

Mesure de la position transversale des faisceaux de leptons e^{\pm}
dans les lignes de transfert du SPS

S. Pénaire, N. Siegel, E. Weisse

1. Introduction

Les lignes de transfert du SPS sont actuellement équipées de détecteurs à émission secondaire (SEM), qui permettent de déterminer la position transversale des faisceaux de protons et d'antiprotons dans le plan horizontal ou vertical, par rapport à l'axe théorique de la ligne.

Deux types de moniteurs sont utilisés. Le plus simple (BSP) permet seulement de calculer le taux de décentrage^{*)} du faisceau, et non sa position absolue ; il est cependant le plus employé car il est le moins coûteux. Le second type (BSG) permet d'acquérir le profil du faisceau dans le plan considéré, et donc aussi sa position ; il est surtout employé pour des mesures d'émittance, d'adaptation bétatronique, ou pour l'observation de zones critiques.

Dans les deux cas, il s'agit d'un détecteur interceptif, constitué de plusieurs feuilles (ou lames) métalliques épaisses de quelque 1/100 de mm, et transversées par le faisceau de particules.

Aux énergies actuelles du SPS (14 à 450 GeV/c), le guidage du faisceau se fait en introduisant simultanément tous les moniteurs dans la ligne, sans que cela ne perturbe exagérément l'opération. A l'injection, on note effectivement un gonflement du faisceau susceptible d'occasionner quelques pertes ; mais aux énergies d'extraction, l'effet est tout à fait négligeable. Il n'en va malheureusement pas de même pour les leptons e^+ et e^- qui seront injectés à 3.5 GeV et extraits à 20 GeV. L'introduction dans le faisceau de moniteurs interceptifs, produit alors des effets perturbateurs beaucoup

*) le taux de décentrage varie entre - 100% et + 100%



plus gênants¹⁾. La présente note évalue l'importance de ces effets en fonction des phénomènes suivants :

- a) perte d'énergie due au rayonnement de freinage ("Bremsstrahlung") ;
- b) grossissement d'émittance dû à la diffusion coulombienne ("multiple Coulomb scattering").

D'autres phénomènes ont également été étudiés, comme la radiation synchrotrone, mais ils s'avèrent négligeables par rapport aux deux premiers cités.

2. Perte d'énergie due au "Bremsstrahlung"

Dans la gamme des énergies considérées, la perte relative d'énergie $\Delta E/E$, est proportionnelle à l'épaisseur t du matériau traversé, et dépend de la longueur de radiation L_R de ce matériau :

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{t}{L_R}$$

Pour une épaisseur $t = 0.1$ mm d'aluminium, dont la longueur de radiation $L_R = 89$ mm, la perte relative d'énergie $\Delta E/E = 1.1 \times 10^{-3}$.

On peut ainsi calculer l'excursion horizontale A_x et verticale A_z , d'un faisceau de leptons traversant successivement un certain nombre de moniteurs SEM (BSP ou BSG) introduits dans la ligne. Les calculs présentés dans les tableaux 1, 2, 3 et 4, pour les lignes TT10, TT70, TI12 et TI18 respectivement, supposent une perte d'énergie relative $\Delta E/E = 1\text{‰}$, à la traversée de chaque moniteur. On remarquera que l'amplitude de ces excursions ne dépend pas de l'énergie E , mais seulement de la chromaticité de la ligne. Ainsi, les amplitudes maximales des faisceaux à 20 GeV en TI12 et TI18, sont-elles du même ordre de grandeur que les amplitudes maximales du faisceau à 3.5 GeV en TT10 ; par contre, elles sont nettement inférieures aux amplitudes horizontales du faisceau à 3.5 GeV en TT70, qui a une courbure radiale très importante.

3. Grossissement d'émittance dû au "multiple Coulomb scattering"

La diffusion angulaire $\Delta\theta$, d'un faisceau d'énergie E , traversant un matériau d'épaisseur t et de longueur de radiation L_R , est telle que :

$$\Delta\theta^2 = \langle \theta^2 \rangle = \left(\frac{E_0}{E} \right)^2 \times \frac{t}{L_R}$$

avec $E_0 = 15$ MeV.

Il s'ensuit un grossissement des émittances transversales ($\epsilon = \sigma^2/B$), tel que :

$$\epsilon_{n+1} = (\epsilon_n^2 + B_n \epsilon_n \cdot \Delta\theta^2)^{1/2}$$

les caractéristiques bétatroniques du faisceau étant modifiées de la façon suivante :

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n \times \frac{\epsilon_n}{\epsilon_{n+1}}$$

$$B_{n+1} = B_n \times \frac{\epsilon_n}{\epsilon_{n+1}}$$

Pour $t = 0.1$ mm et $L_R = 89$ mm, la diffusion angulaire prend les valeurs suivantes :

$$\Delta\theta_i = 0.14 \text{ mrad à } 3.5 \text{ GeV}$$

$$\Delta\theta_e = 0.025 \text{ mrad à } 20 \text{ GeV}$$

On peut ainsi calculer l'émittance horizontale ϵ_H et verticale ϵ_V d'un faisceau de leptons traversant successivement un certain nombre de moniteurs SEM (BSP ou BSG). Les calculs sont également présentés dans les tableaux 1, 2, 3 et 4 ; ils supposent une diffusion angulaire égale à $\Delta\theta_i$ ou $\Delta\theta_e$ (suivant l'énergie du faisceau) à la sortie de chaque moniteur. On remarquera qu'ici le grossissement décroît lorsque l'énergie augmente ; il est donc plus important à 3.5 GeV qu'à 20 GeV.

5. Interprétation des résultats de calcul

Compte-tenu des résultats présentés dans les tableaux 1, 2, 3 et 4, il s'agit de décider si des moniteurs SEM peuvent être utilisés pour le guidage des faisceaux de leptons, ou si l'on doit adopter des moniteurs non-interceptifs. Si les moniteurs SEM sont utilisés, le seront-ils simultanément, comme c'est le cas actuellement, ou séquentiellement, chaque moniteur étant examiné successivement, après que les moniteurs en amont aient été retirés ? Cette dernière éventualité présente évidemment de nombreux inconvénients :

- impossibilité d'une vue d'ensemble rapide,
- temps de réglage considérablement allongés,

- difficultés de réglage augmentées, en particulier lorsque les deux plans sont couplés par un élément "tilté", un "by-pass" ou un système d'échange de phases,
- impossibilité d'utiliser les procédures actuelles de guidage automatique, qui sont maintenant parfaitement opérationnelles en TT10 et TT60/TT70 pour les p^+ .

Une telle solution équivaldrait, en fait, à un retour de huit ans en arrière pour ce qui concerne l'exploitation des lignes de transfert du SPS : en effet, les procédures de guidage dites "automatiques", sont actuellement 3 à 6 fois plus rapides que les procédures dites "manuelles". Dans les deux cas pourtant, les positions du faisceau sont acquises simultanément dans les deux plans ; mais dans le premier cas, les corrections de courant sont calculées par l'ordinateur et envoyées simultanément à tous les dipôles de guidage ; alors que dans le second cas, l'opérateur doit décider lui-même des corrections à envoyer successivement à chaque dipôle. Le retour à une observation "séquentielle" de chaque moniteur, augmenterait encore les temps d'intervention.

5.1. Transfert de e^+ en TT10 (voir tableau 1)

Compte tenu des émittances calculées, il est impossible de guider un faisceau de e^+ jusqu'au bas de TT10, si tous les moniteurs SEM y sont introduits. Il faut donc, soit accepter les inconvénients du guidage séquentiel, soit avoir recours à des moniteurs non-interceptifs. C'est cette dernière solution qui est proposée ici.

L'observation du faisceau de p^+ se fera alors, soit au moyen de ces nouveaux moniteurs si cela est techniquement possible, soit au moyen des moniteurs actuels ; ceux-ci devant être retirés à chaque passage du faisceau de e^+ , pour éviter sa destruction.

5.2 Transfert de e^- en TT70/TT60 (voir tableau 2)

Pour des raisons pratiques, le tableau 2 représente le transfert de e^+ (du SPS vers le CPS) et non de e^- ; mais l'ordre de grandeur des excursions et des émittances est le même dans les deux cas.

Pour les mêmes motifs que précédemment, on propose l'adoption de nouveaux moniteurs non-interceptifs ; d'autant plus que les moniteurs SEM existants ne sont généralement pas placés correctement pour le guidage des e^- .

Dans la partie commune de TT60, l'observation des faisceaux de p^+ extraits se fera au moyen des moniteurs SEM existants ; ceux-ci devront également être retirés au passage du faisceau de e^- .

5.3 Transferts de e^- en TII2 et de e^+ en TII8 (voir tableaux 3 et 4)

Les calculs montrent que, dans les deux cas, le faisceau de leptons pourrait être guidé le long de la ligne sans être détérioré par un grossissement trop important dû à la traversée des moniteurs SEM. Mais il faudrait alors décider si l'on doit retirer les moniteurs à la fin de l'intervention, ou s'ils doivent rester bloqués dans le faisceau :

a) Si l'on retire les moniteurs :

le faisceau n'est plus centré dans la ligne qui devient ainsi beaucoup plus sensible aux instabilités;

le faisceau se perd dans le canal d'injection, puisque les excursions horizontales et verticales sont supérieures à la marge disponible de 5 mm.

b) Si l'on bloque les moniteurs dans le faisceau :

l'énergie du faisceau diminue de plusieurs $\%$; mais cette diminution n'est pas exactement connue, et ne peut donc être exactement compensée, car elle dépend de la qualité du guidage (les électrodes de polarisation des SEM sont percées d'un trou \varnothing 10 mm en leur centre) ;

les émittances transversales atteignent ou dépassent 0.15π dans les deux plans, ce qui enlève toute sa raison d'être au système d'échange de phases, et qui crée des pertes très importantes dans le canal d'injection.

Aucune de ces deux solutions n'est donc acceptable, en conséquence, c'est encore des moniteurs non-interceptifs qui sont proposés pour les nouvelles lignes TII2 et TII8.

6. Proposition d'un moniteur non-interceptif pour le transfert des e^{\pm}

La mesure de la position transversale des faisceaux de leptons e^+ et e^- , pourrait se faire, par exemple, à l'aide de coupleurs⁽²⁾ semblables à ceux qui sont déjà en service dans l'anneau (BPC) et dans TT60/TT70 (BPCT).

6.1 Performances attendues du moniteur

6.1.1 Mesures de position

- mesures simultanées dans les deux plans H et V
 - erreur maximale sur la position du zéro : ± 1 mm
 - domaine de linéarité des mesures : ± 30 mm
 - erreur relative maximale dans ce domaine : $\pm 10\%$
 - répétitivité (fidélité) des mesures : ± 0.2 mm
- } dans
} chaque
} plan

6.1.2 Mesures d'intensité

- erreur relative maximale : ± 5 à 10% suivant la longueur du "paquet" ;
- interchangeabilité : $\pm 2\%$ d'un moniteur à l'autre.

6.2 Conditions d'utilisation du moniteur

- ouverture maximale : $\varnothing 120$ mm ;
- longueur des "paquets" : 0.1 à 8 nanosecondes, ce qui devrait permettre d'observer aussi les p^+ en cible fixe;
- intensités extrêmes :
 2×10^9 à 2×10^{11} pour les faisceaux "single bunch",
 2×10^{12} à 2×10^{13} par "paquet", pour les p^+ en cible fixe.

6.3 Avantages d'un moniteur du type coupleur

Le premier avantage du coupleur est, évidemment, qu'il élimine les inconvénients du moniteur interceptif. Cependant, il fournit aussi d'autres facilités qui, sans être indispensables, méritent d'être soulignées :

- c'est également un bon enregistreur d'intensité, qui permettra de surveiller l'efficacité de transmission du faisceau tout le long de la ligne, mieux que ne peut le faire un BSP ou un BSG;
- il indique les déplacements du faisceau directement en millimètres, et non pas en % de décentrage comme le BSP ; ce qui permettra d'améliorer considérablement la précision et la rapidité des procédures de guidage, qu'elles soient "manuelles" ou "automatiques".

6.4 Quantités

TT10	:	7
TT60/TT70	:	18
TT12	:	7
TT18	:	6

On devrait donc installer 38 coupleurs et prévoir quelques unités de réserve.

7. Conclusions

Un moniteur à émission secondaire (SEM), placé dans un faisceau de leptons e^+ ou e^- , y produit des perturbations importantes, aussi bien à 3.5 qu'à 20 GeV. Il crée d'une part une perte d'énergie de 1‰ environ, provoquant ainsi une excursion du faisceau dont l'amplitude est d'autant plus grande que la chromaticité de la ligne est plus importante, indépendamment de son énergie. Il crée d'autre part un accroissement de l'émittance transversale, d'autant plus sensible que le faisceau est plus gros dans le plan considéré et que son énergie est moindre.

L'évaluation quantitative de ces deux effets, dûs respectivement au "Bremsstrahlung" et au "multiple Coulomb scattering", conduit à conclure que des moniteurs SEM sont inadaptés au guidage des faisceaux e^\pm , et que leur utilisation doit se limiter à l'observation séquentielle du profil de ces faisceaux (BSG).

On est donc amené à proposer l'adoption de moniteurs non-interceptifs, semblables aux coupleurs qui sont déjà en service dans l'anneau (BPC), et dans TT70/TT60 (BPCT). Pour équiper les quatre lignes de transfert TT10, TT70/TT60, TT12 et TT18, un total de 38 coupleurs est nécessaire ; ils seraient fabriqués par le groupe ABM, qui fournirait également la DMS associée. Les premiers exemplaires devraient être disponibles début 1987.

REFERENCES

- (1) Interactions between e^\pm beams and instrumentation in the SPS transfer lines. J. Bossert et L. Burnod, SPS/ABM/Note/85-1 du 9.1.1985.
- (2) Beam position monitors for antiprotons, by R. Bossart. SPS/ABM/RB Report 78-8, 18 September 1978.

Tableau 1

Transfert de e^+ en TT10 à 3.5 GeV
au travers de moniteurs SEM

Moniteur		Plan Horizontal		Plan Vertical	
N°	Nom	Δx (mm)	ϵ_H (mm-mrad)	Δz (mm)	ϵ_V (mm-mrad)
			0.16		0.16
1	BSPV 1003	0	0.34	0	0.43
2	BSP 1004	0	0.68	0	0.65
3	BSPV 1005	0	1.04	0	1.74
4	BSP 1006	0	2.14	0	2.20
5	BSPV 1023	0	2.50	20.4	2.81
				- 17.1	
6	BSG 1027	0	3.12	- 13.6	3.10
7	BSPV 1029	1.5	3.40	- 15.1	4.26
8	BSPH 1029	2.3	3.77	- 11.0	4.94
9	BSPV 1030	8.2	4.50	- 1.0	5.27
	Pt. d'injection	15.5		9.9	

a) Excursion du faisceau Δx et Δz , due à une perte d'énergie de 1°/oo par moniteur traversé (les valeurs indiquées entre deux moniteurs correspondent à des extrema d'excursion).

b) Evolution des émittances ϵ_H et ϵ_V , due à une diffusion coulombienne de 0.14 mrad par moniteur traversé.

Tableau 2

Transfert de e^+ en TT60/TT70 à 3.5 GeV
au travers de moniteurs SEM

Moniteur		Plan Horizontal		Plan Vertical	
N°	Nom	Δx (mm)	ϵ_H (mm-mrad)	Δz (mm)	ϵ_V (mm-mrad)
1	BSG 6100	0	0.16 0.27	0	0.16 0.83
2	BSP 6102	0	1.21	0	1.34
3	BSPV 6103	- 0.1	1.72	0	2.93
4	BSPH 6104	- 0.1	2.89	0	3.73
5	BSPV 6105	- 2.4	3.97	1.4	5.08
6	BSPH 6105	- 7.3	7.11	4.7	5.18
7	BSPV 6201	- 6.9	7.42	17.7	7.21
8	BSG 6201	- 9.8	7.85	11.7	8.07
9	BSP 7001	3.4	8.04	1.6	8.46
10	BSP 7002	17.5 52.2	8.14	- 2.4 8.1	9.42
11	BSG 7009	14.3	8.20	-13.3	9.86
12	BSG 7010	9.6	8.45	- 7.1	9.94
13	BSG 7012	22.1	8.77	0	10.1
14	BSP 7020	67.6 à - 65.5 - 18.5 65.5	8.96	14.4 à - 14.4 - 2.8	10.31
15	BSP 7022	48.8 70.9	9.17	9.6 14.5 à - 25.1	10.61
16	BSP 7032	- 35.6	9.76	8.3	11.84
17	BSM 7035	79.5 -118.4	10.07	-11.2 -31.2	12.42

- a) Excursion du faisceau Δx et Δz , due à une perte d'énergie de 1°/oo par moniteur traversé (les valeurs indiquées entre deux moniteurs correspondent à des extrema d'excursion).
- b) Evolution des émittances ϵ_H et ϵ_V , due à une diffusion coulombienne de 0.14 mrad par moniteur traversé.

Tableau 3

Transfert de e^- en TII2 à 20 GeV
au travers de moniteurs SEM

Moniteur		Plan Horizontal		Plan Vertical	
N°	Nom	Δx (mm)	ϵ_H (mm-mrad)	Δz (mm)	ϵ_V (mm-mrad)
1	IBP 1201	0	0.10	0	0.01
			0.10		0.02
2	IBP 1203	- 1.7	0.12	- 6.4	0.04
3	IBG 1205	1.6	0.12	- 3.6	
4	IBP 1207	11.6	0.13	- 9	0.06
		4.4		- 1.4	
5	IBPH 1209	2.0	0.14	6.0	0.11
6	IBP 1219	9.5 à - 12.1	Phasex	9.1 à - 9.4	Phasex
		- 7.3	0.14	- 5.6	0.12
7	IBP 1220	- 0.4	0.16	16.0	0.15
				22.9	
	Pt d'injection	-16.1		15.8	0.17

- a) Excursion du faisceau Δx et Δz , due à une perte d'énergie de 1°/oo par moniteur traversé (les valeurs indiquées entre deux moniteurs correspondent à des extrema d'excursion).
- b) Evolution des émittances ϵ_H et ϵ_V , due à une diffusion coulombienne de 0.025 mrad par moniteur traversé.

Tableau 4

Transfert de e^+ en T118 à 20 GeV
au travers de moniteurs SEM

Moniteur		Plan Horizontal		Plan Vertical	
N°	Nom	Δx (mm)	ϵ_H (mm-mrad)	Δz (mm)	ϵ_V (mm-mrad)
1	BSG 6100	0	0.10	0	0.01
2	IBP 1801	0	0.10	1.1	0.03
3	IBGH 1802	-14.2	0.13	- 0.4	0.04
4	IBPV 1802	-14.2	0.15	- 0.4	0.05
5	IBPH 1805	- 2.2	0.16	- 9.7	0.06
6	IBGV 1805	- 0.5	0.18	-21.6	0.07
7	IPBH 1806	0.9	0.18	- 5.5	0.08
8	IBP 1818	-23.7	0.20	15.1	0.08
9	IBP 1821	24.9	phasex	0.8	0.20
	Pt	4.8	0.10	30.5	0.21
	d'injection	29.1	0.15	58.8	
				37.3	

- a) Excursion du faisceau Δx et Δz , due à une perte d'énergie de 1°/oo par moniteur traversé (les valeurs indiquées entre deux moniteurs correspondent à des extrema d'excursion).
- b) Evolution des émittances ϵ_H et ϵ_V , due à une diffusion coulombienne de 0.025 mrad par moniteur traversé.