

/nc

PS/BR/Note 76-20

13 juillet 1976

ETUDE DES MODIFICATIONS DE LA LIGNE DE TRANSFERT BR-PS  
POUR ASSURER LA RECOMBINAISON A 10 OU 5 PAQUETS

J.P. Delahaye

## I. INTRODUCTION : BUT ET INTERET

Ces modes avaient été prévus <sup>1)</sup> à la construction du Booster mais non réalisés, (excepté l'agrandissement des chambres à vide du PS et la déformation à l'injection de l'orbite PS par quatre bumpers). Outre les arguments à l'époque concernant les ISR <sup>2)</sup>, leurs principaux avantages sont :

- d'augmenter la densité longitudinale des paquets
- de multiplier l'intensité injectée au PS en multipulsant le PSB.

Le mode "10 paquets" est assuré par deux additions verticales de deux anneaux Booster dans la recombinaison.

Le mode "5 paquets" correspond à l'addition horizontale par injection deux tours dans le PS de deux faisceaux additionnés suivant le mode "10 paquets".

Une étude récente de P. Lefèvre <sup>3)</sup> recommande la réalisation du mode "10 paquets" afin de permettre :

- a) des études dans le PS
  - sur des faisceaux ronds à haute densité ;
  - sur des faisceaux à haute intensité par paquets.
- b) Préparer et étudier des paquets à haute densité longitudinale susceptibles d'être utilisés pour la production d'antiprotons.
- c) Essayer le mode de deux impulsions PSB avec addition verticale préconisée par W. Hardt (intensité PS x 2).

## II. PRINCIPE DE L'ADDITION VERTICALE DANS LA RECOMBINAISON

La représentation dans l'espace de phase vertical du faisceau résultant de l'addition verticale de deux faisceaux initiaux est la plus petite ellipse circonscrite aux deux ellipses représentant les faisceaux initiaux.

L'émittance du faisceau additionné sera donc d'autant plus petite que les ellipses initiales seront plus proches dans l'espace de phase vertical. On montre en Annexe I que dans le cas idéal de deux faisceaux initiaux de mêmes caractéristiques (émittance et adaptation) et qui présentent un point de contact l'émittance du faisceau additionné est égale à

$$3\sqrt{3} / 2 \approx 2.6$$

fois l'émittance d'un des faisceaux initiaux.

### III. REALISATION DE L'ADDITION DANS LA LIGNE DE TRANSFERT ACTUELLE

En aucun point de la ligne deux faisceaux ne peuvent se toucher dans l'espace de phase vertical. La distance minimale qui les sépare est soit le septum TSV1, soit le septum TSV2 soit leur image transportée.

La figure 1 montre la position et la forme des faisceaux en TSV1 puis en TK1 dans l'espace de phase vertical (en pointillé est représenté le faisceau additionné).

La figure 2 donne la même image au niveau de TSV2.

#### 1. Caractéristiques du faisceau additionné en TSV1 ou TSV2

Le cas particulier de deux faisceaux initiaux de même adaptation de même émittance, séparés par une certaine distance mais alignés suivant un de leurs axes, est traité en Annexe I. On peut se ramener dans cette condition en TSV1 (figure 1) ou TSV2 (figure 2) en ne changeant que très légèrement la déflexion de TSV1 (+0,25 mrad) ou de TSV2 (+ 1,2 mrad).

En TSV1 :  $\alpha = 2,564$   $\beta = 21,043$

En TSV2 :  $\alpha = - 2,60$   $\beta = 17,43$

Les paramètres d'adaptation sont à peu près identiques, l'épaisseur du septum ( $e = 6\text{mm}$ ) est égale ; l'application des résultats de l'Annexe I (voir courbes) montre que le coefficient de blow-up est à peu de chose près le même

$\epsilon_{\text{initial}} \sim 12 \pi$	$\Rightarrow$	$\epsilon_{\text{additionné}} \sim 2,95 \times \epsilon_{\text{initial}} = 35,4\pi$
$\epsilon_{\text{initial}} \sim 15 \pi$	$\Rightarrow$	$\epsilon_{\text{additionné}} \sim 2,90 \times \epsilon_{\text{initial}} = 43,5\pi$

#### 2. Conclusions

Réaliser l'addition au niveau de TSV1 est impossible car cela obligerait à la recombinaison en TK2 de faisceaux de l'ordre de  $35\pi$  ce qui est impossible avec le kicker actuel.

L'addition en TSV2, elle, est tout à fait possible. Son coefficient de blow-up vertical ( $\sim 2,90$ ) n'est pas beaucoup plus élevé que le minimum que l'on puisse réaliser (2,60) comme le montre l'Annexe I.

#### IV. OPTIMISATION DE L'ADDITION

Cette optimisation consiste en la minimisation de l'émission verticale du faisceau additionné.

##### 1. Choix de la méthode

Afin de trouver les conditions optimales les figures 3, 4 et 5 représentent l'évolution du blow-up vertical en fonction des divers paramètres

- épaisseur du septum séparant les deux faisceaux initiaux : figure 3
- émittance ( $\epsilon_v$ ) du faisceau initial : figure 3
- adaptation ( $\beta_v, \alpha_v$ ) du faisceau initial : figures 4 et 5.

Il en découle immédiatement : (pour un faisceau initial d'émission donnée)

- Le septum doit être le plus mince possible (figure 3)  
une épaisseur de 1mm introduit une augmentation de 2% du blow-up vertical alors qu'un septum de 6mm d'épaisseur une augmentation de 11,5% de ce même coefficient.
- Le paramètre  $\beta$  d'adaptation doit être le plus grand possible : (figure 4).  
Néanmoins, lorsque  $\beta_v > 15$  m, la décroissance du blow-up reste très faible : un doublement de  $\beta_v$  ne diminue le coefficient de blow-up que de 3,5 %.
- Le coefficient de blow-up est pratiquement indépendant du paramètre  $\alpha_v$  dès que celui-ci atteint 5 pour des petites valeurs de  $\beta$  ( $< 3$ m) et est complètement indépendant de  $\alpha$  pour des valeurs de  $\beta > 3$ m. Ceci provient du fait que  $\alpha$  joue à la fois sur l'orientation de l'ellipse mais aussi sur le rapport des axes (figure 5).

La seule méthode permettant de diminuer le coefficient de blow-up introduit en TSV2 consiste à introduire un septum aussi mince que possible. En effet,  $\beta$  étant égal à 17,5, un accroissement de  $\beta$  n'améliorerait pas le coefficient de blow-up. De plus, pour cette valeur de  $\beta$ , une variation de  $\alpha$  n'apporterait aucun gain.

Le but du septum positionné soit après TSV1 soit après TSV2 est alors de réduire en ce point l'image du septum épais précédent

## 2. Localisation du septum mince

E. Weisse avait proposé <sup>1)</sup> l'addition verticale des anneaux 3 et 4 puis 1 et 2 à la sortie de TSV1 en prévoyant deux nouveaux doubles septa de  $\pm 5,28$  mrad chacun.

Il est souhaitable d'adopter un autre point d'addition à la sortie non pas de TSV1 mais de TQ3 pour un certain nombre d'avantages.

- a) L'addition multipliant l'émission verticale par un facteur d'au moins 2,6 (et donc les dimensions par au moins 1,6), il est intéressant de la réaliser le plus tard possible.
- b) Un minimum d'éléments doit être rajouté (1 seul septum de 3 mrad au lieu de deux doubles septa de 5,8 mrad).
- c) Les kickers TK01 continuent à travailler à leur valeur habituelle. Le kicker TK02 où passe le faisceau additionné reste déclenché.
- d) Les septa (TSV01-TSV02-TSV03) peuvent rester à la même position dans les trois modes (20, 10 et 5 paquets); il est donc possible de passer d'un mode à l'autre d'impulsion en impulsion.
- e) Un minimum d'éléments doit changer faiblement de valeur  
1 septum + 4 quadrupoles pour l'adaptation  
1 septum + 1 kicker + 2 dipôles passent de "ON" à "OFF".
- f) Le mode 5 paquets est conservé en adoptant la séquence  
4 sur 1 puis 625 ns après 2 sur 3 (voir figure 9 : timing ejection - recombinaison - injection PS).
- g) Les paramètres d'adaptation étant à peu près identiques dans les deux cas le blow-up sera le même.

Ainsi le point le plus proche du PS où les faisceaux sont encore séparés d'une distance suffisante (6mm) pour y loger un septum se trouve à la sortie de TQ3.

Le point d'addition (centre du nouveau septum TSV3) pourrait être ainsi positionné à la cote 23,400 m. En ce point les paramètres d'adaptation sont :

$$\alpha = 2,91 \text{ m} \quad \text{et} \quad \beta = 21,3 \text{ m}$$

Les figures 4 et 5 montrent combien ces conditions sont favorables. L'émission du faisceau additionné dépendrait ainsi essentiellement de l'épaisseur (figure 3) de ce nouveau septum.

3. Choix du septum

La déflexion nécessaire de ce septum est de 3,5 mrad.

Compte tenu que ce septum doit être le plus fin possible, deux solutions sont envisageables.

a) Septum électrostatique

On pourrait alors obtenir une épaisseur apparente proche de zéro :

$$\tan \theta = \frac{q E l}{m v^2} \quad \left. \begin{array}{l} q : \text{charge} \\ m : \text{masse} \\ v : \text{vitesse} \end{array} \right\} \text{ de la part.}$$

$$E l \text{ (Volts)} = (B \rho)_{300 \text{ keV}} \times \sqrt{\phantom{x}} \times \tan \theta$$

$$\theta = 3,5 \text{ mrad} \Rightarrow$$

$$E l = 4315 \text{ kV}$$

La distance disponible étant de 50 cm :  $E = 8630 \text{ kV/m}$

L'ouverture verticale nécessaire de 5 cm impose une tension  $V$  entre les plaques de

$$V = 430 \text{ kV}$$

ce qui n'est pas attrayant.

b) Septum magnétique

$$\tan \theta = \frac{q B l}{m v}$$

$$B l \text{ (T, m)} = (B \rho)_{300 \text{ keV}} \times \tan \theta$$

$$\theta = 3,5 \text{ mrad} \Rightarrow$$

$$B l = 171 \text{ gm.}$$

Une distance disponible de 40 cm  $\Rightarrow B = 430 \text{ G}$ . Si l'entrefer horizontal du septum est 6 cm

le nombre d'Ampères-Tours  $\approx 0,8 \times B \text{ (gauss)} \times \text{Entrefer (cm)}$

Le courant dans le septum devient :

$$I \approx 2050 \text{ A}$$

A condition de pulser ce courant en un temps relativement bref (quelques ms) une épaisseur de septum de 1mm est alors réalisable

$$\text{épaisseur TSV3} = 1 \text{ mm}$$

Dans ces conditions le coefficient de blow-up est de

$$2,65$$

ce qui n'est que de 2% supérieur au cas idéal (2,60). La figure 6 montre la disposition dans l'espace de phase vertical des faisceaux initiaux et du faisceau résultant.

#### V. ADAPTATION DU FAISCEAU ADDITIONNE

Seule l'adaptation verticale est modifiée : si l'on applique les résultats de l'Annexe I pour chacun des deux modèles d'addition (avec ou sans TSV3)

		En TSV2	En TSV3
faisceau initial	$\alpha$	- 2,56	+ 2,91
	$\beta$	21,04	21,30
	G	0,0475	0,0469
	B	- 0,1217	+ 0,1366
faisceau additionné	$\alpha$	- 4,53	+ 4,81
	$\beta$	32,75	37,38
	G	0,0305	0,0267
	B	- 0,1383	+ 0,1287

La désadaptation est donnée par la dimension du vecteur  $k$

$$k = \sqrt{\frac{(G - G_0)^2 + (B - B_0)^2}{G G_0}}$$

Elle devient :

- addition en TSV2 sans TSV3 :  $k = 0,624$
- addition en TSV3 :  $k = 0,613$

Cette désadaptation entraînerait un blow-up géométrique de l'ordre de 10% dans le PS. Les quadrupoles d'adaptation TQ5 à 10 devront donc être corrigés pour retrouver la bonne adaptation à l'injection au PS.

## VI. TRAJECTOIRES ET TIMING DES KICKERS

Les figures 7 et 8 montrent respectivement dans les solutions sans TSV3 et avec TSV3, les trajectoires dans les modes 20 paquets et 10 paquets pour une émittance verticale de  $15\pi$ .

- La recombinaison reste identique dans les deux solutions entre les modes 20 ou 10 paquets jusqu'en TSV2.
- Seul le timing de la séquence est différent comme le montre la figure 9.
- L'anneau 3 reste dans tous les cas centré jusqu'en TQ3.
- Le septum TSV3 est positionné dans l'espace laissé libre entre les deux faisceaux par l'ombre de TSV2 (figure 10).
- Dans les deux solutions le kicker TK02 reste déclenché et deux dipôles TDVA et TDV4 permettent de ramener la trajectoire du faisceau additionné au niveau du PS.
- Dans le cas de la solution sans TSV3 (figure 7) seule la déflexion de TSV2 doit être légèrement modifiée (+ 1,2 mrad), TDVA et TDV2 doivent être enclenchés et TK02 déclenché.
- Dans le cas de la solution avec TSV3 (figure 8) TSV2 doit être aussi légèrement modifié (-2,58 mrad), TDVA, TDV1 et TSV3 doivent être enclenchés et TK02 déclenché.

En TSV3 une déflexion de 2,7 mrad est suffisante et cette valeur est pratiquement indépendante de l'émittance verticale à condition que les trajectoires soient adaptées à cette émittance.



Sur les figures 7 et 8 sont inscrites les valeurs des différents éléments dans les modes 10 et 20 paquets.

### CONCLUSION

Remarquons tout d'abord la grande exactitude et prévoyance du projet de la ligne de transfert <sup>1),2)</sup> qui permet aujourd'hui avec très peu de modifications de préparer ce nouveau mode d'éjection et d'injection dans le PS qu'est la recombinaison à 10 (ou à 5) paquets.

Une étude <sup>1)</sup> avait montré à l'époque que ce mode était possible.

Au moment de la réalisation, nous avons tenté de l'optimiser. Il ressort de cette étude :

- 1) les modifications projetées permettent à la fois la recombinaison à 5 et à 10 paquets.
- 2) A condition de réaliser l'addition en aval des kickers TK01, il est possible d'accepter des faisceaux initiaux allant jusqu'à  $15 \pi$  d'émission verticale.
- 3) L'émission verticale du faisceau résultant sera au minimum de 2,6 fois celle d'un des faisceaux initiaux.
- 4) Seul un très faible nombre d'éléments doit être modifié lorsque l'on passe du mode 20 paquets au mode 10 paquets. La pulsation d'un mode à l'autre de pulse à pulse semble donc réalisable dans la partie avant TBH.
- 5) L'adaptation au PS doit être recalculée et les 5 quadrupoles TQ5 à 10 devront être changés d'un mode à l'autre (l'étude est en cours).
- 6) Un dipôle vertical (2 mrad) doit être rajouté en amont de TK02.
- 7) Un dipôle vertical existant TDV4 doit être renforcé (+ 3,5 mrad).
- 8) Le dipôle vertical existant TDV3 permettra d'ajuster la partie utile du faisceau 3.
- 9) Pour l'addition elle-même deux méthodes sont possibles :
  - soit l'on accepte 12% de blow-up géométrique vertical en plus du blow-up minimal et il est nécessaire de ne rien ajouter à la ligne : c'est la solution de l'addition en TSV2;

- soit l'on ramène ce blow-up supplémentaire à 2% et il faut rajouter à la sortie de TQ3 un septum de 1 mm d'épaisseur produisant une déflexion de 2,7 mrad.

Ainsi les essais de la recombinaison à 10 paquets sont possibles très rapidement et pratiquement sans investissement (2 dipôles). Néanmoins, cette solution présente un certain nombre de désavantages :

- l'arrosage intense du septum TSV2 introduit un risque pour l'opération normale à 20 paquets ;
- l'émittance verticale est 10% plus grande qu'elle ne pourrait être.

Aussi il est souhaitable d'envisager deux étapes dans la réalisation de la recombinaison à 10 paquets.

- Effectuer les modifications nécessaires à l'addition en TSV2 (dipôles - timing - adaptation).
- Faire des essais et des mesures en temps limité avec cette solution pour vérifier l'exactitude des provisions.
- Préparer en attendant un septum TSV3 qui vu son faible prix de revient deviendra intéressant si ce mode de recombinaison devient opérationnel.

#### REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier ici tout spécialement K. Schindl pour la gentillesse avec laquelle il a bien voulu m'apporter les "lumières" qui me manquaient quant aux secrets de l'optique corpusculaire, K.H. Reich pour son encouragement constant à rechercher la meilleure solution des problèmes, le B.P.C. tout entier et plus particulièrement H. Koziol et F. Sacherer à qui je dois ma formation théorique.

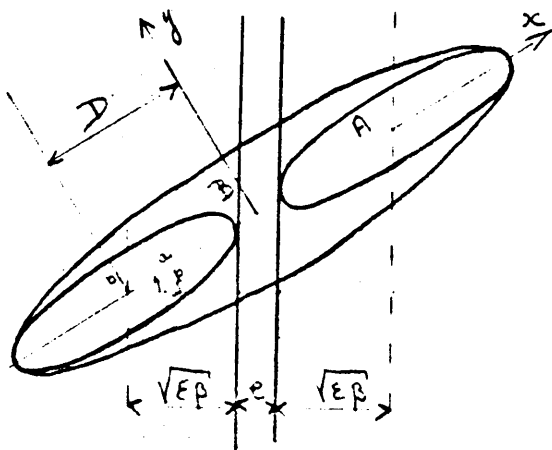
#### Distribution

Groupe BR  
MAC  
Groupe de travail "multipulsing"  
PSS  
J. Gareyte  
E. Weisse

A N N E X E

CARACTERISTIQUES D'UN FAISCEAU RESULTANT DE L'ADDITION DE DEUX FAISCEAUX IDENTIQUES ALIGNES SUIVANT UN DE LEURS AXES

Soit  $e$  l'épaisseur du septum qui les sépare. On affectera des lettres minuscules aux faisceaux initiaux et des lettres majuscules au faisceau résultant de l'addition :



Les ellipses des faisceaux initiaux et additionné ont un axe commun ( $x$ ) et des centres séparés d'une distance

$$D = \frac{\sqrt{ep} + e/2}{\cos \theta}$$

1) Calcul des axes de l'ellipse représentant le faisceau additionné

Rapportons l'équation des ellipses à leur axe :

$$B^e x^e + A^e y^e - A^e B^e = 0$$

$$b^e (x - D)^e + a^e y^e - a^e b^e = 0$$

L'abscisse des points de contact entre les ellipses est donnée par

$$x^e (a^e B^e - A^e b^e) + 2 A^e b^e D x + A^e (a^e b^e - a^e B^e - b^e D^e) = 0$$

Pour qu'il y ait juste contact entre les deux ellipses il faut et il suffit que le déterminant de cette équation soit nul

$$\Delta = 0 \iff \boxed{A^e = \frac{B^e}{b^e} \left( a^e + \frac{b^e D^e}{B^e - b^e} \right)}$$

Pour que l'ellipse représente le faisceau d'émittance minimale il faut et il suffit que l'aire de l'ellipse soit minimale :

$$A_{inc} = \pi A B = \pi \frac{B^2}{b} \sqrt{a^2 + \frac{b^2 D^2}{B^2 - b^2}} = \pi \frac{B^2}{b} \sqrt{Q}$$

$$d(\pi A B) = \left( \frac{2Q(B^2 - b^2)^2 - b^2 B^2 D^2}{b \sqrt{Q} (B^2 - b^2)} \right) \pi B dB$$

$$d(\pi A B) = 0 \iff 2Q(B^2 - b^2)^2 - b^2 B^2 D^2 = 0$$

$$2a^2 B^4 - b^2(4a^2 - D^2)B^2 + 2b^4(a^2 - D^2) = 0$$

$B = \frac{b^2(4a^2 - D^2) \pm \sqrt{\Delta}}{4a^2}$
$\Delta = b^4(4a^2 - D^2)^2 - 16a^2 b^4(a^2 - b^2)$

2) Emittance du faisceau résultant :

$$\mathcal{E} = \pi A B$$

Soit  $\epsilon_i$  l'émittance du faisceau initial

$\mathcal{E} = \pi A B = \frac{A B}{a b} \epsilon_i$
--

Cas spécial où  $e$  et  $\xi = 0$   $\Rightarrow D = \sqrt{\mathcal{E} b} = a$

$$Q = a^2 + \frac{b^2 D^2}{B^2 - b^2} = \frac{a^2 B^2}{B^2 - b^2}$$

$$A = \frac{B}{b} \sqrt{Q} = \frac{a}{b} \frac{B^2}{B^2 - b^2}$$

$$\Delta = b^4 (4a^2 - D^2)^2 - 16 a^2 b^4 (a^2 - D^2) = 9 a^4 b^4$$

$$B = \frac{b^2 (4a^2 - D^2) \pm \sqrt{\Delta}}{4 a^2} = \frac{3 b^2 \pm 3 b^2}{4}$$

$$A = \frac{a}{b} \frac{B^2}{B^2 - b^2}$$

$B = b \sqrt{\frac{3}{2}}$
$A = a \frac{3}{\sqrt{2}}$

Le rapport R des émittances devient

$R = \frac{AB}{ab} = \frac{3\sqrt{3}}{2} = 2,598$
---

### 3) Caractéristiques d'adaptation du faisceau additionné

Soit H et h tels que

$$\frac{A}{B} = H + \sqrt{H^2 - 1} \Rightarrow H = \frac{A^2 - B^2}{2AB}$$
$$\frac{a}{b} = h + \sqrt{h^2 - 1} \Rightarrow h = \frac{a^2 - b^2}{2ab}$$

Soit  $\beta_r$ ,  $\alpha_r$  et  $\gamma_r$  les caractéristiques de l'ellipse résultante

$\beta_i$ ,  $\alpha_i$  et  $\gamma_i$  les caractéristiques de l'ellipse initiale

L'orientation des ellipses initiale et résultante étant commune

$$\cos \epsilon \xi = \frac{\beta_r - \gamma_r}{2\sqrt{H^2 - 1}} = \frac{\beta_i - \gamma_i}{2\sqrt{h^2 - 1}}$$

$$\beta_2 - \gamma_2 = \epsilon \sqrt{H^2 - 1} \cos \epsilon \xi$$

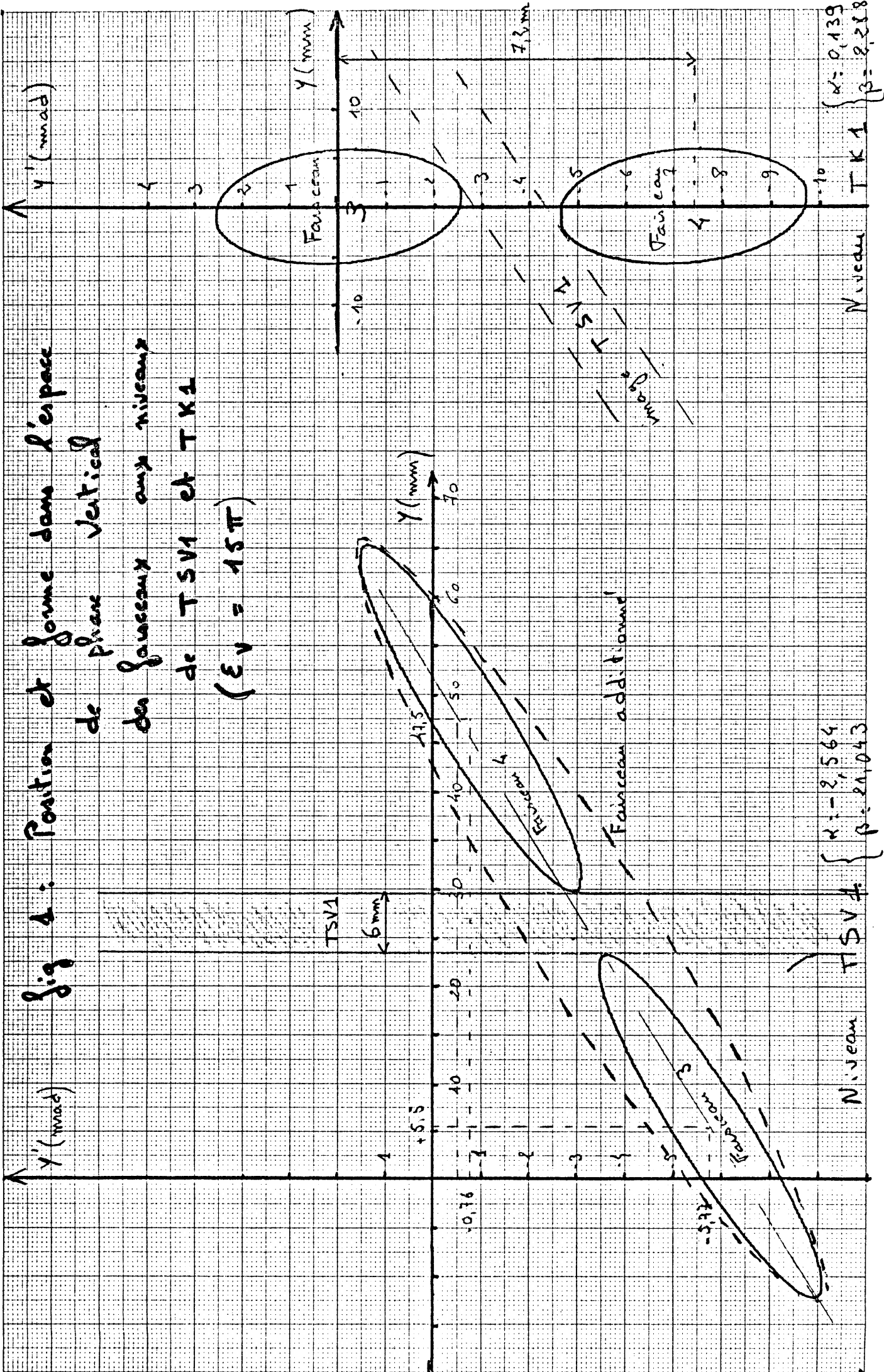
$$\beta_2 + \gamma_2 = \epsilon H$$

$\beta_2 = H + \sqrt{\frac{H^2 - 1}{h^2 - 1}} \left( \frac{\beta_i - \gamma_i}{\epsilon} \right)$
$\gamma_2 = H - \sqrt{\frac{H^2 - 1}{h^2 - 1}} \left( \frac{\beta_i - \gamma_i}{\epsilon} \right)$

R E F E R E N C E S

- 1) Optics of the Booster - CPS Transfer System Specification of  
Magnetic Elements, SI/Note MAE/69/5 de E. Weisse.
- 2) Evolution of Proton Density between Ion Source and ISR,  
CERN-MPS-SI/Int. DL/70-7 de C. Bovet et al.
- 3) Remarques sur les différents modes d'injection dans le PS,  
S/DL/Note 76-15 de P. Lefevre.

Fig 4: Position et forme dans l'espace  
de phase vertical  
des faisceaux aux niveaux  
de TSV1 et TK1  
( $\epsilon_V = 15\pi$ )





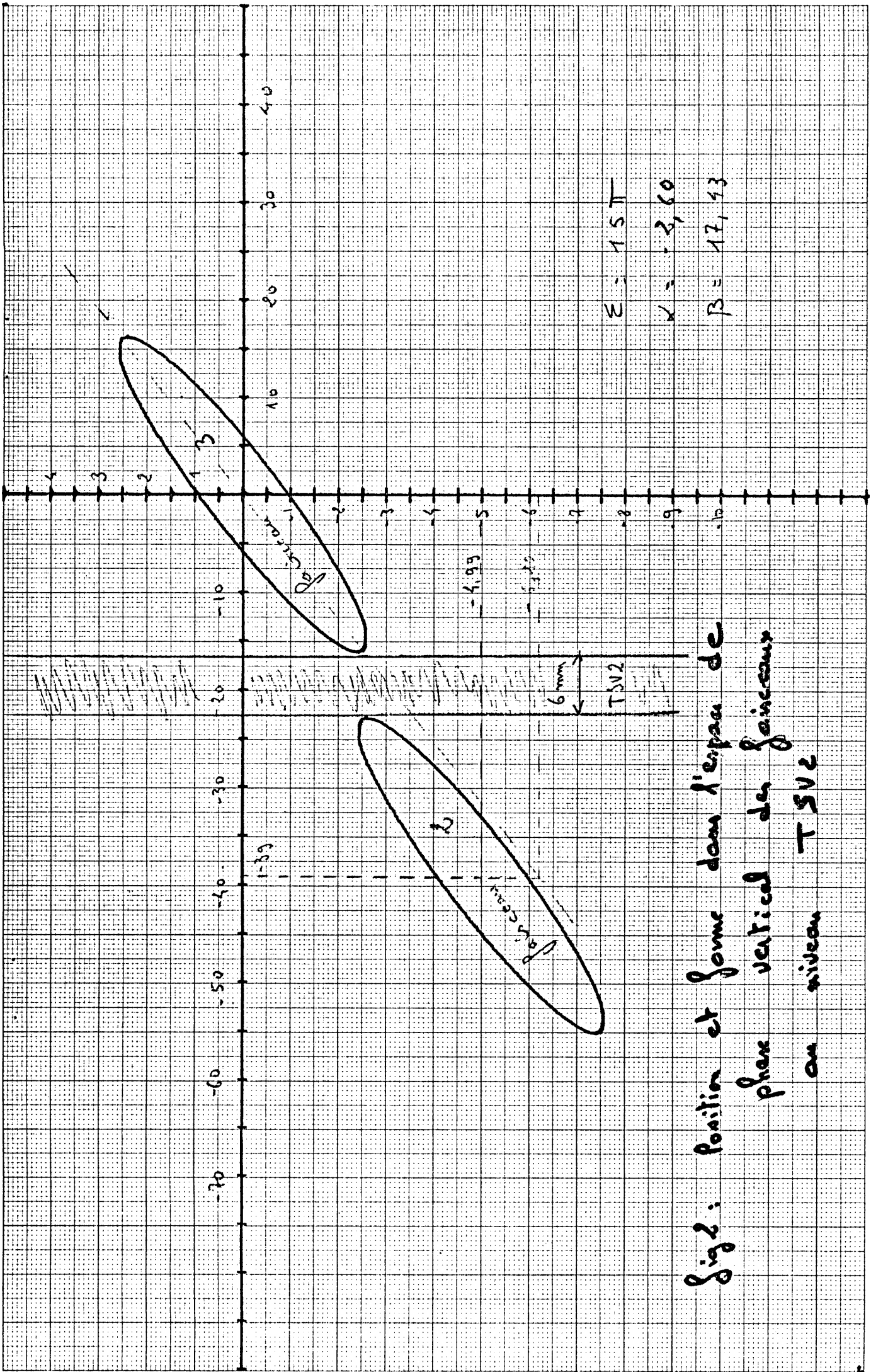


Fig 2: position et forme dans l'espace de phase vertical des gainceaux au niveau TSV2

Fig 3: Evolution avec l'épaisseur d'un septum  
du coefficient de blow-up vertical  $\frac{\epsilon_{add}}{\epsilon_{initial}}$

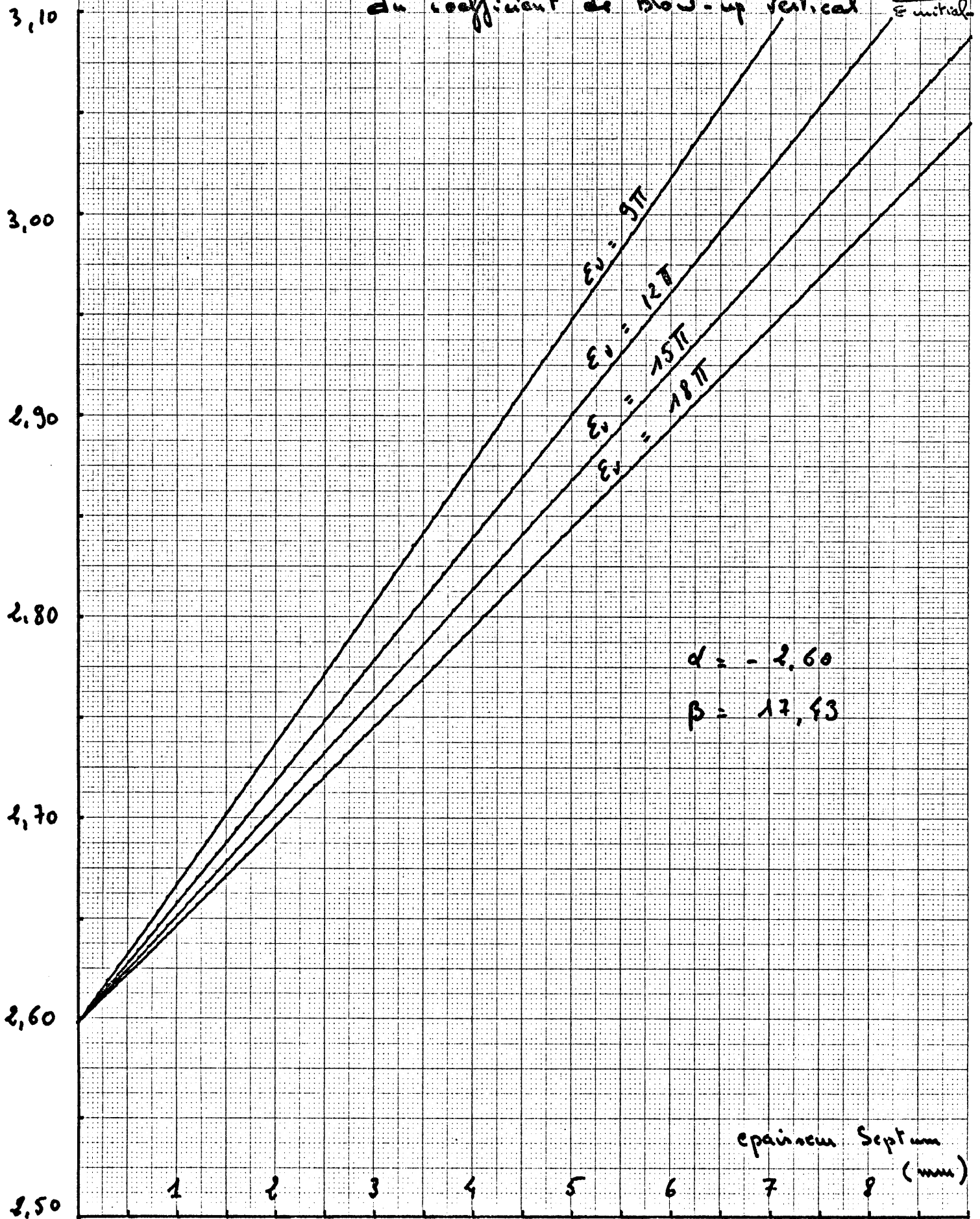


Fig 4 : Evolution avec le paramètre d'adaptation  $\beta$  du faisceau initial du coefficient de blow-up vertical  $\frac{S_{add}}{S_{initial}}$

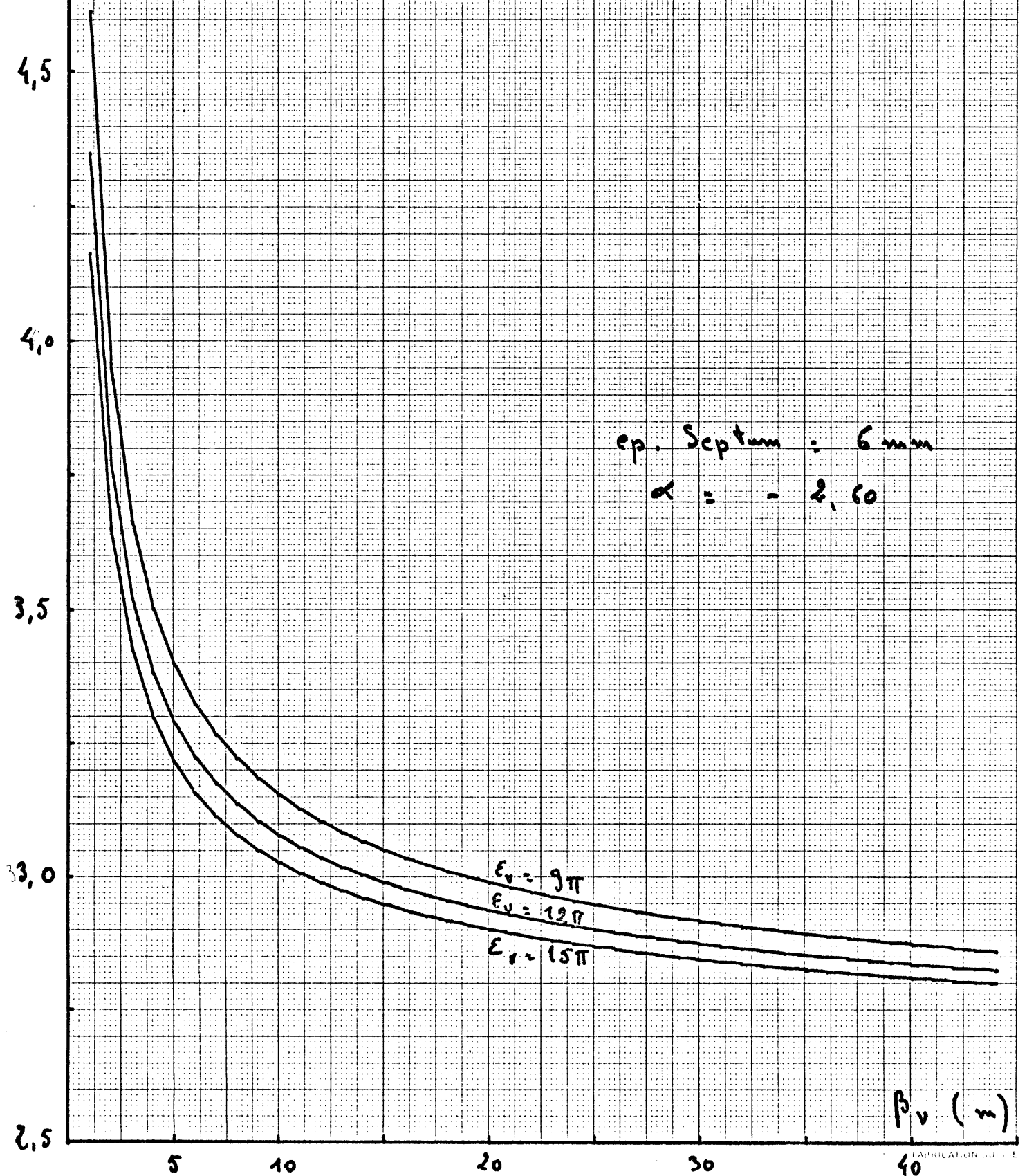


Fig 5 : Evolution avec le paramètre d'adaptation  $\alpha_v$  du faisceau initial du coefficient de blow-up vertical  $\frac{\epsilon_{add}}{\epsilon_{init.}}$

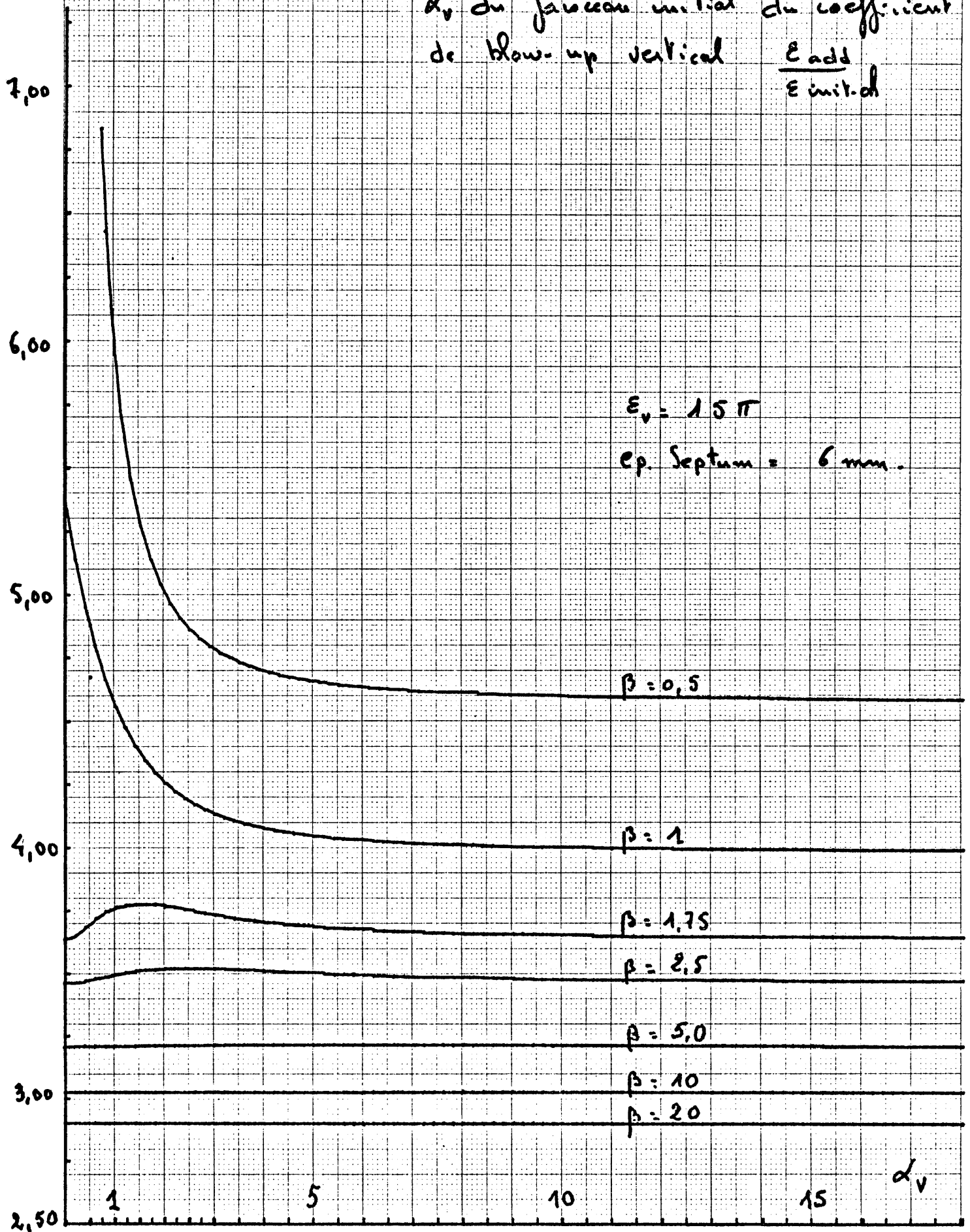




Fig 6 : Représentation dans l'espace de phase vertical  
 des faisceaux initiaux et additionnels  
 au niveau de TSU3 (Cote: 23,4cc  
 sep: 1mm)

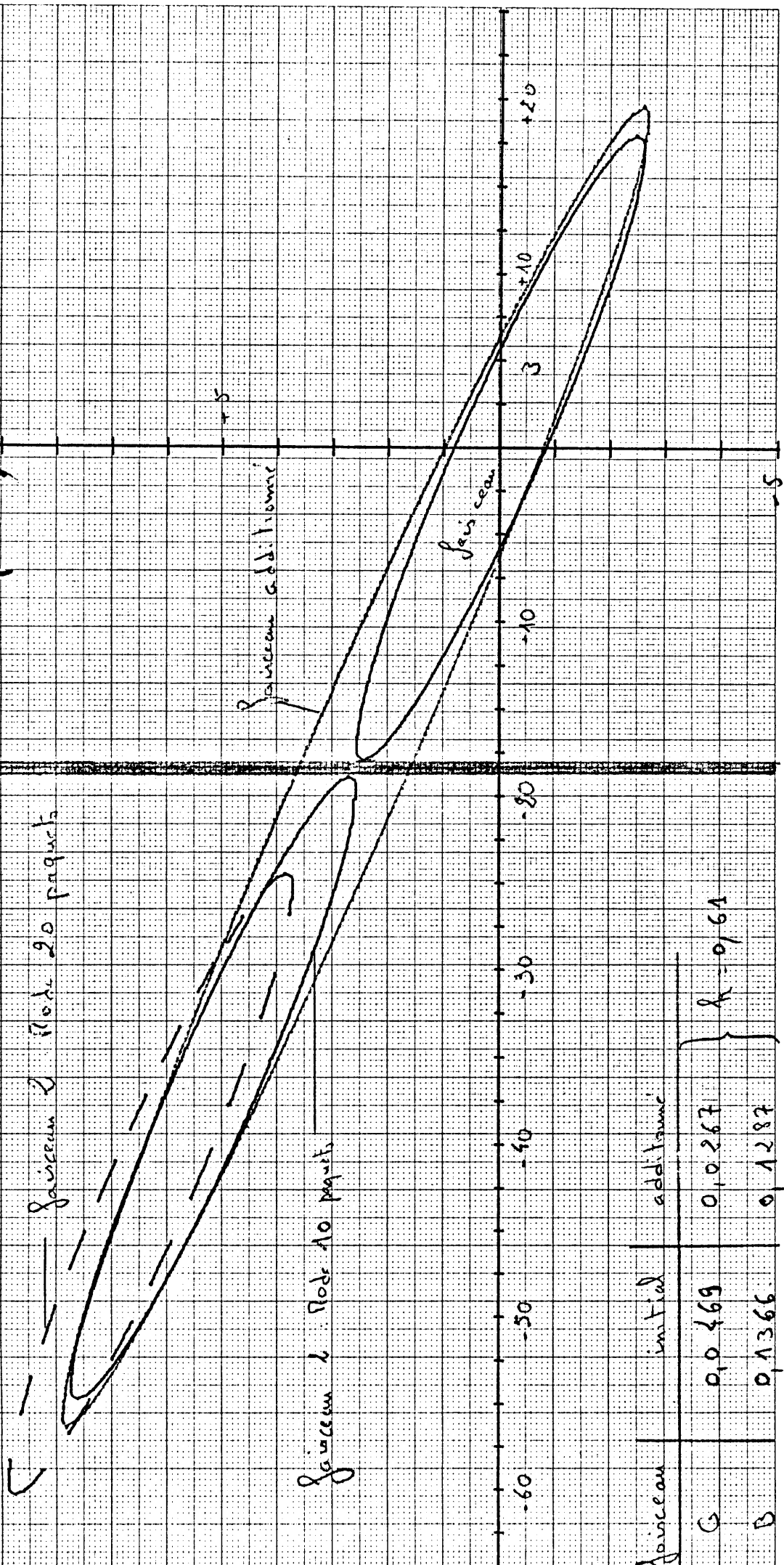
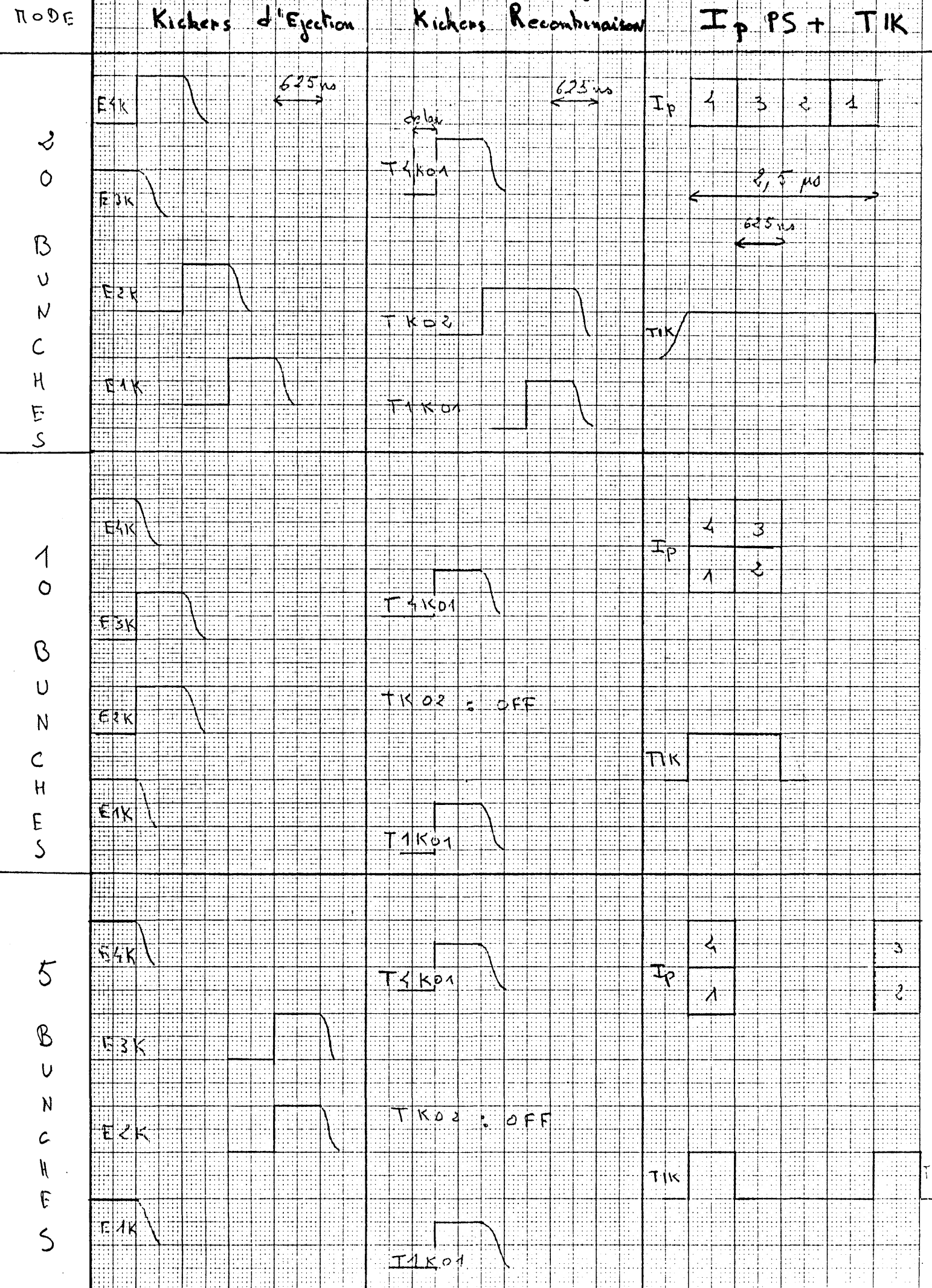




Fig n° 9: Timing Transfert BR - PS



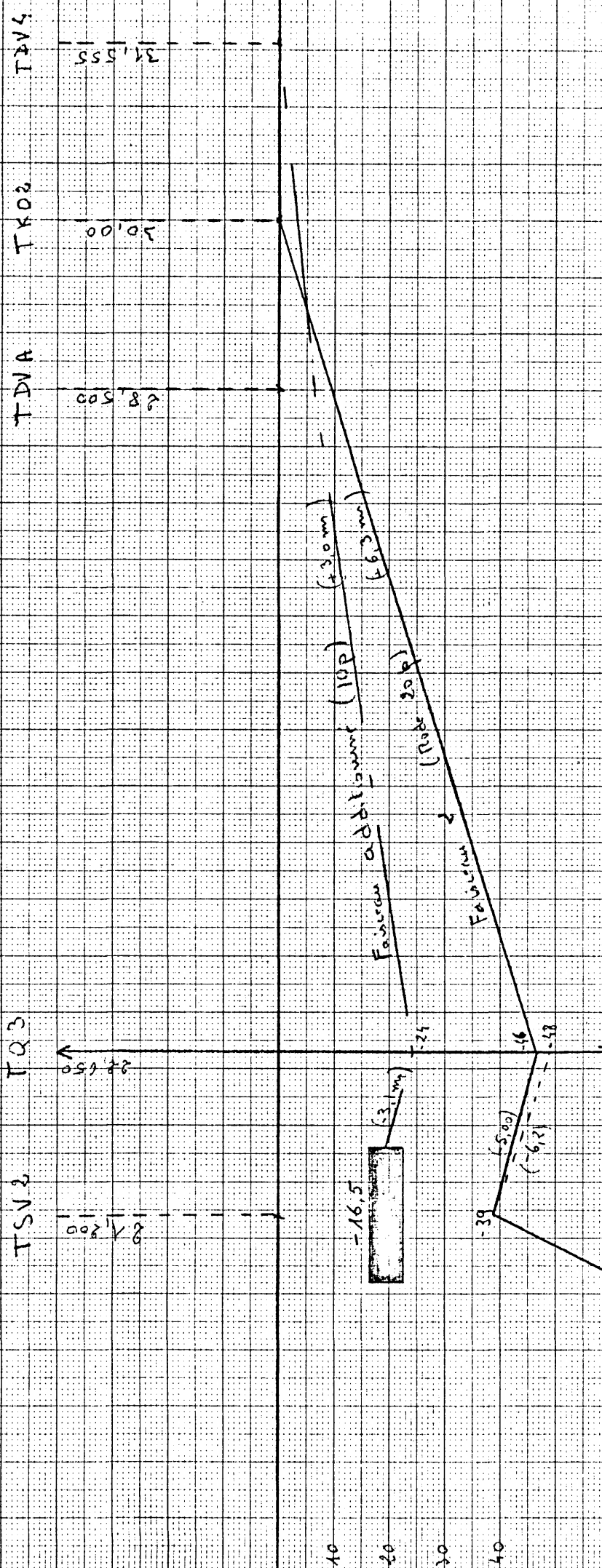


Fig 7 : Trajectoire avec ligne Transporteur { Node 20 paquets ;  
 (E<sub>v</sub> = 15π) Node 10 paquets ;

Node	TSV2	TDVA	TKO2	TSV4
20p	+81,51	0	6,3	0
10p	+82,68	-0,88	0	-2,12