

Rensy. A

CERN PS/JH 1
Septembre 1955.

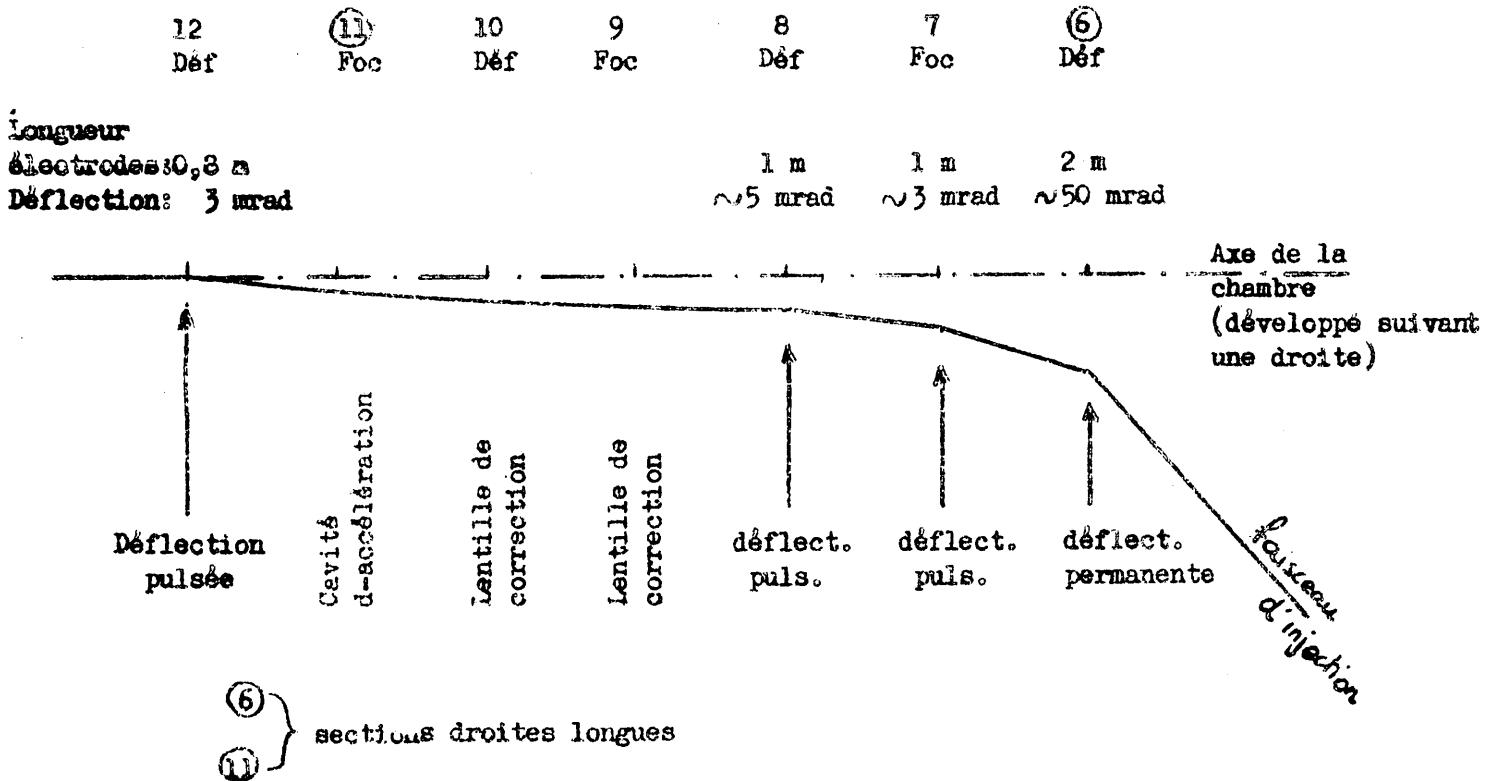
INJECTION DANS LE SYNCHROTRON.

TENSIONS REQUISES AUX ELECTRODES DE DEFLECTION PULSEES.

TRAJECTOIRE D'INJECTION.

A. Introduction.

Le nouveau schéma d'injection, décrit dans le rapport CERN-PS/PL 5, comporte 4 paires de plaques de déflexion électrostatique s'échelonnant le long du trajet d'injection. On a dans l'ordre: (voir fig. 1)



- 1) - Dans la grande section droite 6, une paire de plaques dont le champ, donnant au faisceau un changement d'angle de 50 mrad, est entièrement en dehors de la chambre à vide "normale". En conséquence, il ne sera pas nécessaire de supprimer ce champ après l'injection et la tension aux plaques ne se trouve pas limitée par des questions d'impulsions rapides. Longueur des plaques: $\cong 2m$ (grande section droite).

2) - 3 paires de plaques dont le champ se situe dans l'espace occupé par la chambre a vide normale et devra donc être pulsé. La tension à appliquer aux électrodes sera donc déterminante à cause des difficultés rencontrées pour appuyer le champ après l'injection. On a approximativement les déflexions suivantes, pour un faisceau de 30 micronradians

en 7: 3 mradians, longueur des plaques: 1 mètre (petite section droite)			
en 8: 5 mradians	1 mètre	"	"
en 12: 3 mradians	0,8 mètre	"	"

Pour une énergie donnée du faisceau d'injection, la tension est fixée par les trois paramètres suivants

- | | | |
|---------------------------|---|--|
| a) angle de déflexion | } | a) et b) fixant le champ électrostatique |
| b) longueur des plaques | | |
| c) distance entre plaques | | |

La longueur maximum des plaques étant déterminée par des conditions géométriques pratiquement immuables (Note 1), les deux seules grandeurs susceptibles d'être modifiées en vue d'une diminution de la tension sont la distance entre plaques et l'angle de déflexion.

On va montrer dans le présent rapport comment il est possible de choisir judicieusement distances entre plaques et angles afin de réduire à son minimum la tension aux électrodes 7 et 8. (Il est facile de voir que la tension en 12 est inférieure à celle en 7 et 8 et ne justifie pas une étude particulière).

On établira une relation entre la tension de déflexion minimum (en 7 et 8) et la largeur du faisceau injecté, cela pour différentes conditions d'entrée en 6 (dépendant de la configuration des électrodes 6).

Note 1.

Une petite section droite a 1,6 m de longueur. l'encombrement d'une bobine d'excitation en bout des aimants est de 0,3 m. En 7 et en 8 il reste donc $1,6 - 2 \cdot 0,3 = 1$ mètre à disposition pour les électrodes de déflexion. En 12, on prendra provisoirement des électrodes de 0,8 m de longueur, l'espace supplémentaire étant réservé à des plaques électrostatiques de correction dans le plan vertical.

Il sera également nécessaire de considérer l'influence des dimensions radiales de la chambre à vide sur les tensions pulsées, celles-ci ayant été portées de 12 à 15 cm au cours des derniers mois.

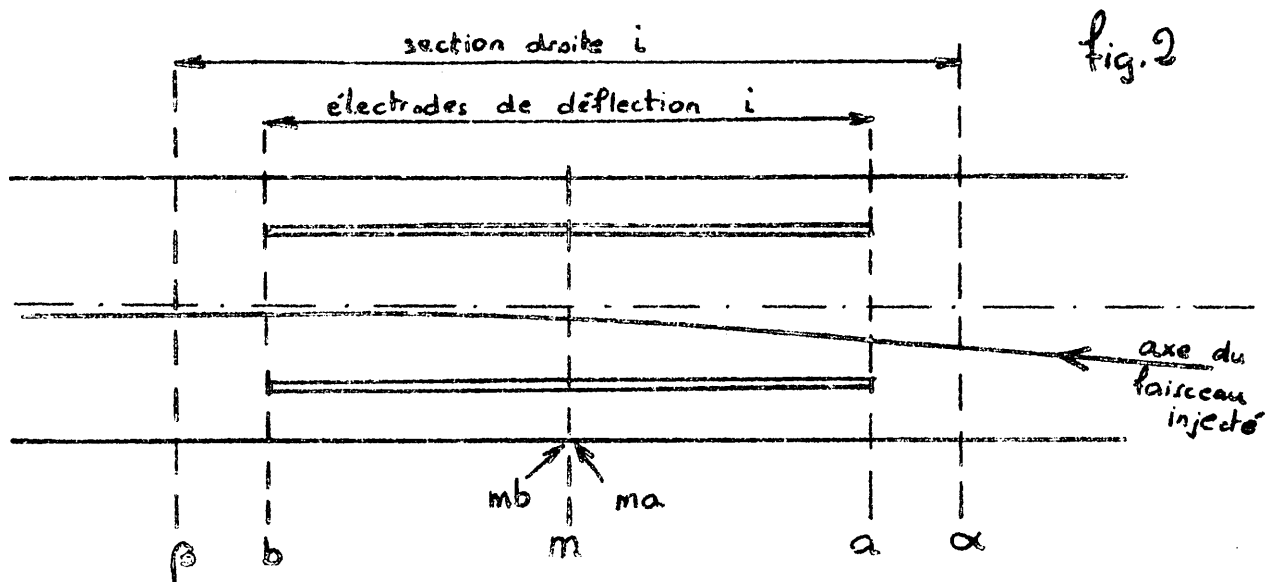
Divers autres points, tels que la précision requise pour les tensions, l'obligation éventuelle d'injecter sur l'orbite fermée et ses conséquences sur les tensions, seront examinés en dernier lieu.

B. Symboles employés.

Certains symboles seront affectés d'un ou de plusieurs indices. Leurs significations sont les suivantes:

Premier indice: chiffre caractéristique d'une certaine section droite.

Deuxième indice: lettres précisant un endroit à l'intérieur de la section droite considérée.



- α → début section droite
- a → début électrodes
- m → milieu électrodes
- ma → milieu électrodes, côté amont (voir note p. 4)
- mb → milieu électrodes, côté aval
- b → fin électrodes
- β → fin section droite.

Symboles:

Faisceau:

- δ $\frac{1}{2}$ largeur moyenne du faisceau
- A acceptation du faisceau.
- x coordonnée d'azimuth de l'axe du faisceau
- y déplacement radial de l'axe du faisceau par rapport à l'axe de la chambre à vide normale (les valeurs $y > 0$ correspondent à l'extérieur de l'orbite d'équilibre)
- \bar{y} idem, réduit à l'échelle utilisée pour la construction graphique dans le plan des phases.
- $y' = \frac{dy}{dx}$ tangente que font entre elles les tangentes aux axes du faisceau d'une part et de la chambre à vide normale d'autre part.
- \bar{y}' idem, réduit à l'échelle
- $p = y/\bar{y} = (y'/\bar{y}')$ échelle employée pour la représentation du plan des phases.
- $\Delta y'$ changement d'angle produit par une déflexion électrostatique

Electrodes:

- l distance entre électrodes.
- U tension entre électrodes
- E champ électrostatique

Chambre à vide:

- b demi largeur de la chambre normale
- B distance entre l'axe de la chambre normale et le point des électrodes 6 qui en est le plus rapproché (voir Annexe 1).

Note:

Dans ce rapport, il est fait emploi de la construction graphique dans le plan des phases décrite dans le rapport CERN PS/PL 2.

On y remplace notamment la trajectoire parabolique d'un faisceau traversant un champ électrostatique homogène par deux segments de droite formant un angle égal à la déflexion totale produite par le champ entre les points a et b

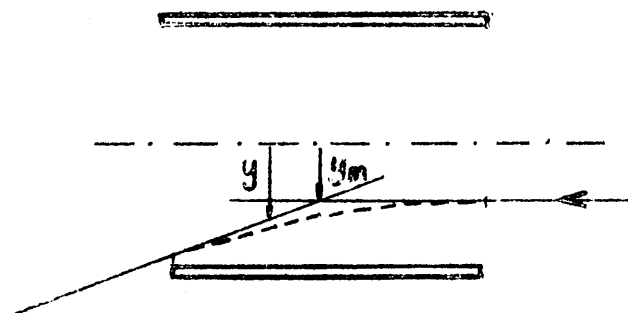


Fig. 3.

Les déplacements y considérés dans ce rapport seront ceux de la trajectoire rectiligne d'approximation, dite trajectoire fictive.

L'apparition d'une discontinuité de la coordonnée y' au centre des plaques requiert l'introduction d'un indice spécial. On aura :

y'_{ms} tangente de la trajectoire au milieu des électrodes, avant le changement d'angle.

y'_{mb} idem, après le changement d'angle.

On a $y'_{mb} = y'_{ms} + \Delta y'$

C. Rappel des conditions géométriques définissant le problème.

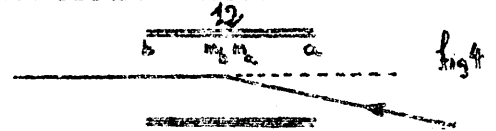
1) - A la sortie des plaques de correction angulaire 12, le faisceau doit être centré sur l'orbite d'équilibre, donc

$$\begin{cases} y_{12\ b} = y_{12\ mb} = 0 \\ y'_{12\ b} = y'_{12\ mb} = 0 \end{cases}$$

Au centre des mêmes plaques, il aura donc les coordonnées fictives suivantes

$$\begin{cases} y_{12\ ma} = 0 \\ y'_{12\ ma} = -\Delta y'_{12} \end{cases}$$

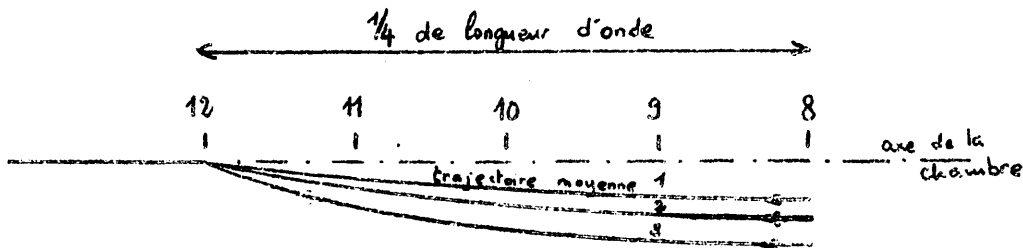
où y'_{12} \equiv déflexion totale apportée par les plaques 12.



Les plaques 8 se situent à un quart de période d'oscillation libre en amont des plaques 12. On aura donc nécessairement

$$\begin{cases} y_{8\ mb} \sim \Delta y'_{12} \\ y'_{8\ mb} = 0 \end{cases}$$

où $y_{8\ mb}$ est fonction de la déflexion $\Delta y'_{12}$ seulement et lui est proportionnel.



$$\begin{cases} y_{12\ ma} = 0 \\ y'_{12\ ma} = -\Delta y'_{12} \end{cases}$$

$$\begin{cases} y_{8\ mb} \sim \Delta y'_{12} \\ y'_{8\ mb} = 0 \end{cases}$$

Ce point 8 mb, connu à une coordonnée près, pourra servir de point de départ pour les études des trajectoires entre 6 et 9, comme on le verra plus loin.

2) - Au centre de la section droite 9 se trouve une lentille quadrupolaire de correction. La chambre à vide à cet endroit doit donc avoir la même dimension que la chambre à vide normale (largeur $2b$), pour laquelle les lentilles ont été dimensionnées. Le faisceau doit donc être entièrement amené à l'intérieur de la chambre à vide normale en cet endroit. On a la condition suivante (voir fig. 6)

Foc 9

Def 8

Foc 7

Def 6

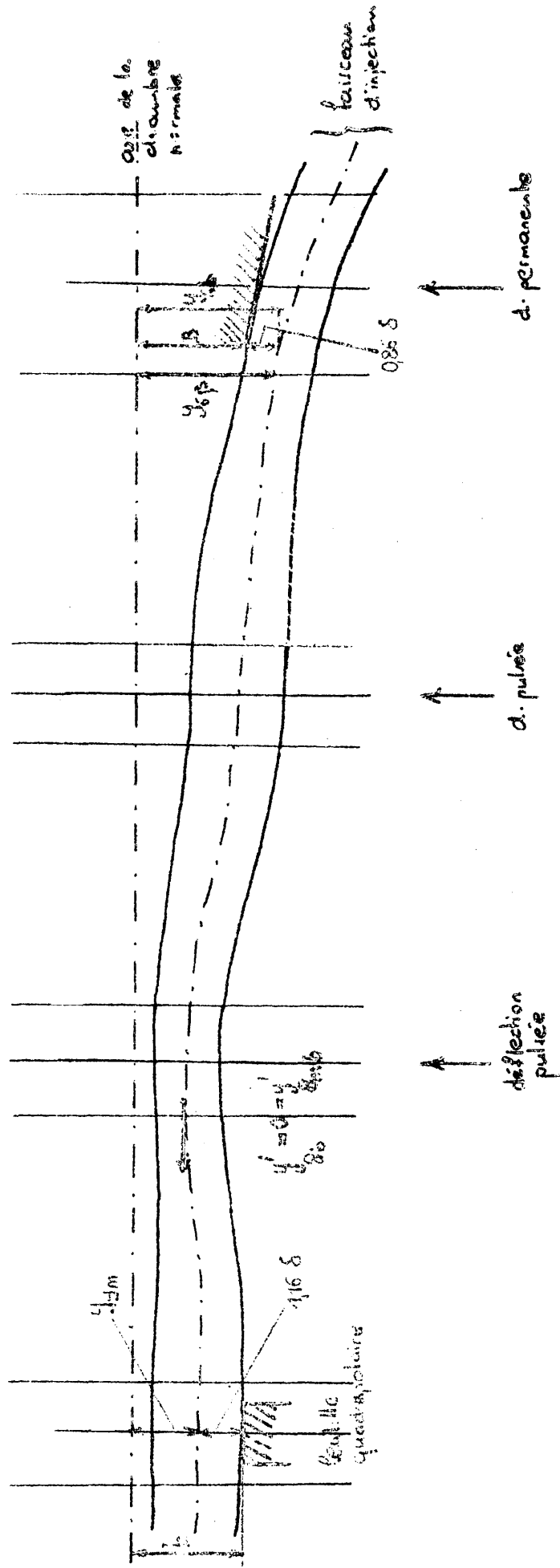


Fig 6 - Conditions geometriques d'injection -

$$y_{9m} \leq b - 1,16 \delta$$

où $\delta \equiv 1/2$ largeur moyenne du faisceau injecté (au milieu d'une section droite comprise entre deux secteurs focalisants, le faisceau a une $1/2$ largeur maximum égale à $1,16 \delta$)

3) - En 6, le bord du faisceau ne doit pas toucher l'électrode de droite. On a approximativement la relation (fig. 6)

$$y_{6b} \geq B + 0,86 \delta$$

(on est entre deux secteurs défocalisants et la largeur minimum du faisceau est égale à $0,86 \delta$)

La distance B varie suivant la configuration de l'électrode de droite en 6 et la forme de la chambre à vide du synchrotron à cet endroit. Voir annexe 1.

Une diminution de B amènera naturellement une diminution des tensions nécessaires en 7 et en 8.

Pour faciliter l'étude graphique, on remplacera l'inégalité ci-dessus par la suivante:

$$y_{6\beta} \geq B + 0,86 \delta$$

établissant la condition géométrique à la sortie de la section droite 6 et non à la sortie des plaques 6, ce qui équivaut à prendre une très légère marge de sécurité.

4) - Les deux conditions mentionnées sous 2) et sous 3) remplies simultanément, établissent une relation entre la $1/2$ largeur moyenne δ du faisceau injecté et les champs (donc les angles) minima de déflexion en 7 et 8.

5) - Une autre condition vient limiter la largeur du faisceau injecté (voir fig. 6). Il s'agit de la zone interdite créée par le champ de fuite du secteur magnétique focalisant précédant la section droite 7 (voir CERN-PS/PL 5)

L'espace libre entre le bord de l'électrode de déflexion permanente en 6 et la zone interdite permettrait d'injecter un faisceau de 15 micronradians au maximum, valeur bien inférieure à celle fixée par les tensions maximum pulsées et découlant de la dépendance établie sous 4).

Il semble donc raisonnable d'admettre une correction locale du champ de fuite considéré afin de faire reculer la zone interdite de 1 à 2 cm, rendant alors possible le passage d'un faisceau de 30 micronradians.

La limitation 5) est de caractère géométriquement simple. La relation 4), de nature plus complexe, fera l'objet de cette étude.

Remarque importante.

Les plaques 7 et 8 devant toutes deux être pulsées et n'étant distantes l'une de l'autre que de 5 mètres environ, on aura avantage à les connecter en parallèle afin de pouvoir employer une source d'alimentation et un dispositif de décharge communs. On aura donc $U_7 = U_8$.

Du point 8 mb, nous dessinons la trajectoire vers 9 m en suivant la direction du faisceau. Nous avons successivement:

- 1 secteur magnétique défocalisant
- 1 secteur magnétique focalisant
- 1 demi section droite

La trajectoire vers 6 se fait en remontant le cours du faisceau:

- 1 déflexion arbitraire $\overline{\Delta y}_8^i$
- 1/2 section droite
- 1 secteur magnétique déf.
- 1 secteur magnétique foc.
- 1/2 section droite
- 1 déflexion $\overline{\Delta y}_7^i = \overline{\Delta y}_8^i$
- 1/2 section droite
- 1 secteur foc.
- 1 secteur déf.

Formant le rapport $k = \frac{\overline{y}_{68}}{\overline{y}_{9m}} = \frac{y_{68}}{y_{9m}}$ et introduisant cette valeur dans le

système d'équations (1), (2), nous en tirons les valeurs de δ , y_{9m} et y_{68}° . L'échelle p est ainsi connue, et cela nous permet de savoir à quelles déflexions $\Delta y_8^i = \Delta y_7^i$ correspond la demi largeur du faisceau δ obtenue.

Répétant ce procédé pour différents $\overline{\Delta y}_8^i = \overline{\Delta y}_7^i$ (en laissant \overline{y}_8 mb constant, afin de garder le trajet entre 8 et 9 inchangé sur le dessin) on obtient la fonction cherchée: $\Delta y_8^i = \Delta y_7^i = f(\delta)$

Le champ électrique de déflexion est proportionnel aux angles de déflexion. On a la relation suivante, pour un faisceau de 50 MeV et des électrodes de 1 mètre de longueur:

$$E \text{ [kV/cm]} \approx \Delta y^i \text{ [milliradian]}$$

Si la distance entre les électrodes est connue on obtient alors la fonctions:

$$U = U(\delta)$$

2) - Analyse du résultat.

Les constantes utilisées pour toutes les constructions graphiques sont données dans l'annexe No. 2.

Les différentes opérations à effectuer pour chacune des trajectoires sont les suivantes:

1)
$$K = \frac{\bar{y}_{6\beta}}{\bar{y}_{9m}} \quad \text{où } \bar{y}_{6\beta} \text{ et } \bar{y}_{9m} \text{ sont tirés du dessin}$$

2)
$$\delta [\text{cm}] = \frac{6 K - B}{1,16 K + 0,86}$$

3)
$$p \left[\frac{\text{cm}}{\text{cm}} \right] = \frac{6 - 1,16 \delta}{\bar{y}_{8 mb}} \quad \text{où } \bar{y}_{8 mb} \text{, tiré du dessin, est une grandeur fixe.}$$

4)
$$E_7 [\text{kV/cm}] = E_8 = \Delta y_8' [\text{mrad}] = \Delta y_7' = p \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \Delta \bar{y}_8' \quad \text{où } \rho = 422 \text{ cm (voir annexe 2)}$$

Les constructions et calculs peuvent être grandement simplifiés par les constatations suivantes.

a) En gardant $\bar{y}_{8 mb}$ constant et en variant $\Delta \bar{y}_8'$, le lieu des points 6β est une droite.

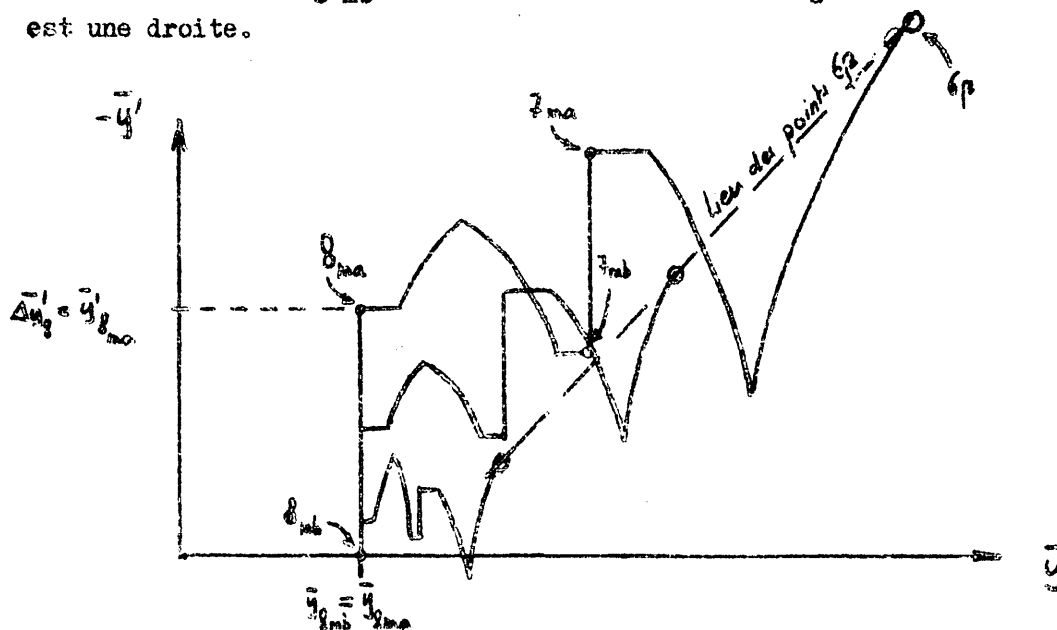


Fig. 8

En effet, on doit avoir un système d'équations tel que

$$\begin{cases} \bar{y}_{7 mb} = K_1 \bar{y}_{8 ma} + K_2 \bar{y}_{8 ma} \\ \bar{y}_{7 mb} = K_3 \bar{y}_{8 ma} + K_4 \bar{y}_{8 ma} \end{cases}$$

où $\bar{y}_{8 ma} = \text{constant}$

D'autre part, on a

$$\begin{cases} \bar{y}_{6\beta} = K_5 \bar{y}_{7ma} + K_6 \bar{y}_{7ma} \\ \bar{y}_{6\beta} = K_7 \bar{y}_{7ma} + K_8 \bar{y}_{7ma} \end{cases}$$

où les deux grandeurs suivantes

$$\begin{cases} \bar{y}_{7ma} = \bar{y}_{7mb} \\ \bar{y}_{7ma} = \bar{y}_{7mb} + \bar{y}_{8ma} \end{cases}$$

sont linéairement dépendantes de \bar{y}_{8ma} .

On a donc bien une relation linéaire entre les deux coordonnées du point 6 β et la variable $\Delta y_8 = \bar{y}_{8ma}$

Il suffit donc de trouver 2 points de la droite cherchée et de la diviser homothétiquement pour obtenir l'ensemble des solutions.

Moyennant la constatation ci-dessus et les équations 1, 2, 3, 4, il est aisé de démontrer que les champs $E_7 = E_8$ doivent, pour une condition d'entrée B fixe, varier linéairement avec la $\frac{1}{2}$ largeur du faisceau δ , ce qui semble d'ailleurs assez évident.

Pour différents B, nous obtenons une famille de droites parallèles. Voir figure 9.

b) Pour une construction graphique, donc une valeur K fixe et différentes valeurs de B , les points du diagramme $E = E(\delta)$ doivent se trouver sur une droite pour laquelle E s'annule lorsque l'échelle $p = 0$, donc au point de l'axe horizontal $\delta = \frac{6}{1,16}$ cm (fig. 9).

Pour différentes constructions graphiques, on obtient une famille de droites convergentes.

Cette remarque contribuera à simplifier grandement les recherches graphiques effectuées par la suite (chapitre E).

Resultat: (Fig. 9).

Pour $B = 5$ cm (chambre rentrante en 6, une électrode de déflexion permanente à la masse, cas (c) de l'Annexe 1), un champ de 3,7 kV/cm en 7 et en 8 est nécessaire pour injecter un faisceau de 30 micronradians d'acceptance ($\delta = 2,25$ cm).

La distance "1" entre les électrodes doit être certainement choisie supérieure à la largeur de la chambre à vide normale ($2b = 12$ cm), le faisceau d'injection n'étant pas entièrement situé à l'intérieur de cette dernière dans la section droite 7. Pour un faisceau de 30 micronradians ($\delta = 2,25$ cm), on aura

$$l_7 = l_8 > 14 \text{ cm}$$

$$U_7 = U_8 > 14 \cdot 3,7 = \underline{\underline{51,8 \text{ kV}}}$$

L'hypothèse de distances l_7, l_8 égales correspond en fait à une mauvaise adaptation aux conditions d'encombrement du faisceau dans la chambre. On va, dans la section suivante, montrer comment il est possible de tirer profit de diverses propriétés géométriques pour abaisser la tension $U_7 = U_8$ en faisant l'hypothèse de distances interplaques inégales.

La relation entre l'acceptance et la largeur du faisceau est indiquée sur la fig. 10.

$E_7 = E_8$ [kV/cm]
 champ de deflection en Tef8

$\Delta y'_7 = \Delta y'_8$ [mrad]
 angle de deflection en Tef8

Fig 9: Chambre de demi-largeur $b = 6\text{cm}$
Les électrodes Tef8 ont même distance
interplaque $l_7 = l_8$

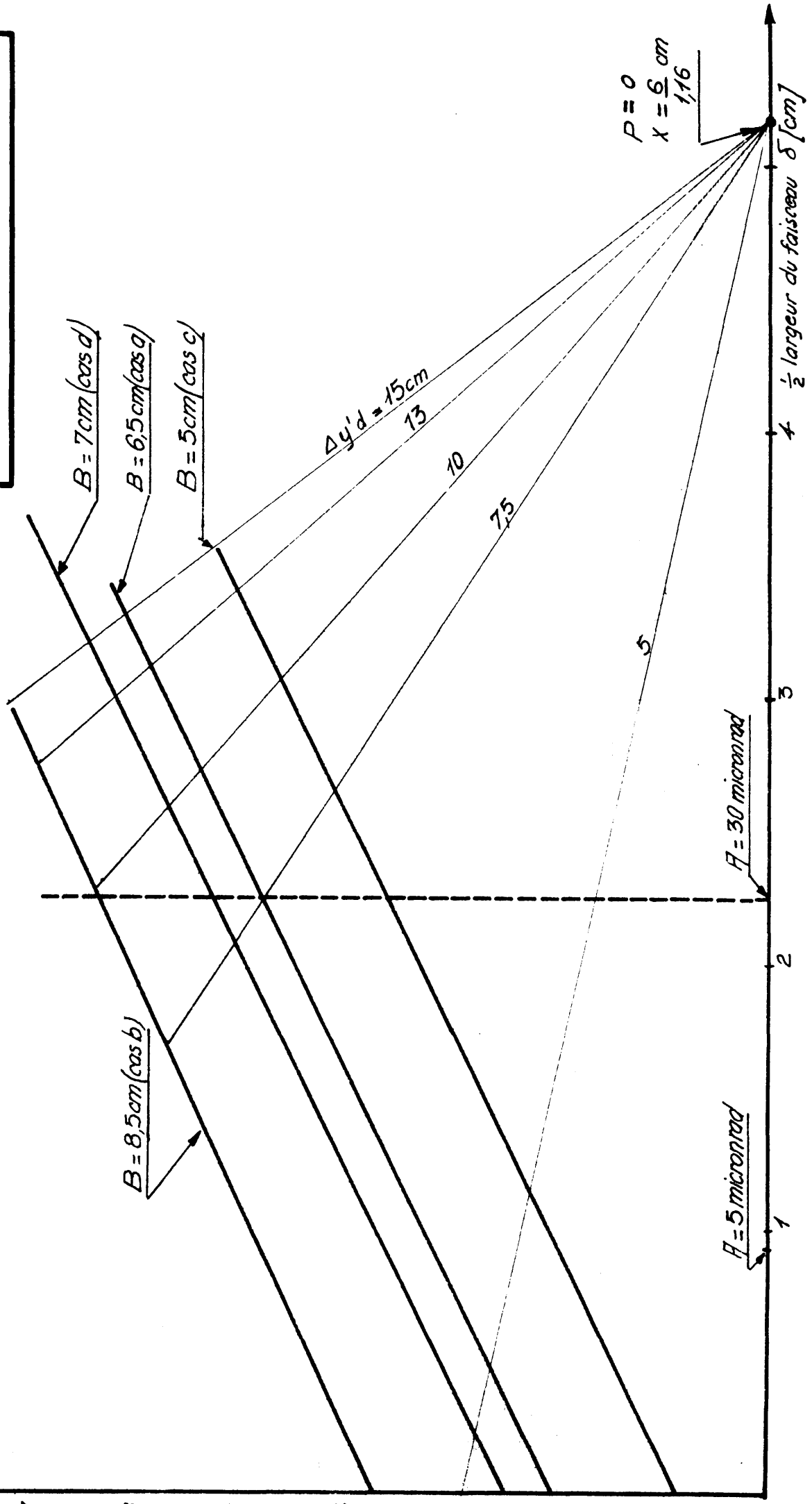
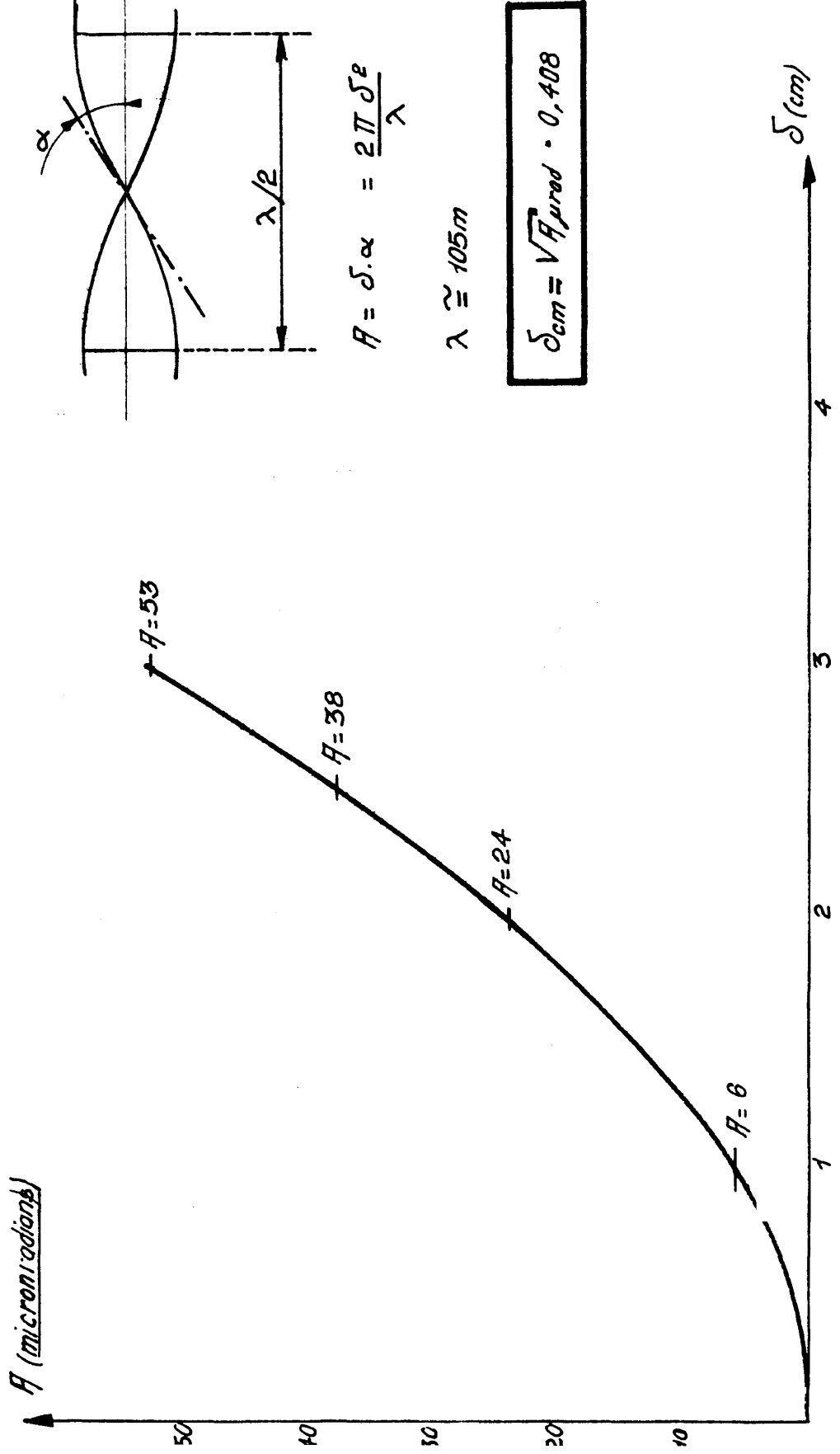


Fig 10: Relation entre la demi-largeur δ du faisceau d'injection et son acceptance H



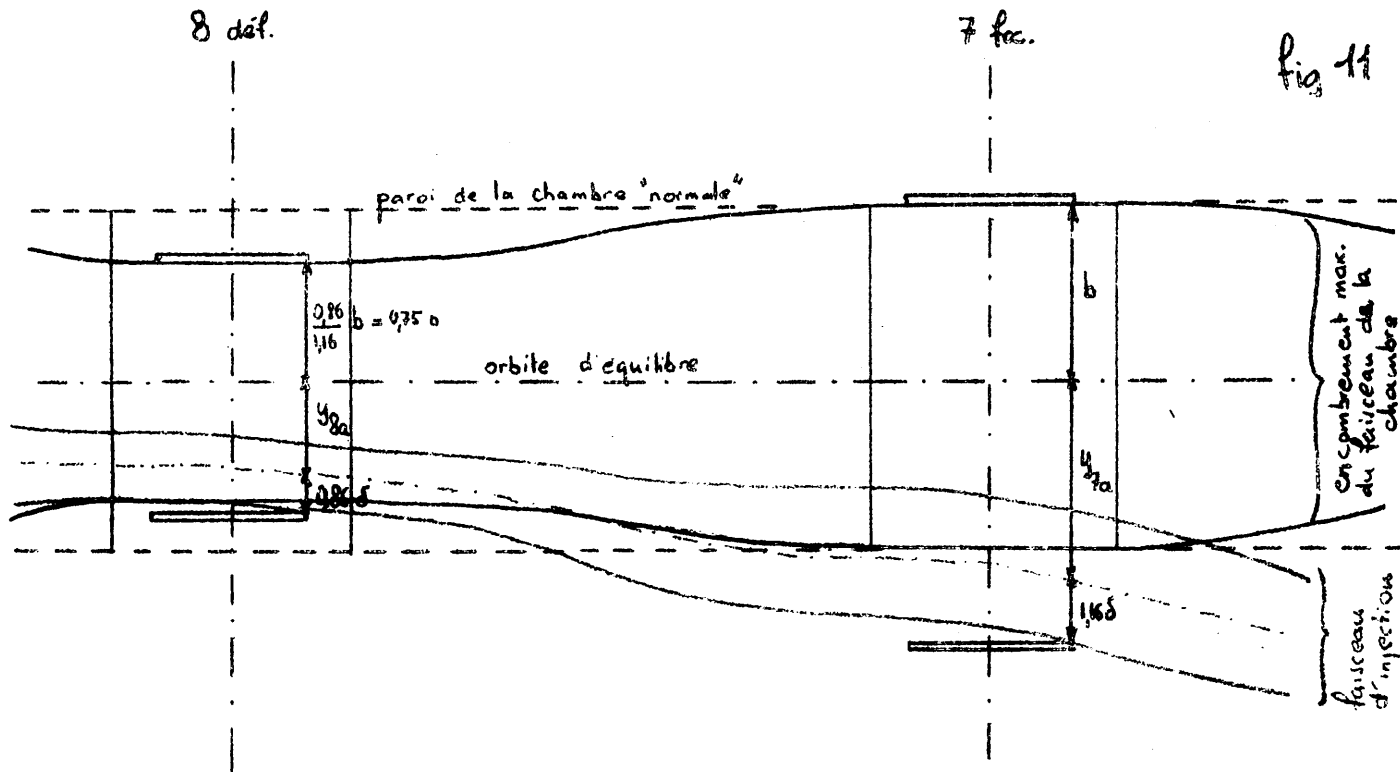
E. Calcul de la tension $U_7 = U_8$ en fonction de la $\frac{1}{2}$ largeur du faisceau injecté.

Paramètre: B (configuration des électrodes d'entrée 6)

Cas spécial $l_7 \neq l_8$ donc $\Delta v_7' \neq \Delta v_8'$.

Chambre à vide normale de $\frac{1}{2}$ largeur $b = 6$ cm.

L'encombrement du faisceau dans la chambre est le suivant:



Grâce à l'ondulation du diamètre du faisceau, il est possible de rapprocher les plaques en 8 (espace défocalisant) tout en les gardant à une distance assez grande en 7 (esp. focalisant).

Conservant l'hypothèse $U_7 = U_8$, on aura un angle de déflexion plus grand en 8 qu'en 7.

$$(5) \quad \frac{E_7}{E_8} = \frac{l_8}{l_7} \approx \frac{0,75 b + y_{8a} + 0,86 \delta}{b + y_{7a} + 1,16 \delta}$$

La demi largeur du faisceau à l'entrée des plaques est égal à $0,86 \delta$ et $1,16 \delta$.

1) Operations effectuées.

On va reprendre la construction graphique décrite précédemment (fig. 7). Pour une certaine déflexion $\Delta \bar{y}_8$ sur le dessin, on va choisir un certain nombre de rapports

$$\frac{\Delta \bar{y}_7}{\Delta \bar{y}_8} = \frac{E_7}{E_8}$$

arbitraires, par exemple 0,75 ; 0,50 ; 0,25. Le lieu des points $G\beta$ cherchés se situe sur une droite dans le plan des phases.

Refaisant cette même série d'opérations pour différentes déflexions de départ $\Delta \bar{y}_8$, on obtient l'image suivante dans le plan des phases:

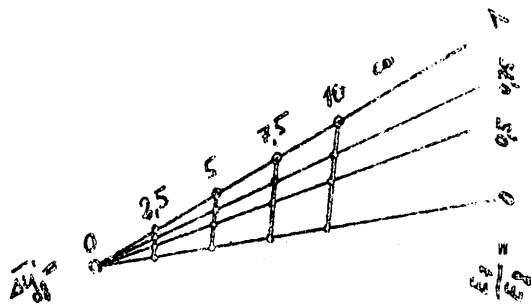


Fig 12

Lieux de points $G\beta$ dans le plan des phases.

La droite correspondant à $\frac{E_7}{E_8} = 1$ est celle déjà trouvée au chapitre précédent.

Les propriétés géométriques simples de la fig. 12 permettent d'obtenir facilement dans le plan E_8, δ (fig. 13) les deux familles de droites correspondantes dont les points de convergence se situent sur l'axe horizontal δ .

De toutes les solutions trouvées, seules sont intéressantes celles qui satisfont l'équation (5). Or on a choisi à priori certaines valeurs du rapport $\frac{E_7}{E_8}$ sans connaître les dimensions du faisceau et sa position; mais ces deux données sont indispensables pour fixer les distances minima l entre électrodes et pouvoir former le rapport $\frac{E_7}{E_8} = \frac{l_8}{l_7}$.

Il s'agit donc de trouver pour quelle solution de chaque droite $y_8^v = \text{constant}$ (voir fig. 13), le rapport $\frac{E_7}{E_8}$ choisi est égal au rapport des longueurs $\frac{l_8}{l_7}$.

Le contrôle point par point risque de représenter un travail long et fastidieux. Il faudrait en effet construire la trajectoire d'un grand nombre de points du plan $E_8 \delta$, calculer les grandeurs l d'après la fig. 11, en former le rapport et le comparer avec la valeur $\frac{E_7}{E_8}$ prise au départ. Suivant le résultat de cette comparaison, écarter ou conserver cette solution.

On peut simplifier cette recherche en constatant que le rapport $\frac{l_8}{l_7}$ ne varie que très peu le long des droites $\Delta \bar{y}_8 = \text{constant}$ (le calcul a été effectué pour deux points extrêmes de plusieurs de ces droites). En d'autres termes, les droites $\Delta \bar{y}_8 = \text{constant}$ sont aussi des droites $\frac{l_8}{l_7} = \text{constant}$. L'intersection d'une droite $\frac{E_7}{E_8} = \text{constant}$ avec la droite l_8/l_7 correspondante donne la solution.

Le lieu des points solutions est aussi une droite (fig. 13)

La relation entre tension de déflexion $U_7 = U_8$ et δ est donnée par la fig. 14 et se déduit de la multiplication des valeurs de E_8 (fig. 13) par les distances $l_8 = (0,75 b + y_{8a} + 0,86 \delta)$ cm
 $= (4,5 + y_{8a} + 0,86 \delta)$ cm correspondantes.

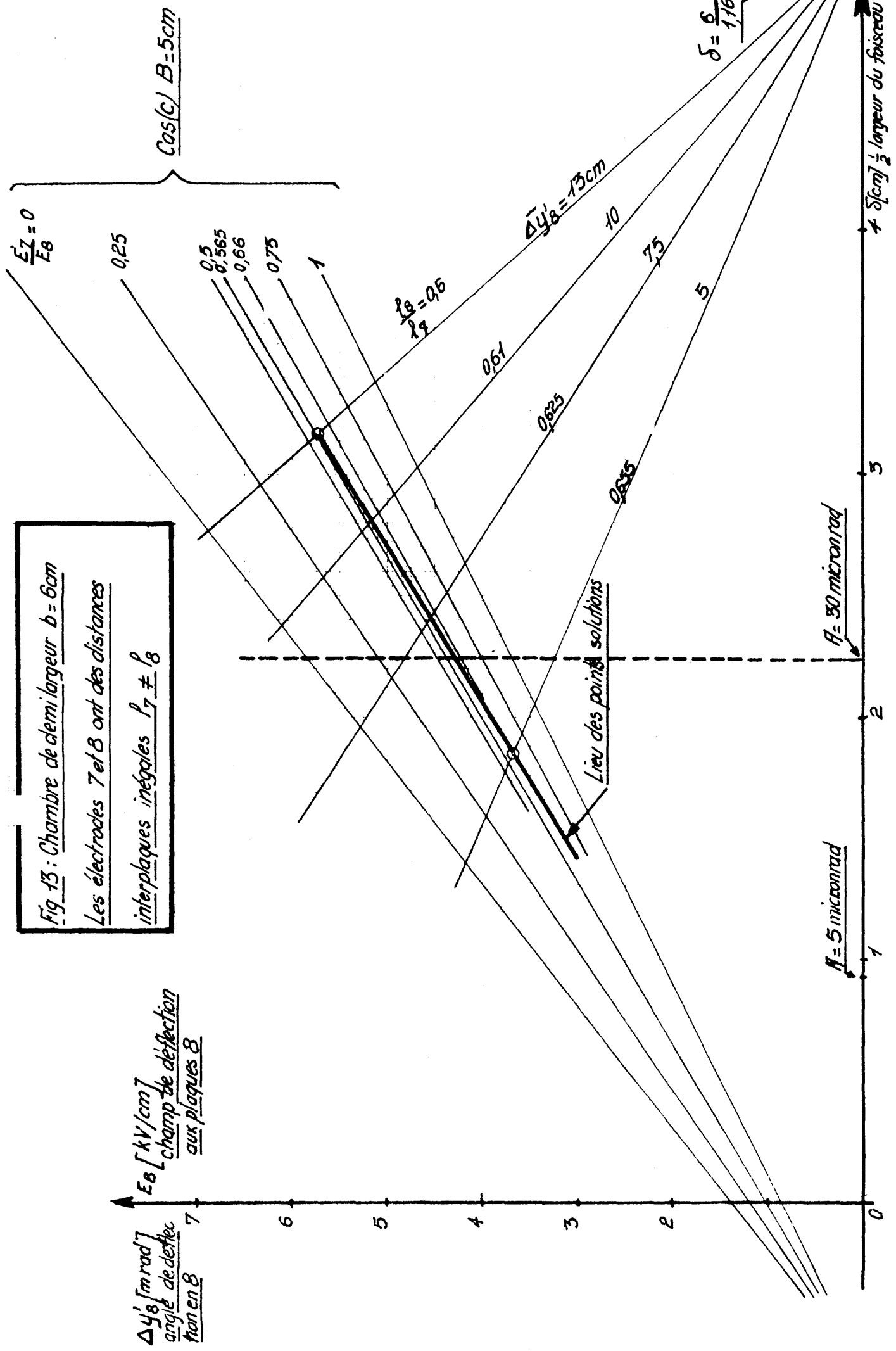
Résultat:

$$\text{Pour } \begin{cases} B = 5 \text{ cm} \\ \delta = 2,25 \text{ cm } [A = 30 \text{ micronradians (cas (c))}] \end{cases}$$

on a $U_7 = U_8 = 41 \text{ kV}$, soit une tension inférieure de plus de 10 kV à celle nécessaire lorsque les plaques ont des distances égales.

Pour $B = 7 \text{ cm}$ (chambre rentrante en 6 et les deux électrodes de déflexion permanente isolées de la masse (cas (d))) la droite $U = U(\delta)$ est placée à environ 20 kV au-dessus de la première et lui est parallèle. Ecarter l'axe du faisceau d'injection de 1 cm à la sortie des électrodes non pulsées fait croître la tension des électrodes pulsées de 10 kV.

**Fig. 13 : Chambre de demi largeur $b = 6\text{cm}$
 Les électrodes 7 et 8 ont des distances
 interplaques inégales $p_7 \neq p_8$**



$\cos(c) \quad B = 5\text{cm}$

$\frac{E_z}{E_8} = 0$

0.25

0.5

0.565

0.66

0.75

1

$\frac{p_8}{p_7} = 0.6$

$\Delta y_8 = 13\text{cm}$

0.61

0.625

0.635

10

7.5

5

$A = 50\text{ microrad}$

$A = 5\text{ microrad}$

1

2

5

Δy_8

largeur du faisceau

E_8 [kV/cm]
 champ de deflection
 aux plaques 8

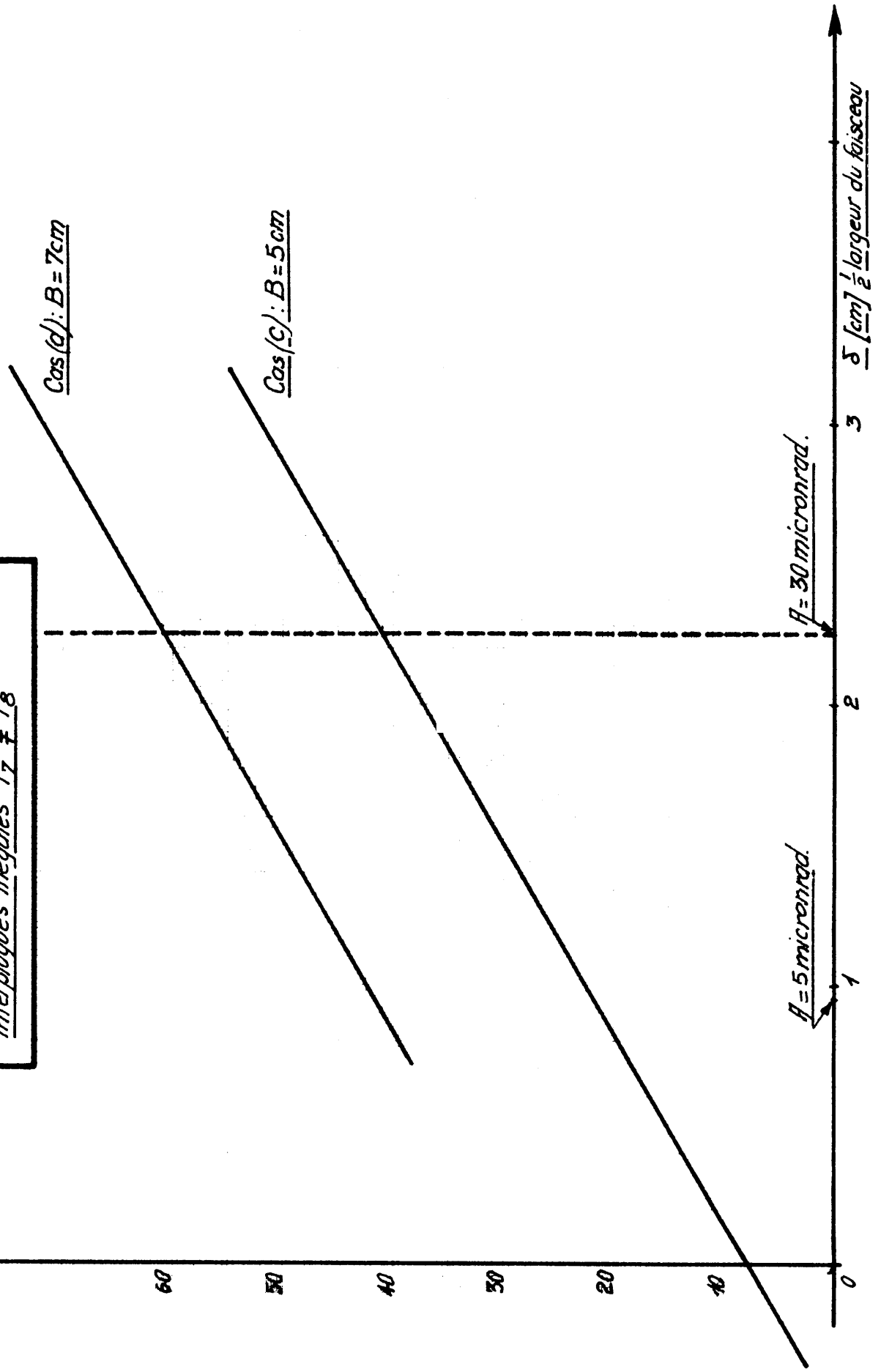
$\Delta y'_8$ [mrad]
 angle de deflection
 en 8

Lieu des points solutions

$\delta = \frac{6}{1.16}$

$U_A = U_7$ [kV]
Intensité de déflexion
aux plaques T et B

Fig 14 : Chambre de demi largeur $b = 6\text{cm}$
les électrodes T et B ont des distances
interplaques inégales $P_7 \neq P_8$



$\beta = 5 \text{ microrad.}$

$\beta = 30 \text{ microrad.}$

1

2

3

δ [cm] $\frac{1}{2}$ largeur du faisceau

F. Agrandissement de la chambre à vide. Ses effets sur les tensions de déflexion

$$U_7 = U_8$$

En juin 1955, il fut décidé de porter la largeur de la chambre à vide du synchrotron de 12 à 15 cm.

Les conséquences en sont les suivantes:

1) Les deux conditions limites pour l'injection en 6 et en 9 (voir fig. 6) sont déplacées dans le même sens. La trajectoire du faisceau d'entrée s'éloigne alors de l'axe neutre des aimants (orbite d'équilibre), se trouvant repoussée vers une région où les forces magnétiques focalisantes ou défocalisantes sont plus grandes.

On devra donc nécessairement augmenter les champs électrostatiques de déflexion afin de contrecarrer, par une augmentation des déflexions dans les sections droites, l'accroissement des déplacements radiaux produits par les aimants.

2) a) Les électrodes d'injection 7 et 8 situées vers le centre de la machine ont leur position définie par la paroi de la chambre à vide. Elles vont donc s'éloigner de l'orbite d'équilibre dans un rapport égal à $7,5/6 = 1,25$.

b) Les électrodes 7 et 8 situées vers l'extérieur ont leur position définie par le bord gauche du faisceau injecté. Elles suivront le déplacement de la trajectoire et s'éloigneront de l'axe dans un rapport sensiblement égal à $7,5/6 = 1,25$.

Les distances totales entre plaques subiront donc un accroissement sensiblement proportionnel à celui de la largeur de la chambre.

Pour cette double raison (accroissement des champs électrostatiques, éloignement des électrodes), la tension de déflexion aux plaques pulsées $U_7 = U_8$ va connaître une augmentation qu'il s'agira de déterminer. Il sera important de connaître le voltage pour lequel le dispositif de décharge des plaques doit être projeté (Note 1).

Note 1.

L'alimentation haute tension 60 kV max, commandée chez Hivolt (Londres) au mois de mai '55 correspond à une chambre de 12 cm de largeur (40 kV pour un faisceau maximum de 30 μ rad, plus une marge de ± 20 kV pour un éventuel ajustage du faisceau sur l'orbite fermée). Dans ces conditions, il est donc également très important de savoir si cette alimentation sera en mesure de satisfaire aux besoins nouveaux créés par l'augmentation des dimensions de la chambre.

1) Nouvelles valeurs des tensions $U_7 = U_8$

Un calcul détaillé, semblable à celui effectué sous E, donne les résultats suivants: (voir fig. 15 et 16, où l'on a également reporté les champs et tensions du cas $b = 6$ cm, à fins de comparaison)

Champs de déflexion: Fig. 15 (correspond à fig. 13)

Pour le cas (c) une chambre rentrante en 6 et une électrode 6 à la masse, $B = 6,1$ cm, cf. Annexe 1), le champ en 6 subit un léger accroissement de 120 V/cm, indépendant de la largeur du faisceau.

On a, pour $\delta = 2,25$ cm ($A = 30$ micronradians):

$$E_8 = 4,42 \text{ kV/cm}$$

$$E_7 = 0,65 \cdot E_8$$

Isoler l'électrode 6 de droite de la masse (cas (d) $B = 8,1$ cm) amènerait une augmentation de 1,8 kV/cm du champ en 8, indépendamment de la largeur du faisceau.

Tensions de déflexion: Fig. 16 (correspond à fig. 14)

Pour un faisceau de 30 micronradians ($\delta = 2,25$ cm),

on a:

on avait:

$$\begin{array}{l} \underline{b = 7,5 \text{ cm}} \\ \text{cas (c)} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} B = 6,1 \text{ cm} \\ \underline{U_7 = U_8 = 52 \text{ kV}} \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l} \underline{b = 6 \text{ cm}} \\ \text{cas (c)} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} B = 5 \text{ cm} \\ U_7 = U_8 = 41 \text{ kV} \end{array} \right.$$

$$\text{cas (d)} \left\{ \begin{array}{l} B = 8,1 \text{ cm} \\ U_7 = U_8 = 73 \text{ kV} \end{array} \right.$$

$$\text{cas (d)} \left\{ \begin{array}{l} B = 7 \text{ cm} \\ U_7 = U_8 = 62 \text{ kV} \end{array} \right.$$

Pour autant qu'on désire injecter un faisceau dont l'acceptance ne soit pas trop petite, l'électrode 6 de droite doit donc être mise au potentiel de la paroi de la chambre ($B = 6,1$ cm), l'autre solution introduisant des tensions pulsées prohibitives et faisant en outre passer le faisceau, dans la secteur magnétique précédant la section droite 7, plus loin de l'axe, donc plus près de la zone interdite créée par les aberrations de champ magnétique (Voir § 5, section C)

Note 1: On remarquera également que les tensions nécessaires dans le cas (d) sont supérieures au maximum fourni par l'alimentation HT 60 kV déjà commandée, constatation qui milite également en faveur de la solution (c).

2) Analyse des résultats. Recherche d'une formule d'approximation.

Etant donné les conditions géométriques d'injection indiquées dans la section C, fig. 8, les champs de déflexion dépendent des trois variables suivantes d'un façon sensiblement linéaire

δ demi largeur du faisceau

B condition limite à la sortie des plaques 6 et qui dépend de la valeur de b.

On a $B = 0,75 b + C$ avec $C = 0,5$ cm cas (c)

$C = 2,5$ cm cas (d)

b demi-largeur de la chambre à vide normale

Le champ électrostatique en 8 sera exprimé par une équation de la forme

$$E_8 = K_0 + K_\delta \cdot \delta + K_C \cdot C + K_b \cdot b$$

Et la tension $U_7 = U_8$:

$$U_7 = U_8 = E_8 \cdot l_8$$

où l_8 , distance entre les plaques 8, est fonction surtout de la largeur de la chambre, et, dans une très faible mesure, que nous négligerons d'ailleurs, des valeurs de δ et de B. On va, à partir des résultats obtenus, chercher à déterminer les valeurs des constantes K, obtenant ainsi une formule d'approximation nous permettant de fixer rapidement les valeurs de la tension aux plaques pulsées dans différents cas.

Les fig. 13 et 15 nous donnent les valeurs suivantes

$K_\delta = 1560 \frac{V/cm}{cm}$
$K_C = 900 \frac{V/cm}{cm}$
$K_b = 80 \frac{V/cm}{cm}$

D'autre part, dans la région qui nous intéresse, l'équation suivante régit les rapports entre la distance interplaques l_8 et la demi-largeur de la chambre b:

$$l_8 = 0,7535 (2 b) = 1,57 \cdot b$$

Comme on le voit, l'influence de l'agrandissement de la chambre sur les champs

de déflexion est assez faible (voir K_p). C'est surtout l'écartement inhérent des plaques qui va être la cause de l'augmentation de la tension. (cf. Fig. 15 et 16).

Nous limitant au cas c) (chambre rentrante, une électrode en 6 à la masse), qui seul semble avoir de signification pratique, nous obtenons la relation suivante:

cas c)

$$U_7 = U_8 = b (470 + 2450 \delta + 125 b) \text{ kV}$$

avec b et δ en cm.

Introduisant l'admittance A à la place de la demi largeur du faisceau δ , il vient: $\delta = 0,408 \sqrt{A}$

cas c)

$$U_7 = U_8 = b (470 + 1000 \sqrt{A} + 125 b) \text{ kV}$$

avec b en cm et A en micronradians.

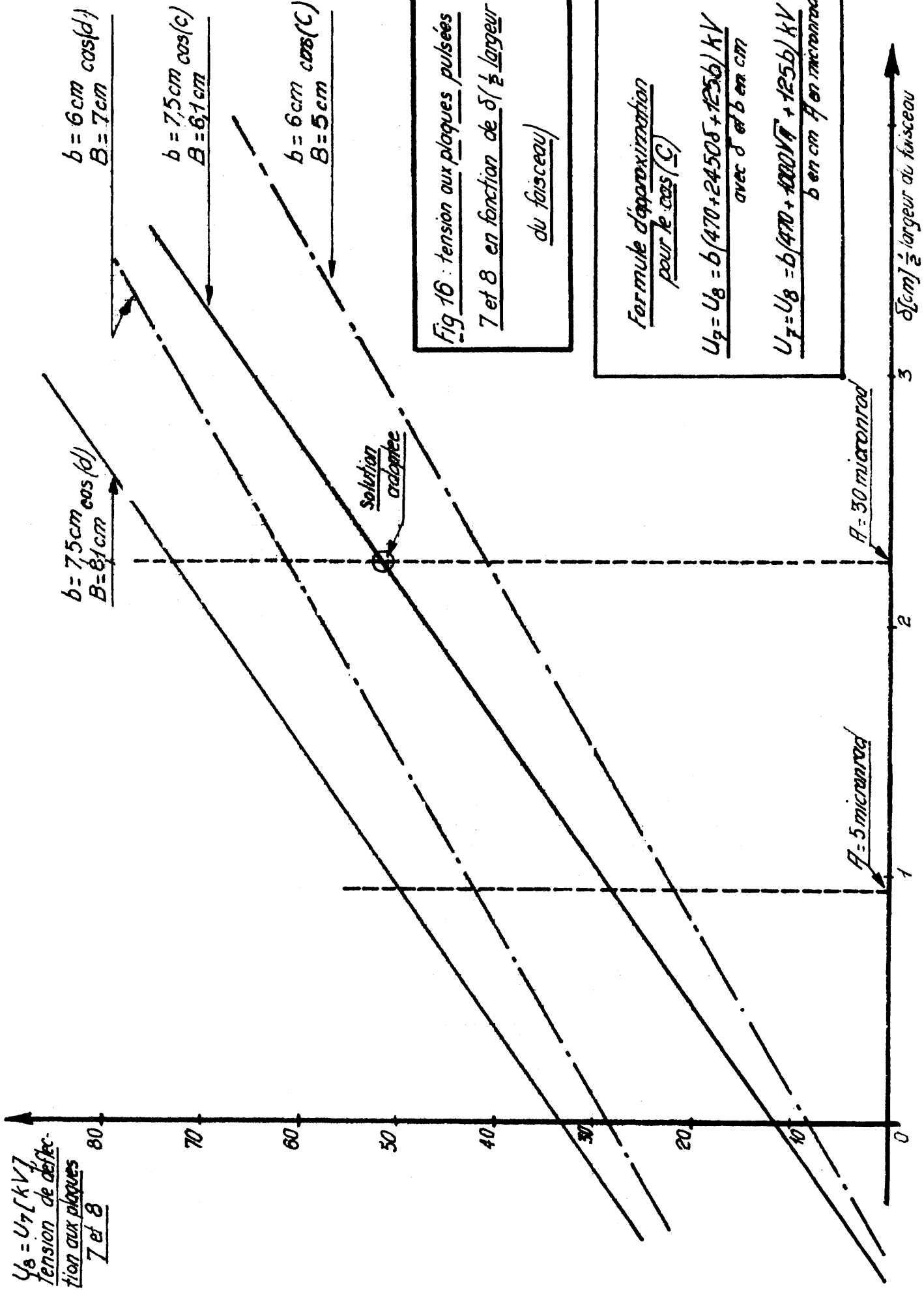


Fig 16 : tension aux plaques pulsées 7 et 8 en fonction de δ ($\frac{1}{2}$ largeur du faisceau)

Formule d'approximation pour le $\cos(C)$

$$U_7 = U_8 = \frac{b(470 + 2450\delta + 125b)}{\text{avec } \delta \text{ et } b \text{ en cm}}$$

$$U_7 = U_8 = \frac{b(470 + 1000\sqrt{A} + 125b)}{b \text{ en cm } A \text{ en microrad}}$$

G. Précision requise pour l'injection.

On va calculer dans ce chapitre quelle précision (donc également quelle stabilité totale) doit être exigée des différentes sources de haute tension alimentant les plaques d'injection 6, 7-8 et 12.

Différentes imperfections du complexe Linac + Injection peuvent amener le faisceau à effectuer dans la chambre à vide du synchrotron des oscillations auxquelles il faut prescrire un maximum d'amplitude. On a notamment:

a) Erreur d'énergie du faisceau à la sortie du Linac. Un écart d'énergie de $\pm 1,5$ o/oo (± 75 keV) provoquera des oscillations de $\pm 2,4$ mm d'amplitude maximum (au centre d'espaces focalisants). Il s'agit là d'une erreur de caractère statistique.

b) Erreur systématique provenant du fait qu'on injecte sur la même orbite pendant 6 μ sec (durée d'une révolution complète des particules dans le synchrotron au début du cycle alors que le champ magnétique ne cesse de croître pendant cette période.

Si le champ du début (ou de la fin) de l'injection coïncide avec la valeur $B_0 = 148$ gauss donnant un rayon $r_0 = 70,079$ m pour des particules de 50 MeV, on aura des oscillations de $- 3,2$ mm (ou $+ 3,2$ mm) d'amplitude maximum.

Si le champ passe par la valeur B_0 au milieu du temps d'injection (3 μ sec), l'amplitude d'oscillation se réduira à 1,6 mm. Ces valeurs correspondent à une montée de champ de 12 kG/sec. Elles sont à diviser par 4 si l'on adopte une montée de champ de 3 kG/sec pour le début du cycle d'accélération.

c) Erreur causée par les systèmes de déflexion. En considérant a) et b), il semble raisonnable d'admettre ici une amplitude d'oscillation maximum de ± 2 mm. A partir de cette limitation, on va calculer la stabilité requise des différentes déflexions. Celles-ci étant échelonnées le long du trajet d'injection, les maxima d'oscillation superposés ne se situeront pas au même endroit de la chambre, ce qui revient à dire que les différentes erreurs se traduisent, à la sortie de la section 12, par des écarts, de position ou d'angle suivant le cas. Toutefois, on prendra une marge de sécurité en supposant une coïncidence géométrique des maxima d'oscillation. On admettra donc une erreur totale égale à la somme statistique des différentes erreurs indépendantes suivantes. On a dans l'ordre, après la sortie du Linac:

1. Erreur de la première déflexion magnétique
2. " " " deuxième " "
3. " des plaques 6 électrostatiques permanentes
4. " " " 7 et 8 électrostatiques pulsées
5. " " " 12 électrostatiques pulsées.

Pour chacune des déflexions indépendantes, on admettra donc une amplitude d'oscillation maximum égale à

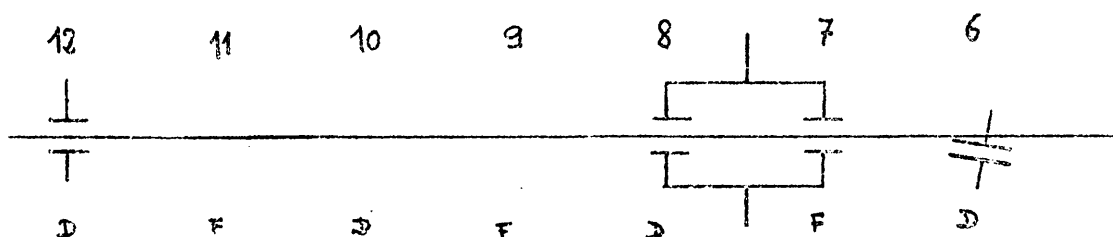
$$\Delta y_F = \frac{2 \text{ mm}}{\sqrt{5}} = 0,895 \text{ mm} \quad (\text{centres d'espaces focalisants})$$

Ceci correspond à une amplitude, au centre d'espaces défocalisants, égale à

$$\Delta y_D = \frac{0,86}{1,16} \cdot \Delta y_F = 0,66 \text{ mm}$$

Calcul des erreurs maximum aux plaques 6, 7-8 et 12.

Grâce à la linéarité de la relation entre champs de déflexion et coordonnées y, y' de la trajectoire, il sera possible de calculer directement la déviation de la trajectoire par rapport à l'injection idéale, provoquée par l'introduction d'erreurs de champs.



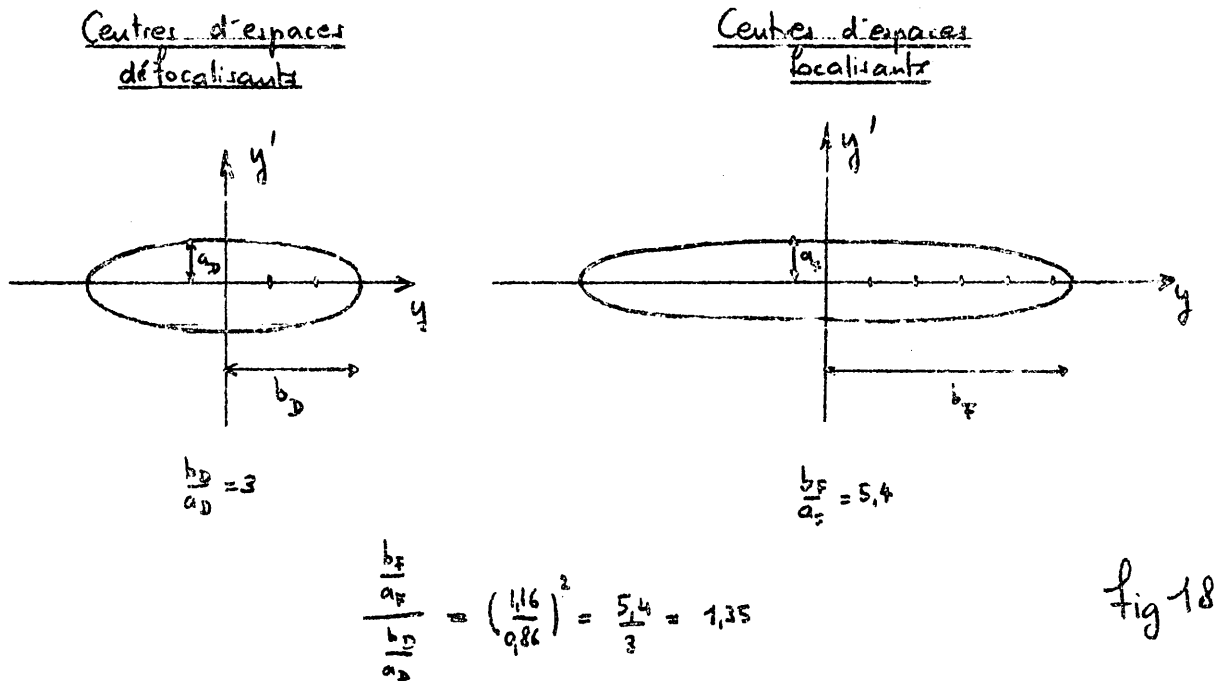
Pour chaque déflexion indépendante i , on construira, dans le plan des phases, l'amplitude de l'oscillation superposée à la trajectoire idéale en prenant au départ une certaine erreur $\bar{d}(\Delta y_i')$ arbitraire. En égalant cette amplitude $\bar{\Delta y}$ à la valeur admise plus haut, on en déduira l'échelle p de la construction graphique et la valeur de l'erreur tolérable

$$d(\Delta y_i') = \frac{p}{\bar{y}} \cdot \bar{d}(\Delta y_i')$$

Remarque

Pour une oscillation libre, les lieux des coordonnées y, y' du faisceau en des points situés à des centres périodiques de symétrie azimutale sont des ellipses

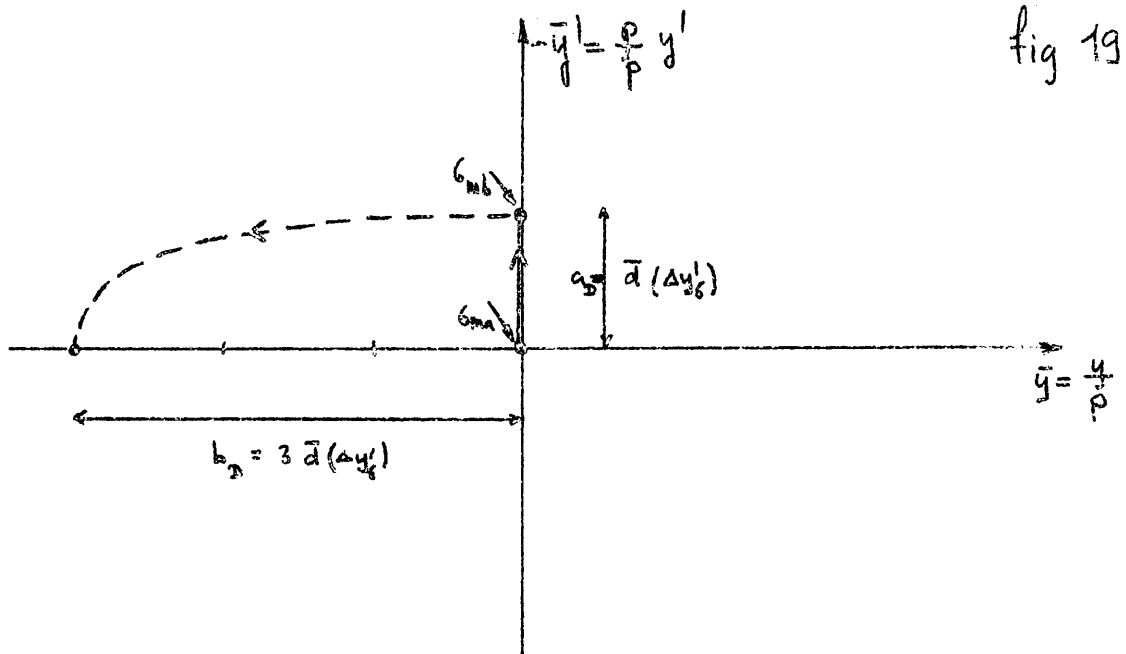
dont les axes concordent avec les axes y, y' . On a:



Connaissant un point quelconque de l'ellipse, il est aisé de trouver la longueur b du grand axe, qui correspond à l'amplitude d'oscillation Δy pour le cas considéré (D ou F)

Plaques 6.

Elles se situent au milieu d'un espace D.



On doit avoir

$$b_D = 3 \cdot \bar{d}(\Delta y_6') = 3 \frac{p}{\rho} d(\Delta y_6') = \bar{\Delta y}_D = \frac{1}{p} \cdot \Delta y_D$$

où $\Delta y_D = 0,66 \text{ mm}$ est donné

$$d(\Delta y_6') = \frac{0,66 \text{ mm}}{3 \cdot \rho} = 0,052 \text{ mrad} \quad \text{où} \quad \frac{1}{\rho} = 2,36 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$$

on avait $y_6' \approx 50 \text{ mrad}$

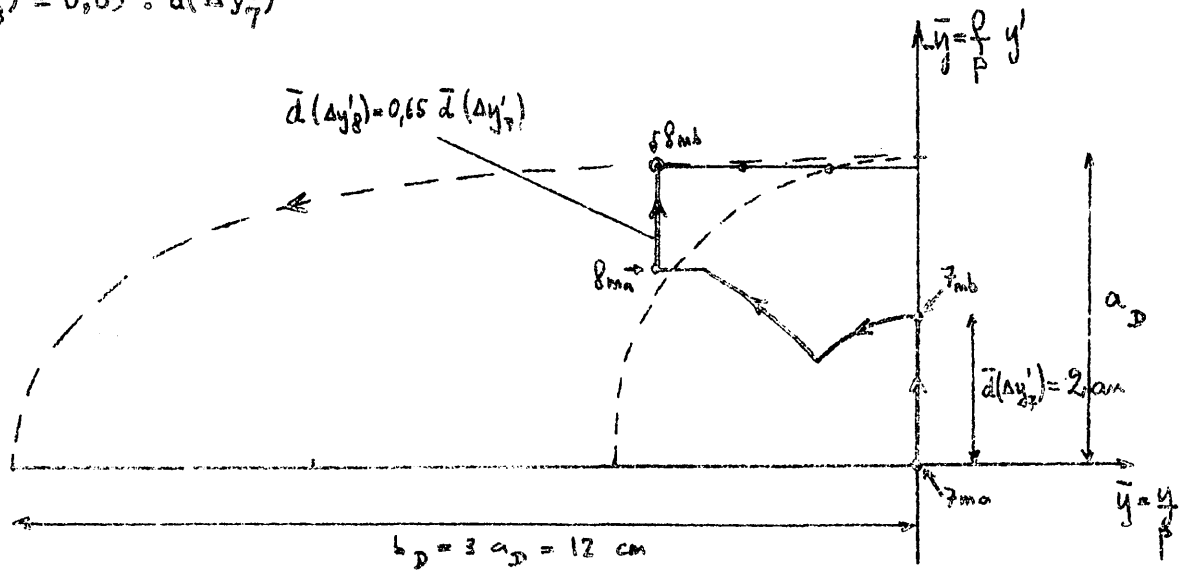
ce qui donne une précision relative égale à

$$\frac{d(\Delta y_6')}{\Delta y_6'} = 0,104 \text{ o/o}$$

Plaques 7 - 8.

Ces plaques possédant une alimentation commune, il faut additionner deux erreurs simultanées de champ en 7 et en 8 prises dans le rapport des champs considérés:

$$\bar{d}(\Delta y_8') = 0,65 \cdot \bar{d}(\Delta y_7')$$



Le point 8_m se situe au centre d'un espace défocalisant.

Fig. 20

$$b_D = 120 \text{ mm} = \bar{\Delta y}_D = \frac{1}{p} \Delta y_D = \frac{1}{p} \cdot 0,66 \text{ mm}$$

$$\text{l'échelle } p = \frac{0,66 \text{ mm}}{120 \text{ mm}} = 5,50 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$

$$\begin{aligned} d(\Delta y_7^i) &= \frac{p}{\rho} \bar{d}(\Delta y_7^i) = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 2,36 \cdot 10^{-4} \cdot 20 \\ &= 0,026 \text{ mrad} \end{aligned}$$

avec un champ $y_7 = 4,42 \text{ mrad}$, on obtient une précision égale à

$$\frac{d(\Delta y_7^i)}{y_7^i} = \frac{0,016}{4,42} = 0,59 \text{ o/o}$$

Plaques 12.

On est exactement dans les mêmes conditions qu'aux plaques 6 et l'erreur absolue devra être la même.

$$d(\Delta y_{12}^i) = d(\Delta y_6^i) = 0,052 \text{ mrad.}$$

Comme le champ de déflexion en 12 sera environ égal à 3 mrad, on a une précision relative de

$$\frac{d(\Delta y_{12}^i)}{y_{12}^i} = \frac{0,052}{3} = 1,73 \text{ o/o}$$

Conclusion.

Les stabilités calculées devraient être maintenues pour une dizaine d'heures consécutives (lors du fonctionnement de la machine, on admettrait un réajustement journalier).

On prescrira les valeurs suivantes:

plaques 6	(permanentes)	0,1 o/o
7 - 8	(pulsées)	0,5 o/o
12	(pulsées)	1,5 o/o

On constatera qu'on a pris une légère marge de sécurité par rapport aux valeurs devant donner un maximum d'amplitude d'oscillation égal à ± 2 mm.

H. Récapitulation.

Le tableau de la page 37 rassemble les caractéristiques principales du système d'injection, valables pour l'injection d'un faisceau large sur l'axe de la chambre.

Il ne faut pas perdre de vue que, lors de l'ajustage fin de la position des aimants, le dispositif devrait également permettre d'injecter un faisceau relativement mince sur l'orbite fermée (orbite fermée après 1 tour) qui ne coïncidera alors pas avec l'axe de la chambre. On admet qu'elle se situera à l'intérieur d'un tore de section elliptique de demi grands axes 4 cm horizontalement et 2 cm verticalement.

Cette adaptation en angle et position réclamera quelque souplesse de la part des alimentations haute tension. D'autre part la trajectoire du faisceau d'injection se trouvant déplacée, il est possible qu'on doive agrandir les distances entre les plaques 7 et 8 indiquées dans le tableau ci-après (donc la tension $U_7 = U_8$) afin de laisser libre passage à un faisceau injecté sur une orbite fermée.

Alimentations haute tension:

Comme on l'a vu, l'électrode 6 qui est située sur la droite du faisceau injecté est confondue avec la paroi de la chambre à vide; elle est donc au potentiel de la masse, et l'électrode HF sera négative.

Des trois genres de connexion possibles des plaques 7 et 8 par rapport à la masse (soit + 60 kV, - 60 kV ou deux électrodes symétriques ± 30 kV), on a conservé le premier pour les raisons suivantes:

Le dispositif de décharge des plaques sera vraisemblablement constitué par un éclateur. L'alimentation symétrique, qui aurait convenu dans le cas d'une décharge à travers deux thyratrons à hydrogène placés en série, est alors peu appropriée.

Le faisceau d'injection longeant les électrodes négatives 7 et 8, les aberrations d'extrémité seront minimum dans le cas où ces électrodes sont à la masse, le champ dans la région considérée étant alors plus uniforme.

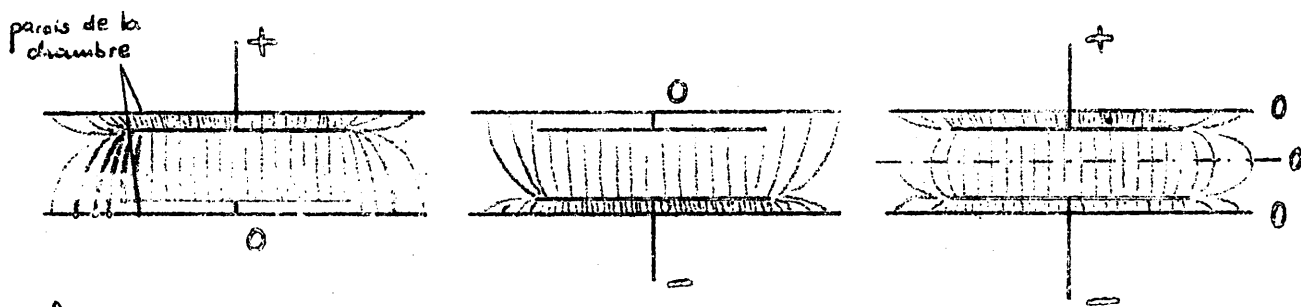


fig 21

Je tiens à exprimer ma reconnaissance au Dr. Lapostolle pour sa collaboration et les nombreux échanges de vue qui ont présidé au développement de ce travail.

J. Huguenin.

/kt

Electrodes de deflection electrostatique situees dans la section droite No	6	mises en parallele 7	8	12
Genre de deflection	permanente	pulsée	pulsée	pulsée
Longueur des electrodes	~ 2 m	1 m	1 m	~ 0,8 m
Pour injecter sur l'orbite d'équilibre un faisceau d'acceptance $A = 30$ microradians (largeur du faisceau $2\delta = 4,5$ cm):				
Distance entre plaques	~ 4,0 cm	16,0 cm	11,78 cm	11,25 cm
Tension entre plaques	~ 100 kV	52 kV	52 kV	~ 45 kV
Champ electrostatique E	~ 25 kV/cm	2,88 kV/cm	4,42 kV/cm	~ 4 kV/cm
Déviation du faisceau	~ 50 mrad	2,88 mrad	4,42 mrad	~ 3 mrad
Caractéristiques des alimentations HT commandées:				
Fabrication	SAMES (Grenoble)			
Type	électrostatique			
Tension max. contre terre	= 150 kV			
Domaine de réglage avec stabilisation	= 50 → 150 kV			
" " sans	0 → 50 kV			
Courant maximum	2 à 2,5 mA			
Stabilité requise pour 10 heures consécutives de travail	± 0,1			
				± 1,5 %

Hivolt (Londres)

HF redressée
± 60 kV
± 6 → 60 kV

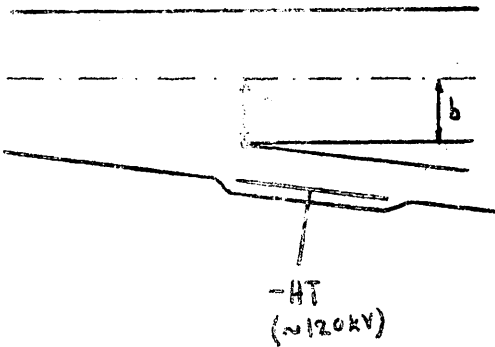
2 mA

± 0,5

Annexe 1.

Différentes configurations géométriques à l'entrée.

(Sortie section droite 6)



Cas (a)

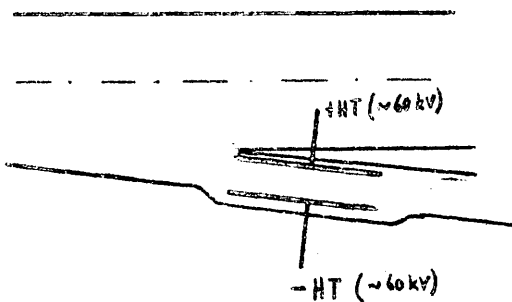
Une des électrodes non pulsées est à la masse, donc identifiée avec la paroi de la chambre.

$b = 6 \text{ cm}, 7,5 \text{ cm}, 9 \text{ cm}$

$B = 6,5 \text{ cm}, 8 \text{ cm}, 9,5 \text{ cm}$

$$B = b + 0,5 \text{ cm}$$

↑
épaisseur de la paroi.



Cas (b)

2 électrodes de potentiel symétriques par rapport à la masse.

$b = 6 \quad 7,5 \quad 9$

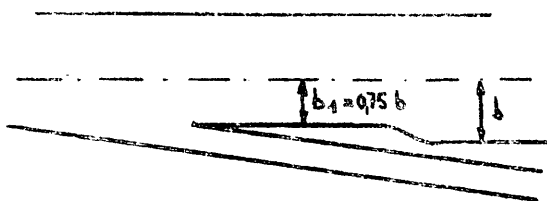
$B = 8,5 \quad 10 \quad 11,5$

$$B = b + 0,5 + 2 \text{ cm}$$

↑
distance pour éviter claquage

On peut faire diminuer B en remarquant que 6 est placé entre deux secteurs défocalisants: le faisceau n'occupera qu'une partie de la chambre du synchrotron. Il est donc possible de faire rentrer la paroi de la chambre à cet endroit, de telle façon que

$$b_1 = \frac{0,86}{1,16} \quad b \approx 0,75 b \quad (\text{voir fig. ci-après})$$



suivant la connection des électrodes 6, on aura donc

soit

Cas (c), paroi rentrante, une électrode à la masse:

$$b = 6 \quad 7,5 \quad 9 \text{ cm}$$

$$B = 0,75 b + 0,5 \text{ cm}$$

$$B = 5 \quad 6,1 \quad 7,2 \text{ cm}$$

soit

Cas (d), paroi rentrante, électrodes symétriques:

$$b = 6 \quad 7,5 \quad 9 \text{ cm}$$

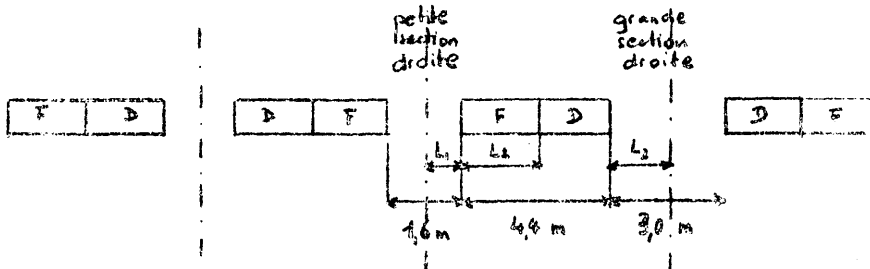
$$B = 0,75 b + 0,5 + 2 \text{ cm}$$

$$B = 7 \quad 8,1 \quad 9,2 \text{ cm}$$

Annexe 2.

Constantes de la construction graphique dans le plan des phases.

Voir le rapport CERN-PS/PL 2, sections 3 et 4



On utilise pour la construction graphique les grandeurs $\frac{L_1}{\rho}$

Avec $\rho = \frac{r_0^2}{\sqrt{n}}$ et $\left. \begin{array}{l} r_0 = 70,079 \text{ m} \\ n = 282 \end{array} \right\} \rho = 4,22 \text{ m}$

$L_1 = 0,8 \text{ m}$

$L_2 = 2,2 \text{ m}$

$L_3 = 1,5 \text{ m}$

il vient:

petite section droite $\frac{L_1}{\rho} = 0,19$

demi secteur magnétique $\frac{L_2}{\rho} = 0,52$

grande section droite $\frac{L_3}{\rho} = 0,355$