement des protons éjectés	26 GeV/c
Energie cinétique des protons éjectés	25 Gev
Intensité du faisceau accéléré par impulsion	$\approx 2 \cdot 10^{12}$ protons
Taux de répétition	$\approx 2,4$ s entre impulsions
Durée de l'éjection	quelques centaines de ms
Déflexion électrostatique	0,26 mrad
Déplacement à la sortie du septum	0,103 mm

les deux derniers paramètres sont donnés pour $E = 8,8$ MV/m et $L_1 = 0,78$ m (voir paragraphe 2.2).

5.2.2 Construction

Les figures 5.8 et 5.9 donnent respectivement les coupes transversale et longitudinale.

Le support de septum est lié à la masse et il peut être déplacé radialement (course de 60 mm et angle de ± 3 mrad).

La cathode est tenue par deux supports isolants mobiles et sa course est de 60 mm.

Les mouvements sont assurés par trois moteurs triphasés commandés par des relais et nous avons une lecture potentiométrique des positions à distance. Les déplacements sont limités en fin de course par des microrupteurs; une comparaison des positions du septum et de la cathode évite le tamponnement.

Le pompage de l'enceinte à vide est assuré par une pompe ionique de 400 ℓ/s . Le prévidage est fait par une pompe turbomoléculaire en série avec une pompe à palettes.

5.2.3 Résultats haute tension obtenus

Après un conditionnement (paragraphe 4.3) de quelques heures effectué avec un écartement entre électrodes de 3 cm et un courant maintenu constant de 20 μA (figure 5.13 courbe 2) nous obtenons les caractéristiques $U = f(d)$ et $E = g(d)$ données par la figure 5.10.

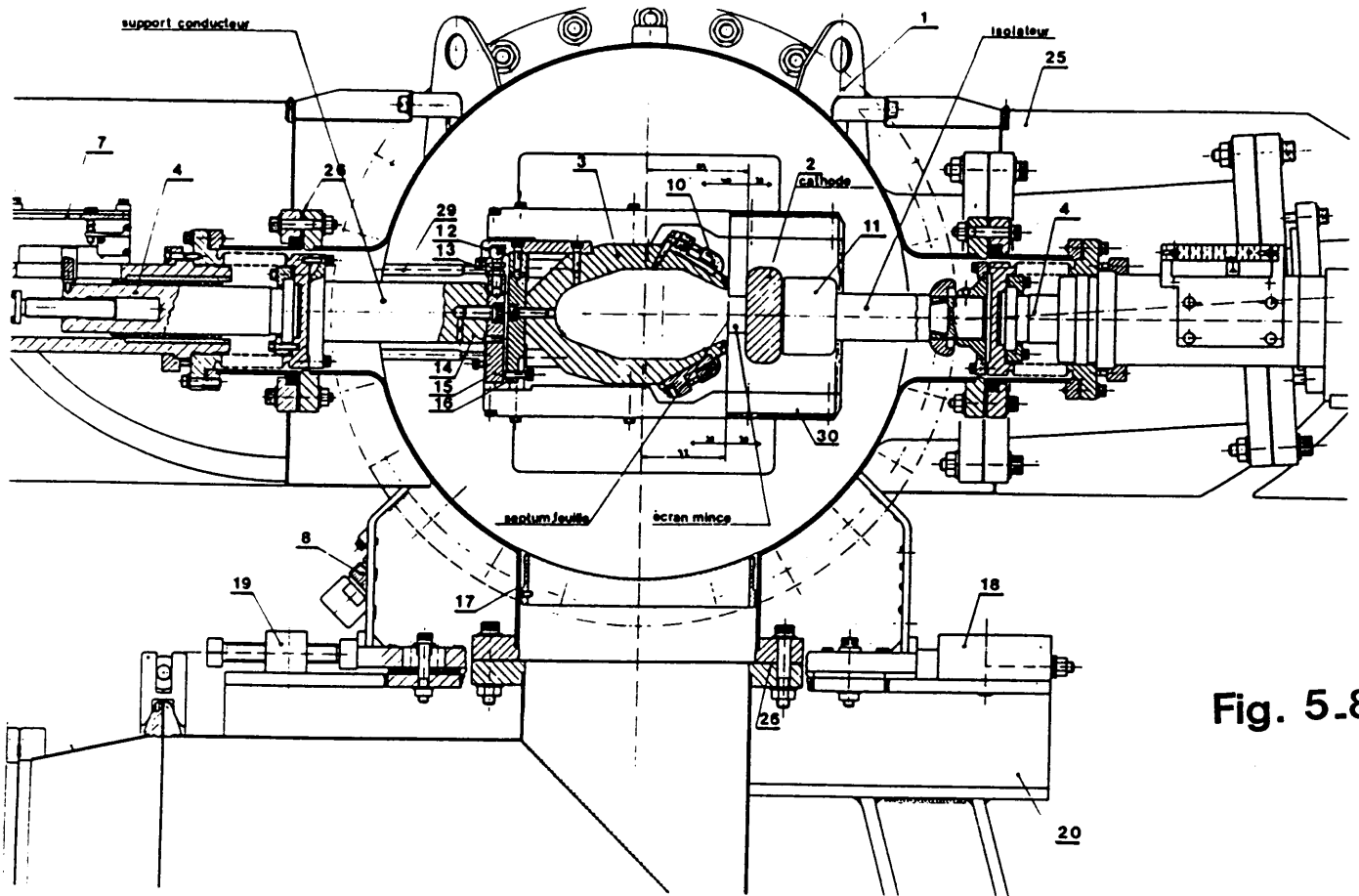


Fig. 5.8

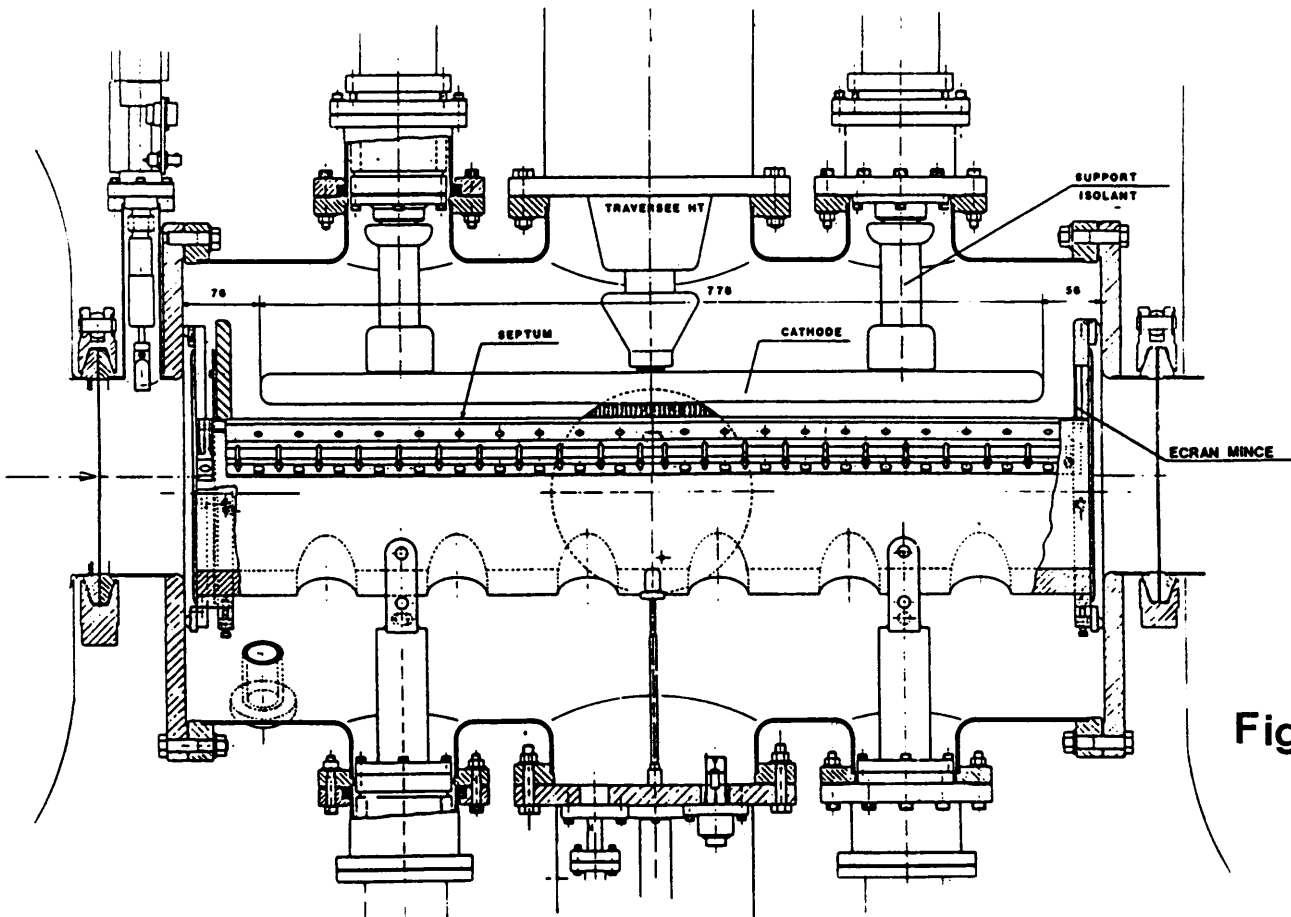
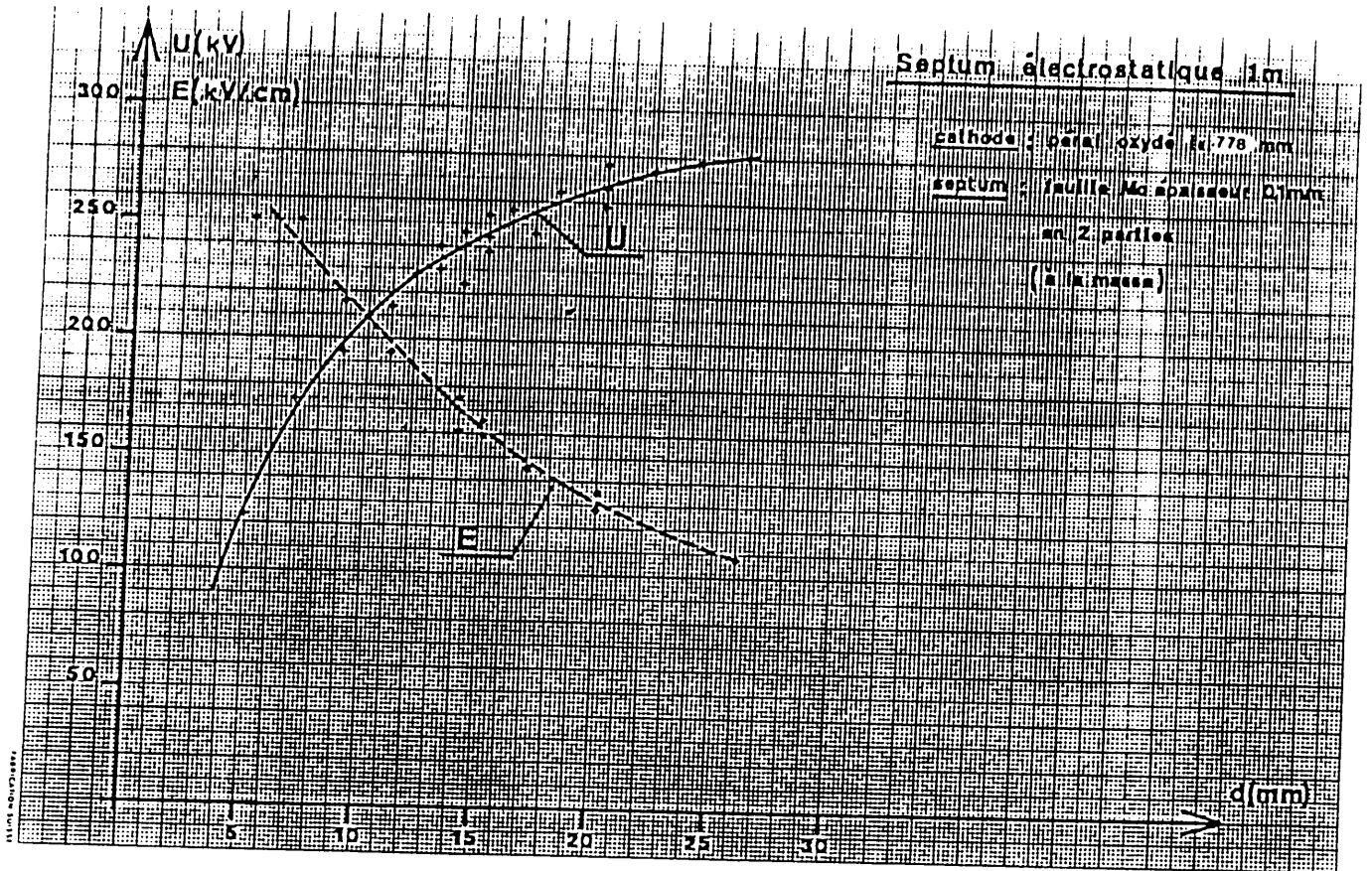


Fig. 5.9

Septum pour l'éjection lente



performances maximales après conditionnement

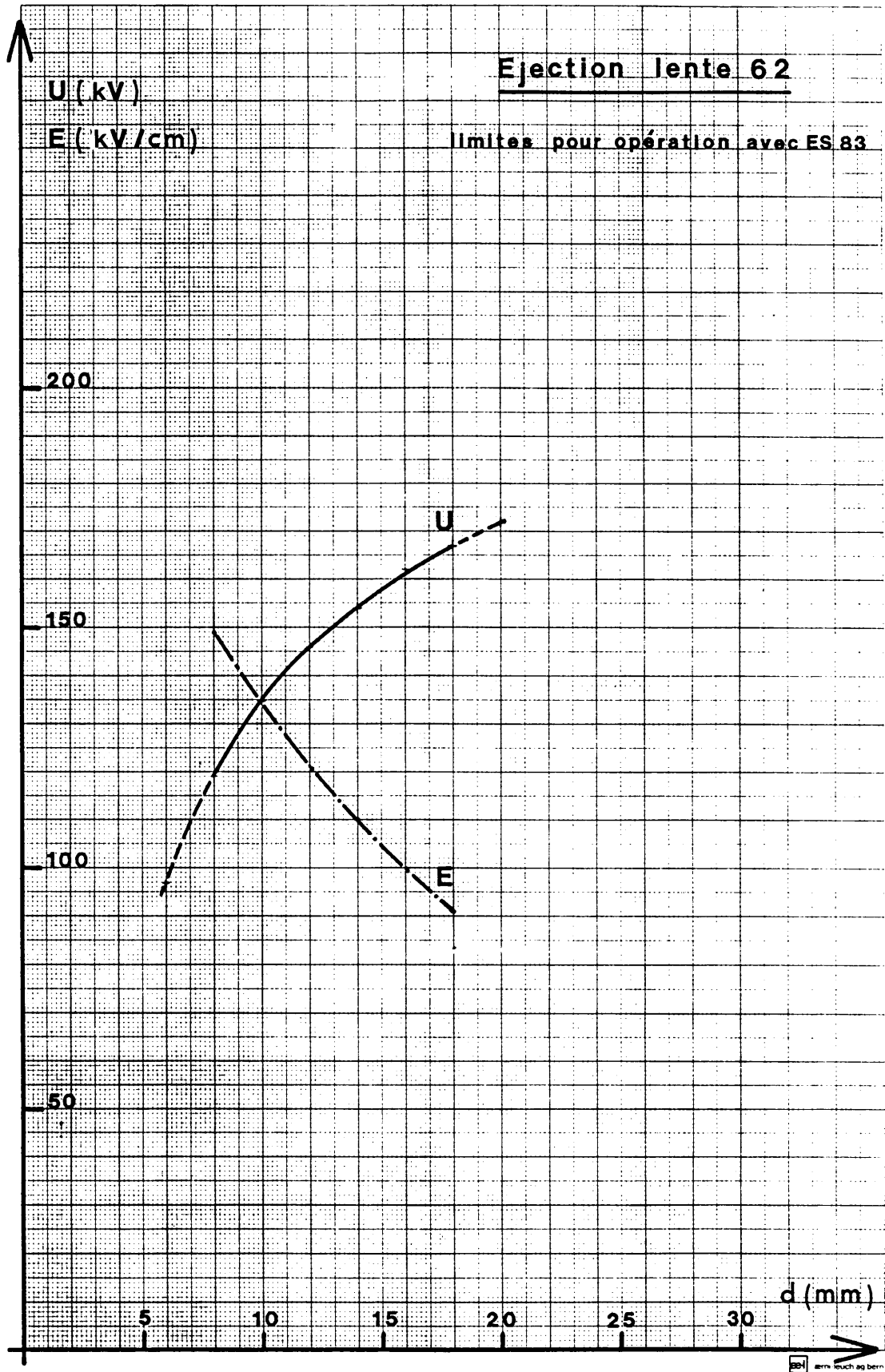
Fig 5.10

5.2.4 Limites permises pour l'opération

Nous devons tenir compte du déconditionnement des électrodes (paragraphe 4.4) et limiter le taux de claquage à une valeur suffisamment faible pour assurer un fonctionnement continu d'au moins une année sans changer la cathode.

La tension limite de travail en fonction de l'écartement des électrodes est fixée à environ 65% de la tension de conditionnement (Figure 5.11).

Dans les conditions actuelles la différence de potentiel requise est de 150 kV pour une distance entre électrodes de 17 mm.



Tensions maximales pour l'opération

Fig. 5.11

5.3 Septum utilisé pour le transfert continu

5.3.1 Paramètres relatifs au transfert continu

Quantité de mouvement des protons éjectés	10 GeV/c	
Energie cinétique des protons éjectés	9,1 GeV	
Intensité du faisceau accéléré par impulsion	$\approx 1,4 \cdot 10^{13}$ protons	
Taux de répétition	1,2 s entre impulsions	
Ejection en 5 ou 3 tours du faisceau dans le PS		
Déflexion électrostatique	1,21 mrad	pour E = 6,5 MV/m et L ₁ = 1,85 m
Déplacement à la sortie du septum	1,12 mm	

5.3.2 Construction

Les figures 5.12 et 5.8 donnent respectivement les coupes longitudinale et transversale.

Sauf pour l'angle, qui est réduit à ± 2 mrad, les déplacements et les limites sont ceux indiqués au paragraphe 5.2.2.

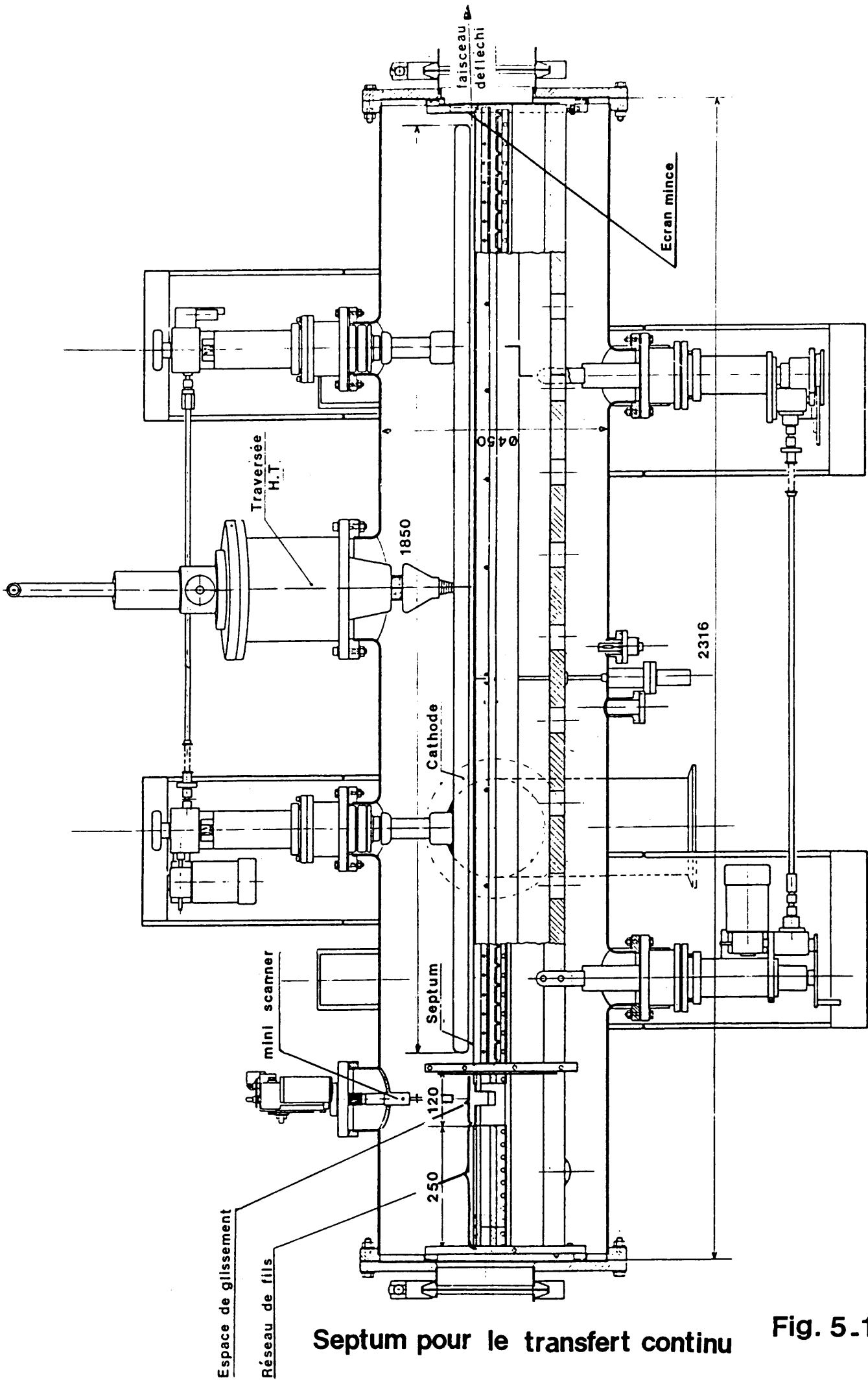
L'intensité du faisceau accéléré est plus élevée que pour l'éjection lente ($1,4 \cdot 10^{13}$ au lieu de $2 \cdot 10^{12}$ protons par impulsion) et nous disposons d'une place plus grande qui a permis l'emploi d'un diffuseur dont les caractéristiques sont les suivantes :

- un réseau constitué de 50 fils de tungstène ($\varphi_f = 0,15$ mm) espacés de 5 mm. Ces fils ne sont pas soumis à un champ électrique donc il n'y a ni flèche due à la force électrostatique ni champ de fuite.
- un espace de glissement de 120 mm entre le réseau de fils et la feuille de molybdène de 0,1 mm constituant le septum.

L'enceinte est pompée par une pompe ionique de 400 μ /s et le prévidage est réalisé par une pompe turbomoléculaire en série avec une pompe à palettes.

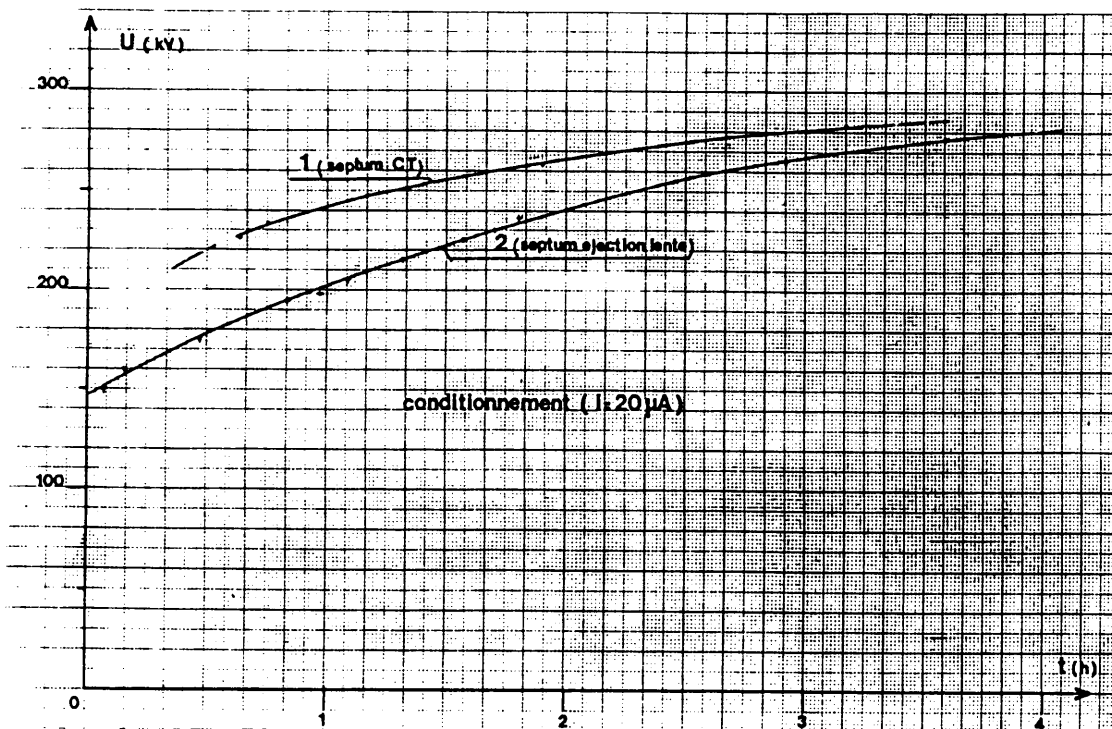
5.3.3 Résultats haute tension obtenus

Après un conditionnement préalable effectué avec une distance entre électrodes de 3 cm et un courant constant de 20 μ A (figure 5.13 courbe 1) nous obtenons les résultats $U = f(d)$ et $E = g(d)$ donnés par la figure 5.14.



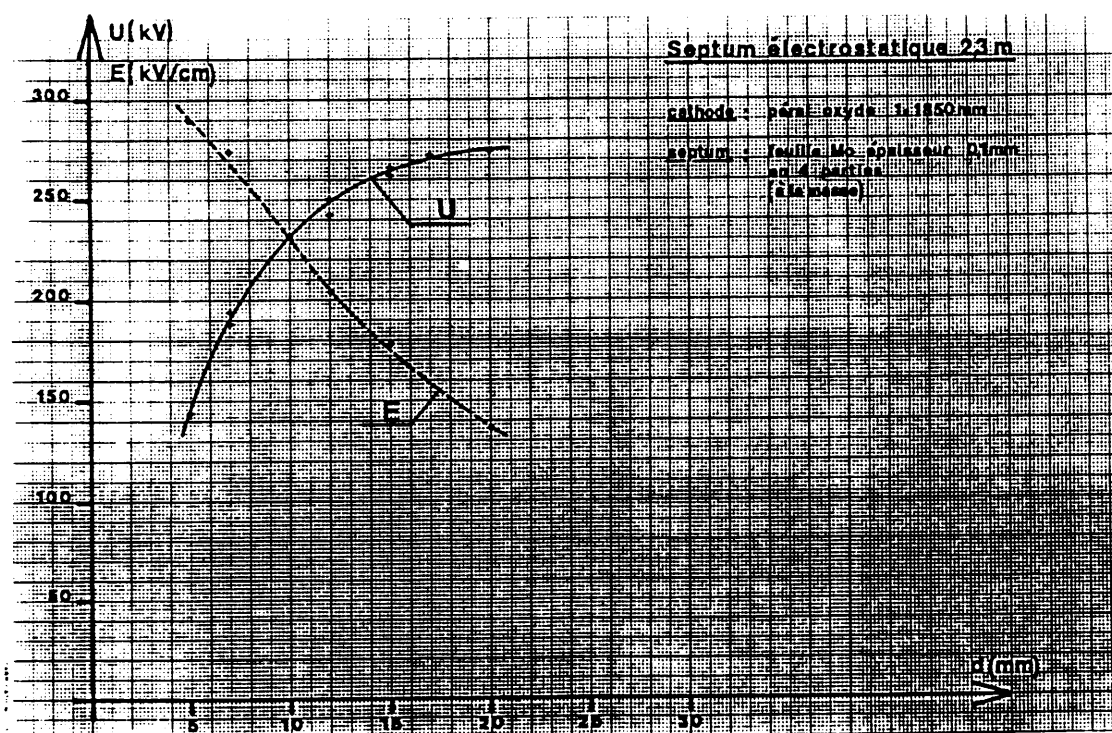
Septum pour le transfert continu

Fig. 5-12



Conditionnement haute tension

Fig. 5.13



performances maximales après conditionnement

Fig. 5.14

6. SEPTUM ELECTROSTATIQUE UTILISE DANS LE LEAR

6.1 Introduction

En plus des expériences à haute énergie faites avec des protons le CERN a entrepris depuis quelques années un programme d'études utilisant des antiprotons.

Les antiprotons sont produits par bombardement d'une cible avec des giclées de protons fournies par le PS. Ces antiprotons sont collectés à 3,5 GeV/c et injectés dans un accumulateur (AA).

Le faisceau d'antiprotons, accumulé pendant des heures, est en même temps soumis à un processus de "refroidissement stochastique". Par réduction de son émittance le faisceau devient plus dense, ce qui permet de continuer son accumulation.

Lorsque les antiprotons ont été emmagasinés en quantité suffisante dans l'accumulateur, ils sont renvoyés dans le PS pour :

- être accélérés jusqu'à 26 GeV/c puis injectés dans le SPS. Dans le SPS ces antiprotons sont accélérés avec des protons circulant en sens inverse (également fourni par le PS à 26 GeV/c) jusqu'à une énergie cinétique de 270 GeV. Les protons et antiprotons de même énergie sont ensuite amenés en collision frontale.
- être décélérés pour alimenter l'anneau d'antiprotons à basse énergie (LEAR). Avec le LEAR nous pouvons utiliser des antiprotons, ayant des énergies cinétiques comprises entre 5,3 MeV et 1,3 GeV, pour les expériences.

La figure 6.1 représente ce complexe de machines utilisées pour les expériences de physique à basse énergie.

Le système d'éjection très lente des antiprotons contenus dans le LEAR, vers les zones expérimentales utilise un septum électrostatique comme premier élément.

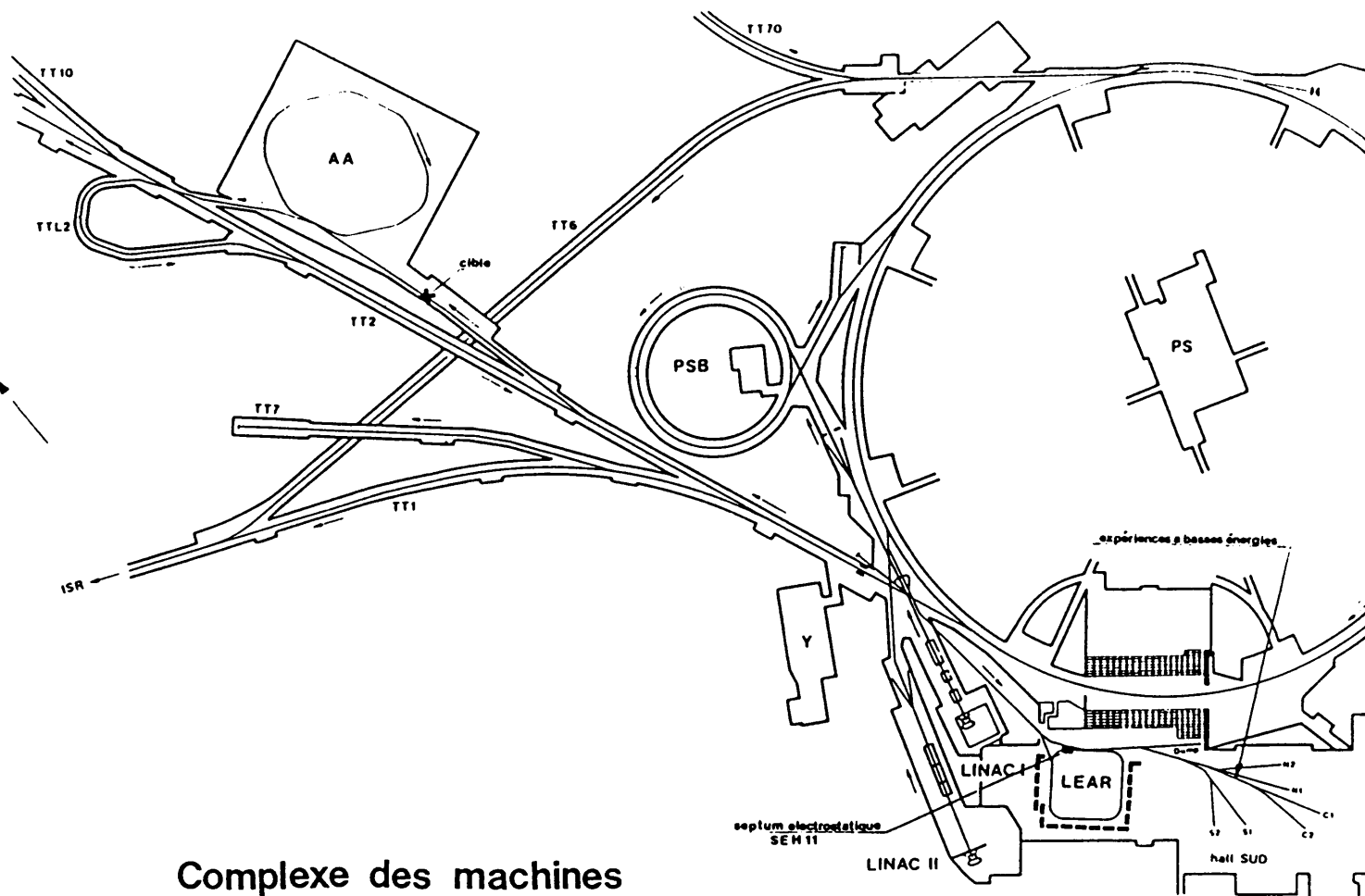
Le cahier des charges de ce septum (SEH 11) fait apparaître des contraintes particulières.

Dans ce chapitre nous présentons le déroulement chronologique de l'étude de ce septum en indiquant les solutions envisagées et retenues. Nous abordons ensuite la réalisation et donnons les performances obtenues.

6.2 Cahier des charges

6.2.1 Caractéristiques du LEAR

Le LEAR doit fonctionner avec les antiprotons (\bar{p}) mais les réglages des



Complexe des machines

Fig. 6.1

différents paramètres peuvent être effectués avec des protons de même énergie dont la production est considérablement moins onéreuse.

- Injection

énergie cinétique	175 MeV
quantité de mouvement	0,6 GeV/c
intensité du faisceau	10^9 \bar{p} injectés à chaque période de 1000 s.

- Ejection

énergie cinétique	5,3 MeV à 1,3 GeV
quantité de mouvement	0,1 GeV/c à 2 GeV/c
intensité	10^6 \bar{p} éjectés par seconde

- Pression résiduelle (équivalent N_2) $1,3 \cdot 10^{-10}$ à $1,3 \cdot 10^{-9}$ Pa
(10^{-12} à 10^{-11} Torr).

étuvage 300°C durant au moins 24 heures.

6.2.2 Specifications du septum SEH 11

Tableau 6.2

Quantité de mouvement GeV/c	Distance entre électrodes mm	Déflexion requise mrad
2	10	3
0,3	20	6
0,1	20	6

- Longueur disponible : 860 mm entre brides d'extrémité
- Dimensions du support de septum (passage du faisceau circulant)
hauteur $h = 70$ mm au centre (65 mm au niveau de la feuille)
profondeur $c = 110$ mm
- Position du septum : 55 ± 10 mm, résolution 0,1 mm
(mesurée depuis l'axe du faisceau circulant)
- Angle du septum : -8 à +2 mrad, résolution 0,1 mrad
- Distance entre électrodes : 10 à 20 mm, résolution 0,1 mm
- Homogénéité du champ électrique: quelques % sur la hauteur utile de la zone centrale

6.3 Contraintes

6.3.1 Double polarité

Lors des réglages il est souhaitable d'utiliser des protons au lieu des antiprotons dont la production est coûteuse.

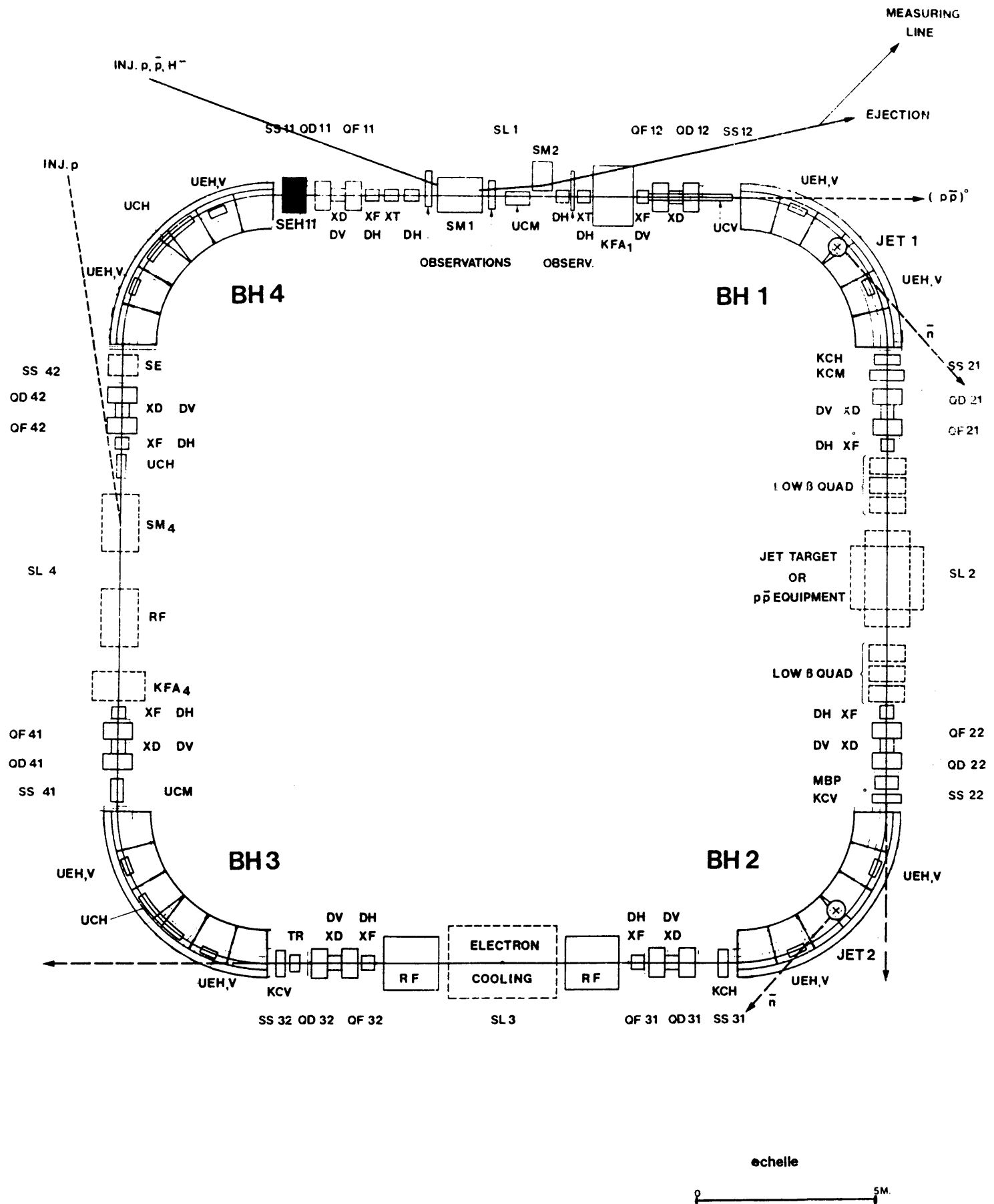
Leurs charges opposées nécessitent un changement de polarité pour le potentiel appliqué à l'électrode haute tension du septum.

6.3.2 Vide très poussé

Une pression résiduelle totale inférieure à 10^{-9} Pa est nécessaire au fonctionnement du LEAR (elle assure une durée de vie suffisante au faisceau).

Pour obtenir une pression aussi basse, il faut :

- choisir des matériaux à faible taux de dégazage.
- être strict dans la préparation des composants (usinage, nettoyage et traitements thermiques).
- utiliser seulement des joints métalliques
- avoir une vitesse de pompage suffisante en choisissant des pompes adaptées aux gaz résiduels et en ayant des grandes conductances.



LEAR Ensemble de la machine

Fig. 6.3

Pour atteindre cet objectif le septum (cuve entièrement équipée) doit, en plus, subir un étuvage complet à 300°C durant au moins 24 heures. Il faut donc :

- que l'élasticité des matériaux soit conservée et que les contraintes mécaniques soient admissibles à 300°C.
- tenir compte des différences de dilatation (température élevée, gradient de température et matériaux différents).
- prévoir un démontage aisé des éléments annexes (moteurs, encodeurs de position) qui ne supportent pas une température aussi élevée. Retrouver les positions initiales après remontage.

6.3.3 Encombrement

L'emplacement du septum électrostatique SEH 11 dans le LEAR est montré dans la figure 6.3. La longueur disponible, y compris les couvercles d'extrémités, est limitée à 860 mm.

A 2 GeV/c la distance entre électrodes est fixée à 10 mm et la déflexion requise est de 3 mrad.

Cette déflexion nécessite un champ intégré $E.L_1 = 5,43$ MV donné par les équations 2.2 et 2.4 ($\beta = 0,905$).

La tension nécessaire, fonction de la longueur de l'électrode, sera :

Tableau 6.4

L_1 en m	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	1
U en kV	108,6	98,7	90,5	83,5	77,6	54,3

Pour obtenir un champ électrique acceptable, il faut choisir une électrode aussi longue que possible mais il est nécessaire de garder une distance minimale de 30 mm entre les extrémités de l'électrode et les couvercles pour tenir une tension suffisante.

6.3.4 Système de contrôle

Le septum électrostatique SEH 11 n'est qu'un élément d'une machine complexe contrôlée par un ordinateur.

Les commandes sont données depuis une console, éloignée de l'équipement, par un personnel d'opération qui n'a pas une connaissance spécialisée de tous les équipements.

Il est donc nécessaire d'incorporer dans les programmes du contrôle des tests pour valider les paramètres demandés et de ne laisser apparaître sur l'écran que les renseignements utiles à l'opération.

Pour pallier une défaillance de l'ordinateur chaque équipement doit être localement autoprotégé.

L'ensemble doit être homogène donc nous utiliserons au maximum un certain "standard" pour réduire le coût et faciliter la maintenance.

6.4 Choix des électrodes

Une électrode anodisée comme celle utilisée en paragraphe 5.1.1. donne de bons résultats lorsqu'elle fonctionne comme cathode mais ses performances sont très réduites dans l'autre polarité.

De plus l'aluminium, surtout après anodisation et colmatage à l'eau, a un taux de dégazage élevé. [19]

Il fallait donc trouver un matériau mieux adapté aux pressions résiduelles très basses et permettant des performances haute tension suffisantes dans les deux polarités.

6.4.1 Essais en petites dimensions - choix du matériau

Une étude des matériaux susceptibles de convenir a été faite en utilisant des électrodes de petites dimensions et pour les deux polarités requises.

- électrode haute tension : dimensions 60 x 80 x 20 mm³ (massive)

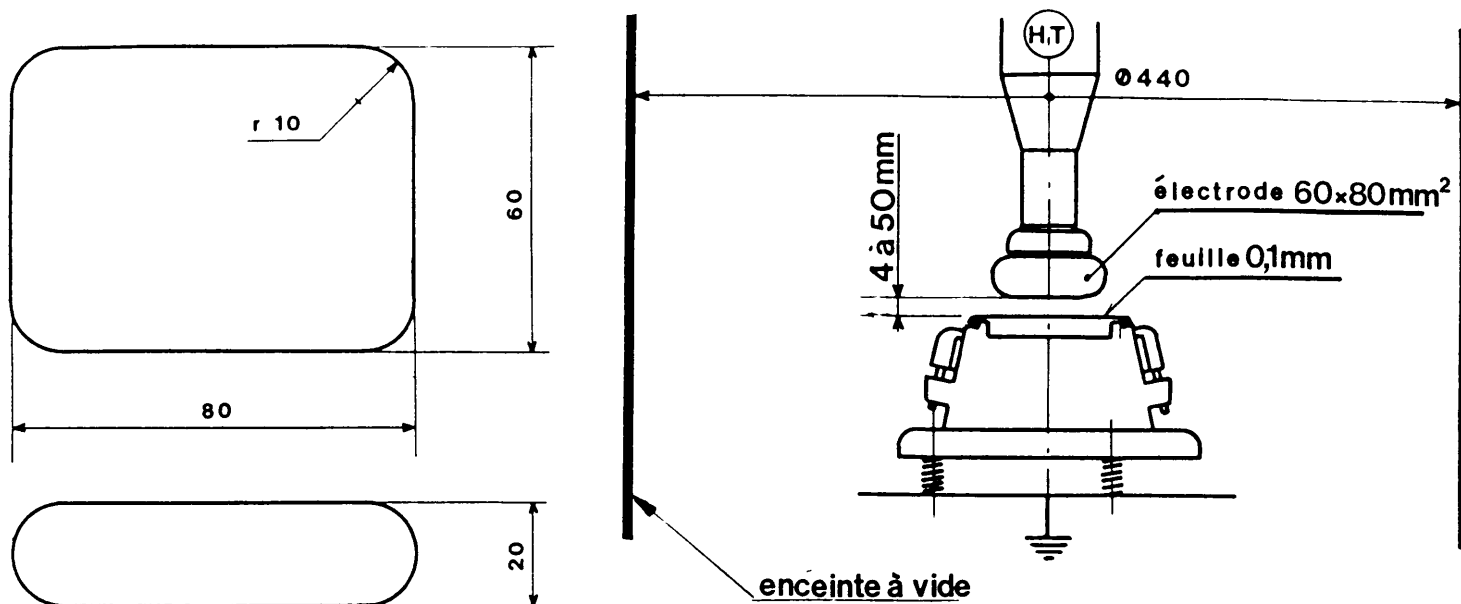
L'électrode est en acier inoxydable ou en titane allié (TA6V) et différents usinages sont comparés : polissage miroir, usinage très fin au diamant et billage en utilisant des billes de verre (30 à 90 µm de diamètre en suspension dans l'eau).

- feuille constituant le septum épaisseur 0,1 mm en molybdène ou en tantale

La feuille est en une ou plusieurs parties et nous vérifions son comportement haute tension après étuvage à 800°C (température atteinte lors d'un brasage).

La figure 6.5a indique les dimensions de l'électrode HT et la figure 6.5b montre la géométrie de l'ensemble du système haute tension. La distance entre l'électrode et la feuille est réglable de 4 à 50 mm.

Le modèle est mis sous vide par une pompe turbomoléculaire et la pression obtenue lors des essais varie de 1 à $2 \cdot 10^{-4}$ Pa.



a) Electrode

b) Montage pour essais HT

Fig - 6.5

ELECTRODES DE PETITES DIMENSIONS

		electrode haute tension d=15mm					
		acier inox. 18.12 Mo+N	Mo déposé sur acier inox.	titane TA6V			
				poli.mécanique	usinage diamant	billage	
feuille 0,1 mm	tantale	P (196) 190kV N					
		P (264) 250 kV N (260) 210 kV	N (210) 200 kV fort courant 20µA	P (285) 240 kV N (290) 235 kV	P (260) 250 kV N (270) 250 kV	N (165) 120 kV fort courant 20µA	
	molybdène	2 parties			P (260) 250 kV N (270) 250 kV	P (250) 240 kV	
		étuvé 800°C			P (310) 270 kV N (315) 260 kV		

Résultats HT obtenus

tableau 6.6

L'alimentation haute tension est fournie par deux générateurs de calibre 500 kV (l'un de polarité positive et l'autre de polarité négative). Ces générateurs peuvent être réglés en tension ou en courant.

6.4.1.1 Procédure

- a) Après usinage et préparation mécanique (polissage, billage ...) l'électrode et la feuille sont soigneusement nettoyées :
 - dégraissage au perchloréthylène en phase vapeur avec condensation sur la pièce à nettoyer suivi d'un séchage
 - nettoyage de 15 min dans une lessive alcaline (PH 11, Diversey 708) avec agitation par ultrasons
 - rinçage à l'eau déminéralisée puis à l'alcool
 - séchage à l'air chaud.

- b) Le couple d'électrodes est monté dans le modèle pour essai HT et dès que la pression résiduelle est inférieure à $2 \cdot 10^{-4}$ Pa nous faisons un conditionnement des éléments soumis à un champ électrique (traversée, déflecteurs ...). Cette opération est effectuée pour un écartement des électrodes de 50 mm et en imposant au générateur un courant continu de 20 μ A.

La tension atteinte est de 350 kV à 400 kV en quelques heures.

- c) Nous réduisons ensuite la distance entre électrodes à 15 mm et faisons le conditionnement des électrodes avec un courant inférieur à 10 μ A. Quelques minutes suffisent pour faire ce conditionnement. Cette opération est délicate: il faut détruire les micropointes et nettoyer les surfaces avec un courant suffisant mais la localisation prolongée du courant sur une zone chauffe les électrodes (paragraphe 4.3).

- d) Nous cherchons la tension limite de travail (critère : taux de claquage inférieur à 1 claquage par heure) en augmentant la tension par paliers de 10 kV.

6.4.1.2 Résultats

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 6.6.

- P indique que l'électrode haute tension est alimentée en tension continue positive
- N indique que l'électrode haute tension est alimentée en tension continue négative

Les tensions obtenues sont données pour une distance entre électrodes de 15 mm :

- la valeur entre parenthèses est la tension de conditionnement
- la valeur suivante est la tension limite de travail qui correspond à un taux de claquages d'un claquage par heure.

Lorsque plusieurs essais sont faits avec les mêmes couples d'électrodes seule la valeur moyenne figure dans le tableau.

Remarques

- 1) L'état de surface des électrodes est un facteur très important: le dépôt de molybdène sur l'acier inoxydable donne de mauvais résultats car l'émission de champ, due à un mauvais état de la surface, est importante ($i = 20 \mu\text{A}$). Il en est de même si l'électrode en titane est satinée par billage (billes de verre de 30 à 90 μm).

L'état de surface selon le mode d'usinage est mis en évidence par les photos de l'annexe 7.

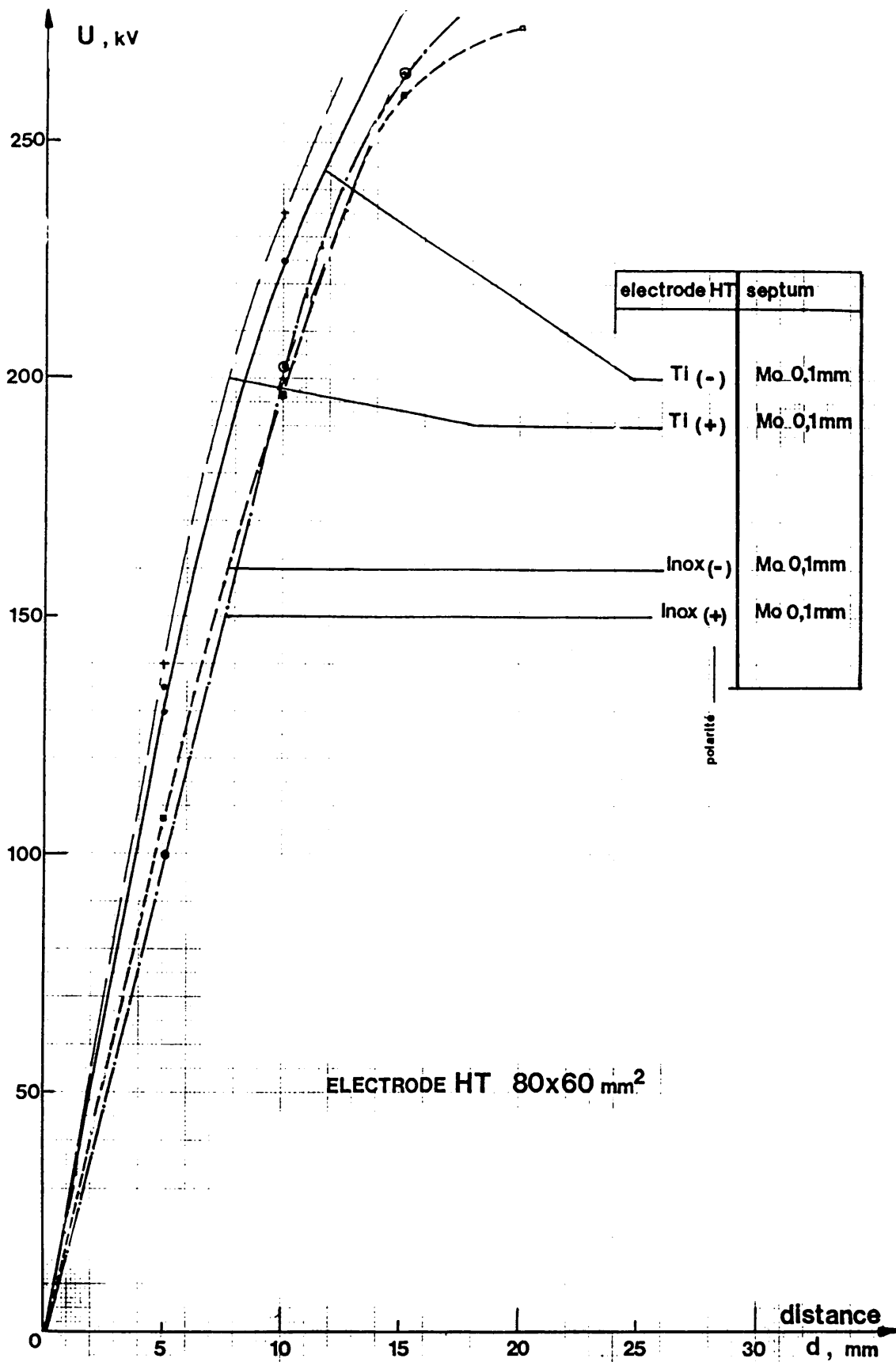
- 2) Les meilleurs résultats sont obtenus si l'on utilise une feuille en molybdène pour le septum (à la masse).

L'acier inoxydable ou le titane allié (TA6V) peuvent convenir, s'il sont parfaitement polis, comme matériau pour l'électrode haute tension.

Le titane donne des résultats légèrement supérieurs mais son conditionnement est plus délicat que celui de l'acier inoxydable. Le poids de l'électrode est réduit si l'on utilise du titane.

Les tensions de conditionnement les plus favorables obtenues en fonction de l'écartement des électrodes et pour ces deux matériaux (polis miroir) sont donnés par la figure 6.7.

tension de conditionnement



Tension de conditionnement selon les matériaux des électrodes

Fig .6.7

6.4.2 Effet des jonctions du septum

- Le support de septum, qui sert à tendre la feuille et limite la zone sans champ électrique occupée par le faisceau circulant, est fabriqué en acier inoxydable.

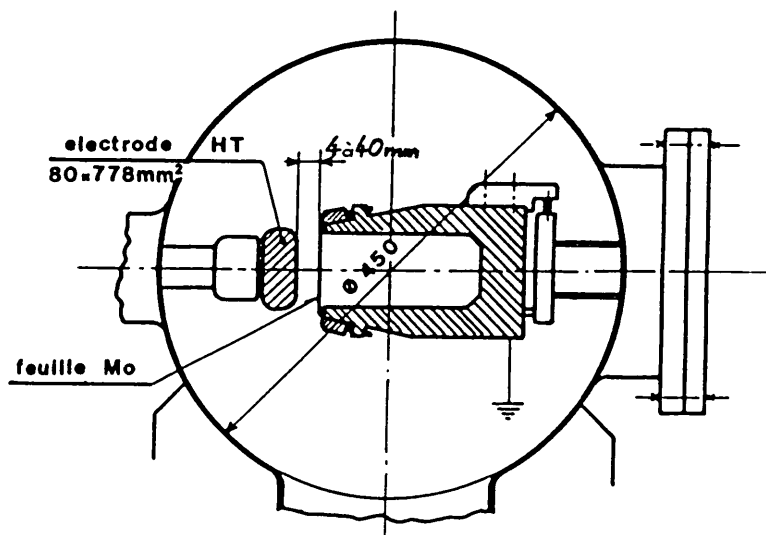
Ce matériau est choisi pour ses bonnes caractéristiques mécaniques et son faible taux de dégazage. [19]

- Les résultats haute tension précédents nous incitent à choisir une feuille de molybdène pour le septum.

- Les coefficients de dilatation de ces deux matériaux sont très différents ($17,3 \cdot 10^{-6}$ pour l'acier inoxydable et $5,4 \cdot 10^{-6}$ pour le molybdène) et ils conduisent à des écarts de dimensions importants lors de l'étuvage à 300°C (plus de 3 mm pour une longueur initiale de 1 m).

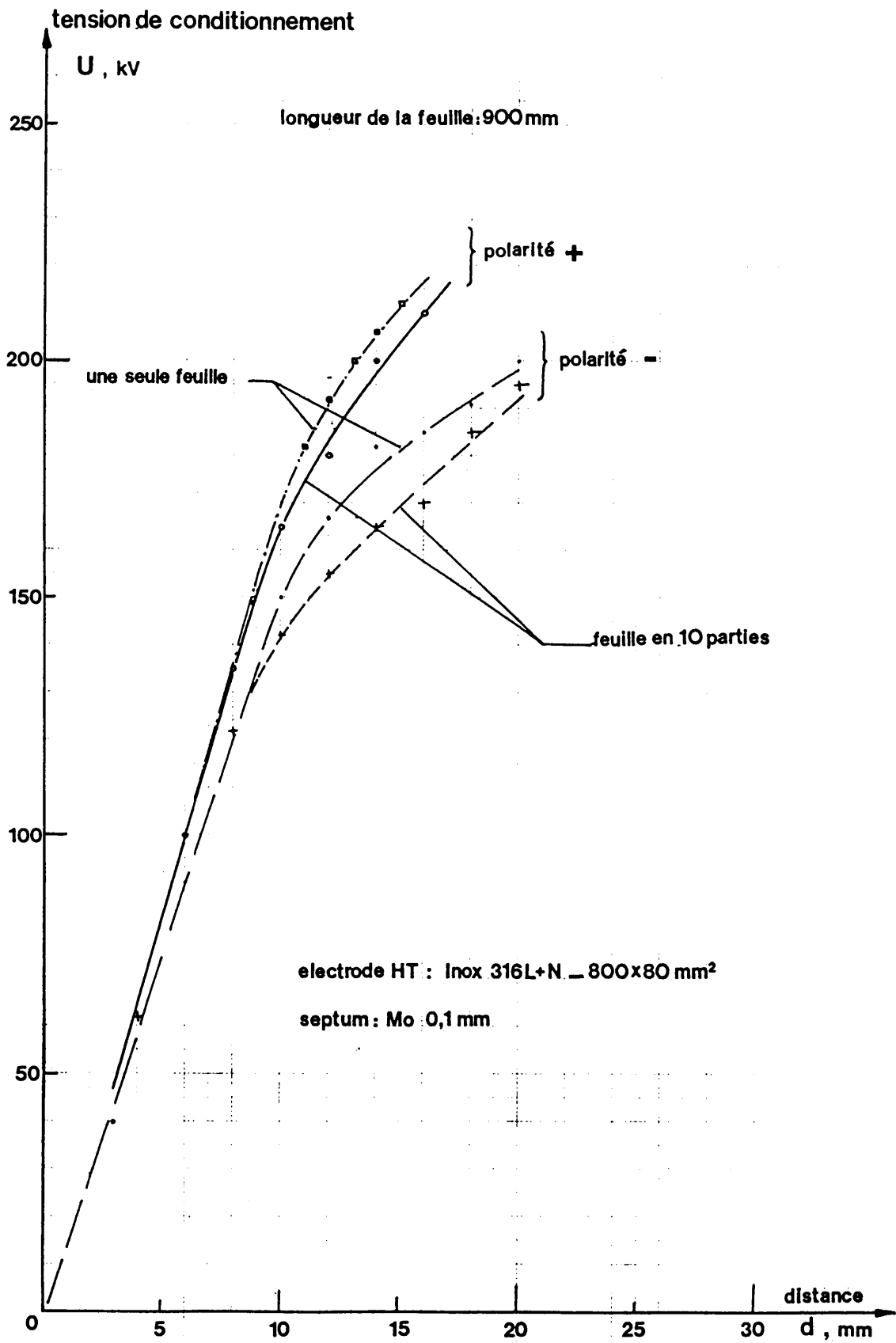
Pour cette raison la feuille de molybdène est partagée en 8 sections de 96 mm et nous laissons un jeu de 0,1 mm entre deux éléments consécutifs. Chaque section est tendue sur deux barreaux de molybdène.

Les bords de la feuille (en face de l'électrode haute tension) peuvent augmenter considérablement l'émission de champ (bavure de découpe). Pour réduire cet effet la feuille est découpée entièrement par un procédé chimique suivi d'une finition électrolytique (paragraphe 3.4.1). Voir figure 6.14 c.



Coupe du modèle

Fig.6.8



Effet des jonctions du septum

Fig. 6.9

En utilisant une électrode approximativement de vraies grandeurs ($800 \times 60 \text{ mm}^2$) en acier inoxydable et une feuille de molybdène, en une partie ou en 10 sections, nous avons fait des essais comparatifs. La géométrie des électrodes est donnée par la figure 6.8 et les résultats sont indiqués sur la figure 6.9.

Si les éléments sont correctement préparés et mis en place la tension obtenue, en fonction de l'écartement des électrodes, est faiblement réduite.

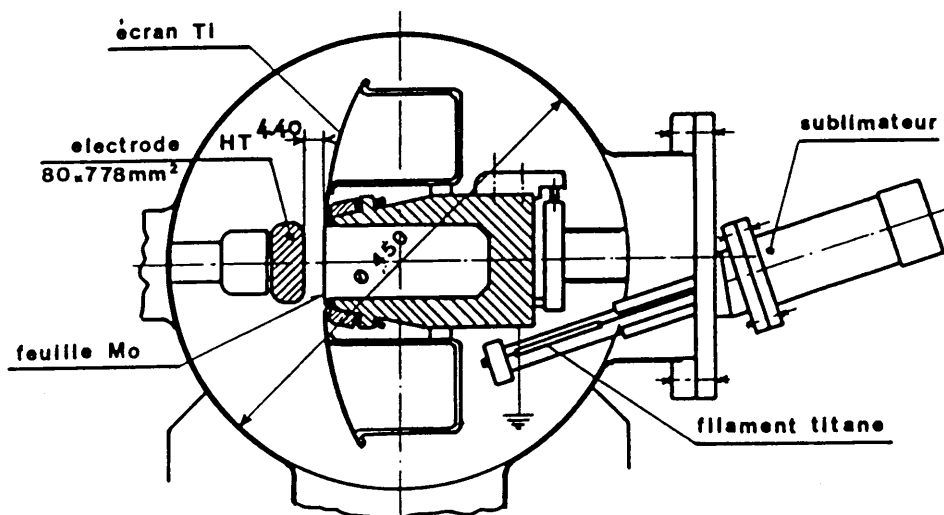
6.4.3 Effet des écrans

Pour obtenir la pression résiduelle très basse qui est requise ($< 10^{-9} \text{ Pa}$) nous utilisons des sublimateurs à titane. La vitesse de pompage obtenue dépend de la surface recouverte de titane lors de la sublimation et de la conductance offerte aux molécules du gaz résiduel. Il faut environ 10 monocouches de titane sur les éléments utilisés pour le pompage.

Pour obtenir une vitesse de pompage maximale nous avons choisi de placer les sublimateurs directement dans l'enceinte à vide.

Il fallait éviter la métallisation des supports isolants et de la traversée haute tension en plaçant des écrans qui les protègent contre la vaporisation des sublimateurs. Ces écrans, recouverts de titane, ont une grande surface et ils participent au pompage.

Un essai haute tension dans les deux polarités, et avec la géométrie de la figure 6.10 a montré que la solution était satisfaisante.



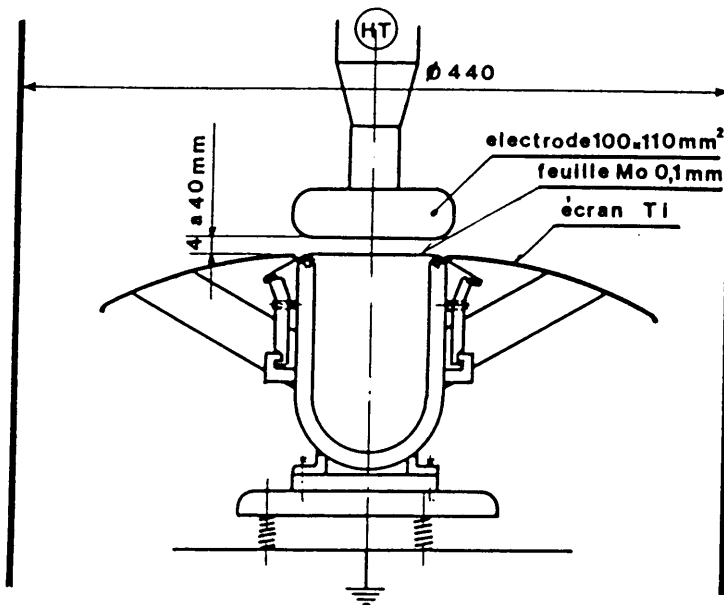
test avec sublimateur

Fig.6.10

6.4.4 Géométrie retenue

- La hauteur du septum est fixée à 70 mm par le cahier des charges.
- Pour obtenir une homogénéité du champ électrique suffisante dans la zone utile pour l'éjection nous choisissons une électrode haute tension d'une hauteur de 100 mm (partie plane = 80 mm).

La présence des écrans conduit à la géométrie de la figure 6.11 pour les essais des petites électrodes dans le modèle.



géométrie retenue

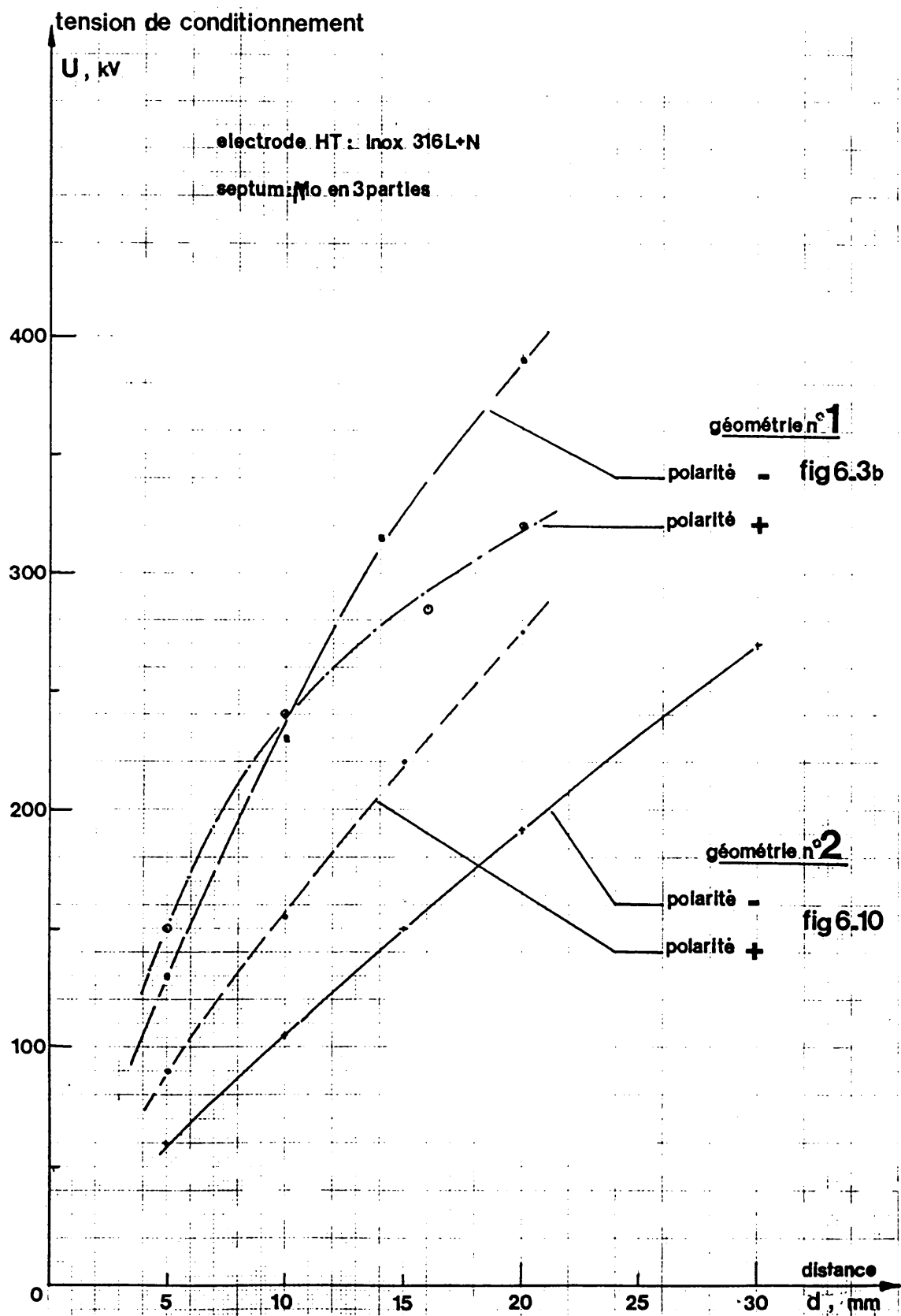
Fig.6.11

Des essais comparatifs entre les géométries représentées par les figures 6.5 b et 6.11 ont donné les résultats de la figure 6.12.

La présence d'une électrode plus large opposée au raccordement de la feuille avec les écrans réduit considérablement les résultats obtenus surtout si l'électrode haute tension est cathode.

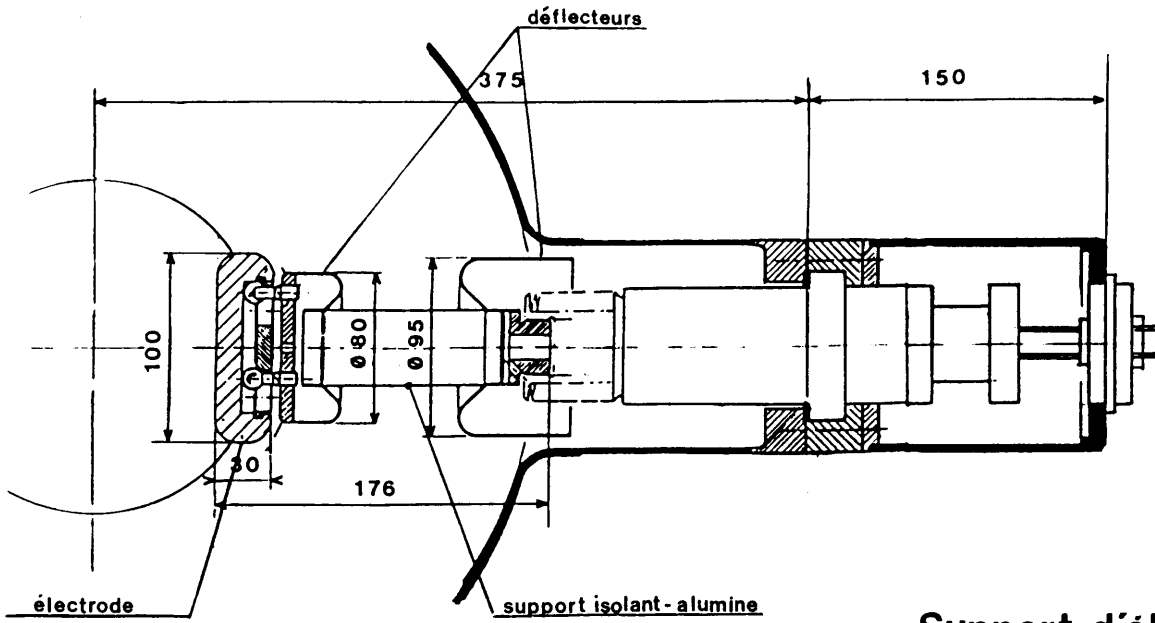
6.5 Choix des isolateurs et déflecteurs associés

L'alumine est retenue comme matériau de la traversée et des isolateurs pour les raisons invoquées au paragraphe 5.1.3 et en raison de son faible taux de dégazage.

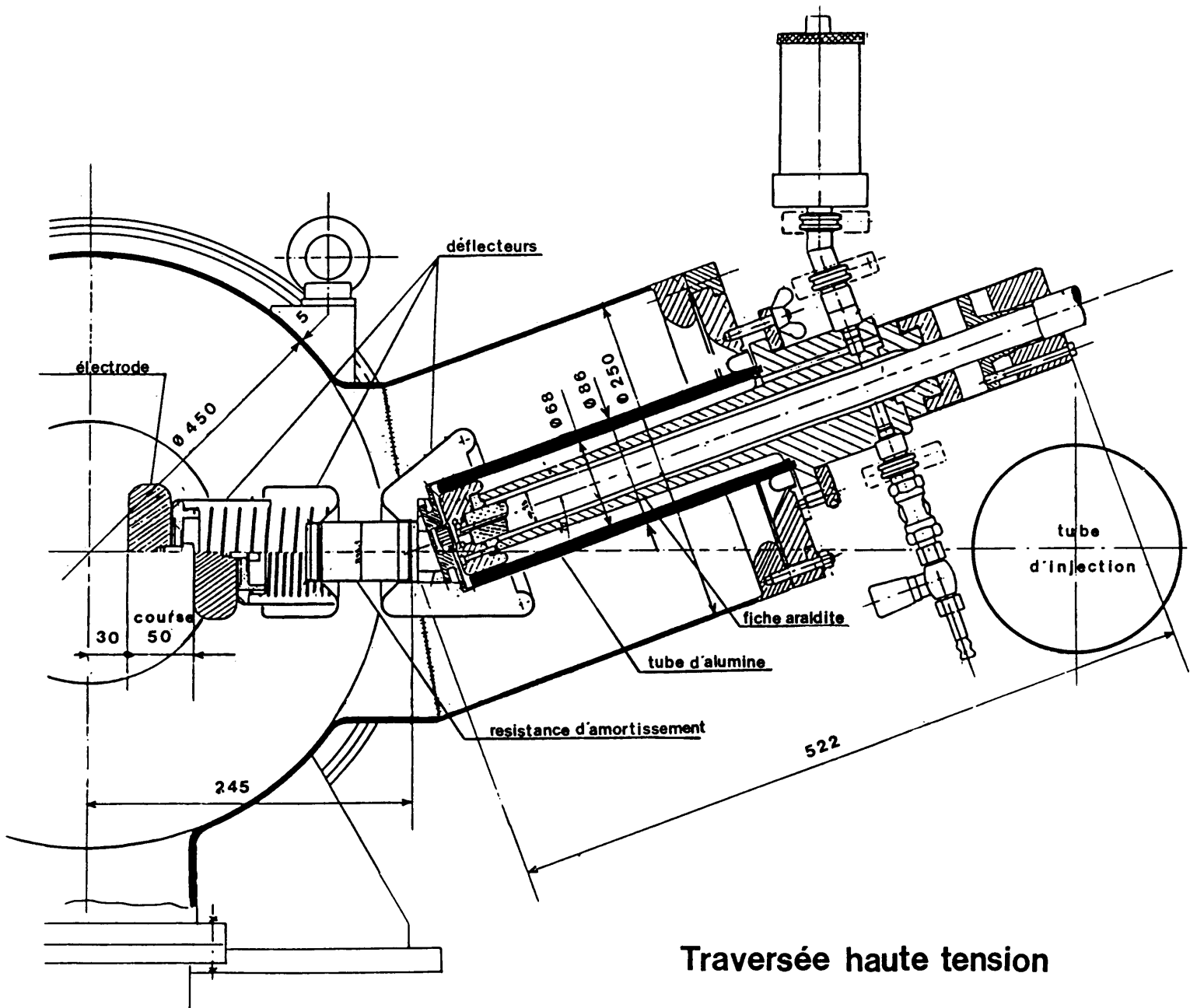


Influence de la géométrie des électrodes dans le modèle pour essais HT

Fig.6.12



Support d'électrode



Traversée haute tension

Fig. 6.13

Les déflecteurs associés sont soumis à des champs électriques importants et dans les deux polarités. Le titane utilisé comme électrode haute tension donne de bons résultats s'il est soigneusement poli, le coefficient de dilatation du titane ($8,5 \cdot 10^{-6}$) est voisin de celui de l'alumine ($\approx 8 \cdot 10^{-6}$) et son brasage sur l'alumine est aisé.

Par l'emploi de déflecteurs brasés sur l'alumine on réduit les surfaces exposées au vide en évitant les nombreuses pièces d'assemblage.

La figure 6.13 montre la coupe d'un support isolant ainsi réalisé.

6.6 Traversée haute tension et résistance d'amortissement

La traversée haute tension est réalisée avec un tube d'alumine et elle est dimensionnée pour permettre de pousser le conditionnement à une tension suffisante.

Un déflecteur en titane bien poli termine la traversée pour réduire le champ électrique sur la brasure titane-alumine et à l'extrémité de la fiche en araldite. La proximité de la ligne d'injection nous oblige à incliner la traversée haute tension.

Une résistance d'amortissement est insérée entre la traversée et l'électrode haute tension. Elle diminue les déformations de la feuille constituant le septum par réduction de l'énergie dissipée entre électrodes lors d'un claquage haute tension.

Cette résistance est réalisée en enroulant un fil de constantan d'un diamètre de 0,2 mm sur un support en alumine, sa valeur est d'environ 400 ohms.

Deux déflecteurs en titane poli terminent la résistance et réduisent le champ électrique à sa surface.

La figure 6.13 montre la traversée haute tension et la résistance d'amortissement.

6.7 Déplacement des électrodes

Les positions et courses spécifiées sont :

- Position radiale du septum de 45 à 65 mm - résolution 0,1 mm; la position radiale est mesurée depuis l'axe du faisceau circulant, cet axe est commun avec celui de l'enceinte à vide.

- Position angulaire du septum de -8 à +2 mrad - résolution 0,1 mrad; l'angle est mesuré par rapport à l'axe de l'enceinte à vide.
- écartement des électrodes de 10 à 20 mm - résolution 0,1 mm.

Pour permettre un bon conditionnement HT il est utile de porter la distance entre électrodes à 40 mm; l'angle autorisé augmente les courses d'environ 5 mm.

La course des supports est fixée à 50 mm pour tenir compte d'un supplément de quelques mm pour les réglages et conserver une petite marge de sécurité.

La résolution de 0,1 mrad demandée sur l'angle nécessite une résolution de 0,05 mm sur les positions si les supports sont distants de 50 cm.

Nous adoptons quatre supports identiques pour réduire le coût de fabrication et pour simplifier la maintenance.

Lors d'un étuvage les moteurs et les capteurs de position doivent être retirés facilement et nous devons retrouver les positions initiales après remontage.

Le système vis - écrou est fabriqué avec dans des matériaux étuvables à 300°C pour conserver les positions. Pour simplifier le démontage nous utilisons quatre supports mécaniquement indépendants.

6.8 Réalisation

6.8.1 Choix des matériaux et mise en oeuvre

- Seuls les matériaux à très faible taux de dégazage sont utilisés pour cette construction.
- Les solutions retenues doivent tendre à limiter au maximum les surfaces exposées au vide.
- Un bon pompage est nécessaire. Il faut éviter les poches avec du gaz emprisonné et l'on préférera les soudures (intérieures ou traversantes) ou les brasures effectuées sous vide aux assemblages vissés.
- L'emploi d'huiles, graisses ou lubrifiants, qui ne peuvent être éliminés avec certitude est prohibé pour l'usinage.
- Un traitement thermique de détente est demandé après les ébauches et les soudures importantes.
- Une méthode de fabrication est proposée au constructeur:

Après usinage les éléments métalliques sont nettoyés (annexe 5) et les pièces en alumine sont traitées à 1000°C dans l'air.

Avant assemblage chaque composant est dégazé à haute température dans un four à vide. La pression doit être inférieure à 10^{-3} Pa pour la température considérée.

Pour les matériaux utilisés dans cette construction les températures et les temps sont les suivants :

- acier inoxydable : 950°C durant au moins 2 heures.

Lors du refroidissement le passage dans la zone de 800°C doit être aussi rapide que possible (injection d'azote).

- Titane : 700°C durant 2 heures.

- Visserie inoxydable : 450°C durant 6 heures

La visserie est préalablement recouverte de 5 μm d'argent pour diminuer le coefficient de frottement et éviter le collage.

6.8.2 Joints utilisés et système de pompage

Tous les joints utilisés sont en cuivre et recouverts de quelques μm d'argent pour éviter leur oxydation.

Ils sont de deux types :

- pour les petits diamètres (jusqu'à 250 mm) nous utilisons les brides "UHV" (ultra high vacuum) à couteaux et un joint plat en cuivre recuit (figure 6.14 a).

- pour les grands diamètres nous utilisons les brides "Wheeler" avec un joint réalisé avec un fil de cuivre recuit et soudé bout-à-bout par soudure à froid en appliquant une forte pression (figure 6.14 b).

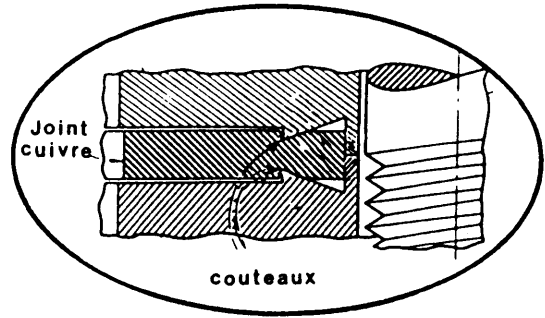
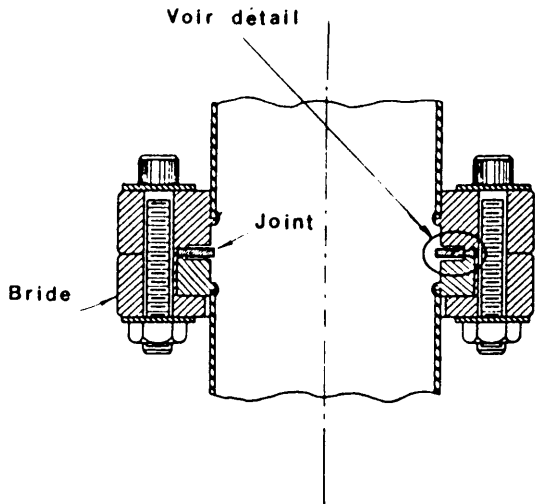
Le pompage de l'enceinte est assuré par les moyens suivants :

1. Prévidage, commun avec celui de l'ensemble du secteur de chambre à vide, avec une pompe turbomoléculaire en série avec une pompe à palettes. Ces pompes sont isolées aux basses pressions.

2. Vide poussé

- une pompe ionique de 400 ℓ/s placée sous le septum électrostatique.

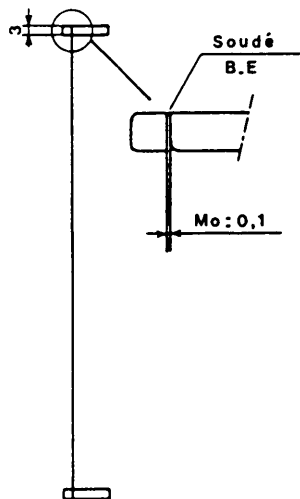
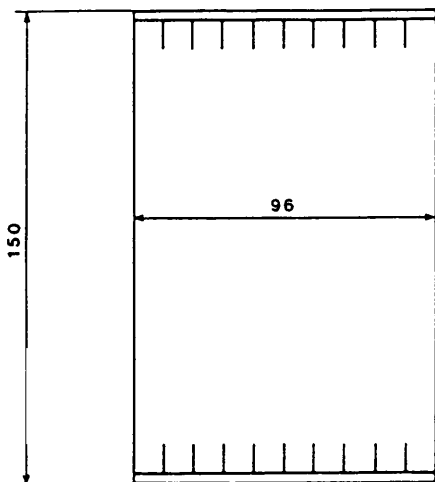
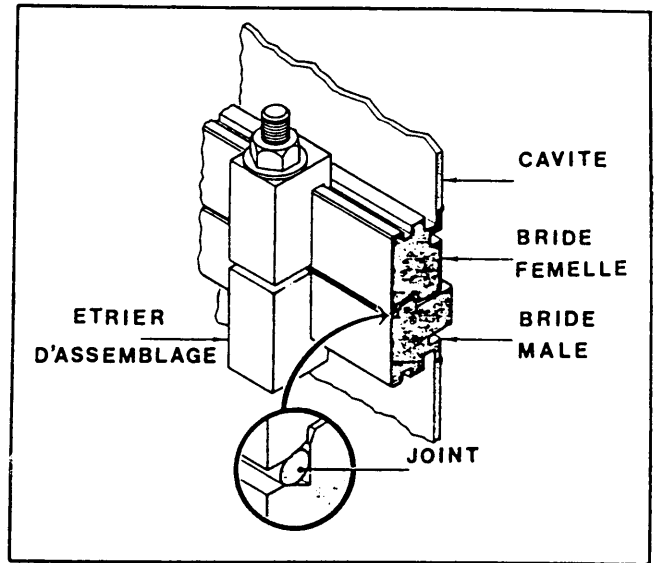
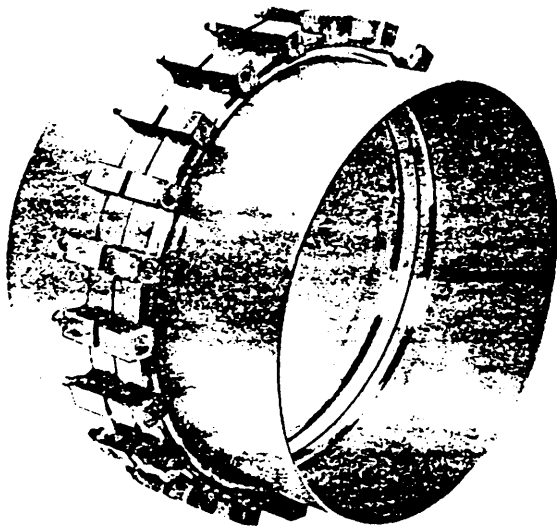
- quatre sublimateurs à titane placés directement dans l'enceinte à vide du septum (l'emploi de deux seulement s'est révélé suffisant).



a)

Jointes métalliques

b)



élément de septum

c)

Fig.6.14

6.8.3. Présentation de l'ensemble

Des barrettes en titane sont brasées sur les éléments de feuille constituant le septum pour permettre de les tendre - figure 6.14 c.

L'électrode haute tension est en titane allié (TA6V), sa longueur est de 720 mm (700 mm de partie plane) et elle est soigneusement polie.

Les couvercles d'extrémité sont réalisés avec une forme spéciale compacte pour obtenir une longueur d'électrode suffisante (paragraphe 6.3.3).

La mesure mécanique des positions est réalisée à l'aide de comparateurs avec une lecture directe et une résolution de 10^{-2} mm.

Un manteau chauffant recouvre les parois extérieures pour atteindre les 300°C nécessaires pour l'étuvage.

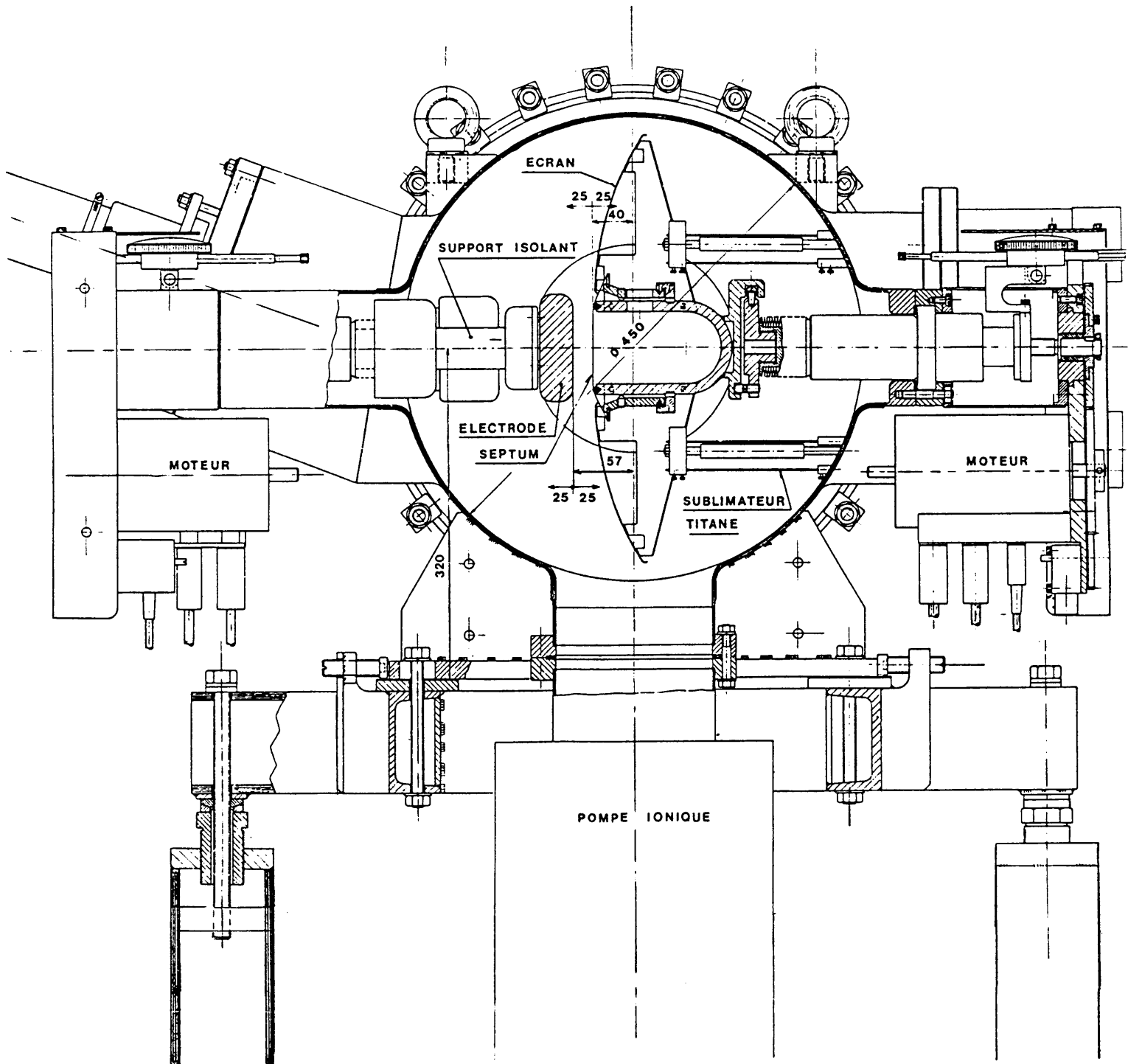
Les figures 6.15 et 6.16 présentent respectivement les coupes transversale et longitudinale de l'équipement réalisé.

6.9 Performances obtenues

6.9.1 Résultats haute tension

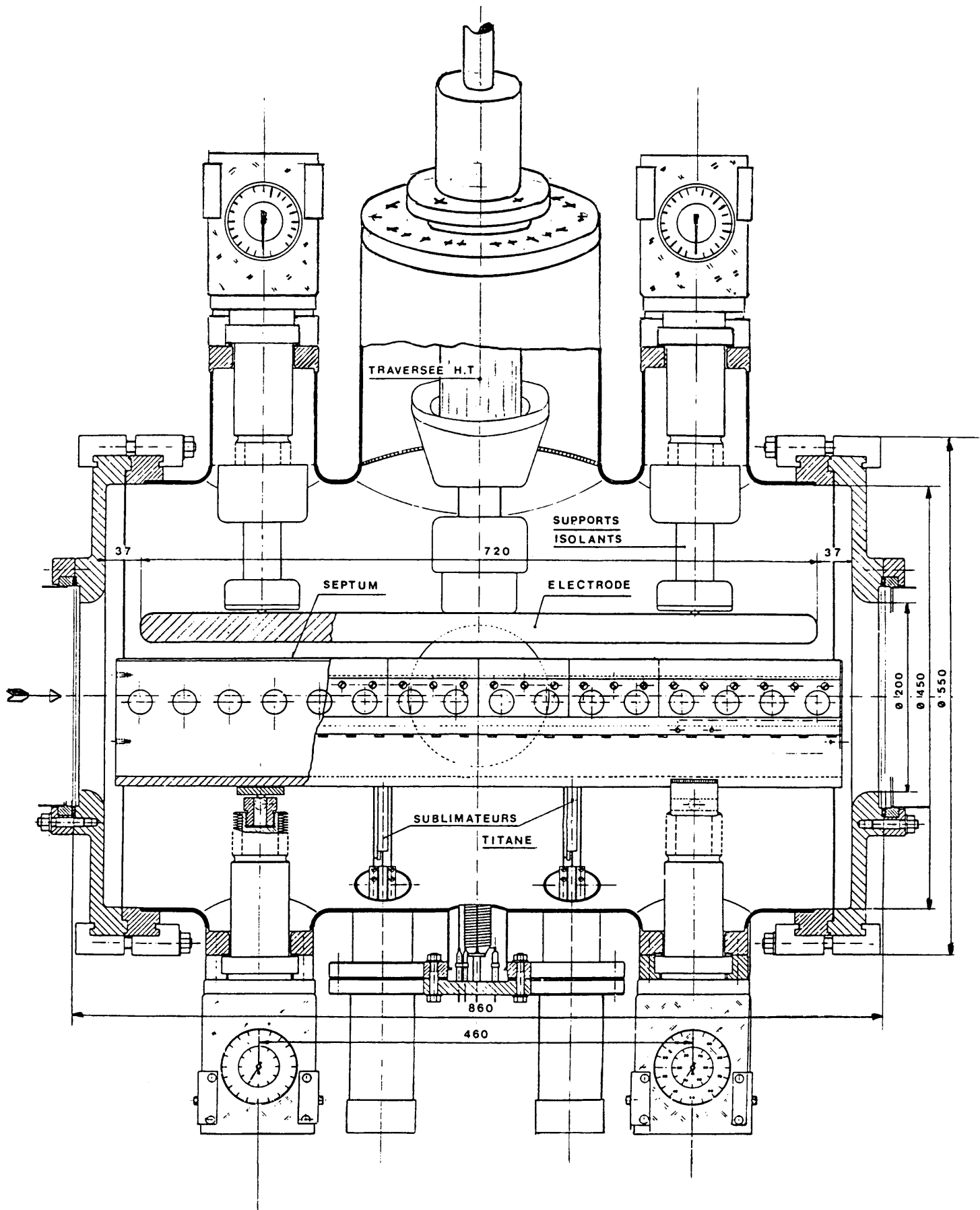
Après l'étuvage à 300°C durant 24 heures nous faisons un conditionnement du septum. Le conditionnement est effectué avec une distance entre électrodes de 40 mm et en maintenant un courant constant de 40 à 100 μ A. Les tensions maximales obtenues sont données dans la figure 6.16. En polarité négative le conditionnement de la traversée haute tension (déflecteurs associés) est plus difficile et l'on retrouve l'effet de géométrie constaté au paragraphe 6.4.4.

Les conditions fixées par le cahier des charges (\approx 80 kV pour un écartement de 10 mm et 120 kV pour un écartement de 20 mm) sont dépassées de 25 à 30% dans la polarité la plus défavorable, ce qui permet une opération sûre aux valeurs nominales.



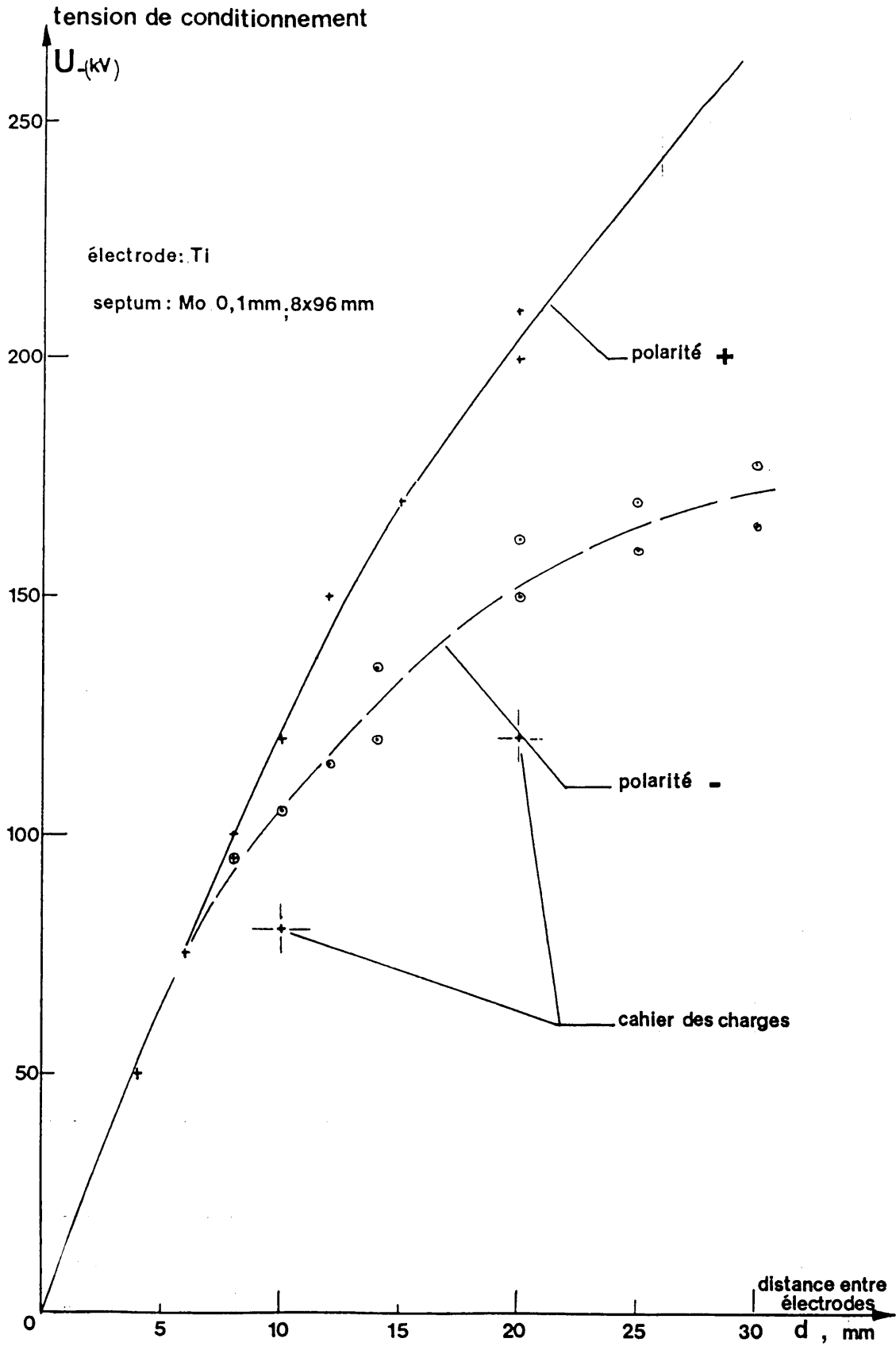
Coupe transversale

Fig.6.15



Coupe longitudinale

Fig.6.16



Tension maximale après conditionnement

Fig.6-17

6.9.2 Homogénéité du champ électrique

Nous avons obtenu une distribution approximative des équipotentiels par une méthode rhéoelectrique en utilisant du papier graphité. La figure 6.18 montre les équipotentiels et les lignes de champ dans une partie de la cuve.

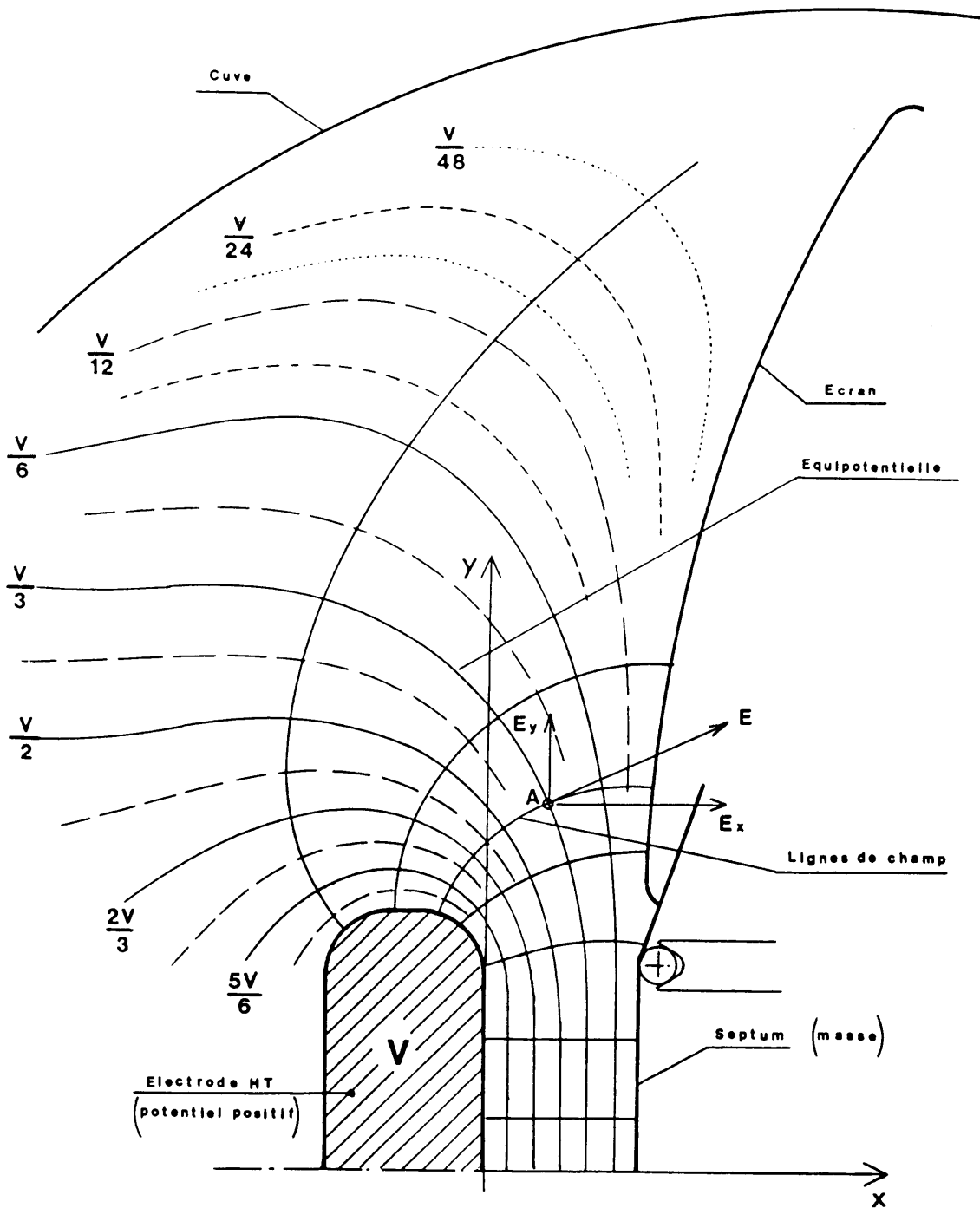
Une évaluation plus précise du champ électrique et de l'écart entre le champ électrique local et le champ électrique moyen $E_0 = U/d$ est faite en utilisant un programme basé sur la méthode des différences finies [20]. Ce programme s'applique aussi bien au potentiel électrique qu'au potentiel scalaire magnétique employé dans ses notations.

Les résultats obtenus en annexe 6 pour cet écart (dit erreur sur le champ électrique) sont donnés par les figures 6.19, 6.20 et 6.21 respectivement pour des écartements entre électrodes de 10, 20 et 30 mm.

La hauteur utile du septum (zone centrale de la feuille où le champ électrique est assez homogène) est donnée sur la figure 6.22 pour différents écartements entre électrodes et en fonction de la précision recherchée.

6.9.3 Pression résiduelle obtenue

Après une sublimation totale d'environ 8 mg de titane et un temps de pompage de deux semaines la pression obtenue est environ 7×10^{-10} Pa (en équivalent N_2).



Equipotentielles obtenues sur papier graphité

Fig.6.18

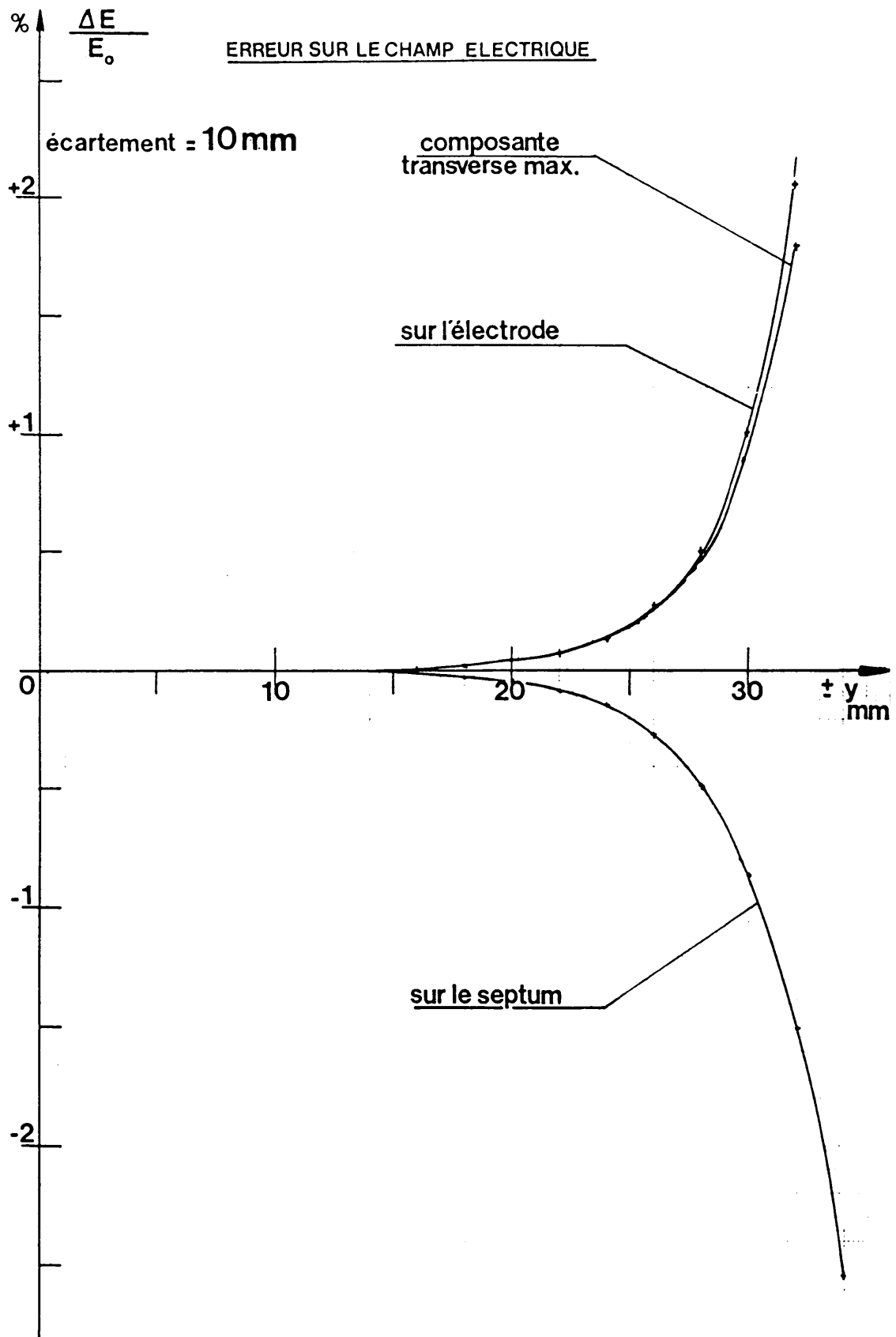


Fig. 6.19

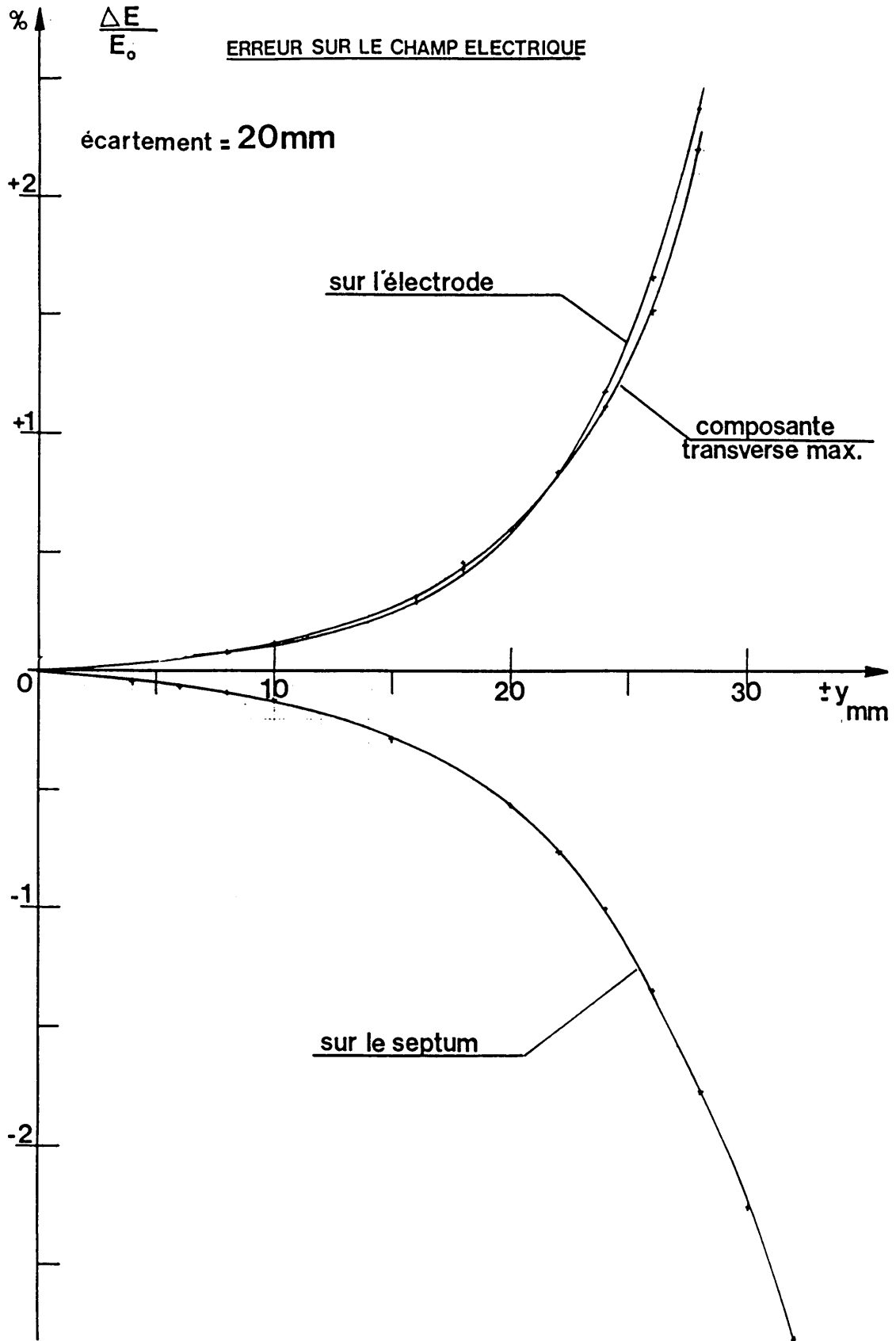


Fig.6.20

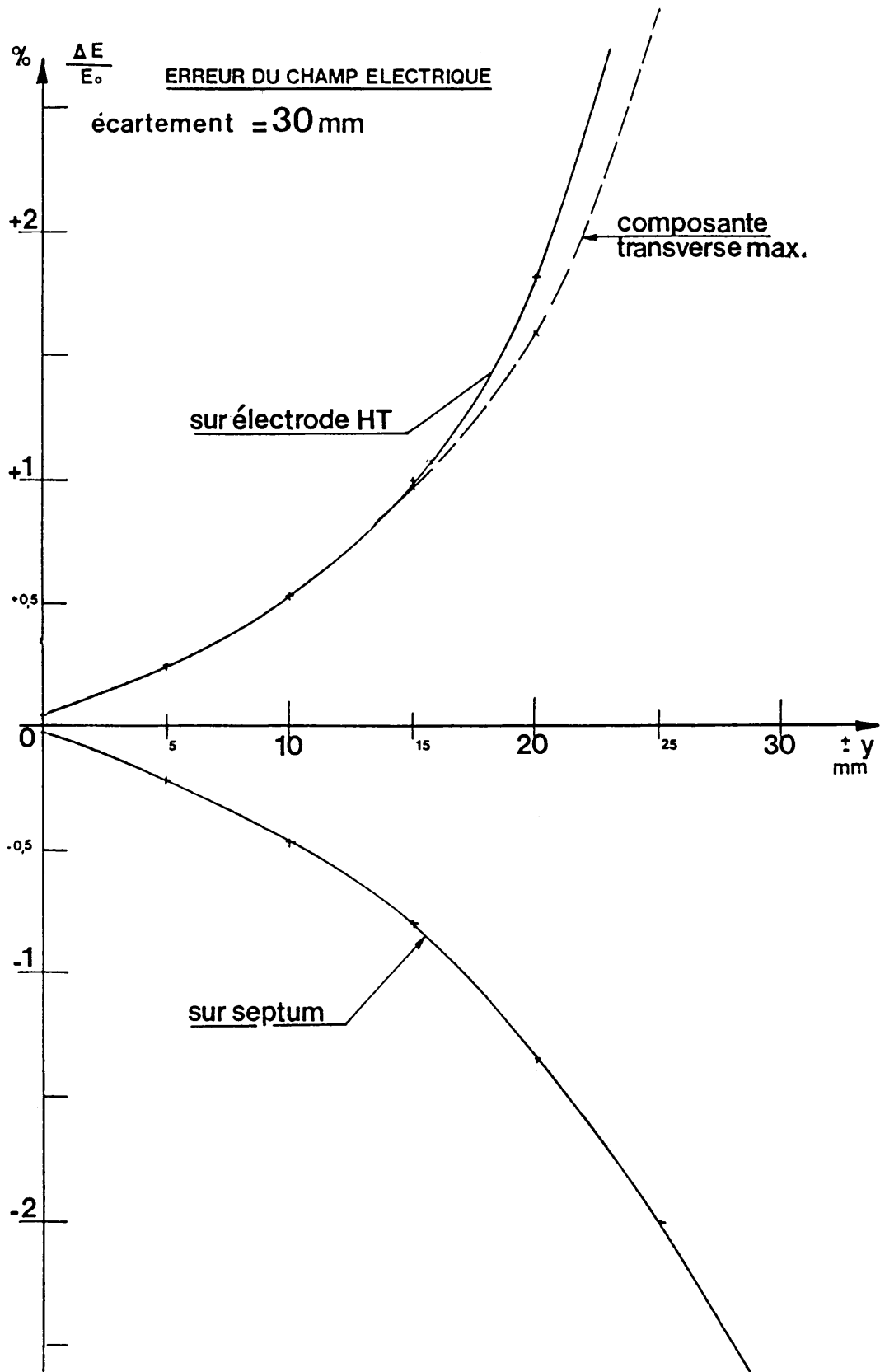
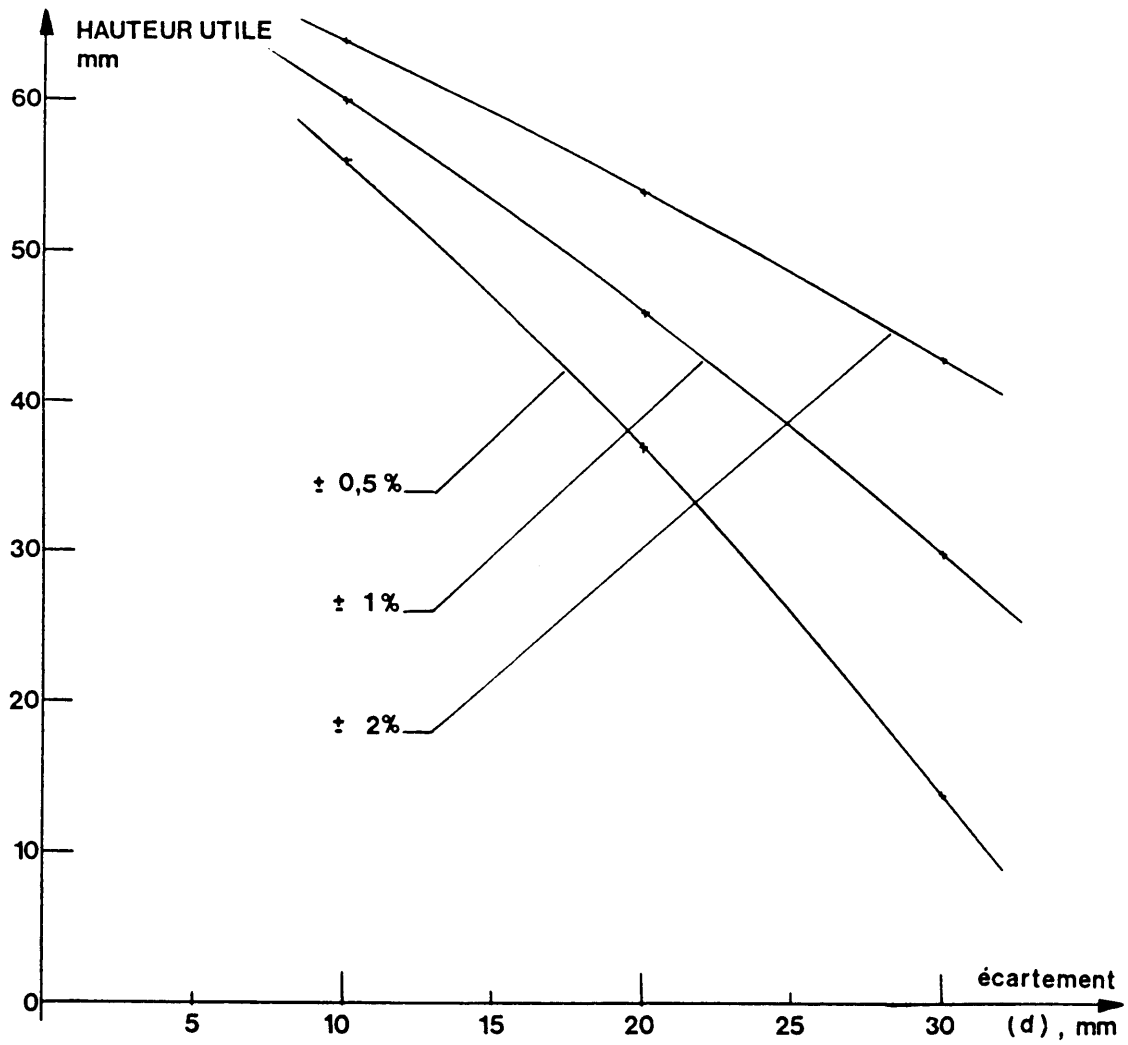


Fig. 6.21



Hauteur utile pour l'éjection

Fig.6.22

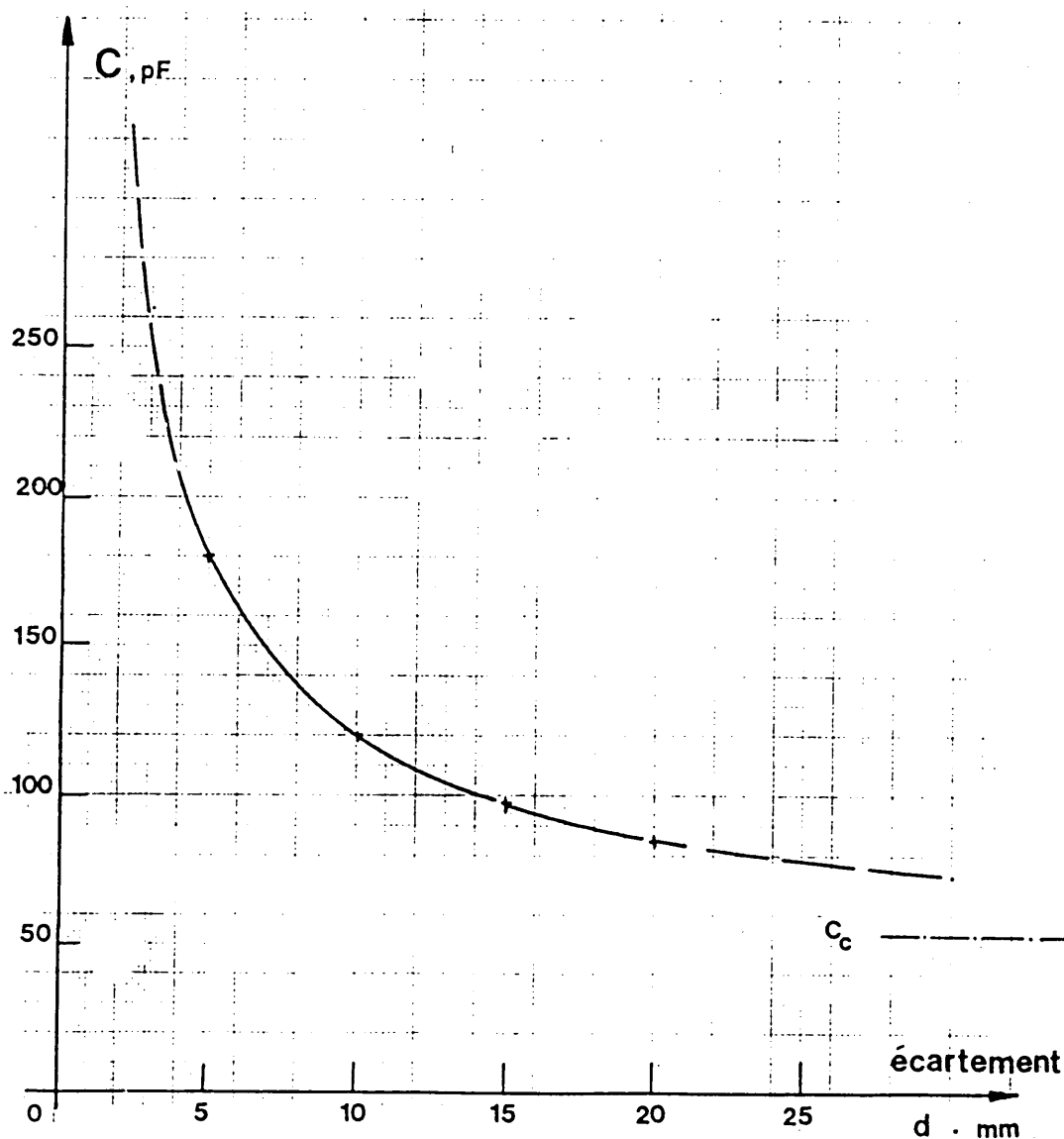
6.9.4 Capacité équivalente du septum

La capacité équivalente du septum vue à son entrée haute tension est la somme de deux termes :

- La capacité du système d'électrodes $C_e = k/d$
k étant une constante et d l'écartement entre électrodes.
- Une capacité environ constante C_c .

Cette capacité est celle de la traversée haute tension munie de ses déflecteurs, de la résistance d'amortissement, des supports et de l'électrode haute tension en regard avec la cuve.

La mesure de cette capacité équivalente est donnée par la figure 6.23.



Capacité du septum

Fig. 6.23

6.10 Contrôle

6.10.1 Structure générale

L'ensemble des équipements du LEAR est placé sous le contrôle d'un ordinateur. Les commandes sont réalisées depuis une console et les paramètres utiles à l'opération sont affichés sur un écran.

Pour décharger l'ordinateur un microprocesseur est utilisé pour les commandes du septum SEH 11. Ce microprocesseur doit :

- convertir les données (angle, écartement) en positions pour chaque support
- valider ou non les données en fonction des limites fixées
- gérer le processus.

Pour pallier une défaillance de l'ordinateur (microprocesseur et interfaces compris) l'équipement est doté de son propre système de sécurité.

6.10.2 Alimentations haute tension

Le conditionnement haute tension est peu fréquent grâce à la pression très basse, mais il nécessite une connaissance approfondie de l'équipement et du processus. Le contrôle de cette phase est fait manuellement depuis la baie de contrôle locale.

Les alimentations haute tension (du type à cascade de Greinacher) ont une tension maximale de 150 kV et un courant limité à 1 mA. Elles possèdent une régulation en courant et en tension.

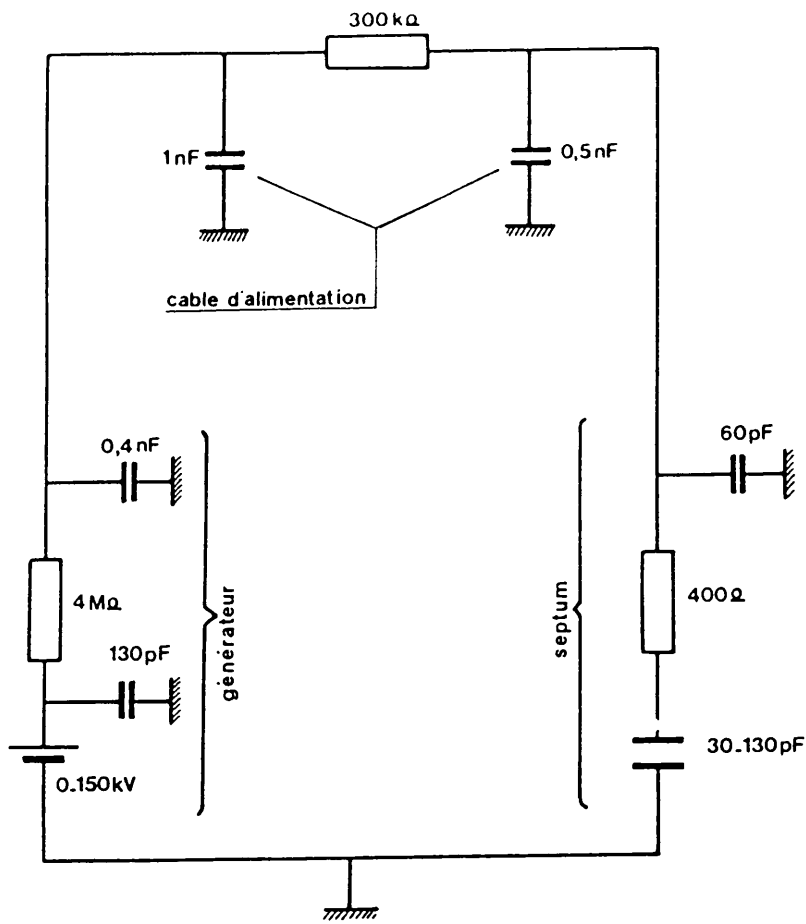
Les images de la tension et du courant (0 à 5 V) ainsi qu'un mot d'état binaire sont transmis à l'ordinateur. Une tension de consigne (0 à 5 V) est seule requise pour fixer la valeur de la tension de sortie.

Localement deux commutateurs permettent de choisir les limites permises pour les tension et courant disponibles sur le septum.

La figure 6.24 donne le schéma électrique du circuit haute tension. L'ensemble de l'installation est blindé et le câble d'alimentation est dimensionné pour 300 kV.

Pour permettre la validation de la tension désirée nous linéarisons la tension permise en fonction de l'écartement d des électrodes en tenant compte du cahier des charges, figure 6.25, par la formule :

$$U_{lim} = 40 + 4 d.$$



circuit
haute tension

Fig. 6.24

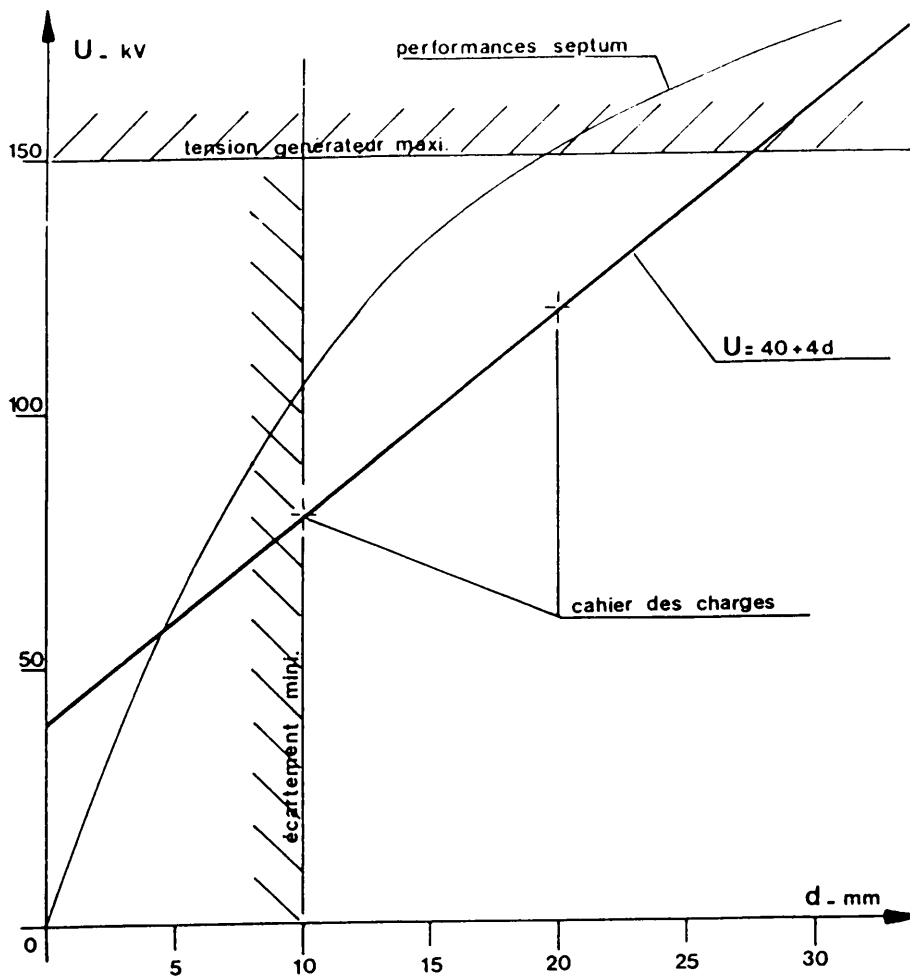
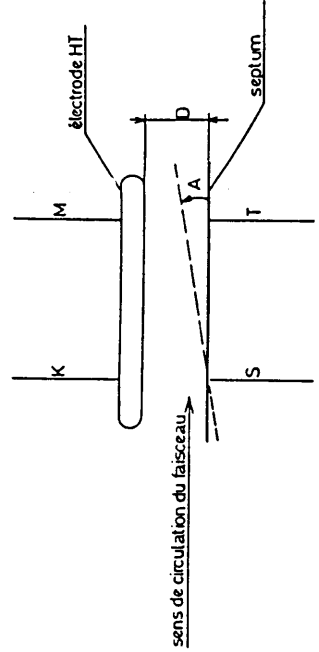
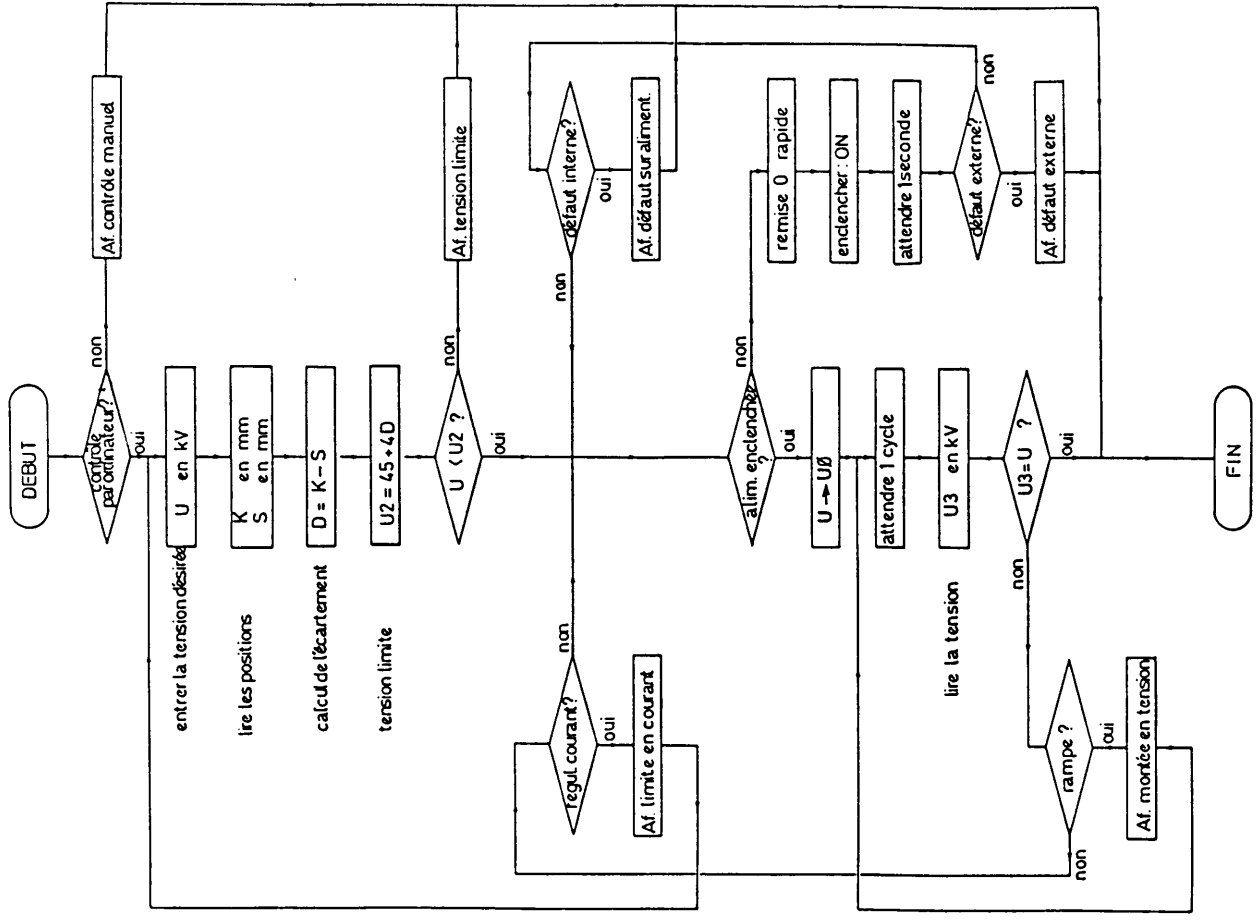


Fig. 6.25

Tension autorisée pour l'opération



- S position du septum désirée] mesurées sur le support S en mm
- S1 limite inférieure pour le septum]
- A angle désiré (septum et électrode HT)] support S fixe en mrad
- A2 limite supérieure pour l'angle]
- K2 limite supérieure pour l'électrode HT] mesurée sur le support K
- D distance entre électrodes désirée (D=K-S= M-T)
- D1 limite inférieure pour la distance (écartement mini)
- K0, M0, S0, T0 positions des supports désirées (après calculs)
- K3, M3, S3, T3 - - - lues

- U tension désirée] HT en kV sur l'électrode
- U3 - lue]
- U0 - de consigne (en kV de tension de sortie)

K0-K3 déplacer le support K pour sa position lue K3 soi égale à la position désirée K0

U -> U0 donner à la tension de consigne U0 correspond à une tension de sortie U0 (la valeur U (tension désirée))

Af. afficher sur l'écran

remarque : l'angle du septum et de l'électrode HT est donné par rapport à l'axe du faisceau $A = \arctan \left(\frac{K-M}{D} \right)$

La figure 6.26 donne l'organigramme utilisé pour le contrôle de la haute tension.

6.10.3 Déplacements

Les paramètres utiles à l'opération sont :

- la position radiale du septum
- l'angle du septum
- la distance entre électrodes
- le champ électrique ou la déflexion nécessaire.

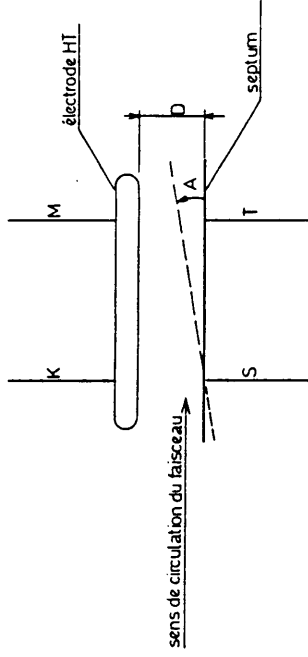
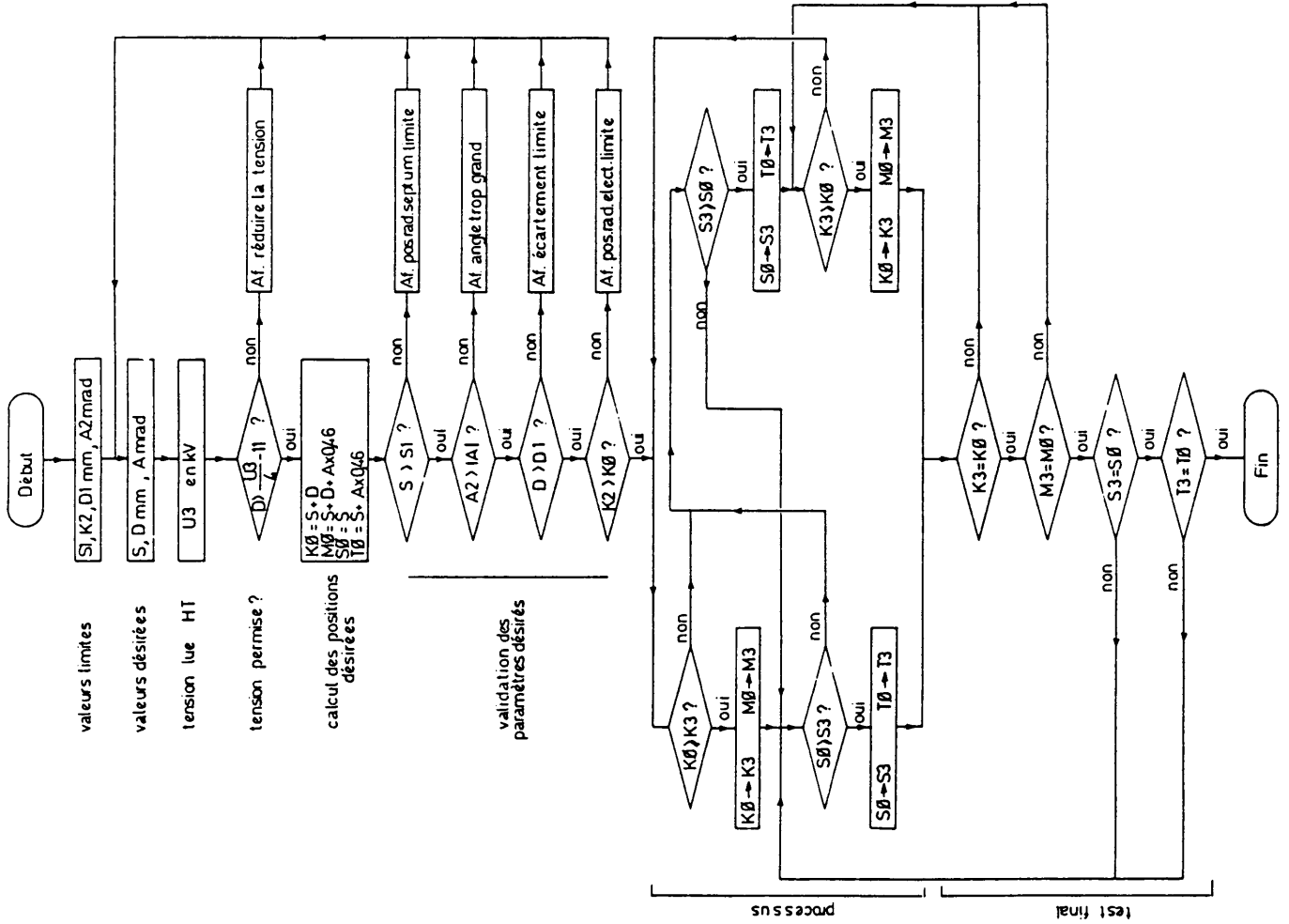
Partant de ces paramètres il faut :

- calculer les positions de chacun des quatre supports
- vérifier si ces positions sont compatibles mécaniquement (courses permises et écartement suffisant) et électriquement (tension en fonction de l'écartement)
- gérer le processus du déplacement des électrodes (ordre selon lequel les déplacements sont effectués).

La figure 6.27 donne l'organigramme utilisé pour le contrôle des positions.

Parallèlement nous effectuons des comparaisons analogiques entre les positions des supports (potentiomètres et ampli opérationnels) pour couper l'alimentation des moteurs s'il y a risque de tamponnement ou si les angles sont trop grands.

Des microrupteurs limitent l'amplitude des déplacements autorisés sur chaque support.



- S position du septum désiré] mesurées sur le support S en mm
- S1 limite inférieure pour le septum]
- A angle désiré (septum et électrode HT)] support S fixe en mrad
- A2 limite supérieure pour l'angle]
- K2 limite supérieure pour l'électrode HT] mesurée sur le support K en mm
- D distance entre électrodes désirée ($D = K - S = M - T$)]
- D1 limite inférieure pour la distance (écartement mini)
- KØ, MØ, SØ, TØ positions des supports désirés (après calculs)
- K3, M3, S3, T3 - - - lues

- U tension désirée] HT en kV sur l'électrode
- U3 - lue]
- UØ - de consigne (en kV de tension de sortie)

KØ → K3 déplacer le support K pour que sa position lue K3 soit égale à la position désirée KØ

U → UØ donner à la tension de consigne UØ (correspond à une tension de sortie UØ) la valeur U (tension désirée)

Af. afficher sur l'écran

remarque : l'angle du septum et de l'électrode HT est donné par rapport à l'axe du faisceau
 $A = 45^\circ$, axe du faisceau = (KØ, axe du faisceau)

CONCLUSION

Dans nos déflecteurs électrostatiques du type septum nous avons obtenu des tensions supérieures à 200 kV pour un écartement entre électrodes de 1 cm en utilisant :

- un septum réalisé avec une feuille de molybdène, mis à la masse.
- une électrode portée à une haute tension négative, constituée d'une plaque d'aluminium oxydée.

Avec un tel septum nous avons dû résoudre le problème des claquages qui sont induits par les ions créés dans le gaz résiduel par le faisceau de protons. D'autre part la polarité de l'électrode haute tension n'est pas réversible et la cuve équipée n'étant pas étuvable le vide est limité à la région de 10^{-7} à 10^{-6} Pa.

Dans le cas du septum nécessaire au LEAR la pression résiduelle requise étant bien inférieure (10^{-9} Pa) et la polarité devant être réversible, nous avons employé une électrode haute tension en titane. Cette électrode nous a permis d'atteindre les performances honorables spécifiées, qui sont cependant inférieures à celles obtenues avec une cathode oxydée.

Grâce à l'emploi de matériaux sélectionnés, de procédures de fabrication appropriées et par un étuvage du septum complet à 300°C nous avons largement atteint le niveau d'ultravide requis avec une pression résiduelle de 7.10^{-10} Pa.

Les supports mécaniquement indépendants rendent les démontages aisés lors d'un étuvage.

Le contrôle, ainsi réalisé, facilite l'opération, évite le tamponnement des électrodes et interdit un champ électrique trop élevé.

La conception d'un déflecteur électrostatique s'appuie sur une connaissance générale des problèmes de haute tension et de vide mais si des performances poussées sont demandées il est nécessaire de renforcer cette connaissance au moyen d'essais en haute tension sur modèle ou prototype.

Sur un tel équipement, en effet, les performances maximales ne sont pas entièrement calculables, au stade actuel de nos connaissances, comme ce serait le cas pour un électro-aimant par exemple.

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé dans le cadre de l'Organisation pour la recherche nucléaire (CERN) à Meyrin-Genève.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui par leur collaboration, leurs conseils, leur soutien ou leurs encouragements m'ont permis de mener à bien cette tâche.

Monsieur C. Germain m'a confié ce projet, ses critiques constructives et attentives m'ont guidé dans ce travail et aidé dans la rédaction de ce mémoire. Qu'il soit assuré de ma reconnaissance.

Monsieur Y. Baconnier, mon chef de groupe actuel, par l'intérêt porté à cette étude et son soutien constant a permis l'achèvement de ce travail dans de bonnes conditions. Je l'en remercie.

Ma gratitude va à tous mes collègues de travail qui, à des degrés divers, ont collaboré à cette réalisation et en particulier à Messieurs A. Dind, et J-C. Dubois, projeteurs chargés des réalisations mécaniques, Monsieur A. Rochex, monteur-mécanicien accompli, Monsieur H-H. Umstätter, dans l'utilisation de programmes, Messieurs L. Jeannerot, I. Kamber et J-C. Thomi.

Je remercie aussi Monsieur U. Jacob pour l'ambiance agréable que j'ai trouvée dans sa Section et je rends hommage à Monsieur R. Tinguely pour m'avoir fait découvrir les difficiles problèmes de la haute tension.

Je dois le difficile et fastidieux travail de dactylographie à Mme. L. Ghilardi, je l'en remercie particulièrement.

ANNEXES

- Annexe 1 Programme pour le calcul de la déflexion électrostatique
- Annexe 2 Découpe chimique d'une feuille de molybdène
- Annexe 3 Composition chimique des alliages
- Annexe 4 Principales caractéristiques des accélérateurs utilisés au CERN.
- Annexe 5 Usinage et nettoyage des éléments exposés à l'ultra-vide.
- Annexe 6 Carte du champ électrique - septum SEH 11.
- Annexe 7 Etat de surface des électrodes.

annexe 1

Programmes sur HP85

Déflexion électrostatique

```

5 REM "SEPT DEF"
10 DISP "ENTRER LES PARAMETRES"
20 DISP "LONGUEUR DES PLAQUES E
  N M "
30 INPUT L1
40 DISP "LONGUEUR DE GLISSEMENT
  EN M "
50 INPUT L2
60 DISP "QUANTITE DE MOUVEMENT
  EN GeV/c"
70 INPUT P
80 DISP "CHAMP ELECTRIQUE EN MV
  /M OU KV/mm "
90 INPUT E
100 DISP "NATURE DES PARTICULES:
  ELECTRONS, PROTONS, ANTIPROTON
  S, POSITONS"
110 INPUT A$
120 IF A$="ELECTRONS" THEN 200
130 IF A$="PROTONS" THEN 250
140 IF A$="ANTIPROTONS" THEN 300
150 IF A$="POSITONS" THEN 350
160 DISP "PARTICULES A SPECIFIER
  "
170 DISP "ENTRER K POUR Q=K*(CHA
  RGE DE L'ELECTRON"
171 INPUT K
180 DISP "ENTRER S POUR M=S*(MAS
  SE DE L'ELECTRON"
181 INPUT S
190 GOTO 500
200 K=1
210 S=1
220 GOTO 500
250 K=-1
260 S=1836
270 GOTO 500
300 K=1
310 S=1836
320 GOTO 500
350 K=-1
360 S=1
370 GOTO 500
500 M0=S*.000512
520 M0=S*.000512
600 X=P/M0
610 B=(X^(-2)+1)^(-(1/2))
620 G=1/SQR(1-B*B)
630 A=-(K*E*L1/(P*B))
640 Y=-(K*E/(P*B))*(L1*L1/2+L1*L2
  )
650 W=(G-1)*M0
660 PRINT
700 PRINT
710 PRINT "*****"
720 PRINT
730 PRINT "POUR DES ";A$
740 PRINT
750 PRINT "CHARGE RELATIVE=";K

```

```

760 PRINT "MASSE AU REPOS RELATI
  VE=";S
770 PRINT
780 PRINT
790 PRINT "LONGUEUR DES PLAQUES="
  ";L1
800 PRINT "LONGUEUR DE GLISSEMEN
  T=";L2;"M"
810 PRINT
820 PRINT "QUANTITE DE MOUVEMENT
  =" ;P;"GeV/c"
830 PRINT "CHAMP ELECTRIQUE=";E;
  "MV/m"
840 PRINT
850 PRINT "DEVIATION=";Y;"mm"
860 PRINT "DEFLEXION=";A;"mrad"
870 PRINT
880 PRINT
890 PRINT "BETA*GAMMA=";X
900 PRINT "BETA=";B
910 PRINT "GAMMA=";G
920 PRINT "ENERGIE=";W;"GeV"
1000 END

```

exemple

POUR DES PROTONS

CHARGE RELATIVE=-1
MASSE AU REPOS RELATIVE= 1836

LONGUEUR DES PLAQUES= 1.85
LONGUEUR DE GLISSEMENT= 0 M

QUANTITE DE MOUVEMENT= 10 GeV/c
CHAMP ELECTRIQUE= 6.5 MV/m

DEVIATION= 1.11721622198 mm
DEFLEXION= 1.20780132106 mrad

BETA*GAMMA= 10.6379357298
BETA= .995610767294
GAMMA= 10.6848339531
ENERGIE= 9.1040538306 GeV

Conversion : Energie cinétique – Quantité de mouvement

```

5 REM "CONV "
10 DISP "ENTRER LES PARAMETRES"
20 DISP "QUANTITE DE MOUV=1 EN
   ERGIE =2 "
30 INPUT D
40 IF D=1 THEN 60
50 DISP "ENERGIE EN GeV ? "
55 INPUT E
56 GOTO 100
60 DISP "QUANTITE DE MOUVEMENT
   EN GEV/C"
70 INPUT P
100 DISP "NATURE DES PARTICULES:
   ELECTRONS, PROTONS, ANTIPROTON
   S, POSITONS"
110 INPUT A$
120 IF A$="ELECTRONS" THEN 200
130 IF A$="PROTONS" THEN 250
140 IF A$="ANTIPROTONS" THEN 300
150 IF A$="POSITONS" THEN 350
160 DISP "PARTICULES A SPECIFIER
   "
170 DISP "ENTRER K POUR Q=K*(CHA
   RGE DE L'ELECTRON"
171 INPUT K
180 DISP "ENTRER S POUR M=S*(MAS
   SE DE L'ELECTRON"
181 INPUT S
190 GOTO 500
200 K=1
210 S=1
220 GOTO 500
250 K=-1
260 S=1836
270 GOTO 500
300 K=1
310 S=1836
320 GOTO 500
350 K=-1
360 S=1
370 GOTO 500
500 M0=S*.000512
520 M0=S*.000512
530 IF D=2 THEN 1010
600 X=P/M0
610 B=(X^(-2)+1)^(-(1/2))
620 G=1/SQR(1-B*B)
650 PRINT
660 PRINT
700 PRINT
710 PRINT "*****"
   *****
720 PRINT
730 PRINT "POUR DES ":A$
740 PRINT
750 PRINT "CHARGE RELATIVE=":K
760 PRINT "MASSE AU REPOS RELATI
   VE=":S
770 PRINT
780 PRINT

```

```

810 PRINT
820 PRINT "QUANTITE DE MOUVEMENT
   =" :P: "GeV/c"
840 PRINT
870 PRINT
880 PRINT
890 PRINT "BETA*GAMMA=":X
900 PRINT "BETA=":B
910 PRINT "GAMMA=":G
920 PRINT
930 PRINT
935 IF D=2 THEN 950
940 E=(G-1)*M0
950 PRINT "ENERGIE=":E: "GeV"
1000 GOTO 2000
1010 G=E/M0+1
1020 B=(1-1/(G*G))^(1/2)
1030 X=B*G
1040 P=B*G*M0
1050 GOTO 730
2000 END

```

exemple

POUR DES ANTIPROTONS

CHARGE RELATIVE= 1

MASSE AU REPOS RELATIVE= 1836

QUANTITE DE MOUVEMENT= 1 GeV/c

BETA*GAMMA= 1.06379357298

BETA= .72861603322

GAMMA= 1.46001944025

ENERGIE= .432432994457 GeV

ANNEXE 2

Découpe chimique d'une feuille de molybdène

(extrait du rapport CERN SB/AC/ST/3163/gp)

1. Préparation

- nettoyage - ultrasons

1 kW/400 l 25 kHz

avec lessive "Diversey 708" 20 g/litre

45 - 50°C durant 45 s.

- rinçage à l'eau

- dégraissage électrolytique cathodique

avec lessive alcaline "LPV 10 - 12"

$U = 8 \text{ V}$ $j = 10 \text{ A/dm}^2$ $t = 1 \text{ min}$, $\theta = 20^\circ\text{C}$.

- rinçage à l'eau

- décapage sulfo-chromique

Cr_2O_3 80 g/litre

$\text{SO}_4 \text{ H}_2$ 2% en poids

$\theta = 20^\circ\text{C}$

$t = 30 \text{ s}$

suivi d'un rinçage à l'eau déminéralisée puis à l'alcool.

- séchage $\theta = 270^\circ\text{C}$ 5 heures à une pression d'environ 10 Pa (10^{-1} Torr)

2. Pose du masque de gravure

Photorésist. "KMER" appliqué au pistolet

Cuisson au four à 80°C durant 20 min

Insolation et développement

Cuisson à 80°C durant 1 h.

3. Usinage chimique

Composition du bain acide nitrique à 62%	50% en volume
acide lactique à 90%	25% en volume
eau distillée	25% en volume
température	17°C
agitation modérée	

Temps de gravage pour 0,1 mm = 10 min

4. Usinage électrolytique (finition)

Composition du bain soude-caustique	40 g/litre
éthylène glycol	45% en volume
eau distillée	55% en volume
hexadécyltriméthylammonium bromure	0,01 g/litre
température	20 à 25°C

Tension	7 V
Distance entre électrodes	5 cm
Temps de gravage pour 0,1 mm	10 min

5. Retrait du "photo-résist. KMER"

6. Nettoyage final

Ultrasons dans un bain de trichloréthylène propre suivi des opérations de nettoyage, de décapage et de séchage décrites en 1.

ANNEXE 3

Composition chimique des alliages

Acier inoxydable 304L (Cr-Ni-18.10)

Cr	17 - 20%	C max.	0,03%
Ni	9 - 12%	Si max.	1%
Fe	le reste	Mn max.	2,0%
		P max.	0,045%
		S max.	0,03%

Acier inoxydable 316 L+N (Cr-Ni-18-12-Mo-N)

Cr	16 - 18,5%	C max.	0,03%
Ni	11 - 14%	Si max.	1%
M _o	2 - 3%	Mn max.	2%
N	0,14 - 0,18%	P max.	0,045%
Fe	le reste	S max.	0,03%

Péraluman (Al-Mg-3) - PRE 30

Mg	2,4 - 3,1%	Z _n max.	0,2%
Cu	0,1%	F _e max.	0,5%
Si	0,5%	C _n max.	0,35%
Mn	0,4%		
Al	le reste		

Titane non allié UT 40 (désignation commerciale "UGINE")

Ti	le reste	C max.	0,08%
		F _e max.	0,25%
		N ₂ max.	0,06%
		H ₂ max.	0,0125%
		C ₂ max.	0,25%

Titane allié UTA6V (désignation commerciale "UGINE")

Al	6%	C	max. 0,08%
V	4%	F _e	max. 0,3%
Ti	le reste	N ₂	max. 0,07%
		H ₂	max. 0,0125%
		C ₂	max. 0,2%

ANNEXE 4

PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES ACCELERATEURS DE PROTONS UTILISES AU CERN.

Linac accélérateur linéaire

Energie cinétique	50 MeV
Taux de répétition	2 impulsions par seconde
Courant	50 à 150 mA
Longueur de l'impulsion	70 à 200 μ s

Préaccélérateur

source	duoplasmatron
énergie	750 keV
courant	400 mA

Structure accélératrice

nombre de tanks	3
fréquence	202,5 MHz
longueur totale	33 m
nombre de cellules	124

Booster synchrotron injecteur

Energie cinétique	800 MeV
Energie à l'injection	50 MeV
Intensité maximale	$2,5 \times 10^{13}$ protons par impulsion

Il est composé de quatre synchrotrons superposés verticalement avec un espace de 36 cm entre anneau.

Circonférence d'un anneau	157 m
Champ magnétique maximum	0,6 T

PS synchrotron à protons

Energie cinétique max.	28 GeV
Energie à l'injection	50 ou 800 MeV
Intensité maximale	2×10^{13} protons par impulsion
Circonférence	628 m
Champ magnétique maximum	1,4 T

SPS synchrotron à protons

Energie cinétique max.	450 GeV
Energie à l'injection	9,1 GeV
Intensité maximale	$2,5 \times 10^{13}$ protons par impulsion
Circonférence	6,91 km
Champ magnétique maximum	≈ 2 T

ANNEXE 5

Usinage et nettoyage des éléments exposés à l'ultra-vide

Matière

N'utiliser que des matériaux à faible taux de dégazage et dont les taux de porosités ou d'inclusions sont très faibles.

Soudures

Les soudures doivent être régulières, continues et non poreuses. Elles devront être si possible exécutées du côté de la pièce exposé au vide ou avoir une pénétration totale.

Toutes les soudures sont réalisées après un dégraissage soigné des pièces à assembler.

Usinage

L'utilisation des graisses de type silicone est interdite ainsi que d'une manière générale, les huiles ou lubrifiants qui ne peuvent pas être éliminés avec certitude.

Nettoyage

La procédure est la suivante :

- essuyage pour enlever les grosses souillures
- dégraissage au perchloréthylène en phase vapeur à 121°C suivi d'un égouttage et d'un séchage
- traitement dans un bain contenant une lessive alcaline (PH 11) à une température de 65°C avec agitation ultrasonique de 30 min
- rinçage à l'eau déminéralisée
- séchage à l'air chaud (150°C)

Après nettoyage les pièces doivent être manipulées avec des gants propres et emballées dans une feuille d'aluminium.

Dégazage sous vide

Le traitement final des surfaces est réalisé dans un four à vide ce qui permet de réduire le taux de dégazage.

La pression doit être inférieure à 10^{-3} Pa ($< 10^{-5}$ Torr) et les températures requises en fonction des matériaux sont les suivantes :

Aluminium	300°C	durant	24 heures
Cuivre	450°C	-	6 heures
Titane et alliages	700°C	-	2 heures
Acier inoxydable	950°C	-	2 heures

avec passage rapide dans la zone des 800°C lors du refroidissement

annexe 6

Carte du champ électrique - septum SEH11

ELECTROSTATIC PERTURBATION LEAR.

FIELD MAP FOR AIR REGION, CYCLE NUMBER 0
X AND Y ARE GIVEN IN MM, FIELDS IN GAUSS.

GAP: 10 mm

y	x	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
0.0	BX =	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.000	0.000
	BY =	-100.000	100.000	-100.000	100.000	-100.000	100.000
2.0	BX =	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000
	BY =	-100.000	100.000	-100.002	99.999	-100.000	100.000
4.0	BX =	0.000	0.001	-0.000	0.000	0.000	0.000
	BY =	-100.000	100.001	-100.001	-99.999	-100.000	100.000
6.0	BX =	0.000	-0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
	BY =	-100.001	-100.001	-100.000	-99.998	-100.000	-100.000
8.0	BX =	0.000	0.001	0.002	0.002	0.001	0.000
	BY =	-100.000	100.000	-100.000	-99.999	-100.000	-100.001
10.0	BX =	0.000	0.001	0.002	0.002	0.002	0.000
	BY =	-99.999	-99.999	-100.000	-99.999	-100.001	-100.003
12.0	BX =	0.000	0.002	0.004	0.004	0.002	0.000
	BY =	-99.997	-99.998	-99.999	-100.000	-100.003	-100.004
14.0	BX =	0.000	0.004	0.006	0.006	0.004	0.000
	BY =	-99.994	-99.995	-99.998	-100.001	-100.006	-100.006
16.0	BX =	0.000	0.007	0.012	0.011	0.007	0.000
	BY =	-99.989	-99.991	-99.996	-100.003	-100.010	-100.012
18.0	BX =	0.000	0.013	0.021	0.021	0.013	0.000
	BY =	-99.978	-99.982	-99.993	-100.006	-100.018	-100.022
20.0	BX =	0.000	0.024	0.040	0.040	0.025	0.000
	BY =	-99.959	-99.967	-99.987	-100.012	-100.033	-100.041
22.0	BX =	0.000	0.045	0.074	0.075	0.047	0.000
	BY =	-99.924	-99.939	-99.976	-100.023	-100.062	-100.077
24.0	BX =	0.000	0.084	0.138	0.141	0.088	0.000
	BY =	-99.859	-99.886	-99.954	-100.042	-100.116	-100.145
26.0	BX =	0.000	0.154	0.256	0.265	0.168	0.000
	BY =	-99.740	-99.787	-99.912	-100.076	-100.218	-100.274
28.0	BX =	0.000	0.278	0.470	0.499	0.326	0.000
	BY =	-99.525	-99.605	-99.829	-100.134	-100.409	-100.523
30.0	BX =	0.000	0.487	0.851	0.947	0.651	0.000
	BY =	-99.142	-99.274	-99.657	-100.218	-100.771	-101.016
32.0	BX =	0.000	0.817	1.499	1.807	1.380	0.000
	BY =	-98.490	-98.688	-99.294	-100.292	-101.452	-102.059
34.0	BX =	0.000	1.270	2.500	3.405	3.217	0.000
	BY =	-97.450	-97.690	-98.514	-100.138	-102.638	-104.598
36.0	BX =	0.000	1.731	3.772	5.972	7.729	7.520
	BY =	-96.953	-96.125	-96.925	-99.003	-103.380	-113.215
38.0	BX =	0.000	1.814	4.837	6.889	13.888	20.724
	BY =	-94.248	-93.963	-94.089	-95.741	-99.895	-108.137
40.0	BX =	0.000	0.488	4.905	10.960	18.838	28.871
	BY =	-93.346	-91.381	-89.693	-90.063	-92.437	-96.801
42.0	BX =	-15.437	-4.616	3.613	11.654	20.633	31.713
	BY =	-98.991	-87.311	-83.137	-82.407	-82.943	-83.843
44.0	BX =	-22.298	-7.930	2.413	11.422	20.663	31.038
	BY =	-71.146	-74.433	-74.077	-73.571	-73.024	-71.826
46.0	BX =	-16.049	-6.685	2.332	10.894	19.519	28.616
	BY =	-60.513	-63.835	-64.867	-64.710	-63.692	-61.542
48.0	BX =	-11.930	-4.748	2.755	10.282	17.867	25.565
	BY =	-52.893	-55.570	-56.727	-56.640	-55.443	-53.009
50.0	BX =	-8.910	-3.058	3.196	9.614	16.077	22.481
	BY =	-46.815	-48.869	-49.804	-49.645	-48.408	-46.024

septum

electrode HT

GAP: 20 mm

ELD MAP FOR AIR REGION, CYCLE NUMBER 0
 AND Y ARE GIVEN IN MM, FIELDS IN GAUSS.

X	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	Y	20.0
0.0 BX	0.000	.016	.030	.041	.048	.049	.048	.041	.031	.018	0.0 BX	0.000
0.0 BY	-99.990	-99.992	-99.994	-99.996	-99.998	-100.000	-100.002	-100.005	-100.006	-100.007	0.0 BY	-100.009
2.0 BX	0.000	.016	.030	.041	.047	.050	.048	.042	.031	.015	2.0 BX	0.000
2.0 BY	-99.976	-99.977	-99.981	-99.984	-99.987	-99.989	-100.006	-100.013	-100.018	-100.024	2.0 BY	-100.025
4.0 BX	0.000	.019	.035	.048	.056	.060	.057	.049	.035	.017	4.0 BX	0.000
4.0 BY	-99.958	-99.961	-99.968	-99.978	-99.989	-99.999	-100.011	-100.022	-100.033	-100.041	4.0 BY	-100.039
6.0 BX	0.000	.023	.043	.059	.070	.075	.072	.061	.042	.023	6.0 BX	0.000
6.0 BY	-99.938	-99.941	-99.951	-99.959	-99.970	-99.978	-100.017	-100.035	-100.052	-100.060	6.0 BY	-100.060
8.0 BX	0.000	.029	.056	.078	.093	.099	.094	.078	.057	.030	8.0 BX	0.000
8.0 BY	-99.912	-99.917	-99.931	-99.949	-99.972	-99.997	-100.025	-100.054	-100.072	-100.084	8.0 BY	-100.086
10.0 BX	0.000	.039	.075	.104	.124	.131	.124	.105	.078	.041	10.0 BX	0.000
10.0 BY	-99.876	-99.885	-99.902	-99.928	-99.960	-99.996	-100.038	-100.074	-100.100	-100.118	10.0 BY	-100.122
12.0 BX	0.000	.052	.101	.140	.166	.176	.167	.144	.105	.056	12.0 BX	0.000
12.0 BY	-99.831	-99.841	-99.864	-99.899	-99.944	-99.997	-100.053	-100.100	-100.139	-100.164	12.0 BY	-100.170
14.0 BX	0.000	.071	.136	.189	.225	.237	.229	.198	.146	.077	14.0 BX	0.000
14.0 BY	-99.769	-99.781	-99.812	-99.861	-99.923	-99.997	-100.070	-100.137	-100.191	-100.227	14.0 BY	-100.236
16.0 BX	0.000	.095	.183	.255	.304	.324	.316	.274	.202	.107	16.0 BX	0.000
16.0 BY	-99.686	-99.702	-99.743	-99.808	-99.894	-99.993	-100.092	-100.166	-100.263	-100.313	16.0 BY	-100.329
18.0 BX	0.000	.128	.245	.343	.411	.445	.435	.379	.280	.149	18.0 BX	0.000
18.0 BY	-99.574	-99.595	-99.649	-99.737	-99.851	-99.983	-100.121	-100.253	-100.362	-100.434	18.0 BY	-100.457
20.0 BX	0.000	.169	.327	.460	.558	.608	.599	.526	.408	.210	20.0 BX	0.000
20.0 BY	-99.426	-99.451	-99.522	-99.638	-99.788	-99.967	-100.158	-100.343	-100.498	-100.602	20.0 BY	-100.637
22.0 BX	0.000	.223	.432	.613	.753	.829	.827	.736	.554	.298	22.0 BX	0.000
22.0 BY	-99.230	-99.262	-99.352	-99.500	-99.696	-99.938	-100.202	-100.463	-100.687	-100.839	22.0 BY	-100.891
24.0 BX	0.000	.288	.563	.810	1.009	1.130	1.147	1.037	.793	.431	24.0 BX	0.000
24.0 BY	-98.975	-99.013	-99.125	-99.308	-99.563	-99.884	-100.248	-100.526	-100.793	-101.176	24.0 BY	-101.256
26.0 BX	0.000	.365	.722	1.057	1.340	1.535	1.595	1.477	1.154	.637	26.0 BX	0.000
26.0 BY	-98.648	-98.692	-98.822	-99.041	-99.363	-99.786	-100.266	-100.619	-101.009	-101.663	26.0 BY	-101.791
28.0 BX	0.000	.450	.905	1.353	1.761	2.075	2.225	2.128	1.714	.971	28.0 BX	0.000
28.0 BY	-98.241	-98.286	-98.422	-98.673	-99.063	-99.606	-100.287	-101.056	-101.808	-102.380	28.0 BY	-102.597
30.0 BX	0.000	.531	1.093	1.685	2.272	2.780	3.102	3.100	2.619	1.550	30.0 BX	0.000
30.0 BY	-97.751	-97.786	-97.908	-98.165	-98.609	-99.282	-100.193	-101.303	-102.482	-103.464	30.0 BY	-103.864
32.0 BX	0.000	.580	1.244	2.018	2.857	3.566	4.301	4.556	4.138	2.669	32.0 BX	0.000
32.0 BY	-97.197	-97.202	-97.260	-97.466	-97.923	-98.714	-99.891	-101.463	-103.335	-105.146	32.0 BY	-106.005
34.0 BX	0.000	.537	1.277	2.277	3.467	4.720	5.867	6.670	6.719	5.168	34.0 BX	0.000
34.0 BY	-96.640	-96.572	-96.466	-96.615	-96.900	-97.753	-99.182	-101.293	-104.176	-107.231	34.0 BY	-110.182
36.0 BX	0.000	.269	1.033	2.338	4.011	5.871	7.759	9.492	10.771	10.936	36.0 BX	8.207
36.0 BY	-96.244	-95.995	-95.511	-95.232	-95.406	-96.217	-97.792	-100.335	-104.228	-110.345	36.0 BY	-121.812
38.0 BX	0.000	.566	1.227	2.032	3.372	4.995	6.994	12.729	15.819	19.213	38.0 BX	23.708
38.0 BY	-96.431	-95.669	-94.336	-93.441	-93.282	-93.926	-95.454	-98.076	-102.238	-108.873	38.0 BY	-119.838
40.0 BX	0.000	.803	1.578	2.224	4.468	7.952	11.694	15.824	20.620	26.672	40.0 BX	35.294
40.0 BY	-98.542	-95.839	-92.623	-90.699	-90.362	-90.764	-92.052	-94.335	-97.693	-103.212	40.0 BY	-110.926
42.0 BX	0.000	.746	1.481	2.049	4.481	8.663	13.224	18.269	24.249	31.745	42.0 BX	41.845
42.0 BY	-17.573	-95.113	-89.269	-87.196	-86.528	-86.737	-87.676	-89.344	-91.811	-95.136	42.0 BY	-99.193
44.0 BX	0.000	.667	1.467	2.313	4.191	8.136	14.265	19.992	26.395	34.282	44.0 BX	44.220
44.0 BY	-82.425	-84.508	-83.213	-82.233	-81.857	-81.997	-82.579	-83.554	-84.849	-86.282	44.0 BY	-87.400
46.0 BX	0.000	.821	1.421	2.235	4.177	9.424	14.816	20.635	27.178	34.779	46.0 BX	43.775
46.0 BY	-75.093	-75.801	-76.551	-76.645	-76.677	-76.818	-77.087	-77.430	-77.716	-77.680	46.0 BY	-76.836
48.0 BX	0.000	.521	1.259	2.002	4.318	9.564	14.944	20.658	26.907	33.869	48.0 BX	41.664
48.0 BY	-66.601	-69.092	-70.435	-71.003	-71.370	-71.501	-71.510	-71.349	-70.878	-69.844	48.0 BY	-67.841
50.0 BX	0.000	.702	1.490	2.490	4.534	9.572	14.736	20.147	25.913	32.107	50.0 BX	38.724
50.0 BY	-61.406	-63.584	-65.003	-65.820	-66.213	-66.205	-66.093	-65.565	-64.586	-62.953	50.0 BY	-60.370

septum

electrode HT

ELECTROSTATIC SEPTUM, LEAR.

FIELD MAP FOR AIR REGION, CYCLE NUMBER 0
 X AND Y ARE GIVEN IN MM, FIELDS IN GAUSS.

GAP: 30 mm

y	x	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
0.0	BX =	0.000	.171	.300	.352	.311	.182	0.000
	BY =	-99.969	-99.968	-99.981	-99.999	-100.018	-100.032	-100.038
5.0	BX =	0.000	.203	.358	.425	.378	.223	0.000
	BY =	-99.777	-99.802	-99.880	-99.990	-100.113	-100.208	-100.245
10.0	BX =	0.000	.281	.504	.611	.556	.334	0.000
	BY =	-99.527	-99.583	-99.737	-99.971	-100.234	-100.446	-100.530
15.0	BX =	0.000	.415	.768	.967	.914	.563	0.000
	BY =	-99.172	-99.261	-99.511	-99.917	-100.406	-100.824	-100.991
20.0	BX =	0.000	.611	1.185	1.585	1.593	1.032	0.000
	BY =	-98.657	-98.767	-99.118	-99.767	-100.641	-101.467	-101.820
25.0	BX =	0.000	.826	1.755	2.600	2.886	2.047	0.000
	BY =	-97.946	-98.029	-98.413	-99.351	-100.894	-102.615	-103.447
30.0	BX =	0.000	.880	2.369	4.146	5.360	4.555	0.000
	BY =	-97.140	-97.002	-97.115	-98.264	-100.838	-104.640	-107.146
35.0	BX =	0.000	1.125	2.629	6.175	9.668	11.477	2.133
	BY =	-96.895	-95.712	-94.714	-95.692	-99.275	-106.890	-120.269
40.0	BX =	0.000	3.494	2.009	8.217	16.125	23.806	39.442
	BY =	-101.697	-93.435	-90.226	-90.644	-94.032	-102.079	-120.911
45.0	BX =	-27.321	-9.009	1.042	9.636	19.149	31.887	52.802
	BY =	-83.252	-84.214	-82.681	-82.912	-84.721	-88.116	-91.668
50.0	BX =	-19.669	-8.836	.995	10.258	20.310	32.660	48.809
	BY =	-69.007	-72.515	-73.395	-73.664	-73.725	-72.890	-68.659

septum

électrode HT

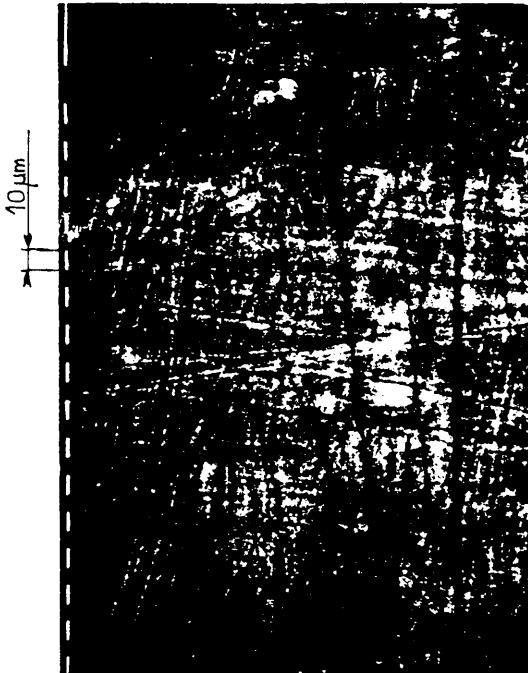
annexe 7

Etat de surface des électrodes

Titane TA6V (tital 318)

Polissage mécanique sans graisse

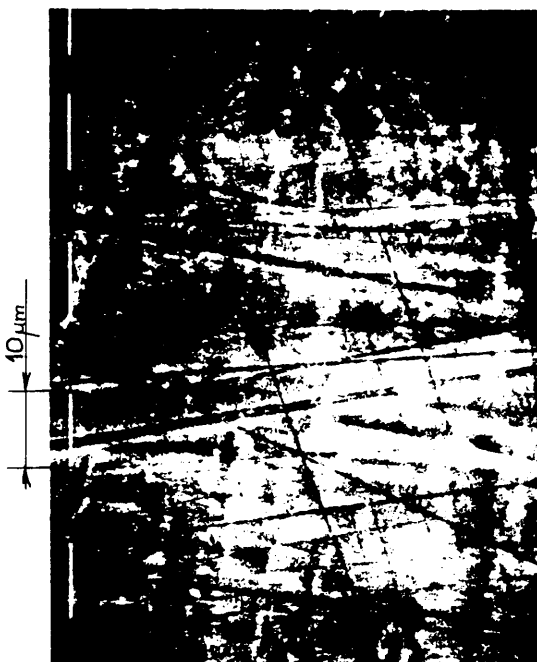
Billage : billes de verre de 30 à 90µm



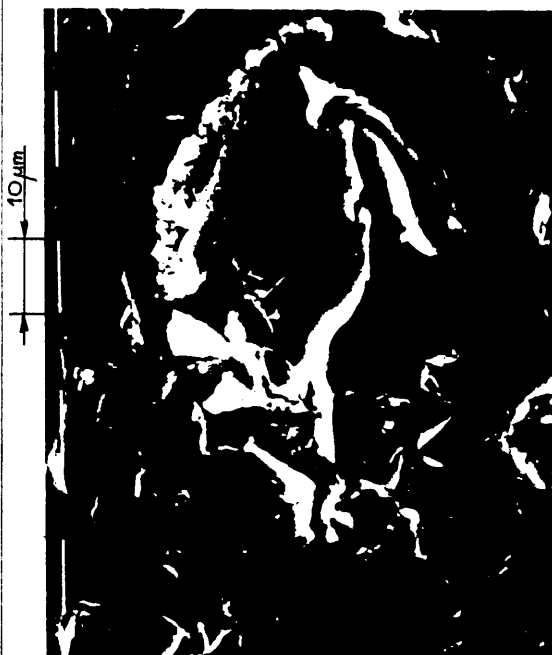
grossissement X 320



grossissement X 320



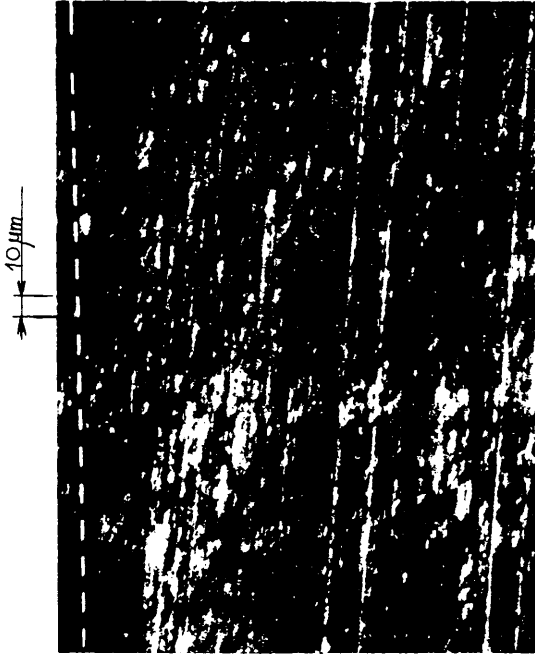
grossissement X 1250



grossissement X 1250

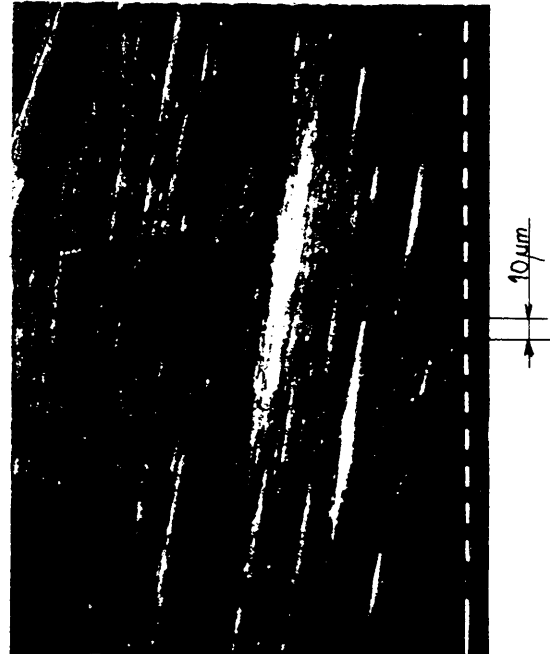
Titane TA6V (tital 318)

Usinage à l'outil diamant

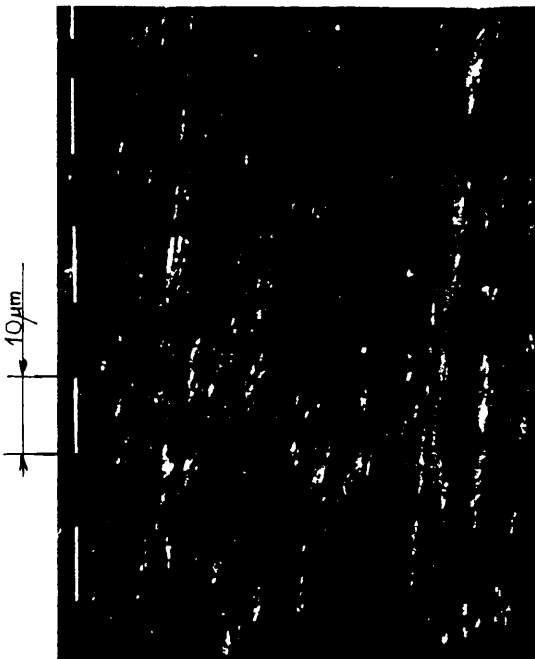


Grossissement x 320

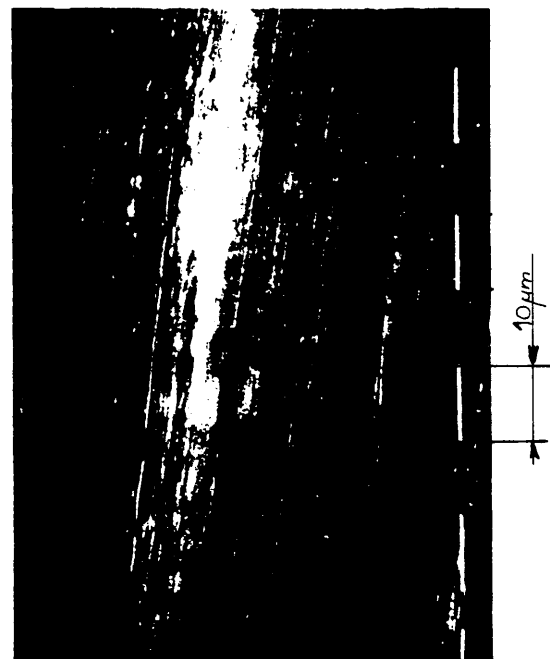
Usinage à l'outil diamant
et polissage à la poudre d'alumine



Grossissement x 320



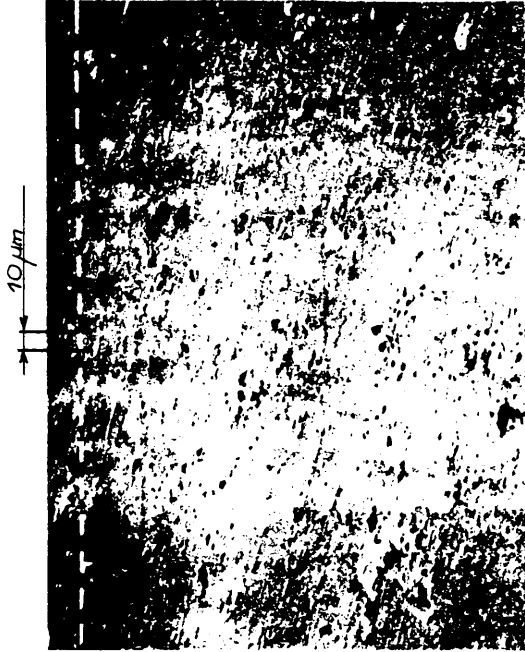
Grossissement x 1250



Grossissement x 1250

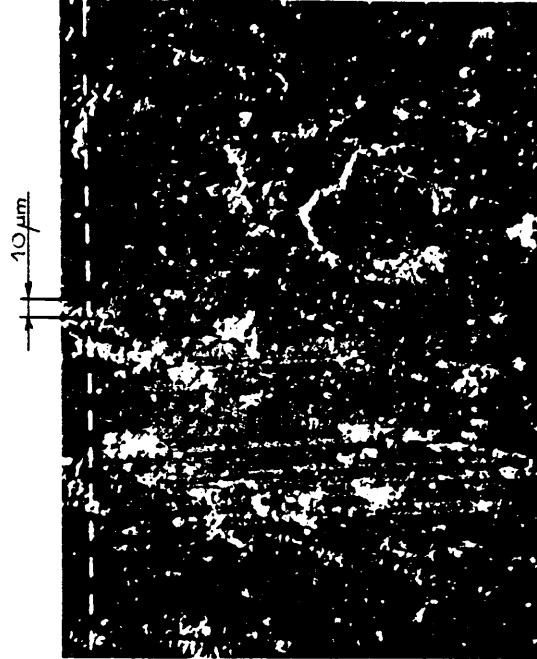
Molybdène

épaisseur 0.1mm laminé à froid dans les deux sens . Nettoyage à la poudre d'alumine

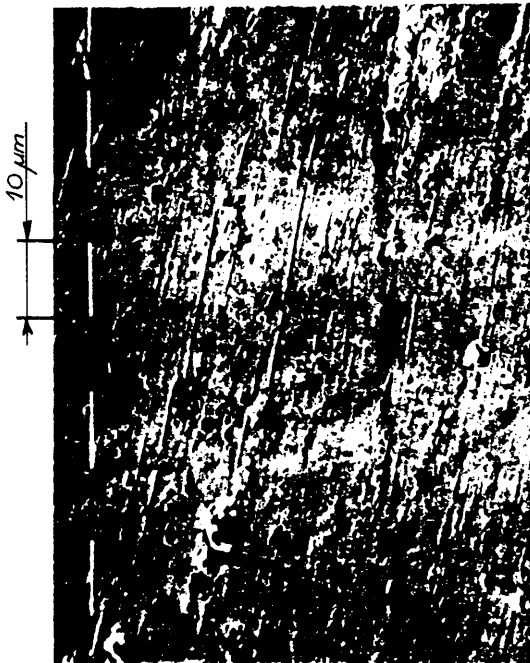


Grossissement x 320

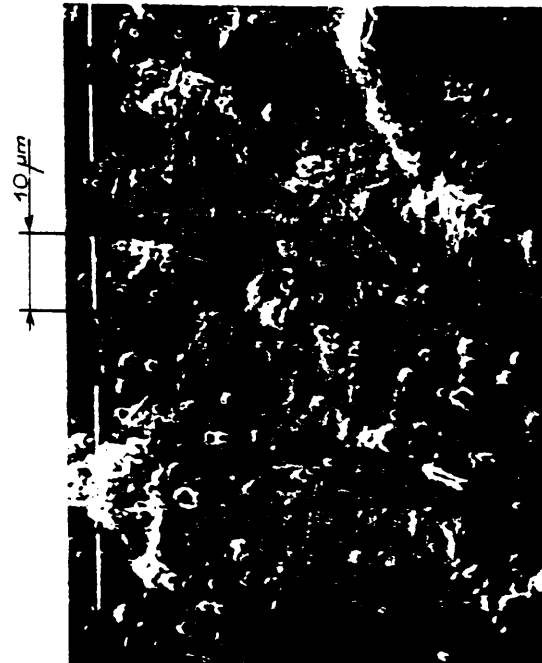
épaisseur 0.1mm laminé à froid après étuvage à 800° C (brasage dans barreau Fi)



Grossissement x 320



Grossissement x 1250



Grossissement x 1250

REFERENCES

1. F. Rohrbach, "Isolation sous vide", rapport CERN 71-5 (1971).
2. J. Delafosse, G. Mongodin, "Les calculs de la technique du vide", Le Vide Mars-avril (1961).
3. M. Aguet, M. Ianovici, "Traité d'électricité de l'E.P.F.L haute tension, Volume XXII", Editions Georgi.
4. H.C. Miller, "Values of Fowler-Nordheim field emission functions $v(y)$, $t(y)$ and $s(y)$ ". General Electric technical information series, rapport No. 66.C-148 (1966).
5. C. Germain, F. Rohrbach, "Mécanisme des décharges dans le vide". VI ème Conf. Int. sur les phénomènes d'ionisation dans les gaz. Tome II p. 111 (1963).
6. F. Rohrbach, "Sur les mécanismes qui conduisent à la formation de l'étincelle électrique à très haute tension et sous ultra-vide par la mesure des temps de retard à la disruption", CERN 71-28 (1971).
7. L. Cranberg, "The initiation of electrical breakdown in vacuum", J. App. Phys. 23, p. 518 (1952).
8. I.N. Slivkov, "Mechanism for electrical discharge in vacuum", Sov. Phys. Techn. Phys. 2, p.1928 (1957).
9. A. Maschke, "Proc. 7th Int. Conf. on high energy accelerators, Yerevan, U.S.S.R Vol. 1 p.576 (1969).
10. A. Durand, P. Tanguy et D. Thouroude, "Champ de fuite des septums électrostatiques à fils", Nucl. Inst. and Methods 165 p.361-370 (1979)
11. A. Durand, "On the scattering of protons at 400 GeV in a wire array placed at the front of an electrostatic septum", Nucl. Inst. and Methods 127 p.349-354 (1975).
12. A. Durand, "Efficacité d'un réseau de fils placé devant la plaque du septum du transfert continu à 12 GeV/c, note interne (1974).

13. C. Germain, L. Jeannerot, F. Rohrback, D. Simon, R. Tinguely, "Technical developments of the CERN electrostatic program", 2nd Int. Symp. on insulation of high voltages in vacuum, p.279-291 Boston (1966).
14. L. Danloy, P. Simon, "Comportement haute tension des séparateurs électrostatiques en présence de vapeurs organiques", rapport CERN/MPS-MV/S 71-1 (1971).
15. G. Streib, "Contribution à l'étude de l'isolement électrique dans le vide à grande distance", Thèse Université de Grenoble (1971).
16. J. Bleeker, C. Germain, M. Thivent, R. Tinguely, "Development of an electrostatic septum at CERN for high energy proton synchrotron", Vth Int. Symp. on discharges and electrical insulation in vacuum, p.377-382 Poland (1972).
17. D. Simon, R. Michelier, "Développements liés à l'étude d'un séparateur électrostatique à plaques multiples", 3ème Int. Symp. on discharges and electrical insulation in vacuum, p.263 Paris (1968).
18. "Design study of a facility for experiments with low energy antiprotons", LEAR) rapport CERN/PS/DL 80-7 (1980)
19. R.P. Henry, "Mesure du taux de dégazage", Le Vide No. 144, p.316-335 Nov. Dec. (1969).
20. J.S. Hornsby, "A computer program for the solution of elliptic partial differential equations", rapport CERN 63-7 (1963).