

CERN/PS/OP/77-12
March 1977

A SIMPLE MODEL FOR MULTITURN INJECTION
INTO A.G. PROTON SYNCHROTRONS

P.D.V. van der Stok^{*)}

*) Paper presented at the 1977 Particle Accelerator Conference,
Chicago, U.S.A.

FIGURE CAPTIONS

- Fig. 1 Phase plane representation of slice movement.
- Fig. 2 Partial acceptance evolution for $Q_H = 4.20$.
- Fig. 3 Efficiency versus number of injected turns for various horizontal emittances.
- Fig. 4 Optimum injection efficiency and setting (DI, DIP) as a function of Q_H .
- Fig. 5 Computed current build-up and incoherent Q_H -domain for a high intensity beam.
- Fig. 6 Horizontal amplitude distribution calculated and measured for four T_B -values.

P.D.V. van der Stok
European Organization for Nuclear Research
1211 Geneva 23, Switzerland.

Summary

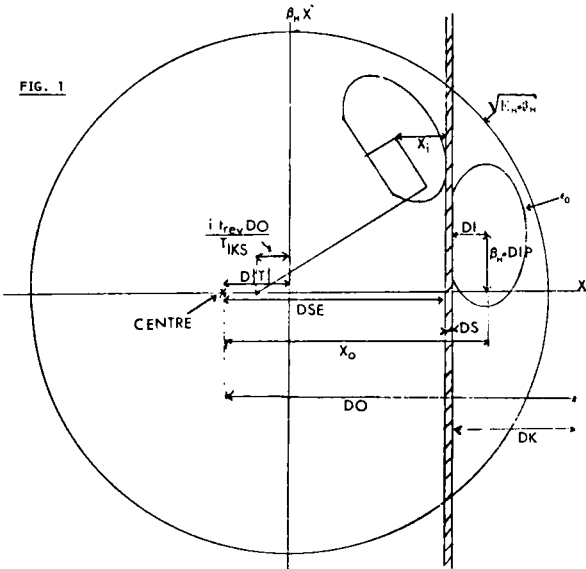
Analytical expressions are derived in order to compute the optimum injection parameters for betatron stacking into a chosen fraction of the total accelerator acceptance in the Q range $N + 0.1 \leq Q \leq N + 0.9$. The example of the CERN PS Booster (PSB) is worked out. The efficiency of the process is calculated using standard numerical integration algorithms with a Gaussian distribution of the incoming beam. Other types of distribution can also be dealt with. The results show that the installation of pulsed dipole and quadrupole supplies to obtain steering and focusing conditions which vary during the injection process will improve the injected current by only 3% in the case of the PSB. The measured performance of the PSB injection system is reported and compared with model prediction. Estimates of injected currents prove to be about 10% higher than the actual values. Some considerations on the influence of space-charge forces, which might explain this effect are presented.

Dynamics of Beam Slice

The beams which are to be injected into the four PSB rings can be aligned and focused such that for each ring the injection conditions are optimal. Four kickers per ring provide a local closed orbit bump at the injection septum position, with a maximum amplitude DO, which falls linearly in a time TIKS, that is: $D(t) = DO (1-t/TKS)$. A slice of incoming beam enters the accelerator at the exit of the injection septum, after which the centre of the slice will perform betatron oscillations with respect to the instantaneous closed orbit, with an amplitude X_0 at the injection point.

The centre of the slice was injected at a distance DI to the outer septum side and at an angle DIP with respect to the closed orbit. After each revolution i , the distance X_i of the slice centre to the inner septum side can be calculated (see Fig. 1) :

$$X_i = X_0 \{1 - \cos(2\pi Q_H i)\} - DI - DS + \frac{i \cdot t_{rev} DO}{TKS} - \beta_H DIP \sin(2\pi Q_H i) \quad (1)$$



DS is the effective septum thickness (1.5-3 mm), Q_H is the number of horizontal betatron oscillations (4-5), β_H is the betatron function value at the injection point (~ 5.8 m), and t_{rev} is the revolution time ($\approx 1.66 \mu s$ at injection).

The symmetry of the Booster unit cells determines $\beta_H^1 = 0$ at the injection point. As it is useful to orientate the incoming beam equidensity ellipses in the same way as the Courant Snyder invariant ellipses at the injection point¹, the incoming beam is focused such that the equidensity ellipses in the horizontal PSB phase plane obey the relation :

$$(x-x_c)^2/\beta_L + (x'-x'_c)^2\beta_L = \epsilon \quad (2)$$

where (x_c, x'_c) are the coordinates of the incoming slice centre.

After each revolution a loss can be produced by the injection septum defining a loss boundary - cut assumed to be a straight line² - in the horizontal phase plane moving with the circulating slice. To correlate the distance X_i directly to the intensity, a normalisation function $F(iQ_H)$ is used such that :

$$X_i^N = X_i / F(iQ_H) \quad (3a)$$

$$F(iQ_H) = \sqrt{\frac{\beta_H^2}{\beta_L^2} \sin^2(2\pi Q_H i) + \cos^2(2\pi Q_H i)} \quad (3b)$$

Here X_i^N is a measure for the number of particles dependent on the particle distribution which will be lost on the injection septum if the losses of all other cuts are neglected.

The start of the injection process T_B , is chosen such that the centre of the horizontal phase plane is filled, yielding :

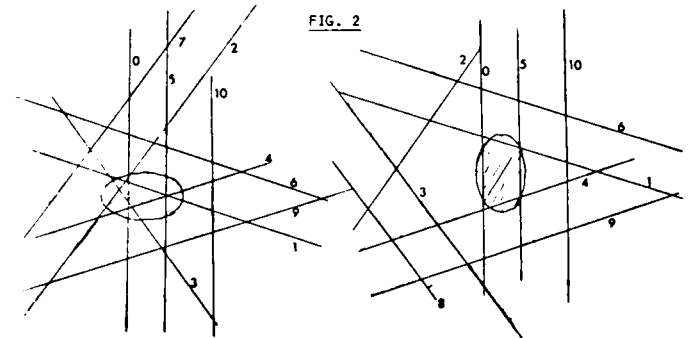
$$T_B = (-DSE - DS + DO) TIKS / DO - t_{rev} \quad (4a)$$

DSE is the distance from the inner septum side to the unperturbed closed orbit.

n_t is the number of injected turns, which determines the end of the injection process: $T_E = T_B + n_t t_{rev}$.

Partial Acceptance

For a slice of incoming beam, an area in the horizontal phase plane - the partial acceptance - is defined to be the area in which the particles have to be located to be accepted in the machine. All particles of



the slice outside this area will be lost on the injection septum. A minimum of three cuts is required to describe such an area, but in some cases four cuts prove to be necessary. A higher number of cuts is not considered, as this only happens in the low efficiency part of the process, or only affects the low density tails of the particle distribution.

Fig. 2 shows an example of the partial acceptance evolution for the case $Q_H = 4.20$. At the beginning of the process the partial acceptance is determined by 3 cuts: 0 produced at the moment of injection and the cuts produced after 1 and 4 machine revolutions. Later on, cut 5 has to be considered as well, leading to a four angle partial acceptance.

The optimized parameter setting is determined by finding the largest ellipse which can be injected into the partial acceptance without losses. In the 3-angle case defined by cuts o, j and k , one poses:

$$X_j^N = X_k^N = DI \quad (5a)$$

and

$$\frac{d}{d\beta_L} \left(\frac{DI^2}{\beta_L} \right) = 0 \quad (5b)$$

As a result, DI and DIP can be written as a function of the moment of injection t and T_{IKS} for a given partial acceptance configuration:

$$DI(t, T_{IKS}) = \frac{A_{DI}t}{T_{IKS}} + \frac{B_{DI}}{T_{IKS}} + C_{DI} \quad (6)$$

$$DIP(t, T_{IKS}) = \frac{A_{DIP}t}{T_{IKS}} + \frac{B_{DIP}}{T_{IKS}} + C_{DIP} \quad (7)$$

Eqns. (6) and (7) are determined by eq. (5a) and β_L coming from eqn. (5b) is approximated by:

$$\beta_L = \frac{\sqrt{0.9} \beta_H |t_E (2\pi Q_H j)|}{\left\{ 0.738 + \left[\frac{\cos(2\pi Q_H k)}{\cos(2\pi Q_H j)} \left| \frac{\sin(2\pi Q_H j)}{\sin(2\pi Q_H k)} \right| + 0.4 \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

while j and k are chosen such that:

$$\cos(2\pi Q_H j) \geq \cos(2\pi Q_H k) \quad (9)$$

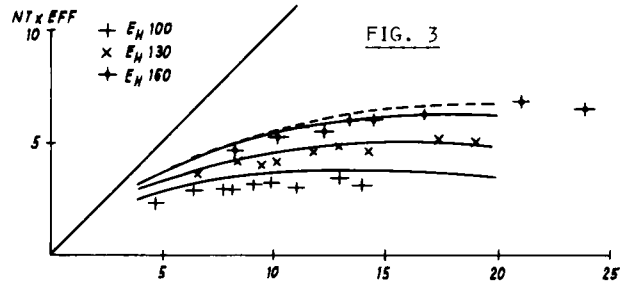
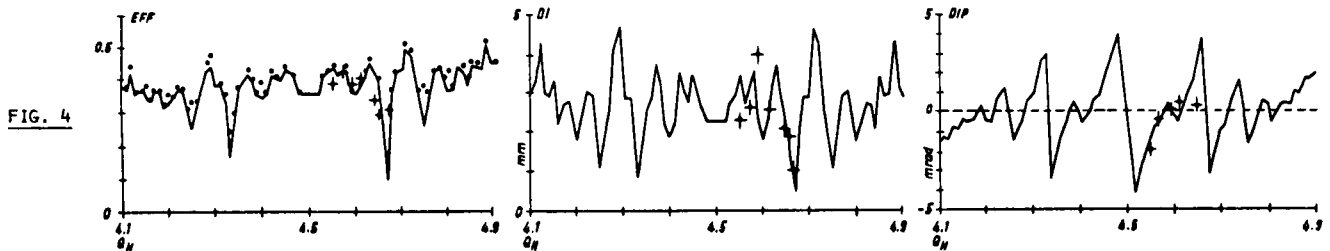
More detailed derivations and results are presented elsewhere³.

For the four-angle case, the DIP is assumed to be completely decoupled from DI . The partial acceptance is determined by the cuts o, k, j and l , where j is almost parallel to cut o . For the calculation the requirements are:

$$DI = X_j^N \quad (10a)$$

$$\frac{\beta_H}{2DI} \left\{ \frac{X_k^N}{|\sin(2\pi Q_H k)|} + \frac{X_l^N}{|\sin(2\pi Q_H l)|} \right\} \approx \beta_L \quad (10b)$$

$$\text{and } \left\{ \frac{X_k^N}{\sin(2\pi Q_H k)} + \frac{X_l^N}{\sin(2\pi Q_H l)} \right\} / 2\beta_H \approx DIP \quad (10c)$$



which yields the same type of equation as eqn. (6) and (7), but β_L will be written as:

$$\beta_L(t) \approx \frac{\overline{DI} \beta_H}{A_{\beta_L} t + B_{\beta_L}}, \quad \overline{DI} = \text{mean}\{DI(t)\}_{T_B}^{T_E} \quad (11)$$

In the PSB it has proved sufficient to distinguish only two partial acceptance configurations during the whole injection process. The time T_0 for switching from one configuration to the other is calculated by requiring that one specific parameter must be a continuous function with time. Of course this procedure can be refined, but such modifications necessitate considerable effort and do not significantly alter the results. Table 1 shows the three possible cases:

TABLE 1			
Case	$T_B - T_0$	$T_0 T_E$	Cont. Parameter
I	3-angle	4-angle	β_L
II	3-angle	3-angle	$DI/\sqrt{\beta_L}$
III	4-angle	3-angle	β_L

At last T_{IKS} can be calculated. In the PSB, the beam is injected until the horizontal PSB emittance containing 95% of the particles has the required size⁴. (Nominal $\epsilon_H = 130 \pi$ mm mrad at 50 MeV, while $A_H = 220 \pi$ mm mrad). When $DI(t)$, $DIP(t)$ and $\beta_L(t)$ are known, it is possible to obtain a first approximation for T_{IKS} from geometrical considerations.

A linearization of the efficiency behaviour around T_E subtracting the particles lying outside ϵ_H will then finally yield the required T_{IKS} .

Efficiency Calculation

To calculate the efficiency of the process, use is made of a Gaussian distribution for the incoming beam, while the probability of finding a particle on an equidensity ellipse ϵ is given by:

$$P(\epsilon) = \frac{1}{\epsilon_0} \exp(-\epsilon/\epsilon_0) \quad (12)$$

$\epsilon_0 \approx 10 \pi$ mm mrad for the incoming PSB beam.

For a given slice, the partial acceptance is split up into two sets of rectangles approximating the total partial acceptance area. One contains twice as many rectangles as the other. The summation over all rectangles yields the efficiency for a given slice of in-

coming beam. A comparison of the results of the two sets shows the accuracy of the calculation. As efficiency is a smooth function of time, the total multi-turn process efficiency is calculated with Simpson's rule. To compare the injections with dynamic injection parameters and fixed ones, the fixed parameter \bar{x} has to be calculated from the dynamic one $x(t)$. A weight function $w(t)$ is defined as :

$$w(t) = 1 - \exp\{-DI^2(t)/\epsilon_0\beta_L(t)\} \quad (13a)$$

$$\text{and} \quad \bar{x} = \frac{\int_{T_B}^{T_E} w(t) x(t) dt}{\int_{T_B}^{T_E} w(t) dt} \quad (13b)$$

Results obtained in the CERN PS Booster

Much information on the performance of the multi-turn injection process is contained in the graphs : number of injected turns (n_t) versus n_t times the efficiency. To diminish space charge effects, these curves have been measured in the PSB with a low intensity Linac Beam (17mA) for $\epsilon_H = 100, 130$ and 160π mm mrad (see Fig. 3). The graphs can be fitted nicely with an effective septum thickness $DS = 3\text{mm}$. The dotted curve shows the prediction for $DS = 1.5 \text{ mm}$ (the calculated value). The probable cause for this high DS -value is the trajectory of the incoming beam in the injection septum.

For $T_{IKS} = 60 \mu\text{sec}$ and $\beta_L = 2\text{m}$ the efficiency plus optimized parameters are displayed in Fig. 4. Measurements in the Q_H value range $4.55 - 4.68$ are also shown. The DIP discrepancy at $Q_H = 4.67$ is related to the influence of the horizontal acceptance, which is not considered in this model, owing to the particular emittance filling adopted in the PSB. For other accelerators it may however be useful to approximate the horizontal acceptance by a cut, thus introducing three partial acceptance configurations with time, instead of only two as in the case of the PSB. The dots in the efficiency plot in Fig. 4 represent the gain expected when injection is performed with dynamic injection parameters.

Space Charge Effects

At high intensities 3.8×10^{12} ppp are injected with the injection point $Q_H, Q_V \approx (4.23, 5.32)$. A horizontal blow-up has been observed coming from the line $Q_H = 4.0$ about $400 \mu\text{sec}$ after injection during the trapping process. One msec after injection the beam is stable. These conditions make it difficult to observe the injection process behaviour. Some deductions can, however, be made.

In Fig. 5 the current build-up and incoherent Q_H -domain during the injection process in the PSB is shown for two typical Q_H values. The Q_H spread and shift-induced partial-acceptance change has been verified by a comparison of the DI -values around $Q_H = 4.67$ and the DIP values around $Q_H = 4.17$ for two incoming beam intensities (17mA and 86mA). The measured values correspond to the predictions from Figs. 5 and 4.

For low-beam intensities it proved impossible to create horizontally hollow beams. Injection of four turns with different T_B values - $T_{IKS}: 40 \mu\text{sec}$, $I_{LINAC}: 17\text{mA}$ and $\Delta E_{LINAC} \leq +35\text{keV}$ - should yield the horizontal amplitude distributions shown in Fig. 6. Different distributions have been measured with BEAMSCOPE⁶ (Fig. 6), which were confirmed by target measurements. The hole fills up and simultaneously the number of high amplitude particles increases. The powering of zero-harmonic octupoles, which create a Q_H spread, diminishes this effect.

The phenomenon may be explained from the lumped beam structure. The space charge forces working on each particle are modulated with the betatron frequency. For a 17mA Linac beam maximum movements of $\pm 0.5 \text{ mm}$ at the septum position have been calculated after five machine revolutions, assuming rigid slices and no Q_H spread at all. For different incoming beam intensities no significant influence of this movement on the injected intensity has been detected. This can be caused by the Q_H spread and the dependence of the sign of the particle movement on the initial conditions of slices and particles.

Acknowledgements

I am grateful to K. Schindl who has significantly contributed to this work. Many suggestions and remarks have been made by Prof. D. Harting, F. Sacherer and H. Schönauer. K.H. Reich and D. Dekkers supported this work. A. Faugier commented on the manuscript.

References

- 1) E.D. Courant, Fermi Lab. report NAL-FN-174.
- 2) C. Bovet, CERN SI/Note DL/69-18.
- 3) P. van der Stok, CERN/PS/OP/Int. 76-1.
- 4) K. Schindl, P. van der Stok, CERN/MPS/BR/Int.74-2.
- 5) K. Schindl, P. van der Stok, This conference.
- 6) Device developed by P. Kreml.

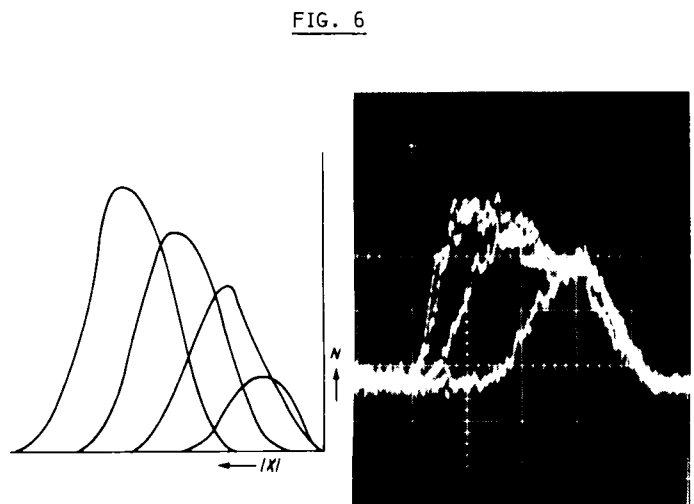
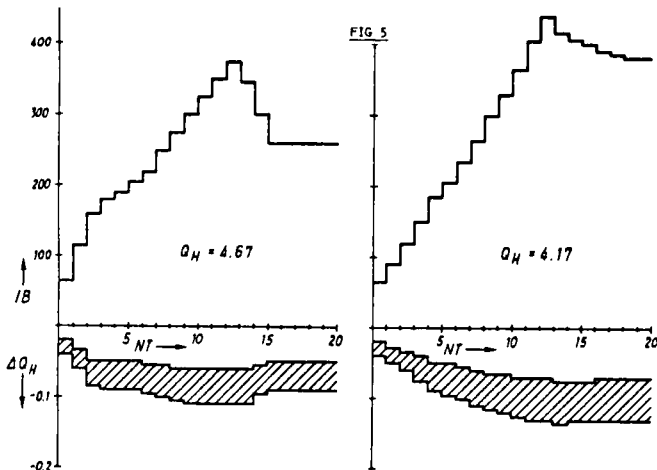


FIG. 6

COMITE D'INSTRUMENTATION

Réunion No 7 du 1.2.1977

Présents : O. Barbalat, S. Battisti, J.P. Bovigny, T. Dorenbos, B. Frammery,
C.D. Johnson, O. Kaestner, B. Kuiper, P. Lefèvre, G. Nassibian,
J.P. Potier, K.H. Reich, J.P. Riunaud, H. Schönauer, D. Simon.

Excusés : A. Krusche, P. Têtu.

ORDRE DU JOUR : Spécifications des moniteurs de pertes au Booster.

Comme base de discussion, un avant-projet, avec options diverses, concernant des moniteurs de pertes (BLM) pour le Booster a été présenté par C.D. Johnson.*

Cette proposition concerne un ensemble de détecteurs placés dans l'anneau Booster, ainsi que dans la ligne d'injection et la ligne de transfert 800 MeV.

Les signaux analogiques de ces détecteurs, instantanés et intégrés, seront multiplexés et accessibles depuis le MCR.

Le système sera entièrement compatible avec le nouveau projet de contrôle du PS par ordinateur, mais initialement pourra fonctionner de manière autonome: le traitement des signaux par un microprocesseur fournira un histogramme des pertes, rafraîchi 5 fois par cycle, sur un écran TV couleur.

I. LES DETECTEURS

Type de détecteur

La proposition indique que parmi les différents types de détecteurs utilisables - chambres à ionisation, détecteurs à l'état solide, photomultiplicateurs, multiplicateurs d'électrons - c'est ce dernier, Aluminium Cathode Electron Multiplier (ACEM) qui convient le mieux.

Compte tenu de la dynamique en énergie nécessaire, de l'expérience des moniteurs dans d'autres laboratoires et de l'expérience acquise au PS, le choix des ACEM a été retenu.

* A beam loss pattern monitor for the PSB - A draft proposal -
J.P. Bovigny, T. Dorenbos, O. Kaestner, C.D. Johnson

Nombre et positions des détecteurs

128 détecteurs seront placés autour des anneaux PSB à raison d'un moniteur par "scraper", c'est-à-dire 2 moniteurs pour chacune des 16 sections droites de chaque anneau.

32 autres moniteurs seront repartis entre la ligne d'injection, la ligne de transfert et quelques points particuliers de l'anneau (fenêtre du "beam scope", cibles et septa).

Soit au total 160 détecteurs dont les emplacements ont été discutés* au sein du Groupe Booster et sont rapportés en annexe.

Calibration et durée de vie

Les moniteurs sont calibrés avec des rayons γ et peuvent présenter une dispersion de $\pm 10\%$ entre eux.

D'autre part des mesures ont été effectuées sur des moniteurs placés sur les anneaux II et I pendant le run dernier, quand l'anneau I n'était pas accéléré. Ces mesures ont montré que l'on observe un signal 10 fois plus fort sur le moniteur de l'anneau dans lequel un faisceau est accéléré, et que les variations de niveaux en cours d'accélération sont de $\pm 20\%$.

De plus la perte d'une même quantité de protons à 50 ou à 80 MeV donne des signaux dans un rapport qui a été estimé par C.D. Johnson à environ 5 (à vérifier).

En ce qui concerne la durée de vie de ces détecteurs, D. Simon fait état de l'expérience que l'on a des moniteurs placés dans les zones d'éjection du PS. Dans ces zones, 8 détecteurs ACEM sont placés en des endroits très radioactifs (à 10 ou 20 cm des cibles avec des doses de 100 rad/h) et fonctionnent 6000 h/an. On en remplace environ un tous les ans.

II. TRANSMISSION ET TRAITEMENT DES SIGNAUX

Signaux analogiques

Les 128 moniteurs de l'anneau seront groupés par 2 (un groupe par section droite) et un seul signal analogique rapide (> 10 MHz) sera disponible par paire de moniteur.

Les 32 autres moniteurs fourniront chacun un signal analogique rapide.

Les signaux rapides seront intégrés pour être digitalisés. Ceux des 128 moniteurs de l'anneau représenteront la sortie de l'un ou de l'autre ou la somme des deux moniteurs d'une section droite, suivant que la haute tension sera appliquée à l'un ou l'autre ou aux 2 moniteurs. Une sortie de chaque intégrateur sera disponible pour observation au MCR.

* Résumé des résultats de la réunion du 4.2.1977 concernant le "Beam Loss Pattern Monitor" - K.H. Reich

Soit au total 96 canaux fournissant 96 signaux rapides et 96 signaux intégrés.

Le multiplexage de ces signaux, qui doit permettre d'observer 4 signaux intégrés quelconques et les 4 signaux rapides associés, sera étudié dans le cadre du nouveau projet de contrôle, par l'équipe "interfaces".

Signaux digitaux

Les signaux intégrés des 96 canaux seront convertis en digital par des ADC de 10 bits. La durée de l'échantillonnage dépend du nombre d'ADC utilisés. Avec un seul ADC et en balayant les 96 canaux, le temps d'échantillonnage atteint 3 ms. Avec un ADC par canal, soit 96 ADC, ce temps peut être réduit à 100 ns. Une solution intermédiaire avec 6 ADC donne un temps d'échantillonnage de 200 μ s.

Après discussion au sein du Groupe Booster les performances souhaitées pour l'électronique sont les suivantes:

- temps d'échantillonnage : 100 - 200 μ s
- temps minimum entre deux mesures : 50 ms (3 ms ultérieurement). Ce temps est limité par le programme de gestion de l'affichage.
- nombre de mesures par cycles : 5 au départ, 10 à 30 par la suite.

COÛT ET DUREE DU PROJET

Le projet pour 160 détecteurs et 96 canaux s'élève à environ 350 KFS. Un tel système pourrait être opérationnel environ 18 mois après accord final.

On souhaite que la partie traitement des données de ce projet s'intègre dans le cadre du nouveau projet contrôle (étude interface). De plus une homogénéité maximum devrait être visée pour des problèmes semblables, comme BLM-Booster, BLM-PS, et CODD. De ce fait les décisions définitives au sujet du traitement des données ne pourraient pas normalement être prises avant l'automne, date à laquelle le cadre de l'interface sera figé.

On va cependant essayer de faire progresser l'étude interface pour que vers les mois de mai/juin un accord puisse être atteint (au niveau du Comité d'Instrumentation et même au MAC) quant aux (i) spécifications définitives des performances, (ii) budget, (iii) délai de livraison du système BLM-Booster.

Dans la proposition formelle, outre les trois points ci-dessus, le coût en personnel et la main d'oeuvre temporaire seront évalués. Le MAC devrait alors aussi se prononcer au sujet de la priorité relative de ce projet.

J.P. Riunaud

Distribution

Comité d'Instrumentation (+ invités)

MAC

MST

PSS, EiC, BS

Personnes citées

ANNEXE

Résumé des résultats de la réunion du 4.2.1977
concernant le "Beam Loss Pattern Monitor"

Présents : G. Baribaud, M. Chanel, B. Frammery, C. Metzger, G. Nassibian,
K.H. Reich, K. Schindl.

Excusés : J.P. Delahaye, H. Schönauer.

1. EMPLACEMENT DES ACEMs

Dans le sens du faisceau :

<u>Nombre</u>	<u>Emplacement</u>	<u>Commentaire</u>
1	I-Q9, entrée, en dessous ?	position exacte à confirmer
1	I-DIS, sortie	
4	I-BV, entrée	pour obs. fonct. I-SV
4	1RB1, entrée	pour obs. font. I-SH
4x16 (14)	RB1, sortie (entrée)	a) emplacement exact à décider après MES b) dans l'hypothèse de 2 ACEM/per.
4x16	RB2, entrée	
4	obturation du beamscope	
4	9 RB1, entrée	pour obs. fonct. cibles
4	ES	emplacement exact à voir
3	T-SV1, 2, sortie	
2	T-Q1 ou 2	" " " "
1	T-Q3, sortie	
1	T-BH	" " " "
1	TS-BH	" " " "
2	Mobiles (lignes d'injection et transfert jusqu'au dump)	
<hr/>		
160		

2. PERFORMANCE DE L'ELECTRONIQUE

- a) Temps d'échantillonnage : 100 - 200 μ s
- b) Espacement entre mesures (digitales) : 50 ms (3 ms ultérieurement)
- c) Nombre de mesures/cycle : 5 au départ, éventuellement 10-30 plus tard.

3. DIVERS

- a) M. Chanel étudiera la perturbation magnétique causée par les ACEMs blindés.

- b) Mesures souhaitées en vue de clarifier l ci-dessus:
 - ACEMs en RB1 entrée + sortie, RB2 entrée dans une période autre que 8 (qui contient l'obturation).
M. Chanel utilise la période 6 comme référence; il y a fait le plus de mesures, d'où l'intérêt de la choisir aussi pour les mesures avec les ACEMs.
 - "Scraper" regardé par ACEM en amont et ACEM en aval.

K.H. Reich