

ETAT DE L'AIMANT DU SYNCHROTRON PSR ET SES PERSPECTIVES
D'EVOLUTION

C. Germain, R. Gouiran, J. Gruber, L. Jeannerot

Résumé

Un rapport sur l'état de l'aimant et son évolution a été publié en 1974 par un groupe ad hoc qui a formulé des recommandations dans le but d'assurer la survie de l'aimant pendant la période d'une dizaine d'années qui était considérée.

Le présent rapport examine les suites qui ont été données aux recommandations de 1974; il présente aussi la situation actuelle en ce qui concerne l'état de l'aimant et son évolution prévue. Tenant compte du rôle élargi du PSR sur une vingtaine d'années, il exprime de nouvelles recommandations qui sont un prolongement de celles de 1974.

Il faudra prévoir un renouvellement de la réserve des enroulements polaires qui s'épuisera vers 1990. Il y aura peut-être lieu vers cette date de s'occuper aussi de la réserve des bobines principales. Enfin il faudra commander vers 1986 une nouvelle réserve de câble spécial pour la boucle en huit de culasse ou plutôt, si possible, préparer l'installation d'une boucle polaire en huit qui sera plus performante.

Table des matières

1. Introduction
 - 1.1 Les suites qui furent données au rapport de 1974
 - 1.2 La situation actuelle
 - 1.3 Le contenu du présent rapport
2. Les unités de l'aimant principal
 - 2.1 Types d'unités
 - 2.2 Inventaire des unités
 - 2.3 Durée de vie du circuit magnétique des unités.
3. Les bobines principales de l'aimant et les barres de connexion
 - 3.1 Types de bobines
 - 3.2 Inventaire des bobines
 - 3.3 Etat des bobines et perspectives d'évolution
 - 3.4 Les barres de connexion (bus-bars)
4. Les enroulements polaires PFW (pole-face windings)
 - 4.1 Description des nouveaux PFW
 - 4.2 Configurations de branchement du système des PFW
 - 4.3 Défauts de fabrication
 - 4.4 Réserve de PFW
 - 4.5 Résistance aux radiations
 - 4.6 Prévisions de remplacement des PFW
5. Les plaquettes pour la correction des courants de Foucault par les PFW
6. La boucle en 8
 - 6.1 Description de la boucle en 8
 - 6.2 Résistance aux radiations - Prévisions de remplacement du câble
 - 6.3 Projet d'une nouvelle boucle en 8
7. Les enroulements de culasse pour basse énergie (BLW)
8. Taux d'irradiation et de radioactivité dans le PSR.
 - 8.1 Doses de radiations reçues par les unités
 - 8.2 Débits de dose engendrés par la radioactivité
9. Conclusion
10. Remerciements
11. Références

Annexe 1 : Problème des sertissages défectueux

1. Constatation des défauts
2. Surveillance et classement des nappes polaires
3. Réparation des défauts.

Annexe 2 : Irradiation des unités d'aimant du PSR.

Figures

- Figure 1 : Cerclage pour bloc d'extrémité d'unité
Figure 2 : Bloc ouvert
Figure 3 : Bloc fermé
Figure 4 : Unité d'aimant
Figure 5 : Photo d'une unité de type U
Figure 6 : Irradiation et radioactivité totales moyennes du PSR.

1. INTRODUCTION

L'état de l'aimant du PSR a été examiné en détail, il y a une dizaine d'années, par un groupe de travail ad hoc. Son rapport ¹⁾, publié en 1974, contient des recommandations destinées à assurer la survie de l'aimant du PSR pour permettre à cet accélérateur de remplir le rôle qui était alors prévu pour lui pendant la décennie suivante.

Depuis cette époque le rôle du PSR a été considérablement étendu au delà du cadre qui avait alors été défini pour lui.

Il est donc opportun d'examiner à nouveau l'état actuel de l'aimant du PSR, de considérer les suites données aux recommandations de 1974, d'évaluer les perspectives d'évolution de l'état de l'aimant et de formuler de nouvelles recommandations pour permettre au PSR de remplir le rôle qui est prévu pour lui à présent.

1.1 Les suites qui furent données au rapport de 1974

Les recommandations du rapport de 1974 portaient essentiellement sur les points suivants :

a) Renforcement des blocs d'extrémité des unités

Il s'agissait de trouver un remède à la détérioration du collage des tôles constituant les blocs, sous l'effet de la dose croissante d'irradiation lors du fonctionnement du PSR. Le moyen choisi a consisté à utiliser un cerclage des blocs d'extrémité pour pallier le décollement des tôles de ces blocs et à réaliser un calage serré entre tous les blocs intermédiaires à la hauteur des pôles.

Le cerclage consiste en deux plaques de serrage entourant le bloc d'extrémité au niveau de chaque pôle. Ces plaques, en acier inoxydable, sont maintenues serrées par des tiges en cuivre au béryllium fortement tendues. Une isolation appropriée a pour but d'éviter de créer une boucle fermée pour les courants de Foucault : voir la figure 1.

Le cerclage et le calage des blocs des unités ont commencé en 1973 sur les unités endommagées puis ont été exécutés systématiquement lors des changements d'enroulements polaires pour se terminer en 1979.

b) Remplacement des enroulements polaires (PFW)

Tous les enroulements polaires, dits aussi nappes polaires, ont été remplacés entre 1977 et 1979 par un nouveau type de nappe plus performant. Une certaine réserve a été constituée pour remplacer les enroulements qui se détériorent sous l'effet de l'irradiation.

La correction des courants de Foucault dans les chambres à vide du PSR est assurée par de nouvelles plaquettes, montées sur des cartes enfichables et comprenant des résistances appropriées, qui sont connectées aux boucles auxiliaires des PFW.

c) Bobines principales des unités

La réserve en bobines principales a été approvisionnée des galettes nécessaires au montage de dix unités. On a pu ainsi assembler des unités de réserve. On pourra aussi assurer pendant au moins cinq ans les remplacements de bobines qui deviendront un jour nécessaires sous l'effet des radiations.

d) Unités complètes en réserve immédiate

Il y a maintenant quatre unités d'aimant assemblées et disponibles en réserve immédiate en cas de nécessité, dont une de chacun des types R, S, T, U (voir la section 2.1).

e) Améliorations de l'aimant du PSR

Les améliorations ont porté essentiellement sur la création d'un nouveau système de correction du champ magnétique par les enroulements polaires permettant plus de souplesse dans le réglage du point de fonctionnement du PSR, sur la mise en bon état et la standardisation des différents circuits de masse des unités pour éviter les boucles et enfin sur la réalisation d'un nouveau train d'impulsions adapté au nouveau système de PFW pour mesurer l'induction magnétique B dans l'entrefer de l'unité de référence.

Le nouveau système d'enroulements polaires

Un système d'enroulements polaires, dit "à 3 courants", a été proposé par R. Gouiran en 1974 ²⁾. Une réalisation provisoire a été mise en service avec succès en mai 1976 ³⁾. Elle utilisait une première boucle

en 8, composée de 3 spires montées sur la culasse des demi-unités focalisantes F d'une part et défocalisantes D d'autre part, connectées en opposition au point de vue magnétique d'où le nom "boucle en 8". (Voir la figure 5). Cette boucle constituait un premier circuit, le second étant formé des nappes polaires F et le troisième des nappes polaires D. Trois alimentations furent adaptées à cet usage provisoire.

Le nouveau système d'enroulements polaires fut consolidé entre 1978 et 1981 : alimentations nouvelles appropriées, câblage spécial, panneau de distribution (patch panel) automatique, meilleur câble pour la boucle en 8. Ce système possède la possibilité d'être connecté en 5 circuits pour un développement futur ⁴⁾.

Le nouveau train B

Avec le nouveau système d'enroulements polaires la valeur de B n'est pas la même dans les secteurs F et D des unités lorsque la boucle en 8 est utilisée. Un nouvel ensemble de génération du train d'impulsions B, adapté aux nouveaux modes d'opération, a été conçu et réalisé avec un matériel moderne à hautes performances ^{4,5)}. Il y eut une installation provisoire dès 1976 puis la mise en place progressive du système final qui est maintenant en service.

f) Projet d'un nouvel accélérateur dans le tunnel du PSR

Les propositions décrites dans le rapport de 1974 n'avaient pas été recommandées car un changement aussi radical et coûteux ne paraissait pas nécessaire.

1.2 La situation actuelle

Beaucoup de nouveautés, qui n'étaient pas prévues dans le rapport de 1974, ont été introduites dans l'utilisation du PSR. On peut constater cependant que l'application des recommandations de 1974, ayant assuré la survie de l'aimant principal, a permis au PSR de continuer à remplir complètement son rôle élargi.

L'état de l'aimant a été surveillé en permanence et des rapports sur ce sujet sont publiés après les grands arrêts pour faire le point sur la situation ⁶⁾.

1.3 Le contenu du présent rapport

Après la présentation des suites qui furent données aux recommandations de 1974, le présent rapport examine en détail, élément par élément, l'état actuel de l'aimant principal du PSR.

Le chapitre 2 donne une présentation générale des unités de l'aimant et décrit leur circuit magnétique. Un inventaire est établi pour les unités installées dans le PSR ou en réserve et pour les blocs en réserve. La durée de vie des blocs est discutée.

Le chapitre 3 examine les bobines principales de l'aimant et les barres de connexion (bus-bars) qui les relient en un circuit général. Un inventaire correspondant est fourni avec ses perspectives d'évolution.

Le chapitre 4 traite des enroulements polaires. La description des nouvelles nappes est suivie d'une présentation de leur branchement selon les systèmes à 3 et à 5 courants. Le problème des défauts de fabrication de certains sertissages est analysé et leur remède est indiqué. La réserve des nappes et ses perspectives d'évolution sont présentées.

Le chapitre 5 est consacrée aux circuits de correction des courants de Foucault dans les chambres à vide du PSR, qui sont réalisés sous forme de plaquettes comportant un ensemble de résistances appropriées.

Le chapitre 6 traite de la boucle en 8. Elle examine sa résistance aux radiations et les problèmes de maintenance. Le projet d'une nouvelle boucle à performances améliorées est présenté.

Le chapitre 7 mentionne pour mémoire les enroulements de culasse pour les basses énergies (BLW) car ils ne présentent aucun problème.

Le chapitre 8 est consacrée aux doses de radiations et à la radioactivité qui résultent de l'opération du PSR.

Le chapitre 9 donne les conclusions de la présente étude et résume les recommandations de ce rapport.

On trouvera dans l'annexe 1 des informations complémentaires sur le problème des défauts de fabrication de certains sertissage. Un tableau donne dans l'annexe 2 les doses de radiations reçues individuellement par les unités d'aimant dans le PSR.

Des informations complémentaires à celles données dans ce rapport, en particulier le développement historique qui nous a conduit à la situation actuelle, peuvent être trouvés dans la référence 18.

2. LES UNITES DE L'AIMANT PRINCIPAL

L'aimant principal du PSR comprend 100 unités qui sont installées dans l'anneau, plus une 101ème unité, dite de référence, qui est utilisée pour la génération des impulsions de champ magnétique par l'appareillage du train B ⁷⁾.

Chaque unité contient 10 blocs constitués d'un empilement de tôles d'acier isolées et collées à l'araldite. Il y a 5 blocs du type "ouvert" (entrefer étroit du côté de la culasse) et 5 blocs du type "fermé" (entrefer large du côté de la culasse). Voir figures 2 à 5.

2.1 Types d'unités

Chaque unité se divise en deux demi-unités de 5 blocs chacune, appelées respectivement secteur F (focalisant) ou secteur D (défocalisant). Compte tenu de la courbure des unités selon l'orbite du PSR, il y a quatre types d'unités, identifiées par la position de la culasse à l'intérieur ou à l'extérieur de l'orbite et par la succession des secteurs F et D dans le sens du faisceau de protons :

Type R : culasse à l'extérieur, D-F,	Nombre dans l'anneau : 35
Type S : culasse à l'extérieur, F-D,	Nombre dans l'anneau : 15
Type T : culasse à l'intérieur, F-D,	Nombre dans l'anneau : 35
Type U : culasse à l'intérieur, D-F,	Nombre dans l'anneau : 15

L'unité de référence, de type T, est placée à l'extérieur de l'anneau.

Les blocs d'origine ont été fabriqués par ANSALDO SAN GIORGIO et l'on a dû, en 1967, faire fabriquer par SIEMENS une série de 48 blocs supplémentaires pour faire face aux remplacements, prévus alors, de certains blocs d'origine endommagés par les radiations. Tout le reste de la tôle d'origine a été utilisé pour la fabrication de ces blocs supplémentaires.

Tous les blocs d'extrémité des unités ont été cerclés autour des pôles supérieurs et inférieurs afin d'éviter que les tôles, décollées par l'effet des radiations, puissent se déplacer sous l'action du champ magnétique pulsé. Il

y a donc quatre cerclages de pôles par unité. Tous les cerclages ont parfaitement tenu jusqu'à présent avec des tiges de serrage en cuivre au béryllium ayant un diamètre limité à 8 mm par le faible espace disponible.

L'unité de référence, située hors de l'anneau et qui n'est pas exposée aux radiations, n'a pas été équipée de cerclages. En outre trois unités dans l'anneau ont conservé une première réparation, dans laquelle une plaque d'extrémité est vissée sur les tôles décollées; il n'a pas été possible, en effet, d'enlever les vis, qui ont été collées à l'araldite, sans risquer d'endommager les tôles.

2.2 Inventaire des unités

De nouvelles unités ont été assemblées, soit pour remplacer des unités situées dans le PSR et endommagées par les radiations, soit pour constituer des unités de réserve en disponibilité immédiate.

Ces nouvelles unités utilisent souvent un mélange d'anciens blocs ANSALDO SAN GIORGIO et de nouveaux blocs SIEMENS, ceux-ci occupant en tout cas les positions d'extrémité.

a) Unités placées dans l'anneau du PSR (sauf T7)

- Unités d'origine, cerclées aux deux extrémités	96
- Unités de nouvelle fabrication avec plaques vissées U18 (MU2), R36 (MU6), U16 (MU56)	3
- Unité de nouvelle fabrication, cerclée, T38 (MU1)	1
- Unité de référence, hors anneau, non cerclée, T7	1

Total 101

b) Réserve d'unités disponibles pour les échanges

- U3 et R23 constituées avec 10 blocs anciens
- T39 et S16 constituées avec 10 blocs nouveaux
- U17 constituée avec 10 blocs nouveaux et réservée aux mesures magnétiques et aux études en laboratoire (nouvelle boucle polaire par exemple).

Il y a donc une unité de chaque type disponible immédiatement pour un échange avec une unité du PSR en cas de besoin. Le temps nécessaire pour cette opération est de 5 jours en tout, mais sans compter un temps de "refroidissement" éventuel si l'unité à changer est trop radioactive.

c) Réserve de blocs

- 1 bloc ANSALDO SAN GIORGIO à profil fermé
- 1 bloc SIEMENS à profil fermé
- 1 bloc SIEMENS à profil ouvert

2.3 Durée de vie du circuit magnétique des unités

Grâce au cerclage des pôles des blocs d'extrémité et au calage des blocs intermédiaires il n'y a plus de déplacement de tôles sous l'effet du champ magnétique pulsé et les dégâts qui en résultaient sont donc éliminés dans la liste des points faibles à surveiller.

Il convient d'examiner aussi deux causes possibles de détérioration des caractéristiques du circuit magnétique sous l'effet de doses de radiations très élevées : l'affaiblissement de l'isolation entre les tôles et la modification des propriétés magnétiques des tôles.

a) Affaiblissement possible de l'isolation entre les tôles

L'isolation entre les tôles des blocs ANSALDO SAN GIORGIO est constituée par une feuille de papier imprégnée d'araldite qui sert au collage des tôles. Les tôles ont été dégraissées mais n'ont pas reçu de traitement destiné à créer une couche isolante sur elles.

Le seul dégât causé par les radiations, qui a été constaté sur ces blocs, est le décollement des tôles dans la région des pôles qui est la plus irradiée.

Est-il possible qu'une irradiation beaucoup plus importante transforme la feuille de papier imprégnée d'araldite en une couche assez conductrice pour laisser passer des courants de Foucault trop élevés? Nous ne le croyons pas car des mesures faites dans la division SPS sur une section de 2 m, réalisée en tôles non isolées, dans un aimant prototype de 6 m n'ont pas permis de mettre en évidence un effet quelconque des courants de Foucault supplémentaires de cette section sur le champ magnétique ¹⁹⁾. Les contacts électriques entre tôles non isolées, même fortement serrées, se font sur des surfaces très limitées, de façon telle que la résistivité moyenne du bloc peut être de l'ordre de 10^5 fois celle de l'acier dans le sens perpendiculaire aux tôles, ce qui atténue suffisamment les courants de Foucault. Dans le cas des blocs d'aimant du PSR l'irradiation de la couche isolante placée entre les tôles ne pourrait pas produire sur la résistance électrique entre les faces d'extrémités un effet aussi grand que l'absence totale d'isolation entre tôles. Cette

conclusion est renforcée par le fait que la résistivité du tissu ou feutre carbonisé ($2 \text{ à } 3 \times 10^{-3} \Omega.m$), qui pourrait être représentative d'une isolation détruite par les radiations, est $2 \text{ à } 3 \times 10^4$ fois celle de l'acier ($1,1 \times 10^{-7} \Omega.m$).

La résistance entre les deux faces d'un bon bloc d'aimant du PSR est de l'ordre de 10Ω , ce qui correspond à une résistivité moyenne de $20 \Omega.m$ perpendiculairement aux tôles. Il apparaît donc que l'isolation entre tôles dans ces blocs est surabondante, ce qui laisse une marge pour sa détérioration.

Les blocs SIEMENS ont une isolation entre tôles plus résistante aux radiations car la feuille de papier intercalaire a été remplacée par une phosphatation des tôles avec emploi de fibres de verre pour arriver à la même densité moyenne que celle des anciens blocs. Il n'y a donc, a fortiori, aucune difficulté à prévoir à cause des courants de Foucault.

Nous pouvons donc conclure que l'influence des radiations ne doit pas faire craindre le développement de courants de Foucault susceptibles de produire des effets mesurables sur le champ magnétique du PSR.

b) Modification des propriétés magnétiques

Des échantillons de tôles des blocs ont été irradiés dans un réacteur pour mettre en évidence des modifications éventuelles de leurs caractéristiques magnétiques ⁸⁾. Remarquons cependant que les conditions de leur irradiation et que les propriétés magnétiques mesurées ne sont pas pleinement représentatives de celles qui importent dans le PSR.

Les tôles ont été découpées en forme d'anneau et empilées pour constituer un tore servant de noyau magnétique dans un transformateur à 50 Hz. Les cycles d'hystérésis de ce transformateur ont été mesurés avant et après l'irradiation dans le réacteur jusqu'à une fluence de $1,3 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ (en comptant seulement les neutrons d'énergie $E > 0,1 \text{ MeV}$, leur énergie maximale étant inférieure à 10 MeV). La dose de radiation absorbée dans le fer et qui correspond à cette fluence est de $2,8 \times 10^7 \text{ Gy} = 2,8 \times 10^9 \text{ rad}$.

Les essais montrent que pour cette dose d'irradiation la perméabilité ne varie pas jusqu'à 1,7 T puis elle diminue progressivement (la réduction est de 15% à 1,9 T).

Il est difficile de transposer les résultats des essais d'irradiation de tôles dans un réacteur pour en déduire les variations correspondantes dans le champ de radiations du PSR. Il paraît judicieux de refaire ces essais dans des conditions plus proches de celles qui nous intéressent car, s'il y a un effet notable pour une dose de quelques gigarads, on peut s'attendre à ce que plusieurs unités d'aimant soient touchées dans l'avenir (voir le tableau No. 2 dans la section 3.3).

Nous recommandons d'effectuer la mesure des propriétés magnétiques des tôles de l'aimant PSR en fonction de la dose d'irradiation (mesurée comme dans le PSR) dans un champ de radiations représentatif de celui du PSR. La méthode du transformateur à 50 Hz décrite ci-dessus conviendrait. Les conditions d'un essai fait dans un faisceau du SPS sur des échantillons d'aimants permanents ²²⁾ pourraient servir de base pour mettre au point la mesure que nous préconisons. Il serait possible d'exposer le tore de tôles à des doses de radiations dépassant 10^{10} rad au cours d'un essai de durée raisonnable, de l'ordre d'une année.

Si l'essai précédent met en évidence des effets susceptibles de modifier la distribution du champ magnétique du PSR d'une façon détectable par le faisceau, il resterait alors à effectuer la mesure la plus directement intéressante, qui consiste à comparer les valeurs du champ magnétique dans l'entrefer des quelques blocs les plus irradiés avec celles de blocs peu irradiés choisis dans le PSR.

La comparaison des champs magnétiques pourrait se faire au moyen d'un jeu de bobines mis en position avec précision dans chacun des deux blocs choisis. La mesure aurait lieu pendant les arrêts longs du PSR en utilisant l'alimentation normale de l'aimant. Une périodicité de quelques années, ou un accroissement de l'irradiation de 1 gigarad par exemple, suffirait pour détecter des variations progressives dans les rapports entre les champs des deux blocs de chaque paire ainsi constituée.

3. LES BOBINES PRINCIPALES DE L'AIMANT ET LES BARRES DE CONNEXION

3.1 Types de bobines

Il y a une bobine, comprenant deux galettes, sur chacun des deux pôles. Chaque galette contient cinq spires. Les galettes sont différentes selon que les unités ont leur culasse à l'intérieur ou à l'extérieur. Il y a donc deux jeux de galettes ⁹⁾.

- pour les unités R et S (culasse à l'extérieur) : jeu de 4 galettes ABCD
- pour les unités T et U (culasse à l'intérieur) : jeu de 4 galettes EFGH.

Il y a eu trois commandes pour la fourniture des bobines

- 1ère commande, d'origine en 1956, à ACEC. (101 jeux montés dans le PSR + 1 jeu ABCD + 1 jeu EFGH)	103
- 2ème commande, pour une réserve en 1967, à ACEC : (4 jeux EFGH)	4
- 3ème commande, pour une réserve en 1975, à ALSTHOM (5 jeux ABCD + 5 jeux EFGH + 1 galette F)	10
Total des jeux de 4 galettes	117

3.2 Inventaire des bobines

a) Bobines montées sur les unités du PSR

ACEC d'origine 1956	98
ACEC commande 1967 sur T38, U16, U18	3
Total des jeux de 4 galettes	101

b) Bobines montées sur les unités de réserve

ALSTHOM commande 1975 sur T39 et S16	2
ACEC d'origine 1956 sur R23 et U3	2
ACEC commande 1967 sur U17 pour mesures et essais	1
Total des jeux de 4 galettes	5

c) Bobines disponibles en réserve

ACEC d'origine 1956 : 2 jeux EFGH récupérés	2
ACEC d'origine 1956 avec 1 galette ALSTHOM : 1 jeu EFGH	1
ALSTHOM commande 1975 : 4 jeux neufs ABCD	4
ALSTHOM commande 1975 : 4 jeux neufs EFGH	4

Total des jeux de 4 galettes 11

La galette F supplémentaire commandée à ALSTHOM a servi à remplacer la galette No. 7F de ACEC (1956) très irradiée qui a été autopsiée pour les études mentionnées au paragraphe 3.3.b.

3.3. Etat des bobines et perspectives d'évolution

a) Isolation des bobines ACEC

Les bobines d'origine, fabriquées par ACEC, sont réalisées avec une barre d'aluminium entourée d'une isolation de 0,5 mm en ruban de papier-mica qui assure l'isolement entre les 5 spires de la galette. L'isolement de la galette vers la masse est obtenu par une épaisseur de 4 mm d'isolation en ruban de papier-mica avec un revêtement en tirette de soie de verre. Toute l'isolation de la galette est imprégnée d'une résine polyester thermodurcissable dite Thermalastic.

Les galettes montées dans les unités sont positionnées et tenues en tous points dans leurs supports par l'intermédiaire de plaques isolantes qui renforcent l'isolement vers la masse.

La surveillance de l'état des bobines est assurée par des inspections visuelles et des essais sous une tension continue de 7 kV pendant une minute lors des arrêts longs du PSR. Notons que la tension la plus élevée par rapport à la masse sur les bobines est de ± 3 kV en service actuellement.

b) Dégradation des bobines ACEC par les radiations

Une détérioration de l'apparence des bobines s'est manifestée depuis longtemps sur les unités les plus irradiées. Il y a décollement du revêtement extérieur avec formation de boursouflures par endroits.

Une étude du niveau résiduel d'isolement d'une bobine très irradiée a été réalisée au CERN en 1972 avec la participation d'un expert de ACEC ¹⁾. La galette 7F choisie provenait de l'unité T30 qui a été en position MU1 depuis l'origine du PSR jusqu'en mai 1966; à cette date l'unité T30 a été remplacée dans le PSR par l'unité T37 puis démontée. La dose reçue par T30 à son point de référence était 6×10^8 rad, ce qui donne sur la galette 7F une dose estimée de $1,5 \times 10^8$ rad à son point le plus exposé.

Les essais d'isolement en tension continue, au moyen d'une électrode de 2 dm^2 appliquée sur la surface de la galette 7F, ont donné à sec une tension de percement de 50 kV. Le niveau résiduel d'isolement est donc excellent mais il tombe considérablement si la surface de la galette est arrosée d'eau. En effet l'isolation de la galette est devenue poreuse sous l'action des radiations, mais un séchage est possible et il rétablit l'isolement électrique s'il n'y a pas eu percement du diélectrique.

Sur la galette 7F l'isolement électrique résiduel était assuré seulement par le mica feuilleté qui est encore en excellent état, mais le papier support du ruban micacé, la résine Thermalastic et le vernis superficiel de finition sont plus ou moins gravement détériorés par les radiations. Six échantillons de l'isolation ont été découpés sur la galette 7F et soumis à un essai d'irradiation accélérée dans un réacteur en 1974 par le groupe "Radiations" (M. Van de Voorde). Les résultats ont confirmé les valeurs obtenues antérieurement qui indiquaient une réduction à environ la moitié de la résistance à la traction pour une dose de 1×10^9 rad sur des échantillons de résine Thermalastic ¹³⁾.

La dégradation de l'isolation constatée sur la galette 7F est produite par une dose bien inférieure à 1×10^9 rad mais on sait maintenant que les essais d'irradiation accélérée dans un réacteur peuvent donner des résultats trop optimistes. Pour une dose totale d'irradiation donnée les dégâts sont aussi fonction du temps d'exposition, c'est-à-dire du débit de dose, car il y a un effet de synergie entre l'irradiation, la température et la présence d'oxygène dont la diffusion dans l'isolant demande un certain temps ^{8,20,23)}. Dans le PSR les débits de dose sont 10^{-3} à 10^{-4} fois ceux des essais dans un réacteur et d'autre part le champ de radiations est aussi de nature différente. Il faut donc utiliser les résultats des essais d'irradiation accélérée avec beaucoup de prudence dans les applications aux accélérateurs ou aux autres équipements ayant des débits de dose comparables. Ce problème est discuté plus en détail dans la section 4.5.

c) Perspectives d'évolution

Le tableau 2 montre les doses d'irradiation qui seraient reçues par les bobines les plus exposées en faisant l'hypothèse que la dose moyenne par an qu'elles ont reçu pendant les trois dernières années (1980-81-82) sera maintenue dans l'avenir. Les doses indiquées sont celles au point de référence des unités et l'on obtient les doses correspondantes aux points les plus exposés des bobines en divisant par un facteur 4.

On voit que l'unité T38 s'approche déjà de la dose limite de 4×10^9 rad qui était prévue dans le rapport de 1974. Cependant les essais de l'isolement de ses bobines, à sec, sous la tension continue de 7 kV restent satisfaisants malgré la dégradation apparente de l'isolation qui est plus accentuée que sur la galette 7F discutée ci-dessus : sa compacité est encore plus diminuée aux endroits très irradiés (boursoflures locales très perceptibles) et sa porosité à l'eau était importante avant l'application d'une nouvelle couche de peinture.

Pour l'unité T38, qui n'est plus exposée à une irradiation importante depuis l'arrêt de la cible 1 à la fin de 1981, nous avons employé la dose reçue en 1982 seulement dans nos calculs d'extrapolation. Si les conditions d'exploitation du PSR restent ce qu'elles sont actuellement pour cette unité, elle continuera pendant une dizaine d'années à être l'unité la plus irradiée du PSR à un niveau constant de 330×10^7 rad. Il serait utile de tirer des informations sur l'état de cette unité afin d'avoir de meilleures bases pour prévoir l'évolution des dégâts dus à l'irradiation de l'aimant du PSR dans les décennies à venir. Dans ce but deux voies nous paraissent intéressantes :

1. Reprendre sur l'isolation des bobines de l'unité T38 des études comme celles qui ont été effectuées en 1972-74 sur l'unité T30 qui avait reçu une dose d'irradiation cinq fois plus faible. Pour cela il conviendrait de sortir l'unité T38 du PSR et de la remplacer par l'unité de réserve disponible T39. La rénovation de l'unité T38 permettrait de reconstituer la réserve d'unités en disponibilité immédiate.
2. Placer l'unité T38 dans une position beaucoup plus exposée aux radiations que MU1, en MU37 par exemple, afin de compléter notre information vers des niveaux d'irradiation supérieurs et d'atteindre éventuellement la dose fatale pour l'isolation. Il est probable que l'affaiblissement progressif de l'isolation sera détecté à temps lors des essais à 7 kV pour permettre un remplacement de cette unité pendant un arrêt planifié. Le risque couru en cas d'une panne pendant l'opération est celui d'un arrêt du PSR pendant cinq jours pour remplacer T38 par T39.

Si l'extrapolation des doses reçues dans les conditions actuelles reste valable, il faudra attendre une douzaine d'années pour que l'unité S2 dépasse l'unité T38 dans la course à l'irradiation maximale. Avec ces hypothèses il est possible, en considérant le tableau 2, de prévoir de quelle façon la réserve de galettes sera utilisée pour remplacer les bobines trop irradiées. Cependant la résistance aux radiations indiquée pour le mica étant très élevée, supérieure à 10^{10} rad ⁸⁾, la dose fatale devrait largement dépasser 4×10^9 rad au point de référence des unités.

d) Emploi de la réserve de galettes

En cas d'arrosage accidentel

Il est probable que le claquage diélectrique ne toucherait qu'une seule bobine avant d'entraîner la disjonction de l'alimentation. L'unité défectueuse devrait être remplacée par une unité de réserve, ce qui peut se faire dans un arrêt du PSR de 5 jours. Les bobines des autres unités éventuellement arrosées pourraient vraisemblablement être séchées sur place pendant cet arrêt.

En cas d'irradiation jusqu'au niveau critique

Le niveau critique d'irradiation ne sera atteint, pour commencer, que par un très petit nombre d'unités pendant une période de plusieurs années. La dose fatale d'irradiation étant alors connue il sera possible de prévoir avec plus de certitude qu'à présent le développement des remplacements de bobines nécessaires. Une nouvelle commande de galettes pourra être passée en ayant un délai suffisant pour leur fabrication grâce à la réserve actuelle.

En conclusion, si les bobines ne sont ni arrosées accidentellement ni manipulées sans égard pour la résistance mécanique affaiblie de leur isolation, leur limite d'irradiation doit permettre de dépasser la dose de 4×10^9 rad au point de référence des unités.

A l'heure actuelle on peut s'attendre à consommer au plus deux jeux de 4 galettes ABCD et deux jeux de 4 galettes EFGH vers la fin de ce siècle à cause de l'irradiation accumulée. Jusqu'à présent aucun remplacement de galette n'a été nécessaire pour cette raison.

La survie des bobines paraît assurée au moins jusqu'à la fin de ce siècle. La réserve actuelle donne un délai suffisant, quand elle viendra à diminuer, pour une nouvelle fabrication destinée à la reconstituer.

3.4 Les barres de connexion (Bus-bars)

Il existe 8 types de barres de connexion qui dépendent du type d'unité (R , S , T , U) raccordée et de la section droite traversée par la barre. La dénomination est ainsi définie :

- 1ère lettre : selon le type de l'unité en amont de la section droite :

I pour culasse à l'intérieur (T, U), E pour culasse à l'extérieur (R, S).

- 2ème lettre : longueur de la section droite :

S pour section courte (short), L pour section longue.

- 3ème lettre : selon le type de l'unité en aval de la section droite

I pour culasse à l'intérieur (T, U), E pour culasse à l'extérieur (R, S).

a) Barres de connexion montées dans le PSR ou en réserve

L'inventaire actuel des barres de connexion est donné ci-dessous

Tableau 1.

Répartition des barres de connexion

Type de barre	Montées dans le PSR	En réserve	Remarques
ISI	19	1	
ILI	4	0	
ISE	18	1	
ILE	7 + 1*	1	Modifiée pour ICE
ESE	22	1 +	Fabrication CERN
ELE	1	0	
ESI	19 + 1*+	2	Fabrication CERN
ELI	7	2	
Total	97 + 2	8	

* Barres modifiées pour l'expérience ICE.

+ Barres fabriquées au CERN à cause des permutations d'unités.

b) Evolution et perspectives

Il n'y a pas jusqu'à présent de vieillissement notable des barres de connexion. En cas de nécessité il est possible d'adapter les barres de réserve en modifiant une partie limitée sur laquelle on refait l'isolation. Il existe un jeu de câbles souples permettant un dépannage rapide.

Tableau 2

Doses (en 10^7 rad) sur les bobines les plus irradiées - valeurs au point de référence des unités

Unité	T38	U16	R15	S2	T14	T12	T6	S8	T34	U14	S6
Fabrication	1970	1970	1959	1959	1959	1959	1959	1959	1959	1959	1959
Position MU	01	08	100	93	37	85	45	59	61	22	87
depuis	5-70	11-70	1959	1959	1959	1959	1959	1959	1959	1959	1959
jusqu'à	présent	9-80	1-74	présent	présent	présent	présent	6-65	présent	11-69	présent
Position MU		56	42					83		16	
depuis		9-80	1-75					6-65		11-69	
jusqu'à		présent	présent					présent		présent	
Dose totale	330,2	203,3	142,8	125,5	92,6	90,4	77,3	82,5	68,3	48,7	50,6
Dose moyenne/an	0,16	0,74	9,2	17,3	15,2	6,7	7,5	7,2	7,6	7,2	6,9
1980 à 1982	(1982)										
Extrapola-	1990	331	209	216	264	144	137	140	129	106	106
tion de la	1995	332	213	262	350	177	175	176	167	142	140
dose reçue	2000	333	217	308	437	211	212	212	205	178	175

4. LES ENROULEMENTS POLAIRES PFW (POLEFACE WINDINGS)

Selon les recommandations du rapport de 1974, l'ensemble des anciennes nappes polaires a été remplacé à cause des détériorations dues aux radiations. De nouvelles nappes ¹⁰⁾ compatibles avec les anciennes, pour permettre une installation progressive dans le PSR, ont été commandées à la firme BBC (Mannheim, Allemagne) en janvier 1976. La commande a porté sur 480 à 486 nappes selon le résultat du compte des nappes après l'acceptation finale.

Les nouvelles nappes ont été installées au cours de trois arrêts du PSR essentiellement : 24 en 1977, 184 en 1978 et 196 en 1979, soit 404 nappes en tout sur les 101 unités d'aimant du PSR.

Rappelons que les nappes existent sous quatre types DL, DR, FL, FR dont la dénomination est définie ainsi :

- 1ère lettre : type de la demi-unité : D pour défocalisante, F pour focalisante
- 2ème lettre : type du pôle correspondant.

Un observateur situé au centre du PSR et regardant les nappes placées sur les pôles inférieurs verra sur la partie gauche (left) de l'unité, donc la demi-unité amont, une nappe L et sur la partie droite (right), donc la demi-unité aval, une nappe R. Une nappe L en amont sur le pôle inférieur peut aussi se monter en aval sur le pôle supérieur à condition que la demi-unité soit de même type (D ou F). On a donc :

L pour amont inférieur ou aval supérieur.

R pour aval inférieur ou amont supérieur.

Chaque unité comprend quatre nappes, dont une de chaque type. Les nouvelles nappes présentent, par rapport aux anciennes nappes, un certain nombre d'améliorations qui sont décrites ci-dessous.

4.1 Description des nouveaux PFW

Les caractéristiques principales des nouveaux enroulements polaires, comparées à celles des anciens, sont les suivantes ¹⁰⁾.

- Positions des 13 conducteurs principaux, et de leurs retours, identiques pour donner le même effet magnétique et permettre un remplacement progressif des anciens PFW par les nouveaux.

- Division, près de l'orbite centrale, du bobinage de chaque nappe en deux circuits séparés :
 - circuit W (wide) du côté large de l'entrefer, avec 3 conducteurs actifs,
 - circuit N (narrow) du côté étroit de l'entrefer, avec 10 conducteurs actifs.
- Augmentation de 20% de la section de cuivre des conducteurs principaux $3 \times 9 = 27 \text{ mm}^2$ au lieu de $2,5 \times 9 = 22,5 \text{ mm}^2$ anciennement.
- Nouvel arrangement des boucles auxiliaires servant à l'auto-alimentation des circuits de correction des courants de Foucault des chambres à vide. Les plaquettes de correction, regroupant les résistances qui sont choisies en fonction des types de chambre à vide, sont discutées dans le chapitre 5.
- Meilleure précision géométrique dans la position des conducteurs et dans la forme de la nappe qui doit bien s'adapter au pôle pour assurer un bon refroidissement.
- Courant efficace nominal par nappe : 80 A
- Température maximale nominale : 50°C.

Lors de leur installation sur les unités les nappes ont été alignées individuellement au moyen d'une mesure magnétique avant d'être fixées par les nouvelles bandes de serrage en acier inoxydable. La géométrie des nappes et la précision de position des conducteurs se sont avérées excellentes.

4.2 Configurations de branchement du système des PFW

Un nouveau système de câblage, utilisant 15 km de câble 50 mm² blindé, ramène 8 circuits généraux à un nouveau panneau de distribution motorisé (PFW patch-panel) qui permet d'obtenir rapidement et simplement les diverses configurations de branchement du système des PFW. Ce système comprend aussi le circuit de la boucle en 8 autour des culasses des unités, qui est décrit dans le chapitre 6.

Les 8 circuits généraux comprennent chacun 101 circuits individuels de nappes qui sont distribuées tout autour de l'anneau PSR. Ces 8 circuits sont nommés :

DN pair et DN impair; DW pair et DW impair
FN pair et FN impair; FW pair et FW impair

Dans la dénomination de ces circuits, D et F se rapportent comme précédemment aux nappes défocalisantes et focalisantes respectivement, N et W se rapportent au circuit de 10 conducteurs (côté étroit) et au circuit de 3 conducteurs (côté large) respectivement, et l'on considère la parité du numéro de la place occupée par l'unité dans le PSR.

- Le circuit DN pair comprend les circuits du côté N des 2 nappes de chacune des 50 unités de numéros pairs, plus celui d'une nappe D de l'unité 101 de référence, soit 101 circuits individuels de nappe.
- Le circuit DN impair comprend les circuits du côté N des 2 nappes de chacune des 50 unités de numéros impairs, plus celui de l'autre nappe D de l'unité 101 de référence.
- Les circuits DW pair et DW impair seront constitués de la même façon et utiliseront chacun le circuit W d'une nappe différente de l'unité 101.
- Les circuits FN pair et FN impair, FW pair et FW impair seront aussi constitués de la même façon.

a) Système de branchement dit "à 3 courants"

Ce système est le seul utilisé en opération à l'heure actuelle. Il y a un regroupement des 8 circuits généraux ci-dessus en 2 circuits et on utilise la boucle en 8 comme 3ème circuit ⁴⁾.

- DN pair et DW pair sont mis en série pour constituer D pair.
- DN impair et DW impair sont mis en série pour constituer D impair.
- FN pair et FW pair sont mis en série pour constituer F pair.
- FN impair et FW impair sont mis en série pour constituer F impair.

On obtient alors les 3 circuits suivants :

- 1er circuit constitué par D pair et D impair en parallèle
- 2ème circuit constitué par F pair et F impair en parallèle
- 3ème circuit constitué par la boucle en 8.

Les regroupements décrits ci-dessus sont faits automatiquement grâce à des contacteurs motorisés dans le panneau de distribution des PFW.

b) Système de branchement dit "à 5 courants"

Dans ce système des possibilités supplémentaires de réglage du champ magnétique sont obtenues en alimentant séparément les circuits N et W. On fait comme ci-dessus la mise en parallèle des circuits pairs et impairs. On obtient ainsi les 5 circuits suivants ⁴⁾

- 1er circuit, DN constitué par DN pair et DN impair en parallèle
- 2ème circuit, DW constitué par DW pair et DW impair en parallèle
- 3ème circuit, FN constitué par FN pair et FN impair en parallèle
- 4ème circuit, FW constitué par FW pair et FW impair en parallèle
- 5ème circuit constitué par la boucle en 8.

Les résistances des différents circuits généraux de même type ont été équilibrées avec des résistances en série pour éviter les courants de circulation lors des mises en parallèle.

Les transformateurs de compensation, qui annulent les courants induits dans les circuits PFW à l'injection, ont été refaits pour fonctionner à 800 MeV comme à 50 MeV.

4.3 Défauts de fabrication

Après le montage de la totalité des nappes dans le PSR, certains défauts de fabrication dans les sertissages, qui n'avaient pas pu être détectés lors des essais spécifiés en usine, ont été mis en évidence en février 1979 pendant l'essai global au courant efficace nominal de 80A. Ces sertissages plus ou moins défectueux se trouvent au raccordement du conducteur principal de $3 \times 9 \text{ mm}^2$ avec un des quatre câbles d'alimentation de 35 mm^2 . Ce problème est exposé plus en détail dans l'annexe 1.

Après une étude du problème avec le fabricant, celui-ci a pris à sa charge la réparation des nappes défectueuses. La cadence de remplacement de celles-ci dans le PSR est donnée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3

Remplacement des nappes défectueuses dans le PSR

Année	DL	DR	FL	FR	Total
1979	1	2	0	0	3
1980	2	1	4	3	10
1982	1	2	4	0	7
1983	4	4	2	2	12
Totaux	8	9	10	5	32

Les nappes sont classées en quatre catégories suivant la valeur de la résistance de leurs quatre sertissages. La valeur la plus élevée des quatre résistances est prise en considération pour ce classement :

- catégorie 1 résistance < 150 $\mu\Omega$
- catégorie 2A 150 $\mu\Omega$ \leq résistance \leq 400 $\mu\Omega$ stable dans le temps
- catégorie 2B 150 $\mu\Omega$ \leq résistance \leq 400 $\mu\Omega$ variable dans le temps
- catégorie 3 résistance > 400 $\mu\Omega$.

Dans la catégorie 2B se trouvent les nappes dont les sertissages ont au moins une résistance comprise entre 150 et 400 $\mu\Omega$ et dont la variation depuis la mesure de 1979 dépasse 25 $\mu\Omega$.

Les nappes des catégories 2B et 3 sont considérées comme défectueuses et doivent être réparées. Le remplacement est fait en priorité pour celles des nappes de la catégorie 3 qui présentent un échauffement excessif. Pour le seuil de la catégorie 3, avec le courant efficace nominal de 80 A, un sertissage de 400 $\mu\Omega$ produit sur le talon de la nappe à son voisinage une température de 35°C, ce qui correspond à un supplément d'échauffement de 3°C.

Avant chaque arrêt long du PSR les résistances des sertissages sont mesurées individuellement avec une précision de quelques microhms. Le classement des nappes est mis à jour à cette occasion comme indiqué dans l'annexe 1.

Après les remplacements de nappes défectueuses mentionnés dans le tableau 3, l'état des nappes dans le PSR en septembre 1983 est le suivant :

Tableau 4

Répartition des nappes dans le PSR suivant l'état des sertissages

Catégorie	DL	DR	FL	FR	Total
1	88	92	91	94	365
2A	7	7	2	3	19
2B	6	2	7	3	18
3	0	0	1	1	2
Total	101	101	101	101	404

Les deux nappes de catégorie 3 qui restent encore à remplacer dans le PSR ne présentent pas un risque immédiat car elles ont des sertissages de résistance relativement peu élevée :

- MU61, unité T34, nappe FL8, 1 sertissage de 564 $\mu\Omega$.
- MU73, unité S3, nappe FR7, 1 sertissage de 546 $\mu\Omega$.

Les températures sur les talons près de ces sertissages sont d'environ 40°C pour le courant efficace nominal de 80 A avec les valeurs de résistance indiquées.

a) Réparation des sertissages

Le nombre total initial de nappes défectueuses (catégories 2B et 3) s'élevait à 62. A l'heure actuelle 30 nappes ont été réparées par BBC, sans aucun rebut pour mauvaise réparation ou dégât sur la nappe, parmi lesquelles 11 nappes ont été remontées dans le PSR. Il reste encore 32 nappes à réparer à présent dont 20 sont dans le PSR.

L'accord passé avec BBC pour la réparation des nappes ayant des sertissages défectueux s'étend jusqu'à la fin de 1989, en se basant sur les mesures de résistance qui seront effectuées jusqu'à cette date. Il est donc possible de procéder aux remplacements de nappes qui resteraient à faire en choisissant la meilleure occasion pendant les arrêts longs du PSR.

b) Surveillance des nappes

Au cours des années à venir il faudra continuer à surveiller les résistances des nappes montées dans le PSR. Il paraît probable que la situation évolue peu désormais.

Quand on prend en considération la progression de l'irradiation des nappes il paraît judicieux de ne plus procéder à des remplacements de nappes pour réparer les sertissages, sauf dans la catégorie 3 éventuellement, pour éviter de créer des fissures dans les câbles des nappes qui sont affaiblis par les radiations. Le problème des fissures est discuté en détail dans la section 4.5.

En ce qui concerne les nappes de la catégorie 3 il faudra prendre en considération le courant efficace qui correspond aux conditions désirées d'opération du PSR pour calculer la température correspondante sur le plus mauvais sertissage. La température limite à ne pas dépasser est 50°C.

4.4 Réserve de PFW

La réserve est constituée par toutes les nappes conformes aux spécifications et qui ne sont pas montées sur les 101 unités constituant l'aimant principal du PSR. Cette réserve est connue avec l'erreur possible des quelques nappes qui seront éventuellement endommagées lors des réparations de sertissages qui restent à faire.

La réserve peut être divisée en plusieurs catégories :

- a) Les nappes ayant seulement de bons sertissages à l'origine.
- b) Les nappes ayant eu au moins une réparation de sertissage quand elles étaient encore neuves.
- c) Les nappes ayant eu au moins une réparation de sertissage après une période d'utilisation dans le PSR.

- d) Les nappes neuves ayant encore au moins un sertissage à réparer.
- e) Les nappes retirées du PSR après une période d'utilisation et ayant encore au moins un sertissage à réparer.

La situation en septembre 1983 est donnée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5

Répartition des nappes de la réserve selon l'état des sertissages

Catégorie	DL	DR	FL	FR	Total
a	14	11	6	13	44
b	0	2	5	4	11
c	2	2	4	0	8
d	0	0	0	0	0
e	4	4	2	2	12
Total	20	19	17	19	75

La réserve est disponible pour les remplacements de nappes devenus nécessaires à cause de l'irradiation reçue pendant le fonctionnement du PSR. Jusqu'à présent il y a eu en tout 6 nappes à remplacer à cause de fissurations de l'isolation en polyuréthane des câbles de connexion résultant de l'irradiation qu'elles avaient reçue.

Le décompte des nappes s'établit comme suit :

- nappes montées sur les 101 unités d'aimant du PSR	404
- nappes de réserve potentielle	75
- nappes mises hors service à cause des radiations	6
Total des nappes acceptées provisoirement	485
- nappes éliminées après réparation des sertissages	0
Total	485

La réserve sert aussi à la construction des unités d'aimant de réserve. Comme déjà indiqué dans le chapitre 3, il y a une unité de réserve disponible de chacun des types R, S, T, U ainsi qu'une unité destinée aux mesures et aux essais (U17). Pour ces 5 unités il faut décompter 20 nappes, ce qui ramène la réserve potentielle de nappes pour les remplacements à 55.

L'état de l'isolement global des nappes est vérifié systématiquement, au début et à la fin de chaque arrêt long du PSR, au moyen d'un essai sous tension continue à 3 kV pendant une minute. Jusqu'à présent il n'y a eu aucun claquage sur les nouvelles nappes pendant ces essais. D'autre part une inspection visuelle est effectuée sur les nappes les plus irradiées pour vérifier l'état de leurs câbles.

Si un défaut sur une nappe se manifestait par un claquage pendant l'opération du PSR on pourrait réaliser le remplacement de la nappe défectueuse au cours d'un arrêt spécial de 2 à 3 jours. Mais plutôt que de procéder immédiatement à ce remplacement on pourrait mettre hors circuit la paire de nappes de la demi-unité concernée et continuer l'opération jusqu'à la fin de la période si le fonctionnement du PSR n'est pas trop perturbé. Cette méthode a déjà été employée lors de dégâts sur les anciennes nappes.

4.5 Résistance aux radiations

Les spécifications des nappes ont été rédigées en ayant pour objectif d'atteindre une dose limite admissible de 3×10^9 rad mesurée au point de référence ¹⁾, c'est-à-dire à l'entrée de l'unité (amont) à 5 cm sous l'axe du faisceau. Le point des nappes le moins résistant aux radiations est l'isolation des câbles de connexion à la sortie du talon. La dose à cet endroit est environ $1/3$ de celle au point de référence. Il fallait donc une dose admissible de 1×10^9 rad pour cette isolation.

Le polyuréthane (PUR) a été choisi pour cette isolation comme étant le meilleur matériau en ce qui concerne la combinaison des propriétés suivantes : résistance aux radiations, grande souplesse et bonnes caractéristiques mécaniques pour une isolation de câble.

Pendant la période préparatoire pour la fabrication des nouvelles nappes, des échantillons du polyuréthane des PFW ont été fournis par la firme BBC afin que le CERN puisse procéder à des essais d'irradiation

accélérée dans un réacteur. Nous avons constaté que ces échantillons satisfaisaient les conditions des spécifications après une irradiation à 1×10^9 rad.

Il est apparu au cours de ces dernières années, aussi bien pour les nouvelles nappes que pour la boucle en 8 (voir la section 6.2), que l'isolation en polyuréthane se dégrade, dans les conditions d'utilisation qui règnent dans le PSR, à des niveaux de dose bien inférieurs à 1×10^9 rad. Il s'agit d'un effet synergique des radiations, de la température et de l'oxygène ambiant qui a été étudié récemment, en particulier par R.L. Clough et K.T. Gillen aux Sandia National Laboratories (Albuquerque, U.S.A). Ces deux auteurs ont étudié auparavant cet effet ²⁰⁾ sur le polyéthylène (PE) et le chlorure de polyvinyle (PVC). Ce phénomène a été l'objet d'un rapport récent au CERN. ²³⁾

La diffusion de l'oxygène et sa consommation dans l'isolation sous l'action de l'irradiation, qui contribue au phénomène de dégradation, sont fonctions du temps. C'est pourquoi les dégâts constatés dépendent non seulement de la dose totale d'irradiation mais aussi de la durée de l'exposition, c'est-à-dire du débit de dose. Dans les cas qui nous intéressent dans le PSR les débits de dose sur les isolations en PUR se trouvaient dans une fourchette de 10^3 à 10^4 rad/heure alors que pendant les essais d'irradiation dans un réacteur le débit de dose est de l'ordre de 10^7 rad/heure.

Dans le cas du polyuréthane des PFW irradiés dans le PSR il existe un niveau critique de dose, de 1 à 3×10^7 rad, auquel les propriétés mécaniques telles que l'élongation et la résistance à la rupture en traction sont déjà modifiées sans que la souplesse et l'apparence du câble, ni a fortiori sa rigidité diélectrique, soient dégradées. Cependant, au dessus de ce niveau d'irradiation, une manipulation du câble, pour un démontage par exemple, sans créer de dégât apparent immédiat, induit l'amorçage de fissures qui se développent, en un temps qui va de quelques heures à quelques jours, jusqu'à la déchirure complète de l'isolation même si celle-ci est laissée au repos après la manipulation.

Pour tenir compte de ce phénomène il convient d'introduire deux niveaux de dose maximale admissible d'irradiation pour les PFW, ramenés au point de référence de l'unité :

- 1) en cas de manipulation de la nappe sur son unité 5×10^7 rad
- 2) sans aucune manipulation de la nappe sur son unité 5×10^8 rad

Ce phénomène a été une surprise pour nous car nous avons été satisfaits lors d'une utilisation précédente du PUR. En effet, pour faire face à l'épuisement progressif de la réserve des PFW d'origine fabriqués par la firme ACEC (Charleroi, Belgique), il avait fallu faire fabriquer 40 nappes supplémentaires dont la réalisation fut confiée à la firme BBC (Mannheim, Allemagne) en 1968. A cette époque le PUR avait été choisi pour l'isolation des câbles sur la base d'essais d'irradiation accélérée dans un réacteur ¹³⁾. L'expérience acquise lors de l'utilisation de ces nappes dans le PSR avait confirmé le bien-fondé de ce choix : aucune de ces nappes n'a dû être remplacée à cause d'une défaillance lors de l'essai de l'isolation à 3 kV. Il y avait cependant un brunissement important du PUR sur les nappes les plus irradiées. Il faut noter qu'aucune de ces nappes n'a été manipulée sur son unité avant le remplacement par les nappes nouvelles : nous connaissons maintenant l'importance de ce fait.

Le tableau 6 donne les doses d'irradiation des nappes dites "BBC-1" les plus exposées de cette première fabrication par la firme BBC. Les doses sont exprimées au point de référence des unités et seules des nappes montées en amont des unités, près du point de mesure, sont prises en considération dans ce tableau.

Lors du montage des nouvelles nappes notre attention n'avait pas encore été attirée par les dégâts précoces sur les isolations en PUR. Toutes les nappes anciennes ont été démontées sans examen particulier puis mises au rebut des matériaux radioactifs. Il n'est plus possible de faire une analyse générale des dégâts dus aux radiations sur ces nappes pour tenter de confirmer l'impression que le PUR des nappes BBC-1 était meilleur que celui des nappes BBC-2. Il y a cependant quelques exceptions car cinq nappes BBC-1 ont été mises de côté dans le Hall Nord :

- 2 nappes qui n'ont jamais été montées sur les unités.
- 2 nappes qui ont été montées sur des unités mais peu irradiées et sur lesquelles l'isolation en PUR des câbles est en parfait état.
- 1 nappe (FL92) qui est restée montée sur l'unité S8 en position MU83 pendant trois ans. Sur cette nappe, qui a été manipulée pour le démontage, l'isolation en PUR de tous les câbles est gravement détériorée et part en lambeaux du côté du talon. La dose reçue au point de référence est de 28×10^7 rad.

Il est difficile à l'heure actuelle de tirer une conclusion sur la supériorité relative du PUR de la première fabrication de BBC. En effet nous n'avons qu'une seule comparaison valable à faire avec une nappe BBC-2,

la FL99, qui a été employée aussi sur l'unité S8 de janvier 1979 à septembre 1980 en position MU83 sur le même pôle. La dose reçue au point de référence est de 21×10^7 rad pendant cette période. La nappe FL 99 a aussi été retirée du PSR donc manipulée : l'isolation en PUR de tous ses câbles est gravement détériorée et part en lambeaux du côté du talon.

Les dégâts sur les nappes FL92 (BBC-1) et FL99 (BBC-2) sont semblables pour des doses de radiations assez voisines.

Tableau 6

Doses d'irradiation des nappes BBC-1 les plus exposées, en amont

Nappe	Unité	Installée	Enlevée	Position MU	Dose 10^7 rad	Remarque
FR102	T38	5-1970	1-1978	1	253	Disparue
FL102						Idem
DL85	U16	11-1970	1-1978	8	196	Idem
DR17						Idem
DL5	R15	1-1975	1-1979	42	101	Idem
DR81						Idem
FL92	S8	1-1976	1-1979	83	28	Hall Nord
FR89						Disparue

Il serait possible d'entreprendre des essais comparés d'irradiation dans le PSR sur des segments de câbles provenant des deux fabrications de nappes par BBC. Nous pensons cependant que le jeu n'en vaut pas la chandelle car il est clair maintenant que le terme polyuréthane recouvre des matériaux de caractéristiques assez variables selon le fournisseur et sa méthode de fabrication (réf. 8, 1ère partie). Il serait préférable, pour des fabrications futures, d'étudier la radio-résistance de câbles actuels de diverses origines, isolés au PUR ou par d'autres matériaux éventuellement meilleurs, dans des conditions représentatives de celles de leur emploi présumé.

Dans de futures spécifications il serait judicieux de définir les essais d'irradiation des isolations selon la norme 544 de la CEI (Commission Electrotechnique Internationale, Genève) en y incluant des conditions, telles que température et débit de dose spécifiés ainsi que manipulation éventuellement, dont on connaît l'importance. Les doses de radiations admissibles seront alors vraisemblablement limitées à 10^8 rad ou moins. 21,23)

4.6 Prévisions de remplacement des PFW

Les doses de radiations reçues par les unités de l'aimant sont données dans la série de rapports "Etat de l'aimant du PS" en valeur annuelle et en valeur cumulée ⁶⁾. Connaissant la date du montage des nappes sur les unités on peut en déduire la dose de radiations reçues par les PFW (Voir annexe 2).

La liste des quelques unités les plus irradiées est susceptible de varier selon les conditions spécifiques de fonctionnement du PSR. Ainsi l'unité T38, qui occupe la position MU1 depuis Mai 1970, est de loin l'unité la plus irradiée avec une dose cumulée de 330×10^7 rad. Elle n'a cependant reçu que $0,16 \times 10^7$ rad en 1982 car la cible 1 a été retirée du service. Les nappes qui sont montées sur le secteur amont de cette unité, donc exposées directement à l'irradiation de la cible 1, ont reçu de janvier 1978 à janvier 1983 une dose totale de 77×10^7 rad, mesurée au point de référence de l'unité. L'isolation de polyuréthane de leurs câbles, qui n'avaient pas été manipulés avant la réparation décrite ci-dessous, présente des fissures dues au phénomène décrit dans la section 4.5. La réparation, ou plutôt le renforcement de l'isolation qui est fissurée seulement sur les 4 câbles de 35 mm^2 , a consisté à glisser sur ces 4 câbles une gaine de polyuréthane renforcée par du tissu de verre.

Les PFW de l'unité T38 ainsi que ceux qui dépasseront le niveau de 30×10^7 rad seront systématiquement examinés sans manipulation chaque année en complément des essais sous tension continue de 3 kV. En cas de fissuration de câbles on renforcera l'isolation au moyen d'une gaine de PUR comme sur l'unité T38. L'expérience montrera si l'on peut ainsi prolonger la durée d'utilisation des PFW.

Le tableau 7 donne les unités les plus irradiées au cours des 3 années 1980-1982, à l'exception de l'unité T38 en position MU1 pour laquelle l'irradiation dans les années à venir devrait rester faible si on n'installe pas un nouvel élément produisant des radiations à la place de la cible 1. La dose totale reçue par l'unité depuis sa fabrication est indiquée ainsi que la date de son installation dans sa position actuelle. Les doses reçues pour les 3 années 1980, 1981 et 1982 sont données ainsi que le total pour ces années et la valeur moyenne par année qui peut servir à estimer le nombre de nappes qu'il faudra remplacer dans l'avenir à cause de l'irradiation si les conditions d'exploitation du PSR restent semblables.

La consommation des nappes de la réserve peut varier suivant les conditions de fonctionnement du PSR et les manipulations de nappes qu'il faudra effectuer pour une raison ou une autre.

Nous avons exposé dans le paragraphe 4.3.b les conditions pour minimiser le remplacement des nappes ayant des défauts de sertissages. A l'heure actuelle aucun nouveau remplacement n'est nécessaire mais il faudra continuer à surveiller les résistances des sertissages.

Nous avons montré dans la section 4.4 que la réserve de nappes disponibles pour les remplacements est de 55 nappes après avoir équipé les 5 unités supplémentaires.

La réserve de nappes devrait être suffisante jusque vers 1990. Il faudra suivre son évolution et passer une nouvelle commande de nappes 2 à 3 ans avant son épuisement.

Dans le futur projet de PFW, auquel il faudra penser dans quelques années, il serait intéressant de franchir la limite imposée par l'emploi de câbles de connexion faisant partie intégrante des nappes. En effet la résistance aux radiations de ces câbles est bien inférieure à celle du corps de la nappe. Une solution possible consiste à employer un connecteur femelle noyé dans le talon de la nappe et sur lequel viennent se brancher tous les câbles de raccordement. Quand un câble est endommagé par les radiations près de l'entrée dans la nappe il est alors facile de changer le court segment concerné qui va de la nappe au bornier PFW de l'unité. Le coût supplémentaire d'une telle fabrication serait faible comparé au gain procuré par une durée de vie des nappes considérablement augmentée.

L'emploi de la solution avec connecteur incorporé dans le talon de la nappe, plus coûteuse que celle des PFW actuels, devrait s'appuyer sur des essais de longue durée effectués avec un prototype dans des conditions représentatives de celles du PSR pour éviter les surprises que des faiblesses inattendues d'une nouvelle solution peuvent causer après des années d'exploitation. Nous recommandons de mettre sur pied ces essais dès que possible pour avoir une durée suffisante d'expérimentation avant d'entreprendre un nouveau projet de PFW.

Tableau 7

Doses reçues (en 10^7 rad) par les unités d'aimant les plus irradiées en 1980-81-82

Position MU	93	37	42	61	45	16	83	77	87	85	97
Unité	S2	T14	R15	T34	T6	U14	S8	T24	S6	T12	T15
En place depuis	1959	1959	1-1975	1959	1959	11-1969	6-1965	1959	1959	1959	1959
Dose totale	125,5	92,6	142,8	68,3	77,3	48,7	82,5	36,0	50,6	90,4	60,4
Dose 1980	30,0	11,5	8,7	10,0	17,0	3,5	9,0	1,2	4,1	9,0	15,0
Dose 1981	7,0	22,0	12,0	8,0	2,1	5,2	4,3	10,0	2,8	3,1	1,7
Dose 1982	15,0	12,1	7,0	4,9	3,5	12,9	8,2	10,0	13,7	7,9	1,9
Dose pour ces 3 ans	52,0	45,6	27,7	22,9	22,6	21,6	21,5	21,2	20,6	20,0	18,6
Dose moyenne par an	17,3	15,2	9,2	7,6	7,5	7,2	7,2	7,1	6,9	6,7	6,2

Note : l'unité T38, montée en position MU1, n'a pas été placée sur ce tableau car la cible 1 est arrêtée

5. LES PLAQUETTES POUR LA CORRECTION DES COURANTS DE FOUCAULT PAR LES PFW

Il y a dans les nappes des boucles auxiliaires qui servent de source de tension grâce à leur couplage inductif avec les bobines principales. Il y a aussi des fils raccordés à différents points du circuit principal des PFW (connexions auxiliaires dites "pick-up"). On peut donc constituer des circuits auxiliaires auto-alimentés servant à faire passer des courants donnés dans certaines parties du circuit principal. Ces courants sont ajustés par des résistances extérieures pour compenser l'effet des courants de Foucault induits dans les différents modèles de chambre à vide placés dans les aimants du PSR.

Les résistances extérieures sont groupées sur des plaquettes enfichables logées dans des supports montés sur le côté de l'aimant (voir figure 5). Il est facile d'enlever ces plaquettes pour les modifier ou les entretenir, ce qui limite l'exposition du personnel aux radiations. Dans l'ancien montage ces plaquettes étaient fixées à demeure sur la face de l'aimant.

Chaque nappe étant divisée en deux circuits, il y a une plaquette N et une plaquette W par nappe, c'est-à-dire 808 plaquettes en tout dans le PSR. Ces plaquettes sont isolées convenablement car elles sont au potentiel des circuits PFW.

A la valeur maximale admissible de la puissance dissipée dans les plaquettes correspond une valeur efficace du dB/dt de l'aimant principal pour des résistances données. Les résistances nécessaires avec les chambres à vide actuelles donnent une valeur efficace maximale de 2,6 T/s pour dB/dt , ce qui est conforme aux spécifications et largement supérieur à la valeur efficace du dB/dt des cycles magnétiques employés jusqu'à présent.

6. LA BOUCLE EN 8

La boucle en 8 est un élément essentiel du système PFW utilisé actuellement car elle permet de découpler dans une certaine mesure les composantes quadrupolaire et sextupolaire du champ magnétique de l'aimant principal ⁴⁾.

6.1 Description de la boucle en 8

La boucle actuelle est constituée de 3 spires qui entourent le noyau vertical de la culasse de chaque demi-unité, en se croisant comme un 8 dans le faible espace qui existe entre les secteurs F et D (18,5 mm sur les unités R et S; 14,7 mm sur les unités T et U). Par rapport aux bobines principales il y a donc un effet additif dans un secteur et soustractif dans l'autre (voir la figure 5).

La boucle est réalisée avec un câble souple en cuivre de section rectangulaire de 150 mm², avec une isolation en polyuréthane de 1,5 à 2 mm d'épaisseur. Le câble est souple car il doit pouvoir se glisser dans son chemin au montage, et l'épaisseur de son isolation est relativement faible car il fallait placer une section maximale de cuivre dans l'espace restreint disponible. Ce câble spécial a été fabriqué par KABELWERK RHEYDT AG (AEG-KABEL, Allemagne).

Le câble est maintenu en place dans un chemin de câble en tôle d'acier inoxydable perforée, dit "gouttière", à l'intérieur de la culasse et par des plaquettes vissées à l'extérieur de la culasse.

Chaque spire en forme de 8 est constituée de 2 segments de câble partant du bornier amont de la boucle pour aller au bornier aval de la boucle. Un segment passe dans la gouttière du secteur amont à l'intérieur de la culasse, traverse le faible espace entre les deux secteurs, et continue à l'extérieur de la culasse sur le secteur aval. L'autre segment commence dans le secteur amont sur l'extérieur de la culasse, traverse aussi l'espace entre les deux secteurs et finit dans la gouttière du secteur aval. La longueur de chaque segment de câble est d'environ 5,5 m.

Le câble actuel a été installé au cours de plusieurs arrêts du PSR entre février 1977 et janvier 1978, en remplacement du câble utilisé pour l'installation provisoire en 1976.

Le courant efficace admissible est limité par la température du câble. Sa valeur maximale de 376 A correspond à 50°C ¹²⁾. Cette limitation à 50°C a été fixée en tenant compte de l'effet synergique de la température, de l'oxygène ambiant et des radiations sur la dégradation de l'isolation du câble comme nous l'avons vu dans la section 4.5.

Des essais de l'isolement diélectrique du câble sont faits systématiquement au début et à la fin de chaque grand arrêt du PSR, sous une tension continue de 4 kV pendant une minute. Les segments de câble dont l'isolation s'est fissurée sous l'effet des radiations se signalent par des claquages à cette tension. Ces segments sont retirés et remplacés par un câble neuf pendant les arrêts du PSR. Cette opération est faite facilement, en général, en raccordant bout à bout le nouveau câble et l'ancien segment. On tire alors l'ancien segment en dehors par son autre extrémité et le nouveau prend sa place grâce à la souplesse du câble dont l'isolation est lubrifiée pour cette opération.

6.2 Résistance aux radiations et prévisions de remplacement du câble

Nous avons exposé dans la section 4.5 le problème de la dégradation de l'isolation des câbles sur les PFW. Le même problème existe avec la boucle en 8 dont l'isolation est aussi en polyuréthane.

Le rapport entre la dose reçue au point critique de la boucle et la dose au point de référence de l'unité est variable selon les cas. Il va de $1/3$ ou $1/4$ à proximité des sources de radiations (cibles internes, septum magnétique ou électrostatique, etc.) jusqu'à $1/20$ loin de ces sources directes d'irradiation.

a) Remplacements déjà effectués

Depuis l'installation de cette boucle isolée au polyuréthane, il a fallu procéder au remplacement d'un certain nombre de segments de câble endommagés par les radiations. Le remplacement porte sur les 3 segments de câble d'un demi 8 qui sont irradiés ensemble, les 3 autres segments complétant le 8 sont en effet soumis à un niveau d'irradiation différent car leur chemin est différent.

Nous avons dû remplacer 13 jeux de 3 segments à la suite de défauts constatés lors des essais en tension continue à 4 kV. En plus nous avons aussi remplacé à titre préventif 6 jeux de 3 segments sur des unités très irradiées.

Il y a une grande dispersion dans les doses reçues par les câbles qui ont claqué lors des essais à 4 kV. Ces doses, ramenées au point de référence de l'unité, varient entre 10 et 50×10^7 rad. Les segments changés à titre préventif se trouvaient aussi dans cette fourchette de valeurs sans avoir claqué lors des essais à 4 kV.

Notons que la manipulation des câbles de la boucle en 8 induit la création de fissures qui se développent dans le temps, comme c'est le cas avec les câbles des PFW (voir la section 4.5), lorsque la dose d'irradiation reçue dépasse environ 5×10^7 rad sur le point de référence de l'unité.

Sur les unités les plus irradiées il faut procéder au remplacement du jeu des 3 segments les plus exposés avec une périodicité de quelques années. On retrouve en général ces unités dans le tableau 7. Notons qu'il a fallu remplacer aussi des câbles sur les unités MU1, MU2 et MU3 à cause de l'irradiation produite par la cible 1. Celle-ci étant à présent retirée de l'opération il n'y a plus lieu de prévoir d'autres remplacements sur ces unités dans le proche avenir.

Chaque remplacement d'un jeu de 3 segments utilise environ 17 m de câble. Nous avons donc consommé environ 320 m de câble pour les 19 jeux déjà remplacés.

b) Réserve de câble et prévisions de remplacement

Nous avons encore en réserve 1080 m de câble, ce qui permet le remplacement de 63 jeux de 3 segments de câble.

La prévision du développement des remplacements qu'il faudra effectuer dans l'avenir est difficile à faire car il y a une grande dispersion dans les valeurs des doses d'irradiation reçues par les spires déjà remplacées.

En 5 années d'opération nous avons consommé près du quart de la réserve initiale de câble, mais il faut prévoir que le nombre de jeux de segments à remplacer va augmenter avec la progression de la dose d'irradiation reçue sur l'ensemble des unités.

En conclusion nous recommandons :

- d'éviter les manipulations du câble de la boucle en 8 dans toute la mesure du possible, pour réduire la consommation du câble et le travail de maintenance avec l'irradiation du personnel qui en résulte.
- de suivre la consommation du câble de réserve et d'en commander une nouvelle quantité avant que cette réserve descende au-dessous de 500 m car il s'agit d'un câble très spécial qui peut être difficile à obtenir.
- de réaliser de préférence une nouvelle boucle plus résistante aux radiations.

6.3 Projet d'une nouvelle boucle en 8

Lors de la conception du système de PFW actuel en 1973-74 les intensités de faisceau désirées maintenant, en particulier à 26 GeV/c, n'étaient pas envisagées. C'est pourquoi il serait très utile d'avoir une boucle en 8 à performances plus élevées.

La boucle actuelle, montée sur la culasse de l'aimant, devient très peu efficace à haute énergie à cause de la saturation des pôles ⁴⁾. Il n'est pas possible de maintenir le point précis de fonctionnement optimal (en nombre d'ondes Q et en chromaticité ξ) au delà de 20 GeV/c avec le système PFW à 3 courants actuel (voir la section 4.2). Il est cependant possible, malgré tout, d'accélérer $1,35 \times 10^{13}$ protons par cycle pour le AA (Accumulateur d'antiprotons) à 26 GeV/c grâce à certaines acrobaties.

Si l'on pouvait installer les spires sur les pôles et non plus sur la culasse, l'efficacité des ampères-tours de la boucle à haute énergie serait doublée approximativement. C'est pourquoi un projet de boucle en 8 avec une spire sur chaque pôle au lieu de 3 spires sur la culasse est à l'étude dans le groupe PSR depuis longtemps déjà. Il y a de grandes difficultés de montage qu'il faut minimiser pour que ce projet soit réalisable dans des conditions raisonnables en ce qui concerne l'exploitation du PSR.

Ce nouveau projet utilise des barres rigides de cuivre, de section 150 mm^2 aussi, mises en forme et raccordées par boulonnage de façon à faciliter leur montage. L'isolation serait assurée principalement par des cales en vétronite mais les barres seraient en plus entourées d'un ruban de Kapton. On obtiendrait ainsi une bonne résistance aux radiations, ce qui

réduirait ou même supprimerait l'entretien de cette boucle. Les barres doivent être solidement maintenues en place car les efforts électromagnétiques sur les conducteurs à cette position sont beaucoup plus grands que dans le cas de la boucle de culasse.

Un prototype de cette boucle polaire a été construit et installé sur l'unité d'essai U17. L'installation de la boucle ne demande pas de manipuler les PFW eux-mêmes, ce qui est essentiel comme nous l'avons vu dans la section 4.5. Il faudra essayer la boucle prototype sur U17 avec un grand nombre d'impulsions de courant pour établir sa fiabilité mécanique. Il est essentiel de prouver et de tester les qualités de cette boucle polaire avant de se lancer dans une réalisation qui demandera un effort important en personnel.

L'intensité efficace pourrait facilement atteindre 400 A, ce qui est la valeur nominale de l'alimentation W1K3 actuelle. Le courant programmé suivant un nouveau cycle plus efficace à haute énergie devrait s'élever jusqu'à 1400 A et rester à cette valeur moins que 30 ms. La valeur nominale du courant de pointe de W1K3 est de 1000 A mais il serait possible de le pousser jusqu'à 1400 A pendant quelques dizaines de millisecondes. La tension de W1K3 est de 900 V, ce qui est suffisant pour permettre les variations de courant rapides envisagées (jusqu'à 8 kA/s). Il faudrait quelques améliorations pour maintenir la fiabilité de W1K3 dans ces nouvelles conditions.

L'installation de cette boucle polaire pourrait s'étaler sur deux arrêts longs du PSR au moins car elle ne demande pas le démontage de la boucle de culasse actuelle. Il faudrait cependant enlever les chambres à vide pour ce montage. On pourrait procéder par étapes en conservant les connexions de la boucle de culasse. Ces connexions seraient utilisées pour la boucle polaire lorsque le moment de la mettre en service arriverait.

La boucle en 8 est maintenant un élément essentiel du système PFW utilisé dans l'opération du PSR. Nous avons montré que c'est aussi l'élément le plus faible de l'aimant principal. C'est pourquoi il faut envisager de la remplacer par une nouvelle boucle plus résistante aux radiations et possédant des performances plus élevées.

Si les essais et l'optimisation du montage sur le prototype de cette boucle polaire sont satisfaisants, il faudrait prendre une décision en 1984 ou 1985 pour effectuer une mise en place qui serait adaptée au programme du PSR mais qui devrait être achevée avant que la dégradation progressive de la boucle de culasse actuelle devienne trop importante.

7. LES ENROULEMENTS DE CULASSE POUR BASSE ENERGIE (BLW)

Les enroulements de culasse, dits "BLW", sont utilisés pour des corrections de l'orbite à l'injection. Ils comportent 2 spires placées sur le bras inférieur de la culasse des unités. Les 2 spires sont réalisées au moyen d'un seul tour d'un câble à 2 conducteurs de 4 mm².

Ce câble comprend deux conducteurs blindés séparément et entourés d'une gaine isolante commune. Le polyuréthane a été choisi pour l'isolation à cause de sa résistance aux radiations.

Les BLW sont moins exposés aux radiations que la boucle en 8 ou les PFW. Leur remplacement sur une unité est très rarement nécessaire. Il faut environ 12 m de câble pour cette opération. Il n'y a pas de problème de ce côté car la réserve de câble est encore de 500 m.

Ce câble spécial a été fourni par FILECA (France).

8. TAUX D'IRRADIATION ET DE RADIOACTIVITE DANS LE PSR

Il y a une surveillance permanente des radiations produites par les faisceaux et de la radioactivité qu'elles engendrent dans l'anneau du PSR. Cette surveillance porte particulièrement sur l'aimant principal.

8.1 Doses de radiations reçues par les unités

Il y a au moins un dosimètre en verre sur chacune des 100 unités placées dans l'anneau du PSR. Ces dosimètres sont relevés chaque année et la dose reçue par chacun est mesurée au moyen d'un spectrophotomètre BECKMAN. Un rapport connu permet de passer de la dose ainsi mesurée à celle qui a été reçue par le fer du premier bloc amont de chaque unité, à 5 cm sous l'axe du faisceau circulant. ^{14,15)}.

On ramène donc toujours la dose, mesurée en des endroits convenablement accessibles, à la valeur correspondante au point de référence ainsi défini de l'unité : sur le premier bloc amont, à 5 cm sous l'axe du faisceau. Notons qu'il s'agit de la dose dans le bloc c'est-à-dire de l'énergie dissipée dans le fer par les radiations, ramenée à une masse d'un kilogramme si on emploie le gray comme unité (1 Gy = 1 J/kg = 100 rad).

Le TIR (Total Irradiation Ring) est défini comme la somme des 100 doses reçues dans le fer au point de référence par les 100 unités.

La valeur du TIR, et sa variation par année en valeur absolue ($\Delta\text{TIR}/\text{an}$) ou en valeur relative ($\Delta\text{TIR}/\text{an}$ par proton accéléré dans l'année, présenté comme $\Delta\text{TIR}/p$), donnent une idée de l'irradiation moyenne qui résulte des consommations et des pertes de protons dans le PSR. La figure 6 donne les courbes correspondantes en fonction des années d'opération du PSR ⁶⁾.

Il apparaît clairement dans la figure 6 que le $\Delta\text{TIR}/p$ est passé de $1,6 \times 10^{-10}$ rad/p en 1973 à $0,3 \times 10^{-10}$ rad/p en 1982, alors que le nombre de protons accélérés dans l'année est passé de $1,5 \times 10^{19}$ en 1973 à plus de 8×10^{19} en 1982.

Ce bon résultat a été obtenu grâce à une diminution de l'emploi des cibles internes et à une meilleure efficacité de l'opération à l'injection et à l'éjection. Il en résulte que les dégâts causés par les radiations à l'équipement, et en particulier à l'aimant principal, ne suivent pas une

progression aussi rapide que celle du nombre total de protons accélérés. Il faut continuer l'effort dans cette direction si on veut conserver encore longtemps le PSR en bon état de marche. Le taux actuel d'accroissement du TIR est de 2 à 3 x 10⁹ rad/an depuis 1977. Il faut veiller à ce que cette valeur n'augmente pas.

8.2 Débits de dose engendrés par la radioactivité

Lorsque le PSR est arrêté la radioactivité créée pendant l'opération se manifeste par un débit de dose de radiations qui est mesuré dans chacune des sections droites avant que la machine soit accessible pour la maintenance.

Le TAR (Total Activity Ring) est défini comme la somme des 100 débits de dose des sections droites, mesurés à 40 cm de la chambre à vide et 32 heures après l'arrêt du PSR (en général le lundi matin). Le débit de dose considéré pour chaque section est la moyenne des mesures en amont et en aval de cette section droite; il est exprimé en mrem/h.

Le TAR donne une indication sur la dose que recevrait une personne circulant dans le PSR et permet de prévoir les doses reçues par le personnel chargé de la maintenance générale ¹⁶⁾.

A la fin de l'année nous définissons un TAR moyen ($\overline{\text{TAR}}$) comme la moyenne des TAR mesurés après chacun des arrêts au cours de cette année-là. La figure 6 donne les courbes correspondantes en fonction des années d'opération du PSR. Le $\overline{\text{TAR}}$ s'est maintenu à un niveau encore tolérable malgré l'augmentation continue du nombre de protons accélérés chaque année. Il était de 7 rem/h environ dans les années 1977 à 1980 et a diminué un peu ensuite. La valeur de 6 rem/h en 1982 correspond donc à un débit de dose de 60 mrem/h à 40 cm de la chambre à vide au milieu de la section droite équivalente à la moyenne.

Comme dans le cas du $\Delta TIR/p$, la valeur relative $\overline{TAR/p}$ est en diminution et reflète le soin qui est pris de limiter les pertes de protons dans le PSR pendant l'opération. Il faut persévérer dans cette direction pour que les travaux de maintenance du PSR puissent continuer à être accomplis avec un personnel limité dont l'irradiation doit rester au dessous des doses tolérables par an et par mois. A cet effet nous avons demandé que l'anneau PSR ne soit pas ouvert si le TAR dépasse 7 rem/h ¹⁷⁾. Au delà de cette limite il faut attendre pendant le temps de refroidissement (cooling) nécessaire, qui ne serait d'ailleurs que de un ou deux jours à condition que l'excès d'irradiation ait été de courte durée. Cette éventualité ne s'est pas encore présentée mais elle est probable dans l'avenir à cause de l'augmentation continuelle de l'intensité du faisceau de protons du PSR. La limite de 7 rem/h pour le TAR sert à maintenir en éveil l'attention qu'il faut porter au bon usage des protons dans le PSR.

9. CONCLUSION

Les recommandations formulées dans le rapport de 1974 ¹⁾ ont été suivies et d'autres améliorations ont aussi été apportées à l'aimant principal du PSR depuis cette date.

L'aimant du PSR est dans un bon état qui lui permet de remplir correctement son rôle dans le fonctionnement actuel de cette machine.

Cette situation pourra se prolonger pendant la vingtaine d'années qui est considérée dans ce rapport, avec les conditions d'opération prévues maintenant pour le PSR, si l'on veille à maintenir une réserve suffisante des éléments qui se détériorent sous l'effet des radiations.

Les éléments dont il faudra s'approvisionner avant l'épuisement de la réserve actuelle sont :

- les enroulements polaires (PFW) vers 1988
- le câble de la boucle en 8 vers 1986
- les bobines principales dans une dizaine d'années éventuellement.

Dans le cas de la boucle en 8, une amélioration des performances du PSR à son énergie maximale serait possible en remplaçant la boucle de culasse actuelle par une boucle polaire. Si le résultat de l'étude en cours est positif, une décision pourrait être prise avant de se réapprovisionner en câble spécial pour la boucle de culasse.

10. REMERCIEMENTS

Au cours des années passées de nombreuses personnes ont participé de près ou de loin aux activités concernant l'aimant principal du PSR. Une liste de noms, même longue, risquerait d'être incomplète. Ces personnes ont leur part à prendre dans la satisfaction que donne l'état de l'aimant selon l'exposé fait dans ce rapport.

Nous désirons cependant citer les personnes suivantes pour leur contribution à ces activités et pour les informations qu'elles nous ont fournies :

P. Bigler, J. Bleeker, M. Bôle-Feysot, L. Brouwers, D. Cornuet, A. Dind, J-C. Dubois, F. Emery, G. Héritier, U. Jacob, I. Kamber, C. Mazeline, A. Rochex, F. Rohner, M. Tardy, J-C. Thomi, H-H. Umstätter.

Nous remercions particulièrement H. Schönbacher pour sa collaboration dans l'étude des dégâts causés par l'irradiation des matériaux.

L'intérêt exprimé et le soutien apporté par Y. Baconnier, R. Billinge, G. Brianti, G.L. Munday et G. Plass dans le cadre de leurs responsabilités nous ont permis de mener à bien ce travail au cours des années passées et jusqu'à aujourd'hui. Il est essentiel qu'un tel soutien persiste à l'avenir pour cette activité afin que le PSR puisse continuer à remplir le rôle élargi qui lui est maintenant assigné à la base du complexe d'accélérateurs du CERN.

11. REFERENCES

1. Groupe de travail sur l'aimant du CPS. "Rapport sur l'état de l'aimant et son évolution. Mesures à prendre pour assurer sa survie", rédigé par R. Gouiran. MPS/SM/Note 74-13 du 7.5.1974.
2. R. Gouiran, "Découplage des champs quadrupolaires et sextupolaires avec les enroulements polaires du CPS", MPS/SM/Note 74-25.
3. E. Brouzet, J. Gareyte, "Performances des PFW provisoires à trois courants. Résumé des essais effectués avec le faisceau jusqu'au 17 juillet 1976", PS/DL 76-19.
4. R. Gouiran, "Enroulements polaires de l'aimant CPS", CERN/PS/SM/76-1.
5. I. Kamber, "The new PS B-train generator system required by the SPS multibatch filling system", PS/SM/Note 77-24.
6. R. Gouiran, U. Jacob, L. Brouwers, Série de rapports annuels édités après les grands arrêts : "Etat de l'aimant du PS" de 1 à 10 (soit de 1973 à 1983). Dernière référence : PS/PSR/Note 83-3.
7. "PS parameters". Data list compiled by R. Gouiran, PS/PSR/Note 82-5.
8. "Index des résultats d'essais de radiorésistance".
1ère partie: matériaux d'isolation de câbles
H. Schönbacher and A. Stolarz-Izycka, CERN 79-04.
2ème partie: résines thermodurcissables et thermoplastiques
H. Schönbacher and A. Stolarz-Izycka, CERN 79-08
3ème partie: matériaux utilisés autour des accélérateurs de haute énergie.
P. Beynel, P. Maier and H. Schönbacher, CERN 82-10
9. U. Jacob, "Specifications for spare excitation coils of the PS main magnet", MPS/SM/Spec. 74-3 du 31.7.1974.
10. J. Gruber, "Spécifications des nappes polaires de l'aimant principal du synchrotron à protons de 25 GeV", MPS/SM/Spec. 75-8 du 6.6.1975.
11. J. Bleeker, C. Germain, R. Gouiran, J. Gruber, "Première analyse de l'échauffement des sertissages des nappes polaires du PS", PS/SM/Note 80-6.
12. R. Gouiran, U. Jacob, "Limites d'utilisation de la boucle en 8 déterminées par son échauffement", PS/SM/Note 79-2.
13. M.H. Van de Voorde, "Effects of radiation on materials and components", CERN 70-5.
14. R. Gouiran, "Taux d'irradiation des unités d'aimant. Statistiques et prévisions", MPS/MU/EP/Note 72-15 Rev.
15. R. Gouiran, "Fading of glass dosimeters. Preliminary results", MPS/SR/Note 73-39.
16. R. Gouiran, "La radioactivité de l'aimant CPS et son influence sur la maintenance de l'anneau. Statistiques et prévisions", CERN/MPS/SR 73-5.

17. "Rapport du groupe de travail sur les doses de radiation du personnel", CERN/PS/DL/80-15.
18. C. Germain, "La rénovation de l'aimant principal du PS", PS/SM/Note 81-13.
19. R. Billinge, "Lamination surface resistance", Document interne du 15.6.1973, LAB II/MA/RB/04.
20. R.L. Clough and K.T. Gillen, "Radiation-thermal degradation of PE and PVC : Mechanism of synergism and dose rate effects", Rad. Phys. and Chem. 18, 661 (1981).
21. F. Coninckx and H. Schönbacher, "Determination of radiation index of rigid and flexible plastics", HS-RP/TM/81-46.
22. F. Coninckx, W. Naegele, M. Reinharz, H. Schönbacher, P. Seraphin, "Radiation effects on rare-earth cobalt permanent magnets", CERN/SPS 83-1, TIS-RP/IR/83-07.
23. P. Maier and A. Stolarz, "Long-term radiation effects on commercial cable-insulating materials irradiated at CERN", CERN 83-08.

ANNEXE 1

Problème des sertissages défectueux

1. Constatation des défauts

Toutes les nappes ont été contrôlées chez BBC et au CERN après leur livraison. Seules ont été acceptées provisoirement celles qui satisfaisaient aux conditions indiquées dans les spécifications ¹⁰⁾. En particulier les résistances devaient se trouver autour de leur valeur nominale dans une tolérance de $\pm 2\%$ fixée par les variations possibles de la section du conducteur.

En février 1979, le montage de la totalité des nappes dans le PSR étant terminé, il a été possible de faire un essai global d'échauffement des nappes au courant efficace nominal de 80 A. Pour une température ambiante de 20°C la température moyenne de la surface des nappes était d'environ 32°C. Cette valeur est bien inférieure à la limite admissible de 50°C et confirme la bonne géométrie des surfaces qui sont en contact avec les pôles de l'aimant.

On constata aussi à cette occasion, pour la première fois, que certaines nappes présentaient des points anormalement chauds sur les talons, dans la région des 4 sertissages reliant le conducteur intérieur de 27 mm² au câble souple de 35 mm² des connexions d'alimentation ¹¹⁾. Un examen plus détaillé montra dans ces cas de points chauds que le sertissage correspondant avait une résistance trop élevée, qui avait été malheureusement masquée par la tolérance de $\pm 2\%$ sur la résistance totale du circuit mesurée lors des essais de réception. Cet examen put être effectué grâce aux connexions internes dites "pick-up" avec lesquelles on arrive à mesurer une assez faible portion du circuit principal.

2. Surveillance et classement des nappes polaires

Après l'étude du problème avec la firme BBC deux valeurs furent retenues comme critère pour la résistance des sertissages car elles sont en relation avec un excès d'échauffement d'une part et avec la possibilité d'augmentation de la résistance dans le temps d'autre part.

a) La valeur de $400 \mu\Omega$.

On obtient sur un sertissage de $400 \mu\Omega$ une température de surface de 35°C pour le courant efficace nominal de 80 A dans une température ambiante de 20°C , c'est-à-dire 3°C de plus que la température moyenne de la surface des nappes.

Toutes les nappes ayant au moins un sertissage de résistance supérieure à $400 \mu\Omega$ sont considérées comme mauvaises et doivent être réparées ou remplacées par des nappes neuves.

b) La valeur de $150 \mu\Omega$ avec une variation supérieure à $25 \mu\Omega$ au cours du temps.

Les sertissages qui ont une résistance supérieure à quelques centaines de $\mu\Omega$ vieillissent : leur résistance augmente au cours du temps de fonctionnement et d'autant plus vite que sa valeur est plus grande.

Pour tenir compte de ce vieillissement possible toutes les nappes ayant au moins un sertissage de résistance supérieure à $150 \mu\Omega$ et dont la valeur varie au cours du temps de plus que $25 \mu\Omega$ sont considérées aussi comme mauvaises et doivent être réparées ou remplacées par des nappes neuves.

Le seuil de $150 \mu\Omega$ est confortablement au dessous du niveau minimum auquel des variations de résistance ont été constatées.

Les sertissages de toutes les nappes ont été mesurés et une nouvelle mesure est effectuée lors de chaque arrêt long du PSR. Selon l'accord avec la firme BBC la période de surveillance des sertissages pour la réparation ou le remplacement des nappes défectueuses s'étend jusqu'à la fin de 1989.

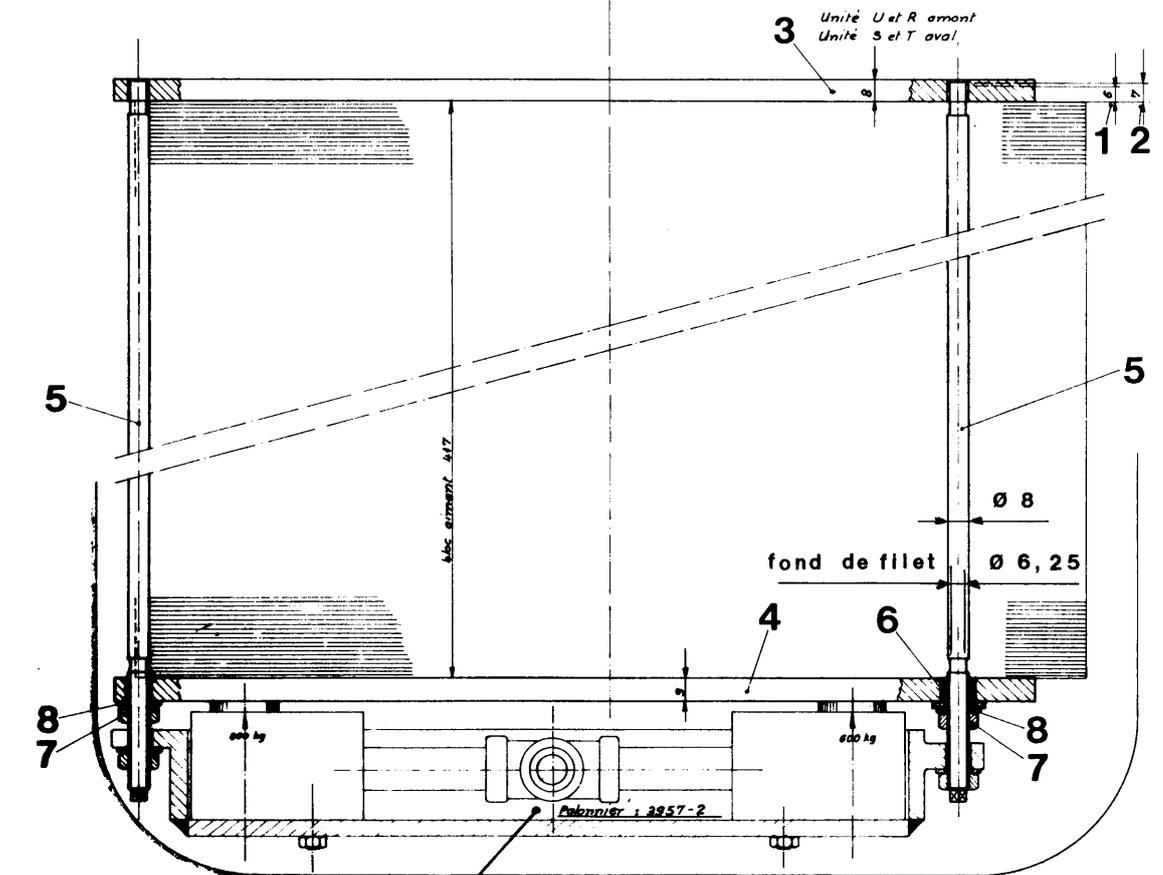
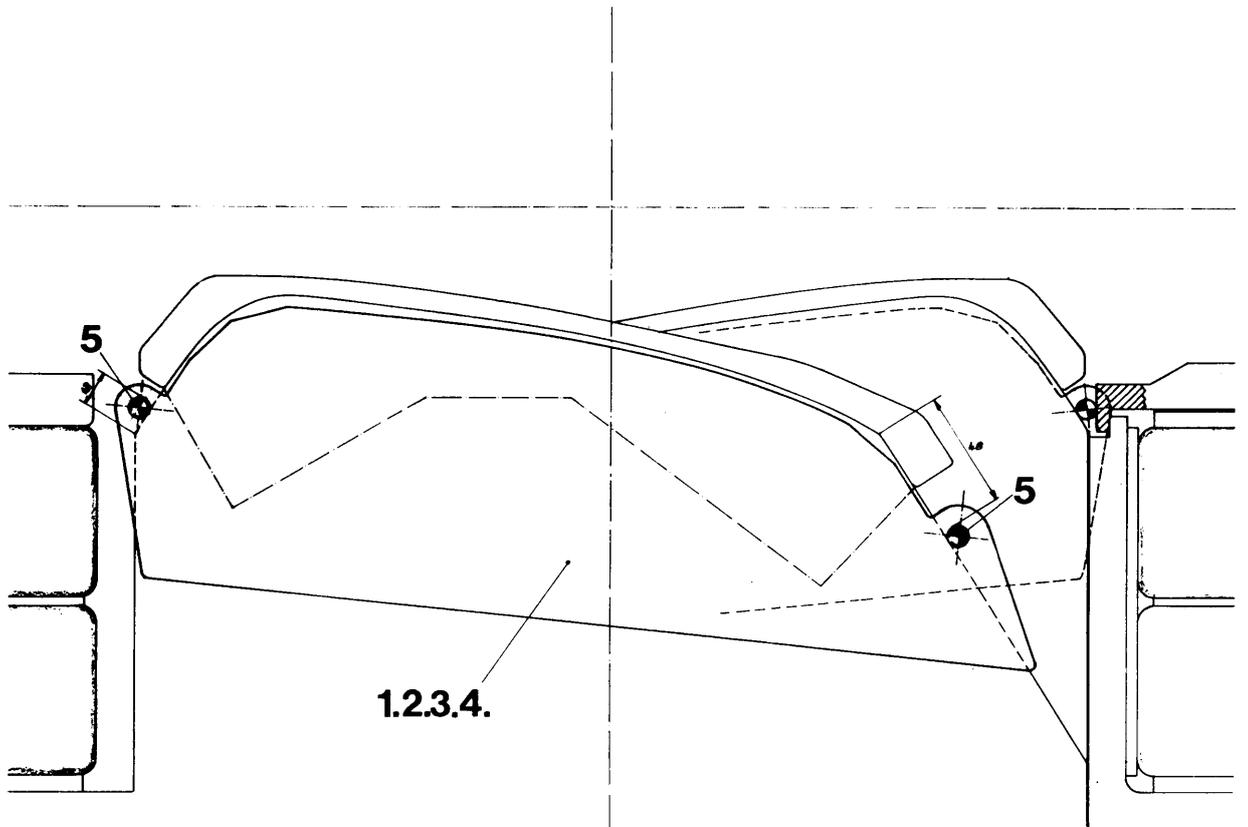
3. Réparation des défauts

La firme BBC a étudié et mis au point une méthode de réparation qui ramène la résistance des sertissages défectueux à une valeur normale sans endommager le talon de la nappe. Pour cette réparation au moyen d'une soudure à l'étain on effectue les opérations suivantes :

1. Percer un trou de diamètre et de profondeur précis à une position bien déterminée sur le talon, au centre du sertissage défectueux.
2. Loger dans ce trou, dont l'axe est placé verticalement, un segment de tube de cuivre calibré.
3. Introduire dans ce tube une longueur de fil de soudure à l'étain correspondant à une masse précise.
4. Chauffer le haut du tube avec un chalumeau, juste suffisamment pour faire fondre la soudure qui remplit alors le trou pratiqué dans le sertissage et se dégage autour du tube qui est alors enlevé.
5. Mesurer la résistance du sertissage pour vérifier que sa valeur est devenue normale.
6. Boucher le trou qui reste dans l'isolation du talon avec de l'araldite.

Cette méthode de réparation a d'abord été utilisée chez BBC sur des nappes qui n'avaient pas été irradiées dans le PSR. Quant aux nappes radioactives retirées du PSR la réparation a été effectuée au CERN par un spécialiste de BBC pour éviter les problèmes de transport de matériaux radioactifs.

L'expérience a montré que cette méthode de réparation conduit à un résultat tout à fait satisfaisant. Il n'y a eu aucune nappe endommagée lors de la réparation et BBC n'a pas eu à reprendre sa fabrication pour remplacer des nappes mises au rebut.



palonnier pour mise en place
des tirants sous contrainte

Cerclage pour bloc d'extrémité d'unité

Fig 1

Unité de type T

secteur D en aval

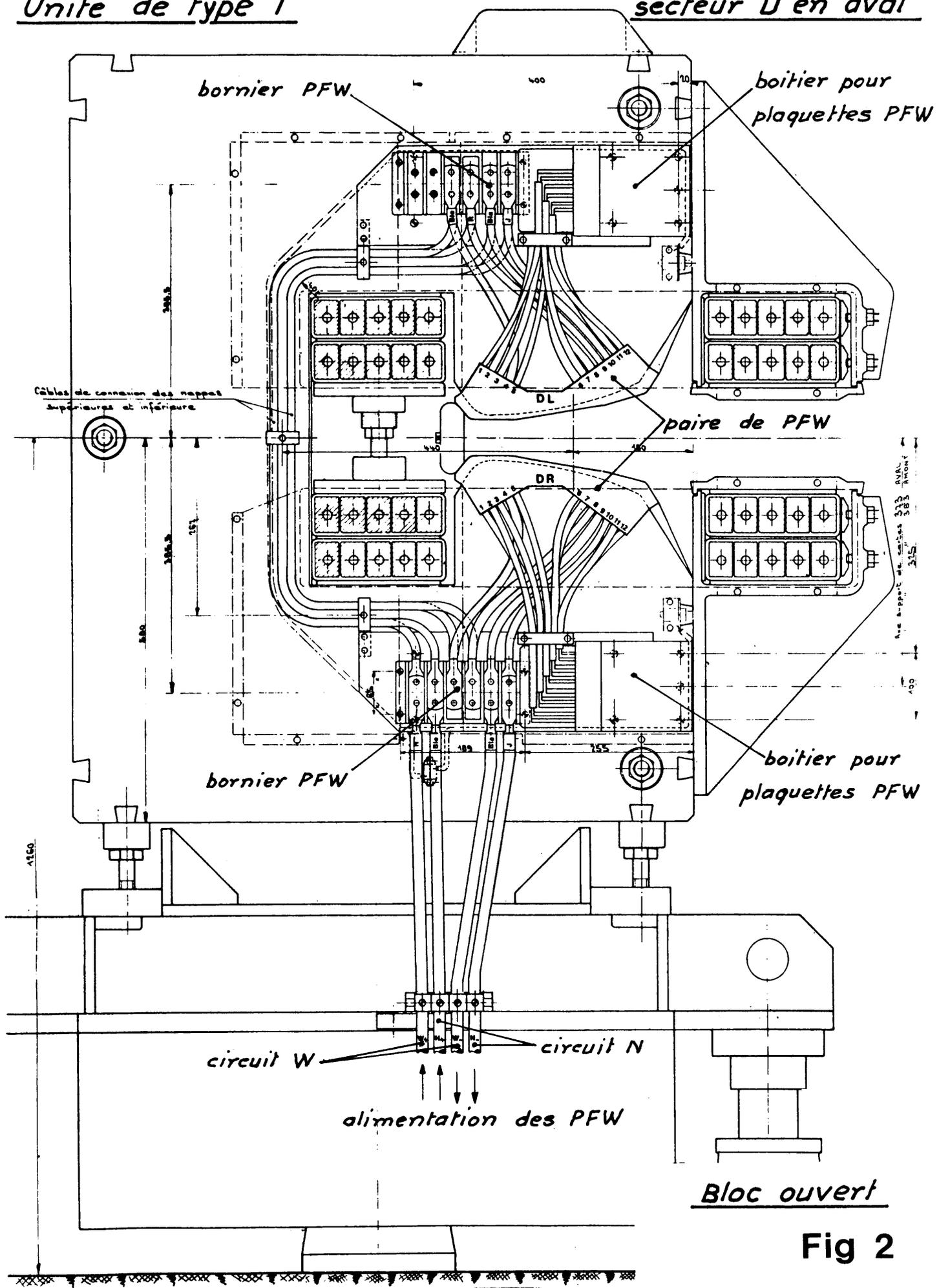
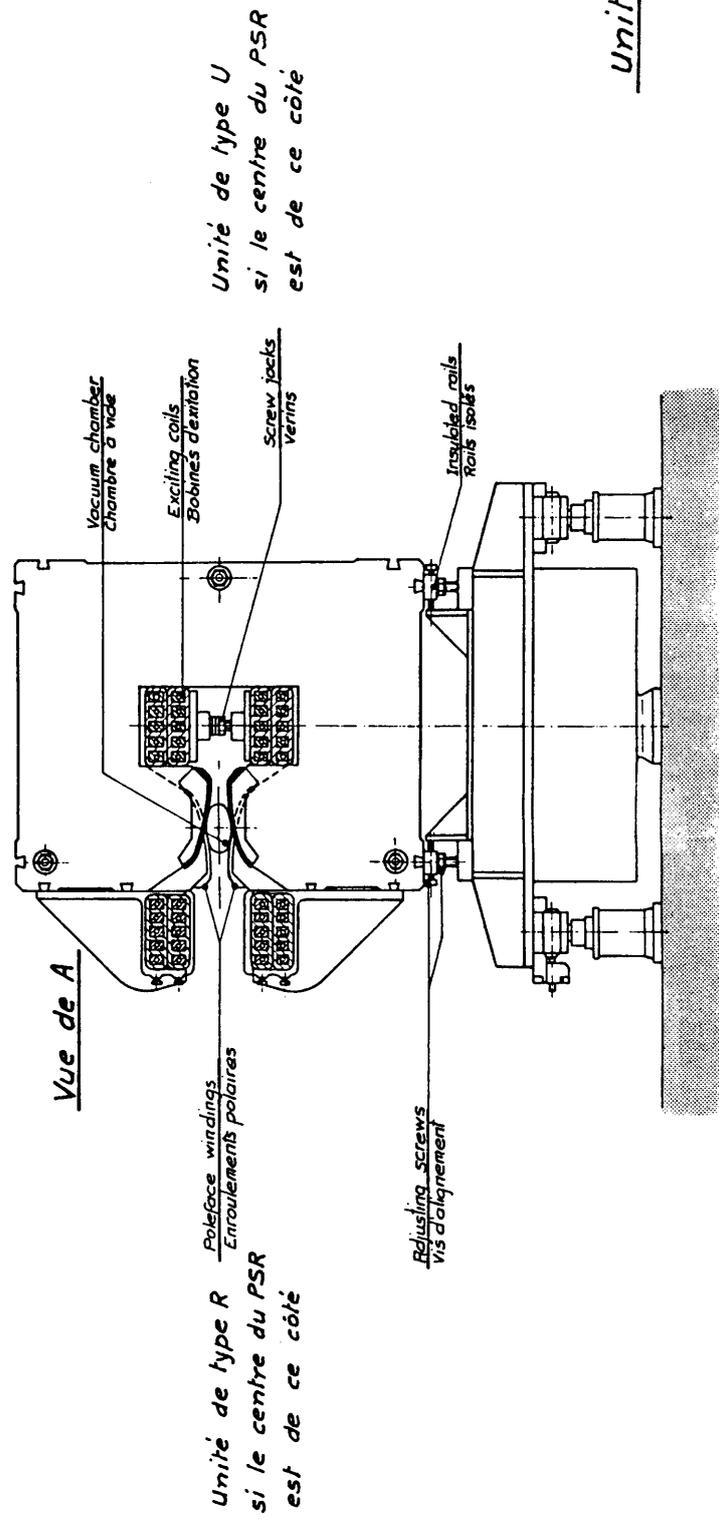
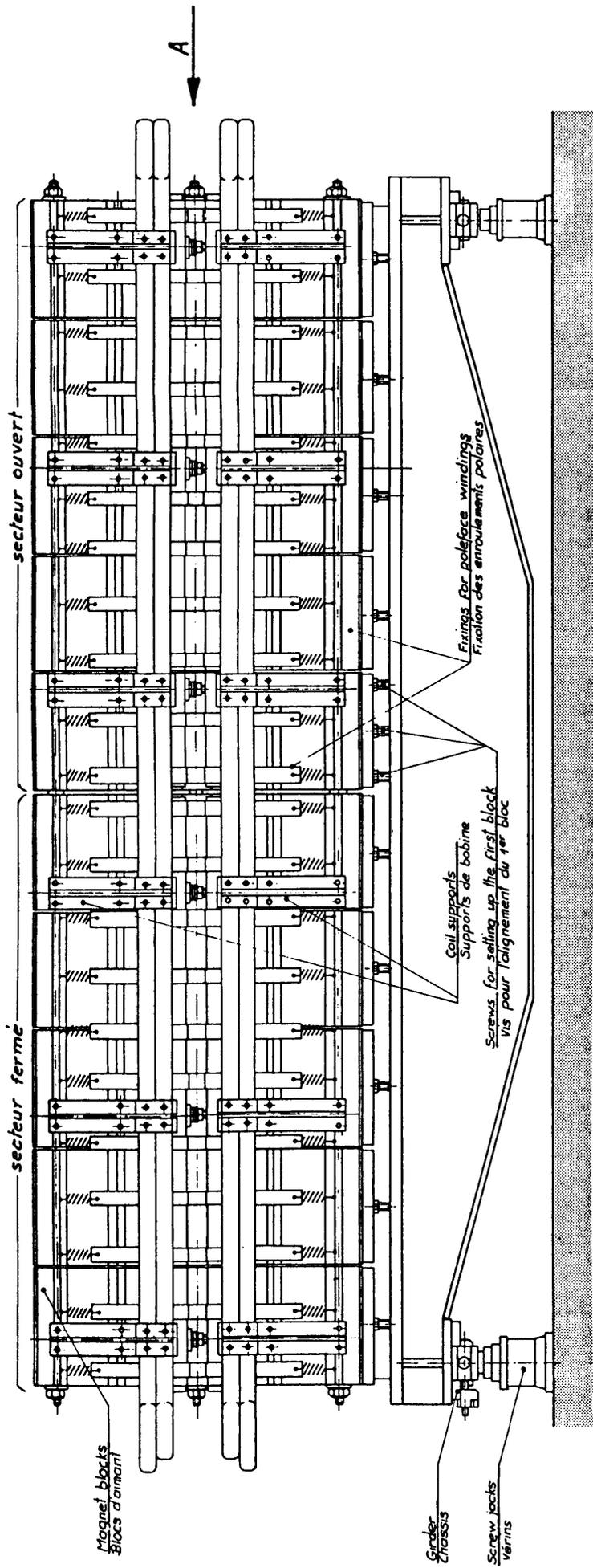
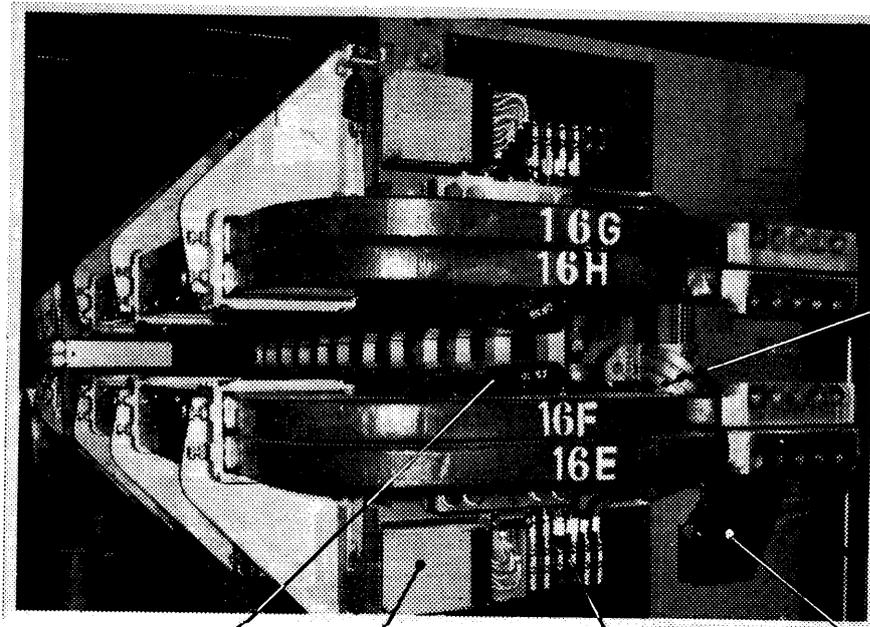


Fig 2



Unité d'aimant

Fig 4



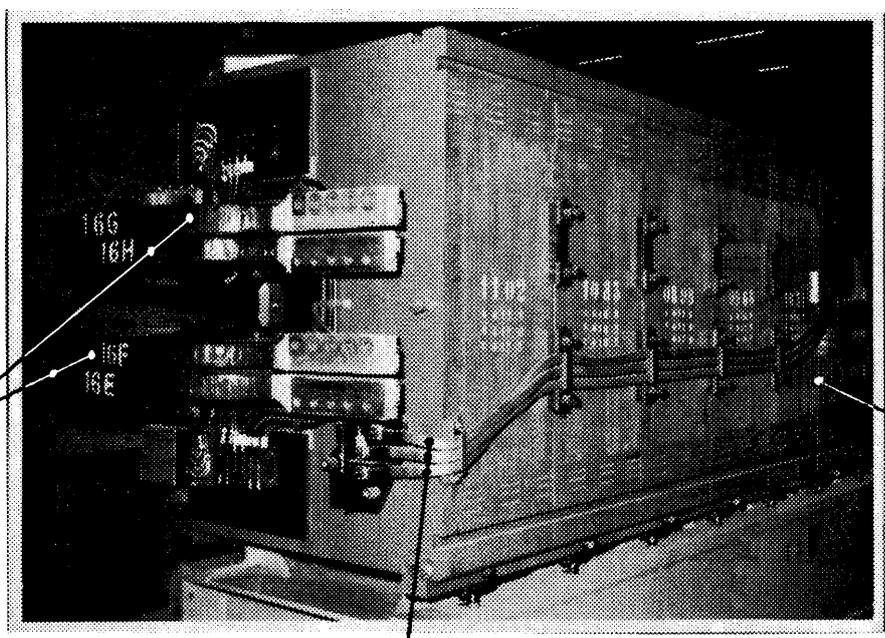
3 câbles
boucle en 8

PFW

boitier pour
plaquettes PFW

bornier
PFW

bornier
boucle en 8



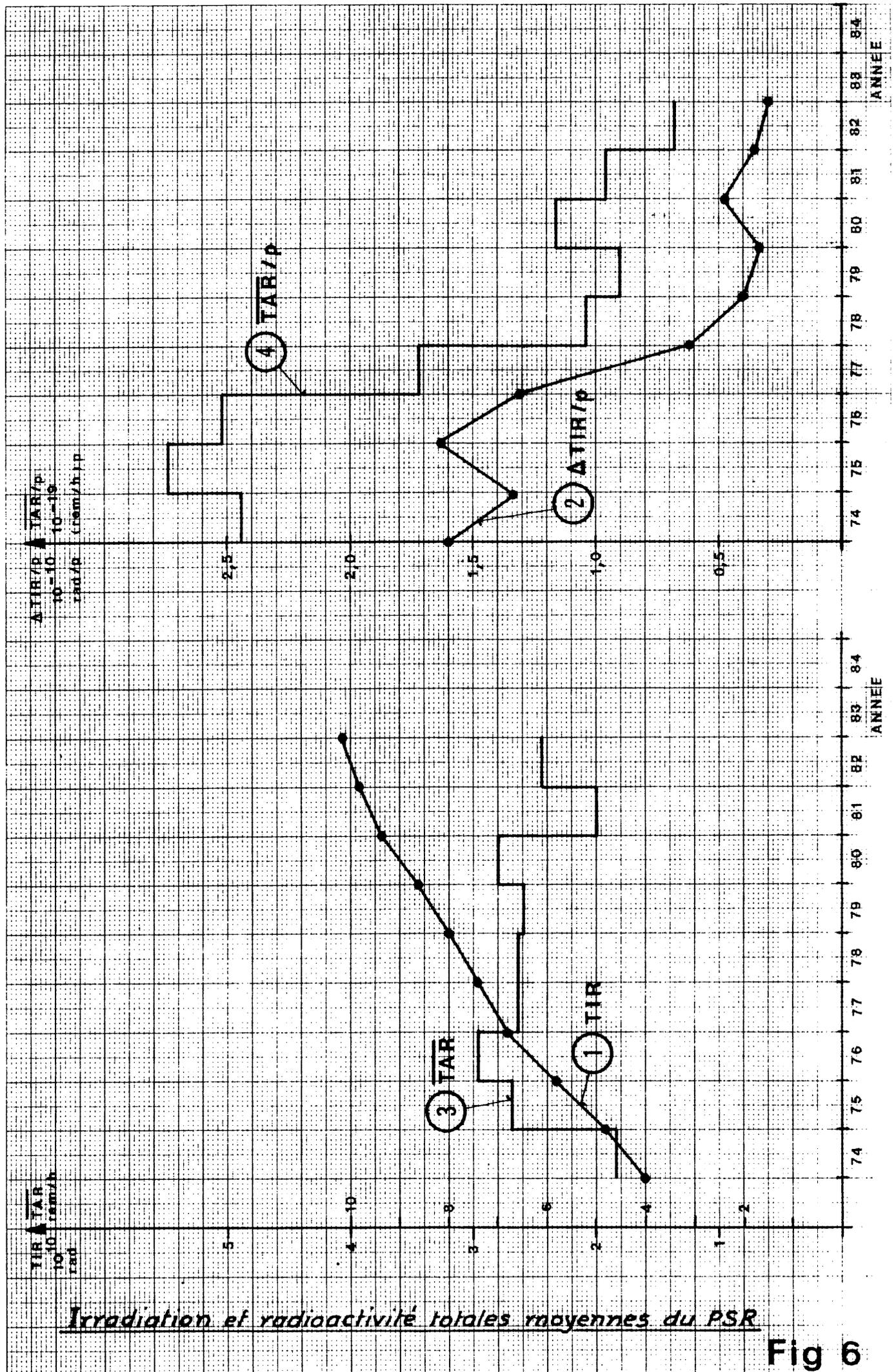
4 galettes
bobines
principales

espace entre
secteur F et
secteur D

3 câbles boucle en 8

Unité de type U

Fig 5



Irradiation et radioactivité totales moyennes du PSR

Fig 6