

Où en est la BEBC?

Plan définitif de la BEBC

1) corps de la chambre ; 2) fenêtres de faisceau ; 3) vide chambre ; 4) disque de séparation ; 5) piston ; 6) échangeurs ; 7) pompes à vide secondaires ; 8) évent vide chambre ; 9) moteur de détente ; 10) hublot « fish-eye » ; 11) pompes des « fish-eye » ; 12) chargeurs des caméras ; 13) enroulements supraconducteurs ; 14) cryostats ; 15) entretoises des bobines ; 16) réservoir tampon d'hélium ; 17) vide aimant ; 18) enceinte magnétique ; 19) atmosphère d'azote ; 20) évent enceinte magnétique.

C'est en juin 1967 que le Conseil du CERN approuvait le projet de la grande chambre à bulles européenne qui lui avait été soumis par un groupe d'experts d'Allemagne, de France et du CERN. La chambre proprement dite est un cylindre vertical de 3,7 m de diamètre et de plus de 2 m de haut, dont le sommet est un dôme où sont placées quatre caméras dotées d'objectifs « fish-eyes ». A sa partie inférieure se trouvent le piston et le système de détente qui produit les variations de pression nécessaires à la formation des bulles dans le sillage des particules chargées.

La chambre, qui contiendra 33,5 m³ d'hydrogène liquide, est entourée d'une enceinte à vide autour de laquelle est disposée une bobine supraconductrice produisant un champ de 35 kilogauss. Cette bobine est plongée dans un cryostat rempli d'hélium liquide à 4,4° K (température nécessaire pour que se manifeste la supraconduction). Enfin, ceignant l'ensemble, se trouve un blindage qui réduit considérablement le champ de fuite. Le projet, décrit en détail dans le COURRIER CERN vol. 7, page 143, a subi depuis lors différentes modifications et les principaux paramètres n'en ont été arrêtés « irréversiblement » qu'à la fin de 1968, date à laquelle une dernière retouche a été apportée aux appels d'offres adressés à l'industrie.

C'est pourquoi il est opportun de revenir sur l'article du COURRIER CERN d'août 1967 pour faire le point des derniers changements intervenus et synthétiser les résultats obtenus avec les 2 principaux « bancs d'essais » de la BEBC que sont la maquette de 1 m et l'aimant supraconducteur expérimental Braracourcix.

Configuration définitive de la grande chambre

Deux des changements principaux apportés aux plans de la grande chambre portent sur l'enceinte à vide. Elle est prolongée notablement vers le haut et elle se présente désormais comme un cylindre dont le plancher et le plafond sont constitués par le blindage magnétique : il en résultera une meilleure accessibilité au dôme de la chambre, un opérateur pouvant y entrer par un trou d'homme. Pour éviter toute possibilité de feu ou d'explosion à l'intérieur du blindage magnétique, il a été décidé que l'espace compris entre le blindage et l'enceinte

à vide ne serait plus ventilé mais rempli d'azote, le pourcentage maximal d'oxygène admis étant de 5 %. Un opérateur spécialement équipé pourra y pénétrer pour des interventions exceptionnelles. Un troisième point porte sur le système d'évacuation d'urgence des 33 m³ d'hydrogène liquide de la chambre ; en cas de nécessité, une partie du liquide peut être dirigée, après réchauffage, dans des ballons gonflables.

Enfin, en vue des exigences de l'aimant, un nouveau schéma de principe a été proposé pour le réfrigérateur. Au lieu de deux réfrigérateurs séparés classiques, une installation combinée à hélium et

hydrogène est prévue. Celle-ci comportera un circuit principal à hélium produisant du froid par travail extérieur dans des turbines et par détente Joule-Thomson ainsi qu'un circuit secondaire à hydrogène, prérefroidi par le circuit principal, comportant un étage Joule-Thomson mais pas de turbines. La concentration des capacités de compression et des turbines dans le circuit hélium garantit une grande sécurité de fonctionnement du circuit aimant (en priorité à la chambre) et une mise à froid accélérée des bobines. La nouvelle solution semble être moins chère que la solution classique.

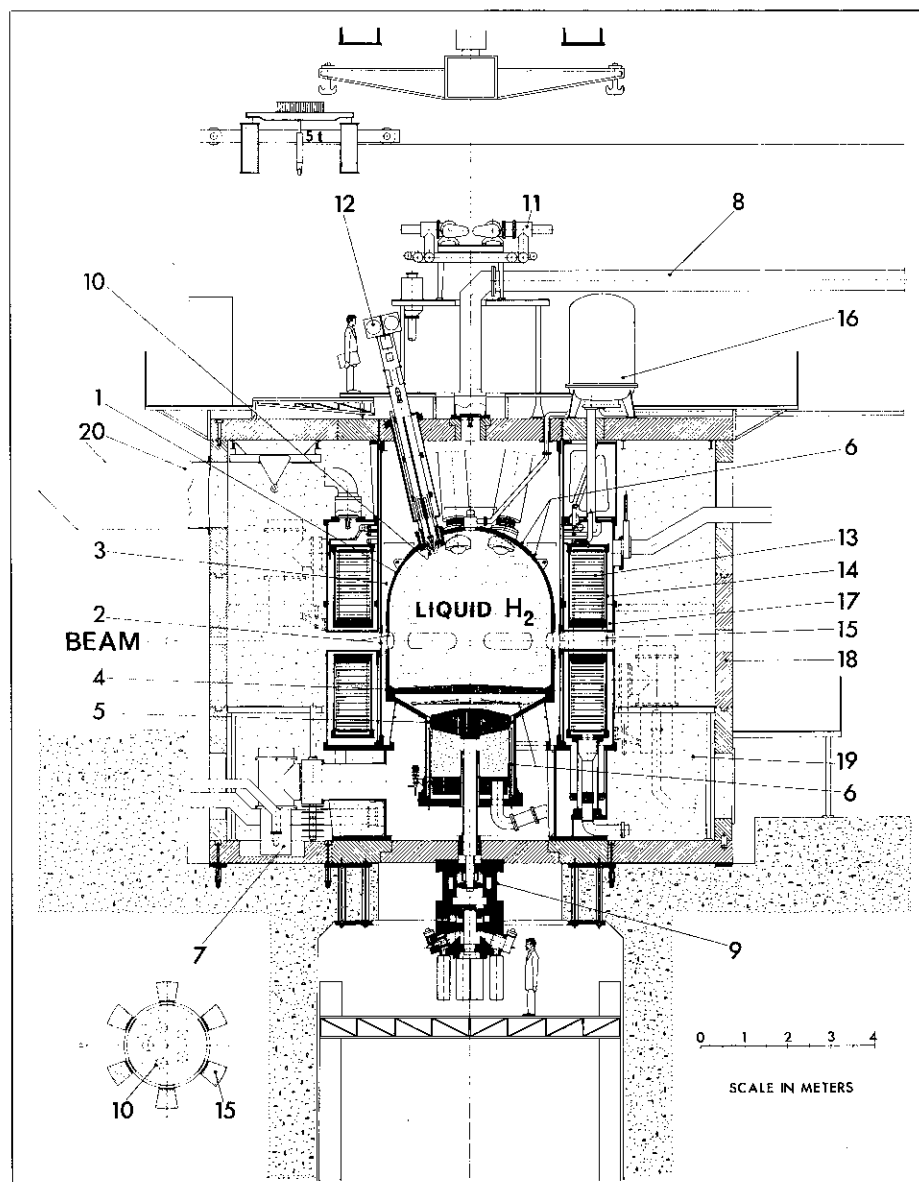


Tableau comparatif des offres pour le ruban supraconducteur

	No	1	2a	2b	3	4	5	6
— Echantillon	—	CGE	CFTH	CFTH	SSW	BBC	IMI	SUP*
— Soumissionnaire	—	F	F	F	D	CH	GB	USA
— Pays d'origine	—	Al+Cu	Al+Cu	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu
— Type de stabilisants	—	0,059	0,035	0,03	0,032	0,09	0,44	2
— Section d'un filament SC	mm ²	79	260	260	224	116	54	18
— Nombre de filaments	—	28	51	42	43	67	156	235
— Poids de supraconducteur	g/m							
— Densité de courant dans le supraconducteur au courant nominal	A/mm ²	1500	780	730	790	550	240	160
— Section du stabilisant	mm ²	130	160	157	177	172	159	143
— Résistivité du stabilisant pour B = 0 T ; $\sigma = 0$ kg/mm ²	10 ⁻⁸ x Ω cm	0,6	1	1	1,16	0,6	0,9	1,33
— Poids total du conducteur	g/m	673	840	1600	1620	1600	1580	1515
— Longueur totale du conducteur	km	52,5	52,5	65,5	65,5	65,5	65,5	65,5
— Longueur unitaire sans soudure	m	1560	1560	1560	780	180	130	200
— Courant critique min. pour une induction // de 5,1T et $\perp$ de 3,8T	kA	8	8	6,45	6,45	6,45	6,45	6,45

* SUP = Norton International Supercon Division

Les contrats

Les quatre contrats principaux relatifs à la grande chambre ont été approuvés lors des sessions du Comité des Finances des 4 février et 11 mars.

1) Ruban supraconducteur

Il s'agit d'un ruban de 61 mm x 3 mm de section et de 65 km de longueur constitué à partir d'un ruban de cuivre dans lequel sont noyés des fils supraconducteurs en alliage de niobium-titane. Ce ruban refroidi à 4,2°K et exposé à un champ magnétique maximal de 59 kG pourra transporter un courant de près de 7000 A qui créera un champ magnétique de 35 000 gauss au centre de la chambre. Le contrat a été adjudé par moitié aux firmes Siemens (RSA) et Thomson-Houston (France) qui ont fait les offres les moins disantes. Il va de soi que les caractéristiques électromagnétiques des deux rubans seront rigoureusement semblables.

Le coût global du contrat est de 7,3 MFS (3,65 MFS par firme). La période contractuelle de livraison s'étale de septembre 1969 à juin 1970.

2) Chaudronnerie

Cette fourniture se subdivise en deux ensembles distincts représentant au total 350 t d'acier

- le corps de chambre avec sa suspension et son enceinte à vide ;
- les cryostats des bobines supraconductrices et l'enceinte à vide correspondante.

Un contrat de 2,7 MFS pour la fourniture de la chambre et de l'enceinte à vide a été adjudé à Thyssen (RFA) et le second, de 3,3 MFS, pour la fourniture des cryostats et de l'enceinte à vide à Alstom — Neyrpic (France) ; il s'agit dans les deux cas de l'offre la moins disante : les livraisons s'étaleront d'avril 70 à novembre 70.

Les deux fabricants recourent à des procédés

de soudure différents ; automatique chez Thyssen et manuel chez Alstom-Neyrpic. Dans les deux cas il est nécessaire d'effectuer des contrôles en cours de soudure, soit par radiographie, soit par ultrasons. Alstom-Neyrpic met actuellement au point une technique de soudure des pièces de forte épaisseur par bombardement électronique, beaucoup plus rapide et élégante (1 m à la minute contre 1 m en 25 h.) que la soudure manuelle mais qui nécessite une grande précision dans l'usinage des pièces avant soudure. Cette technique sera substituée à la soudure manuelle si elle est parfaitement au point au moment de la mise en fabrication.

3) Installation de réfrigération

Cette installation doit assurer les fonctions suivantes :

- purification et liquéfaction des fluides requis pour le remplissage de l'aimant et de la chambre ;
- refroidissement de l'aimant et de la chambre à bulles de la température ambiante jusqu'à la température d'opération ;
- réfrigération en continu ;
- réchauffage de la chambre à bulles et de l'aimant.

La réfrigération en continu de la chambre à bulles et de l'aimant en conditions opérationnelles constitue la marche normale de l'installation frigorifique.

Le contrat a été passé à la firme Sulzer (Suisse) qui a fait parvenir la soumission la moins disante à la date de clôture de l'appel d'offre.

Le montant du contrat est de 5,017 MFS. L'installation devra être en place au CERN et réceptionnée pour le 31 octobre 1970.

4) Enceinte magnétique

Il s'agit d'une enceinte de 2000 t d'acier doux entourant l'ensemble de la chambre et ayant pour but de réduire le champ de fuite.

Le contrat a été attribué à la firme CAFL (France) qui a fait l'offre la moins disante (3,742 MFS). La livraison doit s'étaler entre janvier 1970 et février 1971.

Choix du supraconducteur

L'aimant supraconducteur de la grande chambre constituera la plus grosse unité du genre jamais construite, par la densité du champ magnétique (35 kG contre 20 kG pour la grande chambre d'Argonne qui est de dimensions voisines), par la taille et par l'énergie emmagasinée.

Rien n'empêcherait théoriquement d'utiliser pour l'aimant (dont le champ englobera un volume intérieur total de 70 m³) les solutions classiques. Toutefois de simples considérations de consommation d'énergie se sont montrées déterminantes. Là où un aimant aurait consommé 56 MW pour les pertes joules et 1,2 MW pour le refroidissement, soit au total près de 2 fois la consommation actuelle du CERN, l'aimant supraconducteur consommera moins d'un MW dont la quasi totalité pour la réfrigération, les pertes par effet joule dans les enroulements supraconducteurs étant réduites à 200 W, y compris les pertes des connexions intérieures et des amenées de courant. 56 000 000 W contre 200 W : la comparaison est parlante. Si la supraconduction est légèrement plus onéreuse du point de vue investissement, on se rattrape vite sur la consommation car pour 5 000 heures de fonctionnement, l'aimant classique dépenserait pour 17 M francs suisses d'électricité contre 0,6 M francs suisses pour le supraconducteur.

D'autres facteurs ont joué en défaveur de la solution classique, tels que l'énorme consommation d'eau de refroidissement. Pour le ruban supraconducteur, 13 sociétés d'Europe et des Etats-Unis furent invitées en 1967 à manifester leur intérêt. Finalement le CERN reçut sept échantillons de 6 firmes différentes : 2 de rubans stabilisés à l'aluminium et 5 de rubans stabilisés au cuivre.

La plupart de ces échantillons ont été essayés au CERN dans Braccourcix, l'aimant supraconducteur expérimental de 60 kG et 2 MJ d'énergie stockée. (Voir COURRIER CERN vol. 8, page 23). On a ainsi pu lancer en mai 1968 la première spécification pour la fourniture du ruban supraconducteur de la grande chambre.

Tenant compte des conditions d'environnement thermique et magnétique, de la contrainte mécanique et de la structure de l'enroulement, le CERN a rédigé une spé-

A gauche : tableau des principaux paramètres des 7 échantillons de ruban supraconducteurs soumis.

A droite : photo des 7 échantillons montrant la taille et la disposition des filaments de Nb-Ti.

cification technique imposant un certain nombre de paramètres.

L'examen des réponses reçues en juillet 1968 conduisit à modifier la section qui fut réduite de 88 X 3 mm à 61 X 3 mm en raison de considérations relatives aux problèmes de bobinage si bien que la sélection du fournisseur requit un deuxième appel d'offres lancé en octobre 1968. Nous donnons dans le tableau de la page 64 les principales caractéristiques des offres envoyées par les 6 firmes ainsi qu'en figure 1 les coupes des différents rubans proposés.

Les fils supraconducteurs, noyés dans le cuivre (ou l'aluminium dans le cas des deux échantillons de gauche) sont tous faits d'alliage de niobium-titane (la proportion en poids du titane varie de 40 à 60 % selon les firmes). Cet alliage a été choisi parce qu'il est supraconducteur à la température de l'hélium liquide, relativement bon marché, facilement maniable et qu'il présente un comportement électro-magnétique favorable (maintien de l'effet de supraconduction en présence d'un champ magnétique élevé).

Les principaux critères de sélection du ruban étaient les suivants :

- 1) minimum de soudures par galettes, soit par tranche de 1600 m de ruban.
- 2) isotropie du conducteur de Nb/Ti vis-à-vis du champ magnétique (les fils de section ronde étant les meilleurs de ce point de vue).
- 3) bonne liaison entre le conducteur et le stabilisant.
- 4) bonne tenue mécanique (en effet les forces qui s'exercent sur chaque spire des galettes sont considérables en raison du champ magnétique. Cela se traduit par une forte traction sur le ruban, environ 10 kg/mm² aux points les plus sollicités. La résultante des forces axiales correspond à une force d'attraction de 9000 t entre les deux bobines.
- 5) niveau de prix.

Quant à la structure des enroulements, elle se base en partie sur des études faites à Brookhaven et objet au CERN d'un important développement, et sur des mesures de laboratoire confiées à deux firmes européennes l'Air Liquide (France) et British Oxygen (Grande-Bretagne) portant en particulier sur le comportement thermique de la structure et l'influence de la configuration des enroulements sur l'évacuation de la chaleur.

L'étude et la mise au point de ces matériaux entièrement nouveaux ont demandé des travaux de développements industriels importants. Les firmes ayant

participé à cet appel d'offres ont fait preuve d'un excellent esprit de coopération dont le CERN se félicite.

La maquette de 1 m

Depuis juin 1968, la maquette de 1 m de la grande chambre qui comporte un grand nombre des éléments du projet définitif (à l'exception du bobinage supraconducteur) est soumise à des essais (voir COURRIER CERN vol. 8, page 129).

Il a été possible de recueillir beaucoup de renseignements, de confirmer la plupart des solutions adoptées et dans quelques cas de trouver des solutions meilleures.

Faisons rapidement le tour des différentes questions :

— Scotchlite : c'était la première fois qu'on utilisait ce type de revêtement dans une chambre à grande épaisseur d'hydrogène : les doutes qu'on pouvait avoir quant à la netteté des traces des particules ont été levés.

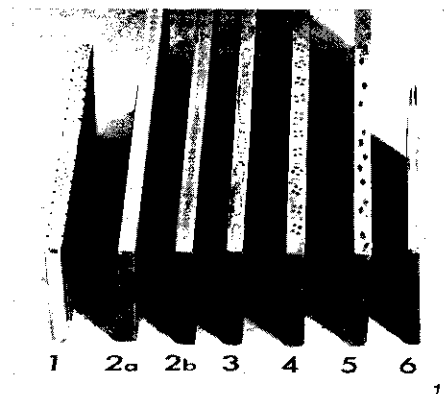
— Bulles : la photographie sur fond brillant oblige à prendre les photos lorsque les bulles ont atteint une taille d'au moins 700 μ (contre 300 μ environ pour les chambres usuelles) d'où normalement un temps de formation des bulles plus long favorisant la dérive et nuisant à la précision des mesures, mais il a été possible d'accroître la vitesse de formation des bulles en travaillant à une température d'hydrogène plus basse. En général on fait fonctionner les chambres à hydrogène à 26° K. Sous ces conditions, les bulles ont 300 μ de diamètre environ 1 ms après le passage des particules et il faudrait attendre 4 ms pour obtenir des bulles de 600 μ de diamètre.

La plupart des photos de la maquette ont été prises à 25° K, le délai étant 2 à 3 ms pour des bulles de 600 μ . Ce délai est encore plus court quand on abaisse davantage la température de la chambre. Toutefois, il n'était pas possible de sensibiliser la chambre au-dessous de 24° K.

Conditions de fonctionnement

Le fonctionnement à basse température n'a été possible qu'en raison de l'excellent comportement des échangeurs, de la configuration de la chambre et de la bonne étanchéité du piston, autant de facteurs qui réduisent la formation des bulles parasites.

Les expériences avec la maquette permettent déjà d'affirmer qu'une opération de la grande chambre sera possible avec une puissance frigorifique très acceptable même pour une détente relativement lente



(40 ms ou plus) à un taux de répétition élevé (2 c/s ou plus).

Turbulences thermiques

On a étudié les caractéristiques thermiques de la maquette. Pour cela on a utilisé :

- 1) les mesures (au moyen d'un hodoscope à photodiodes) des déviations d'un rayon laser sous l'effet des gradients thermiques;
- 2) les photographies du rayon laser et d'un trait droit sur le fond de la chambre. Une sonde thermique, mobile à l'intérieur de la chambre, à très grande vitesse de réaction (1 ms) est en cours de mise au point pour le prochain essai.

On a aussi remarqué que les turbulences thermiques, très faibles pendant la détente, n'apparaissent qu'après 40 ms (donc bien après la prise de la photo).

Hublots « fish-eye »

Les hublots hémisphériques (« fish-eye ») ont été montés dans la chambre pour la première fois, après une longue série d'essais statiques. Les joints collés avec une colle epoxy/aluminium sont restés parfaitement étanches. Cette méthode simple sera définitivement adoptée pour la grande chambre après ce succès.

Une petite difficulté venait du fait qu'une légère fuite dans la tuyauterie extérieure a laissé entrer des traces d'azote qui se sont condensées sur la face interne du hublot de la chambre, ce qui donne une diffusion parasite de la lumière.

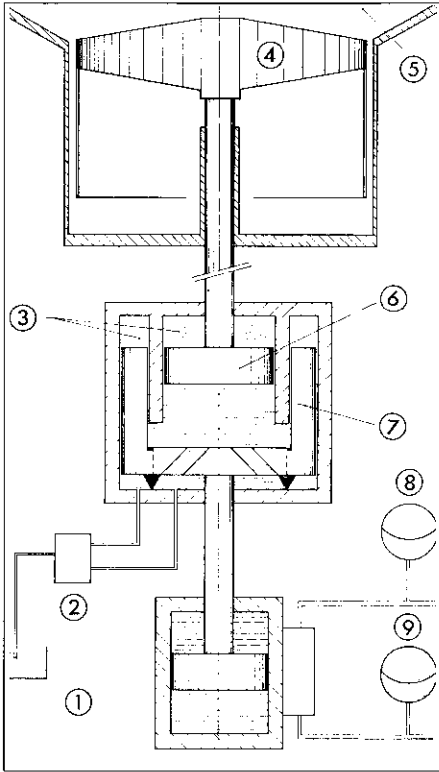
Ce phénomène de dépôt sur les hublots est toujours la « bête noire » des gens qui s'occupent des chambres à bulles. En général, il faut vider la chambre et la réchauffer un peu pour faire disparaître le dépôt.

On a profité de cet incident dans la maquette pour essayer une méthode rapide de nettoyage. Le fish-eye est raccordé à un vide séparé du vide principal de la chambre. On peut donc remplir l'espace entre les hublots avec de l'hélium gazeux sans casser le vide principal et sans vider la chambre. Il suffit de baisser le niveau de l'hydrogène liquide juste en dessous du fish-eye pour qu'un courant d'hélium chaud puisse faire évaporer l'azote condensé dans un délai de 15 minutes au maximum.

On peut se permettre une telle opération grâce à la séparation des vides et grâce à l'utilisation des hublots en quartz qui supportent bien les grandes différences de température créées pendant ce procédé de nettoyage.

Moteur de détente de la BEBC avec son système de compensation des forces dynamiques. On a 1) remise d'énergie, 2) verrouillage, 3) ressorts gazeux, 4) piston froid, 5) chambre, 6) piston moteur, 7) contre-masse, 8) accumulateur haute pression, 9) accumulateur basse pression.

1. Presse film du nouveau système de transport de la pellicule. C'est sur la plaquette rectangulaire, faite de tubes de verre accolés par soudure que se fait le placage du film par dépression. Les cylindres noirs protègent les vannes du circuit pneumatique contre le champ magnétique.



Système de détente, contrôle, télécommande

La maquette a en outre permis de confirmer la validité de l'implantation basse du piston et de mettre au point les principaux éléments du système de détente, le système de contrôle et les systèmes de télécommande.

Piston et disque

La structure du piston de la maquette (en nid d'abeilles plastique) ne sera pas directement extrapolable à la grande chambre ; néanmoins on a déjà pu adopter plusieurs solutions définitives telles que le déplacement des segments d'étanchéité vers le haut et leur montage sur le corps de la chambre. Quant au disque, il ne sera mis en place dans la maquette que prochainement.

Enfin les différents essais de la maquette ont rodé les équipes et lors de la mise en marche de la grande chambre en 1971, l'expérience accumulée constituera un atout majeur.

Détente de la BEBC

Dans les chambres à bulles, les forces dynamiques engendrées par le système d'expansion lors de chaque pulsation créent des vibrations importantes en raison

des très grandes accélérations dues à la faible période du cycle expansion-recompression et à l'importance des masses déplacées. Sur la grande chambre à bulles de 2 m du CERN, en raison de la masse réduite du piston (de l'ordre de 60 kg), l'absorption des vibrations reste un problème relativement facile, résolu par la fixation du système de détente sur la masse importante (600 t) que constitue le fer de l'aimant.

Dans le cas de la grande chambre à bulles à hydrogène de 3,70 m du CERN la masse déplacée atteint près de 2 tonnes ce qui, compte tenu de la course de 145 mm du piston et de la période des pulsations, engendre une force dynamique de 345 t. L'importance de ce chiffre a conduit le CERN à proposer une solution permettant de réduire considérablement ces efforts en recourant à une méthode présentant quelques analogies avec le principe du canon sans recul. Il s'agit d'utiliser une « contre-masse » égale à la « masse principale » constituée par le piston froid et le piston moteur, mais animée d'un mouvement de translation parallèle et de sens opposé à celui du piston moteur auquel elle est liée par un volume d'huile. La résultante des forces dynamiques du système masse — contre-masse est donc nulle.

Les efforts intervenant pendant le cycle se limitent aux forces de liaison chambre/système d'expansion, soit au maximum à 140 t.

Le système de remise d'énergie qui compense les pertes de toutes natures (frottement, pertes hydrauliques, irréversibilité thermodynamique au sein de l'hydrogène...) a une puissance de 700 kW.

Programme

Le groupe hydraulique dont la livraison est prévue pour avril 1970 est réalisé par l'industrie. Le système d'expansion lui-même est partiellement réalisé au CERN et partiellement à l'extérieur ; ses essais doivent commencer à la fin de 1970.

Un prototype à échelle réduite du système d'expansion va être expérimenté à partir de mai 1969. Les essais permettront notamment de vérifier la conception du système et l'exactitude des calculs analogiques réalisés parallèlement pour le prototype de la grande chambre. La partie électronique employée pendant ces essais sera réutilisée par la suite pour le système d'expansion de la grande chambre.

Nouvelles du CERN

Suppression de la session du Conseil

La session du Conseil prévue pour les 12 et 13 mars a été annulée. Il s'est avéré nécessaire de réorganiser le calendrier des décisions concernant le projet de 300 GeV. Comme ces décisions doivent être différées, la session spéciale du Conseil de mars devenait sans objet. La prochaine session du Conseil se tiendra comme d'habitude en juin (19, 20).

Cyclage rapide de la chambre de 2 m

Le 13 mars a commencé une période d'exploitation de la chambre à bulles de 2 m à raison de 2 détenteurs séparées par un intervalle de 150 ms par cycle.

C'est pendant l'arrêt de l'été 1968, alors que la chambre subissait sa révision annuelle qu'ont été opérées les modifications nécessitant le démontage de la chambre si bien que depuis la remise en marche du PS, à la fin d'octobre 1968, l'essentiel du nouveau système fonctionne ; il n'a cependant été utilisé qu'à raison d'une détente par cycle tandis que se poursuivaient les préparatifs relatifs aux équipements extérieurs.

Ce cyclage double permettra de mener plus rapidement certaines expériences requérant par exemple des conditions particulières d'alimentation de la chambre.

Les modifications ont porté sur les points suivants :

1. système de transport de film entièrement nouveau environ 20 fois plus rapide permettant de passer d'une image à une autre en 85 ms. L'entraînement assure une précision de positionnement de 1 mm. Les presse-films (voir fig. 1) sont des plaques de 25 mm. d'épaisseur percées de tout

