

MPS/Int. LIN 66-1  
25 février 1966

ADAPTATION DU FAISCEAU LINAC  
AU SYNCHROTRON A PROTONS

P. Tétu

ADAPTATION DU FAISCEAU LINAC  
AU SYNCHROTRON A PROTONS

I. Introduction

La section droite 26 définit le lieu où le faisceau, en provenance du linac et ayant traversé la zone de l'infecteur, arrive avec une énergie de 50 MeV dans la machine. Il n'est pas encore sur son orbite fermée (il faut attendre pour cela qu'il subisse l'action défléctrice des infecteurs pulsés 27 et 28) mais il est soumis dès 26 à l'action focalisante et défléctrice des électro-aimants du synchrotron à protons.

Pour une injection optimum le faisceau doit présenter en section droite 26 des caractéristiques bien déterminées au point de vue du rapport diamètre sur angle dans chaque plan de phase transversal (c'est-à-dire radial  $yy'$  et vertical  $zz'$ ).

L'injection sur plusieurs tours devant être essayée de façon opérationnelle sur la machine, nous avons éprouvé le besoin de vérifier certains chiffres que nous possédions pour la valeur de focalisation du champ de fuite de l'aimant 25 qui semblaient difficilement compatibles avec les résultats des mesures préliminaires que nous avons faites.

Pour adapter correctement le faisceau il faut connaître : la force focalisante des éléments se trouvant dans l'infecteur ainsi que leur position.

Il est aussi nécessaire de déterminer à quelles aberrations sont soumis les protons lorsqu'ils subissent l'action des champs de fuite des différents éléments focalisants (en particulier celui de l'électro-aimant 25).

Nous avons mesuré l'émittance du faisceau venant du linac en mettant à la place de l'infecteur permanent 26 un appareillage basé sur la méthode de mesure des émittances à l'aide d'un réseau de fentes fines et d'une émulsion photographique. Des photos ont été prises aimant principal du synchrotron coupé puis enclenché pour vérifier l'action du champ de fuite de l'électro-aimant 25 sur l'émittance du faisceau; afin de séparer au mieux les différents paramètres influençant les protons, nous avons limité le plan de phase  $yy'$  puis  $zz'$  à l'aide des volets variables BA41, BA42, BA43, BA44 (voir Fig. 2a); nous avons contrôlé à l'aide de ces mesures de quelle manière ces limitations se transforment en section droite 26.

Les considérations qui suivent, ainsi que les abaques ci-jointes, sont issues en partie de calculs et de mesures, en partie de vérifications expérimentales obtenues le 1er novembre 1965, à l'aide de la série des 27 émittances différentes mesurées aussi bien dans le plan  $yy'$  que le plan  $zz'$ .

## II. Transport du faisceau dans l'infecteur (voir Fig. 2a)

La zone de l'infecteur située entre la sortie du Tank III et la section droite 26 se compose de 6 espaces de glissement séparés par 5 éléments aptes à fournir une force focalisante qui sont (en allant dans le sens du faisceau) :

- a) deux triplets quadrupolaires d'adaptation ajustables, dont on connaît la loi, reliant le courant d'alimentation à la force focalisante. Il existe des courbes donnant la force focalisante dans les plans de phase  $yy'$  et  $zz'$  en fonction du courant d'alimentation du quadrupole intérieur et des deux quadrupoles extérieurs (qui sont alimentés en série). On a toujours pu vérifier l'exactitude de ces courbes.

Un système permettant de faire varier la force focalisante d'un des plans en gardant l'autre constante est sur le point d'être rendu opérationnel au MCR.

- b) Deux aimants de directions (IB11 et IB21) dont on a calculé la force focalisante due aux effets de bord et qui a pu être vérifiée lors des mesures effectuées en section droite 26.

Nous obtenons dans le plan  $yy'$   $1/f = 0,054 \text{ m}^{-1}$ , soit  $f = 18,5 \text{ m}$  (c'est une focalisation).

Dans le plan vertical  $zz'$  nous avons  $1/f < 0,01 \text{ m}^{-1}$ .

A condition de diriger correctement le faisceau lors du réglage de l'injecteur on peut considérer ces focalisations comme invariables.

- c) Le champ de fuite de l'électro-aimant 25 qui a été mesuré dans le plan  $yy'$  à l'aide d'une plaque de Hall et dont on a déterminé la valeur dans le plan  $zz'$  avec une bonne approximation.

On a tout d'abord représenté ce champ à l'aide d'une succession de lentilles minces séparées par des espaces de glissement. Puis on a pris un modèle qui place au milieu du champ de fuite une lentille équivalente. On obtient ainsi une représentation simple et malgré tout acceptable. On peut vérifier que si l'on considère l'effet global produit par ce champ sur le faisceau cette représentation est suffisamment exacte pour qu'on puisse l'adopter.

La figure 2b) indique la situation équivalente de l'infecteur dans le plan radial  $yy'$ .

La figure 2c) donne cette même représentation mais cette fois pour le plan  $zz'$  vertical. Le schéma est simplifié par le fait que les aimants de déflexions IB11 et IB21 ont un faible effet focalisant sur le faisceau.

Les approximations que nous nous permettons sont justifiées si l'on considère :

- que le faisceau de protons du linac n'est que très approximativement assimilable à une ellipse dans ses plans de phase transversaux,
- que les courbes équidensité de courant à l'intérieur des ellipses d'émittance ne sont pas concentriques,
- que les aimants de directions placent les particules suivant leur énergie à des endroits différents dans le plan de phase radial.

Ainsi l'ajustage fin de l'adaptation doit être effectué lors du réglage de l'injection dans la machine par les opérateurs du MCR à l'aide des commandes agissant sur le courant des triplets quadrupolaires.

### III.A Détermination de l'adaptation

Les calculs ainsi que les abaques permettant de déterminer rapidement l'adaptation du faisceau du linac au synchrotron reposent sur une méthode de calcul exposée par Mr. H.G. Hereward dans son rapport PS/Int.TH 59-5 du 23 mars 1959. Je rappelle brièvement que l'ellipse de phase peut être définie soit par les paramètres  $a, b, c$  (où  $a$  et  $b$  restent invariables après passage dans un espace de glissement), soit par les paramètres  $d, e, f$  [où  $d$  et  $e$  restent invariables après passage dans une lentille mince (voir Figure 1)]. On pose alors

$$R = \frac{a}{b} \quad X = \frac{c}{b} \quad G = \frac{d}{e} \quad B = -\frac{f}{e}$$

R et G sont toujours positifs.

X et B ont un signe qui dépend de la focalisation de l'ellipse (X est positif et B négatif si l'ellipse est focalisante et l'inverse dans le cas d'une ellipse de phase défocalisante). Dans tout ce qui suit nous avons pris la notation suivante :

$R_{26}, X_{26}, G_{26}, B_{26}$  pour la valeur des paramètres en section droite 26,,

$R_T, X_T, G_T, B_T$  pour ces mêmes paramètres à la sortie du second triplet,

$R_E, X_E, G_E, B_E$  à l'entrée du premier triplet.

Pour déterminer la valeur des focalisations à afficher sur les deux triplets d'adaptation on agit de la façon suivante :

- a) on amène l'ellipse de phase du faisceau mesurée à 50 MeV (à la sortie du Tank III) jusqu'à l'entrée du premier triplet;
- b) on ramène l'ellipse de phase que l'on désire obtenir en 26 de cette position à la sortie du deuxième triplet;
- c) on détermine alors la valeur à afficher sur les triplets pour avoir superposition de l'ellipse d'entrée et de l'ellipse de sortie lorsqu'on transfère la première à travers les triplets.

On effectue séparément ces opérations pour le plan radial  $yy'$  et vertical  $zz'$ .

III.B Plan radial yy'

Nous prenons  $E = S/\pi = a \cdot b = 21,7 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  qui est une émittance à l'intérieur de laquelle se trouve la partie intéressante à haute densité du faisceau de protons du linac. On mesure habituellement à 50 MeV,

$$\frac{a}{b} = 2,20 \text{ mm/mrad} \qquad \frac{c}{b} = 1,27 \text{ mm/mrad.}$$

Sachant que le faisceau doit parcourir 4,9 m pour arriver au premier triplet on aura à cet endroit :

$$\begin{aligned} R_E &= 2,20 \text{ mm/mrad} & X_E &= 6,17 \text{ mm/mrad} \\ G_E &= 0,0513 \text{ mrad/mm} & B_E &= -0,1436 \text{ mrad/mm.} \end{aligned}$$

Si nous désirons une certaine ellipse de phase en section droite 26 que nous notons  $R_{26}$  et  $X_{26}$  nous devons ramener cette ellipse à la sortie du deuxième triplet; on peut le faire de la façon suivante qui permet d'avoir  $R_T$  et  $X_T$  en fonction de  $R_{26}$  et  $X_{26}$  :

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -3,58 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0,054 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -7,28 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0,054 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -0,16 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -3,4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{26} & X_{26} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Nous avons alors :

$$Z_T = \frac{m_{11} + m_{12}}{m_{22} - jm_{21}} \text{ avec } Z_T = R_T + jX_T.$$

On obtient en définitive

$$\begin{aligned} R_T &= \frac{101R_{26}}{0,144 (R_{26}^2 + X_{26}^2) + 1,37X_{26} + 3,24} \\ X_T &= \frac{7,49 (R_{26}^2 + X_{26}^2) - 29,9X_{26} - 310}{0,144(R_{26}^2 + X_{26}^2) + 1,37X_{26} + 3,24}. \end{aligned}$$

Si l'on désire que  $X_{26} = 0$ , c'est-à-dire que l'ellipse soit dans les axes principaux (ce qui est le cas le plus fréquent) on a plus simplement :

$$R_T = \frac{101R_{26}}{0,144R_{26}^2 + 3,24}$$

$$X_T = \frac{7,49 R_{26}^2 - 310}{0,144R_{26}^2 + 3,24}$$

En partant de ces résultats nous avons tracé des abaques donnant  $R_T = f(R_{26})$  et ce pour différents  $X_{26}$  et  $X_T = f(R_{26})$  pour différents  $X_{26}$  (voir Fig. 3).  
Connaissant  $R_T$  et  $X_T$  on peut calculer  $G_T$  et  $B_T$

$$G_T = \frac{R_T}{R_T^2 + X_T^2} \quad \text{et} \quad B_T = \frac{-X_T}{R_T^2 + X_T^2}$$

Il s'agit, maintenant que nous connaissons  $G_E$ ,  $B_E$ ,  $G_T$  et  $B_T$ , de déterminer la force focalisante des triplets IQ11 et IQ21 pour une adaptation correcte.  
On a :

$$T_1 = -B_E + \frac{1}{L} \pm \frac{1}{L} \sqrt{\frac{G_E}{G_T} - L^2 G_E^2}$$

$$T_2 = B_T + \frac{1}{L} \pm \frac{1}{L} \sqrt{\frac{G_T}{G_E} - L^2 G_T^2};$$

$T_1$  et  $T_2$  étant la force focalisante de IQ11 et IQ21 en  $m^{-1}$  (positive si nous avons une focalisation dans le plan considéré).  $B_E = -0,144$ ,  $G_E = 0,051$ ,  $L = 9,15$  m. Pour un  $G_T$  et  $B_T$  donné on obtient en général deux solutions pour chaque triplet. En couplant les deux valeurs les plus positives des triplets IQ11 et IQ21, on obtient la solution forte de focalisation :

$$T_{1+} = 0,253 + \left( \sqrt{\frac{0,0607}{G_T} - 0,26} \right) 10^{-1}$$

$$T_{2+} = B_T + 0,109 + \sqrt{G_T(19,6 - 83,5G_T)}$$

Les deux autres valeurs correspondent à la solution faible :

$$T_{1-} = 0,253 - \left( \sqrt{\frac{0,0607}{G_T} - 0,26} \right) 10^{-1}$$

$$T_{2-} = 0,109 - \sqrt{G_T(19,6 - 83,5G_T)}$$

Les figures 4A et 4B fournissent des abaques permettant de déterminer  $T_1$  et  $(T_2 - B_T)$  en fonction de  $G_T$ .

### III.C Plan vertical zz'

En appliquant un raisonnement analogue à celui du plan yy' on obtient les résultats suivants :

$$R_E = 1,85 \text{ mm/mrad}$$

$$X_E = 5,76 \text{ mm/mrad}$$

$$G_E = 0,0505 \text{ mrad/mm}$$

$$B_E = -0,157 \text{ mrad/mm.}$$

Si l'on ramène  $R_{26}$  et  $X_{26}$  à la sortie du second triplet on a :

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -14,3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0,064 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -3,4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{26} & X_{26} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Ce qui nous donne pour  $R_T$  et  $X_T$  :

$$R_T = \frac{100,7 R_{26}}{0,41(R_{26}^2 + X_{26}^2) + 9,98X_{26} + 60,8}$$

$$X_T = \frac{0,544(R_{26}^2 + X_{26}^2) - 86,8 - 1139}{0,41(R_{26}^2 + X_{26}^2) + 9,98X_{26} + 60,8}$$

La figure 5 fournit les abaques permettant de déterminer  $R_T$  et  $X_T$  pour un  $R_{26}$  et  $X_{26}$  désiré. Les figures 6A et 6B permettent de connaître  $T_1$  et  $(T_2 - B_T)$  en fonction de  $G_T$ .

IV. Utilisation des abaques

a) Injection sur un tour

Comme la section droite 26 est horizontalement défocalisante, l'adaptation optimum sera obtenue pour  $R_{26} = 12$  et  $X_{26} = 0$  dans le plan  $yy'$  et  $R_{26} = 21,7$ ,  $X_{26} = 0$  dans le plan  $zz'$ .

On trouve alors comme solution de focalisation pour les triplets quadrupolaires d'adaptation  $IQ_{11}$  et  $IQ_{21}$ .

	Plan $yy'$		Plan $zz'$	
	$T_1(m^{-1})$ $IQ_{11}$	$T_2(m^{-1})$ $IQ_{21}$	$T_1(m^{-1})$ $IQ_{11}$	$T_2(m^{-1})$ $IQ_{21}$
Solution forte	- 0,45	- 0,16	- 0,33	- 0,27
Solution faible	- 0,054	- 0,044	- 0,21	- 0,032

La figure 7 nous indique la force focalisante d'un triplet ( $IQ_{11}$  et  $IQ_{21}$ ) en fonction du courant alimentant le quadrupole intérieur (abscisse) et du courant alimentant les quadrupoles extérieures (ordonnée). Nous voyons deux réseaux de courbes distinctes : l'un intéresse le plan de phase  $yy'$  et l'autre le plan de phase  $zz'$ .

Le sens du courant dans les quadrupoles est tel que nous travaillons pour les deux triplets dans le cadran correspondant à un courant positif dans l'intérieur et négatif dans les extérieurs.

Contrairement à la convention utilisée pour calculer l'adaptation les courbes de focalisation sont ici positives si le triplet est défocalisant dans le plan considéré. Sur la figure 7 les ronds pleins représentent la valeur de la focalisation qui était utilisée avant le 1er novembre. Les ronds vides indiquent la solution forte de la nouvelle adaptation.

Les carrés vides indiquent la solution faible de la nouvelle adaptation.

On obtient en définitive :

	Triplet IQ11		Triplet IQ21	
	Intérieur	Extérieurs	Intérieur	Extérieurs
Solution forte	11,2A	7,1A	6,4 A	2,9 A
Solution faible	7,9 A	4 A	3,9 A	1,9 A

Les courants sont inscrits en Ampères.

La solution forte exige un courant de 11,2A dans le quadrupole intérieur de IQ11; ce courant est supérieur à ce que peut fournir l'alimentation à l'heure actuelle. Nous avons adopté la solution faible.

Les deux solutions sont d'ailleurs équivalentes si l'on se place de part et d'autre des deux triplets.

b) Injection sur plusieurs tours

Dans ce cas la machine n'accepte pour chaque tour qu'une partie du plan de phase radial  $yy'$  du faisceau en provenance du linac, cette partie varie d'ailleurs de tour en tour.

Nous n'avons plus dans ce cas une ellipse d'acceptance mais nous pouvons tout de même inscrire la courbe obtenue dans une ellipse ayant un certain  $R_{26}$  et  $X_{26}$ . On doit, si l'on veut être instantanément adapté au mieux, avoir une adaptation variable durant les 20  $\mu$ sec de l'impulsion de courant, ceci n'est pas possible à l'heure actuelle, par contre on peut tracer une ellipse qui sera circonscrite aux différentes courbes instantanées obtenues : ce sera l'adaptation optimum; elle est en général un peu différente de celle utilisée pour l'injection monotour.

Les courbes d'acceptance instantanées variant avec le  $\varnothing$  radial de la machine il est nécessaire de pouvoir trouver une adaptation correcte rapidement. Nous devons être capables aussi d'explorer l'adaptation radiale en gardant l'adaptation verticale fixe.

#### V. Utilisation des volets

La principale utilisation des volets variables est de limiter le faisceau de façon à pouvoir injecter dans la machine un faisceau dont l'émittance aura été réduite en diamètre et en angle. Il est donc nécessaire de posséder dans l'inflexeur deux volets se trouvant à une distance qui corresponde à une rotation de  $\pi/2$  du plan de phase du faisceau.

On utilisait auparavant le flag 26 pour limiter le diamètre du faisceau en section droite 26, le faisceau étant par ailleurs limité en BA43 qui se présentait en section droite 26 comme une limitation des angles de l'émittance.

Avec les nouvelles valeurs de focalisation la situation a sensiblement changé. On peut toujours limiter le diamètre à l'aide du volet 26 mais il faut déterminer à quelles conditions doit répondre le second volet si l'on veut qu'il limite le plan de phase en 26 suivant une droite parallèle à l'axe des y ou des z.

La matrice qui transfère de 26 à ce second volet la limitation des angles devra être de la forme :

$$\begin{pmatrix} 0 & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = M .$$

En effet, dans ce cas, la position à ce volet ne dépendra que de l'angle 26 et vice versa.

#### Plan yy'

La matrice M est égale à :

$$\begin{pmatrix} 0 & -5,93 \\ 0,169 & -0,96 \end{pmatrix} ,$$

si l'on transfère la limitation angle de 26 à BA41. On a donc avec ce volet la condition requise.

Plan zz'

La matrice M est égale à :

$$\begin{pmatrix} -0,03 & -15,28 \\ 0,0667 & 0,315 \end{pmatrix},$$

si l'on transfère la limitation angle de 26 à BA43. On a donc avec ce volet à peu près la condition requise.

Si l'on voulait la condition exacte il faudrait rapprocher le volet BA43 du deuxième triplet.

Faisceau fin :

On agira de la façon suivante :

- 1) limiter le faisceau en diamètre à l'aide du volet 26 à la dimension désirée.
- 2) Pour le plan y limiter le faisceau en angle à l'aide de BA41 sachant que  $\approx 6$  mm en BA41 se transforment en un angle de 1 mrad en 26.
- 3) Pour le plan z limiter le faisceau en angle à l'aide de BA43 en sachant que l'on a à peu près une limitation de 1 mrad pour 15 mm de limitation en BA43.

REMERCIEMENTS

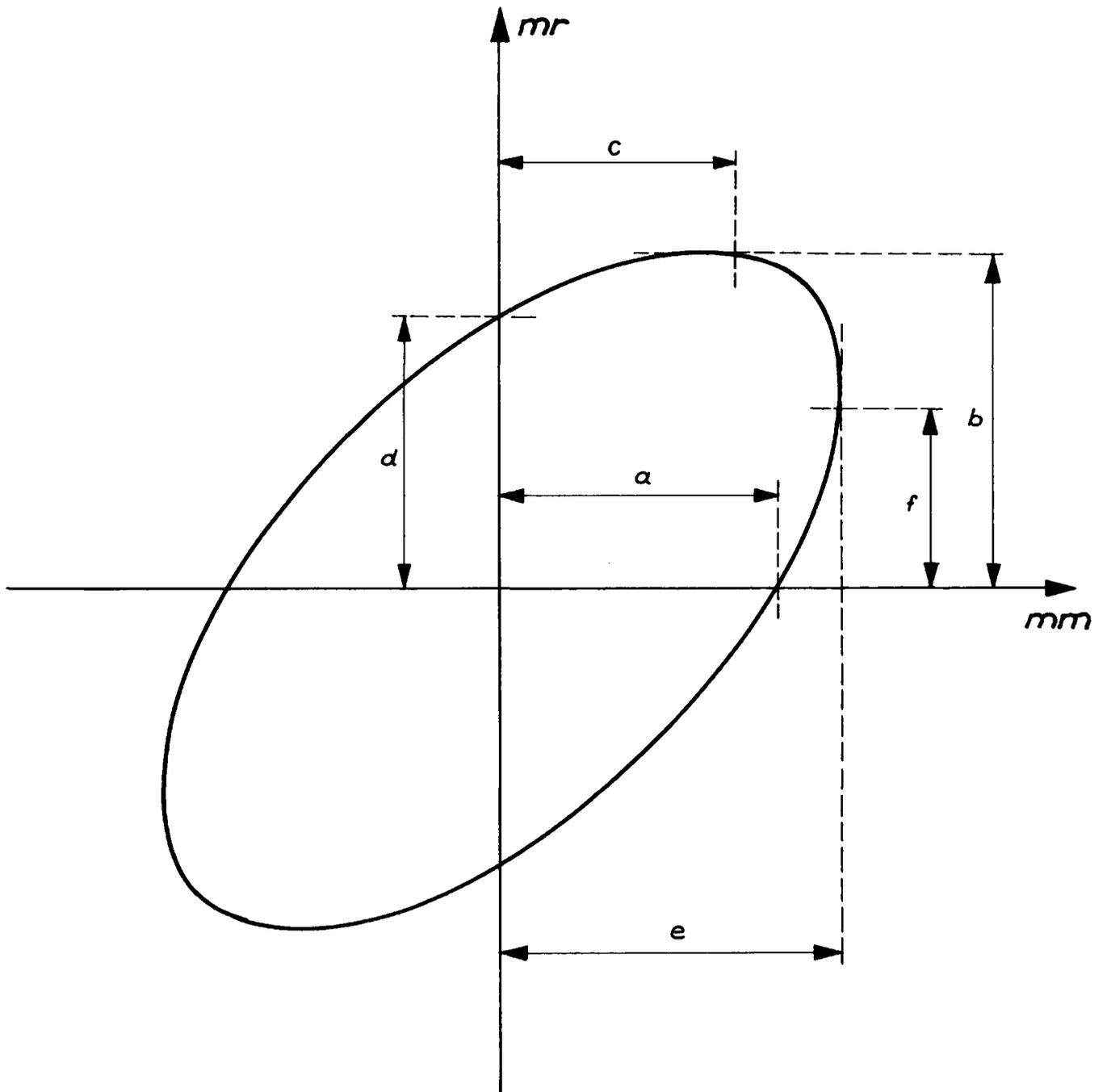
Je remercie MM. J.-J. Aebi et L. Bernard qui m'ont aidé à la préparation et à la réalisation des mesures.

Distribution :

Personnel scientifique de la Division PS  
Groupe Linac  
Opérateurs MCR  
P. Lapostolle  
B. Montague  
L. Thorndahl

REFERENCES

- 1) H.G. Hereward, Effect of quadrupoles in the CPS : Methods of calculation, MPS/Int. DL 63-9.
- 2) H.G. Hereward, The properties of particle beams in optical matching systems in terms of phase-plane ellipse shapes, PS/Int. TH 59-5.
- 3) T.R. Walsh, The optical design of beam matching systems, AERF A/R 2711.
- 4) P. Têtu, Emittance du faisceau linac, MPS/Int. LIN 63-5.



**Fig. 1**

*Paramètres définissant les ellipses d'émittance*

Fig. 2b Schéma équivalent de la zone de l'infecteur dans le plan yy'

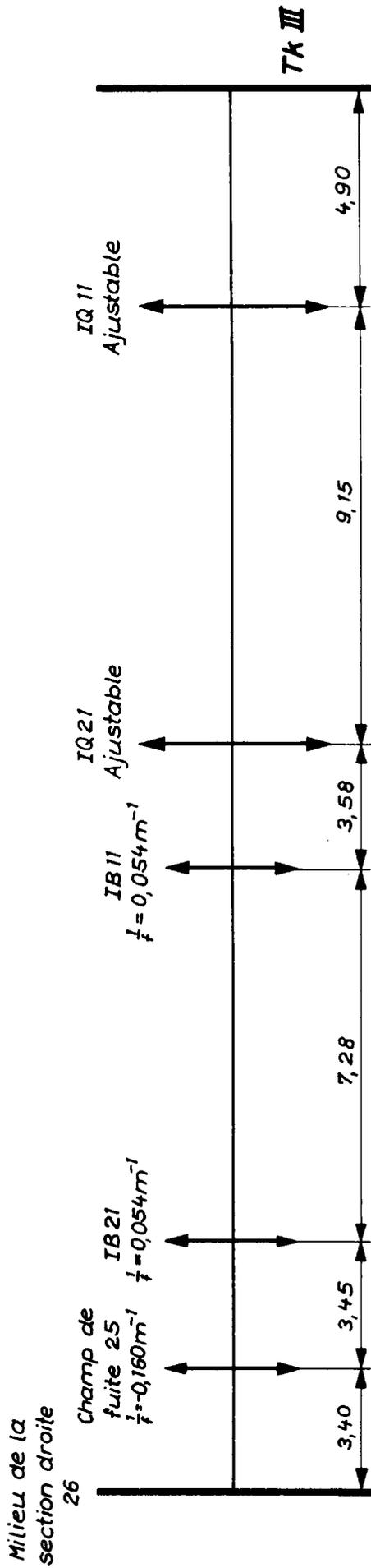
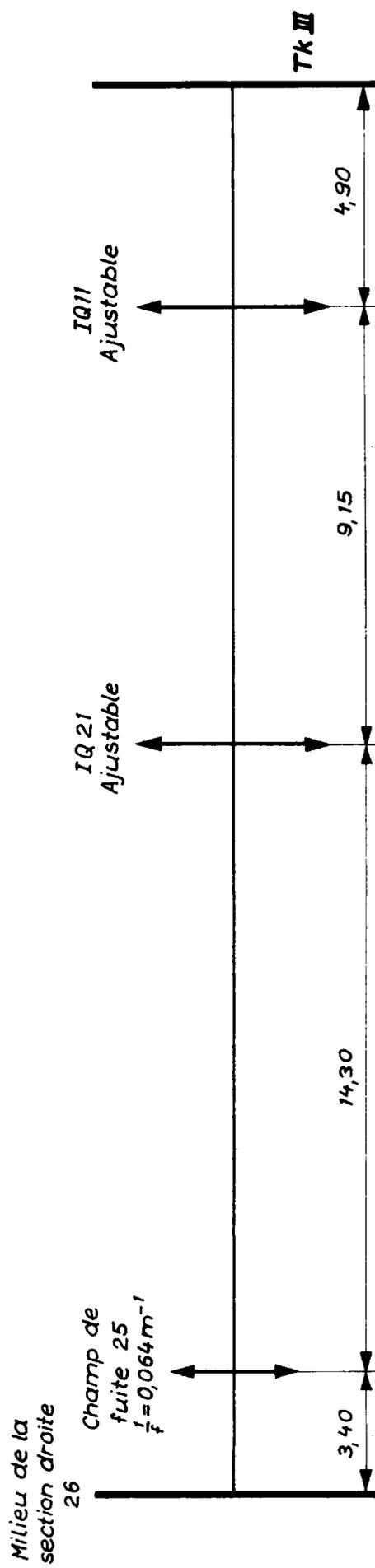


Fig. 2c Schéma équivalent de l'infecteur dans le plan zz'



Les  $f$  sont positifs pour les valeurs focalisantes  
Les espaces de glissement sont cotés en mètres

Fig. 2b et 2c

Linac to synchrotron optics

MPS 1200

CERN - MPS  
LINAC

105-1637-4

20.12.65 Rottenfluh

Plan YY'

$R_T$  et  $X_T$  en fonction de  $R_{26}$  pour différents  $X_{26}$

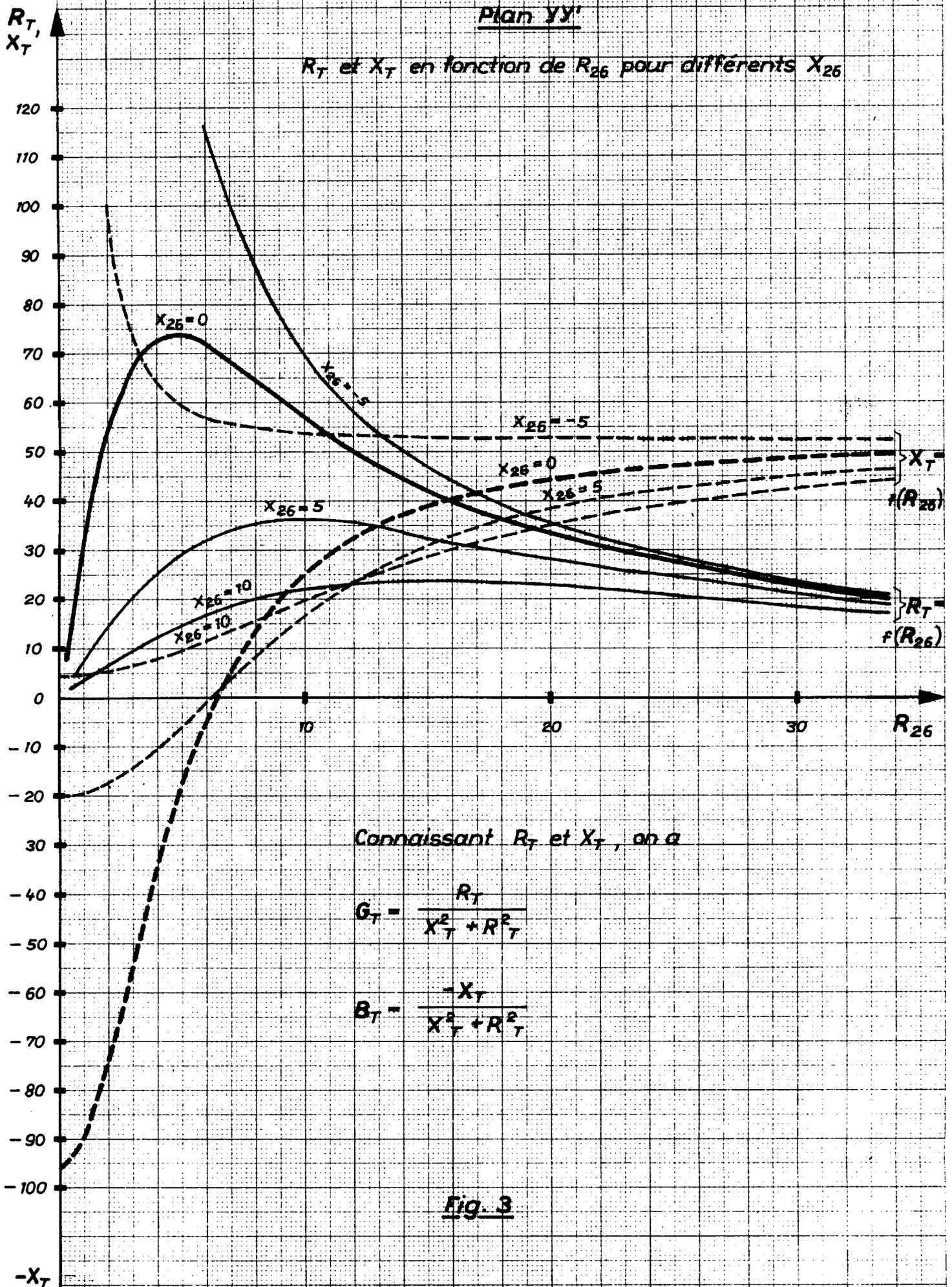
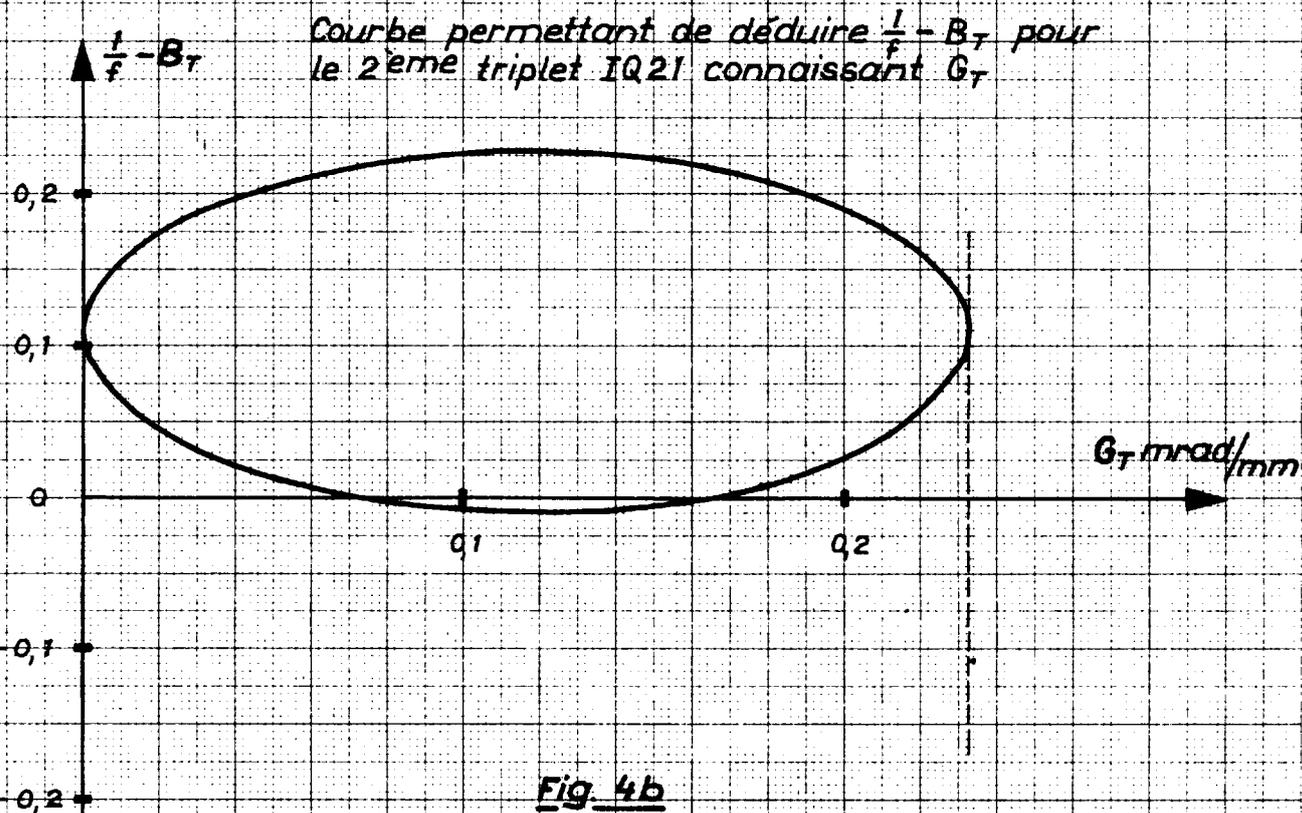
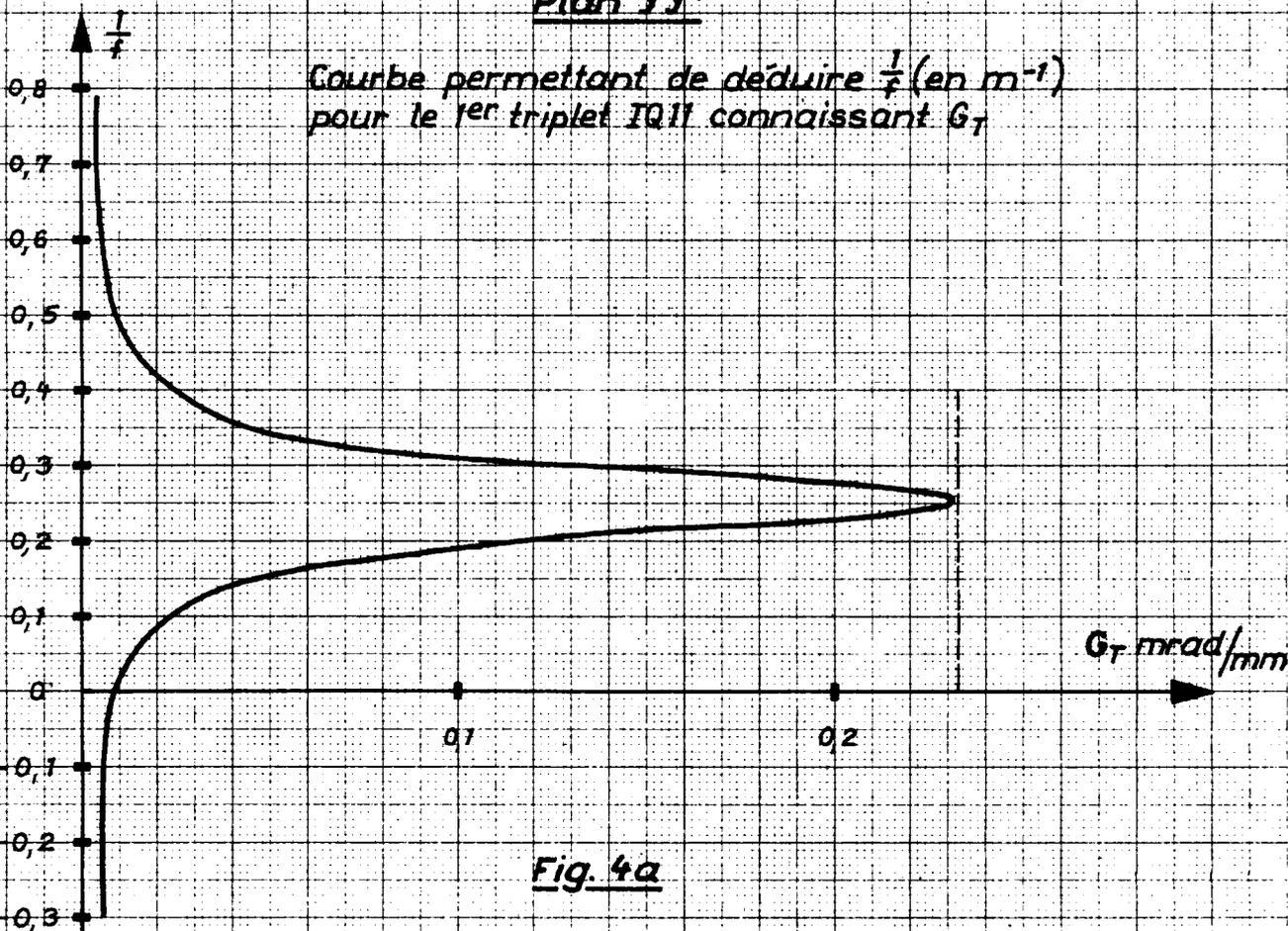


Fig. 3

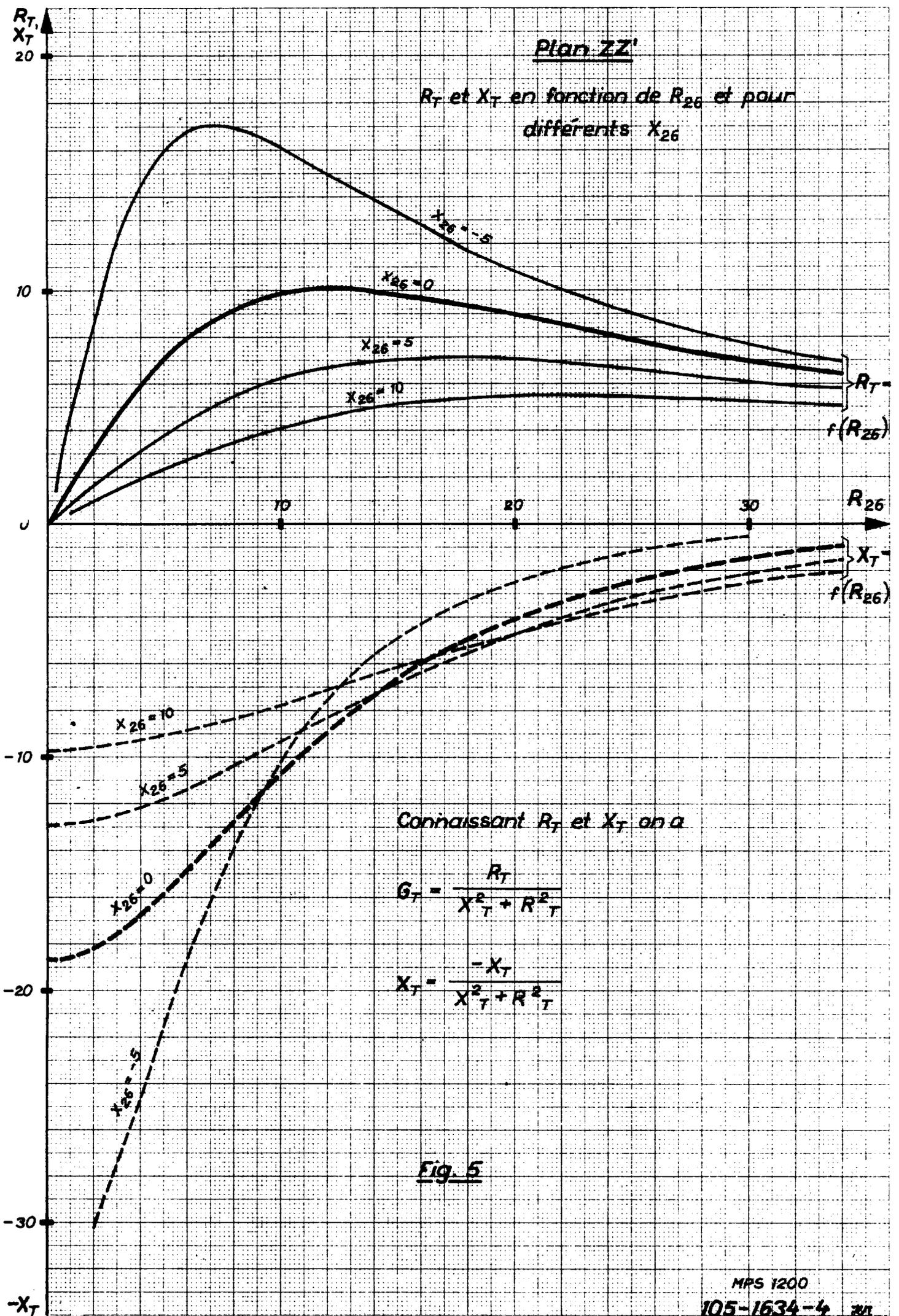
Plan YY'



N.B. : Les valeurs de  $\frac{1}{f}$  positives indiquent que le triplet est focalisant dans le plan YY'

Plan ZZ'

$R_T$  et  $X_T$  en fonction de  $R_{26}$  et pour différents  $X_{26}$



Plan ZZ'

Courbe permettant de déduire  $\frac{1}{f}$  (en  $m^{-1}$ ) pour le 1<sup>er</sup> triplet IQ11 connaissant  $G_T$

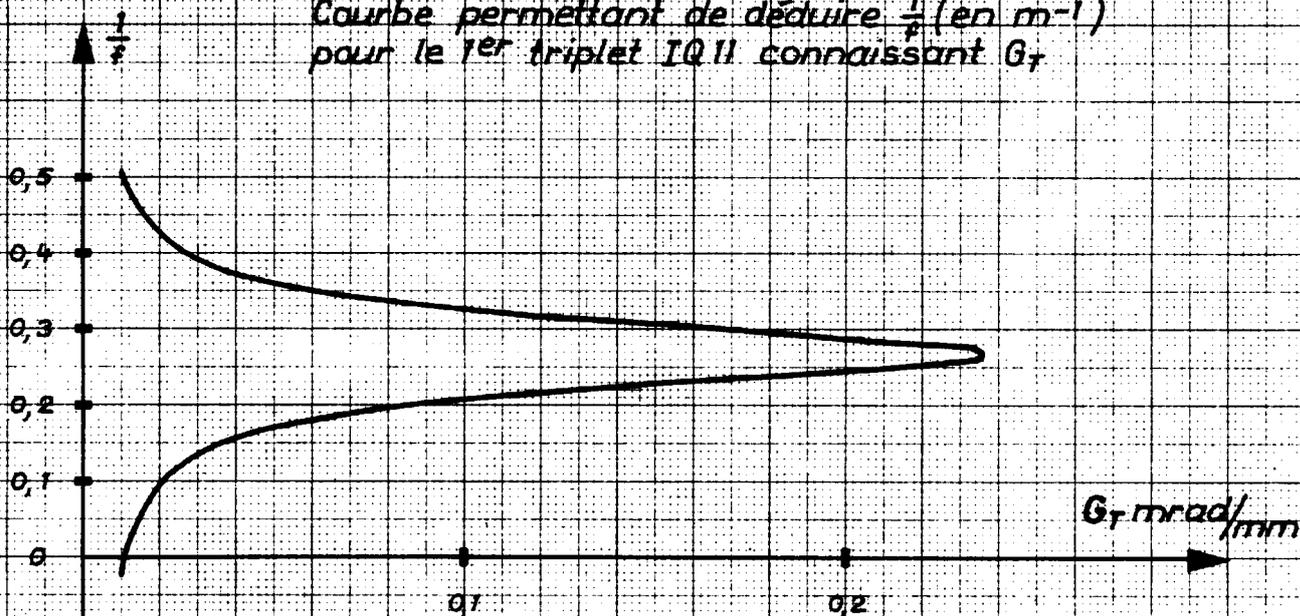
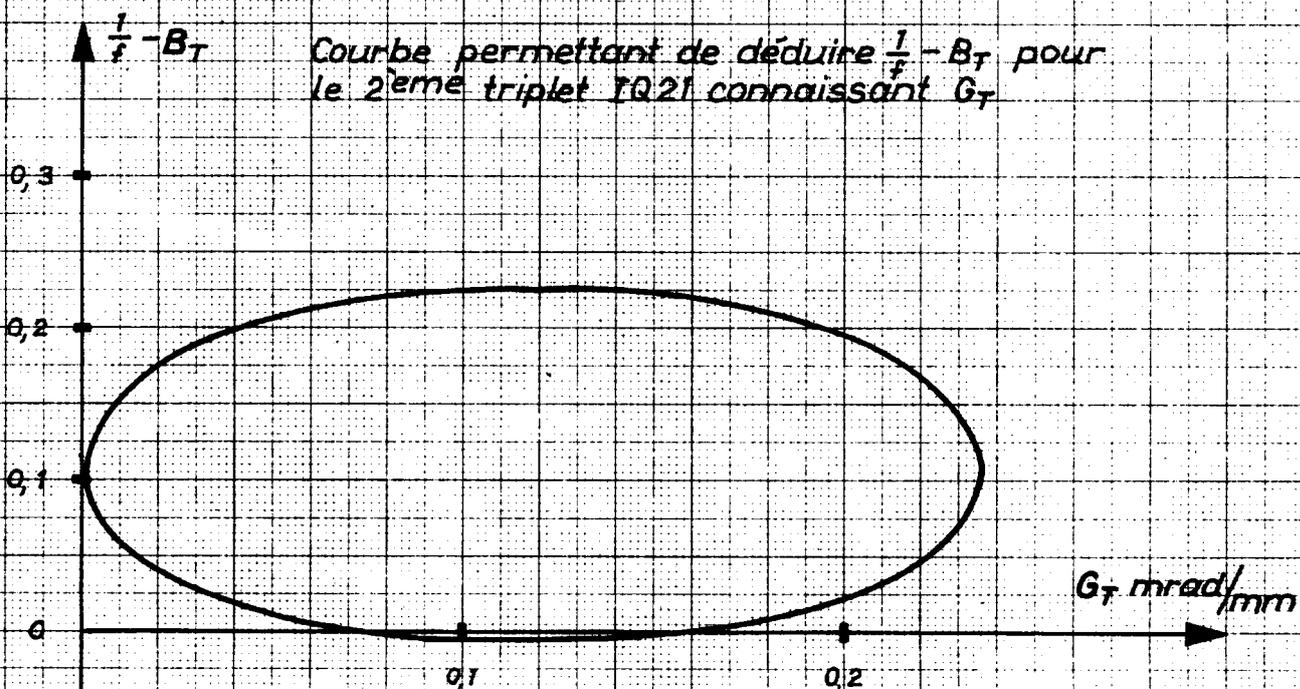


Fig. 6a



Courbe permettant de déduire  $\frac{1}{f} - B_T$  pour le 2<sup>eme</sup> triplet IQ21 connaissant  $G_T$

Fig. 6b

