

PRÉSIDENCE DU CONSEIL

A

COMMISSARIAT A L'ÉNERGIE ATOMIQUE

SUR LE PROJET DU SYNCHROTRON A PROTONS DE SACLAY

H. BRUCK et R. LEVY-MANDEL



Rapport C.E.A. n° 458

1955



Centre d'Études nucléaires de Saclay

Service de Documentation

Boite postale n°2 Gif sur Yvette (S et O)

H. BRUCK et R. LÉVY-MANDEL

1955

N. 1 del *Supplemento* al Vol. 2, Serie X,
del *Nuovo Cimento* - pag. 423-441

Sur le projet du synchrotron à protons de Saclay.

H. BRUCK et R. LÉVY-MANDEL

Commissariat à l'Énergie Atomique, France

Le plan quinquennal 1953-1957 du Commissariat à l'Énergie Atomique prévoyait l'édification d'un grand accélérateur dont les caractéristiques n'avaient pas été arrêtées.

Au cours de l'année 1954, sous l'impulsion de son Haut-Commissaire, le Professeur F. PERRIN, la décision a été prise de construire sur le terrain du Centre d'Études Nucléaires de Saclay, un synchrotron à protons. L'énergie que les particules accélérées doivent atteindre a été fixée à 1.75 GeV, à un premier stade, avec possibilité de pouvoir dépasser cette valeur ultérieurement. L'énergie des particules accélérées a été ainsi choisie, à la suite d'informations de Brookhaven, afin qu'elle soit suffisante pour la création de particules V.

La responsabilité de la réalisation de cette machine est assumée par M. R. MAILLET. L'établissement du projet, ainsi que la surveillance technique de son exécution est à la charge du Service des Accélérateurs, dirigé par M. S. D. WINTER.

Les auteurs, membres de ce Service, ont l'honneur de présenter, ci-dessous, quelques remarques sur le choix du type et les dimensions de cette machine, sur la conception de son aimant, ainsi que sur le bâtiment et la mise en œuvre pratique du projet.

1. - Choix du type de la machine.

1.1. *Tableau comparatif des caractéristiques de l'orbite.* - A la suite d'études comparatives, une machine du type conventionnel, à la manière du Cosmotron de Brookhaven, a été adoptée, écartant ainsi le principe de la focalisation intense.

Cette décision s'appuie sur les études suivantes :

- 1) Un rapport établi sous la direction de M. A. ABRAGAM ⁽¹⁾ et consacré essentiellement aux possibilités de la focalisation intense.
- 2) Un avant-projet de machine conventionnelle par M. P. DEBRAINE ⁽²⁾.
- 3) Des déterminations de caractéristiques d'aimants et de dimensions d'entrefer à partir de mesures à la cuve rhéographique.
- 4) Une étude économique comparative par M. S. D. WINTER ⁽³⁾.

Le Tableau I, extrait du rapport cité de A. ABRAGAM, reproduit quelques caractéristiques calculées de deux machines à 1.75 GeV, respectivement conventionnelle et à focalisation intense, ainsi que les caractéristiques d'une machine de 30 GeV, à focalisation intense.

TABLEAU I.

N° du projet (cf. note CEA n. 41)	Conv. 2	Foc. int. 4	Foc. int. a
Energie en fin d'accélération . . .	1.75 GeV		30 GeV
Induction sur l'orbite en fin d'accélération (B_0) _{max}	10	kgauss	12 kgauss
Rayon de courbure magnétique de la trajectoire r_0	8.40 m		86 m
Type de la machine	conventionnel	foc. intense	foc. intense
Mailles {	nombre	4	18
	type	FO	DOFO
	longueurs	F: 13.2 m O: 3.3 m	D, F: 146 cm O : 73 cm
Indice du champ n	0.6	± 36	± 392
Fréquence betatron Q_r	0.71	3.78	7.25
Déphasage de l'oscillation par maille (mode σ) . . .	—	$2\pi/4.76$	$2\pi/7.88$
Energie cinétique de transition	—	2.39 GeV	~ 5.8 GeV
Energie d'injection	4 MeV	4 MeV	50 MeV
Vitesse de montée de l'induction B_0	22.2 kG/s	18.9 kG/s	12 kG/s
Harmonique de la H.F.	2	2	38
Hauteur de la chambre $2 A_z$	50 mm	58 mm	49 mm
Largeur de la chambre $2 A_r$	365 mm	73 mm	70 mm

On a supposé pour les trois machines comparées dans ce Tableau la même pression résiduelle d'air de $p = 2 \cdot 10^{-6}$ tor dans la chambre, les mêmes erreurs

⁽¹⁾ A. ABRAGAM, C. BLOCH, M. PAUTHIER et I. SOLOMON: *Étude de la focalisation intense dans le Synchrotrons à Protons, Note CEA, n. 41* (Janvier 1954).

⁽²⁾ P. DEBRAINE: *Cosmotron à gradient constant, Note CEA, n. 62* (Avril 1954).

⁽³⁾ S. D. WINTER: *CEA, Note AC 273, du 27 Avril 1954.*

quadratiques moyennes sur l'alignement des blocs magnétiques de $\langle \xi \rangle = 0.25$ mm, et sur l'induction rémanente de $\langle \delta B \rangle = 0.2$ gauss.

Parmi les informations produites par ce tableau, on note, particulièrement, les hauteurs $2A_z$ peu différentes entre les machines conventionnelle et à focalisation intense de 1.75 GeV; on note, ensuite, les dimensions $2A_z \times 2A_r$, presque identiques de la chambre des deux machines à focalisation intense, dont les rayons sont pourtant différents d'un facteur 10, et finalement, la valeur de l'énergie de transition, de la machine à focalisation intense de 1.75 GeV, valeur assez mal placée à 2.39 GeV.

1'2 *Commentaires sur les dimensions de la chambre de circulation.* —

On sait que, dans une machine à grand rayon, le principe de la focalisation intense ou du gradient alterné permet une réduction notable de la section nécessaire de la chambre, ce qui permet de réduire en conséquence les dimensions et le prix de l'aimant.

On est tenté de concevoir une machine plus petite à rayon $r_0 \approx 10$ m, comme simple réduction homothétique d'une machine à grand rayon de l'ordre de 100 m. Cela serait permis s'il y avait invariance des trajectoires par rapport à une telle homothétie. Cependant:

a) une telle invariance n'est pas vérifiée par rapport au gas scattering dont l'amplitude croît quand le rayon et, de ce fait, l'énergie d'injection diminuent;

b) les défauts d'alignement des éléments de l'aimant ne peuvent pas être réduits dans la même proportion que le rayon;

c) l'énergie de transition n'est pas atteinte à la même fraction du cycle.

Le fait que les défauts d'alignement ne peuvent pas être réduits dans la même proportion que le rayon et que l'amplitude du gas scattering augmente quand le rayon diminue, conduit à une section de chambre sensiblement égale pour une machine de 10 m et de 100 m de rayon.

L'inclinaison des pièces polaires sera aussi sensiblement la même dans les deux cas, étant donné que l'induction ne doit pas varier de plus d'un facteur 3 d'une extrémité de la zone utile radiale à l'autre, sinon, les champs deviendraient, du côté des champs faibles, à l'injection, trop sensibles à des effets perturbateurs et, du côté des champs forts, en fin de cycle, trop saturants pour le fer.

En réduisant le rayon, on est donc obligé de laisser le gradient du champ pratiquement constant, et ce faisant, l'indice $n = (r_0/B_0)(dB/dr)$ du champ baisse environ comme r_0 . La forte convergence de la machine qui fait sa supériorité faiblit donc simultanément, rapprochant ses caractéristiques de celles d'une machine conventionnelle.

Il s'avère, ainsi, qu'à $r_0 \approx 10$ m le bénéfice de la focalisation intense est

déjà quasi nul, en ce qui concerne la hauteur $2A_z$ requise pour la chambre. Seule, la réduction de l'amplitude des oscillations synchrotron est encore importante, autorisant une réduction sensible de l'extension radiale de la chambre.

Par ailleurs, le peu de liberté que l'on a dans le choix du gradient du champ, c'est-à-dire de la convergence de la machine, ne laisse au constructeur aucun paramètre pour situer convenablement dans le cycle l'énergie de transition.

On sait que l'énergie cinétique de transition est approximativement $T_{tr} \approx (Q_r - 1)E_0$, Q_r et E_0 étant respectivement la fréquence bêta-tron radiale et l'énergie au repos du proton. Il faut accepter que l'énergie de transition se place, pour une machine de $r_0 \approx 10$ m, très peu au delà de la fin du cycle, rendant assez délicat tout projet d'extension future de l'énergie maximum,

Une machine conventionnelle permet, en outre, de réaliser des champs magnétiques plus forts au centre de la chambre, et, déjà de ce fait, d'atteindre, à rayon égal, des énergies supérieures.

1.3. *L'intensité de pulsation.* — Dans les machines à focalisation intense, le pas de spiralisation est très petit. En plus, l'existence d'un gradient élevé du champ, ainsi que le phénomène de la saturation du fer, limitent l'extension radiale de la partie utilisable du champ magnétique. Dans ces conditions, il est avantageux de faire l'injection sur un tour unique. Cependant, grâce à la faible amplitude synchrotron qui caractérise la machine à focalisation intense, on conserve la majorité des particules introduites à l'intérieur de cette section relativement faible de chambre. Le fait que pour deux machines à focalisation intense de rayons respectivement grand et petit les sections de chambre soient approximativement égales, entraîne aussi l'égalité des sections maxima des faisceaux que l'on peut y injecter. La densité des protons, contenus dans ce faisceau, est limitée par la charge d'espace. Cette densité limite s'avère pratiquement indépendante des caractéristiques de la machine. Le nombre total des particules que l'on peut introduire dans une machine à focalisation intense diminue donc environ linéairement avec le rayon, rendant le problème de l'intensité plus ardu à rayon faible.

Dans une machine conventionnelle, afin de conserver les particules injectées, l'importance de l'amplitude des oscillations radiales synchrotron impose une extension radiale beaucoup plus grande de l'entrefer. Mais on peut mettre à profit ce fait en injectant sur plusieurs tours. On peut ainsi gagner aisément un ordre de grandeur sur le nombre total des particules injectées par cycle comparé à une machine à gradient alterné de même rayon.

1.4. *Considérations économiques.* — A rayon égal, les dimensions de l'aimant d'une machine à focalisation intense sont inférieures à celles d'une machine conventionnelle. Cependant, l'économie qui en résulte n'est plus très importante

dans le cas présent d'un rayon d'orbite relativement faible. Contrairement à la situation pour une machine à grand rayon:

1) la différence des dimensions de l'entrefer ne porte plus que sur la largeur;

2) la différence du prix de l'aimant et de son alimentation ne constitue plus qu'une fraction relativement faible du prix total.

TABLEAU II.

Rayon de courbure magnétique des trajectoires	r_0	8,40 m		
Vitesse de montée de l'induction	B	20 kG/s		
Type de la machine		conventionnel		foc. intense
Énergie en fin d'accélération		1,75 GeV	2,7 GeV	1,75 GeV
Induction sur l'orbite en fin d'accélération	$(B_0)_{\max}$	10 kgauss	14 kgauss	10 kgauss
Dimensions de la chambre	$\left\{ \begin{array}{l} 2A_z \\ 2A_r \end{array} \right.$	100 mm		90 mm
		300 mm		110 mm
Poids de l'aimant	$\left\{ \begin{array}{l} \text{fer} \\ \text{cuivre} \end{array} \right.$	580 t		~365 t
		50 t		41 t
Puissance d'alimentation		10 000 kVA	19 800 kVA	5 800 kVA
Perte moyenne		250 kW	498 kW	275 kW
Prix de l'aimant		362		250
Prix de l'alimentation		131	220	101
Prix aimant + alimentation		493	582	351
Total (approx.) des dépenses (bâtiment et main d'œuvre compris) (prix en millions de francs français).		1 750	2 100	1 800

Afin de pouvoir apprécier numériquement cette situation, nous extrayons au Tableau II quelques résultats d'une étude économique menée par S. D. WINTER (4). Ces données se rapportent à deux machines, conventionnelle et à focalisation intense, semblables aux deux premières du tableau I, à la différence près que:

1) la pression résiduelle a été supposée de $p = 10^{-5}$ tor (au lieu de $2 \cdot 10^{-6}$ précédemment);

(4) S. D. WINTER: l. c. Les dimensions d'aimant à la base de cette étude sont éventuellement à majorer pour prévoir un espace supplémentaire dans les entrefers pour des enroulements correcteurs. La valeur comparative des chiffres de ce tableau ne serait pas affectée par ces rectifications.

2) la largeur de la chambre de la machine conventionnelle a été réduite à une valeur moindre résultant d'un compromis entre le facteur intensité et le facteur prix.

Cependant, l'intensité de cette machine conventionnelle est encore estimée d'un ordre de grandeur supérieur à celle du projet comparé à focalisation intense ⁽⁵⁾.

Quant à la dépense totale, on constate qu'il y a pratiquement égalité entre les deux machines comparées.

1.5. *Conclusion.* — Pour un synchrotron à protons de 8,40 m de rayon, c'est-à-dire dont l'énergie des particules serait de 1,75 GeV à une induction de 10 kgauss sur l'orbite, la comparaison des deux types de machines conduit finalement aux appréciations suivantes, en faveur de la machine du type conventionnel, qui ont motivé son adoption :

- 1) plus grande facilité d'extension vers des énergies plus élevées;
- 2) intensité par cycle d'un ordre de grandeur supérieur;
- 3) différence des dépenses — en principe favorable à la machine à gradient alterné — extrêmement faible sinon nulle dans le cas d'une machine d'un rayon de 8.40 m seulement.

Les arguments suivants s'ajoutent en faveur d'une machine conventionnelle :

- 4) précision d'alignement des éléments de l'aimant moins critique;
- 5) avantages pratiques d'accessibilité et de facilité d'extraction du faisceau que procurent les sections droites plus longues et l'entrefer plus large;
- 6) garanties plus grandes — surtout à l'heure où la décision fut prise — concernant la réussite en général et le délai de réalisation dans le cas d'une machine dont déjà plusieurs prototypes fonctionnent aux Etats-Unis et en Angleterre.

2. — Valeurs numériques envisagées des paramètres

Les paramètres de la machine ne sont pas encore définitivement fixés.

Nous reproduisons, ci-dessous, un ensemble de caractéristiques envisagées. Le choix définitif en différera éventuellement, mais en tout cas, de très peu et par exemple par une section de chambre ou une longueur des sections droites légèrement supérieures.

⁽⁵⁾ On obtient un facteur 10.8 dans l'hypothèse d'un faisceau injecté de même intensité dans les deux cas et en déterminant le rendement de la capture d'après E. PERSICO; voir ces *Comptes rendus*.

Ainsi, le Synchrotron de Saclay se différenciera de celui de Brookhaven essentiellement par une chambre dont les dimensions ont été substantiellement réduites: la hauteur sera plus petite compte tenu de l'expérience faite à Brookhaven sur ce point, ainsi que du choix d'une vitesse de montée du champ un peu plus élevée dans notre cas. De plus, la largeur de la chambre sera plus faible; ceci en rapport avec l'emploi d'un harmonique plus élevé — probablement le second — de la H.F.

Géométrie de l'entrefer et énergies de début et de fin de cycle.

— Énergie de fin d'accélération	1,75 GeV
— Champ sur l'orbite en fin d'accélération	$(B_0)_{\max} = 10 \text{ kG}$
— Rayon de courbure de la trajectoire	$r_0 = 8.4 \text{ m}$
<hr/>	
— Longueur totale des sections droites	$x = 0.25$
— Longueur totale des secteurs magnétiques	
<hr/>	
— Longueur de l'orbite centrale	$C = 66 \text{ m}$
— Énergie d'injection	4 MeV
— Champ sur l'orbite à l'injection	$(B_0)_i = 344 \text{ G}$
— Vitesse de montée du champ à l'injection	$\dot{B}_0 = 20000 \text{ G/s}$
— Longueur d'une section droite	$L_s = 3.36 \text{ m}$
— Indice du champ	$n = 0.6$
— Pression à l'intérieur de la chambre	$p = 5 \cdot 10^{-6} \text{ mmHg}$

Oscillation bêta-tron.

— Fréquence de l'oscillation bêta-tron	$\left\{ \begin{array}{l} \text{horizontale} \dots\dots\dots Q_H = 0.77 \\ \text{verticale} \dots\dots\dots Q_V = 0.87 \end{array} \right.$
— Paramètre β de la matrice de transfert	$\left\{ \begin{array}{l} \beta_M \left\{ \begin{array}{l} \text{horizontal} \dots\dots\dots \beta_M^H = 1.82 \\ \text{vertical} \dots\dots\dots \beta_M^V = 1.47 \end{array} \right. \\ \bar{\beta} \left\{ \begin{array}{l} \text{horizontal} \dots\dots\dots \bar{\beta}^H = 1.74 \\ \text{vertical} \dots\dots\dots \bar{\beta}^V = 1.43 \end{array} \right. \end{array} \right.$

Caractéristiques du faisceau injecté.

— Admittance (linéaire)	$A = 2\alpha d = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ cm rad}$
— Diamètre horizontal	$2J_H = 8.7 \text{ mm}$
— Diamètre vertical	$2J_V = 8 \text{ mm}$

Excursion de l'orbite.

On admet qu'il y a 288 blocs magnétiques dont la position par rapport au centre obéit à une loi de Gauss d'écart quadratique moyen $\langle \xi_H \rangle = 2.5 \text{ mm}$, et la position par rapport à un plan horizontal de référence obéit à une loi de Gauss $\langle \xi_V \rangle = 0.5 \text{ mm}$.

On admet, en outre, que les blocs magnétiques sont groupés par paires de façon à réduire l'écart quadratique moyen de leur champ magnétique à l'injection à $\langle \Delta B \rangle = 0.2 \text{ gauss}$.

On en déduit:

— Écart quadratique moyen de l'excursion verticale de l'orbite fermée	$\langle f_v \rangle = 0.15 \text{ mm}$
— Écart quadratique moyen de l'excursion horizontale de l'orbite fermée	$\langle f_H \rangle = 1.44 \text{ mm}$

Gas scattering.

— Moyenne quadratique de l'amplitude due à la diffusion par les gaz résiduels pour une pression résiduelle d'air de $p = 5 \cdot 10^{-6}$ tor	$b_0^x = 33 \text{ mm}$ $b_0^y = 29 \text{ mm}$
— Fraction de particules non perdues par gas scattering contre les parois supérieure et inférieure de la chambre à la dite pression .	37 %

Pour ces chiffres, la hauteur utile de chambre est supposée égale à 65 mm pour une hauteur intérieure réelle de 80 mm.

Oscillations synchrotron.

— Fréquence de révolution de la particule:	
à l'injection	$F_i = 0.42 \text{ MHz}$
à la fin de l'accélération	$F = 4.3 \text{ MHz}$
— Ordre de l'harmonique utilisée	2
— Phase optimum pour une chambre de 30 cm de largeur (d'après E. PERSICO, l. c.)	$\varphi_s = 41^\circ$
— Dispersion maximum initiale d'impulsion des particules susceptibles d'être accrochées par la H.F.	$(\Delta p/p)_{\max} = \pm 1.55 \%$
— Amplitude d'oscillation synchrotron correspondante	$(\Delta r_s)_{\max} = \pm 258 \text{ mm}$
— Rendement de la capture (d'après E. PERSICO, l. c.)	$\mathcal{L}(\alpha) = 27 \%$
— Gain d'énergie par tour	1 112 eV
— Tension de crête de la H.F.	1 680 V
— Contraction de l'orbite par tour pendant l'injection	$\sigma = 2.95 \text{ mm}$
— Déplacement radial de l'orbite pour une erreur de fréquence de 10^{-3}	$\delta_r = 21 \text{ mm}$
— Durée de l'injection (approximative)	120 μs

Entrefer.

— Largeur utilisable par le faisceau	300 mm
— En hauteur: Enroulement correcteurs	$2 \times 10 = 20 \text{ mm}$
Paroi de la chambre (porcelaine)	$2 \times 25 = 50 \text{ mm}$
Hauteur interne de la chambre	$= 80 \text{ mm}$
Total	150 mm

Electro-aimant.

— Poids fer	800 t
— Poids cuivre	40 t

Induction maximum sur l'orbite	10 kG	14 kG
Flux maximum	36.6	51.2 Wb
Induction moyenne dans la culasse	13200	18500 G
Ampère-tours maximum	134000	200000
Energie électromagnétique maximum emmagasinée	2440	5200 kJ
Perte Joule par cycle	405	1280 kJ
Puissance de l'alimentation	10300	16100 kVA

3. - Sur l'aimant.

3'1. *Dimensions et structure.* - La Fig. 1 montre une moitié du profil en C des blocs qui composent l'aimant. Les dimensions de l'aimant représenté sont légèrement supérieures à ce qui serait nécessaire pour le projet décrit au chapitre précédent. Les dimensions de la Fig. 1 correspondent sensiblement à la limite supérieure de la gamme des possibilités envisagées.

Les dimensions d'un tel aimant sont conditionnées par les dimensions et l'induction maximum d'entrefer que l'on désire réaliser. La fraction de la section de l'entrefer utilisable par le faisceau est limitée radialement par la qualité du champ et en hauteur par l'encombrement à réserver à des enroulements correcteurs et à la paroi de la chambre. La section d'entrefer utilisable de l'aimant, représenté à la Fig. 1, est ainsi d'environ 373 mm radialement sur 110 mm en hauteur.

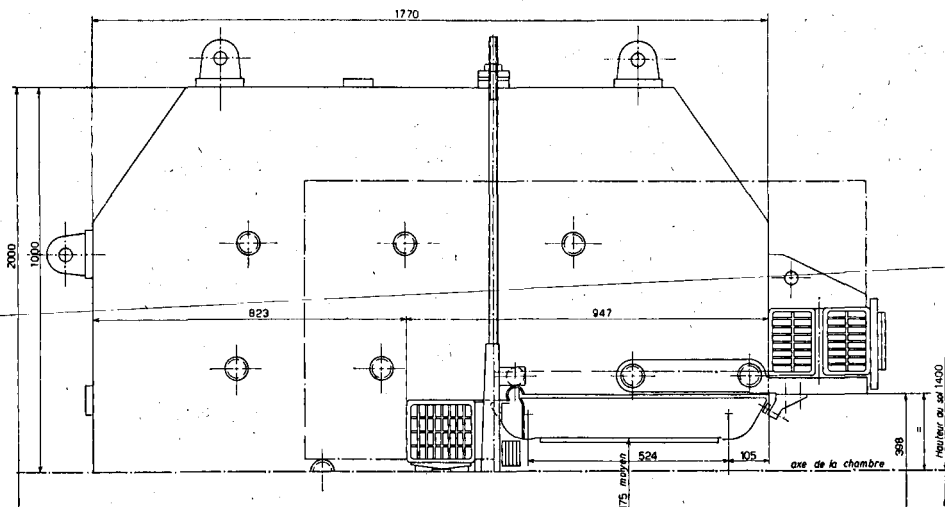


Fig. 1.

Comme à Brookhaven, l'aimant est constitué par 288 blocs pour un cercle complet. Chaque bloc couvre azimuthalement $(2\pi/288)r_0 = 184$ mm au droit de l'orbite d'équilibre qui, pour l'exemple d'aimant décrit ici, a dû être porté à $r_0 = 8450$ mm.

Chaque bloc de culasse comporte 14 à 15 tôles d'environ 10 mm d'épaisseur chacune. L'épaisseur totale du bloc est de 149 mm avec une épaisseur utile d'acier de 145 mm.

La section de culasse, visible sur la Fig. 1, est dimensionnée de telle manière que l'induction moyenne dans chaque coupe traversée par le flux soit au maximum de $1.34B_0 = 18700$ gauss pour une induction dans l'entrefer de $B_0 = 14000$ gauss.

Les tôles de la culasse sont assemblées par tirants et par soudure à la périphérie.

Les pièces polaires sont rapportées. Chaque pièce polaire se compose de 82 à 83 tôles de 2 mm, l'épaisseur totale étant de 170 mm. Ces tôles sont assemblées par collage à l'araldite.

L'induction moyenne dans les pièces polaires est de $1.12B_0 = 15700$ gauss pour une induction dans l'entrefer de $B_0 = 14000$ gauss.

Le fait d'avoir séparé les pièces polaires de la culasse procure les avantages suivants.

- 1) La possibilité d'introduire un petit entrefer supplémentaire entre la culasse et les pièces polaires, entrefer dont il sera question d'une manière plus détaillée par la suite.

- 2) La possibilité d'entreprendre l'édification de la culasse sans devoir attendre la fin de l'étude de la forme exacte des pièces polaires; ceci procure un gain précieux de temps dans le cadre de l'ordonnement de l'édification de la machine.

- 3) La possibilité de donner des épaisseurs différentes aux tôles de la culasse et des pièces polaires. L'épaisseur de la tôle de la culasse peut être choisie suffisamment grande pour amortir par courant de Foucault la répercussion des harmoniques élevés de l'ondulation du courant d'alimentation de l'aimant sur la courbe de la montée du champ. Par contre, la tôle des pièces polaires peut être suffisamment mince, rendant faible l'influence sur le champ dans l'entrefer des perturbations provenant et des courants de Foucault et des fluctuations statistiques des propriétés des tôles de la pièce polaire.

- 4) Finalement, le fait de séparer les pièces polaires de la culasse simplifie le profil des tôles de la culasse et rend ainsi l'usinage plus économique, tout particulièrement dans le cas présent où la fenêtre de la bobine intérieure est plus haute que l'entrefer.

3.2. *Sur le champ dans l'entrefer.* — On sait que la carte du champ dans l'entrefer de l'aimant doit rester pratiquement invariante à partir de l'injection jusqu'à la fin du cycle; même le rétrécissement de l'extension radiale de la zone utile du champ vers la fin du cycle doit être évité, car les procédés actuellement connus pour faire sortir le faisceau accéléré de l'entrefer en fin de cycle, s'accompagnent de larges oscillations radiales dans l'entrefer. Lors de

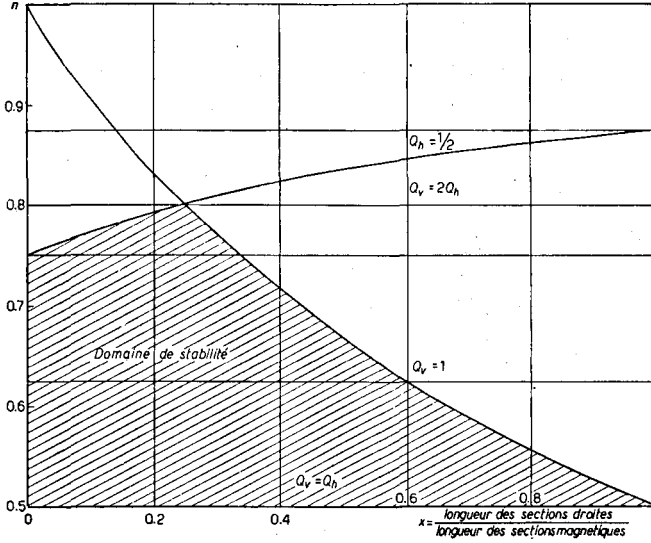


Fig. 2. — Extrait d'un rapport de M. PAUTHIER.

la montée du champ, on peut éventuellement tolérer une variation de l'indice du champ n n'atteignant pas des valeurs limites pour lesquelles une résonance se produit. Ces valeurs limites sont fonction de la longueur des sections droites du synchrotron (voir Fig. 2) et se resserrent quand les sections droites s'allongent. L'ordre de grandeur de la tolérance est de $\delta n \approx \pm 0,1$.

La carte du champ dans l'entrefer est définie par la géométrie des surfaces polaires qui bordent cet entrefer. L'invariance du champ suppose que ces surfaces restent équipotentielles pendant tout le cycle. Une différence radiale de potentiel ΔP dans les surfaces polaires entre deux points distants de $\Delta r = \overline{AB}$ (voir Fig. 3) entraîne une variation δn de l'indice du champ

$$(1) \quad \delta n = \frac{\Delta P}{P_0} \frac{r_0}{\Delta r}$$

Dans cette formule, P est la chute du potentiel magnétique entre une surface polaire et le plan médian de l'entrefer.

La différence de potentiel ΔP est l'expression de la différence de consommation d'ampère-tours (AT) dans la culasse le long de deux lignes de flux passant, respectivement, par A et B . Les AT en question peuvent avoir leur origine dans les AT normaux de la bobine d'excitation, dans la magnétisation rémanente et dans des courants de Foucault.

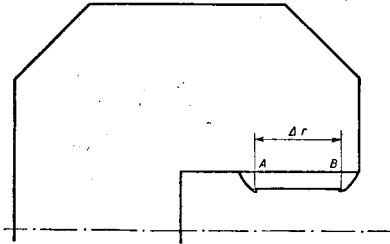


Fig. 3.

L'apparition de différences dans la consommation d'AT est particulièrement favorisée par la forme dissymétrique en C de la culasse qui crée des inégalités de chemins magnétiques pour les différentes lignes de flux.

On peut exprimer ΔP comme fraction γ de la chute de potentiel P_0 moyenne dans la demi-culasse:

$$\Delta P = \gamma P_c.$$

Pour des estimations numériques grossières, on peut considérer γ comme peu variable en fonction du degré de saturation de la culasse.

Pour la culasse considérée représentée aux Figs. 1 et 3, on trouve, à l'aide de mesures à la cuve rhéographique (*) entre les points A et B , sensiblement,

$$\frac{\Delta P}{P_c} = \gamma \approx \frac{1}{5}.$$

Par ailleurs, les AT consommés dans la culasse sont une fraction,

$$\eta = \frac{P_c}{P_0 + P_c},$$

des AT totaux.

On peut donc écrire:

$$(2) \quad \frac{\Delta P}{P_0} = \frac{\gamma \eta}{(1 - \eta)},$$

et respectivement, en tenant compte de (1),

$$(3) \quad \delta n = \frac{\gamma r}{(1 - \eta)} \frac{r_0}{\Delta r}.$$

(*) Ces mesures ont été faites à l'aide d'une cuve à fond modelé, et par approximations successives. Il est ainsi possible de tenir compte du fait que la perméabilité magnétique de la culasse est une fonction variable du lieu.

La Fig. 4 représente la fraction η (théorique, calculée) des AT totaux, consommée dans la culasse, en fonction de l'induction B_0 dans l'entrefer.

D'autre part, sur la Fig. 5, la courbe a représente le défaut $\Delta P/P_0$, respectivement δn résultant de la courbe de η (Fig. 4) avec les relations (2) et (3).

Aux inductions faibles, la courbe δn ne représente pas l'erreur totale, réellement observable, étant donné qu'elle ne tient pas compte de la magnétisation rémanente, ni des courants de Foucault. Par contre, aux inductions fortes, elle est valable et en assez bon accord avec l'erreur δn observée à Brookhaven (7).

3.3. Entrefer d'amortissement d'épaisseur constante. — Le trait qui fait l'originalité de l'aimant du Synchrotron de Saclay est sans doute l'entrefer d'amortissement suggéré par M. RICATEAU (8). Cet entrefer supplémentaire, situé entre la culasse et chaque pièce polaire (Fig. 6) doit aisément permettre de réduire l'erreur δn sur l'indice du champ à une valeur $\delta n'$ plus faible d'un ordre de grandeur.

La théorie de cette idée a reçu quelques compléments par la suite et a fait l'objet de quelques premières mesures sur modèle (9).

Cependant l'exposé ci-dessous ne fait pas allusion aux mesures et les formules et courbes données sont purement théoriques.

On admet facilement l'action de cet entrefer dans l'analogie entre les relations fondamentales:

$$\mathbf{H} = \text{grad } P = \mu \mathbf{B}$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0$$

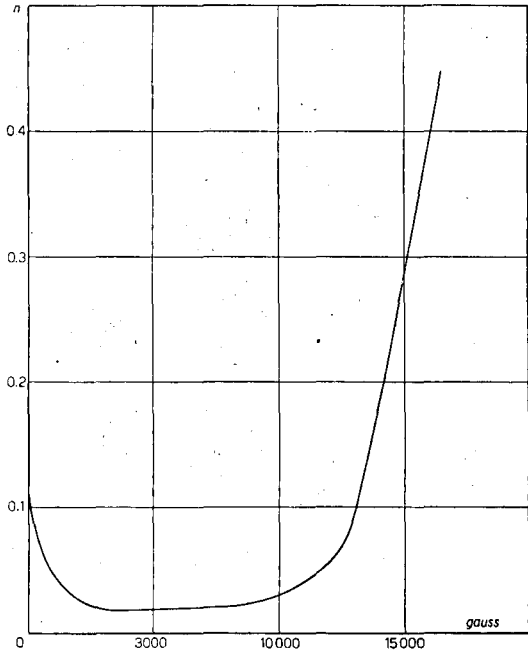


Fig. 4.

(7) *Rev. Scient. Instr.*, 24 (1953), p. 752, fig. 12 et p. 773, fig. 1.

(8) M. RICATEAU: *Perturbations magnétiques dues au rémanent, perturbations magnétiques aux inductions élevées*, Note CEA, n. 72, Juin 1954.

(9) H. BRUCK: *Sur l'aimant du Synchrotron*, note CEA à paraître.

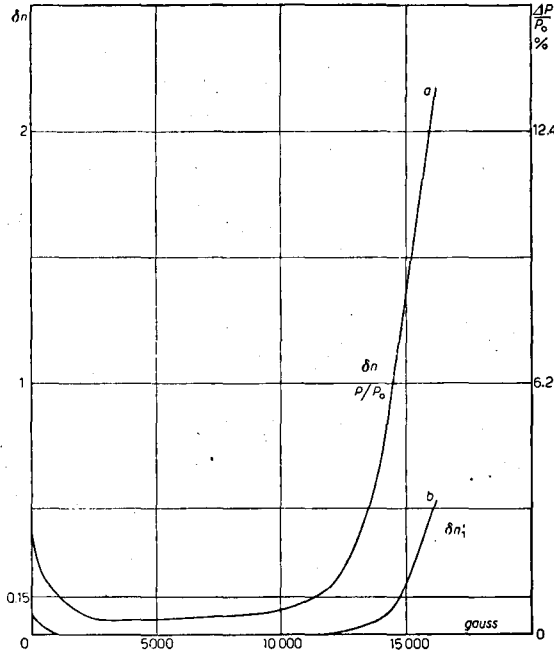


Fig. 5.

du magnétisme et les relations

$$\text{grad } P_0 = c j$$

$$\text{div } j = 0,$$

régissant les répartitions de courant électrique dans un milieu de conductibilité spécifique c , fonction du lieu. Dans le langage de cette analogie, la pièce polaire est un bon conducteur (μ grand) comparé à l'entrefer d'amortissement.

Par conséquent (voir Fig. 6), sur un trajet $AA'B'B$, traversant d'abord l'entrefer, cheminant ensuite radialement dans la pièce polaire et re-traversant encore une fois l'entrefer, la différence de potentiel ΔP s'épuise essentiellement

dans les deux traversées de l'entrefer. La fraction $\Delta P'_1$ de différence de potentiel subsistant entre les extrémités $A'B'$ de la pièce polaire sera donc très petite.

On établit aisément les relations approximatives :

$$(4) \quad \Delta P'_1 = \frac{\Delta P}{1 + K} \quad \text{respectivement} \quad \delta n'_1 = \frac{\delta n}{1 + K} \dots,$$

le nombre

$$K = \frac{8\mu_p h_f h_p}{\Delta r^2} = \frac{R_f}{R_p}$$

étant un'expression approximative pour le rapport de la réluctance R_f de la double traversée de la fente à R_p , réluctance du trajet dans la pièce polaire, et

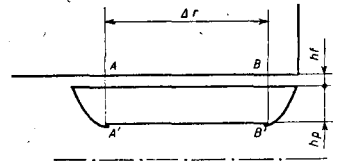


Fig. 6

μ_p la perméabilité magnétique de la pièce polaire,

h_f l'hauteur de l'entrefer d'amortissement,

h_p l'hauteur de la pièce polaire,

et

$$\Delta r = \overline{A'B'} \quad (\text{cf. Fig. 6}).$$

Sur la Fig. 5, la courbe pour $\delta n_1'$ est représentée à côté de celle pour δn . La courbe pour $\delta n_1'$ a été calculée pour $h_r=6$ mm, $h_p=105$ mm, $\Delta r=524$ mm.

Aux inductions élevées auxquelles l'effet atténuateur de l'entrefer est le plus nécessaire, l'efficacité du principe baisse rapidement à cause de la baisse rapide simultanée de la perméabilité μ_p de la pièce polaire.

3.4. *Entrefer d'amortissement d'épaisseur non constante.* — Il est possible de remédier quelque peu à cette situation en inclinant la face arrière de la pièce polaire par rapport à la face limite de la culasse. Une inclinaison d'un angle α fera varier linéairement en fonction de r l'épaisseur h_r de la fente (cf. Fig. 7).

On admet l'action d'une telle inclinaison de la manière suivante:

Supposons d'abord $\Delta P = 0$, entre A et B ; la chute radiale de potentiel dans la pièce polaire sera en tout cas également petite par rapport à celle à travers l'entrefer d'amortissement. Ainsi les deux faces limites de l'entrefer d'amortissement peuvent être comparées aux faces — chacune equipotentielle — d'un condensateur à plaques planes mais non parallèles, à l'intérieur duquel le champ est donc non uniforme et en particulier plus fort du côté de l'écartement minimum des plaques. Dans la pièce polaire, le flux venant de la culasse est donc non uniformément réparti, tandis que le flux ressortant de la pièce polaire du côté de l'entrefer principal est pratiquement uniforme. A l'intérieur de la pièce polaire s'opère le réarrangement des lignes de flux, ce qui implique l'existence d'une composante radiale du champ, c'est-à-dire d'un gradient du potentiel.

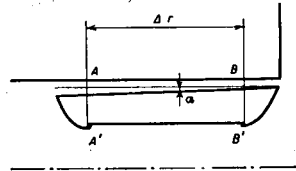


Fig. 7.

On est maître de la valeur et du signe de cette composante radiale, par le choix de la valeur et du signe de l'inclinaison α .

On trouve aisément une expression analytique approximative pour la chute radiale de potentiel dans la pièce polaire due à l'inclinaison α en supposant $\Delta P = 0$:

$$(6) \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta P_2' = - \frac{\Delta r \cdot H_0' \alpha}{1 + K}, \\ \delta n_2' = \frac{\Delta P_2' r_0}{P_0 \Delta r}. \end{array} \right.$$

H_0' est le champ magnétique moyen dans l'entrefer d'amortissement. Dans le cas général ($\Delta P \neq 0$; $\alpha \neq 0$) on a entre les points A' et B' la différence

de potentiel

$$(7) \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta P' = \frac{\Delta P - \Delta r H_0' \alpha}{1 + K}, \\ \delta n' = \frac{1}{P_0} \frac{r_0}{\Delta r_0} \frac{\Delta P - \Delta r H_0' \alpha}{1 + K}. \end{array} \right.$$

On peut choisir l'angle α de sorte que $\delta n' = 0$ pour l'induction maximum envisagée. Ce cas est représenté sur la Fig. 8 pour une induction maximum de $(B_0)_{\max} = 14\,000$ gauss dans l'entrefer. Dans ce cas, comme la figure le

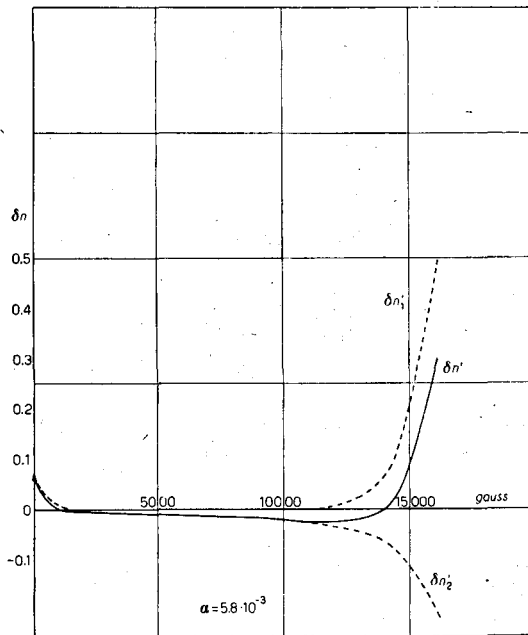


Fig. 8.

montre, il y a surcompensation aux inductions moyennes; mais l'entrefer d'amortissement joue aisément son rôle d'atténuateur à ces valeurs d'induction moyenne pour lesquelles μ_p est élevé.

La condition $\delta n' = 0$ ou $\Delta P = \Delta r H_0' \alpha$ signifie que la différence de potentiel ΔP existant entre les extrémités radiales de la surface limite de la culasse est exactement absorbée par la surépaisseur $h_f(A) - h_f(B) = \Delta r \cdot \alpha$ de la fente; le chemin magnétique supplémentaire que représente cette surépaisseur compense exactement l'inégalité des chemins magnétiques de la culasse.

35. Anneau de garde aux extrémités des pièces polaires. — Cependant, pour que la face de la pièce polaire côté entrefer principal soit réellement équipotentielle, il faut encore considérer le flux de fuites venant du plan médian et qui pénètre radialement de part et d'autre dans les extrémités de la pièce polaire. Pour ce flux, l'entrefer d'amortissement joue un rôle néfaste, c'est-à-dire le même que précédemment mais en sens inverse: la réluctance de la pièce polaire étant faible, comparée à celle de l'entrefer d'amortissement, les variations de potentiel provoquées par ce flux dans la pièce polaire seront également faibles, comparées à celles à travers l'entrefer. Le flux pénétrant radialement dans la pièce polaire ressortira dans l'entrefer d'amortissement uni-

formément réparti sur toute la largeur Δr de ce dernier. Le réarrangement de ces lignes de flux à l'intérieur de la pièce polaire implique à nouveau de fortes composantes radiales dirigées vers le centre de part et d'autre en tous points de la pièce polaire.

Pour parer à cette sensibilité accrue de la pièce polaire au flux de fuites radial, on est conduit :

1) à donner aux pièces polaires un profil en forme de bateau afin de réfracter les lignes du flux de fuites à l'intérieur de la pièce polaire vers la verticale;

2) à séparer les extrémités radiales des pièces polaires de la zone centrale par une fente verticale; les extrémités ainsi séparées joueront un rôle d'anneaux de garde par rapport à la partie centrale.

La Fig. 9, en reproduisant à une échelle plus grande que sur la Fig. 1 les extrémités radiales d'une pièce polaire, fait mieux ressortir la forme en bateau des extrémités, les fentes de séparation verticales, ainsi que la technique envisagée d'accrochage des pièces polaires à la culasse.

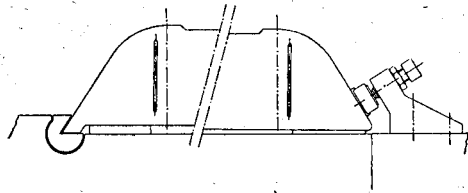


Fig. 9.

* * *

Les conceptions développées ci-dessus garantiront probablement dans les limites indiquées de tolérance, l'invariance de la carte du champ entre 340 gauss et 14 000 gauss, c'est-à-dire du début jusqu'à la fin du cycle. Elles rendront, de ce fait, probablement ⁽¹⁰⁾ inutile l'emploi d'enroulements correcteurs.

Nous insistons cependant sur le fait qu'il ne s'agit, en ce moment, que d'un projet théorique dont la vérification expérimentale n'est pas encore entièrement achevée, tant en ce qui concerne les principes que les solutions technologiques de réalisation envisagées.

4. - Bâtiment destiné au synchorotron.

Nous avons cru pouvoir dégager de l'expérience acquise ailleurs un certain nombre de conditions qu'il serait bon d'introduire dans le projet d'un bâtiment :

1) construire sur un seul plan, ce qui simplifie la protection et, partant, l'expérimentation;

⁽¹⁰⁾ Il convient de formuler des réserves, en particulier sur une influence éventuelle en début de cycle, des courants de Foucault se produisant dans les parois de la chambre.

2) dégager la machine pour l'utiliser sur le maximum de sa périphérie et prévoir au départ des zones d'extension de l'expérimentation;

3) dégager pour l'expérimentation l'aire comprise à l'intérieur de l'aimant;

4) les moyens de levage doivent desservir à la fois la machine et la zone expérimentale.

La disposition du projet de Saclay telle qu'elle est représentée par la Fig. 10 s'inspire de ces conditions.

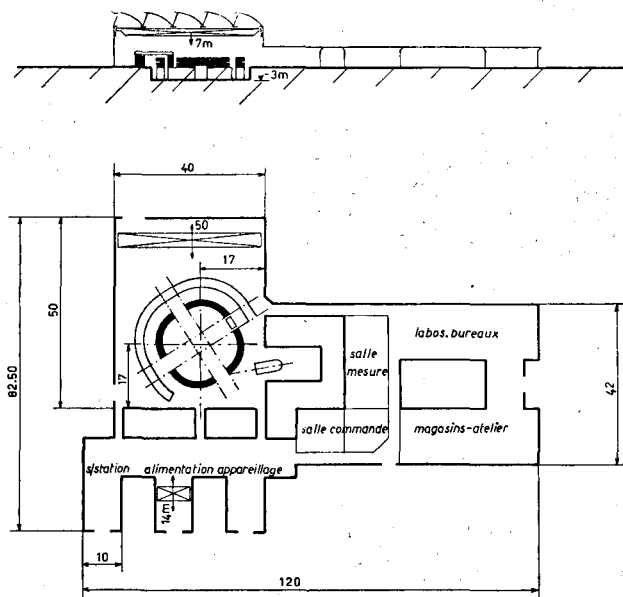


Fig. 10.

5. - Délais et moyens d'exécution du projet.

5.1. *Délais.* - Le choix du type de machine a été arrêté au cours du mois de Mai 1954. Les grandes lignes de l'ordonnancement de la réalisation sont les suivantes.

— Au cours du deuxième semestre de 1954, les études de réalisation sont entreprises.

— Au cours de 1955, l'aimant, son alimentation et l'injecteur sont lancés en fabrication. La construction des fondations de l'aimant et du bâtiment est commencée.

— Au cours du premier semestre de 1956, les blocs constituant l'aimant arrivent de fabrication et sont soumis à des contrôles magnétiques individuels. La chambre et le pompage sont lancés en fabrication.

— Au cours du deuxième semestre, le montage de l'aimant est commencé. La Haute Fréquence est lancée en fabrication.

— Au cours du premier semestre de 1957, le montage de l'aimant est terminé, son alimentation est mise en place et les essais magnétiques commencent. La chambre et le pompage sont achevés de fabrication et l'injecteur installé.

— Au cours du deuxième semestre de 1957, la chambre est mise en place avec le pompage et les essais avec faisceau commencent.

— La première étape de 1.75 GeV doit être atteinte au début de 1958.

5.2. *Moyens.* — Le personnel du Service des Accélérateurs, auquel l'exécution de ce programme a été confié, se décompose de la manière suivante:

Physiciens et ingénieurs, dont 4 ingénieurs mécaniciens et 7 ingénieurs électroniciens . . .	22
Agents techniques	21
Dessinateurs	7
Ouvriers mécaniciens	15
	<hr/>
Total	65

Ce chiffre doit être porté progressivement à 80 ou 90 personnes, mais les effectifs définitifs dépendront essentiellement de l'apport industriel plus ou moins important, tant pour les études que pour la réalisation.

H. BRUCK et R. LÉVY-MANDEL

1955

N. 1 del *Supplemento* al Vol. 2, Serie X,
del *Nuovo Cimento* - pag. 423-441