

Attention: la lecture de ce rapport est fort recommandée pour comprendre, mais les chiffres indiqués risquent d'être changeés
entre temps

VS 2/82

LA RECOMBINAISON DES FAISCEAUX ISSUS DES QUATRE ANNEAUX DU CERN PS BOOSTER

Améliorations - Evolution - Mesures

J.P. Delahaye

Table des matières

	Page
1. INTRODUCTION	1
2. LES PROCESSUS NECESSAIRES A LA RECOMBINAISON: DESCRIPTION-EVOLUTION	2
2.1 Synchronisation	2
2.2 Ejection	3
2.3 Recombinaison	4
2.4 Adaptation	5
2.5 Acceptance de la ligne	6
3. INFLUENCE SUR LES QUALITES DE FAISCEAU	6
3.1 Les mécanismes et leurs conséquences	6
3.2 Grossissement dû aux mésalignements	9
3.3 Grossissement transversal par désadaptation entre anneaux	10
3.4 Récapitulatif de l'influence de la recombinaison sur les qualités de faisceau	11
4. LES DIFFERENTS MODES DE RECOMBINAISON	12
4.1 Principes: modes 20, 10 et 5 paquets	13
4.2 Addition verticale: mode 10 paquets	13
4.3 Addition longitudinale: mode 5 paquets	15
5. INSTRUMENTATION	17
5.1 Transformateurs rapides - Ecrans scintillateurs - Electrodes de position	17
5.2 La ligne de mesure à 800 MeV	18
5.3 Principe de la mesure par moniteurs à émission secondaire - Paramètres principaux	19
5.4 Traitement des profils et calcul des paramètres de représentation du faisceau	22
5.5 Présentation des résultats	24
5.6 Mise au point- Précision des résultats	25
6. CONCLUSION	26
Remerciements	27
Bibliographie	28

1. INTRODUCTION

Le CERN PS Booster¹⁾ (PSB) est encore actuellement le seul pré-injecteur à anneaux multiples: 4 accélérateurs indépendants superposés dont les faisceaux de 5 paquets chacun sont recombinaisonnés avant injection dans l'accélérateur principal.

Cette technique présente pourtant l'avantage essentiel d'un accélérateur à cyclage rapide qui est de fournir un faisceau de haute densité car accéléré par petites bouffées à la limite de la charge d'espace, sans en subir l'inconvénient majeur, c'est-à-dire d'imposer un temps d'attente à basse énergie lors du remplissage de l'accélérateur principal.

La multiplication d'anneaux à accélération lente (1 à 2 Hz) mais simultanée implique, il est vrai, une difficulté nouvelle représentée par la recombinaison des faisceaux issus des divers anneaux afin de présenter à l'accélérateur principal un faisceau comme provenant d'un seul et unique pré-injecteur. Ceci impose une ligne très complexe de transport de faisceau²⁻⁴⁾ avec un nombre élevé (fig. 1) d'éléments critiques: 7 aimants à septum et 7 défecteurs rapides en l'espace de 30 mètres.

Aussi, des doutes sérieux avaient été émis lors du projet du PSB, tout d'abord sur la possibilité même des ajustements sans dégradation des qualités de faisceaux, mais aussi sur la fiabilité de l'ensemble.

Par contre, cette technique nouvelle s'avérait d'ores et déjà d'une souplesse très appréciable pour l'injection de l'anneau principal, et des modes différents de recombinaison^{3,4)} améliorant encore les densités dans les espaces longitudinal et horizontal avaient été projetés.

Le but de ce rapport consiste à essayer de transmettre, à ceux qui seraient tentés par la technique des anneaux multiples (fusion, anneaux de stockage pour expériences neutrinos, etc.), l'expérience de leur recombinaison accumulée pendant 6 ans d'opération continue. Il essaie, en outre, de répondre aux espoirs et aux doutes soulevés lors de la construction.

Ainsi, la première partie décrira les divers processus et conditions nécessaires à cette recombinaison ainsi que les transformations qu'elle a dû subir pour s'adapter aux exigences d'un faisceau d'intensité double de celle prévue à l'origine.

La deuxième partie, quant à elle, tentera de chiffrer son influence sur les qualités de faisceaux mettant en lumière les efforts faits pour les améliorer.

Dans la troisième partie, nous montrerons les avantages que l'on a pu tirer de la souplesse engendrée par cette recombinaison pour présenter au PS des faisceaux de densités linéiques et longitudinales supérieures.

La quatrième partie, enfin, présentera l'ensemble de l'instrumentation de la ligne et tout spécialement une ligne de mesure nécessaire aux ajustements, à leur vérification rapide et à une adaptation transversale parfaite au PS.

2. LES PROCESSUS NECESSAIRES A LA RECOMBINAISON: DESCRIPTION-EVOLUTION

Pendant tout le processus d'injection, puis d'accélération, chacun des 4 faisceaux est totalement indépendant. Afin de reconstituer un seul faisceau de 20 paquets à partir de ces 4 faisceaux séparés, diverses tâches doivent être au préalable accomplies:

- a) Egaliser leur énergie et en ajuster le phasage: c'est le rôle de la synchronisation;
- b) Ejecter chacun des faisceaux suivant une séquence synchronisée;
- c) Recombiner ces faisceaux verticalement en séquence pour les amener de manière identique au point d'injection du PS;
- d) Adapter le faisceau à la ligne ainsi qu'à ses diverses fonctions, c'est-à-dire:
 - soit l'injection au PS,
 - soit l'une des mesures de la ligne de mesure à 800 MeV,
 - soit l'envoi au bloc de décharge du Booster ou à un éventuel utilisateur.

2.1 Synchronisation

L'énergie cinétique T du faisceau est donnée par la formule:

$$T = E_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{2\pi Rf}{c} \right)^2}} - 1 \right)$$

où $E_0 = 938,26$ MeV est l'énergie au repos des protons,
R est le rayon moyen de l'orbite fermée d'équilibre (en m),
f est la fréquence de révolution des particules (en Hz),
 $c = 2,997925 \times 10^8$ m/sec est la vitesse de la lumière.

L'égalité d'énergie entre anneaux est ainsi obtenue par l'égalisation simultanée juste avant l'éjection de leur rayon moyen d'orbite et de leur fréquence de révolution avec une précision telle que le grossissement longitudinal après filamentation et dilution dans le PS reste négligeable⁵⁾ (cf. chapitre 3).

$$T = 800 \text{ MeV} \pm 0,08 \text{ MeV} ; \quad R = 25000 \pm 0,25 \text{ mm} \quad f = 8033160 \pm 80 \text{ Hz} .$$

L'égalité des fréquences et leur phasage sont assurés⁶⁾ en imposant aux quatre cavités accélératrices la fréquence d'un même oscillateur de référence tandis que les rayons moyens des orbites sont réglés par ajustement individuel par anneau du champ magnétique des aimants de courbure.

2.2 Ejection

a) Ejection rapide:

Dans chacun des anneaux, l'éjection est du type éjection rapide radiale par "kicker" en période 14L1 et septum en 15L1 séparés par une seule période (fig. 2), le nombre de mailles $n = 16$ et le point de travail horizontal $Q_H = 4,2$ étant tels que l'avance de phase par maille est proche de 90° .

Des "bumpers" rapides (20 msec de période) BE.DHZ SW 10, 20, 30 placés respectivement en 14L4, 15L1, et 15L4 assurent une déformation locale de l'orbite fermée compensant la diminution pendant l'accélération du diamètre du faisceau (moitié à l'éjection de celui à l'injection).

b) Ajustement de l'orbite fermée:

Seul l'ajustement du kicker étant indépendant par anneau, la position et l'angle de leur orbite fermée à l'entrée du septum d'éjection sont centrés par 2 dipôles dans chaque plan $BE_i D_{VT}^{HZ}$ 10, 20.

Leur couplage⁷⁾ est étudié de façon à agir séparément soit sur la position, soit sur l'angle du faisceau à l'éjection. Les alimentations lentes de ces dipôles seront remplacées par des alimentations pulsées en 1980 pour éviter une déformation d'orbite pendant le cycle d'accélération réduit pour le remplissage multiple du SPS. On a alors profité de l'occasion pour déplacer les aimants⁷⁾ en 4L1 et 11L1 afin de minimiser à la fois les déformations résiduelles de l'orbite fermée tout au long de l'anneau et le courant nécessaire à une correction donnée:

$$I = \pm 20 \text{ A} \Rightarrow \begin{cases} \text{plan horizontal} & \Delta X = \pm 10 \text{ mm} & \Delta X' = \pm 1 \text{ mrad} \\ \text{plan vertical} & \Delta Z = \pm 5 \text{ mm} & \Delta Z' = \pm 0,5 \text{ mrad} . \end{cases}$$

c) Séquence d'éjection:

La figure 3a montre l'enchaînement des diverses opérations d'un temps total de ~ 30 msec, synchronisation comprise, sur un palier à 800 MeV.

L'éjection elle-même est déclenchée (fig. 3b) soit par une impulsion BTR indiquant que l'accélérateur principal PS a atteint son champ magnétique d'injection, soit par une impulsion WTR dérivée du PSB indiquant que celui-ci est prêt à l'éjection lorsqu'il est utilisé à d'autres fins que le remplissage du PS.

Chacun des kickers éjection et recombinaison est ensuite synchronisé (fig. 3c) sur la RF de l'oscillateur de synchronisation suivant une séquence telle que chacun des 7 kickers ne nécessite qu'un front de montée rapide (~ 50 nsec) entre 2 paquets (celui de descente pouvant être quelconque).

Anneau 3 - Anneau 4 - Anneau 2 - Anneau 1.

Un délai ajustable surveillé par un "drift stabilizer" (fig. 3c) permet de positionner le front de montée du kicker puis de maintenir cette synchronisation avec une haute précision (± 2 nsec).

2.3 Recombinaison

a) *Principe:*

La recombinaison verticale des faisceaux des 4 anneaux séparés l'un de l'autre de 36 cm s'effectue en 3 étapes sur une distance totale de 30 m (fig. 1):

- recombinaison du faisceau de l'anneau 4 avec celui de l'anneau 3,
- recombinaison du faisceau de l'anneau 1 avec celui de l'anneau 2,
- recombinaison du faisceau de l'anneau 2 avec celui de l'anneau 3,

amenant ainsi les 4 faisceaux au niveau du PS, qui est aussi celui de l'anneau 3 du Booster.

Ces 3 opérations sont en principe identiques et même exactement symétriques pour les 2 premières. Elles sont basées sur la trilogie classique "Bending-Septum-Kicker", le septum (~ 80 mrad) servant à minimiser la déflexion rapide du kicker (~ 7 mrad). Cette déflexion est encore diminuée grâce aux quadrupôles BT.QNO 10 à 30 placés entre septum et kicker et assurant entre eux une avance de phase verticale proche de 90° .

La seule différence entre les 2 premières recombinaisons et la troisième consiste en la présence d'un doublet de quadrupôles à la sortie du premier septum car une focalisation dans les 2 plans était nécessaire alors qu'un seul quadrupôle a été suffisant à la sortie du deuxième septum (cf. 2.4).

b) *Augmentation de l'acceptance par décentrage de quadrupôles:*

Contrairement à une ligne de transfert classique où le faisceau passe au centre des quadrupôles, ici l'un des 2 faisceaux à recombinaison y est obligatoirement décentré et subit ainsi des déflexions parasites.

A l'origine, chacun des quadrupôles était centré sur le niveau de référence (ou niveau de l'anneau 3 et du PS). Cette disposition, la plus simple car ne perturbant qu'un seul faisceau, restreignait néanmoins fortement l'acceptance verticale. En effet, le faisceau à recombinaison était alors extrêmement décentré (fig. 4) alors que l'ouverture disponible était réduite au seul rayon du quadrupôle limitant à 13π l'acceptance verticale de la ligne. En réalignant le centre des quadrupôles sur l'axe reliant septum et kicker (figs. 5 et 6), l'acceptance locale verticale a été triplée en répartissant les déflexions parasites sur les 2 faisceaux, profitant ainsi de l'ouverture totale du quadrupôle. Cette restriction locale d'acceptance était ainsi totalement éliminée.

Un quadrupôle spécial feuilleté de 200 mm de diamètre a même ainsi pu être libéré, remplacé par un quadrupôle standard $\varnothing 150$ mm, et être utilisé pour permettre des impulsions supplémentaires de la ligne de mesure sans autres frais (cf. 2.4b).

Le prix à payer réside en la compensation supplémentaire des déflexions parasites des faisceaux auparavant centrés dans les quadrupôles: six dipôles de correction ont été installés à cet effet (figs. 5 et 6) compliquant encore les trajectoires de recombinaison.

2.4 Adaptation

Le rôle des 13 quadrupôles de la ligne peut être divisé en 3 parties bien distinctes agissant en 3 zones propres:

a) *La zone de recombinaison* (de l'éjection au point de recombinaison)

Trois quadrupôles (fig. 1) dont le réglage fixe n'a été modifié que lors du changement du point de fonctionnement dans les anneaux. Ils ont été spécialement calculés (fig. 7a) afin de:

- adapter les dimensions du faisceau à la chambre à vide;
- minimiser le grossissement du faisceau par fluctuations des kickers en y ajustant un noeud vertical aussi petit que possible (cf. chapitre 3);
- assurer une avance de phase verticale proche de 90° entre septum et kicker pour en minimiser la déflexion.

b) *La ligne de mesure* (du point de recombinaison au bloc de décharge)

Quatre quadrupôles (fig. 1) dont le réglage est variable suivant l'utilisation de la ligne:

- en injection PS pour amener le faisceau au point d'adaptation (fig. 7b);
- en bloc de décharge PSB pour produire un faisceau à la fin de la ligne aussi peu dense et aussi parallèle que possible (fig. 8a);
- en mesures horizontales ou verticales en adaptant au point de mesure, sur le détecteur central, un noeud de faisceau de dimension égale à la moitié de celle du faisceau sur les détecteurs extrêmes (fig. 8b, et c.);
- en expérience au bout de la ligne de mesure (source à neutrons, physique des neutrinos lents, etc.) en ajustant le faisceau aux désirs des utilisateurs.

Afin de permettre une excitation différente de cycle à cycle entre une injection au PS et une autre utilisation du Booster, et profiter ainsi du temps mort laissé par l'accélération du PS jusqu'à son énergie maximale, les 2 premiers quadrupôles communs aux deux lignes ont été modifiés pour permettre des variations au même rythme que l'aimant BT.BHZ 10 (cf. chapitre 5). Pour cela, la ligne a été réorganisée et 2 quadrupôles feuilletés ont été regroupés en ce point après une modification de leurs alimentations.

c) *La zone d'adaptation* (du point d'adaptation au point d'injection PS)

Six quadrupôles (fig. 1) destinés à adapter le faisceau à l'injection PS. Leur réglage a été déterminé en collaboration étroite avec J.P. Riunaud à partir

de l'adaptation mesurée dans la ligne de mesure et reportée au point d'adaptation (cf. chapitre 5) après une détermination expérimentale de la matrice équivalente du champ de fuite à l'injection PS.

2.5 Acceptance de la ligne

Prévue à l'origine pour un faisceau circulant d'émittance verticale 9π grossissant jusqu'à 12π en mode "20 paquets" à l'injection PS, celle-ci a été considérablement augmentée jusqu'à 20π , émittance verticale des faisceaux haute intensité actuels du Booster, qu'elle transmet avec une efficacité de 95%.

Ce résultat a été obtenu principalement:

- a) par le nouveau réglage des quadrupôles adaptant mieux l'enveloppe du faisceau à l'ouverture de la chambre et en minimisant la déflexion du kicker;
- b) en décentrant les quadrupôles dans la zone de recombinaison comme explicité ci-dessus;
- c) en augmentant jusqu'à leur maximum la force des kickers ce qui a demandé, avec un soin tout particulier, des ajustements de leur réglage (Timing-Steepening Line) (cf. chapitre 3).

Les acceptances limites sont ainsi devenues pour le point de fonctionnement actuel⁸⁾ (voir fig. 9):

$$\begin{aligned} A_H &= 50\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad} && \text{limitée par l'ouverture de la chambre,} \\ A_V &= 20\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad} && \text{limitée par la force des kickers de recombinaison,} \\ A_L &= 15 \text{ mrad} && \text{limitée par le temps de montée des kickers.} \end{aligned}$$

3. INFLUENCE SUR LES QUALITES DE FAISCEAU

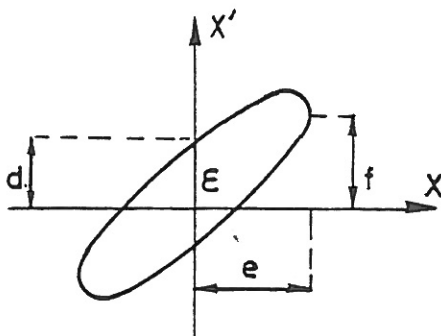
3.1 Les mécanismes et leurs conséquences

Toute différence de position, d'angle ou d'adaptation, dans les plans de phase transversaux et longitudinaux entre soit les paquets provenant d'un même anneau, soit les faisceaux issus d'anneaux différents, provoque après injection dans l'accélérateur principal plusieurs effets néfastes:

- Grossissement du faisceau après filamentation et dilution induisant même des pertes par dépassement d'acceptance;
- Déclenchement d'instabilités multitours transversales ou longitudinales nécessitant des boucles de contre-réaction puissantes ou l'emploi d'octupôles stabilisateurs par amortissement Landau mais élargissant les résonances;
- Apparition même parfois d'instabilités micro-ondes lors de dilution de parties du faisceau à faible dispersion en énergie responsables de pertes en cas d'impédance longitudinale trop élevée de la chambre à vide.

Le premier de ces mécanismes est de loin le plus important; il dégrade les densités du faisceau:

a) Paramètres caractéristiques de l'ellipse représentative du faisceau dans l'espace des phases



ϵ = Emittance = Aire de l'ellipse/ π .

$G = d/e \sim$ rapport d'axe

$B = -f/e \sim$ orientation de l'ellipse

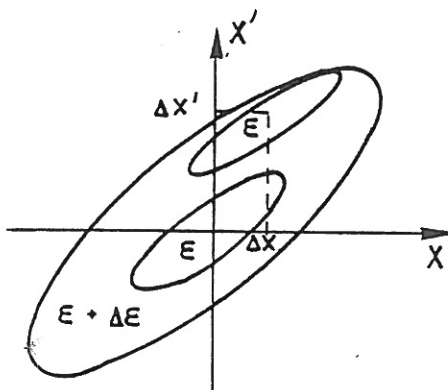
{ Lorsque le faisceau est
proche d'un noeud: $B \sim 0$.

L'intérêt du choix de ces paramètres réside dans le fait que l'action d'un quadrupôle mince se résume à une variation ΔB de l'orientation de l'ellipse, le rapport d'axe G restant inchangé:

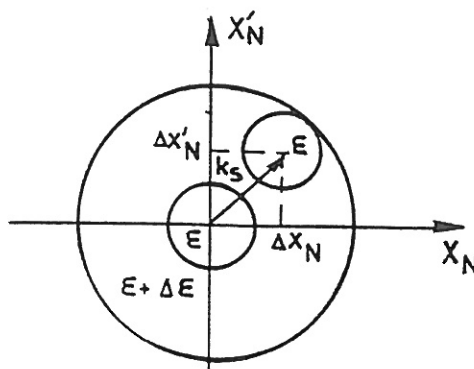
$$\Delta G = 0 \quad \Delta B = K\ell$$

avec K la force focalisante du quadrupôle et ℓ sa longueur.

b) Grossissement après dilution par mésalignement



Espace de phase réel



Espace de phase normalisé

Soit le faisceau de paramètres de représentation ϵ , G et B mésaligné d'une position ΔX et d'un angle $\Delta X'$.

Soit

$$k_s = \sqrt{\Delta X_N^2 + \Delta X'_N{}^2}$$

le vecteur de mésalignement avec

$$\Delta X_N = \sqrt{G} \Delta X \quad \Delta X'_N = (B\Delta X + \Delta X')/\sqrt{G}.$$

Le grossissement après filamentation est donné par la formule

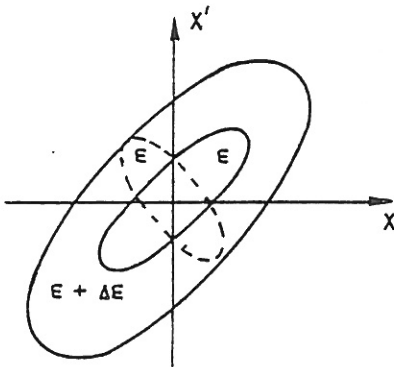
$$\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} = \frac{k_s}{\epsilon} + \frac{2k_s}{\sqrt{\epsilon}}.$$

Pour de faibles erreurs d'alignement: $k_s \ll 1$

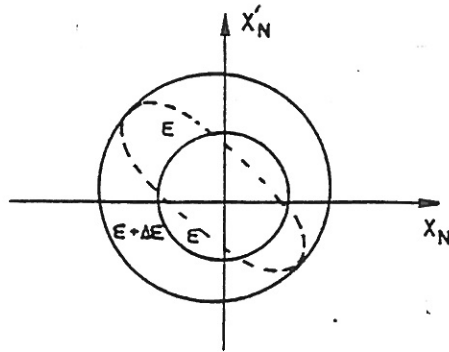
$$\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \sim \frac{2k_s}{\sqrt{\epsilon}} \sim 2 \sqrt{\frac{(B^2 + G^2) \Delta X^2 + \Delta X'^2}{G\epsilon}}.$$

Le grossissement est dépendant de l'adaptation et de l'émittance du faisceau. Dans le Booster où les émittances verticales sont moitié des horizontales, une même erreur sera plus sensible dans le plan vertical.

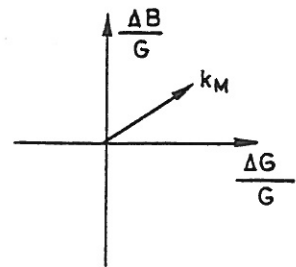
c) Grossissement après dilution par désadaptation



Espace de phase réel



Espace de phase normalisé



Espace de représentation

Soit un faisceau ϵ , G et B désadapté de valeurs ΔG et ΔB et $k_m = \sqrt{\Delta G^2 + \Delta B^2/G^2}$ le vecteur désadaptation.

Le grossissement après dilution est donné par la formule

$$\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} = k_m \left(\frac{k_m}{2} + \sqrt{1 + \frac{k_m^2}{4}} \right).$$

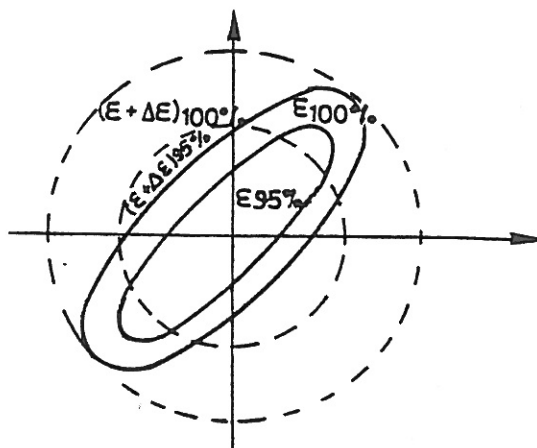
Pour de faibles désadaptations: $k_m \ll 1$

$$\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \sim k_m \sim \sqrt{\frac{\Delta G^2 + \Delta B^2}{G^2}}.$$

Le grossissement n'est, dans ce cas, fonction que de l'adaptation du faisceau. Ainsi, dans les 2 cas de mésalignement ou de désadaptation, il sera possible de minimiser l'influence d'un élément particulièrement critique (par exemple les instabilités d'un kicker) en y adaptant le faisceau en un noeud le plus petit possible (G maximal).

d) *Grossissement de 95% des particules du faisceau*

Les formules précédentes s'appliquent exactement en ce qui concerne la totalité des particules. Ceci est dénommé grossissement géométrique.



Mais ce calcul est très pessimiste, comme le montre le schéma ci-dessus, si l'on s'intéresse uniquement à 95% des particules internes au faisceau. Ceci est souvent le cas en raison des difficultés de détermination des queues de faisceau. Les relations entre les grossissements géométriques et à 95% dépendent fortement⁹⁾ de la distribution des particules et peu de l'origine du grossissement (fig. 10).

Pour des grossissements allant jusqu'à 50% la formule approchée peut être utilisée

$$\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} 95\% = \frac{\Delta \epsilon / \epsilon \text{ géométrique} - 10\%}{2}$$

3.2 Grossissement dû aux mésalignements

a) *Mésalignement transversal d'anneau à anneau*

Deux causes principales: les erreurs de réglage de la recombinaison et l'instabilité des éléments de déflexion.

- Un minimum d'erreur de position $\Delta X = \Delta Z = \pm 0.5 \text{ mm}$ au moins égal au double de la résolution des éléments de mesure est généralement admis au point d'adaptation. Le faisceau nominal horizontal $\epsilon_H = 33\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, $G = 0,105$, $B = 0,016$, subit alors un grossissement géométrique de 6% alors que le faisceau nominal vertical, $\epsilon_V = 12\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, $G = 0,214$, $B = 0,109$ subit lui un grossissement de 15%.

- La stabilité des éléments continus de grande déflexion (~ 80 mrad pour les aimants de courbure et à septum) est poussée suffisamment ($\Delta I/I = \Delta\theta/\theta = 5 \times 10^{-4}$) pour assurer des grossissements négligeables.
- Une telle stabilité est impossible sur les éléments rapides ou kickers (~ 7 mrad). Aussi, dans le plan vertical plus sensible, l'adaptation y a été spécialement étudiée (fig. 7a) pour former un noeud de petit diamètre ~ 9 mm. Une stabilité acceptable de $\pm 2\%$ ne produit alors qu'un grossissement géométrique de 10%.

b) *Mésalignement transversal de paquet à paquet*

Cet effet est causé par la forme imparfaite de l'impulsion des déflecteurs rapides (kickers) tout spécialement pendant leur montée.

La forme des impulsions des 7 kickers a été soigneusement mesurée¹⁰⁾ ainsi que l'effet des paramètres pouvant l'influer¹¹⁾.

Des améliorations significatives ont déjà été obtenues grâce à l'équipe responsable de ces éléments:

- par une meilleure adaptation de la "Steepening line" rendue possible grâce au développement de transformateurs rapides,
- par l'élimination de défauts dans certains câbles,
- par un choix optimal de la synchronisation kicker-paquets (fig. 11).

Des travaux sont encore en cours sur les plus mauvais d'entre eux BT.KFA 20 et BE 2 KFA.

Néanmoins, des erreurs subsistent affectant le ou les 2 premiers paquets de l'anneau correspondant¹¹⁾ et leur effet atteignant parfois 20% est résumé dans le tableau récapitulatif (cf. chapitre 3.5).

3.3 Grossissement transversal par désadaptation entre anneaux

Cet effet est essentiellement causé par les déflexions différentes que subissent les faisceaux pendant leur recombinaison: aucune pour l'anneau 3, mais deux de 80 mrad pour les anneaux 4 et 2 et quatre de 80 mrad pour l'anneau 1.

En effet, chaque dipôle produit, en plus de sa déflexion, un ensemble de focalisations ou défocalisations parasites dû à 2 effets:

a) *Focalisation dans le plan de déflexion par aimant secteur d'angle θ*

Les matrices équivalentes montrent l'importance de cet effet:

$$\text{Matrice équivalente dans le plan de déflexion} \left| \begin{array}{cc} \cos \theta & \rho \sin \theta \\ -\frac{\sin \theta}{\rho} & \cos \theta \end{array} \right| \begin{array}{l} 1^{\text{er}} \text{ ordre} \\ \approx \end{array} \left| \begin{array}{cc} 1 & \ell \\ -\frac{\theta}{\rho} & 1 \end{array} \right| \approx \text{quadrupôle focalisant de focale } \ell/\theta^2$$

Matrice équivalente $\begin{vmatrix} 1 & \ell \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \approx$ espace de glissement de longueur ℓ .
dans le plan perpendiculaire

b) Effet des faces d'entrée de l'aimant

Soit ϵ l'angle d'entrée ou de sortie du faisceau avec la perpendiculaire aux faces de l'aimant. Chacune des faces est équivalente à un quadrupôle mince de focale $\theta \operatorname{tg} \epsilon$ défocalisant dans le plan de déflexion mais focalisant dans le plan perpendiculaire.

c) Cas particulier de l'aimant droit penché

Ainsi, dans le plan de déflexion, les effets parasites sur l'aimant peuvent être assimilés à un quadrupôle focalisant entouré de deux quadrupôles défocalisants: dans le cas particulier de l'aimant droit penché $\epsilon_e = \epsilon_s = \theta/2$, ces deux effets se compensent et l'effet parasite se réduit à un allongement apparent de la longueur de l'aimant de $\ell/(1 - \theta^2/2) \sim 3 \text{ cm}$.

Par contre, dans le plan perpendiculaire, l'effet ne peut être réduit et deux quadrupôles minces focalisants subsistent.

d) Cas de la recombinaison

C'est ce cas particulier de l'aimant droit penché qui a été choisi pour tous les dipôles importants, ce qui explique (voir tableau 1 ci-dessous) que l'effet de désadaptation soit de manière surprenante très faible en vertical (plan de déflexion) et par contre non négligeable en horizontal puisqu'il atteint 30% de grossissement géométrique pour l'anneau 1.

Cet effet a été vérifié dans la ligne de mesure à 800 MeV (cf. chapitre 5).

e) Correction

Une étude avait été entamée pour compenser la désadaptation par des doublets individuels par anneau mais n'a pas été poursuivie car l'effort pour placer ces éléments correcteurs dans le peu de place disponible est apparu démesuré par rapport à la correction recherchée. On s'est alors contenté de moyenniser l'effet en adaptant le faisceau à l'injection PS non pas sur l'adaptation théorique de l'anneau 3 mais sur l'adaptation moyenne de l'ensemble des 4 anneaux mesurée dans la ligne de mesure (voir chapitre 5).

3.4 Récapitulatif de l'influence de la recombinaison sur les qualités de faisceau

Le tableau 1 ci-dessous résume les grossissements géométriques transversaux des effets décrits ci-dessus pour les différents anneaux.

Tableau 1

Plan	HORIZONTAL				VERTICAL			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Anneau								
Mésalignement	6%	6%	6%	6%	15%	15%	15%	15%
Instabilités kickers	10%	10%	10%	10%	20%	10%	0%	10%
Montée kickers	10%/5	10%/5	10%/5	10%/5	10%/5	20%/5	0%	10%/5
Désadaptation	30%	20%	0%	15%	2%	1,5%	0%	1,5%
TOTAL	48%	38%	18%	33%	34%	30%	15%	29%

On y observe un grossissement dans les 2 plans d'autant plus élevé que l'anneau est loin du plan de référence: il est donc naturellement le plus faible dans l'anneau 3 et le plus fort dans l'anneau 1.

Ces valeurs sont très pessimistes car d'une part, les effets ont été ici artificiellement ajoutés alors qu'en fait ils se recouvrent, et d'autre part, la désadaptation a été prise en compte comme si ces effets n'avaient pas été répartis sur les 4 anneaux.

Le tableau 2 ci-dessous montre que si les grossissements moyens géométriques des 4 faisceaux sont voisins de ceux qui avaient été prévus lors du projet, les grossissements réels affectant 95% des particules leur sont néanmoins bien inférieurs.

Tableau 2

Plan	$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}$ prévu	$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}$ moyen géométrique	$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}$ moyen 95% de part.
Horizontal	30%	34%	12%
Vertical	30%	27%	9%
Longitudinal	10%	10%	3%

4. LES DIFFERENTS MODES DE RECOMBINAISON

Comme suggéré dans l'introduction, l'un des avantages des accélérateurs à anneaux multiples réside dans la souplesse engendrée par leur recombinaison. Cette possibilité a été largement exploitée dans le Booster et a permis différents remplissages du PS schématisés sur la figure 11. Le passage en opération d'un mode à l'autre est possible d'un cycle au suivant.

4.1 Principes: modes 20, 10 et 5 paquets

a) *Le mode 20 paquets* (fig. 11a)

C'est le mode usuel d'opération où les quatre faisceaux injectés l'un après l'autre remplissent complètement la circonférence du PS.

b) *Le mode 10 paquets* (fig. 11b)

Prévu dès la construction du Booster²⁻⁴), il permet idéalement de doubler la densité longitudinale du faisceau par addition verticale de paquets issus de 2 anneaux éjectés simultanément. La totalité des particules est alors regroupée en 10 paquets ne remplissant que la moitié du PS.

c) *Le mode 5 paquets*

Projeté initialement pour accroître les performances des ISR¹²), ce mode était fondé sur l'injection en deux tours dans le PS des 10 paquets précédents par addition dans l'espace de phase horizontal formant ainsi 5 paquets composés chacun des 4 paquets individuels provenant chacun d'un anneau Booster différent.

Nécessitant de trop profondes modifications à l'injection PS¹³), cette méthode a été remplacée par une proposition de combinaison dans l'espace de phase longitudinal¹⁴) (fig. 11c).

Les deux groupes de 5 paquets chacun déjà additionnés verticalement sont injectés dans le PS avec des énergies légèrement différentes sur leur orbite fermée correspondante. La différence de fréquence correspondante annihile rapidement leur différence de phase dans l'espace longitudinal. Lorsqu'ils n'occupent plus qu'un seul quart du PS, ils sont capturés simultanément et accélérés jusqu'à haute énergie.

Cette méthode permet ainsi de quadrupler théoriquement le nombre de protons par paquets et d'en augmenter la densité dans les 3 plans. Elle a été développée comme méthode possible pour le remplissage du nouvel anneau d'Accumulation d'Anti-protons (A.A.)¹⁴) en construction, dont la circonférence a été choisie pour cette raison égale à celle du Booster: le faisceau d'antiprotons stockable par impulsion est en effet d'autant plus intense que le nombre de protons incidents sur la cible par temps de révolution dans l'A.A. est élevé. Par contre, ses émittances sont pratiquement indépendantes de celles du faisceau incident.

4.2 Addition verticale: mode 10 paquets

Le faisceau résultant de l'addition verticale est représenté dans l'espace de phase (fig. 12) par l'ellipse circonscrite à celles représentant les 2 faisceaux initiaux. Son émittance est donc au minimum égale à 2,6 fois celle de chacun des faisceaux initiaux¹⁵).

Afin de minimiser cette émittance et la réduire à l'acceptance du PS, une étude¹⁵⁾ de l'influence des divers paramètres a montré:

- que l'épaisseur du septum d'addition ne devrait pas dépasser 1 mm;
- que les ellipses représentatives des 2 faisceaux doivent obligatoirement être alignées suivant un de leurs axes dans l'espace de phase vertical (fig. 12);
- que les paramètres G et B des faisceaux avant addition doivent être minimaux.

a) Localisation de l'addition

E. Weisse¹⁶⁾ avait proposé la sortie du premier septum BT.SMV10 en y prévoyant deux nouveaux double septa.

Nous avons préféré¹⁵⁾ reculer l'addition à la sortie de BT.QN030 (fig. 1) afin de:

- laisser inchangées jusqu'au 2^e septum BT.SMV20 (fig. 1) les trajectoires de la ligne, ce qui facilite la pulsation de cycle à cycle¹⁷⁾,
- simplifier le septum mince à rajouter: un seul double ($\pm 2,6$ mrad) au lieu de 2 doubles ($\pm 5,8$ mrad),
- éviter la recombinaison ultérieure d'un faisceau de grande émittance verticale ce qui aurait obligé à augmenter fortement la déflexion du dernier kicker TK02,
- réaliser cette addition le plus tard possible dans la ligne et en un endroit où les paramètres d'adaptation $G = 0,05$, $B = 0,13$, sont favorables à un gonflement ($\times 2,65$) proche du minimum avec un septum d'épaisseur 1 mm.

b) addition

Les différentes opérations à réaliser sont schématisées sur les figs. 12 et 13:

- Ajuster au niveau du septum d'addition BT.SMV30 les positions des 2 faisceaux de telle façon que leurs enveloppes viennent en lécher les faces supérieure et inférieure. Afin d'éviter une pulsation aux septa et aux aimants massifs, des dipôles feuilletés (BT₂³ DVT40) ont été rajoutés¹⁸⁾;
- Régler les déflexions équivalentes du double septum mince BT.SMV30 pour aligner les faisceaux dans l'espace de phase (fig. 12). Un septum expérimental à déflexion unique avait été installé pour les essais mais sera remplacé dès 1980 par un double d'épaisseur 1 mm¹⁸⁾;
- Réaligner les trajectoires centrales de ce nouveau faisceau additionné sur le niveau de référence du PS grâce à deux autres dipôles feuilletés installés à cet effet.

c) Adaptation

L'addition change fortement¹⁵⁾ l'adaptation du faisceau.

Soit β et γ les paramètres de Twiss de l'ellipse représentative dans l'espace de phase vertical,

$$H = \frac{1}{2} (\beta + \gamma) ,$$

et les indices i relatifs au faisceau initial et r au faisceau résultant.

$$\beta_r = H_r + \sqrt{\frac{H_r^2 - 1}{H_i^2 - 1}} \left(\frac{\beta_i - \gamma_i}{2} \right)$$

$$\gamma_r = H_r - \sqrt{\frac{H_r^2 - 1}{H_i^2 - 1}} \left(\frac{\beta_i - \gamma_i}{2} \right)$$

L'injection dans le PS sans réadaptation du faisceau additionné entraînerait un grossissement vertical de 20% d'autant plus indésirable que l'acceptance verticale du PS est l'élément limitant de ce mode (cf. paragraphe suivant).

Aussi, à partir des mesures relevées par la ligne de mesure, un nouveau réglage des quadrupôles d'adaptation BTP.QN010 à 60 a été calculé par J.P. Riunaud et une réadaptation parfaite a été vérifiée sur les moniteurs à l'injection PS¹⁹⁾.

Leurs variations (± 10 A) minimisées par répartition ont permis pour la modulation de cycle à cycle¹⁸⁾ de conserver les aimants massifs et de limiter à des modifications mineures les changements dans la régulation des alimentations.

d) Essais et résultats

Une fois réalisée l'adaptation au PS du faisceau additionné, la difficulté majeure a consisté en l'injection d'un faisceau haute intensité d'émittance verticale ($15\pi \mu\text{rad}\cdot\text{m} \times 2,65 = 40\pi \mu\text{rad}\cdot\text{m}$) supérieure à celle du PS (30 à $35\pi \mu\text{rad}\cdot\text{m}$).

Un minimum de pertes a été réalisé en rapprochant les faisceaux du septum d'addition perdant ainsi une partie des queues peu peuplées du faisceau mais favorisant le maintien dans le PS de son coeur dense. Un faisceau de $1,5 \times 10^{13}$ ppp a été ainsi présenté au PS dont $1,2 \times 10^{13}$ ppp accéléré, ce qui en accroît de 50% la densité linéique¹⁹⁾.

4.3 Addition longitudinale: mode 5 paquets

Le rôle du Booster en ce mode consiste essentiellement en:

- l'accélération et synchronisation des 2 groupes d'anneaux à des énergies différentes mais avec des fréquences de révolution restant identiques entre Booster et PS;
- leur recombinaison verticale amenant les 2 groupes de 5 paquets chacun au même point d'injection malgré leur différence d'énergie;
- l'addition verticale des faisceaux à même énergie de la même manière que dans le mode précédemment défini.

a) *Différence d'énergie entre anneaux*²⁰⁾

Cette différence Δf doit être au moins supérieure à 4 fois la fréquence synchrotronique f_s ²¹⁾ de façon à ce que, durant le glissement dans le PS, les 2 poisons ne se perturbent pas

$$f_s \sim 1,8 \text{ kHz} \Rightarrow \Delta f \geq 8 \text{ kHz} \Rightarrow \Delta T \geq \pm 3,5 \text{ MeV} .$$

La limite maximum de cette différence provient des acceptances horizontale et longitudinale du PS

$$\Rightarrow \Delta T < \pm 5 \text{ MeV} .$$

Toutes les modifications dans le PSB¹⁸⁾ ont été prévues pour ce ΔT maximum. Afin de permettre un transfert de paquet à poisson, la variation d'énergie est assurée²⁰⁾ par un changement simultané de la fréquence de synchronisation f et de la position radiale R du faisceau par action sur le champ magnétique B de courbure:

$$\frac{\Delta T}{T} = \gamma(\gamma + 1) \left(\frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta R}{R} \right) \quad \Delta T = \pm 5 \text{ MeV}$$

$$\frac{\Delta f}{f} = \left(\frac{1}{1 + \gamma^{-1}} \right) \left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\gamma_{trPS}^2} \right) \frac{\Delta T}{T} \quad \Delta f = \pm 8,7 \text{ kHz}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{\gamma_{trPS}^2 (1 + \gamma^{-1})} \frac{\Delta T}{T} \quad \Delta R = \pm 2,5 \text{ mm}$$

$$\frac{\Delta B}{B} = \left(\frac{1}{1 + \gamma^{-1}} \right) \left(1 - \frac{\gamma_{trBR}^2}{\gamma_{trPS}^2} \right) \frac{\Delta T}{T} \quad \Delta B = \pm 13,2 \text{ gauss}$$

A cause de la simultanéité avec l'addition verticale, les anneaux 2 et 3 auront la même énergie, ainsi que les anneaux 1 et 4, et le groupe injecté le premier (2 + 3) disposera de l'énergie la plus faible.

b) *Recombinaison - Addition*

La différence d'énergie est suffisamment faible pour ne pas nécessiter de variation des gros éléments de déflexion pour la recombinaison.

On a pu montrer²⁰⁾ que le décentrage en position dans les anneaux ainsi que les déflexions parasites dans la recombinaison peuvent être rattrapés à la fois par les dipôles de correction d'orbite à l'éjection $BE_1, DHZ10, 20$ et par les dipôles horizontaux de correction de la recombinaison $BT_1, DHZ10$ que l'on a remplacés à cet effet par des aimants feuilletés.

c) *Injection - Capture - Accélération PS*

Les 2 groupes arrivent ainsi à l'injection PS suivant le même alignement malgré leur différence d'énergie et sont injectés sur leur orbite d'équilibre par pulsation du kicker d'injection¹⁹⁾.

Une manipulation des cavités RF²²⁾ assure alors leur glissement puis l'attrapage et l'accélération jusqu'à haute énergie des 5 paquets résultants.

d) *Essais - Résultats*

La différence d'énergie optimale trouvée expérimentalement $\pm 2,5$ MeV, a confirmé entièrement la théorie de perturbation des poissons²¹⁾.

Un faisceau de $1,15 \times 10^{13}$ ppp a pu être injecté avec seulement 5% de pertes supplémentaires par rapport au mode 10 paquets en remplissant totalement les acceptances transversales du PS, la verticale 35π $\mu\text{rad}\cdot\text{m}$ à cause de l'addition verticale, l'horizontale 100 $\mu\text{rad}\cdot\text{m}$ par suite du schéma d'injection¹⁹⁾.

Malheureusement, des pertes importantes (20 à 30%) sont apparues dès l'attrapage des 5 superpaquets à haute intensité, et le mécanisme n'a pu en être totalement expliqué¹⁹⁾.

Entre-temps, une méthode similaire²²⁾ effectuée à haute énergie (26 GeV/c) avait été développée. Elle a été finalement retenue car elle ne nécessitait pas:

- l'attrapage des superpaquets car l'éjection peut alors être déclenchée dès que les 2 groupes atteignent la même position horizontale;
- le maintien, durant toute l'accélération au PS (y compris le passage à la transition), de paquets remplissant dès l'injection les acceptances transversales et longitudinales.

5. INSTRUMENTATION²³⁾

5.1 Transformateurs rapides - Ecrans scintillateurs - Electrodes de position

a) *Transformateurs rapides BT.TRA-BTP.TRA*²⁴⁾:

La mesure du nombre de protons transférés est effectuée en 2 points (fig. 1):

- en BT.TRA après la recombinaison et par anneau afin de juger de son efficacité de transmission;
- en BTP.TRA à l'entrée du PS pour mesurer l'efficacité d'injection.

L'absence d'un transformateur dans la ligne de mesure est regrettable à chaque fois qu'une expérience de physique y a été installée. Le développement d'un transformateur non standard $\varnothing 200$ mm n'a pu être entrepris et l'essai d'utilisation du signal Σ du moniteur de position BTM.UES10 a échoué par manque de précision.

Un soin tout particulier leur a été apporté afin que la précision ($\pm 1\%$) et la fiabilité de leur mesure leur permettent de servir à la surveillance du faisceau.

b) *Ecrans scintillateurs:*

Dès sa construction, la ligne a été bien équipée en écrans scintillateurs avec observation par caméra en 7 points critiques (fig. 1) dont les septa et kickers. Ces écrans, bien qu'inadéquats pour une mesure précise du centre du faisceau (± 2 mm), sont très utiles pour un réglage grossier de la ligne et une surveillance de la forme du faisceau. Ils ont par contre le désavantage à cette énergie de détruire le faisceau.

c) *Electrodes de position:*

- Une mesure précise ($\pm 0,5$ mm) de la position du centre du faisceau au passage des septa, mais aussi au point d'adaptation, est nécessaire pour éviter et des pertes et des grossissements de faisceau (cf. chapitre 3).
- Des moniteurs électrostatiques ont été choisis à cause de leur réponse à haute fréquence permettant l'observation des paquets individuels.
- A l'origine, un seul ensemble de 4 moniteurs avait été prévu à l'entrée de la recombinaison et quatre électrodes dans la partie adaptation de la ligne pour assurer une bonne injection au PS.
- Deux nouvelles "Pick up" dont la dernière d'un type spécial (\emptyset 200 mm) ont d'abord été rajoutées dans la ligne de mesure pour permettre un ajustement ou des vérifications lors de cycles parasites de l'opération.
- Six autres éléments en 4 "stacks" seront installés¹⁸⁾ en 1980 aux points critiques de la recombinaison à cause d'une part, de l'augmentation de l'intensité et des émittances du faisceau transmis, et d'autre part, de la précision supérieure nécessitée par le mode nouveau de recombinaison en 10 paquets (cf. chapitre 4) exploité pour la production d'antiprotons.

5.2 La ligne de mesure à 800 MeV

Cette ligne²⁵⁻²⁷⁾ prévue par C. Bovet et H. Koziol dès la construction du Booster devait servir à:

- un transfert jusqu'au bloc de décharge comme décharge du faisceau,
- une mesure d'émittance et d'adaptation par moniteurs à émission secondaire,
- une mesure de dispersion d'énergie par spectrométrie.

Bien que l'ensemble de l'appareillage ait été construit pour le démarrage²⁸⁾, seul le transfert au bloc de décharge a été effectivement utilisable immédiatement. Les mesures d'adaptation et de spectrométrie n'ont pu apporter leur concours au "Running in" et aux premières années d'opération essentiellement à cause du peu de temps et de main-d'oeuvre disponible à cette époque pour sa mise au point.

a) *Spectrométrie:*

Cet instrument, par souci d'économie, n'a pas été conçu comme un vrai spectromètre car il ne permet pas l'analyse par paquet de la distribution d'énergie²⁶⁾.

Sa résolution ($\Delta p/p = \pm 10^{-4}$) lui permet cependant la mesure de la différence d'énergie moyenne entre deux anneaux, un des éléments critiques de la recombinaison (cf. chapitre 3). Mais comme la précision de la synchronisation (cf. chapitre 1) est deux fois meilleure ($\Delta p/p = \pm 5 \times 10^{-5}$), et de plus sa vérification est aisée par exemple par l'observation de la position moyenne dans le PS de l'orbite fermée de chacun des anneaux, le "Booster Performance Committee"²⁹⁾ décida en 1976 que l'intérêt de la mesure ne justifiait pas l'effort à entreprendre pour la rendre opérationnelle.

b) *Mesures par moniteurs à émission secondaire (S.E.M.):*

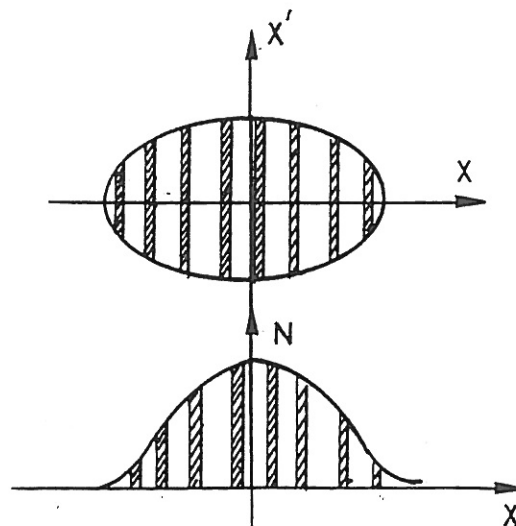
Comme décrit au paragraphe 5.4 ci-dessous, l'analyse des profils relevés par 3 moniteurs permet de déduire²⁵⁾ l'ensemble des caractéristiques transversales du faisceau: alignement, adaptation, émittances.

Des bruits parasites sont venus perturber les signaux collectés de faible niveau délivrés par les moniteurs et l'exploitation en a été retardée. Une étude précise et systématique³⁰⁾ mettant en cause des émissions dues aux kickers a permis de les réduire à $\sim 5\%$ du signal maximum. Pour cela, l'électronique de traitement a été blindée, et les câbles d'alimentation des kickers ont été révisés.

- Cette préparation accomplie, les deux dernières années ont été utilisées à
- redéfinir un traitement du signal³¹⁾ applicable à la fois aux moniteurs installés dans la ligne de mesure et à ceux servant à l'injection PS afin de favoriser la comparaison de leurs résultats;
 - développer un programme de traitement "en ligne" dans un ordinateur spécialement réservé aux études machines;
 - tester la validité des résultats et en corriger les erreurs;
 - adapter à l'opération la présentation des résultats.

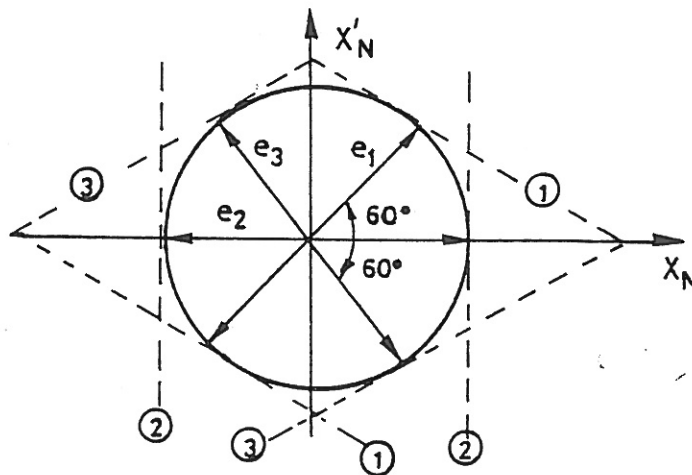
5.3 Principe de la mesure par moniteurs à émission secondaire - Paramètres principaux

a) *Principe:*



Les moniteurs constitués de 20 fils fins ($30 \mu\text{m}$ d'épaisseur) en nickel sont placés perpendiculairement au faisceau qui, les traversant, provoque une émission secondaire strictement proportionnelle au nombre de protons en cette position. La mesure du courant induit est ainsi équivalente à une projection de l'espace des phases à l'espace réel. L'acquisition, puis l'intégration de ce signal, peut actuellement se synchroniser soit sur le faisceau total, soit sur celui issu d'un seul anneau. Un développement ultérieur permettra la mesure d'un paquet prédéterminé. Deux mesures similaires en des points différents permettent de recalculer (cf. 5.4 et 5.5 ci-dessous) les paramètres de l'ellipse de représentation du faisceau dans l'espace de phase (émittance et adaptation) à partir de la matrice de transfert entre ces 3 points et des dimensions de faisceau correspondantes. Notons qu'il serait également possible d'obtenir le même résultat par variation connue de l'adaptation en un seul point de mesure: l'appareillage est alors simplifié mais nécessite des quadrupôles pulsés et ne permet pas une adaptation du détecteur à la mesure, ce qui en limite la précision.

b) *Position des moniteurs - Adaptation idéale:*



Afin d'obtenir la meilleure précision sur la détermination des paramètres de l'ellipse représentation du faisceau dans l'espace de phase, ses dimensions sont déterminées en 3 points équidistants (séparés de 60°) dans l'espace normalisé au détecteur central.

Profitant de l'espace libre (fig. 1) entre les derniers quadrupôles et le mur protégeant le bloc de décharge du faisceau et pour simplifier la matrice de transfert entre les 3 détecteurs, ceux-ci ont été placés dans un espace de glissement de longueur $L = 5 \text{ m}$.

Soit e_1 et e_3 les rayons du faisceau sur les détecteurs 1 et 3,

l_1 et l_3 les distances entre détecteurs extrêmes et détecteur central,

G et B les paramètres d'adaptation sur le détecteur central.

Les images des détecteurs 1 et 3 dans l'espace de phase normalisé au détecteur central ou point de mesure sont des droites d'équation:

$$X'_{1N} = \frac{B\ell_1 + 1}{\ell_1 G} X_{1N} - \frac{e_1}{\ell_1 \sqrt{G}} \quad X'_{3N} = \frac{B\ell_3 - 1}{\ell_3 G} + \frac{e_3}{\ell_3 \sqrt{G}} .$$

Leurs pentes seront respectivement de + et -30° si:

$$\frac{B\ell_1 + 1}{\ell_1 G} = - \frac{B\ell_3 - 1}{\ell_3 G} = \text{tg } 30^\circ = \frac{1}{\sqrt{3}} .$$

Une solution consiste en

$$B = 0 \Rightarrow \ell = \ell_1 = \ell_3 = L/2 \Rightarrow \ell = 2,5 \text{ m} \\ \ell G = \sqrt{3} \Rightarrow G = 0,693 .$$

c) Dimension du faisceau sur les détecteurs:

Après transport le long d'un espace de glissement de longueur ℓ , l'adaptation devient:

$$G_1 = G_3 = \frac{G_2}{1 + \ell^2 G_2^2} = \frac{G_2}{4} = 0,173$$

$$e_1 = e_3 = \sqrt{\epsilon/G_1} = e_2 \sqrt{G_2/G_1} \Rightarrow e_1 = e_3 = 2e_2 .$$

L'adaptation théorique idéale assurant la meilleure précision est donc un noeud sur le détecteur central de dimension égale à la moitié de celle aux détecteurs extrêmes.

Plan	Emittance maximale	Rayon sur détecteurs 1 et 3	Rayon sur détecteur 2
Horizontal	$40\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$	15 mm	7,5 mm
Vertical	$20\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$	11 mm	5,5 m

Afin d'obtenir la meilleure précision tout en utilisant le même traitement de mesures, un nombre identique de fils ($n = 20$) a été choisi sur les 6 détecteurs mais avec des dimensions (2,0 mm) et des espacements (0,4 mm) doubles sur les détecteurs extrêmes. Ce choix laisse alors sur chaque détecteur, de chaque côté du faisceau, 4 fils en horizontal (5 en vertical) pour la détermination des limites du profil, problème le plus délicat de la mesure.

5.4 Traitement des profils et calcul des paramètres de représentation du faisceau

a) *Traitement des profils*

Tenant compte de la haute qualité du signal délivré par le coeur du faisceau et de ses défauts dans les queues où il devient comparable au bruit de fond, la dimension du faisceau n'est déduite qu'après un traitement approprié de chaque profil³¹⁾:

- élimination par lissage des mauvais points de mesure,
- détermination par parabole du sommet de la distribution,
- rejet de la mesure par surveillance des 4 premiers moments du profil,
- intégration du profil de part et d'autre et à partir de ce sommet,
- recherche du niveau de base (ou bruit de fond) basée sur l'assomption d'un bruit "blanc" correspondant à une valeur moyenne constante de son intégration,
- correction du profil en conséquence,
- détermination de la pente à l'origine (centre du faisceau) de cette intégrale ainsi que des dimensions contenant après intégration 50% et 90% des particules en vue d'une comparaison des paramètres au centre, au milieu, et au bord du faisceau.

b) *Calcul de l'alignement*

Les premiers moments ou moyenne des distributions permettent de déterminer avec grande précision la position du centre de charge sur chaque moniteur. On en déduit alors la position et l'angle du faisceau au point de mesure:

$$X = \frac{X_1 + X_3}{2} \quad X' = \text{Arc tg} \frac{X_3 - X_1}{2\ell}$$

avec $\ell = 2,5$ m la distance entre moniteurs.

c) *Calcul de l'adaptation²⁵⁾*

Elle se déduit du transfert des paramètres G , B , ϵ d'un moniteur à l'autre et des dimensions du faisceau e_i mesuré sur chacun des détecteurs

$$e_i = \sqrt{\epsilon/G_i} .$$

Soit $b = e_2^2$, $p = e_3^2 - e_1^2$, $q = e_3^2 + e_1^2$,

$$G = \frac{[8(q - 2b) b - p^2]^{1/2}}{4\ell b} ,$$

$$B = \frac{-p}{4\ell b} .$$

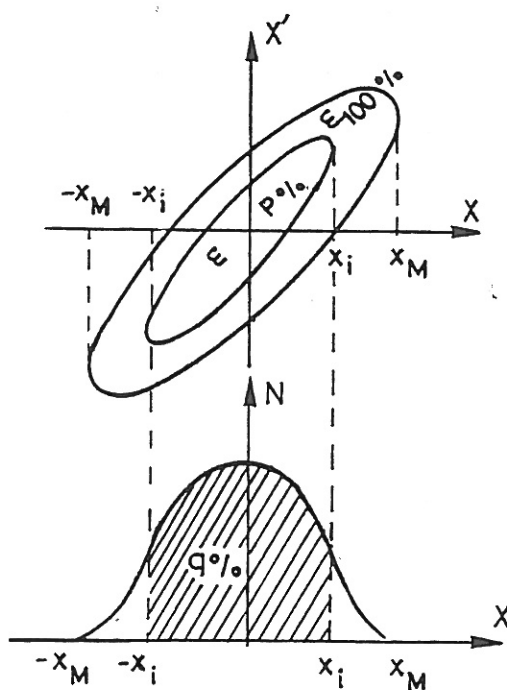
d) Calcul des émittances totales et partielles

L'émittance totale englobant toutes les particules se déduit de la même manière

$$\varepsilon = Gb = \frac{[8(q - 2b) b - p^2]^{1/2}}{4l}$$

La détermination d'une émittance partielle contenant p% de particules nécessite un calcul préliminaire contrairement aux mesures par cibles dans l'anneau qui l'obtiennent directement grâce au mouvement synchrotronique.

En effet, du fait de la projection de l'espace de phase dans l'espace réel, l'intégration du profil déterminé par S.E.M. jusqu'à une dimension égale à celle de l'ellipse contenant p% de particules représente une surface égale à q% de celle du profil complet. La relation entre q et p n'est pas simple et dépend de la distribution des particules. La figure 14 montre la variation de ces 2 valeurs dans le cas d'un profil gaussien où l'on peut vérifier combien la mesure par cible est mieux appropriée à la détermination des queues du faisceau et donc de son émittance totale alors que la mesure par S.E.M. l'est mieux aux mesures en son centre et donc de ses émittances partielles.



Une méthode originale a été mise au point pour retrouver le pourcentage de particules $N(x_i)/N_{tot}$ contenues dans l'ellipse partielle de dimension $\pm x_i$ lorsque l'on ne connaît que la distribution $f(X)$ projetée dans l'espace réel et mesurée par les S.E.M.

Elle est fondée sur une formule³²⁾ donnant la distribution en amplitude $n(R)$ dans l'espace de phase normalisé en fonction du profil projeté $f(X)$:

$$n(R) = -2 \frac{d}{dR} \int_R^{X_{11}} \frac{f(X) X}{\sqrt{X^2 - R^2}} dX$$

où $X = x/\sqrt{G}$ est l'abscisse normalisée

X_M est le rayon normalisé du faisceau total

$$N(X_i) = \int_0^{X_i} n(R) dR = N_{\text{tot}} - 2 \int_{X_i}^{X_M} \frac{f(X) X}{\sqrt{X^2 - X_i^2}} dX .$$

Cette expression a le désavantage de faire appel à une intégration où intervient le profil dans les queues du faisceau mais est par contre rigoureuse quelle que soit la distribution des particules.

e) Calcul des erreurs d'alignement et d'adaptation

Les formules du paragraphe 3.1 ont été utilisées pour calculer directement et les vecteurs d'erreurs et les grossissements correspondants.

5.5 Présentation des résultats³³⁾

Deux types de représentation ont été prévus: l'un, sous forme de "display" (fig. 15) rassemblant les éléments importants est plus orienté vers l'opération, tandis que l'autre, plus complet sous forme de listing (fig. 16) est plus adapté aux études machine.

a) Trois "displays" peuvent être obtenus (fig. 15):

- Le premier (sur option) apparaît après traitement de chacun des moniteurs et permet de vérifier les corrections apportées au profil;
- Le second donne automatiquement pour chacun des anneaux les profils mesurés, les erreurs d'alignement et d'adaptation sous forme numérique et graphique, et l'évolution à l'intérieur du faisceau des densités et émittances partielles. Le graphique portant les vecteurs d'erreurs facilite l'opération en définissant par un cercle la zone correspondant à des grossissements de 20% ce qui est considéré comme limite ultime d'erreurs acceptables.
- Le troisième fait suite aux displays précédents uniquement lorsque la mesure a été faite sur le faisceau complet. Il résume les caractéristiques principales des 4 anneaux ainsi que du faisceau recombinaison pour en faciliter la comparaison.

b) Le "listing" (fig. 16) sur option:

Il permet de garder sur papier les valeurs précédentes ainsi que des mesures secondaires ou intermédiaires: dimension du faisceau, moments des profils, comparaison des caractéristiques au centre et au bord du faisceau, etc.

5.6 Mise au point - Précision des résultats

a) *La vérification des mesures d'alignement* a été facilitée par les 2 moniteurs de position TSU1 et TSU2 dans la même ligne. Une bonne correspondance n'a d'ailleurs été prouvée qu'après réaligement par les géomètres de la position des moniteurs.

$$\Delta X = \pm 0,5 \text{ mm} \quad \Delta X' = \pm 0,1 \text{ mrad} .$$

b) *La mise au point des mesures d'adaptation* a été plus délicate; elle a nécessité de nombreuses études car une divergence très importante ($\Delta G = \pm 0,45$; $\Delta B = \pm 0,012$) est apparue entre théorie et mesures.

La véracité des mesures a pourtant été mise en évidence par variation contrôlée de la force focalisante du dernier quadrupôle de la ligne.

Le même exercice répété de proche en proche sur les quadrupôles successifs a ensuite confirmé la justesse des matrices de transfert correspondantes et tout particulièrement celle des deux gros aimants défecteurs.

L'origine de la discordance a finalement été découverte par la même méthode appliquée aux quadrupôles BT.QN040 et 50 d'un modèle différent (Oerlikon \emptyset 200) pour lequel une erreur de 10% en calibration a pu être prédite et confirmée par les mesures.

Après correction, une concordance parfaite (fig. 17) a pu être établie dans le plan vertical tandis qu'une légère discordance subsistait dans le plan horizontal

$$\begin{aligned} \Delta G_H &= +0,07 & \Delta B_H &= +0,16 & K_M &= 0,24 \\ \Delta G_V &= +0,04 & \Delta B_V &= +0,02 & K_M &= 0,13 \end{aligned}$$

due à un achromatisme imparfait de la ligne et à l'action du champ de fuite à l'éjection.

Ces résultats reportés au point d'adaptation ont alors permis à J.P. Riunaud de recalculer le réglage des quadrupôles d'adaptation BTP.QN010 à 60 pour adapter parfaitement le faisceau au PS en ses différents modes d'injection (20, 10 ou 5 paquets). Le réglage pour le mode opérationnel n'avait au préalable pu être déterminé qu'expérimentalement au cours de nombreuses séances d'essais à cause de l'erreur alors inconnue dans la calibration de BT-QN040 et 50.

c) *Les mesures d'émittances* ont été comparées à celles effectuées dans l'anneau avec les cibles juste avant l'éjection. Une vérification plus précise des émittances partielles pourrait être entreprise par comparaison avec le Beamscope maintenant que celui-ci est devenu opérationnel.

Sauf en ce qui concerne les faisceaux horizontal de l'anneau 1 et vertical de l'anneau 2, la fig. 15 montre une correspondance de

$$\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} = \pm 10\%$$

jusqu'à des émittances partielles de 85% une fois enlevée dans le plan horizontal la contribution due au mouvement synchrotronique. La cible horizontale de l'anneau 1 s'est d'ailleurs par la suite révélée entachée d'erreurs.

En conclusion, la mesure d'émittance partielle par la méthode d'intégration préconisée au chapitre 5.4 s'avère correcte au centre du faisceau mais devient imprécise et même inadéquate pour la détermination de l'émittance totale.

6. CONCLUSION

Les craintes exprimées lors de la construction du Booster selon lesquelles la complexité de la recombinaison viendrait gacher les qualités de cet accélérateur à anneaux multiples n'ont donc pas été vérifiées.

En effet, son réglage bien que délicat au départ possède maintenant des valeurs stables et reproductibles que les opérateurs assistés par l'ordinateur n'ont aucune difficulté à retrouver eux-mêmes.

De plus, les nombreuses améliorations apportées ont permis d'assurer un transfert au PS pratiquement sans pertes de faisceaux haute intensité jusqu'à 2×10^{13} ppp en l'entachant d'un grossissement inférieur à celui qui avait été originellement prévu et avec une fiabilité très élevée.

En outre, la souplesse du processus a permis des modes nouveaux de recombinaison des anneaux, accroissant encore et la densité linéique du faisceau, et celle dans l'espace de phase longitudinal. L'un de ces modes, tout au moins, sera utilisé dès 1980 en modulation d'un cycle à l'autre pour la production d'anti-protons.

On tirera comme dernière leçon de cette expérience qu'une instrumentation riche, assistée d'un ordinateur approprié, s'est révélée indispensable à son réglage fin ainsi qu'à sa surveillance pendant des "runs" de plus en plus longs: la ligne de mesure à 800 MeV permet dès lors une détermination rapide, précise et complète de l'ensemble des caractéristiques transversales du faisceau sur des cycles du PSB inutilisés par l'opération. Par son biais, des faisceaux expérimentaux parfaitement adaptés ont pu être fournis aux éventuels physiciens intéressés par le faisceau à 800 MeV du Booster.

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma gratitude, spécialement à K.H. Reich qui a eu le "courage" de me confier cette tâche et qui a su me prodiguer les encouragements et les moyens pour la mener à bien. Je n'oublierai ni K. Schindl pour les mille enseignements dont il m'a généreusement fait profiter, ni J.P. Riunaud pour sa collaboration étroite pour tout ce qui concernait le PS. Je remercierai finalement les équipes "Aimants", "Alimentation", "Logiciel" et tout particulièrement "Kickers" et "Electroniques" du PSB pour leurs nombreuses contributions sans lesquelles aucune amélioration n'aurait été possible.

Distribution (Abstract):

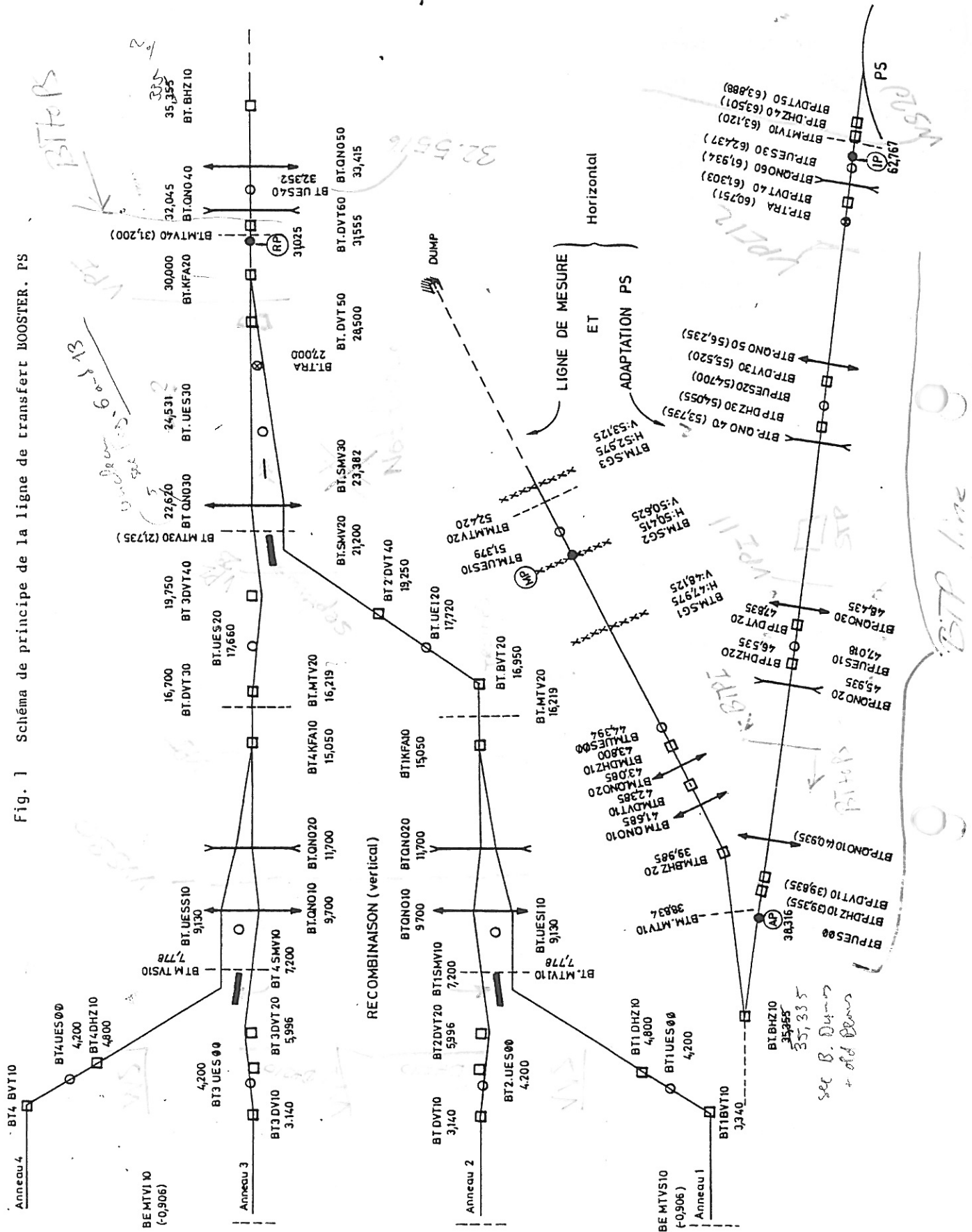
Personnel scientifique ISR, PS, SPS.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) The PSB staff (reported by K.H. Reich), The CERN PS Booster, a flexible and reliable injector, Proc. 4th All-Union Accelerator Conf., Dubna, 1976 (Acad. of Sciences, Moscou, 1977), vol. 2, p. 221-225, et CERN/PS/BR/76-14 (1976).
- 2) A.E. Ball and R. Billinge, Beam optics for the transfer from the Booster to the PS, MPS/Int. MA/B 67-24 (1967).
- 3) C. Bovet, Further thoughts on the transfer to PS, SI/Note DL 68-6 (1968).
- 4) E. Weisse, Optics for the Booster-PS transfer system, SI/Note MAE/69-5 (1969).
- 5) J.P. Delahaye, Ejection et recombinaison des quatre anneaux Booster, MPS/BR Note 76-9 (1976).
- 6) G. Gelato and L. Magnani, Better dynamic closed loop control of the PSB-RF accelerating system, IEEE Trans. Nucl. Science, vol. NS-24 No. 3, June 1977, p. 1536, et CERN/PS/BR 77-7 (1977).
- 7) J.P. Delahaye, Ajustement individuel par anneau de l'orbite fermée à l'éjection, PS/BR Note/77-19 (1977).
- 8) J.P. Delahaye, Les limitations de faisceau introduites par la ligne de transfert BR-PS, MPS/BR Note 75-27 (1975).
- 9) K. Schindl, Increase of 95% emittance due to missteering and mismatch, MPS/BR Note/75-25 (1975).
- 10) M. Le Gras, C. Metzger and D. Williams, Examination of ejection and recombination kicker performances, MPS/BR Note 75-21 (1975).
- 11) J.P. Delahaye, Les kickers éjection et recombinaison du Booster, Etat - Améliorations, PS/BR Note/79-10 (1979).
- 12) C. Bovet and E. Keil, ISR performance related to PS injection schemes, MPS/Int. DL/B 67-5 (1967), ISR/TH/69-76 (1969), SI/Int. DL/69-12 (1969).
- 13) P. Lefèvre, Remarques sur les différents modes d'injection dans le PS, PS/DL Note/76-15 (1976).
- 14) R. Billinge and M.C. Crowley-Milling, The CERN proton-antiproton colliding beam facilities, IEEE Trans. Nucl. Science, vol. NS-26, No. 3, June 1979, p. 2974, et CERN/PS/AA 78-3 (1978).
- 15) J.P. Delahaye, Etude des modifications de la ligne de transfert BR-PS pour assurer la recombinaison à 10 ou 5 paquets, PS/BR Note 76-20 (1976).
- 16) E. Weisse, Optics of the Booster-CPS transfer system - Specifications of magnetic elements, SI/Note MAE/69-5 (1969).
- 17) J.P. Delahaye, La recombinaison verticale en mode 10 paquets modulable de cycle à cycle, CERN/PS/BR/78-5 (1978).
- 18) J.P. Delahaye, Les modifications du Booster pour l'anneau A.A., CERN/PS/BR 78-12 (1978).

- 19) J.P. Delahaye, P. Lefèvre and J.P. Riinaud, Improved recombination of the 20 PSB bunches and merging into 5 dense bunches in the CERN Proton Synchrotron, IEEE Trans. Nucl. Science, vol. NS26 No. 3, June 1979, p. 3565, and CERN/PS/BR/DL/OP 79-7 (1979).
- 20) J.P. Delahaye and G. Gelato, Le faisceau du PS Booster à 2 énergies (mode 5 paquets) modulable de cycle à cycle, PS/BR Note/78-9 (1978).
- 21) F.E. Mills, Stability of phase oscillations under two applied frequencies, BNL Int. Report AADD 176 (1971) and correction by W. Hardt.
- 22) D. Boussard and Y. Mizumachi, Production of beams with high line density by azimuthal combination of bunches in a synchrotron, IEEE Trans., Nucl. Science vol. NS26 No. 3, June 1979, p. 3623.
- 23) V. Agoritsas et al., PSB beam observation and measurements, CERN/PS/BR/CO/EI/MU/OP 79-22 (1979).
- 24) S. Battisti and E. Marcarini, Transformateurs de mesure des faisceaux PSB et PS, PS/CO/Note 79-12 (1979).
- 25) C. Metzger, Mesures des émittances et du centrage des faisceaux dans la ligne de mesure 800 MeV du PSB, CERN/SI/Int. DL/69-10 (1969).
- 26) C. Metzger, Optics of the 800 MeV spectrometer, CERN/SI/Int DL/69-9 (1969).
- 27) A. Daneels and C. Metzger, Software for the 800 MeV measurement line, SI/Note DL/70-16 (1970).
- 28) G. Baribaud and C. Metzger, The 800 MeV measurement line of the CERN PS Booster, CERN/MPS/Int. BR/73-2 (1973).
- 29) H. Koziol, Minutes of meeting No. 8 of Booster Performance Committee, PS/Mi-BR/76-39 (1976).
- 30) C. Metzger, Ligne de mesure 800 MeV du PSB, résultats de tests, CERN/MPS/BR Note 75-29 (1975).
- 31) P. Lefèvre, communication personnelle.
- 32) P.W. Krempf, The Abel-type integral transformation with the kernel $(t^2 - x^2)^{-1/2}$ and its application to density distribution of particle beams, MPS/Int. BR/74-1 (1974).
- 33) J.P. Delahaye, Utilisation en opération de la ligne de mesure 800 MeV, PS/BR Note/78-7 (1978).

Fig. 1 Schéma de principe de la ligne de transfert BOOSTER. PS



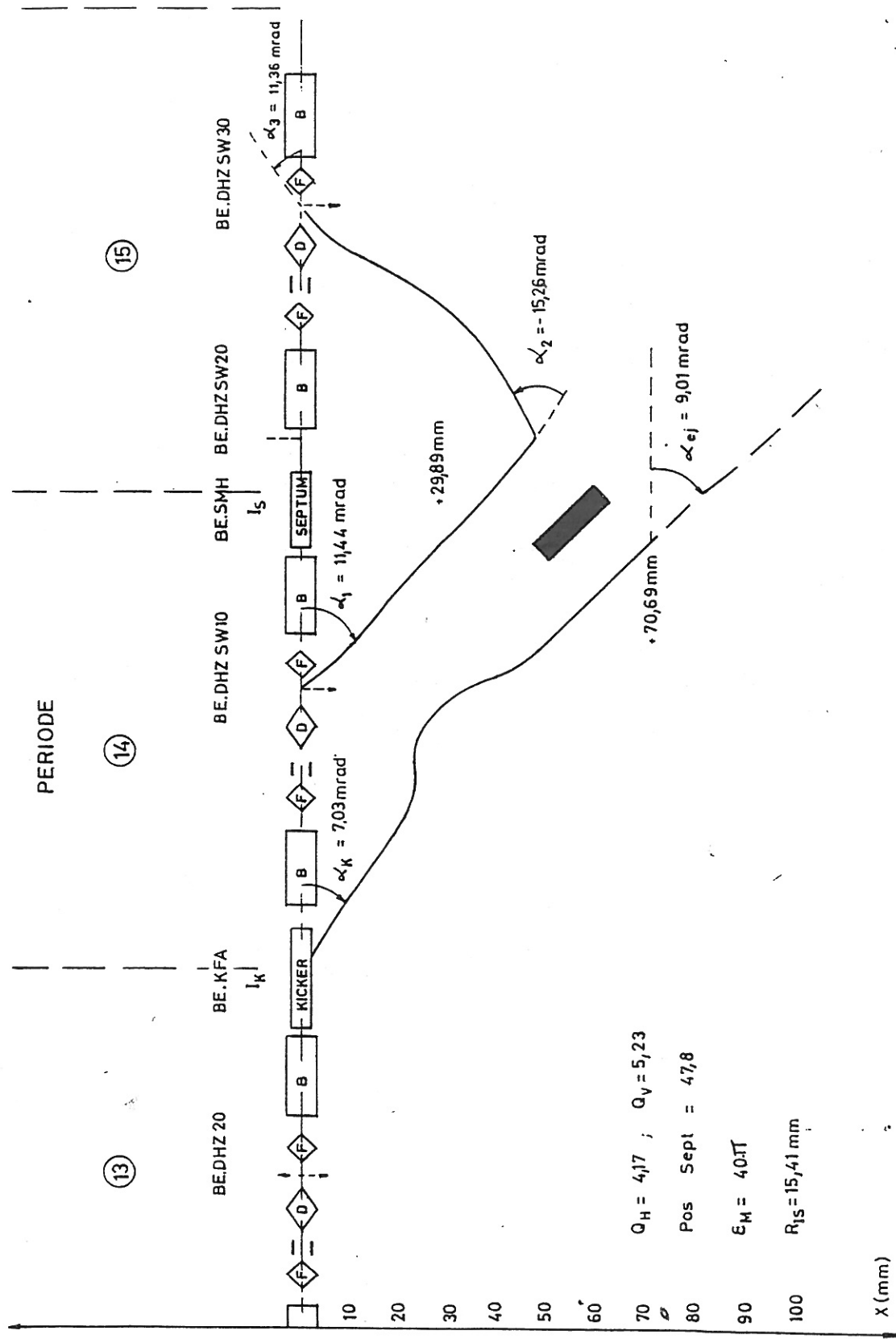
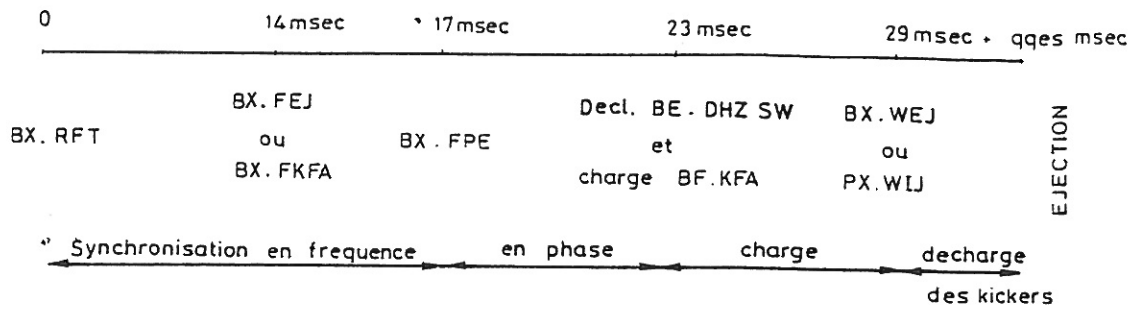
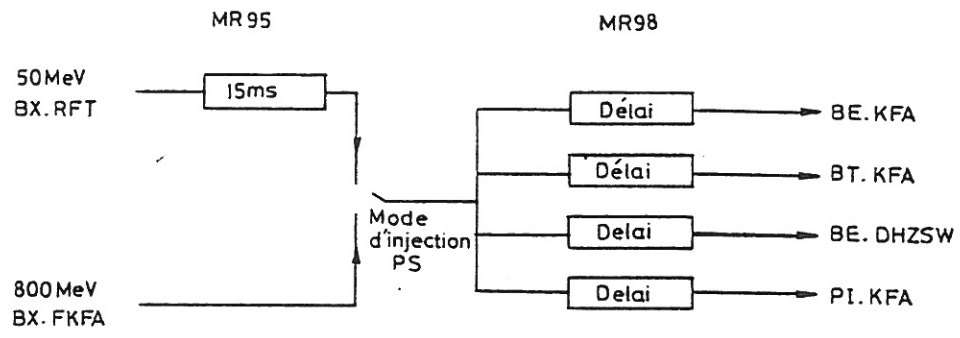


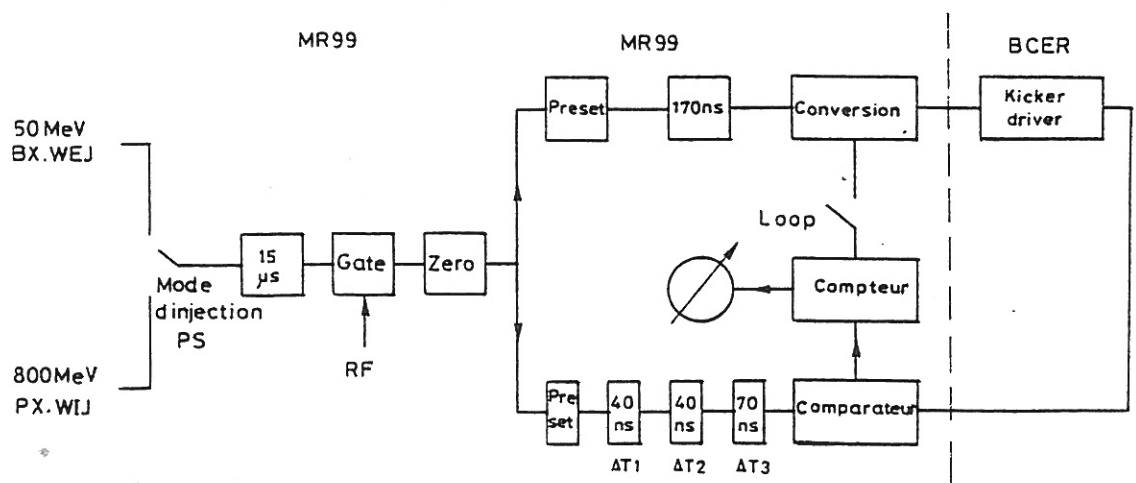
Fig. 2 Schéma d'éjection de faisceaux d'émission horizontale 40π mm-mrad



a) Sequence des operations de synchronisation et éjection



b) Charge des kickers et déclenchement des Bumpers



c) Synchronisation des kickers d'Ejection et Recombinaison

Fig. 3 Principe du timing de l'éjection

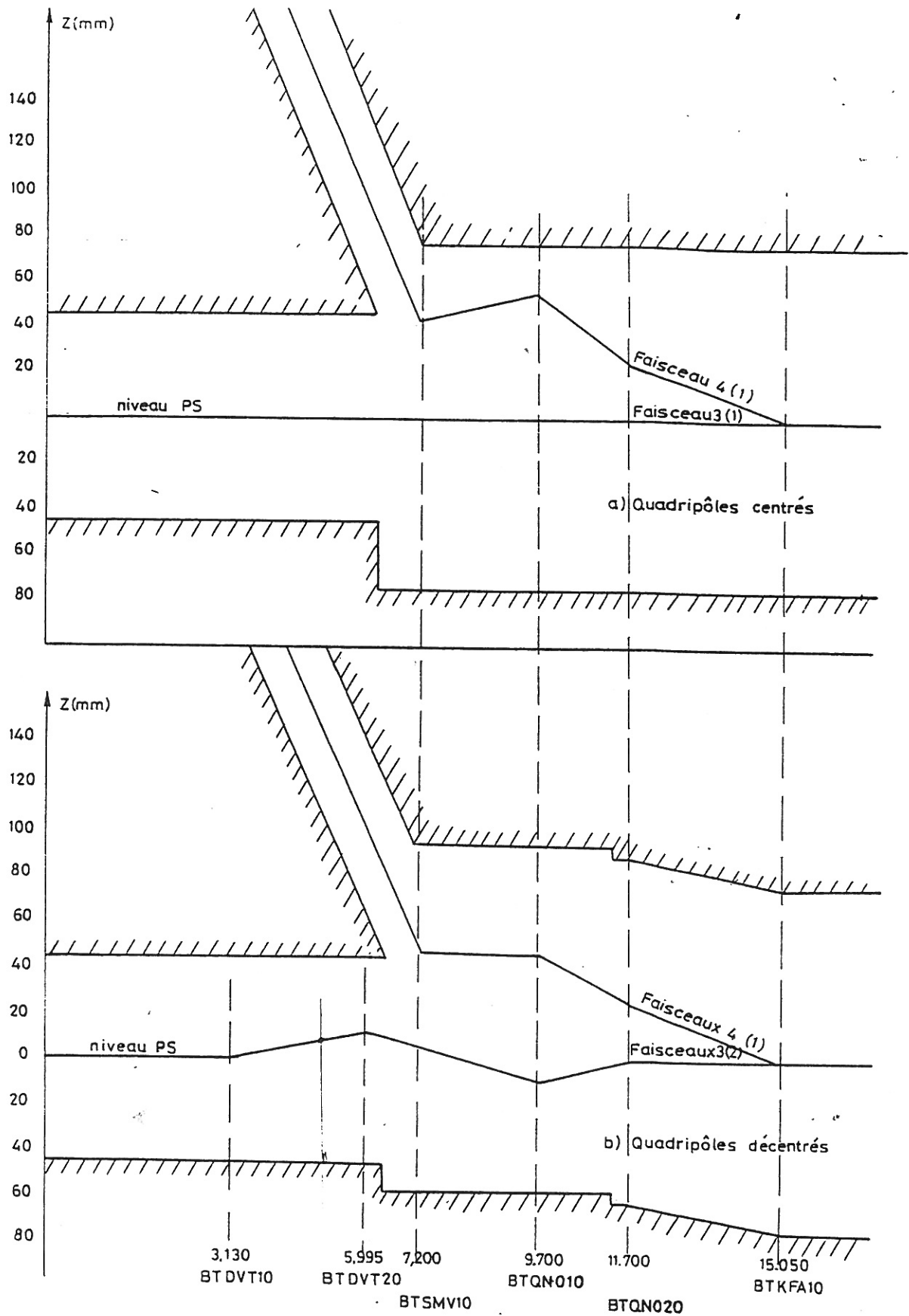


Fig. 4 Triplement de l'acceptance verticale en BTQN010 par décentrage des quadripôles BTQN010 de 18,85 mm et BTQN020 de 13,65 mm

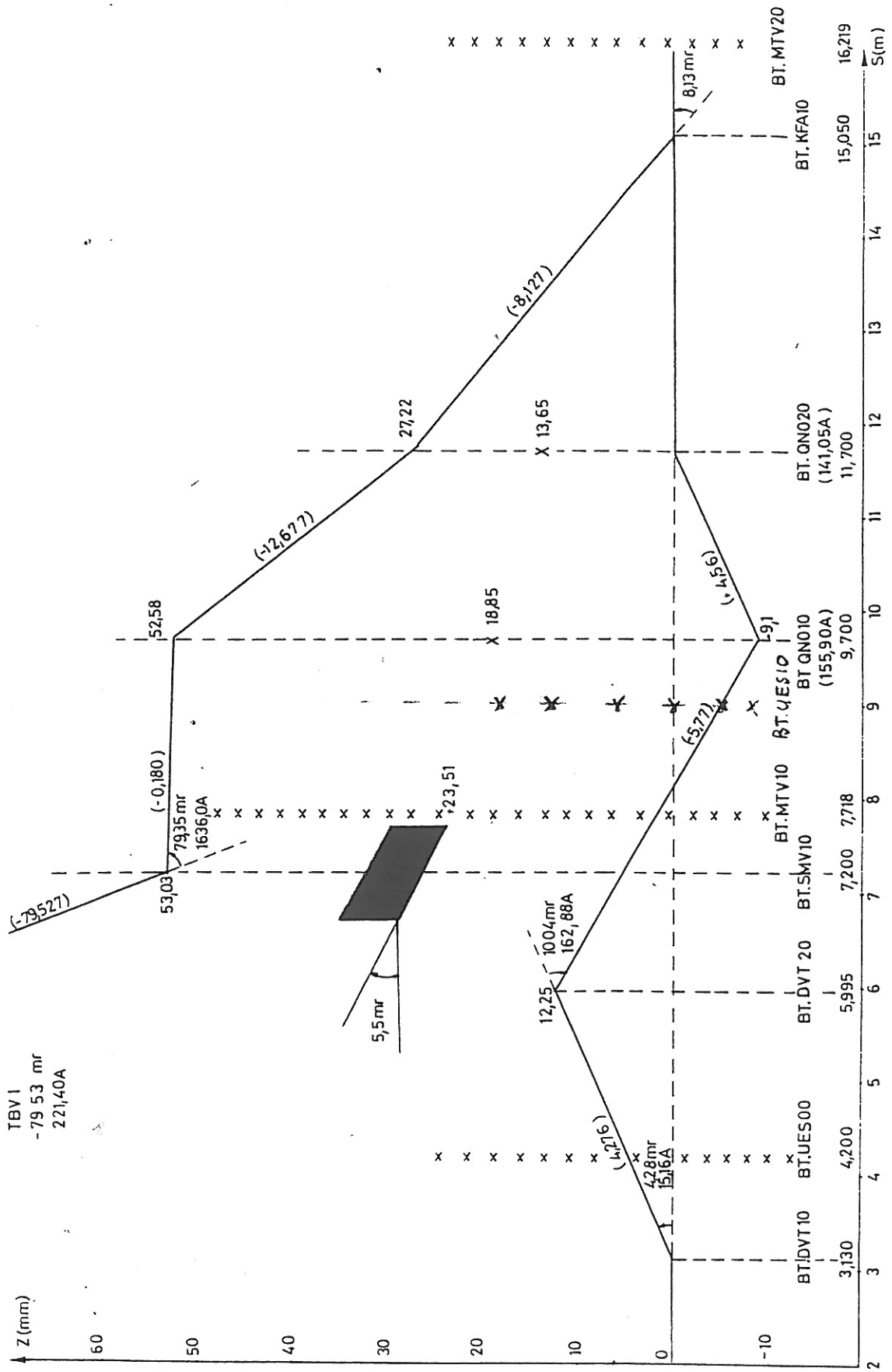
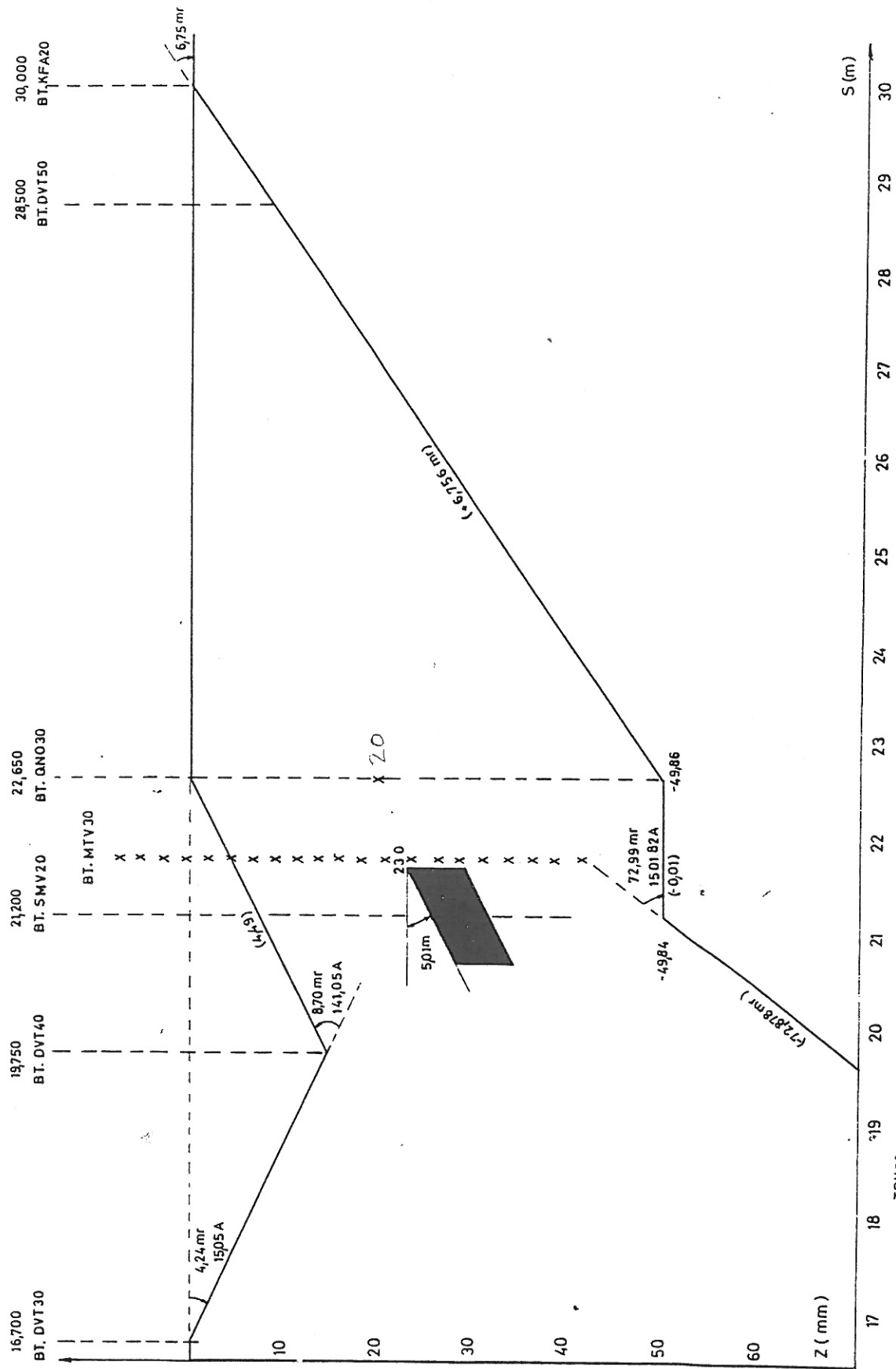
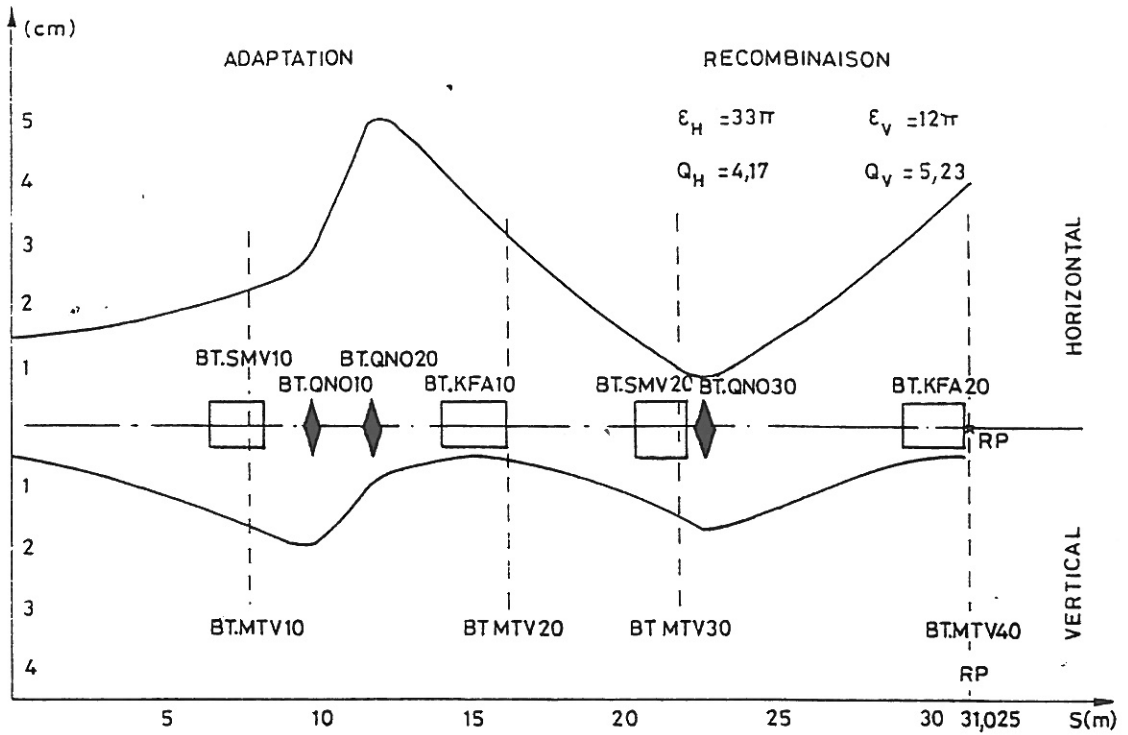


Fig. 5 Schéma de recombinaison des faisceaux 4 (ou 1) sur le faisceau 3 (ou 2). L'émission verticale 20F.



TBV02
92,978 mr ↔ 194,09 A

Fig. 6 Schéma de recombinaison du faisceau 2 sur l'anneau 3 d'émission verticale 20π mm-mrad



	TQ1	TQ2	TQ3	TSQ2	TQ4	TQ5	TQ6	TQ7	TQ8	TQ9	TQ10
Kl (m ⁻¹)	-0,3693	0,3342	-0,2548	0	0,1965	-0,1353	0,2994	-0,2384	0,3880	-0,2852	0,3018
I (A)	155,90	141,05	94,20	0	82,95	-57,10	126,39	100,64	163,80	120,40	127,40

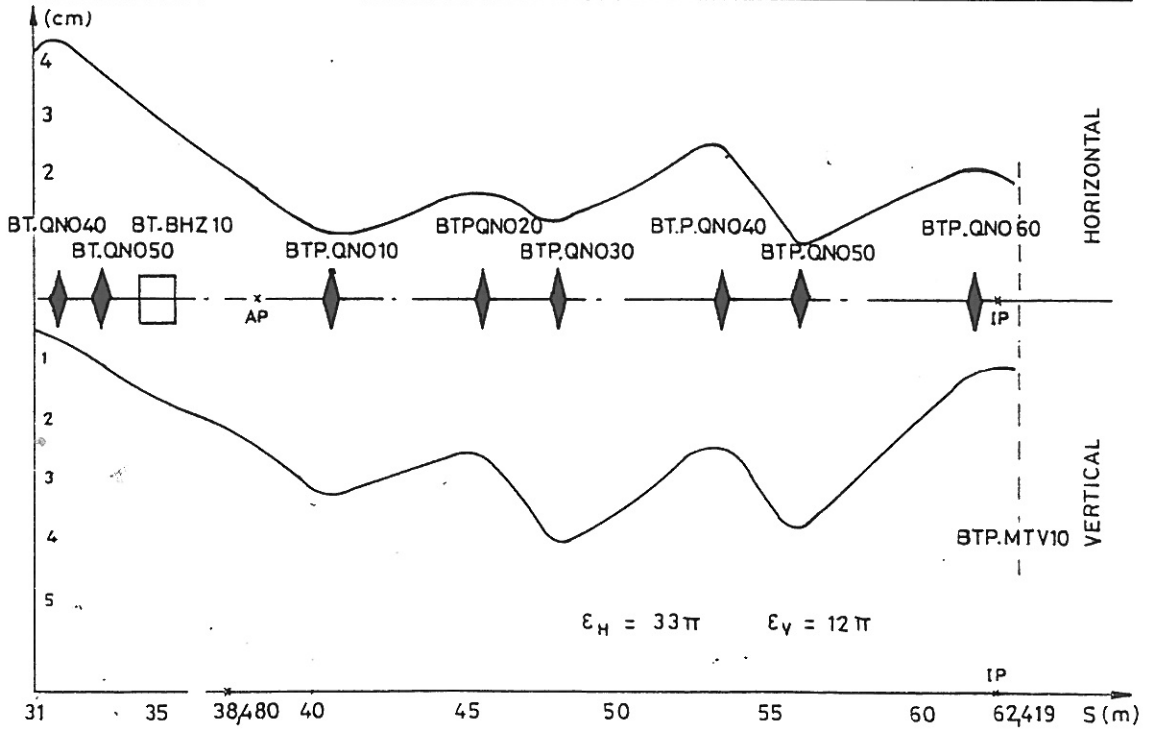


Fig. 7 a) Adaptation - Recombinaison
b) Adaptation injection PS.

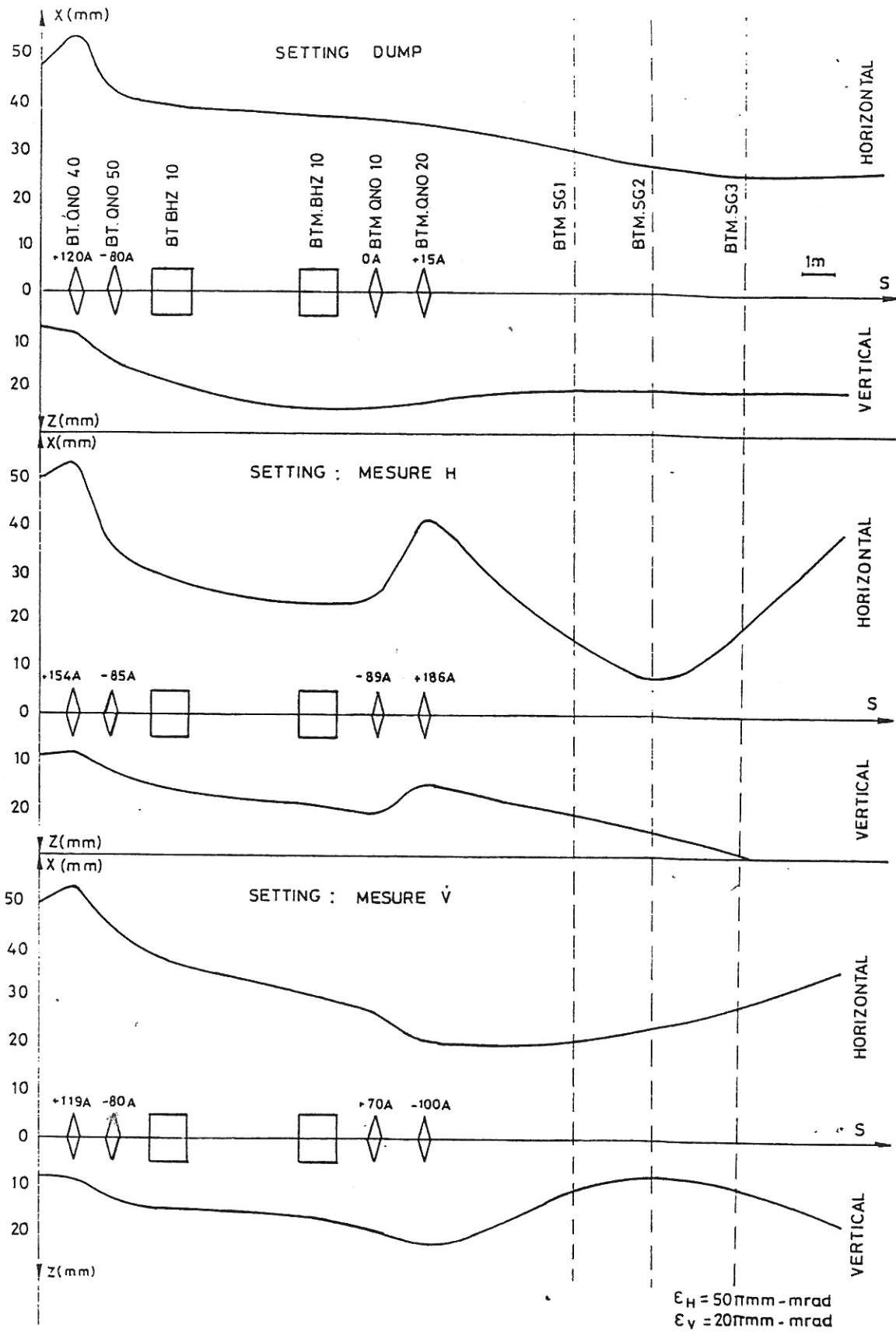


Fig. 8 Envelopes du faisceau dans la ligne de mesure

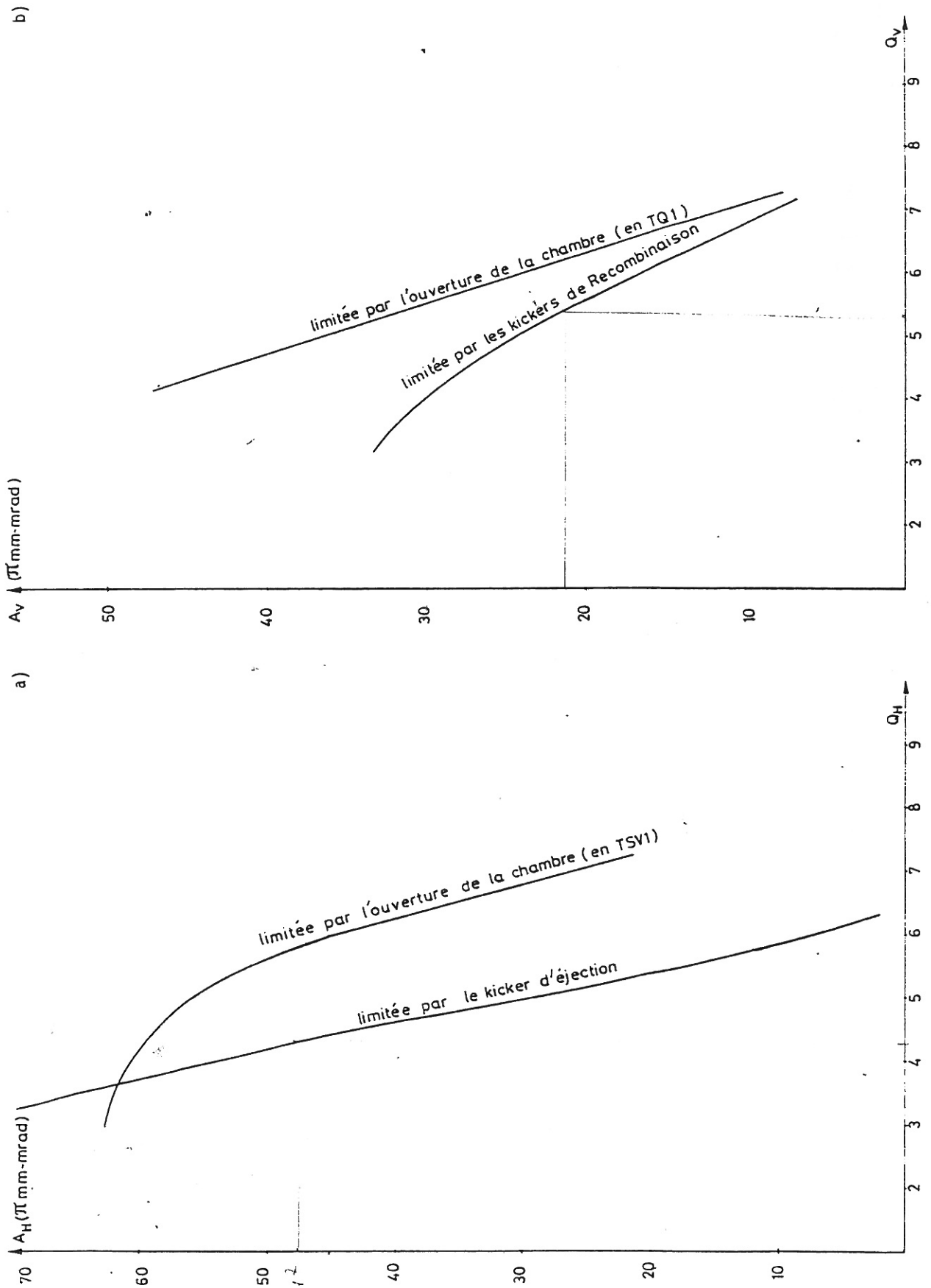


Fig. 9 a) Variation avec Q_H de l'acceptance horizontale de la recombinaison $Q_V = 6,20$.
 b) Variation avec Q_V de l'acceptance verticale de la ligne de recombinaison $Q_H = 4,20$.

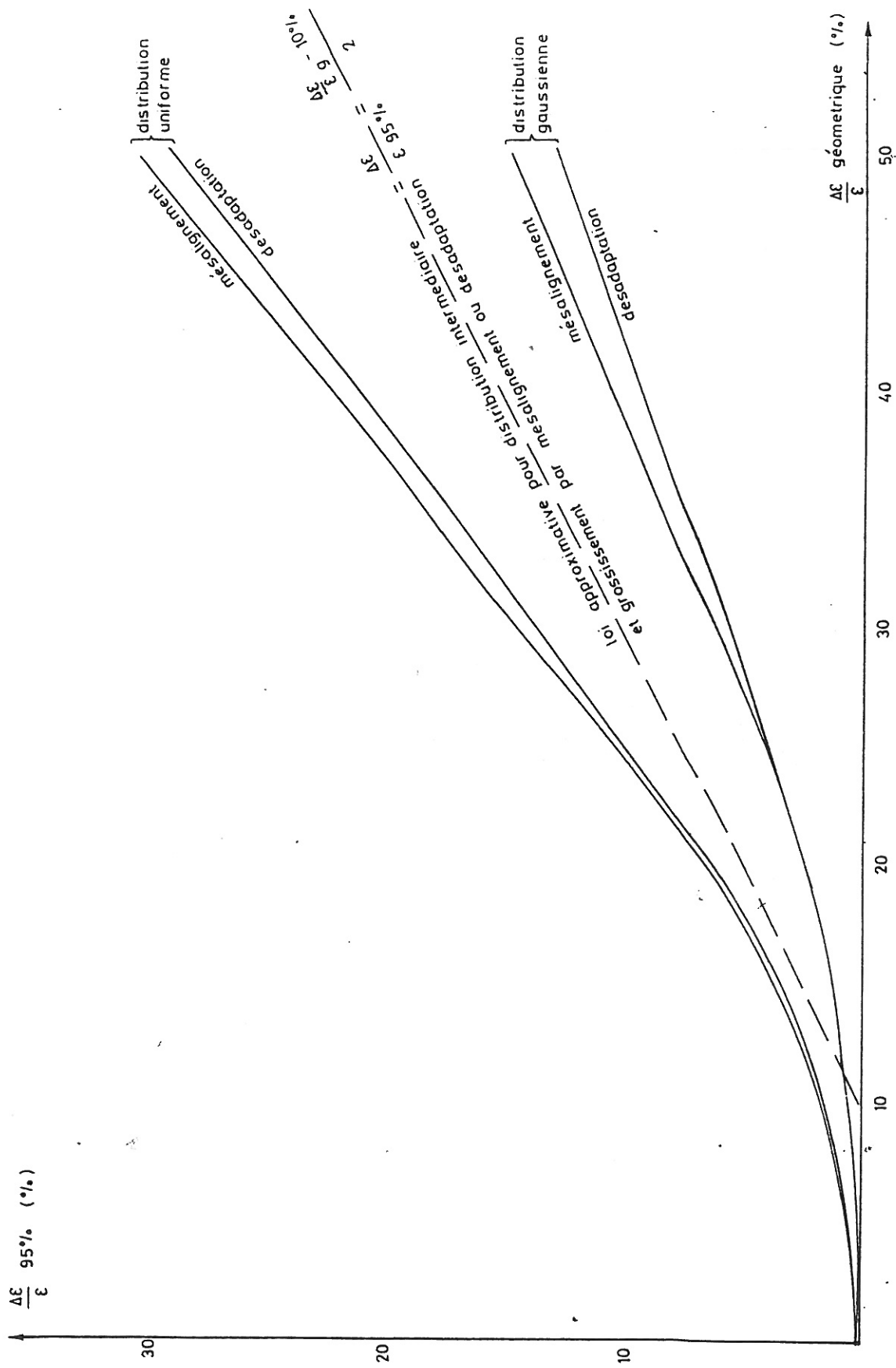


Fig. 10 Variation du grossissement réel de 95% des particules en fonction du grossissement géométrique de 100% des particules.

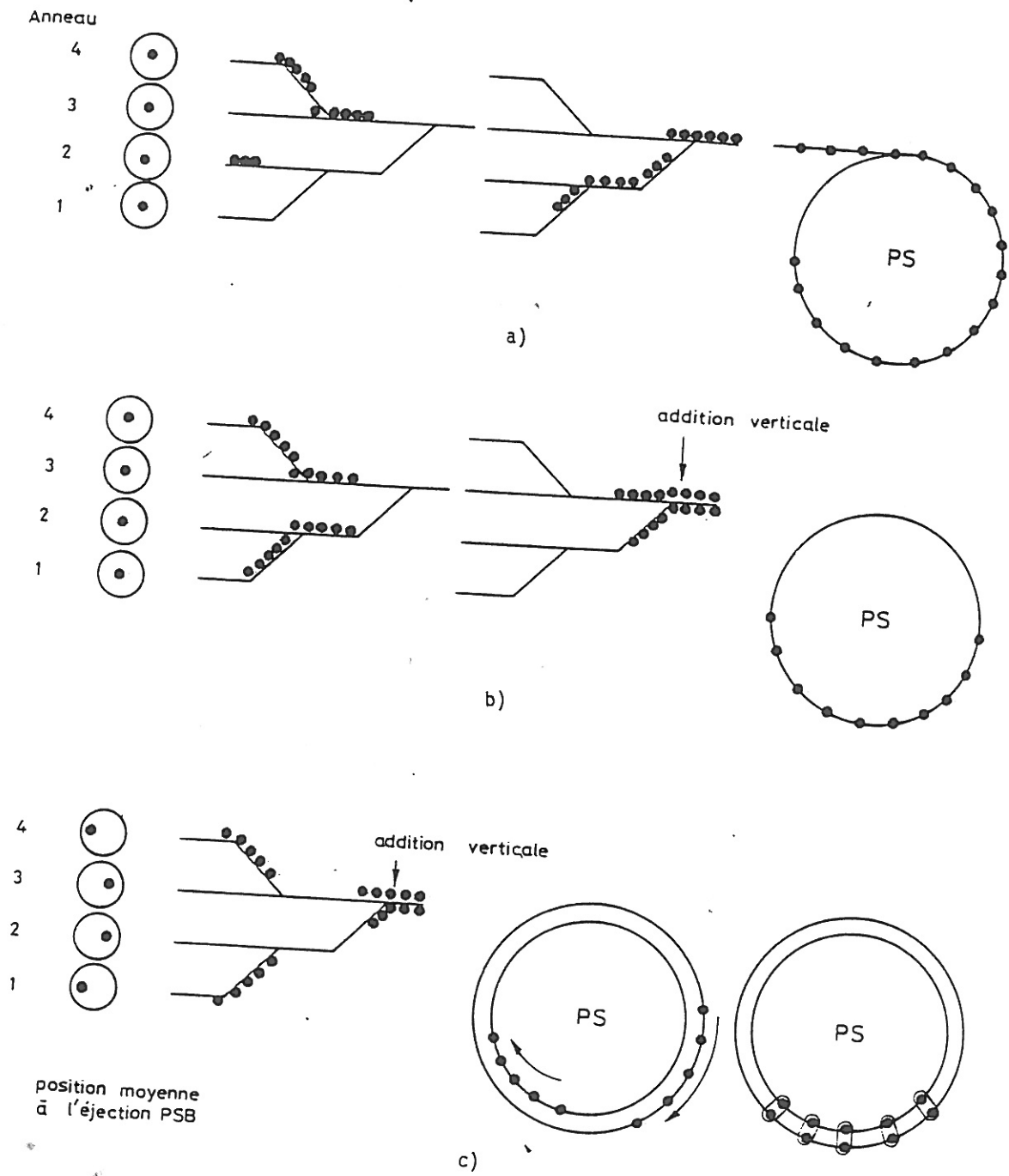


Fig. 11 Principes de recombinaison des 4 anneaux PSB en mode 20, 10 et 5 paquets.
 a) Mode 20 paquets.
 b) Mode 10 paquets.
 c) Mode 5 paquets.

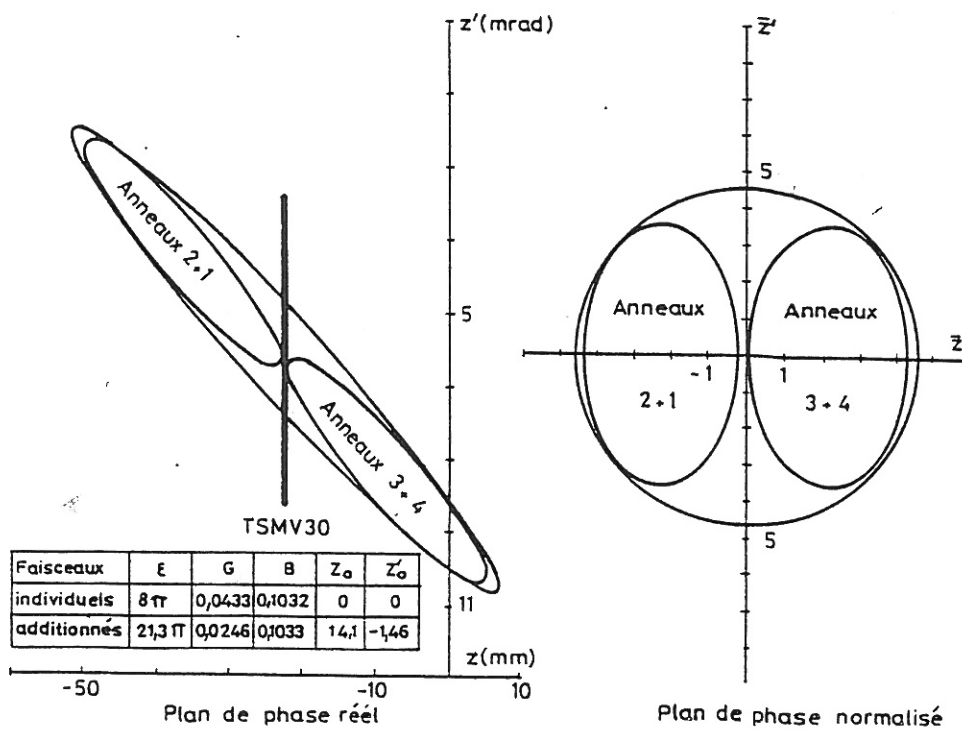
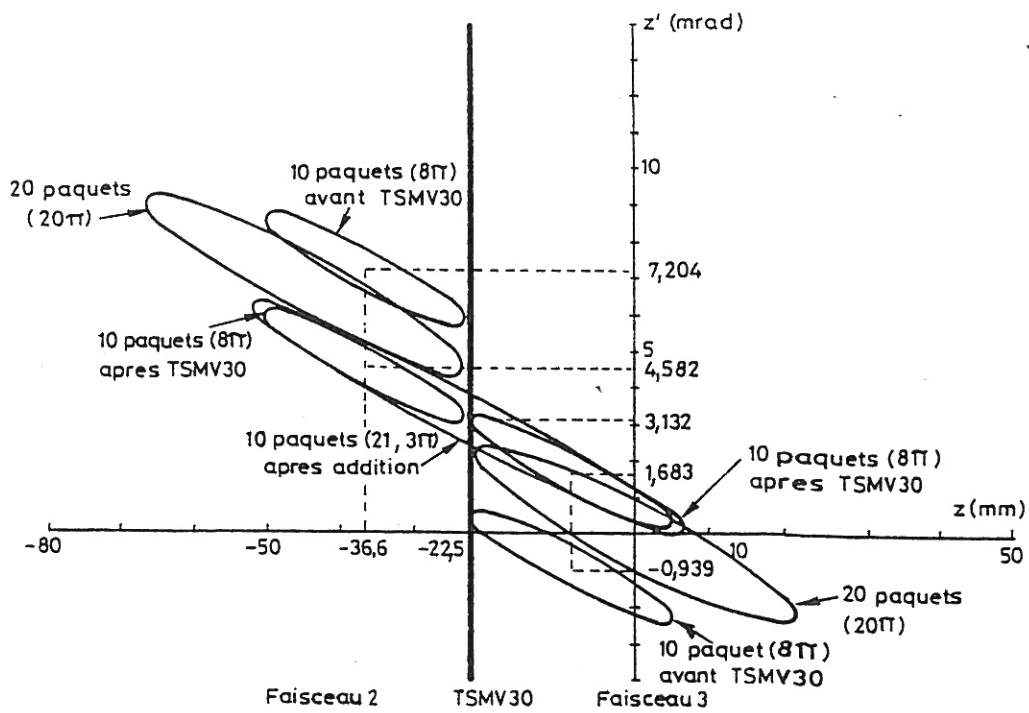


Fig. 12 .Représentation dans l'espace de phase du septum d'addition TSMV30 des faisceaux avant et après addition

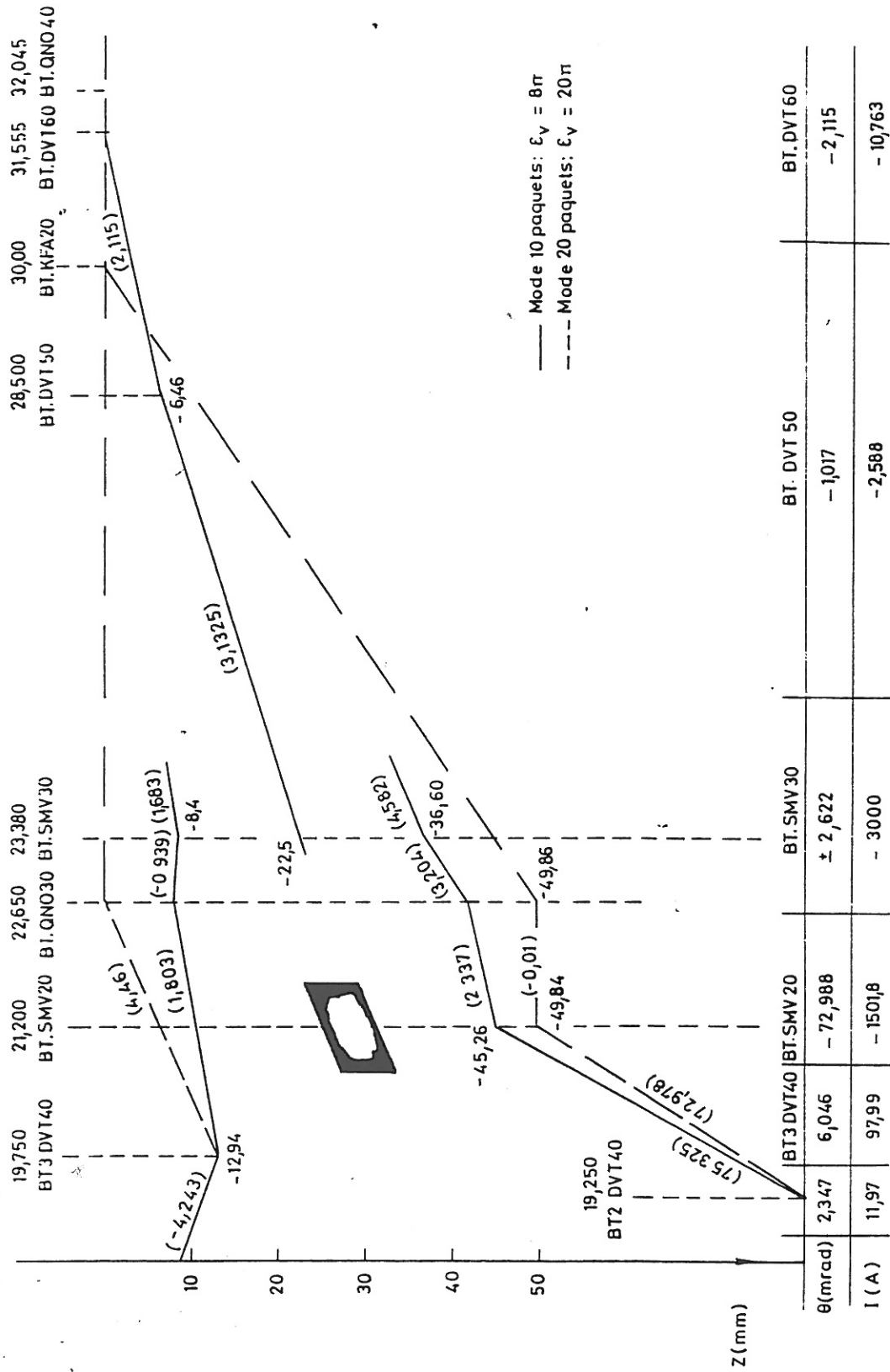


Fig. 13 Trajectoires des faisceaux 2 et 3 au point d'addition en mode 10 et 20 paquets

Distribution projetée gaussienne: $f(x)$

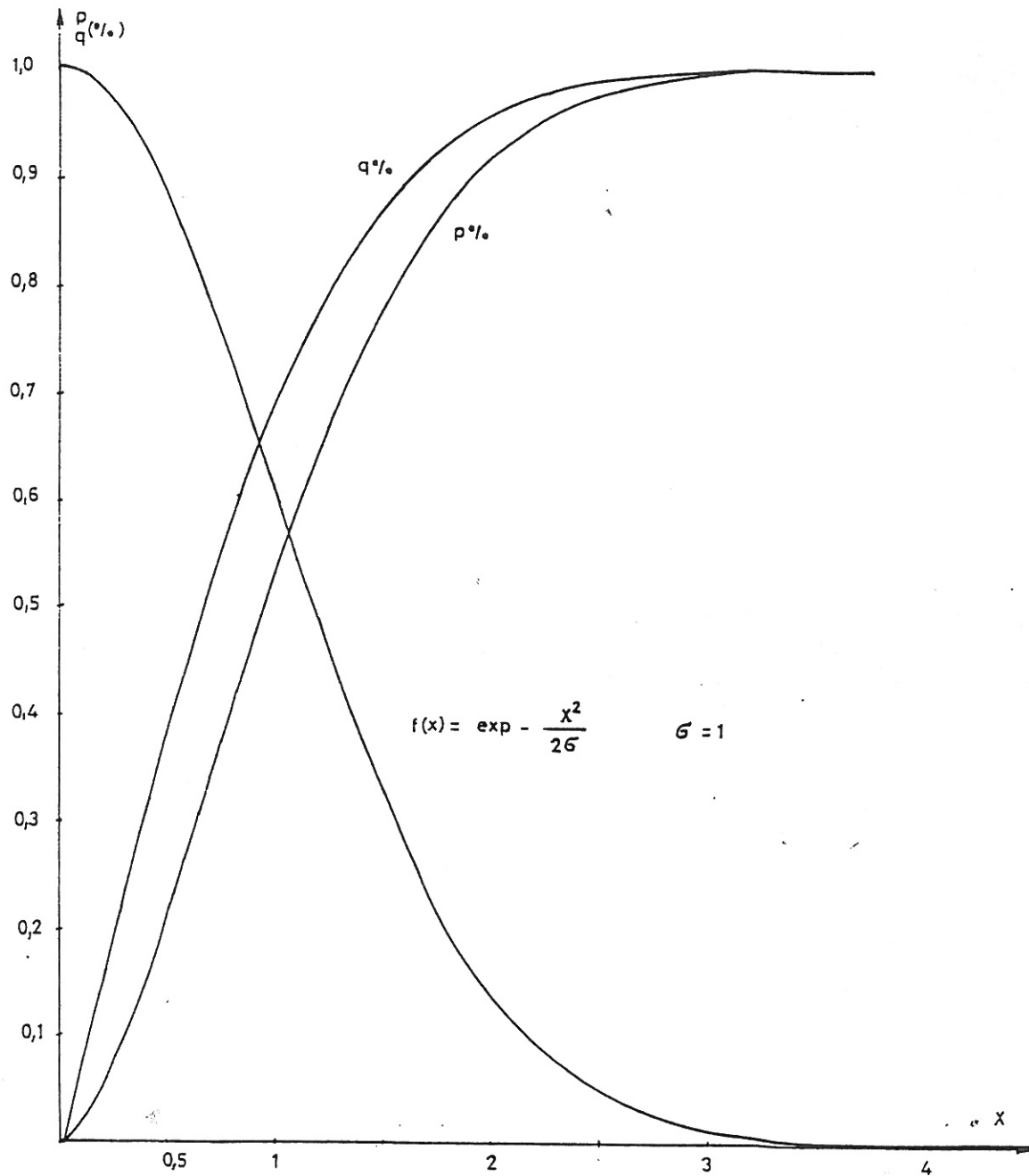
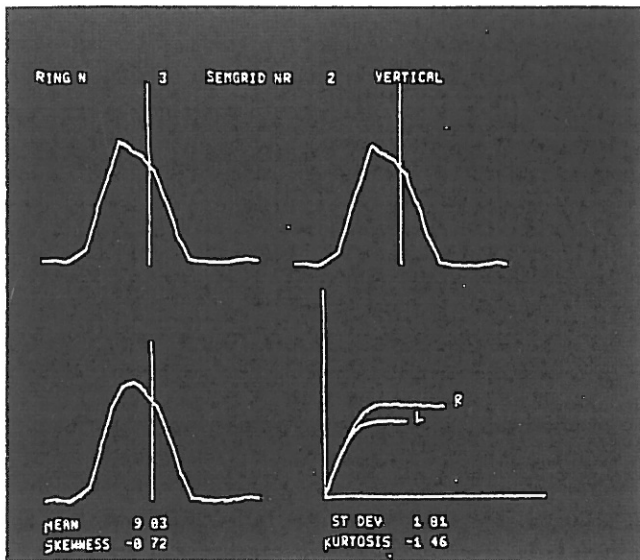
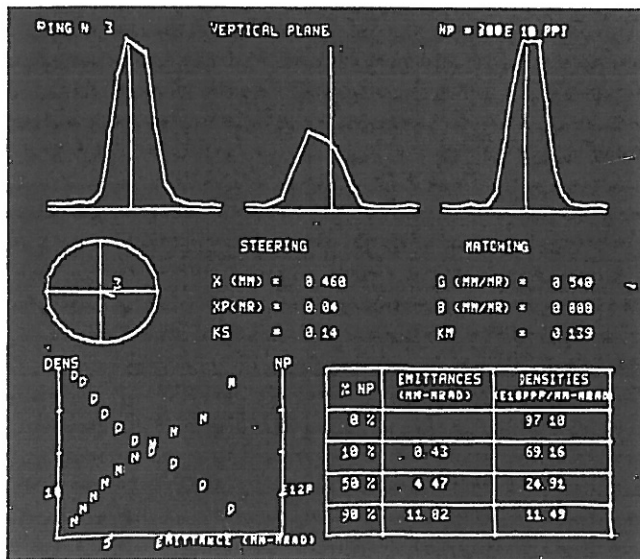


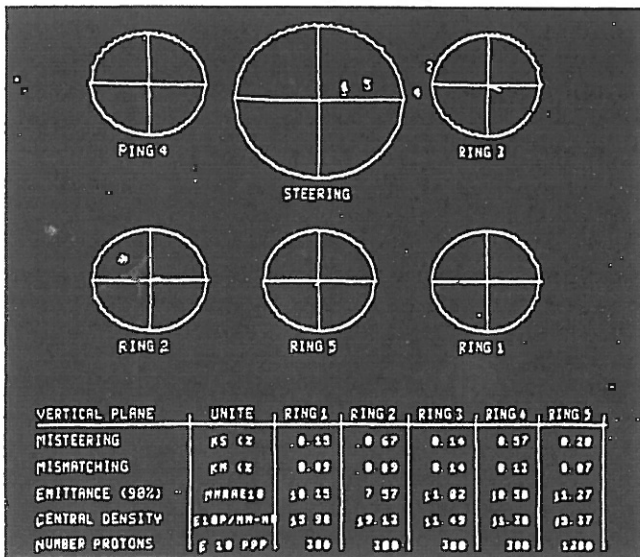
Fig. 14 Pourcentage de faisceau à l'intérieur d'une dimension $2X$ mesurée avec des cibles (p%) ou des Sem Grid (q%)



1^{er} Display - Traitement du signal d'un S.E.M.



2^e Display - Caractéristiques principales d'un Anneau



3^e Display - Récapitulatif des caractéristiques principales des anneaux individuels

Fig. 15 Display - Ligne de Mesure

RING NR 4	HORIZONTAL				RUNNING MEAN OF														
8	1	4	1	3	4	9	24	58	131	211	333	210	130	42	5	3	1	14	5
1	1	5	4	6	11	27	56	77	98	240	132	122	100	66	45	31	35	21	6
19	20	13	19	22	32	68	137	16	215	235	211	127	63	43	49	27	28	31	27

MOMENTS	MEAN	ST. DEV.	SKEWNESS	KURTOSIS
SEMGRIID 1	11.88	1.81	-0.17	4.54
SEMGRIID 2	11.62	2.37	-0.51	1.13
SEMGRIID 3	18.41	1.83	-1.15	8.13

ADAPTATION MEASUREMENT

MEASUREMENT POINT	CENTRE	TAILS	MIDDLE		
STEERING:					
X (MM)	1.46 (1.46)	XN= 8.91			
X1 (MRAD)	-0.67 (-0.67)	X1N= -1.25			
DEPS/EPS	5.61 (5.61)				
MATCHING:					
E1 (MM)	9.85 (9.85)	11.25 (11.25)	5.68 (5.68)		
E2 (MM)	8.33 (8.33)	9.25 (9.25)	4.41 (4.41)		
E3 (MM)	12.85 (12.85)	13.51 (13.51)	6.82 (6.82)		
G (G8= 0.69388)	8.339 (8.339)	8.353 (8.353)	8.393 (8.393)		
B (B8= 0.88888)	-0.878 (-0.878)	-0.865 (-0.865)	-0.878 (-0.878)		
K	8.75 (8.75)	8.78 (8.78)	8.59 (8.59)		
PHI (RAD)	-2.95 (-2.95)	-2.95 (-2.95)	-2.89 (-2.89)		
ADAPTATION POINT					
STEERING:					
X (MM)	2.91 (2.91)	XN= 1.37			
X1 (MRAD)	-0.62 (-0.62)	X1N= 8.71			
DEPS/EPS	1.28 (1.28)				
MATCHING:					
G (G8= 0.11288)	8.253 (8.253)	8.242 (8.242)	8.222 (8.222)		
B (B8= 0.33188)	8.311 (8.311)	8.312 (8.312)	8.328 (8.328)		
K	8.85 (8.85)	8.88 (8.88)	8.78 (8.78)		
PHI (RAD)	-8.14 (-8.14)	-8.14 (-8.14)	-8.83 (-8.83)		
QUADRUPOLES (0.1 A):	TSQ1-4	888	-388	-588	858
	TQ4-88	828	8		

EMITTANCE MEASUREMENT

	RIGHT	LEFT	EMITTANCE
18 x	1.8 MM	8.9 MM	8.35 (8.35) MM-MRAD
28 x	1.8 MM	1.8 MM	1.21 (1.21) MM-MRAD
38 x	2.3 MM	2.4 MM	2.26 (2.26) MM-MRAD
48 x	2.8 MM	3.8 MM	3.51 (3.51) MM-MRAD
58 x	3.3 MM	3.6 MM	4.96 (4.96) MM-MRAD
68 x	3.9 MM	4.1 MM	6.68 (6.68) MM-MRAD
78 x	4.5 MM	4.6 MM	8.43 (8.43) MM-MRAD
88 x	5.3 MM	5.2 MM	10.81 (10.81) MM-MRAD
98 x	6.7 MM	6.2 MM	15.07 (15.07) MM-MRAD
95 x	7.5 MM	7.3 MM	20.77 (20.77) MM-MRAD

Fig. 16 Ensemble des résultats déduits de la ligne de mesure à 800 MeV

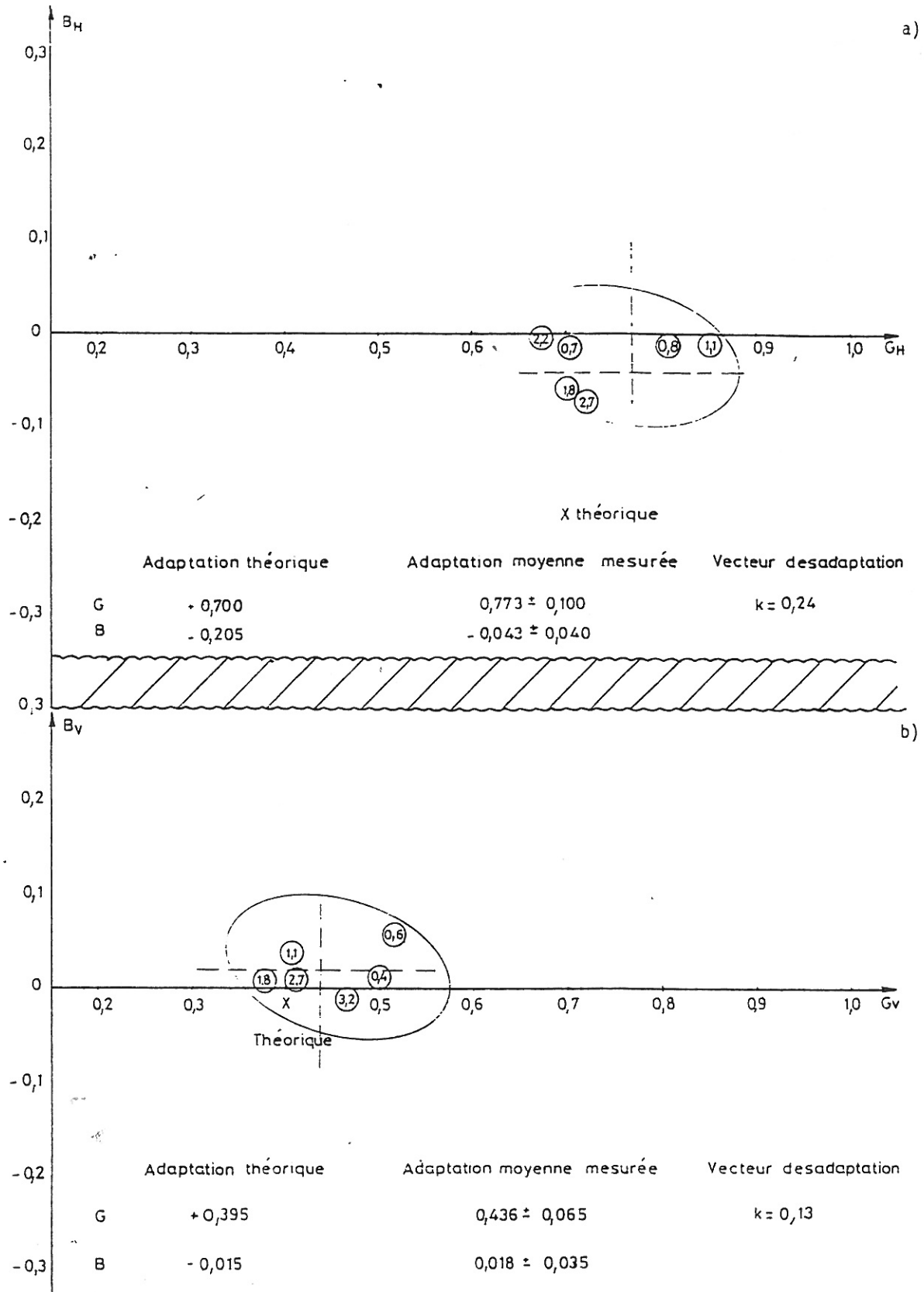


Fig. 17 a) Mesure de l'adaptation horizontale au point de mesure (faisceau 3 de $p \times 10^{12}$ ppp).
 Comparaison avec l'adaptation théorique X.
 b) Mesure de l'adaptation verticale au point de mesure (faisceau 3 de $p \times 10^{12}$ ppp).
 Comparaison avec l'adaptation théorique X.

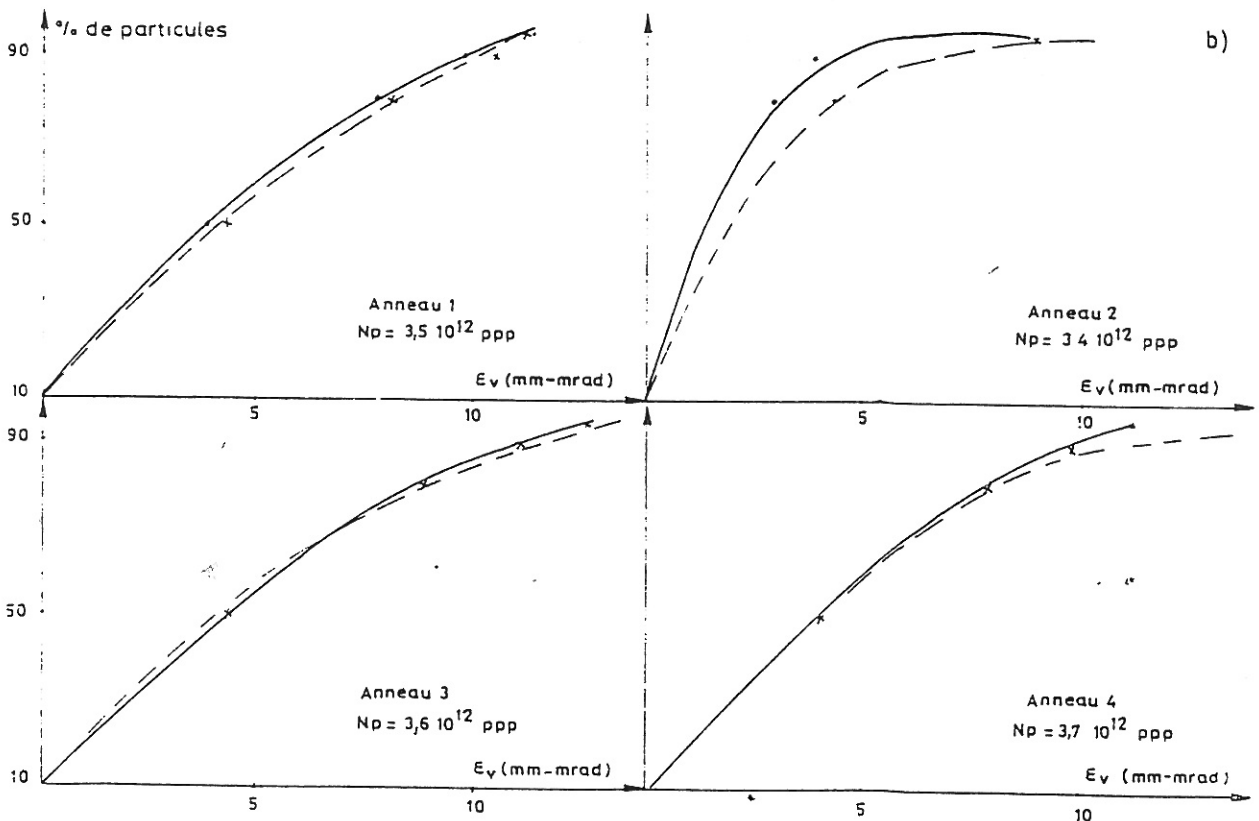
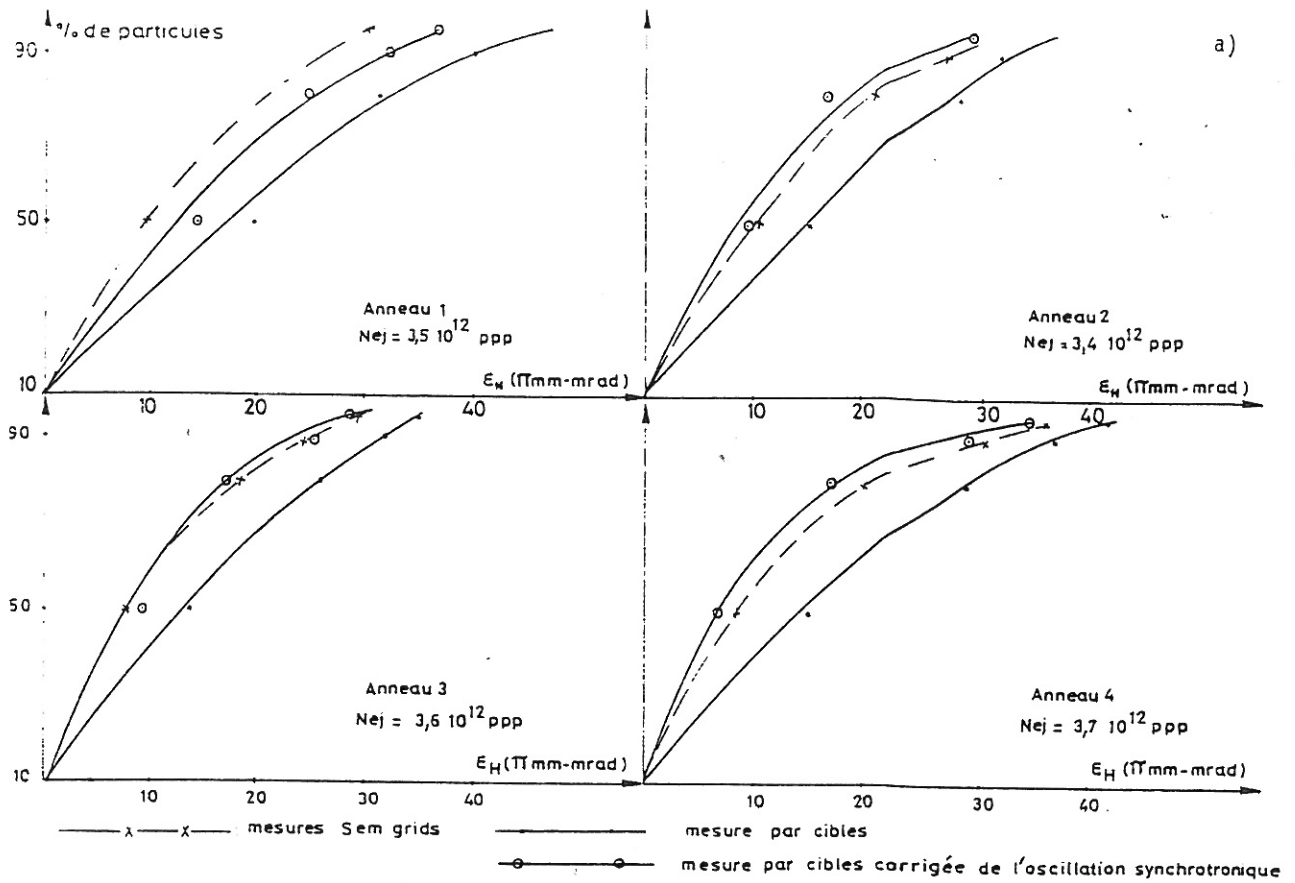


Fig. 18 a) Emittances horizontales partielles des faisceaux Booster. Comparaison cibles-Sem grids.
 b) Emittances verticales partielles des faisceaux Booster. Comparaison cibles-Sem grids.