

GROUPE DE TRAVAIL DUR L'AIMANT DU CPS

RAPPORT SUR L'ETAT DE L'AIMANT ET SON EVOLUTION

MESURES A PRENDRE POUR ASSURER SA SURVIE

Rédaction : R. Gouiran

Membres du groupe de travail : A. Asner, C. Bovet, C. Germain (président),
R. Gouiran, (secrétaire), W. Hardt, U. Jacob,
P. Lefèvre, G. Plass, F. Rohner, C.E. Rufer.

Distribution: ouverte

Membres du groupe de travail
Chefs de groupes MPS
G.L. Munday
C.J. Zilverschoon

Groupe de Travail sur l'Aimant du CPS

RAPPORT SUR L'ETAT DE L'AIMANT ET SON EVOLUTION

MESURES A PRENDRE POUR ASSURER SA SURVIE

RESUME

Comme le CPS doit être encore utilisé plus de dix ans à haute intensité et comme son aimant présente déjà des signes de vieillissement, un groupe de travail a été formé pour étudier les conditions de sa survie.

Les principaux dégâts proviennent de l'effet combiné de la dégradation des matières organiques fortement irradiées et des forces magnétiques pulsées. Les tôles des blocs commencent à se décoller, elles se déplacent et risquent de venir arracher les talons des enroulements polaires déjà fortement affaiblis par les radiations. L'isolation des bobines principales commence à se dégrader.

Afin de mieux connaître la relation entre le décollement des tôles et leur irradiation, toute une série de mesures de doses a été entreprise, ce qui a permis de définir le risque d'incident en fonction de la dose reçue et de connaître ainsi la fiabilité des aimants.

Les hypothèses les plus probables d'utilisation du CPS comme instrument de physique à 26 GeV/c, comme injecteur pour les ISR et le SPS sont passées en revue jusque vers 1985, avec différentes hypothèses sur l'intensité accélérée. On pourra alors prédire plus ou moins l'évolution de la fiabilité

de l'aimant ainsi que les réparations à faire sur les blocs et les échanges de composants trop irradiés tels qu'enroulements polaires ou bobines principales. Il faut s'attendre à un rythme de 2 réparations par an passant progressivement à 3 par an à partir de 1978 environ.

Pour sauvegarder l'aimant, nous avons entrepris de placer un cerclage des pôles des blocs d'extrémité, avec deux fortes plaques d'acier inoxydable serrées à 1 tonne par des tiges isolées en cuivre au beryllium. Une quarantaine de nouveaux blocs d'acier, plus résistants aux radiations, avaient déjà été fabriqués par la maison Siemens avec le stock d'acier restant au CERN. Au cours de ces réparations, les enroulements polaires sont conservés si possible ou alors remplacés par d'autres enroulements pris dans la réserve ACEC d'origine ou dans un lot de 40 pièces commandées par la suite à la maison BBC et résistants mieux aux radiations. Les bobines principales, bien que dégradées, peuvent être encore utilisées. Il serait bien néanmoins de prévoir une commande de quelques jeux de galettes de réserve.

Etant donné qu'un nombre important d'enroulements polaires doit être changé, et compte tenu des exigences accrues sur les qualités du faisceau accéléré à haute intensité et haute énergie, il a été décidé de lancer une étude sur des nouveaux enroulements polaires plus perfectionnés pour remplacer les anciens.

Ainsi avec des réparations appropriées et des commandes suffisantes pour du matériel de réserve amélioré (enroulements polaires et bobines), la survie de l'aimant paraît assurée.

Comme la radioactivité induite peut être un facteur limitant les possibilités de maintenance, donc d'exploitation, une étude a permis de montrer la possibilité de prédire et d'évaluer les doses reçues par le personnel. Moyennant un certain nombre de règles, la radioactivité induite, quoique forte, ne devrait pas devenir un obstacle insurmontable pour le fonctionnement de l'accélérateur.

Au cas, envisagé initialement, où il aurait fallu changer radicalement l'aimant de l'accélérateur, tout en conservant l'alimentation, le système RF, le système à vide et la topographie des faisceaux extraits, nous avons étudié deux possibilités de remplacement : soit en réutilisant les aimants des ISR (avec une limitation à 19 - 20 GeV/c), soit en montant un accélérateur à fonctions séparées. Ces solutions réclameraient un arrêt beaucoup plus long et des dépenses plus importantes que pour la solution retenue.

En annexes, nous donnons un état général de l'aimant en 1974 et un inventaire général des réserves en blocs, enroulements polaires, bobines et berceaux.

1. Introduction

Le synchrotron CPS, mis en service en 1959, a maintenant 15 ans d'âge. Il est utilisé dans des conditions plus difficiles que celles qui avaient été envisagées lors de sa construction et il est prévu de prolonger son existence encore longtemps afin de remplir les anneaux de stockage ISR et de servir d'injecteur pour le grand synchrotron SPS.

L'aimant du CPS a commencé à présenter des signes de vieillissement dangereux dès 1965, d'autant plus rapidement que l'intensité des protons accélérés augmentait. De 1960 à 1973, cette intensité est passée de $1,1 \cdot 10^{11}$ à $6 \cdot 10^{12}$ protons par impulsion, soit un facteur supérieur à 50! Quant au nombre d'impulsions du champ magnétique, il dépassait cent millions à la fin de 1973 pour environ 10^{20} protons accélérés à cette date.

Sous l'effet combiné de la destruction des matières organiques irradiées et des forces magnétiques mises en jeu, des tôles de l'aimant ont commencé à se décoller, venant arracher certains talons d'enroulements polaires déjà affaiblis par l'irradiation. En même temps l'isolement des bobines principales se dégradait.

Il a donc été décidé, dès décembre 1971, de créer un groupe de travail ("CPS Magnet Working Group") dont les tâches essentielles étaient :

1. Analyse de la situation et de son évolution.
2. Etude des moyens pour sauvegarder et améliorer l'aimant dans la mesure du possible.
3. Présentation de propositions pour la rénovation ou le remplacement éventuel de l'aimant actuel si nécessaire.

Ce groupe était composé à l'origine de dix membres qui se sont réunis une douzaine de fois et ce rapport en présente les conclusions.

Ses membres sont : A. Asner, C. Bovet, C. Germain (président), R. Gouiran (secrétaire), W. Hardt, U. Jacob, P. Lefèvre, G. Plass, F. Rohner, C.E. Rufer. Ce groupe a bénéficié en plus de nombreuses collaborations, en particulier de la part de O. Barbalat, J. Gareyte, M. Gyr, R. Holsinger, C. Mazeline, ainsi que du groupe de la Physique de Santé.

2. Analyse de la Situation et de son Evolution

2.1 Etat de l'Aimant d'Origine et Signes de son Vieillissement

2.1.1 Composition Principale de l'Aimant du CPS

Le CPS est composé de 100 unités d'aimant dans l'anneau, plus une 101ème unité servant de référence magnétique. Chaque unité comprend deux demi-unités F ou D formées de blocs en forme de C ayant leur culasse de retour soit vers l'extérieur de l'anneau, soit vers l'intérieur (1,2). Deux types de blocs, dits "ouverts" ou "fermés" suivant que l'entrefer étroit est du côté de la culasse ou du côté opposé, permettent de composer 4 types d'unités toujours constituées de 10 blocs, 5 ouverts et 5 fermés. Ce sont les types :

R = type D-F, culasse à l'extérieur
S = " F-D, culasse à l'extérieur
T = " F-D, culasse à l'intérieur
U = " D-F, culasse à l'intérieur

La répartition actuelle est indiquée à l'annexe (1).

Sur les pôles de chaque demi-unité se trouve montée une paire d'enroulements polaires (PFW) pour le haut et le bas. Il y a ainsi 4 types d'enroulements polaires, avec 101 pièces de chaque type, soit les

FR et FL pour les secteurs F, et les DR et DL pour les secteurs D.

Sur chaque unité se trouve montée une paire de bobines principales, pour le haut et le bas. Chaque bobine étant faite de 2 galettes de 5 conducteurs chacune, il y a donc 8 types de galettes groupées en 2 jeux de 4, un jeu dit ABCD pour les unités R et S et un jeu dit EFGH pour les unités T et U.

2.1.2 Les Blocs de l'Aimant d'Origine

Fabriqués chez Ansaldo San Giorgio (Gênes, Italie), avec de l'acier provenant de Cornigliano (Gênes, Italie), ces blocs sont constitués de 262 ± 1 tôle d'acier de 1,5 mm à faible teneur en carbone, collées entre elles au moyen d'une araldite epoxyde (type XV de CIBA, Bâle, Suisse). L'isolation entre tôles est obtenue par une feuille de papier intercalaire. Les données de référence pour ces blocs (soit un dixième d'unité d'aimant PS) sont : longueur = 417 mm, poids complet = 2'890 kg, surface = $0,929 \text{ m}^2$, densité de l'acier = 7,85, facteur de remplissage = environ 0,95. Ce dernier facteur est simplement le rapport du poids réel sur le poids équivalent au volume multiplié par la densité de 7,85.

Décollement des Tôles d'Extrémité

Le champ magnétique pulsé exerce sur les extrémités des forces tendant à décoller les tôles, d'autant plus facilement que la colle a été détruite plus ou moins par l'irradiation.

Etant donné la complexité de la géométrie et de la construction, il est assez difficile de faire une estimation sûre de ces forces. Néanmoins nous pouvons résumer les conclusions des différents travaux sur ce sujet (3,4,5,6) :

- a) la force totale appliquée sur toute la surface extérieure de la dernière tôle est d'environ 2'400 kg,
- b) la force nécessaire à appliquer sur une plaque de serrage d'un pôle pour empêcher les tôles de se déplacer si elles étaient toutes décollées, serait de 600 kg environ. Il ne faut pas oublier que l'ensemble de l'unité est bloqué par trois grands tirants qui la traversent de part en part; donc le déplacement des tôles décollées ne se produit qu'au voisinage de la surface des pôles, là où la colle est très dégradée,
- c) les tôles commencent à se décoller progressivement et le décollement ne se produit pas d'un seul coup sur tout le bloc. Nous avons constaté jusqu'à une vingtaine de tôles décollées, mais en général il n'y a que quelques tôles qui se décollent. La force à appliquer pour les maintenir est donc inférieure à 600 kg.

A ce jour, nous avons constaté que 26 unités s'étaient décollées, le plus souvent à une seule extrémité. L'état exact de l'aimant sera décrit au paragraphe 3.2, mais nous pouvons dire que sur ces 26 unités, 6 ont été remplacées par de nouvelles unités, 18 ont été cerclées d'un ou deux côtés et 4 sont encore à réparer d'un ou deux côtés. Les plus grands dégâts apparaissent près des cibles internes (01, 06 et 08).

2.1.3 Dégradation des Enroulements Polaires

A la suite des irradiations, l'araldite du talon devient cassante et s'effrite, en même temps que l'isolation des câbles de sortie devient aussi dure, cassante et désagrégée. A ce jour 24 enroulements polaires ont été perdus de ce fait. Les enroulements d'origine étaient

fabriqués par ACEC (Charleroi, Belgique). Si ces enroulements n'étaient pas endommagés par les tôles décollées, ils pourraient peut-être supporter plus de 10^9 rad, à condition de ne pas être touchés.

2.1.4 Dégradation des Bobines Principales

Les bobines principales, fabriquées aussi par ACEC sont en aluminium, entouré de ruban de papier-mica, de ruban de fibres de verre, enrobé dans une résine synthétique dite Thermalastic^(7,8). A la suite des irradiations, certaines bobines présentent des dégradations du Thermalastic telles que l'isolation est assurée uniquement par le mica feuilleté. Néanmoins bien qu'ayant perdu beaucoup de leurs propriétés d'isolation et surtout leur étanchéité à l'eau, ces bobines sont encore utilisables pour autant qu'elles ne soient ni arrosées accidentellement ni trop manipulées mécaniquement⁽⁹⁾. Dans ces conditions, il est possible que ces bobines puissent supporter au moins 10^9 rad, ce qui correspond à une irradiation de 4 à $5 \cdot 10^9$ rad au point de référence sur les enroulements polaires tel qu'il est défini au par. 2.2.

2.1.5 Dégradation du Circuit de Refroidissement

Des améliorations apportées au système de refroidissement (remplacement de certains tuyaux de caoutchouc par des tuyaux métalliques, amélioration des caoutchoucs restants et des joints...), ainsi que la possibilité d'assurer une maintenance régulière, font que ce système ne pose pas de problèmes majeurs pour l'avenir de l'aimant CPS.

2.2 Irradiation et Fiabilité de l'Aimant

La dégradation des unités d'aimant semble essentiellement être causée par les irradiations qu'elles ont reçues, associées aux contraintes mécaniques provenant des champs magnétiques pulsés. Des détails sur les problèmes rencontrés peuvent être trouvés dans les réf. (7,10,11,12,13,14, 15,16,17,18). Nous avons essayé de déterminer les doses reçues par chaque

unité d'aimant depuis le début des opérations ⁽¹⁹⁾ afin d'en déduire la probabilité pour que les tôles soient décollées à partir d'une certaine dose. Les détails de cette étude peuvent être trouvés dans réf. ^(20,21)

Les données présentées ne doivent être considérées que comme des ordres de grandeur, car toutes ces mesures sont entâchées de nombreuses erreurs, à savoir : les statistiques d'opération ⁽¹⁹⁾ du CPS ne sont jamais absolument précises, en particulier pour les temps de "Machine Development" et "Setting Up", la dosimétrie elle-même donne des résultats variables suivant le type de dosimètre et le genre de radiations, les corrélations entre les pertes dans l'accélérateur et les doses reçues sont difficiles à dégager. Les doses sont normalisées en les ramenant à l'énergie absorbée dans le fer au coin amont du premier bloc d'acier, à 5 cm sous l'axe du CPS. Nous avons comparé différentes données expérimentales et théoriques (22,23,24,25,26,27,28,29,30,32,33,34,35,36) et nous avons aussi fait de nombreuses mesures d'irradiation au cours des années 1972 et 1973.

Les doses reçues par les unités peuvent être divisées en plusieurs groupes :

- dose reçue directement par l'unité qui suit la source et valant $2 \cdot 10^{-10}$ rad/int.p pour une cible dans une section droite courte, $2,5 \cdot 10^{-10}$ rad/int.p pour un septum sur le côté d'une section droite courte. Les cibles "dump" sont considérées dans ces cas. Le nombre de protons interagissant (int.p) se déduit des "protons alloués" en connaissant les efficacités des sources de radiations.
- dose reçue par le reste de l'anneau et causée par une opération donnée. Dans les références ^(21,37), nous donnons une liste de ces corrélations et des facteurs de corrélation, ainsi que les hypothèses sur les efficacités des cibles et des éjections.
- dose causée par les injections.

- dose générale, difficile à corréler avec une opération donnée et liée à l'accélération en général. Cette dose dite "banale" est estimée à $4,5 \cdot 10^{-13}$ rad/acc.p par unité, en moyenne.

L'annexe 1 montre la répartition des doses à la fin de 1973 et la Fig. 1 représente l'histogramme correspondant, pour les unités qui sont actuellement dans l'anneau. (Il faut rappeler que 4 unités très irradiées (ayant reçu entre $5 \cdot 10^8$ et 10^9 rad) ont été démontées et n'apparaissent plus sur cet histogramme. Il s'agit de 2 unités en position 01, une en 06 et une en 08). La fiabilité f est déterminée, pour chacune des tranches de l'histogramme, comme étant $1 - p$, p étant la probabilité que les tôles soient décollées dans une unité ayant reçu une dose dans cette tranche, constatée expérimentalement. Il est possible de déduire une courbe de fiabilité d'origine en fonction de la dose R reçue au point de référence, en rad, donnée par : $f = 0,83 \log \frac{8 \cdot 10^8}{R}$ pour $R > 5 \cdot 10^7$. Cette courbe est assez imprécise et ne représente que des probabilités autour desquelles nous avons de grandes fluctuations dues probablement à des différences dans la qualité de la fabrication au départ. Aussi le point où elle commence à descendre au-dessous de $f = 1$ est fort imprécis, en particulier, pour ce qui concerne les unités dans la région de l'injection Linac pour lesquelles les doses reçues à basse énergie sont mal connues et leurs effets mal estimés. Néanmoins, cette courbe de fiabilité reproduit assez fidèlement la dégradation de la résistance mécanique de quelques échantillons d'araldites de moulage soumis aux radiations ⁽¹⁷⁾. On peut en déduire que le risque de dégradation est pratiquement nul au-dessous de $3 \cdot 10^7$ rad, et qu'il devient presque total au-dessus d'environ 10^9 rad.

Mais il est apparu qu'après avoir réparé les unités qui s'étaient décollées les premières, la fiabilité des unités restantes se révélait meilleure et que la formule ci-dessus donnant f devenait pessimiste d'au moins 15% sur f en 1974. Cette observation confirmerait la possibilité d'une assez grande dispersion dans la qualité du collage des tôles.

2.3 Hypothèses sur l'Utilisation Future du CPS

Certaines indications sur le futur du CPS tant comme accélérateur pour la physique à 26 GeV/c que comme injecteur pour les ISR ou les SPS peuvent être trouvées dans réf. (38,39,40,41).

a) De 1974 à 1975

Le CPS va progressivement s'établir à un niveau d'intensité intermédiaire d'environ $5 \cdot 10^{12}$ protons par cycle d'une durée moyenne de 2,4 s. Le nombre de protons accélérés pour la physique par an passerait de $1,4 \cdot 10^{19}$ à $3,5 \cdot 10^{19}$, se répartissant en : 25% sur les cibles internes (abaissé probablement jusqu'à 10% à la fin de la période), 25% sur les éjections rapides (y compris ISR), et 50 à 65% sur les éjections lentes (Est et Ouest). A ces chiffres s'ajoutent environ 5% des protons accélérés perdus sur des décharges internes ("dumps"). Les énergies seraient 26,3 GeV pour les ISR, 24 à 26,3 GeV/c pour la physique CPS avec des pointes exceptionnelles à 28 GeV/c.

b) De 1975 à 1978

L'éjection lente vers l'Ouest s'arrêterait au moment de la conversion du Hall Ouest pour le SPS. Le SPS sera mis progressivement en service mais à intensité réduite initialement. Les ISR seraient remplis avec la meilleure luminosité possible. L'intensité accélérée, avec le synchrotron injecteur ("Booster"), devrait pouvoir atteindre à la fin 10^{13} p/p, c'est-à-dire passer progressivement à $7 \cdot 10^{19}$ protons par an dans le cas maximum. Les allocations pour cibles internes limitées à 10^{12} p/p varieraient entre 5% et 20%, les éjections rapides continueraient à prendre 25% et l'éjection lente, réduite au seul Hall Est à la fin, prendrait de 55 à 70%. Il convient d'ajouter encore 5% sur les décharges internes. Les énergies resteraient les mêmes qu'en a) avec en plus 10 à 14 GeV/c pour l'injection SPS.

c) De 1978 à 1983-1985

Le SPS prendrait environ $2,8 \cdot 10^{19}$ proton/an et la physique à 26 GeV/c entre $2,8 \cdot 10^{19}$ et $5,6 \cdot 10^{19}$ proton/an suivant les conditions choisies. Les cycles d'injection à 10-14 GeV/c SPS, d'injection à haute énergie ISR et de physique à haute énergie CPS, seraient combinés et imbriqués. L'intensité accélérée serait choisie entre $5 \cdot 10^{12}$ et 10^{13} p/p. Les cycles varieraient entre 3,6 sec pour une injection à 10-14 GeV/c SPS seule et 8 sec pour une injection à 10-14 GeV/c suivie de deux impulsions à 26 GeV/c pour la physique CPS-ISR.

Les allocations pour la physique à 24-26 GeV/c seraient de 5 à 20% pour les cibles internes suivant la situation choisie, de 15% pour les ejections rapides et de 65 à 80% pour l'éjection lente Est. Il est probable que les pertes sur les décharges internes pourraient être abaissées progressivement de 5% à 3%.

Il nous est impossible à présent d'avancer des hypothèses raisonnables sur l'utilisation du CPS au-delà de 1985 que nous avons considéré comme une date limite pour cette prospective.

2.4 Prévisions d'Irradiation et Evolution de la Fiabilité du CPS Actuel

En extrapolant les données du tableau de l'annexe 1 en fonction des prévisions d'opération, nous pouvons faire quelques prévisions sur les doses et sur la fiabilité future de l'aimant.

Le tableau 1 ci-dessous (extrait de 41), montre l'augmentation de la valeur de paramètre TIR suivant les différentes hypothèses considérées. TIR signifie "Total Irradiation in Ring" et est la somme des 100 doses de radiation, en rad, mesurées au point de référence, 5 cm sous l'axe à l'entrée des unités.

Tableau 1, TIR, en rad

Prot. Accel. à 25 GeV/c	Variantes	jusqu'à fin 1975	fin 1977 (+2 ans)	fin 1983 (+6 ans)
$5 \cdot 10^{12}$ p/p	A ₀ = pas de cible interne après 1975	$2,0 \cdot 10^{10}$	$2,48 \cdot 10^{10}$	$4,03 \cdot 10^{10}$
	A ₁ = 10% sur cibles internes	$2,0 \cdot 10^{10}$	$2,76 \cdot 10^{10}$	$4,98 \cdot 10^{10}$
	A ₂ = 20% sur cibles internes	$2,0 \cdot 10^{10}$	$3,02 \cdot 10^{10}$	$5,89 \cdot 10^{10}$
10^{13} p/p	B ₀ = pas de cible interne après 1975	$2,0 \cdot 10^{10}$	$2,97 \cdot 10^{10}$	$5,49 \cdot 10^{10}$
	B ₁ = 5% sur cibles internes	$2,0 \cdot 10^{10}$	$3,23 \cdot 10^{10}$	$6,29 \cdot 10^{10}$
	B ₂ = 10% sur cibles internes	$2,0 \cdot 10^{10}$	$3,62 \cdot 10^{10}$	$7,76 \cdot 10^{10}$

Pour illustrer cette valeur, considérons un TIR d'environ $5 \cdot 10^{10}$ rad fin 1983 (variante A1). L'histogramme correspondant à son maximum à $2 \cdot 10^8$ rad et s'étend jusqu'à $5 \cdot 10^9$ rad pour l'unité la plus exposée. Considérant la fiabilité des unités individuelles, nous trouvons qu'environ 50 unités seraient à réparer. En retranchant celle déjà faites en 1974, il nous resterait environ 25 unités à réparer d'ici 1983 au rythme de 2 par an dans les premières années, pour atteindre 3 par an à partir de 1978 environ.

Ceci suppose quelques échanges standard d'enroulements polaires et même de bobines que nous pourrions commander à temps sans difficultés.

3. Action pour la Sauvegarde et l'Amélioration de l'Aimant Actuel

3.1 Réparation de l'Aimant et Remplacement de Certains Eléments

3.1.1 Anciens Blocs Ansaldo

Lors de la constatation des premiers dégâts, certains blocs Ansaldo ont été perdus à cause d'une dégradation trop avancée, accompagnée

de corrosion et de radioactivité intense. Pour éviter cela, il suffit d'empêcher le mouvement des tôles décollées en cerclant les blocs d'extrémité au moyen de 2 fortes plaques d'acier inoxydable comprimant la région des pôles et maintenues par deux tiges isolées en cuivre au beryllium traité (Fig. 2). L'épaisseur de la plaque (entre 6 et 8 mm), ainsi que le diamètre des tiges (8 mm), est limité par l'espace disponible. Il est même parfois nécessaire de modifier légèrement le premier support des bobines principales pour arriver à loger les tiges, compte tenu des irrégularités géométriques des enroulements polaires ACEC.

Comme la force à appliquer sur la plaque d'acier capable d'empêcher les tôles décollées de se déplacer est évaluée à 600 kg environ (voir § 2.1.2), les tiges sont mises en traction au moyen d'un vérin afin que la force appliquée à la plaque soit d'environ 1'150 kg, soit un facteur de sécurité d'environ 2.

La réparation peut se faire sur place dans l'anneau après avoir démonté section droite et chambre à vide, et déplacé l'unité si nécessaire. Une équipe de deux personnes peut effectuer la réparation complète des deux blocs d'extrémité, soit 4 cerclages, en une journée environ en ce qui concerne cette réparation elle-même. Dans toute la mesure du possible, les enroulements polaires sont conservés, sauf s'ils sont trop abîmés ou si leur géométrie n'est pas compatible avec la pose des tiges. (L'inventaire du stock de réserve est donné dans l'annexe 2). S'il ne faut pas changer les enroulements polaires, alors le coût du matériel de cerclage pour une unité complète est d'environ 1'000 F.S.

En plus de 1'010 blocs Ansaldo montés à l'origine, il y en avait 10 en réserve qui furent montés sur une nouvelle unité (T37 en 01), puis en partie récupérés (voir annexe 2).

3.1.2 Nouveaux Blocs Siemens

Au début des réparations, un certain nombre d'unités d'aimant très dégradées ont été démontées et remplacées par des unités nouvelles fabriquées en atelier. Dans ce cas, les blocs provenaient soit des unités démontées, soit de blocs Ansaldo d'origine en réserve, soit de nouveaux blocs fabriqués par la maison Siemens, à partir d'un stock d'acier d'origine se trouvant encore au CERN.

Cette firme a refait un outillage pour fabriquer des blocs dont la géométrie et le champ magnétique sont parfaitement identiques à ceux des blocs Ansaldo ⁽⁴²⁾. Les dimensions et le coefficient de remplissage ont été observés. L'isolement entre tôles est obtenu par phosphatage et en plus un remplissage intercalaire en fibre de verre donne les bonnes dimensions. La colle araldite tenant les tôles a été spécialement étudiée pour supporter des radiations jusqu'à 10^9 rad.

Le stock d'acier a permis de fabriquer une quarantaine de ces blocs (voir annexe 2), et cinq nouvelles unités ont été montées qui sont composées en totalité avec ces blocs (unité étalon U17) ou partiellement (unités T38 en O1, U18 en O2, R36 en O6, U16 en O8). Installés surtout aux extrémités des unités, ces blocs ont été renforcés par des plaques d'acier de 4 mm, de forme comparable à celles de la Fig. 2, mais vissées directement dans les blocs sous les pôles à chaque extrémité.

3.1.3 Enroulements polaires ACEC d'Origine

Certains enroulements très dégradés sont irrécupérables et doivent être remplacés par des enroulements pris sur la réserve (voir annexe 2). Malheureusement cette réserve n'est pas seulement limitée, mais pas entièrement utilisable non plus, soit à cause d'une géométrie trop débordante qui ne permet pas de placer les tiges du cerclage, soit à cause de défauts internes (mauvais alignement des conducteurs, connexions

coupées etc...). En effet, le premier choix dans la livraison ACEC a été utilisé de préférence lors du montage initial du PS. Le maximum est tenté pour récupérer le plus possible d'enroulements polaires afin de faire durer la réserve le plus longtemps possible. Il arrive parfois qu'en démontant les enroulements pour faire un cerclage, ceux-ci rendus cassants par les radiations soient abîmés par la manipulation et doivent être changés de ce fait, malgré les précautions prises. Pour diminuer ce risque, nous nous efforçons d'installer le cerclage en soulevant les enroulements polaires sur place mais sans les sortir de l'entrefer.

3.1.4 Nouveaux Enroulements Polaires BBC

Une commande de 40 enroulements polaires strictement identiques à ceux déjà existants (10 de chaque type), a permis de faire face aux remplacements les plus exposés. En effet, ces enroulements, déjà supérieurs aux originaux en ce qui concerne la géométrie générale et la disposition des conducteurs, sont plus résistants aux radiations et devraient pouvoir supporter $3 \cdot 10^9$ rad sans dommage.

3.1.5 Bobines Principales ACEC.

Comme indiqué au § 2.1.4, les dégradations des bobines ne semblent pas devoir entraîner dans l'avenir un remplacement systématique, tout au moins à court terme. Cependant une commande de 4 jeux complets du type EFGH a été passée en 1967 (prix environ 57'000 FS par jeu). Il y avait en plus une réserve d'origine pour un jeu ABCD et un jeu EFGH (voir annexe 2).

Il est possible d'envisager un entretien des bobines en réserve en les étuvant (par passage de courant par exemple) et en les recouvrant ensuite d'un nouveau vernis étanche et résistant aux radiations.

Ces bobines sont supposées résister à 10^9 rad, ce qui correspond pour les galettes les plus près du faisceau, compte tenu de leur position sur l'unité, à $4 \cdot 10^9$ rad au point de référence sur les enroulements polaires.

Il faut cependant envisager dans l'avenir l'éventualité du remplacement de quelques bobines dans les régions les plus exposées (près des cibles internes et près des "dumps" entre autre).

3.2 Etat de l'aimant en Février 1974, après le dernier grand arrêt

Les détails sont donnés dans les annexes 1 et 2. En résumé nous avons :

a) Unités de nouvelle fabrication, avec des blocs Siemens au moins aux deux extrémités, avec plaques de renfort vissées, enroulements polaires BBC, bobines échangées (provenant de la réserve ou de la deuxième commande) : aux positions 01, 02, 06 et 08, soit un total de 4 actuellement dans l'anneau. Il convient d'ajouter l'unité étalon (U 17) qui a été fabriquée en plus pour le programme des mesures magnétiques. Le total final est donc 5.

b) Unités rénovées, c'est-à-dire remises en état en atelier avec cerclage des deux blocs d'extrémités, et des bons enroulements polaires ACEC ou BBC: aux positions 64 (U 9) et 100 (R 6): total = 2.

c) Unités cerclées des deux côtés, c'est-à-dire réparées sur place dans l'anneau aux deux extrémités, avec des enroulements polaires encore en assez bon état: aux positions 07, 10, 24 et 62, soit un total de 4 .

d) Unités cerclées d'un seul côté, donc réparées sur place comme en c) mais à une extrémité seulement (amont am ou aval av): aux positions 09 am, 12 am, 22 am, 23 av, 28 av, 34 am, 48 am, 49 am, 58 am, 63 am, 70 av et 96 av; total 12.

e) Unités encore endommagées dans l'anneau après l'inspection de Février 1974, et à réparer dès que possible aux positions 09 av, 42 am et 74 av; total 3.

f) Unités en réserve, sorties de l'anneau et devant être renouées en atelier : R 15 et U 3; total 2.

g) Unités encore dans l'état d'origine: 75 dans l'anneau plus l'unité de référence no. 101.

h) Unités sorties de l'anneau et démontées pour être remplacées: T 30 de 01 en 1966, T 37 de 01 en 1970, U 4 de 08 en 1970, soit un total de 3 unités "disparues".

L'unité T37 avait été fabriquée avec des éléments de réserve. Les éléments de ces unités, en bon état avec ou sans réparation, ont été utilisés pour constituer en partie les unités de nouvelle fabrication a).

3.3 Améliorations Désirables de l'Aimant

Il est apparu qu'un certain nombre d'améliorations souhaitables pouvaient être apportées à l'aimant à l'occasion de sa rénovation.

a) Projets de Nouveaux Enroulements Polaires

Au moment de commander des enroulements neufs de rechange, il a été décidé de surseoir momentanément à ces commandes en attendant de savoir s'il ne vaudrait pas mieux installer des nouveaux enroulements plus perfectionnés pour répondre aux exigences accrues concernant le champ magnétique qui sont entraînées par l'augmentation de l'intensité du faisceau à haute énergie. Cette question est en cours d'étude (43, 44, 45, 46, 47, 48, 49). Elle comprendra aussi le projet des nouvelles alimentations correspondantes.

Deux problèmes se posent:

1. A-t-on le temp d'attendre cette installation avec la réserve de matériel dont nous disposons?
2. Pourrait-on faire l'échange complet des 400 enroulements polaires, accompagnés du nouveau cerclage de tous les 200 blocs d'extrémités des unités, au cours d'un seul arrêt annuel du PS ayant si possible la durée habituelle?

A la première question nous pouvons répondre que fin 1977 semble la date limite pour notre réserve actuelle d'enroulements polaires, compte tenu de l'augmentation de l'intensité accélérée vers 1978. A la deuxième question nous pouvons répondre qu'un arrêt d'environ dix semaines devrait être suffisant pour faire ce travail en une seule fois (50, 51). Si cette durée est trop longue ou si cette transformation radicale semble trop risquée, il est toujours possible d'étudier des enroulements polaires de l'ancien type mais légèrement améliorés par des connexions auxiliaires tout en restant compatibles avec les anciens, ce qui permettrait un échange plus progressif et moins osé.

b) Amélioration de Certains Composants

Certains composants comme les joints et tuyaux de caoutchouc ou les plaquettes de connexion des enroulements polaires, peuvent être progressivement améliorés dans le cadre de la maintenance générale.

c) Gain d'Espace pour Loger les Plaques de Renfort

Une proposition de modification des manifolds et des connexions pour le vide des sections droites (31) donnerait un gain de place permettant de mettre une plaque de renfort plus épaisse et un talon d'enroulement polaire aussi plus épais.

3.4 Survie Probable de l'Aimant Rénové

Il n'est pas encore possible de prédire la durée de vie exacte d'un cerclage actuel car les essais de longue durée en impulsions pour étudier la fatigue restent à faire. Cependant toute tige cassée pourra être remplacée, même si cet accident peu probable entraîne la destruction d'un enroulement polaire. Il faudra aussi faire cette étude sur le cerclage définitif prévu en fonction des nouveaux enroulements polaires, et s'assurer que la durée de vie est illimitée en pratique. Les enroulements polaires eux-mêmes construits avec des matériaux résistant mieux aux radiations, devraient pouvoir supporter au moins $3 \cdot 10^9$ rads avant qu'il faille les remplacer par des enroulements de réserve prévus à l'avance.

Quant aux bobines, il sera nécessaire d'en remplacer quelques-unes éventuellement lorsque l'unité aura pris $4 \cdot 10^9$ rads. Malheureusement cette opération est trop importante pour être faite dans l'anneau et il faudra procéder par remplacement de l'unité en question. Seulement 5 à 6 unités dépasseront $3 \cdot 10^9$ rads selon nos prévisions jusqu'en 1985.

Dans ces conditions, la durée de vie de l'aimant peut être allongée au moins jusqu'aux dates indiquées, et même encore beaucoup plus loin, en utilisant les méthodes qui viennent d'être décrites pour répondre aux besoins de réparations et d'échanges.

4. La Radioactivité Induite et la Maintenance de l'Aimant

Il était aussi intéressant de savoir si la radioactivité induite croissante gênerait ou non la maintenance ou les réparations dans l'anneau.

Pour cela une série d'études et de mesures a été entreprise, s'appuyant sur des recherches déjà effectuées (52,53,54,55,56,57,58,59,60,61).

Le débit de dose de référence est celui qui est mesuré à 40 cm de la paroi d'une section droite deux jours après l'arrêt du CPS pour la physique (soit généralement le lundi matin).

Nous montrons, dans la référence 52, que ce débit de dose est donné, pour une section droite i , par

$$D_i(T,t) = k_i \cdot I_i \text{ (p/s)} \cdot \log \left(1 + \frac{T}{t}\right)$$

où T est le temps d'irradiation de la source créant D_i , t est le temps de décroissance (attente ou "cooling") qui suit, I est le nombre de protons par seconde ayant en moyenne interagis dans cette source pendant T et K_i une constante de la source en rem/h par proton interagissant et donnée dans la référence 52. (Par exemple $K = 1,7 \cdot 10^{-11}$ dans le cas des septums d'éjection rapide et $6,7 \cdot 10^{-12}$ dans le cas de cibles internes).

Le paramètre TAR ("Total Activity in the Ring") représente artificiellement la somme des 100 débits de dose mesurés comme indiqué ci-dessus. Il est évident qu'il dépend beaucoup du type d'opération pendant la période mensuelle précédant la mesure, ainsi que de l'efficacité des éjections qui va en s'améliorant. A la fin de 1973, TAR valait 5,2 rem/h comme à la fin de 1972 malgré l'augmentation de l'intensité⁽³⁷⁾. Le tableau 2 suivant, tiré de⁽⁴¹⁾ montre une évolution possible de TAR dans les conditions pessimistes. Il est probable que le TAR réel sera 10 à 20% inférieur à ces chiffres.

Prot. Accel. à 25 GeV/c	Variantes	jusqu'à fin 1975	fin 1977 (+2 ans)	fin 1983 (+6 ans)
$5 \cdot 10^{12}$ p/p	A ₀ = pas de cibles internes après '75	10	8,1	7,7
	A ₁ = 10% sur les cibles internes	10	10,7	9,8
	A ₂ = 20% sur les cibles internes	10	13,4	12,1
10^{13} p/p	B ₀ = pas de cibles internes après '75	10	13,7	13,3
	B ₁ = 5% sur les cibles internes	10	16,3	15,9
	B ₂ = 10% sur les cibles internes	10	19,5	19,1

TABLE 2 (TAR en rem/h, après 2 jours d'attente)

Quant à la dose reçue par le personnel travaillant h heures dans la région i, nous avons montré dans (52) qu'elle valait

$$D = h \cdot \frac{1}{f_e} \cdot \frac{1}{f_p} \cdot \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{200}{t} \right) \cdot D_i$$

où t est le temps qui s'écoule entre l'arrêt pour la physique et l'intervention, f_e est un facteur de réduction de dose dans le cas où l'équipement de la section droite est démonté, et f_p un facteur de réduction de dose dépendant de la proximité du personnel par rapport au point de mesure pendant les h heures demandées par ce travail spécifique.

Il a été montré (41, 52) que ces doses, bien qu'élevées, ne pouvaient pas être considérées comme un obstacle irréductible pour le fonctionnement à haute intensité sous réserve de satisfaire l'une des conditions suivantes ou une combinaison appropriée de ces conditions partiellement remplies :

- a) plus ou moins doubler dans l'avenir le personnel le plus exposé (environ 15 personnes dans les sections vides, mécanique et aimant en particulier),
- b) engager du personnel en régie pour travaux exceptionnels,
- c) réduire le nombre d'interventions dans l'anneau,
- d) diminuer les temps d'intervention (par la discipline et l'outillage),

- e) planifier les opérations de physique du CPS pour laisser un temps suffisant de décroissance radioactive dans les régions les plus actives où doivent se faire les interventions planifiées etc...

5. Remplacement Eventuel de l'Aimant Complet

Cette solution bien qu'improbable, n'était pas à écarter à priori tant que les méthodes de réparation ne s'avéraient pas clairement réalisables. Malgré le fait que l'installation d'une nouvelle machine réclamerait un an d'arrêt environ, nous avons néanmoins étudié quelques possibilités de remplacement de l'aimant (62,63).

5.1 Utilisation d'Aimants des ISR

Dans l'hypothèse où les ISR seraient reconstruits avec des aimants supraconducteurs pour accroître considérablement leur énergie, il serait possible d'utiliser leurs aimants actuels pour construire un accélérateur sur l'anneau de béton du CPS présent. La quantité de mouvement maximale de cette machine à fonctions combinées ne dépasserait pas 19 à 20 GeV/c, ce qui reste acceptable pour une injection dans le SPS.

La Fig. 3 a) montre le type de maille utilisable, du type FODO, pour 60 périodes.

Les paramètres principaux pourraient être les suivants (Ref. 62)

Nombre de périodes = 60	Nombre d'aimants = 60 F et 60 D
$Q_H = 6,17$ naturel, 6,25 avec correct.	Champ B = 0,67 T à 10 GeV/e
$Q_V = 5,35$ " , 5,25 " "	" " = 1 T à 15 GeV/c
β_{\max} (m) = 20, 6 (H), 24, 5 (V)	R = 0,3 Ω , L = 1,82 H
β_{\min} (m) = 12, 71 (H), 15,2 (V)	I = 1500 A à 10 GeV/c
$R\hat{\alpha}_p = 2,94$ m	Temps de montée à 10 GeV/c avec 9kV = 0,3 s
$\gamma_{tr} = 6,16$	$\Delta Q = - 0,0027$ (H) et + 0,08 (V)
	pour $\Delta p/p = 1\%$

R (rayon moyen) = 100 m (comme le CPS actuel)	
p (rayon de courbure) = 49,50m	sections droites longues =
Flèche dans les aimants = 16 mm	60 de 4,69 = 281,4m
	60 de 0,6 = 36 m
	<hr/>
	Total = 317,4m
	(à comparer avec 188m du CPS actuel)

Il n'y a aucune superpériodicité. Sur la Fig. 3 a) nous pouvons constater que les angles d'éjection doivent être assez grands pour passer à côté de la culasse des aimants.

La correction pour obtenir $Q_H = 6,25$ et $Q_V = 5,25$ est très faible et peut être obtenue avec les éléments de correction qui restent de toute façon nécessaires.

Les équipements existants sur le CPS ainsi que l'alimentation principale et les cavités RF pourraient être réutilisées sans diminution sensible de l'acceptance.

Le coût d'un tel remplacement n'a pas été étudié en détail car il y a surtout de la main-d'oeuvre. Quant au délai, il devrait être comparable à celui étudié au paragraphe 5.3, soit 10 à 12 mois.

Cette solution a pour avantages : aimants existants et moins sensibles aux radiations, espace libre sans champ assez important; elle a pour inconvénients : quantité de mouvement limitée à 19 - 20 GeV/c, angles d'extraction assez grands, nécessité probable de réétudier de nouveaux enroulements polaires ou des systèmes importants de correction par lentilles.

5.2 Nouveaux Aimants pour un Accélérateur à Fonctions Combinées

Il semble difficile d'envisager de construire des aimants exactement identiques, dans leurs propriétés magnétiques, aux aimants actuels. Il faudra

faire de longs travaux pour avoir un acier de même caractéristique permettant le remplacement progressif des aimants actuels grâce à une compatibilité complète avec ceux-ci.

Nous aurions pu envisager de construire des aimants similaires mais avec un meilleur acier, à grains orientés ou non . De toute façon, de tels aimants n'auraient pas été compatibles avec les aimants actuels et il faudrait donc un très long arrêt pour reconstruire le CPS.

Cette solution ne nous a pas semblé assez intéressante pour en faire une étude plus poussée.

5.3 Nouveaux Aimants pour une Machine à Fonctions Séparées

Un exemple de maille possible est décrit dans la Réf. (63). Nous en rappelons ici brièvement les principales caractéristiques.

Tout d'abord il faut préciser les contraintes imposées : rester sur la poutre en béton actuelle, utiliser les cavités RF actuelles ainsi que l'alimentation principale et les pompes à vide, accepter les gros équipements du CPS actuel, être compatible avec la topographie actuelle des faisceaux externes et enfin être assez simple pour permettre une mise en service rapide et souple.

L'exemple proposé ici consiste en 36 périodes FODO. Mais d'autres possibilités, avec un nombre différent de périodes (40 par exemple) ont été étudiées et sont aussi intéressantes.

La Fig. 3 b) montre une des 36 mailles, et le tableau 4 résume les principaux paramètres.

Il y aurait 72 aimants du type C, avec $B = 1.8T$ à $28 \text{ GeV}/c$. Les lentilles seraient au nombre de 36 F ($K\ell = - 0,128 \text{ m}^{-2} \cdot 0,95 \text{ m}$) et 36 D ($K\ell = + 0,239 \text{ m}^{-2} \cdot 0,50 \text{ m}$) (64).

TABLEAU 4

	Schéma proposé	Present CPS
Q_H, Q_V	6,25	6,25
Phase bétatronique par période	$62,5^\circ$	45°
β_{\max} (H)	28,3 m	22,5 m
β_{\max} (V)	29,3 m	22,5 m
β_{\min} (H)	9,7 m	11,7 m
β_{\min} (V)	9,9 m	11,7 m
$R \hat{\alpha}_s$	3,46m	3,04m
γ_{tr}	6,06m	6,12m
R moyen	100 m	100 m
R courbure	52 m	70 m
Sections droites longues	72 de 3,20m	} 20 de 3 m 80 de 1,60m
Total =	230,4 m	
Gain =	42,5 m (22%)	Total = 188 m
Sections droites très courtes	72 de 0,27m (0,45 entre culasses)	
$R(\Omega)$	0,29	0,32
$L(H)$	0,67	0,95
P_{ohm} (W)	2,74 M	2,8 M
\hat{W}_{mag} (J)	13,2 M	11,8 M

L'acceptance serait sensiblement la même que celle du CPS actuel et la topographie générale serait peu modifiée: les départs des faisceaux externes ne seraient déplacées que de quelques mètres. (Les cycles d'accélération seraient similaires à ceux actuels, peut-être même légèrement plus rapides.)

Le coût général d'un tel remplacement a été estimé à 25 M frs. (1973) et la durée du changement à 10 mois d'installation plus quelques mois de rodage progressif.

Auparavant un délai de 3½ ans semblerait nécessaire pour la préparation de cette installation (études, commandes, fabrication, contrôles et essais).

6. Conclusions

L'analyse de la situation et de son évolution, compte tenu de la possibilité de réparer et de renforcer les unités d'aimant défectueuses, nous montrent que la survie de l'aimant semble assurée encore pour au moins une dizaine d'années. Les mesures mises en oeuvre comprennent principalement :

- le cerclage des blocs d'extrémité
- le remplacement de bobines
- le remplacement des enroulements polaires.

Le projet de nouveaux enroulements polaires avec leurs alimentation devient urgent : en effet, la réserve actuelle pourrait permettre d'attendre la mise en place du nouveau système jusqu'au début 1978 au plus tard.

La maintenance régulière pourrait être assurée malgré la radioactivité accrue, à condition de respecter certaines règles assez strictes sur l'organisation du travail et la planification des opérations.

Il est apparu que le remplacement radical de l'aimant complet n'est pas nécessaire dans le cadre actuel de la survie de l'aimant.

Le groupe de travail sur l'aimant SPS se fait un plaisir re remercier ici les nombreuses personnes qui l'ont aidé dans sa tâche.

R E F E R E N C E S

- 1.- K.H. Reich - "The CERN Proton Synchrotron Magnet" Vol. I and II
MPS/Int. DL 63-13
- 2.- B. Kuiper, G. Plass - "Measurement of prototype magnet unit"
PS/Int. 59-5.
- 3.- M. Gyr - "Fringing field at a pole edge" CERN/MPS/SR 72-3
avec addendum.
- 4.- C. Mazeline - "Estimation de la force azimutale sur les tôles
d'extrémité des unités de l'aimant du CPS, par mesure ponctuelle
de l'induction." MPS/SR/Note 72-21.
- 5.- F. Rohner - "Study on the repair of damaged blocks on the PS Magnet
units". MPS/SR/Note 72-8.
- 6.- R. Holsinger. Communication privée.
- 7.- M.H. Van de Voorde - "Effects of radiation on materials and components".
CERN 70-5.
- 8.- R. Bogaerts - ACEC revue 2 (1961).
- 9.- Lettre ACEC du 10/10/1972 concernant l'expertise des bobines.
Réf. VEN/VGE/JBX/JJ/18V 83954.
- 10.- "Radiation problems encountered in the design of multi-GeV for research
facilities" Ed. by K. Goebel - CERN 71-20.
- 11.- "Dose measurements near internal targets at the CERN PS with inter-
comparison of different dosimeters", M. van de Voorde, ISR/MA/70-50.
- 12.- "Improvements on the properties of organic materials in accelerator
magnets", M. van de Voorde, ISR/MA/70-17.
- 13.- "The effect of nuclear radiation on the electrical properties of
epoxy resins", M. van de Voorde, CERN 68-13.
- 14.- "Radiation damage to the magnetic properties of materials in the
CPS", C.D. Johnson, MPS/CO/Note 68-18 (et MPS/CO-Note 66-7).
- 15.- "Radiation in the PS ring during 69, 70 and 71; limitations on
future high intensity running", J.H.B. Madsen, MPS/CO/Note 72-11.
- 16.- "The effect of nuclear radiation on hoses", M. van de Voorde, ISR/MA/68-59.
- 17.- M. Van de Voorde-"Action des radiations ionisantes sur les résines
époxydes " CERN 70-10 (1970).

- 18.- M. Van de Voorde, F. Rohner "Radiation dose measurements and damage studies at the CPS " ISR/MA 70-09.
- 19.- G. Azzoni - "Statistics of PS operation" 1965 to 1973, CERN/MPS/CO
- 20.- R. Gouiran - "Irradiation of CERN PS magnet steel blocks
Note MPS/MU/EP 72-14, RG-1d.
- 21.-"Taux d'Irradiation des Unités de l'Aimant. Statistiques et Prévisions"
R. Gouiran; MPS/MU/Note/EP 72-15 Rev.
- 22.- G.J. Levine, D. Squier, G.B. Stapleton, G.R. Stevenson.
"The angular dependence of dose and hadron yields from targets in
8 GeV/c and 24 GeV/c extracted proton beams " Particle accelerators-1972,
Vol. 3, pp. 91-101.
- 23.- J. Ranft, J.J. Routti - "Fluka and Magka, Monte-Carlo program for
calculating nucleon-meson cascades in cylindrical geometries "
CERN Lab. II RA/71-4.
- 24.- J.H.B. Madsen, M. Van de Voorde - "Results of radiation dose
measurements in the PS tunnels MPS/Int. CO 67-7.
- 25.- L. Hoffmann, M. Sullivan, J.A. Geibel, J. Ranft -
"Shielding studies in steel with 10 and 20 GeV/c protons " Nuclear
Instrument and Methods, 1965 , 45-69.
- 26.- S. Charalambus, K. Goebel, D. Nachtigall
"Angular distribution of secondary particles and dose-rates produced
by 19.2 GeV/c protons bombarding thin Be, Al, Cu and U targets".
CERN DI/HP/97 (1967).
- 27.- C.D. Johnson, R. Scheldon, G.B. Stapleton -
"Measurements of radiation dose distribution generated by targetting
in the CERN proton synchrotron" RHEL/M 175, Rutherford Laboratory (1969).
- 28.- J. Ranft, J.J. Routti -
"Hadron cascade calculations of angular distribution of integrated
secondary particles fluxes from external targets and description
of program FLUKU" CERN Lab II RA/72-8.
- 29.- J.J. Routti, M. Van de Voorde et al.
"Fluence and dose measurements in the activation and spallation
detectors near internal targets at the CERN PS" ISR/MA/71-29.
- 30.- J.H.B. Madsen -
"Radiation dose measurements around the PS vacuum chamber"
MPS/Int. CO 66-4 (et MPS/CO-Notes 68-38, 69-21, 69-36 et MD du
23.10.69).
- 31.- P. Riboni, C.E. Rufer
"Proposal for further improvement of the PS vacuum system"
MPS/ML/Note 74-5 (13.3.1974).

- 32.- K. Goebel, M. Nielsen -
"Routine flux density and dose rate measurements near the PS vacuum chamber". HP 69-69 Rev.
- 33.- M. Nielsen -
"Accumulated doses in straight sections in MPS" Private note.
- 34.- M. Hoefert, M. Nielsen
"Estimation of radiation doses to the ring magnets of the PS from June 1966 to June 1972".HP 72-III.
- 35.- M. Hoefert
"Dosimeter response in the high-energy radiation field around the CERN proton synchrotron". DI/HP/162.
- 36.- G.P. Benincasa, C.D. Johnson -
"Calibration of the CPS beam loss monitor system of 100 air ionization chambers". MPS/Int. CO 68-28.
- 37.- R. Gouiran -
"Etat de l'aimant CPS après l'arrêt de janvier 1974".
MPS/SM/74-5.
- 38.- G.L. Munday -
DIR/MPS/MEMO 73-66 (18.6.1973), 73-67 (21.6.1973).
- 39.- O. Barbalat -
"Hypothèses sur l'utilisation future du CPS"
MPS/DC/Note 73-4
- 40.- R. Gouiran, L. Hoffmann (Chairman), W. Kubischta, Ch. Steinbach;
"Report of the Working Group on the Implication of the Future Use of Internal Targets".
MPS/MU/LHgm, 29.8.1973.
- 41.- R. Gouiran -
"CPS High Intensity Running, Implication on magnet irradiation and radioactivity". MPS/SR/Note 73-43.
- 42.- F. Rohner -
"First results of magnetic measurements on the Siemens spare block no. CO2 compared with the PS block S5". MPS/Int/SR 68-13.
- 43.- J. Gareyte, P. Lefevre -
" Proposition pour de nouveaux enroulements polaires pour le PS".
MPS/DL/Note 72-27.Rev.
- 44.- A. Asner, R. Holsinger -
"Improved proposal for a new air-cooled high intensity PS Pole face winding, yielding independant saturation compensation and correcting multipole fields, created by only 4 or 5 conductors along the pole contour".
MPS/MA/Note 73-2.

- 45.- M. Gyr -
"An analytical approach for the design of new pole face winding for the CPS". MPS/SR/Note 73-15.
- 46.- R. Holsinger -
Communication privée.
- 47.- A. Asner, K.D. Lohmann, J. Schmit -
"First proposal for a new air cooled PFW system for a high intensity PS..".
MPS/SI/Note NAE 72-12.
- 48.- A. Asner, R. Holsinger -
"End field effects in the proposed separate conductor, new CPS pole face winding". MPS/MA/Note 73-4.
- 49.- R. Gouiran, P. Lefèvre -
"Le projet de nouveaux enroulements polaires", en préparation.
- 50.- L. Brouwers -
"Remplacement des enroulements polaires du PS, estimation de la durée de l'arrêt". MPS/SR/Note 73-28.
- 51.- C.E. Rufer -
"Time estimate for the replacement of the PS Magnet pole face windings".
MPS/ML/Int Note 73-18.
- 52.- R. Gouiran -
"La radioactivité de l'Aimant du CPS et son Influence sur la Maintenance de l'Anneau. Statistiques et Prévisions".
CERN/MPSSR 73-5.
- 53.- J.Ranft and K. Goebel -
"Estimation of induced radioactivity around high energy accelerators from hadronic cascade star densities obtained from Monte-Carlo calculations". 300 GeV/RAD. Note/70-24.
- 54.- K. Goebel, M. Nielsen -
"Predictions of induced radioactivity in the PS Ring". HP-70-90.
- 55.- M. Höfert, M. Nielsen, J.M. Hanon -
"Prediction of future radiation levels from induced radioactivity around the proton synchrotron and in regions near external targets in view of higher machine intensities." HP - 73-124.
- 56.- P. Coet -
"The work in highly radioactive experimental areas of the PS and estimate of induced activity and radiation damage inside the tunnels of extracted beams." CERN/MPS-MU/EP 72-2.
- 57.- M. Barbier, North Holland Publ.
"Induced Radioactivity".

- 58.- M. Höfert, J.M. Hanon, M. Nielsen -
"Radiation problems in view of high intensity beam dumping on dump D1".
HP 73-120.
- 59.- A.H. Sullivan, T.R. Overton - Health Physics, II, 1101-1105 (1965).
"Time variation of the dose rate from radioactivity induced in a high
energy accelerator".
- 60.- J.H.B. Madsen -
"Radiation in the PS Ring during '69, '70 , '71." MPS/CO/Note 72-11
- 61.- "The second stage CPS improvement study". MPS-int/DL/B 67-19.
- 62.- R. Gouiran -
"A possible PS lattices using ISR magnet".
- 63.- R. Gouiran -
"An example of a possible separated junction lattice which could replace
the present CPS"
- 64.- A. Asner, G. Schell-
"Parameters for a new CPS magnet system".
MEMO SJ/MAE du 22.12.1972.

ANNEXE 1

1. Dans le tableau qui suit, nous indiquons l'état des unités d'aimant actuellement présentes dans l'anneau, au 1.2.1974, c'est-à-dire avant la mise en route pour l'année 1974.

Nous indiquons :

Colonne 1 : L'emplacement de l'unité et son numéro

Colonne 2,3: Son irradiation pendant l'année 1973, ainsi que la dose totale accumulée depuis son installation dans l'anneau^{*)}. Il s'agit toujours de la dose dans le fer, à l'entrée du premier bloc, 5 cm sous l'axe du faisceau, qui est le point utilisé toujours comme référence. Les doses ont été mesurées avec des dosimètres en verre et confirmées par les prévisions statistiques.

Colonne 4 : Sa fiabilité f. Cette valeur est le complémentaire du risque d'incident p ($f = 1 - p$).

Colonne 5 : Des observations sur son état actuel avec les définitions suivantes :

- nouvelle fabrication: blocs Siemens au moins aux extrémités avec plaques de renfort vissées, enroulements polaires BBC
- renouvelées: remises en état en atelier, blocs d'extrémité cerclés, bons enroulements polaires (ACEC ou BBC)
- Cerclées: réparées sur place dans l'anneau avec cerclage des blocs d'extrémité amont ou aval, enroulements polaires encore en assez bon état
- endommagées à réparer: unités dont les tôles des blocs d'extrémité sont légèrement décollées et bougent lors des impulsions de courant. Leur réparation est prévue

^{*)} Pour les unités renouvelées et remises en place, il s'agit aussi de la dose accumulée avant la rénovation.

pour le prochain arrêt (courant 74 pour l'unité 74, prochain arrêt en 1975 pour les autres).

Résumé du tableau

- Unités de nouvelle fabrication: 1, 2, 6, 8	= Total	4
- Unités rénovées: 64 (U9), 100 (R6)	= Total	2
- Unités cerclées des deux côtés: 7, 10, 24, 62	= Total	4
- Unités cerclées d'un seul côté: 9, 12, 22, 23, 28, 34, 48, 49, 58, 63, 70, 96	= Total	12
- Unités encore endommagées au 1.2.74, à réparer : 9, 42, 74	= Total	3
- Unités en réserve, à rénover: R 15, U 3	= Total	2
- Unités encore dans l'état d'origine dans l'anneau	: 100 - 25 =	75

II. TIR - Total Irradiation in the Ring

Ce paramètre est la somme des 100 doses d'irradiation reçues au point de référence des unités présentes dans l'anneau depuis l'origine du PS :

- Janvier 1972	TIR: $1,07 \cdot 10^{10}$ rad.
- Année 1973	Δ TIR (73): supplément acquis durant 1973: $2,55 \cdot 10^9$ rad.
- 1 ^{er} janvier 1974	TIR: $1,33 \cdot 10^{10}$ rad.

III. TAR - Total Activity in the Ring

Ce paramètre est la somme des 100 débits de dose mesurés à 40 cm des sections droites, latéralement et moyennés entre l'amont et l'aval de la section droite et mesurés toujours 2 jours après l'arrêt du PS pour la physique :

- fin décembre 1972 TAR: 5,2 rem/h
- fin décembre 1973 TAR: 5,2 rem/h

Il est difficile de faire déjà des prévisions pour 1975 car TAR dépend essentiellement du type d'opération et des pertes de protons durant les 2 derniers mois.

ANNEXE 2

Inventaire Général

1. Mouvement des Unités

1.1 Unités Démontées du CPS

T30 en 01 jusqu'en 1966 - démontée
T37 en 01 de 1966 à 1970 - démontée
U4 en 08 jusqu'en 1970 - démontée
R6 en 06 jusqu'en 1972 puis renouvée - en 100 en 1 - 1974
U9 en 02 jusqu'en 1973 puis rénouvée - en 64 en 1 - 1974
U3 en 64 jusqu'en 1 - 1974 - en cours de rénovation en atelier
R15 en 100 jusqu'en 1 - 1974 - en cours de rénovation en atelier

1.2 Nouvelles Fabrications

T37 en 01 (voir ci-dessus) - démontée
T38 en 01 depuis 5 - 1970
U16 en 08 depuis 11 - 1970
U17 unité étalon pour mesures magnétiques (1972)
U18 en 02 depuis 1 - 1973
R36 en 06 depuis 1 - 1972

A part la T37, ces unités comprennent des blocs Siemens renforcés par des plaques de 4 mm vissées, au moins aux extrémités, et des enroulements polaires de bonne qualité.

1.3 Unités Rénovées en Atelier

R6 en 100 depuis 1 - 1974
U9 en 64 depuis 1 - 1974

Ces unités sont cerclées haut et bas sur les blocs d'extrémité amont et aval et possèdent des enroulements polaires en bon état. Elles ont subi un nettoyage et une révision générale.

1.4 Unités en Réserve en Atelier en Cours de Rénovation

U3 venant de 64 le 1 - 1974

R15 venant de 100 le 1 - 1974

1.5 Permutation d'Unités dans l'Anneau

Entre 11 (T10) et 39 (S15) en 1 - 1972

" 22 (U4) " 16 (R7) " 11 - 1969

" 42 (U3) " 64 (R23) " 1964

" 82 (U5) " 58 (R3) " 1965

" 83 (T4) " 59 (S8) " 1965

" 34 (U6) " 40 (R16) " 1 - 1972

" 54 (U15) " 50 (R2) " 1963

" 18 (R35) " 48 (U10) " 11 - 1969

" 88 (U1) " 62 (U11) 1966

La situation initiale est indiquée ci-dessus à gauche. La situation actuelle après les permutations se trouve dans l'état général de l'aimant présenté en annexe 1.

2. Blocs d'Aimant

2.1 Utilisation des Blocs SIEMENS (Livraison de 1969 à 1971, pour un total de 40).

Blocs ouverts, S _o		Réserve 1974	Blocs fermés, S _c		Réserve 1974
01		prototype, mauvaise isolation	01		prototype, mauvaises dimensions
02		x	02		prototype, mauvaises dimensions
03		x	03	T 38	
04	T 38		04		x
05	T 38		05		x
06	U 16		06	U 16	
07	U 16		07	T 38	
08	T 38		08	U 18	
09		x	09	U 16	
10	U 17		10		x
11	U 17		11	U 17	
12		x	12	U 17	
13		x	13	U 17	
14		x	14	U 17	
15	U 18		15	T 38	
16	R 36		16	U 17	
17	U 17		17		x
18	R 36		18		x
19		x	19	R 36	
20		x	20		x
21	U 17		21		x
22		x	22	R 36	
23	U 17		23		x
24		x	24		x
Total	13	10 + 1 douteux	13		9 + 2 douteux

2.2 Réserve de Blocs Ansaldo

Certains des blocs des unités démontées ont été réutilisés. Il y avait en plus des 1010 blocs montés une réserve de 5 blocs ouverts et 5 blocs fermés à l'origine.

a) Blocs Fermés

- 2 blocs en mauvais état, rouillés, radioactifs, avec de nombreuses tôles décollés (135, 287 de l'unité T 37 venant de 01)
- 1 bloc utilisable bien qu'il manque la première tôle (341 de T30 venant de 01 d'origine)
- 10 blocs encore montés sur U3 et R15 à rénover et réparer éventuellement (96,380,47,492,379,441,271,68,517,261)

b) Blocs Ouverts

- 2 blocs en mauvais état, rouillés, radioactifs, avec de nombreuses tôles décollés (739 de T37 venant de 01, 897 de U4 venant de 08).
- 1 bloc utilisable bien que la première tôle soit frippée et à enlever (703 de T30 venant de 01).
- 10 blocs encore montés sur U3 et R15 à rénover et à réparer éventuellement (1102, 1083, 898, 968, 1031, 854, 679, 833, 826, 815).

3. Enroulements Polaires

3.1 Enroulements Polaires Originaux ACEC

a) Réserve Actuelle

Cette réserve actuelle provient d'une part de la réserve d'origine,

et d'autre part de la récupération d'enroulements dont la géométrie rendait difficile le cerclage de blocs, ainsi que de certains enroulements endommagés, mais réparables. Ces derniers pourraient être réutilisés en cas d'extrême nécessité moyennant quelques modifications ou réparations. Certains enroulements de cette réserve sont considérés comme utilisables bien qu'ils n'aient pas un bon alignement des conducteurs (axe du champ nul décalé jusqu'à 10 mm par rapport à la ligne du faisceau).

Dans le tableau qui suit, nous avons indiqué la quantité provenant:
a) de la réserve d'origine, b) d'une récupération d'enroulements en bon état venant de l'anneau mais nécessitant des modifications pour être réutilisés et c) d'une récupération d'enroulements endommagés venant de l'anneau (talon abimé, isolation des câbles coupés...) et éventuellement réparables sous réserve d'une expertise plus approfondie.

Types	FL	FR	DL	DR
Réserve d'origine	9	5	3	2
Récupérés en bon état	5	2	5	2
récupérés éventuellement réparables	3	3	2	2
Total	17	10	10	6

b) Pertes Actuelles

FL	FR	DL	DR
4	6	6	8

3.2 Enroulements Polaires Nouveaux BBC. Réserve Actuelle

La commande originelle portait sur 10 pièces de chaque. La réserve actuelle est:

FL	FR	DL	DR
4	6	3	2

4. Galettes. Réserve Actuelle

4.1 Jeux ABCD pour Unités R ou S (culasse extérieure)

Il y en avait un jeu à l'origine et qui fut monté sur l'unité R36 installé en position 06.

Il reste en réserve un jeu monté sur l'unité R15 venant de la position 100, actuellement en atelier, en cours de rénovation.

4.2 Jeux EFGH pour Unités T ou U (culasse intérieure)

La deuxième commande portant sur 4 jeux, a servi à équiper les quatre unités suivantes: U16 (en 08), T38 (en 01), U18 (en 02) et U17 (étalon de mesures).

Il y avait à l'origine un jeu de réserve qui fut monté sur l'unité T37 placé en 01 puis démontée.

Il y a à présent en réserve 3 jeux utilisables et 1 jeu pratiquement inutilisables, soit :

{ 2 jeux récupérés des unités U4 (en 08) et T37, installée en 01
} 1 jeu monté sur l'unité U3 venant de 64, en réserve en atelier
(L'unité 64 fut remplacée par U9 venant de la position 02)

1 jeu dont la galette F a été découpée pour examen approfondi, venant de T30 en position 01.

En plus, il existe 1 jeu hors normes, trop long, inutilisable dans la machine, pouvant servir à monter une charge magnétique.

5. Berceaux - Réserve

Il y a deux types de berceaux qui ne diffèrent que par l'emplacement des trous. Il est possible, à la rigueur, de transformer un type en un autre. Un berceau est libre, deux sont montés sur les unités en réserve U3 et R15 et un est monté sous une ancienne charge faite de 6 vieux blocs, soit un total de 4 berceaux en réserve.

Logar. Teilung } 1 - 100, Einheit } 83,33 mm
Division } } } }

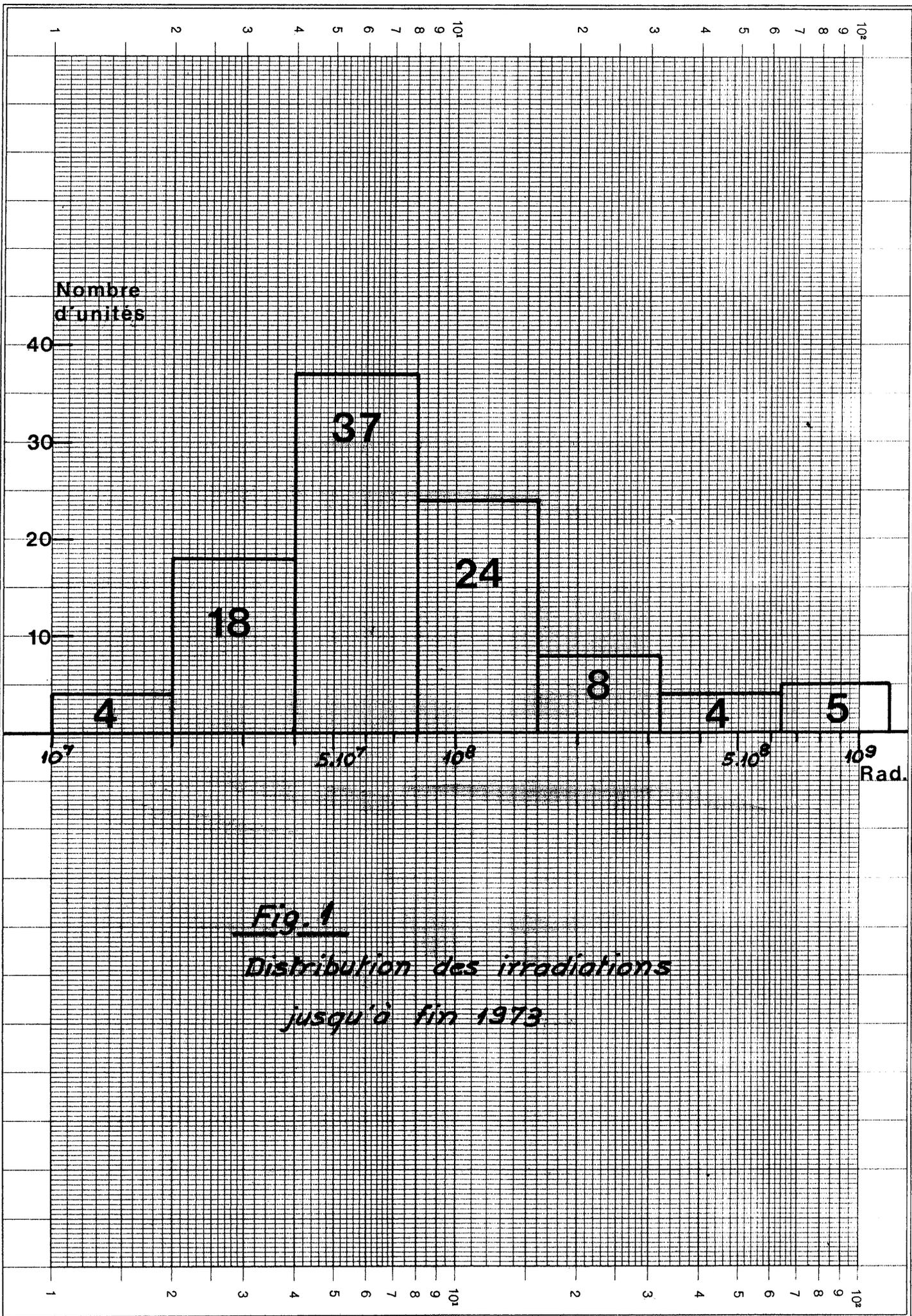


Fig. 1

*Distribution des irradiations
jusqu'à fin 1973*

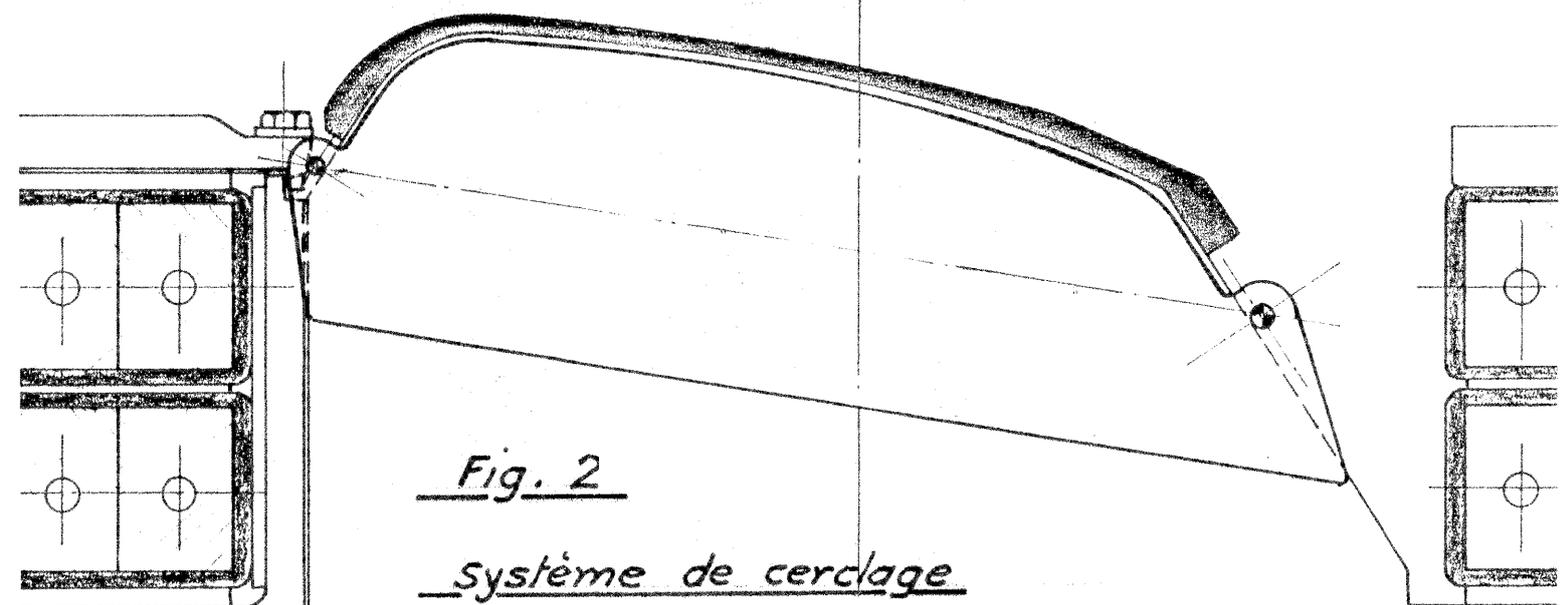
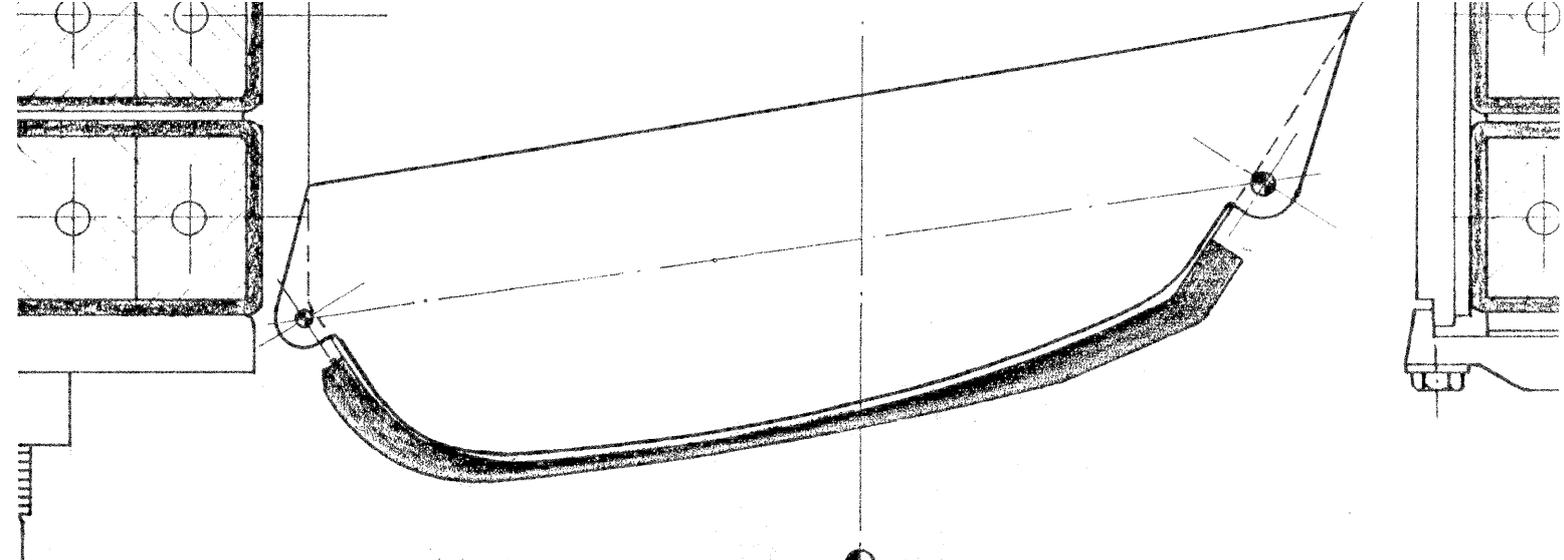
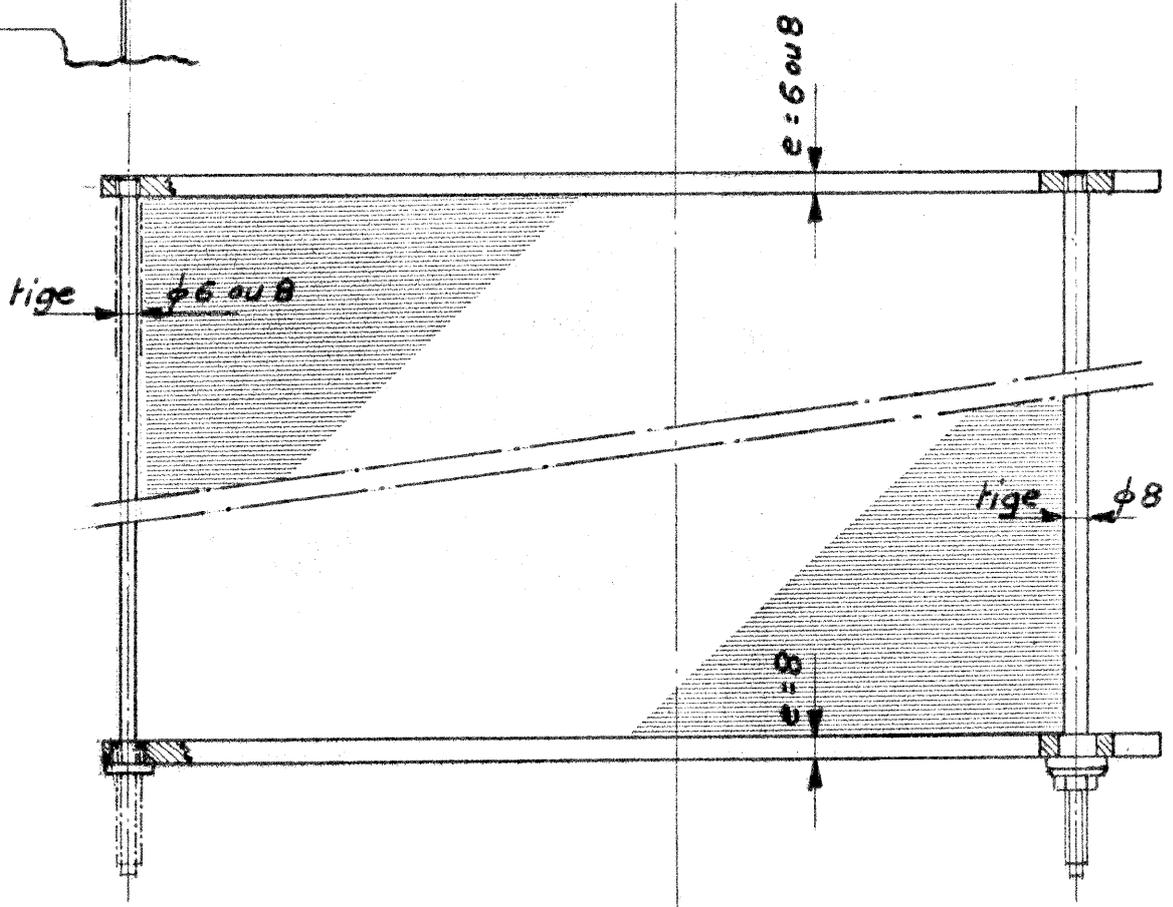


Fig. 2
Systeme de cerclage



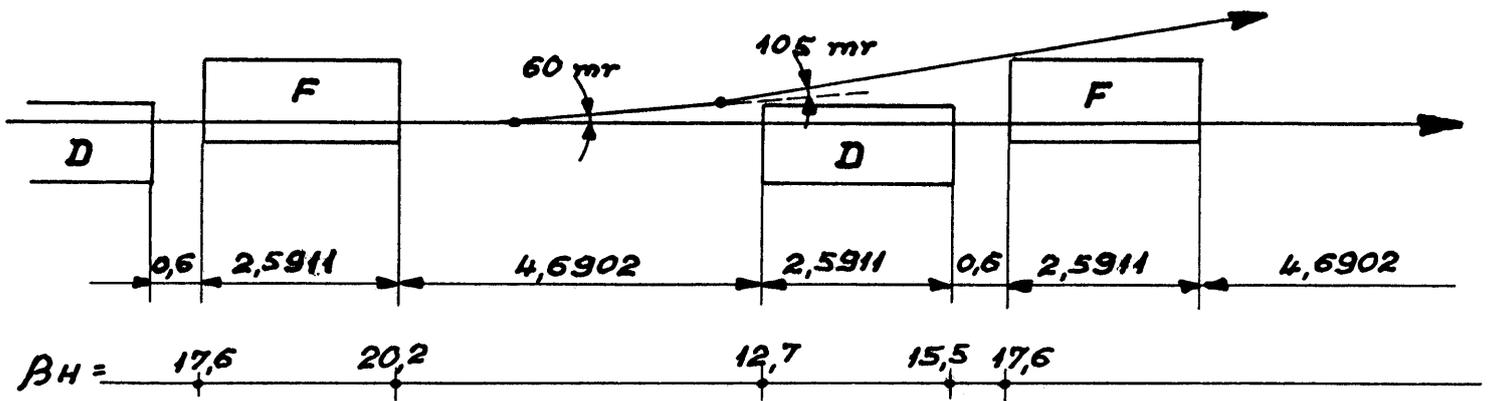


Fig 3a Maille possible pour un CPS utilisant les aimants ISR
(Total = 60 périodes FoDo)

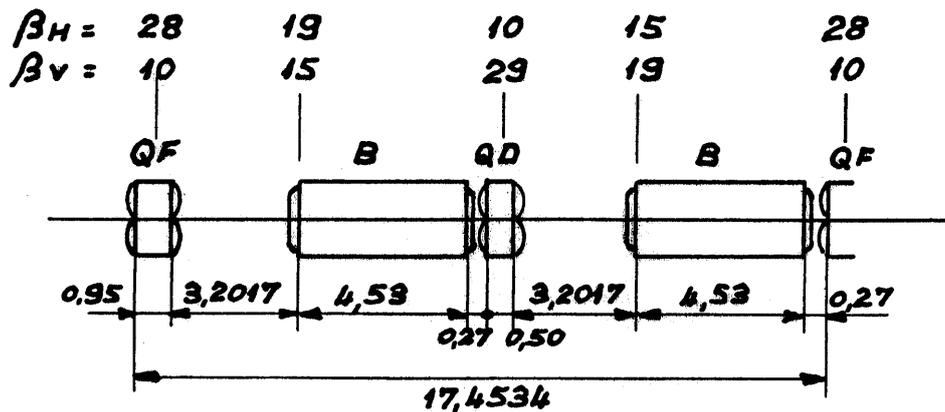


Fig 3b Maille possible pour un CPS à fonction séparée
36 périodes FoDo