

Février 1980

ORGANISATION EUROPÉENNE POUR LA RECHERCHE NUCLÉAIRE

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET LEP

P. Darriulat :

La physique à LEP

W. Schnell :

La conception du LEP

J.B. Adams :

Conséquences du projet de construction du LEP
sur les activités de recherche du CERN

CERN

Genève, le 3 décembre 1979

LA PHYSIQUE A LEP

P. Darriulat

AVERTISSEMENT

Cet exposé est très élémentaire. Il est écrit à l'intention des membres du personnel désireux de se faire une idée des raisons qui poussent les physiciens à demander qu'on leur construise un nouvel accélérateur, encore plus grand que le SPS. Son ambition est d'être accessible au lecteur n'ayant qu'une connaissance minime de la physique des particules élémentaires et de ses développements récents. S'il parvient peut-être à atteindre ce but, c'est au prix de nombreuses omissions, voire d'inexactitudes. En particulier il n'est fait mention ni d'invariance de jauge, ni de spin. L'enchaînement historique des idées est complètement passé sous silence. Les noms de ceux qui ont contribué à leur élaboration ne sont pas cités. Le lecteur désireux de s'informer plus sérieusement sur la question peut consulter les rapports jaunes CERN 76-11, CERN 76-18 et CERN 79-01.

Néanmoins, la physique à LEP est si étroitement liée aux progrès récents et aux idées nouvelles qu'il est indispensable de commencer par les présenter. Ces progrès ont porté sur deux fronts : d'une part le nombre des particules élémentaires à partir desquelles, par assemblages successifs, l'univers est construit, est bien moindre qu'on ne le pensait il y a quelques années ; d'autre part les interactions que ces particules exercent entre elles semblent pouvoir être décrites dans le cadre d'une théorie des champs renormalisable, le seul qui permette de concilier effets quantiques et effets relativistes.

LES FERMIONS ELEMENTAIRES

Dans sa version la plus simple la nouvelle image de l'univers contient quatre familles de particules élémentaires (fermions) ponctuelles.

Tableau I : Les fermions élémentaires

Famille	Symboles	Charge	
Leptons {	neutrinos	$\nu_e \quad \nu_\mu \quad \nu_\tau$	0
	électrons	$e \quad \mu \quad \tau$	-1
quarks {		$u \quad c \quad t$	2/3
		$d \quad s \quad b$	-1/3

Chaque famille est composée de trois membres presque identiques. Les six leptons sont groupés en deux familles, celle du neutrino et celle de l'électron, et les six quarks en deux autres familles dont la structure rappelle celle des leptons. Le proton et le neutron, qui constituent les noyaux d'atomes et plus généralement l'ensemble des hadrons, à l'étude desquels le CERN s'est consacré pendant vingt cinq ans, sont des agrégats de quarks fortement liés entre eux.

Pour compléter le tableau il est nécessaire d'associer à chaque particule une soeur jumelle, son antiparticule, de masse égale et de charge opposée. Cette nécessité découle naturellement de la théorie. Lorsque de la matière est créée sous forme d'une paire particule-antiparticule (équivalence relativiste entre masse et énergie) la charge totale est conservée et la symétrie de l'univers est préservée.

L'INTERACTION ELECTROMAGNETIQUE

Décrire l'univers à partir des particules élémentaires qui le composent ne prend de sens que si l'on spécifie les interactions de ces particules entre elles : ce sont ces interactions, bien plus que les particules qui les subissent, qui constituent l'univers observable.

Depuis trente ans l'électrodynamique quantique (QED) nous offre une description remarquablement simple de l'interaction électromagnétique entre

particules chargées. Schématiquement l'interaction consiste en l'échange, entre les deux particules chargées, d'une nouvelle particule (boson), neutre, dont la masse est définie par les conditions cinématiques avant et après la collision. A la valeur de sa masse près la particule échangée est en tous points semblable à une particule qui existe à l'état libre dans l'univers : le photon, particule des ondes électromagnétiques et lumineuses.

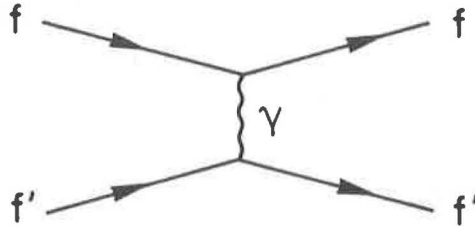


Figure 1 : Interaction électromagnétique entre deux fermions chargés, f et f' , par échange d'un photon. Le temps s'écoule de gauche à droite.

Dans ce schéma l'interaction est d'autant plus probable que d'une part la masse de la particule échangée est plus proche de celle du vrai photon et que, d'autre part, elle a plus de chances d'être émise et absorbée par les fermions qui interagissent. Les probabilités d'émission et d'absorption sont égales et dépendent d'une seule quantité, le couplage du photon aux fermions. Dans le cas de l'interaction électromagnétique la constante de couplage est tout simplement la charge électrique du fermion.

Tous les phénomènes électromagnétiques, et en particulier l'interaction schématisée en Figure 1, peuvent être construits à partir de l'interaction élémentaire décrivant l'émission (ou l'absorption) d'un photon par un fermion. On représente cette interaction élémentaire sous forme d'un diagramme ; le même diagramme décrit également les processus de création et d'annihilation d'une paire fermion-antifermion.

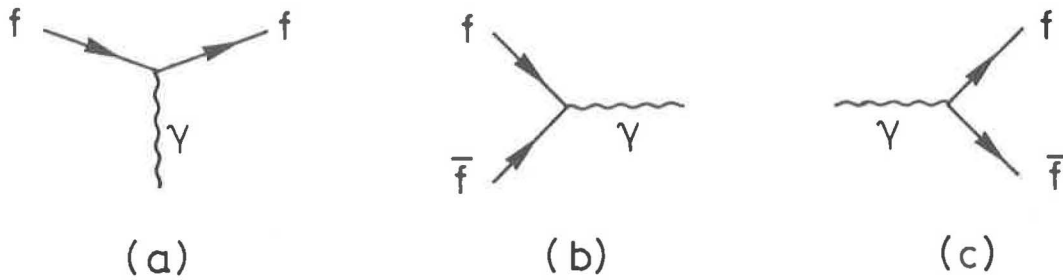


Figure 2 : L'interaction électromagnétique élémentaire :
a) émission ou absorption,
b) annihilation,
c) création d'une paire.

ANNEAUX e^+e^- A BASSE ENERGIE

Avant de présenter les autres interactions élémentaires nécessaires à la description de l'univers il est instructif de se pencher un instant sur la physique des anneaux e^+e^- à basse énergie, physique gouvernée exclusivement par l'interaction électromagnétique. Le processus typique que ces machines permettent d'étudier est l'annihilation des particules incidentes en un "photon" lourd qui crée à son tour une paire fermion-antifermion chargée.

Une réaction particulièrement simple, la production d'une paire $\mu^+\mu^-$, est illustrée en Figure 3. La section efficace de production, une quantité proportionnelle à la probabilité d'interaction, y est portée en fonction de l'énergie totale disponible, $2E$, égale au double de l'énergie E de chacun des faisceaux. Cette section efficace est d'autant plus faible que le photon de l'état intermédiaire est plus massif, donc que sa masse est plus éloignée de zéro, la masse du vrai photon. Notons qu'au bas de l'échelle, la section efficace de 10 pb correspond à un taux de production de seulement 3 évènements par heure (le taux de production est le produit de la section efficace par une quantité décrivant l'intensité des faisceaux et la qualité de leur recouvrement, appelée luminosité, et prise ici égale à $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Les figures 4a, 4b et 4c montrent trois exemples de résonances hadroniques. Lorsque l'énergie totale franchit une valeur égale à la masse d'une particule composée d'une paire de quark-antiquark la section efficace de production augmente brutalement : ceci permet d'une part de découvrir de

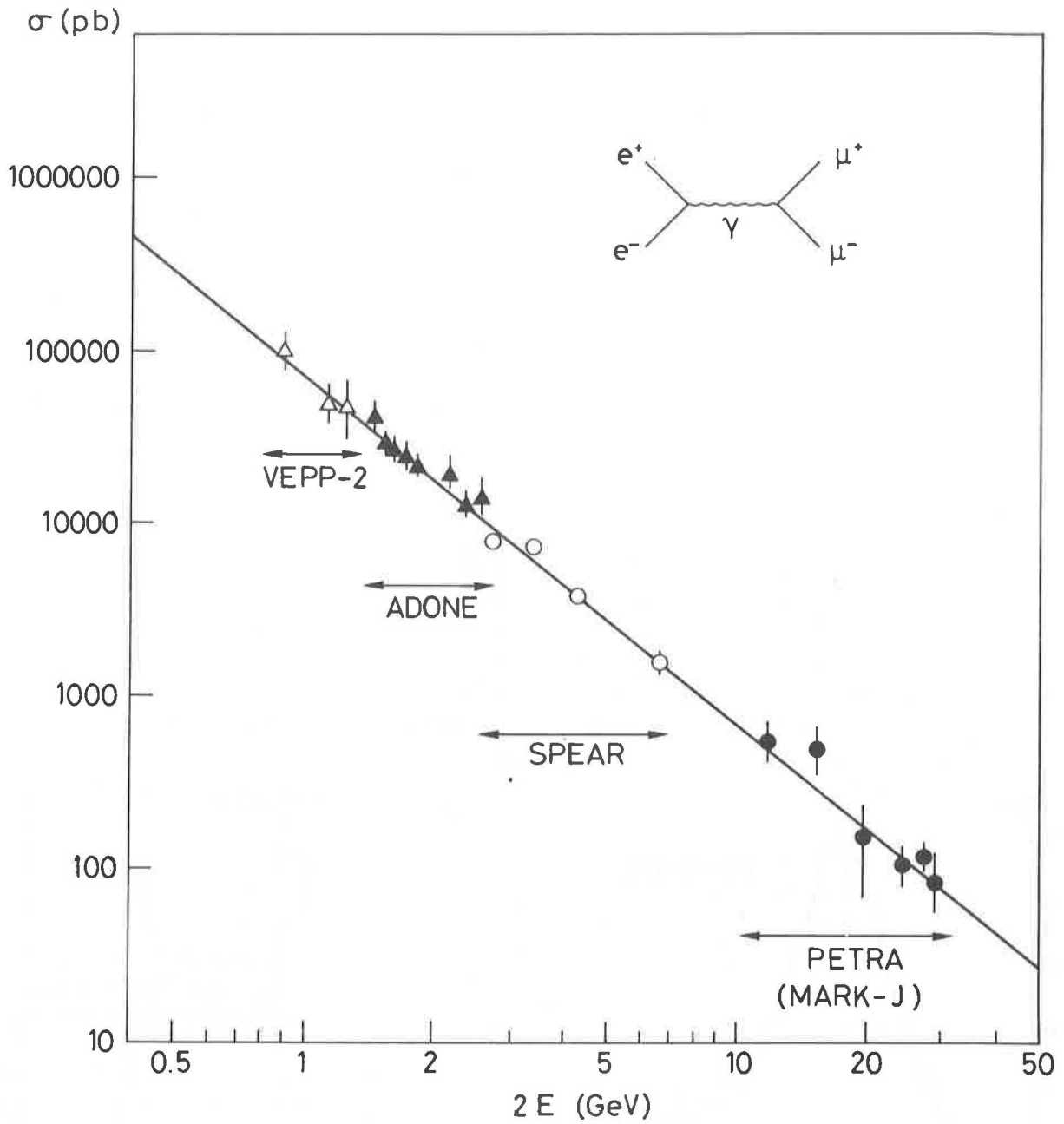


Figure 3 : La section efficace de production d'une paire $\mu^+ \mu^-$ en fonction de l'énergie disponible. Le résultat de plusieurs mesures expérimentales est comparé à la théorie (ligne continue).

Figure 3 : The production cross-section for a $\mu^+ \mu^-$ pair as a function of the available energy. The theory (solid line) is compared with several experimental results.

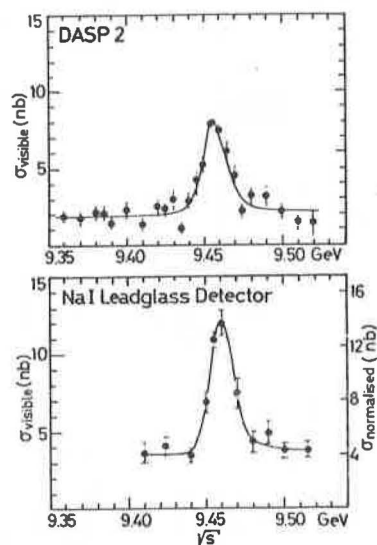
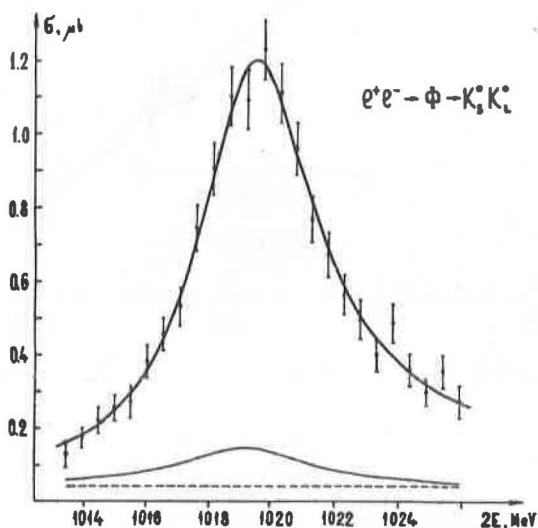
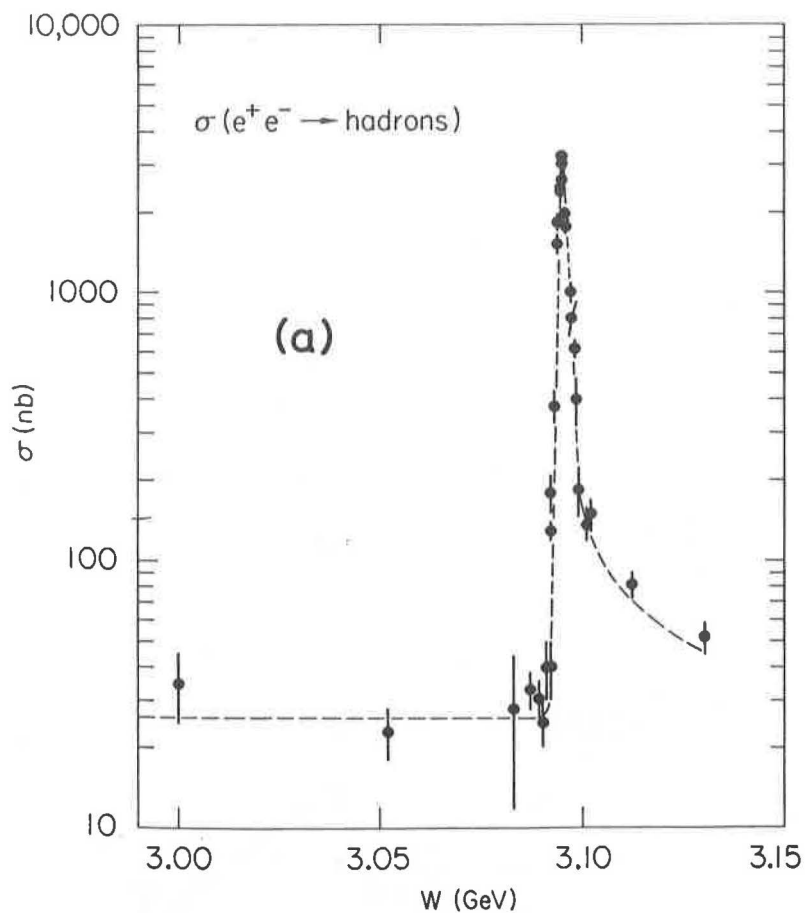


Figure 4 : Trois exemples de résonance dans une voie quark-antiquark :
 (a) $c\bar{c}$, (b) $s\bar{s}$, et (c) $b\bar{b}$.

Figure 4 : Three examples of resonance in a quark-antiquark
 channel : (a) $c\bar{c}$, (b) $s\bar{s}$, and (c) $b\bar{b}$.

nouvelles particules en explorant l'échelle d'énergie, d'autre part d'étudier en détail leurs divers modes de désintégration en ajustant l'énergie des faisceaux au maximum de leur section efficace.

Enfin la Figure 5 montre la variation, en fonction de l'énergie, du rapport R entre les section efficaces $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ et $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$. La structure observée correspond à l'ouverture de nouveaux seuils ($s\bar{s}$, $c\bar{c}$, $\tau^+\tau^-$) et à la formation d'états résonants.

Ces trois exemples illustrent la richesse de l'information contenue dans les collisions e^+e^- . De nombreux autres exemples, mettant en jeu une étude plus fine de la structure de l'état final, auraient pu être choisis. Dans tous les cas la clarté de l'analyse est une conséquence de la pureté de l'état final constitué seulement d'une paire fermion-antifermion.

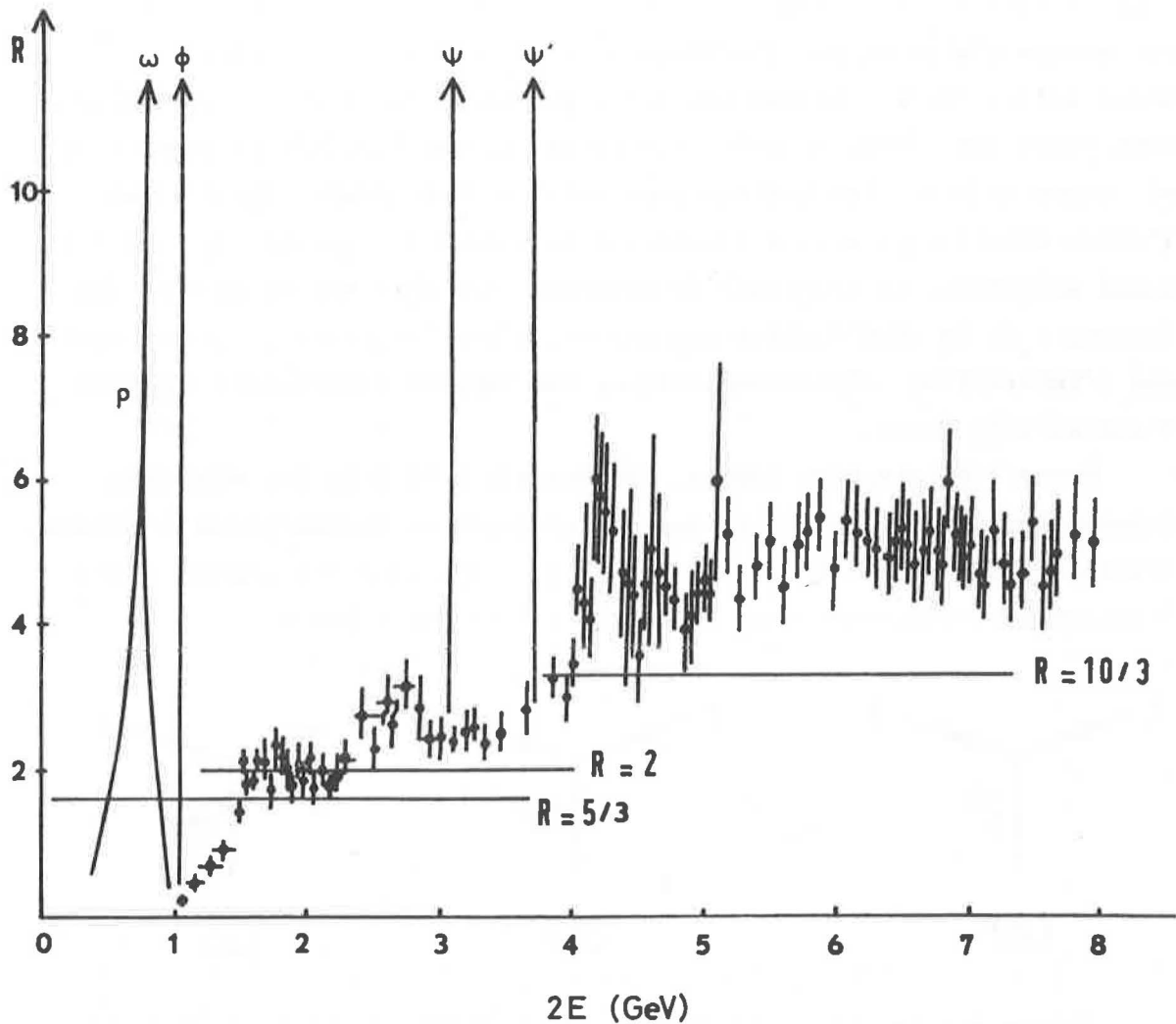


Figure 5 : Le rapport R entre les sections efficaces $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ et $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ à basse énergie.

LES AUTRES INTERACTIONS

Ce n'est que récemment qu'on a su donner des interactions autres que l'interaction électromagnétique une description calquée sur l'électrodynamique quantique.

Dans chaque cas l'interaction élémentaire est schématisée par un diagramme qui décrit l'émission (ou l'absorption) d'un nouveau boson (l'analogue du photon). Les caractéristiques de ce boson, et en particulier la valeur de sa masse, spécifient complètement l'interaction quand on connaît les quatre constantes de couplage associées à chacune des familles de fermions élémentaires (analogues de la charge électrique).

C'est ainsi que la chromodynamique quantique (QCD) décrit les interactions fortes entre quarks, responsables de la cohésion des hadrons et des noyaux d'atomes, par l'échange d'un gluon, particule neutre et de masse nulle. Cette cohésion est telle que lorsqu'un quark et un antiquark sont créés sous forme de paire ils interagissent aussitôt et engendrent plusieurs hadrons. Ces hadrons sont émis en deux groupes (jets) dont l'étude détaillée permet d'identifier la nature des quarks qui leur ont donné naissance. La constante de couplage (couleur) est nulle chez les leptons : de la même manière que les neutrinos (neutres) ne connaissent pas l'interaction électromagnétique, les leptons (incolores) ignorent l'interaction forte.

Reste l'interaction faible, responsable à la fois des réactions induites par les neutrinos et des désintégrations radioactives β . Domaine privilégié de LEP, elle mérite qu'on s'y arrête plus longuement. Trois diagrammes élémentaires sont nécessaires à sa description.

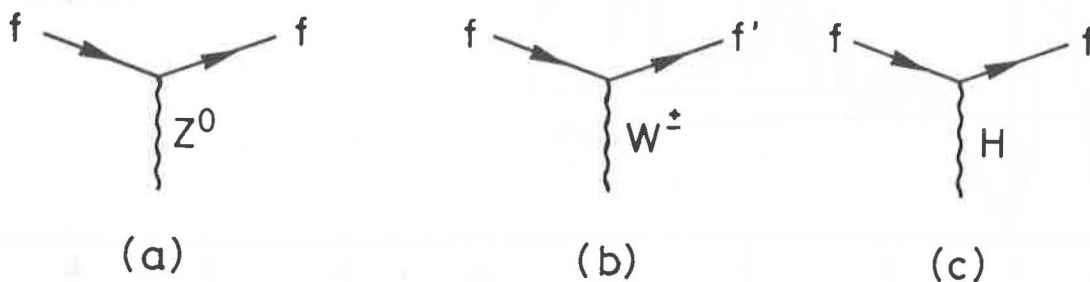


Figure 6 : Les trois diagrammes élémentaires de l'interaction faible :
(a) courants neutres,
(b) courants chargés,
(c) boson de Higgs.

Le premier est responsable des courants faibles neutres, observés pour la première fois au CERN en 1973 dans l'interaction d'un faisceau de neutrinos dans Gargamelle. La réaction mise en évidence est schématisée en Figure 7.

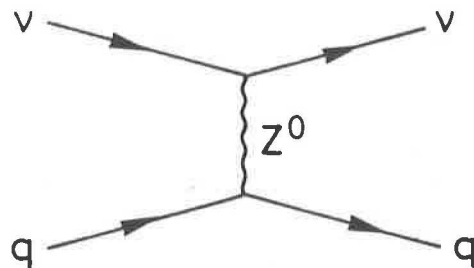


Figure 7 : Courants neutres : interaction entre un neutrino et un quark par échange d'un boson neutre Z^0 .

La particule échangée, Z^0 , est couplée à chacune des quatre familles de fermions élémentaires, y compris à celle des neutrinos, et ceci contrairement à l'interaction électromagnétique. Sa masse très élevée, de l'ordre de $90 \text{ GeV}/c^2$, explique à la fois que le Z^0 n'ait pas encore été observé et que l'interaction correspondante nous ait semblé très faible.

Le second diagramme est responsable des courants faibles chargés et des désintégrations faibles d'un grand nombre de particules telles que le muon et le neutron.

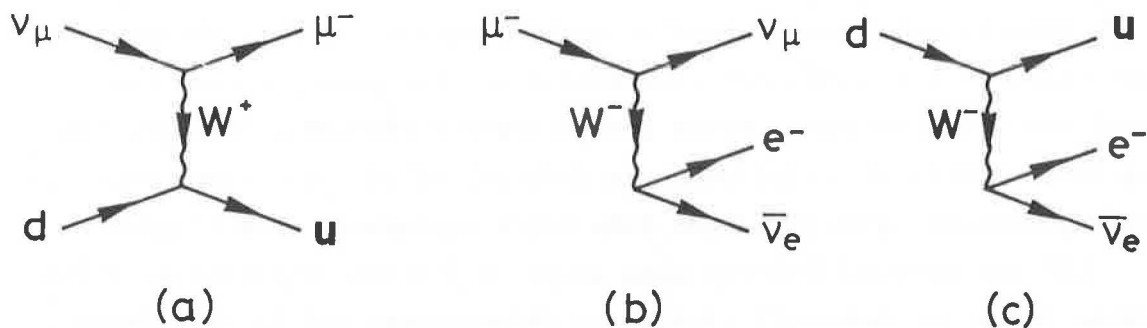


Figure 8 : Trois réactions gouvernées par l'échange d'un W :
a) courants chargés
b) désintégration du muon
c) désintégration du neutron.

La particule échangée, W^\pm , est presque aussi massive que le Z^0 , et n'a par conséquent pas encore pu être observée. Comme elle est chargée son échange entraîne la transformation du fermion qui l'a émise en un fermion d'une autre famille, sans toutefois mélanger les leptons et les quarks.

Enfin le troisième diagramme est associé à l'émission d'un boson de Higgs, H, et ne correspond à aucun phénomène observé. Sa présence, imposée par le désir d'étendre le formalisme de l'électrodynamique quantique à des réactions dans lesquelles le boson échangé est massif, est quelque peu inattendue. De plus les constantes de couplage de H aux fermions sont proportionnelles aux masses de ces fermions et par conséquent différentes entre les membres d'une même famille, ce qui distingue H des autres bosons. Enfant non désiré de la théorie, son observation en serait néanmoins une éclatante confirmation.

Les trois diagrammes élémentaires de l'interaction faible (Figure 6) forment avec l'interaction électromagnétique un ensemble dont les théories nouvelles donnent un traitement global ; cette unification, longtemps attendue, est un succès spectaculaire de ces théories. La distinction entre interactions faible et électromagnétique ne serait qu'un accident historique lié à la relative petitesse des énergies que nous avons su produire jusqu'à maintenant.

L'INTERACTION FAIBLE A LEP

La situation actuelle est particulièrement passionnante : en possession d'une théorie apparemment complète et bien construite nous devons maintenant vérifier les nombreuses prédictions qu'elle nous propose. Les questions sont précises ; seule l'expérience y répondra. Mais que les réponses confirment ou infirment la théorie, elles nous feront sans nul doute progresser d'un grand pas dans notre connaissance de l'univers.

LEP est particulièrement bien adapté à l'étude détaillée de l'interaction faible et des trois diagrammes élémentaires qui la constituent.

Sur le processus d'annihilation électromagnétique :

$$e^+ e^- \rightarrow \gamma \rightarrow f \bar{f}$$

vient maintenant se greffer le processus faible

$$e^+ e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow f \bar{f} .$$

De même que le premier a une section efficace d'autant plus grande que l'énergie disponible est proche de zéro (la masse du photon), le second domine au voisinage de la masse du Z^0 , c'est-à-dire lorsque l'énergie de chacun des deux faisceaux approche $\frac{1}{2} 90 = 45$ GeV. La Figure 9 montre la variation du taux de production $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ en fonction de l'énergie. Elle atteint à son maximum une valeur de 3300 paires $f\bar{f}$ par heure ! Aux énergies de LEP l'interaction faible est devenue plus forte que l'interaction électromagnétique.

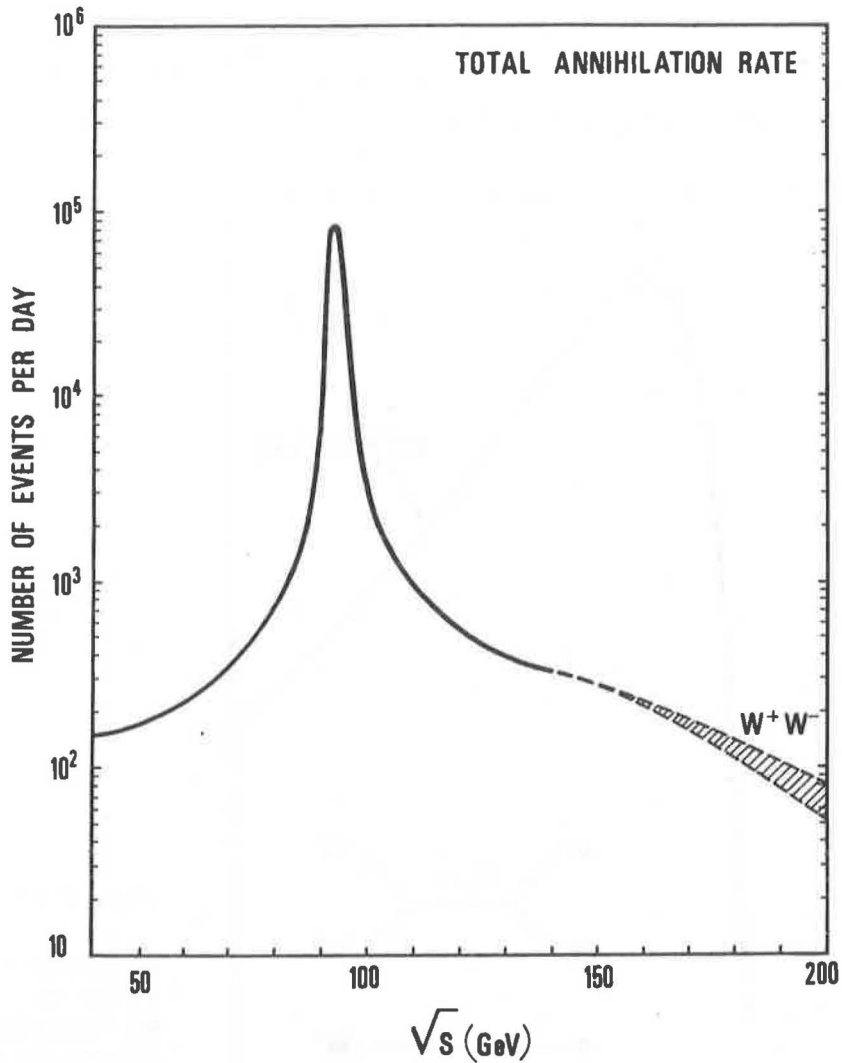


Figure 9 : Taux journalier de production de paires $f\bar{f}$ à LEP. A haute énergie la production de paires W^+W^- est également indiquée.

L'étude détaillée des états finaux dans cette région permettra de mesurer les couplages du Z^0 aux différents fermions, couplages auxquels la théorie attribue des valeurs bien précises. D'autre part l'étude de la région d'énergie située au dessous de la masse du Z^0 à laquelle les diagrammes électromagnétique et faible contribuent de façon similaire donne lieu à des phénomènes d'interférence riches en enseignements sur la nature exacte des courants faibles neutres.

L'étude du courant faible chargé est moins directe. La production de W est possible dès que le seuil est franchi mais la section efficace est petite et l'observation sera difficile. Plus intéressante est la production d'une paire W^+W^- (Figure 10) à laquelle contribuent deux diagrammes d'annihilation (γ, Z^0) et un diagramme d'échange (ν).

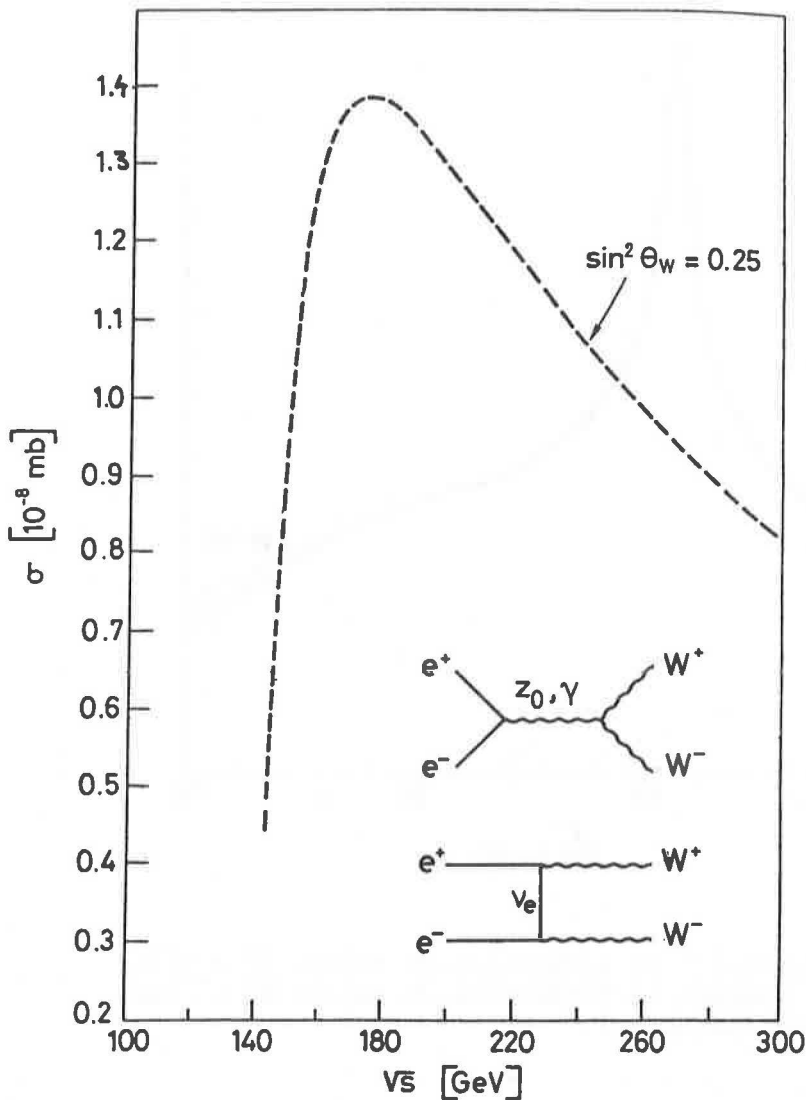


Figure 10 : Section efficace de production d'une paire de bosons W^+W^- en fonction de l'énergie totale $\sqrt{s} = 2E$.

Si la section efficace reste faible c'est que de fortes interférences destructrices entre les trois mécanismes sont prédites par la théorie. Mais la moindre déviation entre théorie et réalité romprait cet équilibre et pourrait résulter en des taux de production beaucoup plus importants : cette région est donc très sensible à la nature exacte du couplage (Z^0 , W^+ , W^-) entre les trois bosons faibles.

Quant au boson de Higgs, l'ignorance dans laquelle nous sommes de la valeur de sa masse rend difficile l'évaluation de nos chances de l'observer.

Sa préférence pour les particules massives suggère toutefois que ces chances sont d'autant plus grandes que l'énergie disponible est plus élevée. En particulier les diagrammes de la Figure 11 dont les états finaux ont une signature simple semblent être de bons candidats.

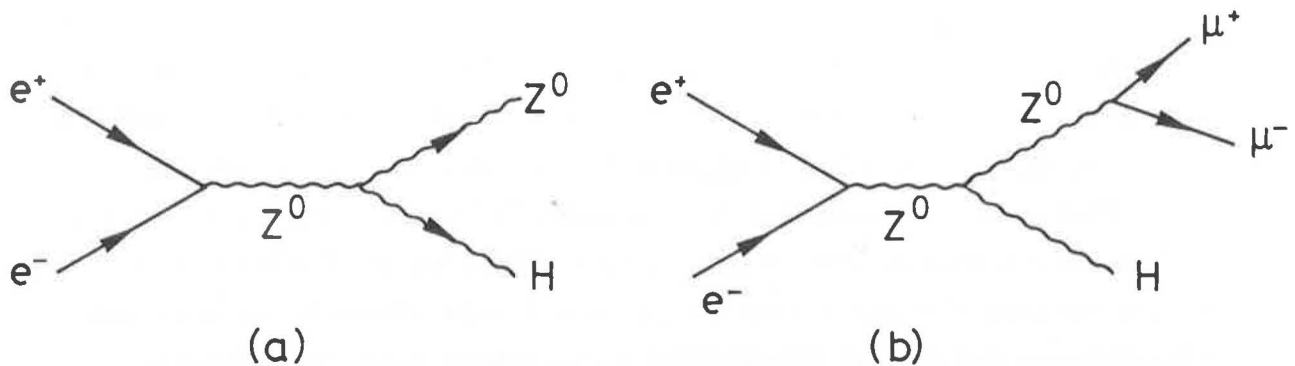


Figure 11 : Deux exemples de mécanismes de production du boson de Higgs à LEP.

DEUX CRITIQUES

Nous avons jusqu'ici raisonné comme si nous étions certains de la validité des théories nouvelles. C'est là une attitude ni bien aventurière ni bien scientifique. Si ces théories étaient erronées, LEP resterait-il justifié ? Et quand même ces théories seraient valables, n'existe-t-il pas des moyens moins onéreux de les vérifier ?

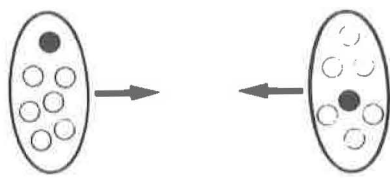
Répondre à la première critique est aisé : on peut imaginer de nombreuses variantes de la théorie, toujours au prix d'une plus grande complexité. Dans tous les cas des phénomènes nouveaux, associés à des variations spectaculaires des taux de production, apparaissent quand

l'énergie totale approche la centaine de GeV. Ceci est lié à la connaissance que nous avons de l'interaction faible à basse énergie et aux contraintes qu'elle nous permet de placer sur sa dépendance en énergie. Le courant faible neutre devient de plus en plus important au fur et à mesure que croît l'énergie totale et son comportement aux énergies où il atteint le niveau de l'interaction électromagnétique ne peut qu'être riche d'enseignements.

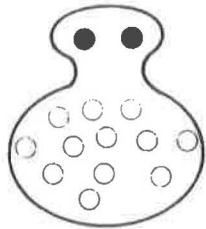
La seconde critique appelle une réponse plus nuancée.

On peut d'abord se demander si un accélérateur de protons, et en particulier un anneau de collisions proton-proton ou proton-antiproton ne serait pas un outil mieux adapté que LEP à l'étude de l'interaction faible : à coût égal, ou à taille égale, ces accélérateurs permettent d'atteindre des énergies nettement plus importantes. D'ailleurs on espère bien que le projet $p\bar{p}$ permettra de découvrir le Z^0 et peut être même le W au SPS avant que LEP soit construit. Mais de même que l'étude détaillée du J/ψ et de l' T , particules découvertes sur des machines à protons (BNL, FNAL), est conduite sur des anneaux e^+e^- (Spear, Doris, Cornell), il est raisonnable de penser que l'étude détaillée de l'interaction faible exigera l'existence de LEP. Il y a à cela plusieurs raisons que l'expérience des années précédentes a clairement mises en évidence. La production d'un Z^0 dans une collision proton-antiproton (Figure 12) se fait par fusion d'un quark du proton et d'un antiquark de l'antiproton. Les autres constituants des particules incidentes, quarks et gluons, sont accélérés en pure perte : simples spectateurs du processus de production, l'énergie qu'on leur a transmise est perdue. Pire, ces spectateurs sans intérêt interagissent à leur tour : les produits de leurs interactions compliquent l'interprétation de l'état final et risquent de cacher aux yeux de l'expérimentateur le phénomène intéressant.

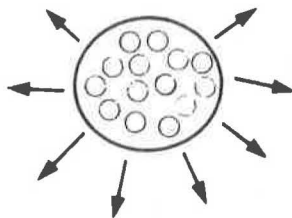
Autre avantage des collisions e^+e^- : leur attitude plus démocratique vis à vis des différents membres des familles de quarks qui sont produits avec des probabilités comparables. Au contraire les états finaux des collisions proton-proton et proton-antiproton sont essentiellement peuplés de quarks u et d qui sont largement majoritaires dans l'état initial.



(a)



(b)



(c)

hadrons

Figure 12 : Production d'un Z^0 dans une collision $p\bar{p}$. Seuls un quark et un antiquark (en noir) contribuent à sa formation. Les autres constituants des particules incidentes (quarks, antiquarks et gluons) agissent en spectateurs et les débris de leur interaction compliquent la structure de l'état final.

On peut enfin se demander quelle énergie maximale LEP doit être capable de fournir. S'il est clair que la région du Z^0 doit être généreusement couverte, n'est-il pas trop ambitieux de vouloir du même coup atteindre celle du W^+W^- ? Il serait sans doute dommage d'imposer un trop grand retard à l'étude du Z^0 sous ce prétexte. D'autre part il ne serait pas raisonnable de construire une machine plus grande que le SPS pour couvrir la région du Z^0 et devoir en construire une autre, encore plus grande, quelques années plus tard pour atteindre le seuil W^+W^- . Le projet LEP tel qu'il est présenté dans le "livre rose" répond à ces inquiétudes de façon très satisfaisante en envisageant une construction étagée sur plusieurs phases.

CONCLUSIONS

Laboratoire particulièrement bien adapté à l'étude de l'interaction faible, LEP devrait nous permettre de répondre à un grand nombre de questions pressantes que nous posent les théories nouvelles.

Même si ces théories s'avéraient erronées LEP resterait l'outil idéal d'étude des courants neutres tant par le domaine d'énergie qu'il permet d'explorer que par la richesse d'information caractéristique des anneaux e^+e^- .

Il s'insère de façon logique dans le programme de mise en chantier d'une nouvelle génération d'accélérateurs puisque l'Union Soviétique avec UNK et les Etats Unis avec Isabelle et le Doubler ont choisi la voie protons.

Il s'inscrit naturellement dans la ligne de recherche du CERN qui, ayant découvert l'existence du courant faible neutre, se doit d'en poursuivre l'étude jusqu'à en comprendre la nature exacte.

W. Schnell

Introduction

Les travaux sur le LEP ont commencé au début de 1976 avec la formation de deux groupes d'étude chargés d'examiner les possibilités pour la recherche et la faisabilité d'une grande machine à collisions électron-positron, de taille supérieure à tout ce qui avait été imaginé jusqu'à maintenant. Un premier rapport avait déjà été publié en 1976 par le groupe qui étudiait l'intérêt de cette réalisation pour la physique (1). Il en est rapidement résulté un large enthousiasme et un consensus général en faveur de la construction d'un accélérateur de ce type, comme prochain projet majeur pour la physique européenne des hautes énergies.

A la différence de nombreux autres accélérateurs, la conception du LEP se base sur une spécification physique précise. La machine doit dépasser certains seuils d'énergie au cours d'étapes successives et en particulier les seuils de production de trois particules de masse très élevée, encore hypothétiques, qui sont supposées médialiser l'interaction faible. Il s'agit de la particule neutre Z^0 et de la paire de particules chargées W . Cette production doit s'effectuer par l'intermédiaire de collisions électron-positon, car cela représente la seule réaction réalisable qui soit suffisamment propre pour permettre une étude détaillée des nouveaux événements prévus à ces énergies.

Contrairement aux protons, les électrons et les positons perdent de l'énergie par rayonnement lorsqu'ils circulent dans un anneau de stockage. La perte d'énergie par tour est proportionnelle à la puissance quatre de l'énergie de la particule et inversement proportionnelle au rayon de courbure. C'est ce fait qui impose deux des caractéristiques les plus importantes du LEP, savoir:

- une très grande taille, exigée pour obtenir une courbure modérée de la trajectoire des particules autour de l'anneau (mais, en conséquence, le champ magnétique est faible de sorte que les aimants sont assez peu coûteux à fabriquer), et
- un système haute fréquence extrêmement développé et puissant, qui est requis pour la compensation de la perte d'énergie des particules au cours d'une révolution.

Lors de notre première étude technique, nous avons prévu un anneau de 50 km de circonférence, car cette valeur est approximativement optimale en vue de l'obtention d'une énergie de 100 GeV par faisceau, avec emploi d'un système HF entièrement classique. Un premier rapport a été publié en 1977 (2), mais plusieurs problèmes fondamentaux de dynamique du faisceau et de technologie restaient non résolus; de plus, le coût était considéré comme prohibitif.

Toutefois, l'expérience que nous avons ainsi acquise fut mise à profit lors de l'étude d'un nouvel anneau prévu avec de plus petites dimensions (circonférence de 22 km) afin d'établir une base pour un projet réaliste, et nos efforts ont été certainement couronnés de succès. Un rapport détaillé (3), bientôt appelé le "Livre Bleu", fut publié en août 1978. Il montra qu'une telle machine était entièrement réalisable. Cette étude technique ainsi que tous nos travaux ultérieurs ont fait l'objet de discussions approfondies dans la communauté de la physique, surtout dans le cadre de l'ECFA, le Comité européen sur les futurs accélérateurs. Un important groupe de travail ECFA-LEP a effectivement examiné les détails de la conception de la machine ainsi que tous les aspects de l'expérimentation physique. La critique essentielle sur l'étude technique exposée dans le "Livre Bleu" tenait au fait que, compte tenu de sa circonférence relativement "petite", cette machine serait incapable d'atteindre le seuil d'énergie pour la production d'une paire de particules W en employant des cavités HF classiques, et qu'il faudrait donc attendre le développement de cavités supraconductrices pour être en mesure de franchir ce seuil.

En conséquence, des travaux ont été immédiatement lancés pour l'étude d'un anneau de 30 km de circonférence, dont la conception devait incorporer un certain nombre d'améliorations essentielles intervenues entre temps. Un nouveau rapport technique (4), le "Livre Rose", fut publié en août dernier. C'est cette conception, que je me propose de décrire maintenant, qui bénéficie actuellement d'une approbation universelle -- dans les propositions officielles présentées par le Comité des Directives scientifiques et par l'ECFA au Conseil du CERN -- en tant que base pour le prochain projet majeur du CERN.

Principaux paramètres

Nous proposons de construire le LEP en plusieurs étapes, comme le montre le Tableau 1.

Tableau 1: Etapes énergétiques

Etape	1/6	1/3	1	4/3	2	
Energie nominale	49,4	62,3	86,11 ^{*)}	92,86 ^{*)}	130	GeV
Luminosité	0,385	0,616	1,07	1,15	$1,04 \times 10^{32}$	$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
Intensité	5,71	7,20	9,15	9,15	6,16	mA
Puissance HF	16	32	96	128	96	mW
Longueur des cavités	272	543	1629	2172	1629	m
	Cavités en Cu			Cavités supraconductrices		
Coût estimé	1064		1275			MSF

*) On étudie la possibilité d'une augmentation de 2 à 3 GeV.

Le premier objectif essentiel, correspondant à l'étape 1, prévoyait d'atteindre 85 GeV par faisceau (l'énergie dans le centre de masse est le double de cette valeur) avec des cavités HF en cuivre et une luminosité de $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. La luminosité est proportionnelle aux taux de collision et par conséquent elle fixe l'échelle pour la fréquence d'apparition d'un processus donné, par exemple la production d'une paire de W. Ainsi, l'inverse de la luminosité détermine le temps exigé pour la réalisation d'une certaine expérience, qu'elle dure des semaines, des mois ou des années.

Il s'est avéré que l'énergie maximale atteignait 86 GeV par faisceau, et nous espérons pouvoir encore gagner 2 à 3 GeV grâce à des améliorations de l'optique de faisceau en cours d'étude. Avec des cavités en cuivre, l'énergie maximale est limitée par la dissipation de puissance dans les cavités. La configuration prévue pour l'étape 1 contient suffisamment d'espace en réserve pour qu'il soit possible de porter l'énergie à au moins 93 GeV (cette possibilité est appelée étape 4/3) simplement par installation de cavités HF et de sources d'alimentation HF supplémentaires, mais la dépense additionnelle et l'augmentation de la puissance consommée seraient considérables.

Toutefois, nous avons de bonnes raisons d'espérer que finalement les pertes de puissance dans les cavités HF pourront être très fortement réduites par emploi de cavités HF supraconductrices. Par conséquent, le système magnétique, l'installation de vide et d'autres éléments vitaux du LEP sont conçus dès le départ de manière à permettre d'atteindre des énergies allant jusqu'à 130 GeV dès que des cavités supraconductrices HF présentant des caractéristiques d'exploitation satisfaisantes deviendront disponibles. Il est évident que pour cette étape finale, que nous appellerons étape 2, on ne doit pas prendre trop de risques et l'on ne doit pas tenter de construire la totalité de la longueur -- environ 2 km -- de la structure supraconductrice avant que la technologie correspondante soit au point. Cela n'est pas le cas actuellement, mais elle apparaît prometteuse à long terme.

Vers la fin de la période de construction, la recherche pourra déjà commencer avec seulement une fraction du système HF installée, et la symétrie suggère qu'à cette fin on pourrait utiliser un sixième ou un tiers du système HF prévu pour l'étape 1. Nous avons procédé à une estimation de coût pour l'étape 1/3, mais l'étape 1/6 est tout aussi intéressante. L'énergie atteinte lors de cette étape est suffisante pour des recherches dans la région correspondant à la production Z^0 , et cela d'autant mieux que la plage d'énergies utile pour cette étape pourra être étendue jusqu'à environ 55 GeV, avec une luminosité quelque peu réduite.

La liste des principaux paramètres est présentée dans le Tableau 2. Le LEP comprend un seul anneau de stockage de 30 km de circonférence dans lequel les électrons et les positons, du fait de leurs charges opposées, circulent dans des directions elles-mêmes opposées. L'intensité moyenne par faisceau en circulation reste assez faible, environ 10 mA, afin de maintenir la puissance HF et les dimensions de l'injecteur dans des limites raisonnables. Toutefois, le faisceau est comprimé en seulement quatre paquets entrant en collision de manière précise en huit points d'interaction au niveau desquels s'effectueront les recherches. Etant donné que les paquets ont seulement 10 cm de long et que leurs distances mutuelles sont d'environ 8 km, il s'ensuit que l'intensité maximale du faisceau dans un paquet est de l'ordre de 1000 A. Le champ dans les aimants de courbure est faible.

Quatre des huit régions d'interaction seront conçues pour la luminosité maximale; elles disposeront d'un espace libre de ± 5 m pour l'expérimentation. Les quatre autres régions disposeront d'un espace libre double du précédent, mais avec une luminosité réduite de moitié. Les dimensions transversales du faisceau au point de collision sont extrêmement faibles.

Tableau 2: le LEP à 86 GeV

Paramètres généraux

Circonférence de la machine	30,608	km
Nombre de points d'interaction	8	
Nombre de paquets par faisceau	4	
Intensité en circulation par faisceau	9,15	mA
Nombre d'onde bétatronique horizontal	70,32	
Nombre d'onde bétatronique vertical	74,54	
Temps d'amortissement transversal	12,8	ms
Durée de vie par Bremstrahlung faisceau-faisceau	8,18	h
Durée de vie globale de faisceau	5,79	h
Dispersion naturelle en énergie (vqm)	$1,2 \times 10^{-3}$	

Paramètres de la cellule régulière

Longueur d'une cellule régulière	79	m
Champ de courbure	0,081	t
Rayon de courbure	3,545	km
Avance de phase horizontale ou verticale	60°	
Ouverture horizontale dans une cellule normale	± 59	mm
Ouverture verticale dans une cellule normale	± 33	mm

Paramètres d'une région d'interaction

Luminosité	$1,07 \times 10^{32}$	$0,53 \times 10^{32}$	$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
Fonction d'amplitude horizontale	1,6	3,2	m
Fonction d'amplitude verticale	0,1	0,2	m
Décalage maximum de l'accord faisceau-faisceau	0,06	0,06	
Espace libre autour du croisement	+5	+10	m
Dimension verticale du faisceau (vqm)	0,017	0,025	mm
Dimension horizontale du faisceau (vqm)	0,359	0,508	mm

Implantation et zones d'expérimentation

L'implantation proposée pour le LEP est présentée sur la figure 1. L'anneau et les zones d'expérimentation seront construits en souterrain et les constructions en surface se limiteront à quelques bâtiments à proximité immédiate des huit points d'accès. De cette manière, nous suivons l'exemple très remarquable du tunnel du SPS dont la présence est strictement non repérable en surface sur la majeure partie de sa circonférence.

L'anneau du LEP sera construit presque au contact de l'anneau du SPS, afin que plus tard, si cela est souhaité, on puisse réaliser soit des collisions électron-proton dans une dérivation du complexe du SPS, soit l'injection de protons dans le tunnel du LEP. Ce tunnel sera foré en sous-sol dans la molasse et le calcaire jurassien, en utilisant des foreuses analogues à celle qui a été employée pour la construction du SPS. Le tunnel aura la même largeur, soit 4 m (figure 2). Cette implantation pourra encore être modifiée, avec déplacement de quelques centaines de mètres, en fonction des forages de reconnaissance actuellement effectués afin de déterminer la profondeur exacte de la roche de molasse au-dessous de la surface.

Des lignes d'alimentation en énergie électrique (figure 3) et une source d'eau de refroidissement pour l'appoint, ayant simultanément des capacités suffisantes, sont déjà disponibles dans la zone du SPS. Contrairement à ce qui s'est passé pour cet accélérateur, pour lequel des tranchées pour câbles ont été tolérées, nous prévoyons une distribution d'énergie électrique et d'eau à l'intérieur du tunnel du LEP, de manière à éviter toute perturbation en surface entre les huit points d'accès.

Les zones d'expérimentation seront également souterraines. Un groupe de trois d'entre elles seront situées à une assez grande profondeur dans le Jura, et on y accèdera par des tunnels approximativement horizontaux. Des coupes des deux zones extérieures de ce groupe sont présentées sur la figure 4. Il s'agit d'enceintes souterraines dont la conception suit presque exactement celle de la zone LSS4, actuellement construite autour du SPS pour les expériences proton-antiproton. Chacune de ces zones pourra accueillir une grande expérience, dont les équipements pourront être retirés hors du faisceau chaque fois que cela sera exigé. Un tunnel de service séparé permet de maintenir libre le tunnel d'accès principal. Parmi les trois zones implantées sous le Jura, la zone centrale est située à la plus grande profondeur. Sa conception est analogue à celle des zones précédentes, mais un peu plus simple. Son emploi sera limité à la réalisation d'une expérience de taille plus modeste.

Trois zones implantées dans la molasse au-dessous du niveau du sol, présentent également une conception similaire, mais elles ont une longueur beaucoup plus importante dans la direction transversale par rapport au faisceau (figure 5), de manière à pouvoir abriter deux grandes expériences susceptibles d'être alternativement mises en service sur le faisceau, comme cela se réalise actuellement dans l'une des zones de PETRA. On accèdera à ces halls souterrains par l'intermédiaire de deux puits d'accès: un très grand puits de 9 m de diamètre et un autre plus petit.

Enfin, nous espérons pouvoir incliner le plan de l'anneau du LEP de manière à ramener deux zones expérimentales suffisamment près de la surface pour qu'elles puissent être excavées à ciel ouvert depuis leur sommet. Les fosses rectangulaires ainsi construites (figure 6), de $30 \times 70 \text{ m}^2$, pourront également abriter chacune deux grandes expériences.

La maille

La figure 7 (partie supérieure) présente la maille pour les arcs principaux, c'est-à-dire la suite régulière d'aimants de courbure, de quadrupôles de focalisation, de sextupôles pour la correction de la chromaticité (dépendance en énergie de la focalisation) et de correcteurs de l'orbite. Il s'agit d'une disposition classique pour une machine à fonctions séparées. La période de la maille pour un anneau aussi important que celui du LEP s'avère assez longue: 79 m. Cela est favorable, car il s'ensuit qu'une importante fraction de la circonférence peut être équipée d'aimants de courbure.

La partie inférieure de la figure 7 présente le passage vers la zone d'interaction qui abritera également le système HF. Dans cette région de transition, la dispersion du faisceau doit être supprimée, c'est-à-dire que des particules de différentes énergies présentes à l'intérieur du faisceau doivent être superposées sur la même orbite. Dans cette région, on utilise les mêmes modules d'aimants de courbure que dans la maille régulière.

Enfin, la figure 8 présente schématiquement la maille et les fonctions de la maille au voisinage du point de collision. Les courbes marquées $\sqrt{\beta}$ sont proportionnelles à la taille du faisceau. Elles montrent comment les faisceaux sont soumis à une très forte focalisation locale à proximité du point de collision.

La luminosité ne peut être optimisée qu'à l'intérieur d'une plage d'énergies limitée. Elle a été optimisée pour les énergies maximales (figure 9), lorsque la plus grande valeur accessible est exigée pour l'étude d'événements qui sont supposés se produire à ce niveau avec une très faible section efficace. Aux énergies inférieures, une chute de la luminosité est inévitable et un effort supplémentaire est requis (gonflement artificiel du faisceau par emploi d'aimants "wigglers" à champs alternés) afin de prévenir une chute encore plus rapide que celle qui est présentée sur la figure 9. Toutefois, cela est sans grande conséquence, étant donné que les sections efficaces des événements intéressants seront plus élevées aux plus basses énergies.

La limite absolue de la luminosité est conditionnée par un effet assez fondamental d'interaction électromagnétique entre les deux faisceaux

ayant une densité très élevée. Le champ électromagnétique d'un faisceau est assez fort; il varie extrêmement rapidement, de manière non linéaire, sur de courtes distances. Ce champ provoque des perturbations régulières sur les particules du faisceau opposé, et il peut les rejeter hors de l'orbite si l'effet devient trop intense. On a l'habitude de décrire cet effet compliqué sous la forme d'une modification de la fréquence d'oscillation transversale que l'un des faisceaux impose à l'autre. La limite empirique pour ce décalage de l'accord faisceau-faisceau, ΔQ , sur laquelle se base notre étude technique, est de 0,06.

Compte tenu de cette limite fondamentale, l'une des possibilités d'augmentation de la luminosité consisterait à accroître l'intensité du faisceau. Cela est réalisable, du fait que le champ électromagnétique de l'un des faisceaux augmente linéairement avec son intensité, alors que le taux de collision entre des faisceaux identiques augmente suivant le carré de leurs intensités. Toutefois, une augmentation de la densité du faisceau bien au-delà de la valeur 10 mA, que nous avons adoptée, entraînerait des exigences prohibitives en matière de puissance HF et de taille de l'injecteur.

Une autre possibilité consiste à faire passer les faisceaux par le point d'interaction sous une large dispersion angulaire de manière à réduire le rapport de la perturbation faisceau-faisceau inévitable, à la dispersion angulaire déjà présente auparavant. C'est précisément ce qui est réalisé par la forte focalisation locale, dans une section intermédiaire dite à faible valeur de β , comme on peut le constater sur le bord gauche de la figure 8. Dans cette même direction, on pourrait encore obtenir une légère amélioration en équipant cette section avec des quadripôles très minces, de sorte que les expériences pourraient tolérer leur installation sur une position encore plus rapprochée du point de collision que celle qui est actuellement prévue (distance nominale de ± 5 m par rapport à ce point).

Le système magnétique

Des aimants de courbure, de longueur totale d'environ 22 km, devront être fabriqués. Ces aimants auront un profil en C et ils seront construits en utilisant des tôles d'acier découpées avec précision (figure 10). Cette méthode de fabrication des aimants est classique, mais elle reste une excellente méthode pour la fabrication en série étant donnée qu'une matrice d'estampage permet de contrôler la précision de la configuration du champ pour un très grand nombre d'aimants. Toutefois le champ est très faible -- environ 1 kG -- et nous souhaitons en profiter pour introduire quelques conceptions non classiques pour la construction des aimants.

En premier lieu, les aimants ne seront pas excités par des bobines classiques, mais par une simple paire de barres conductrices refroidies par circulation d'eau, et réalisées en aluminium extrudé. Les barres seront isolées par une paire de coques à pinces, en matière plastique, également fabriquées par extrusion. Toutes les barres seront connectées en série, de manière à constituer un circuit à deux tours tout autour du LEP. Ces barres sont beaucoup moins coûteuses que les bobines habituelles à plusieurs spires, et elles permettent de monter bout à bout des blocs d'aimants de longueur appropriée, de manière à remplir les longues périodes de la maille sans perte d'espace.

En second lieu, le faible champ permet de réduire à moins d'un tiers le facteur de remplissage par l'acier, sans que cela conduise dans la région de saturation. A cette fin, des éléments d'écartement sont pressés sur les tôles par la matrice d'estampage, de sorte que ces tôles sont espacées de plus de trois intervalles sur un pas lorsqu'elles sont empilées sur un gabarit (figure 10, partie inférieure). Afin que de tels ensembles se transforment en une culasse d'aimant rigide, il faut introduire une charge de remplissage entre les tôles. Nous proposons d'entourer l'ensemble complet par un moule approprié et de le remplir avec du béton. Des tirants précontraints, noyés dans l'ensemble, assureront une compression incorporée d'environ 10 tonnes, de sorte que chaque culasse d'aimant formera un bloc de béton armé d'environ 6 m de long. Cette méthode conduit à une économie proche de 50% sur le coût estimé; le poids des aimants est réduit de moitié et la rigidité mécanique est améliorée d'environ un ordre de grandeur par rapport aux aimants habituels dans lesquels les tôles sont maintenues ensemble par des étriers soudés.

Nous avons d'abord construit trois modèles à échelle réduite et, jusqu'à maintenant, nous avons essayé un modèle en vraie grandeur avec des résultats très satisfaisants. Le béton -- qui devrait en fait être appelé un "mortier", compte tenu de l'absence évidente de granulats dans le mélange -- est formé de ciment, de sable de silice à fine granularité, d'eau et d'additifs pour la prévention du retrait. Afin que le mortier puisse pénétrer entre les tôles, l'ensemble est vibré au cours de la coulée. L'eau en excès s'élimine très rapidement par ségrégation et elle est évacuée par pompage, en particulier à partir de la zone interne du moule. Nous nous proposons de poursuivre ces travaux sur modèles jusqu'à ce que nous ayons essayé la moitié d'une période de la maille contenant six aimants de courbure. Au cours de la construction du LEP, il faudra fabriquer environ cinq aimants chaque jour.

Les quadrupôles et les sextupôles doivent présenter des champs magnétiques élevés, et de ce fait ils doivent posséder des culasses en acier classiques. Toutefois, nous envisageons de réaliser des économies en fabriquant les bobines d'excitation à partir de feuillards d'aluminium anodisés, comportant des conduites de refroidissement collées sur leur surface extérieure. Au total, 1400 quadrupôles et sextupôles équiperont la maille.

Les quadrupôles installés sur les sections intermédiaires, à proximité immédiate de chaque point de collision, doivent posséder simultanément une force magnétique considérable et une grande ouverture. Ils peuvent être fabriqués en cuivre et en acier, mais il est préférable d'utiliser des aimants supraconducteurs. La figure 11 présente un modèle basé sur les quadrupôles supraconducteurs, qui ont été essayés avec succès et qui sont actuellement en cours de fabrication pour une zone d'interaction des ISR.

L'installation de vide

La conception de l'enceinte à vide de la maille principale, dont la longueur totale requise atteindra environ 26 km, est conditionnée par la dureté et l'intensité du rayonnement synchrotronique qu'elle devra absorber. La puissance rayonnée par mètre est de 1,2 kW à 86 GeV, et elle atteint 4,3 kW à 130 GeV.

La figure 12 montre une coupe de l'enceinte à l'intérieur des aimants de courbure. Cette enceinte est réalisée en aluminium extrudé. Elle est refroidie par circulation d'eau et elle est équipée d'un système linéaire et réparti de pompes ioniques immergées dans le champ des aimants principaux. Il s'agit là de la conception standard, initialement mise en oeuvre pour l'anneau de stockage SPEAR et ultérieurement améliorée pour PETRA. Dans le cas qui nous intéresse, l'effet Compton diffusera environ la moitié de la puissance de rayonnement autour du périmètre de la section de l'enceinte. Cet effet nous contraint à introduire deux canaux de refroidissement supplémentaires qui s'ajoutent à celui qui est installé à l'endroit de la première incidence. Un blindage en plomb épais, collé sur l'enceinte, empêchera toute pénétration du rayonnement dans l'air du tunnel dans lequel il amorcerait des réactions chimiques affectant l'air et l'humidité qu'il contient. La chambre avec son blindage pré-installé sera fabriquée et mise en place par sections de 12 m de long, pesant chacune environ 600 kg.

Il est exigé environ 22 km de pompes ioniques réparties. Leurs anodes seront fabriquées selon une nouvelle technique, par superposition de couches formées de bandes minces en acier inoxydable pouvant être découpées en continu, et suffisamment minces pour éviter tout réchauffement excessif par le rayonnement diffusé. Les cellules des pompes ont de grandes dimensions inhabituelles, afin de garantir l'allumage des pompes en présence du faible champ à l'injection. Un modèle a été construit et essayé avec succès.

L'injecteur

Le canal d'injection (figure 13) comprend d'abord un accélérateur linéaire d'électrons qui est suivi par une cible de conversion. On trouve ensuite un autre accélérateur linéaire et un anneau d'accumulation pour les positons. L'injecteur principal est un synchrotron ayant une énergie maximale de 22 GeV et une circonférence de 1,7 km. Sa fréquence de cyclage est relativement modérée: une impulsion toutes les 2,5 s. Le choix de l'énergie d'injection est surtout déterminé par des problèmes de charge d'espace dans l'anneau principal du LEP. Compte tenu de l'intensité de faisceau que nous avons choisie, nous avons adopté une énergie à l'injection aussi faible qu'il nous a semblé possible. Une augmentation de l'énergie d'injection entraînerait une très rapide augmentation des dimensions et du coût de l'injecteur.

Tout comme l'anneau principal, le synchrotron injecteur contiendra quatre paquets, mais ils auront une intensité beaucoup plus réduite, de sorte qu'il faudra environ 10 minutes d'accélération répétitive des positons et 2 minutes d'accélération des électrons pour remplir le LEP à son intensité nominale.

Nous prévoyons de construire l'injecteur du LEP au-dessous de l'actuel site des ISR (figure 14), en utilisant l'infrastructure existante. Nous envisageons également de construire le système magnétique du synchrotron et une importante fraction de son installation de vide en employant des éléments des ISR. En fait, tous les aimants des ISR équipant les deux anneaux actuels seront utilisés pour la maille à fonctions combinées du synchrotron injecteur (figure 15). L'installation HF sera réalisée à partir des mêmes modules que ceux du système HF de l'anneau principal.

Le système haute fréquence

Le Tableau 3 présente une liste des paramètres du système HF pour l'étape 1. Ce système doit compenser une perte d'énergie d'environ 1,4 GeV par tour, due au rayonnement synchrotronique. Si l'on multiplie cette valeur par la somme des deux intensités moyennes des faisceaux, on obtient une perte de puissance de 25 MW due au rayonnement synchrotronique des deux faisceaux. Afin de compenser en outre les pertes électromagnétiques inévitables (110 MeV par tour) et d'assurer une surtension pour une durée de vie suffisante malgré l'émission quantique, il sera exigé une tension HF de crête proche de 2 GV. Cela est fondamentalement équivalent à la tension requise pour un accélérateur linéaire d'assez grandes dimensions.

La structure HF utilisée aura une longueur d'environ 2 km et cela correspond à un optimum économique approximatif. Une structure plus courte coûterait moins par elle-même, mais elle exigerait des dépenses supplémentaires sur les alimentations ainsi que pour l'exploitation, et inversement. La longueur totale de la structure sera divisée en 16 postes identiques, installés à raison d'un poste de part et d'autre de chaque région d'interaction. La figure 16 montre l'implantation d'un tel poste équipé, pour l'étape 1, de 48 cavités à cinq cellules et de six amplificateurs à klystrons de puissance d'un mégawatt. On présente également la localisation d'un système harmonique HF qui sera ajouté afin de permettre le contrôle de la longueur des paquets et de l'accord du nombre d'oscillations synchroniques Q_s . Au début, on équipera seulement la moitié des postes (avec un tiers et deux tiers de leur équipement HF nominal, respectivement pour les étapes 1/6 et 1/3).

La figure 17 présente la disposition des amplificateurs de puissance HF dans des sections du tunnel séparées qui partent d'une zone d'interaction et qui s'étendent parallèlement au tunnel principal, sur une certaine distance.

La structure accélératrice elle-même (figure 18) sera réalisée en cuivre; elle sera conforme aux principes de conception et aux méthodes de construction déjà éprouvés. Toutefois, la cavité de stockage sphérique présentée à la partie supérieure de la figure constitue une nouveauté. Cette cavité est excitée selon un mode (mode H, évitant tout champ électrique perpendiculaire aux parois), qui permet le stockage d'énergie avec de faibles pertes. En excitant les deux fréquences de résonance du système couplé, on peut provoquer des oscillations de l'énergie stockée entre les deux cavités, en passant en moyenne la moitié du temps dans l'environnement à faibles pertes, tout en générant le champ accélérateur maximal lors du passage des paquets. En pratique, cette méthode entraîne une économie d'un facteur 1,5 sur la dissipation d'énergie dans les parois de la cavité, pour une tension HF donnée. La figure 19 présente la modulation calculée des tensions dans les cavités ainsi que la tension en dents de scie superposée qui est due à la charge par le faisceau.

Nous avons essayé la méthode de la cavité de stockage à faible puissance (en employant une cavité de PETRA à 500 MHz que DESY nous a obligeamment prêtée). Nous avons de plus construit et essayé un modèle à l'échelle 1/2 de la cavité sphérique réelle. Des essais à puissance élevée sont en cours de préparation.

Tableau 3: Principaux paramètres du système HF, étape 1

Energie nominale	E	86,1	GeV
Luminosité nominale	L	$1,07 \times 10^{32}$	$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
Perte d'énergie par rayonnement synchrotronique, par tour	U_0	1370	MeV
Perte d'énergie parasite, par tour	U_{hm}	110	MeV
Tension HF de crête, par tour	V_{HF}	1949	MV
Angle de phase stable, (depuis le passage par zéro)	ϕ_s	130,6	degrés
Fréquence	f_{HF}	353,4	MHz
Nombre d'oscillations synchrotroniques par tour	Q_s	0,158	
Longueur de la structure HF active	L_c	1628,8	m
Impédance shunt par unité de longueur	Z	40,0	$\text{M}\Omega \cdot \text{m}^{-1}$
Dissipation et réflexion de la cavité pour le mode fondamental	P_d	61,7	MW
Puissance synchrotronique (deux faisceaux)	P_b	25,1	MW
Pertes dans le guide d'ondes		7,2	MW
Pertes dans le mode parasite (deux faisceaux)	P_{hm}	2,0	MW
Nombre de postes HF		16	
Nombre total de klystrons		96	
Nombre total de cavités à cinq cellules (chacune étant couplée à une cavité de stockage)		768	

Puissance consommée et améliorations en cours d'étude

La conception que j'ai décrite jusqu'à maintenant, bien qu'elle mette en oeuvre un certain nombre d'idées nouvelles, est basée sur la technologie actuelle. La figure 20 présente la consommation de puissance électrique estimée en fonction de l'énergie. Elle correspond à environ 90 MW pour l'étape 1/6 (en supposant qu'à cette étape on réalisera déjà le nombre maximum d'expériences de physique). Elle s'élèvera jusqu'à environ 250 MW pour les valeurs nominales de l'étape 1. Environ 60% de cette dernière puissance sont consommés par le système HF principal, en supposant que le rendement de conversion CC-HF est de 70%, comme cela a été démontré à l'aide d'un klystron de PETRA exploité à une tension un peu plus élevée.

Des travaux de développement sont actuellement en cours; ils visent à augmenter ce rendement de conversion, soit par emploi de klystrons, soit en utilisant d'autres sources de puissance HF telle que des tétrodes ou des gyrocons. Si ce rendement était porté de 70% à 80%, ce qui semble possible, il en résulterait une économie de 19 MW pour l'énergie de crête de l'étape 1.

Même après achèvement de l'étape 1, le LEP ne sera pas toujours exploité à l'énergie maximale. Dans le cas d'une exploitation à énergie réduite, et bien que la consommation de puissance décroisse suivant une forte pente, cette diminution n'est cependant pas aussi rapide qu'elle devrait l'être idéalement, car le rendement des sources de puissance HF disponibles chute assez rapidement lorsqu'elles sont exploitées à puissance réduite. Dans ces conditions, pour l'exploitation aux plus basses énergies, il semble ainsi intéressant de travailler avec une partie du système HF hors service. Toutefois, on a bon espoir que cette situation pourra être améliorée, ce qui conduirait à des économies supplémentaires aux plus basses énergies.

Des propositions plus ambitieuses visent à réduire la dissipation de puissance par emploi d'un taux de modulation plus élevé à la fréquence de répétition des paquets, au-delà de ce qui est déjà réalisé à l'aide du système à cavité de stockage schématisé sur les figures 18 et 19, afin de diminuer la dissipation inutile aux instants où aucun faisceau n'est présent dans les cavités. L'une des possibilités consiste à ajouter un commutateur HF à semiconducteur ou coupleur qui connecte les deux cavités, de manière à maintenir l'énergie stockée dans la cavité à faibles pertes pendant une plus importante fraction du temps. La difficulté essentielle tient à la charge importante sur le commutateur (supérieure à 1 MVA). Aucun commutateur approprié n'est encore disponible, mais nous avons lancé des travaux de développement sur cette question, en cherchant à atteindre une réduction éventuelle d'un nouveau facteur d'environ 1,5 pour la dissipation dans les cavités.

Les cavités HF supraconductrices, étape 2

La réduction la plus importante de la puissance appelée pourrait être finalement obtenue par emploi de cavités HF supraconductrices. De cette manière, la dissipation dans les cavités peut être réduite jusqu'à un facteur proche de 10^{-5} , mais les réfrigérateurs d'hélium exigeront un apport de puissance important qui ne saurait être négligé. Toutefois, on pourrait obtenir une économie estimée de 90 MW sur la consommation totale de puissance à 90 GeV, c'est-à-dire une réduction de 250 MW à 160 MW, si une structure supraconductrice HF appropriée était déjà disponible pour l'étape 1.

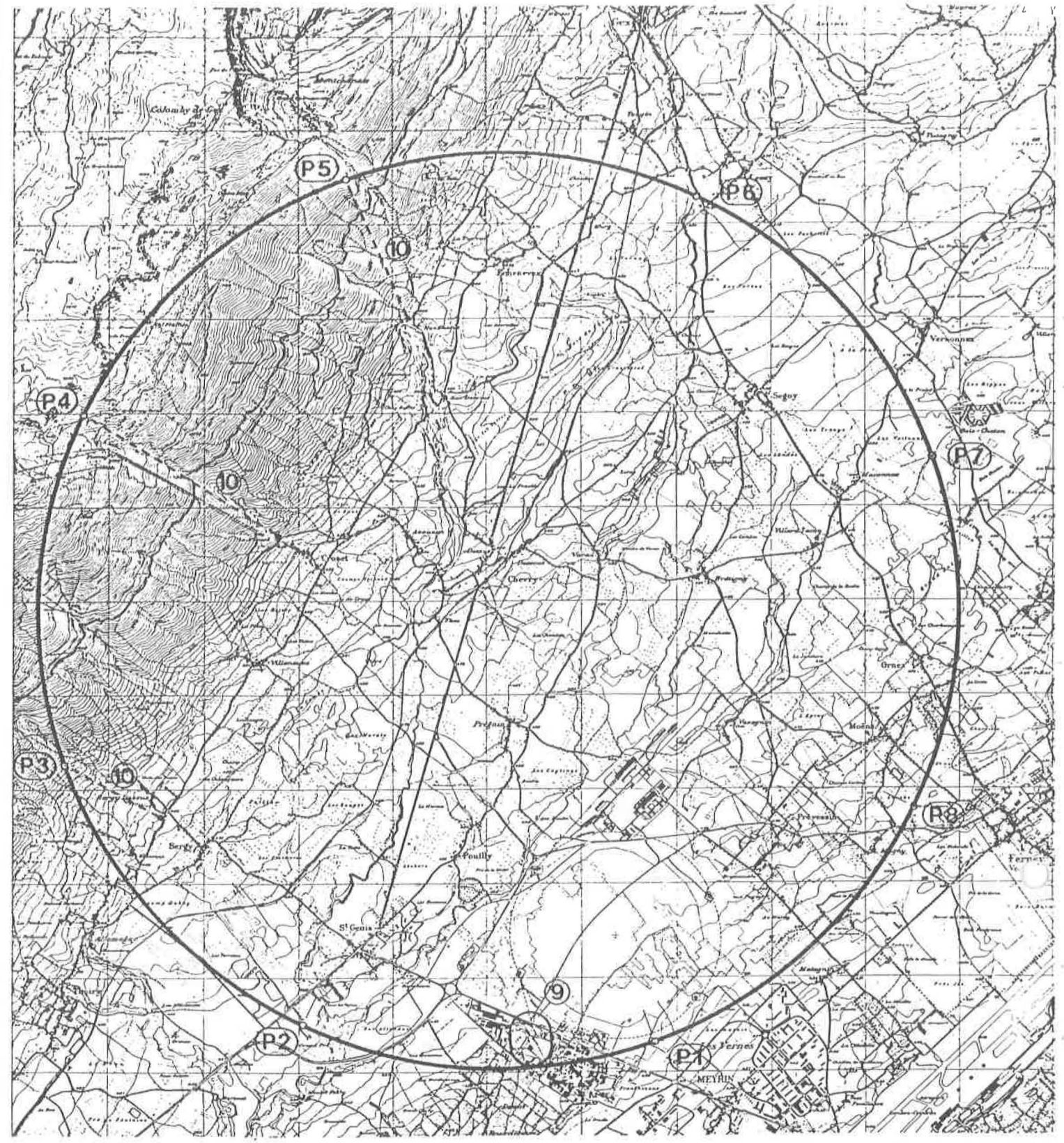
Afin d'augmenter l'énergie jusqu'au niveau final prévu pour l'étape 2, soit 130 GeV, une structure supraconductrice capable de fournir un champ accélérateur de 5 MV/m sera requise (figure 21). Avec des cavités supraconductrices, pratiquement toute la puissance HF installée, égale à 96 MW, peut être convertie en puissance pour le faisceau, et le LEP a été conçu pour assurer une luminosité de $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ à 130 GeV sous ces conditions. Toutefois, la consommation totale de puissance pour cette énergie maximale sera supérieure à la consommation dans l'étape 1, du fait que le système de réfrigération devrait consommer lui-même 50 MW, selon les estimations, et du fait de l'augmentation de la puissance des aimants.

Actuellement, aucune cavité supraconductrice convenant pour le LEP n'est encore disponible. L'exigence concernant un champ accélérateur de 5 MV/m à 130 GeV est présentée en perspective sur la figure 22, qui indique les champs accélérateurs les plus élevés qui ont été obtenus jusqu'à maintenant dans des modèles de laboratoire à différentes fréquences.

Des travaux de développement très poussés sont actuellement en cours dans plusieurs laboratoires européens. L'un des centres pour ces travaux se situe au Kernforschungszentrum de Karlsruhe dans lequel on prépare deux cavités d'essai monocellule à 500 MHz (figure 23) pour des expériences sur le faisceau de l'anneau de stockage DORIS à Hambourg. Les cavités étudiées dans ce centre ont une section rectangulaire. Cela correspond à l'une des deux idées récentes concernant les modalités de suppression de l'avalanche, qui est un effet de multiplication résonnante des électrons et qui représente l'une des nombreuses difficultés devant être surmontées. Ces cavités sont également équipées de coupleurs d'un nouveau modèle à l'aide desquels la puissance en entrée doit être couplée au faisceau, alors que la puissance induite par le faisceau sera extraite à des fréquences plus élevées. Ce sont là deux autres exemples des difficultés qui doivent être résolues. Jusqu'à maintenant, on a atteint un champ accélérateur de 3,7 MV/m dans le laboratoire, et des essais avec le faisceau commenceront au début de l'année prochaine.

Un autre centre d'activité est actuellement en cours de formation au CERN, en collaboration avec l'université de Wuppertal. Nous avons commencé en lançant une étude systématique de la technologie des surfaces, en utilisant l'expérience acquise et l'équipement spécial disponible pour des travaux d'ultravide aux ISR. En second lieu, nous souhaitons essayer des cavités ayant une forme différente, avec une section semi-circulaire, comme le montre la figure 24, car cette solution correspond à une autre idée plus récente sur les possibilités d'élimination de l'effet d'avalanche. Une cavité à 500 MHz ayant cette forme est en cours de construction et les essais en laboratoire commenceront sous peu.

Il est clair que ces travaux se situent encore au niveau des études de faisabilité, alors que la production en série, fiable et économique, de structures multicellulaires n'est pas encore en vue. Toutefois, le rythme actuel des progrès est encourageant et le LEP, sous la forme que j'ai décrite, est conçu de telle sorte qu'une conversion progressive vers l'emploi de cavités supraconductrices HF reste possible au cours de l'une quelconque des étapes, et cela dès que la nouvelle technologie le permettra.



- P 1, 7, 8** UNDERGROUND EXPERIMENTAL HALLS
- P, 2, 6** SURFACE EXPERIMENTAL HALLS
- P 3, 4, 5** DEEP UNDERGROUND EXPERIMENTAL HALLS
- 9** INJECTOR SYNCHROTRON
- 10** ACCESS TUNNELS TO THE DEEP UNDERGROUND EXPERIMENTAL HALLS

Fig. 1. Disposition générale

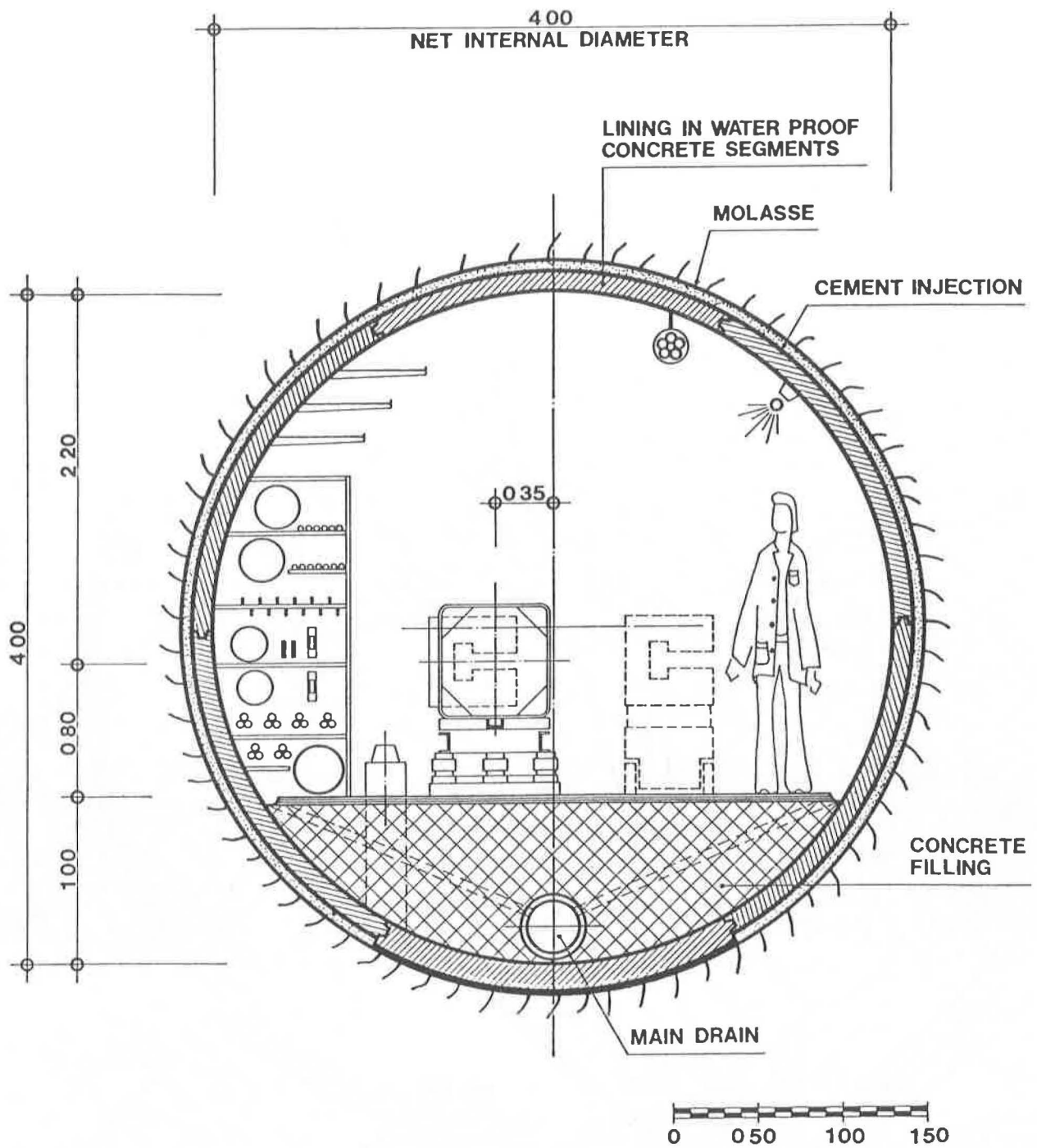


Fig. 2. Coupe du tunnel principal



Fig. 3. Distribution d'énergie électrique dans le tunnel principal

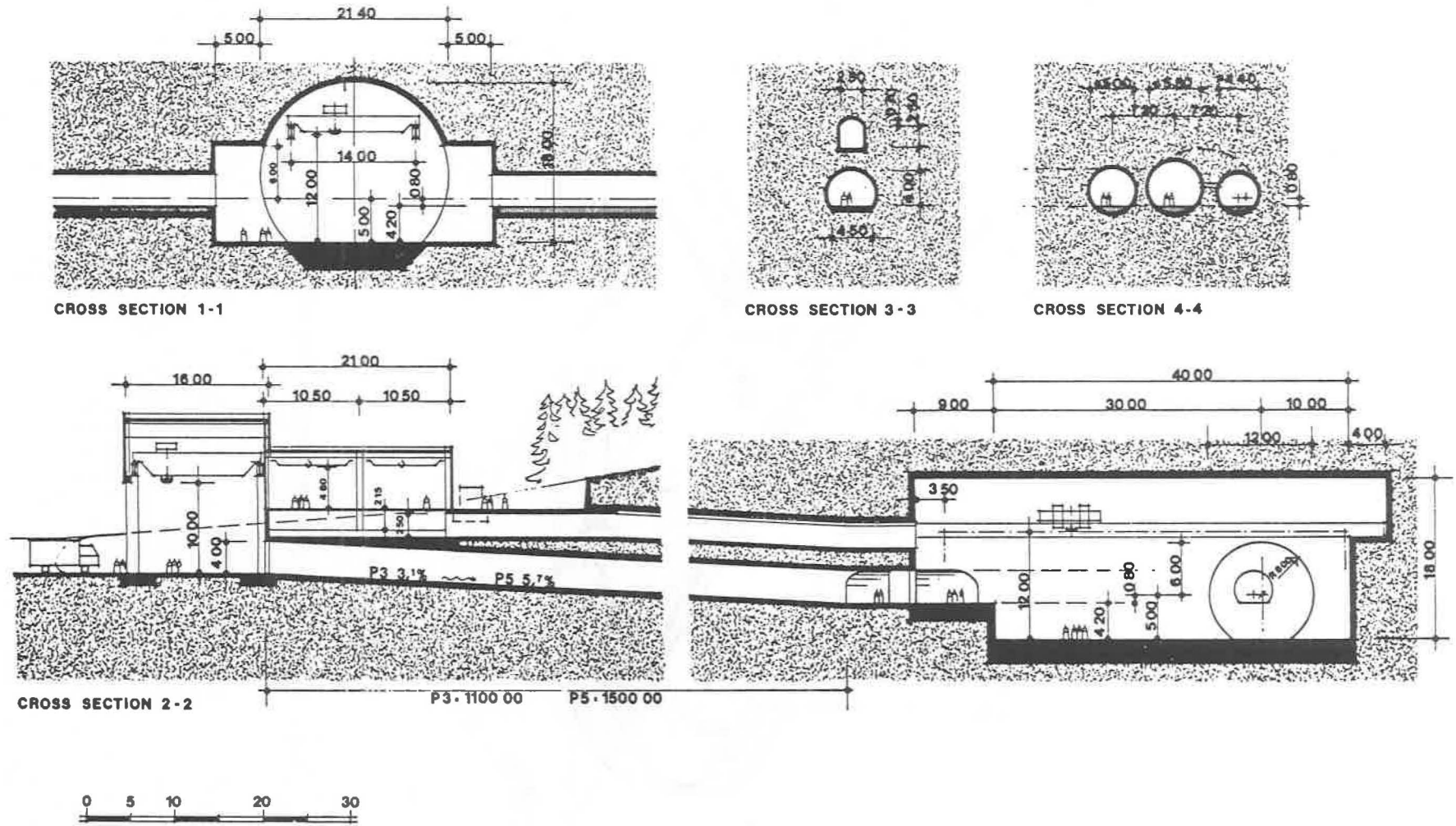


Fig. 4. Halls d'expérimentation profondément enterrés

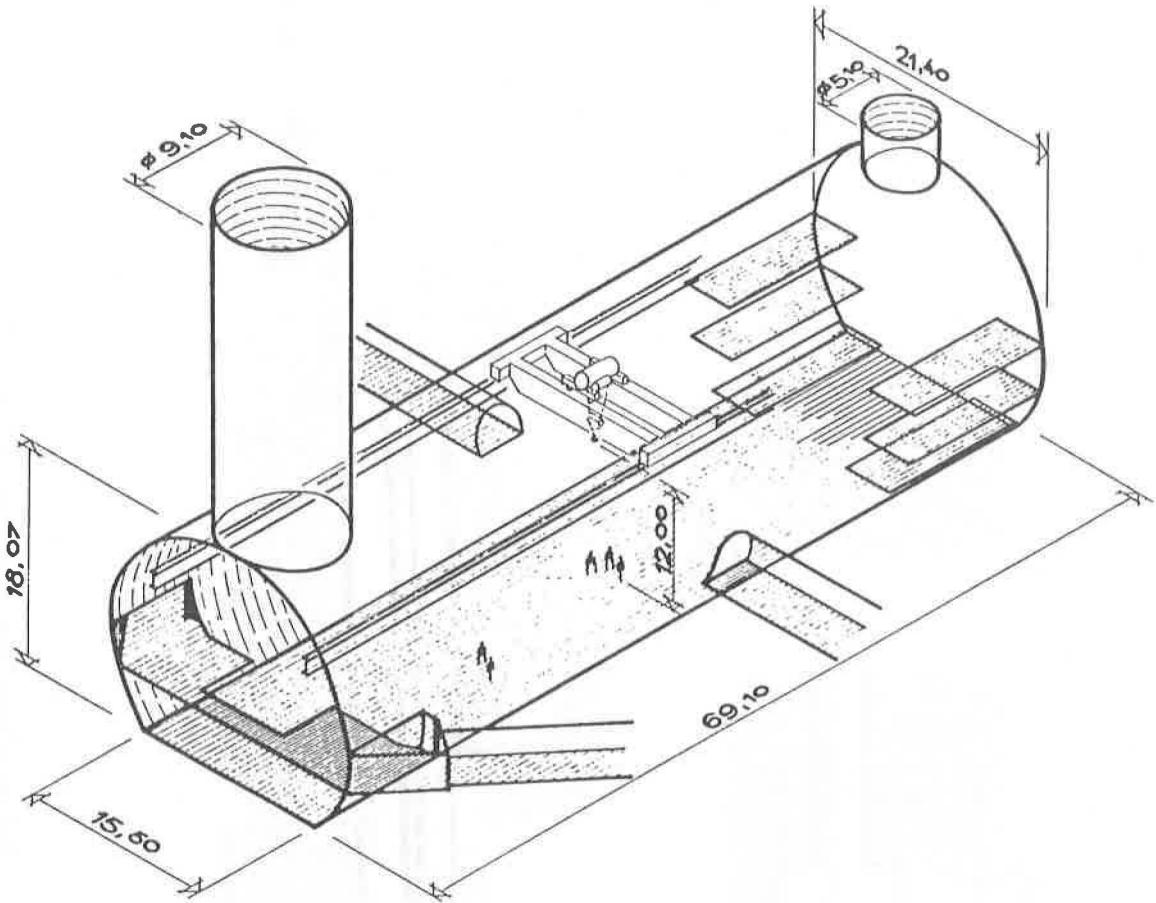
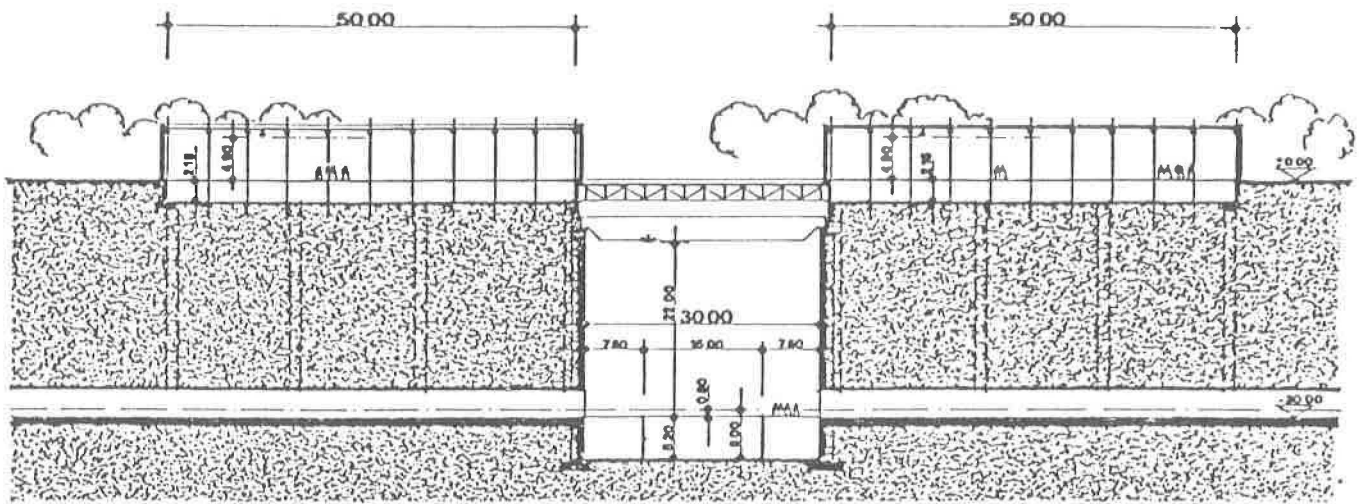
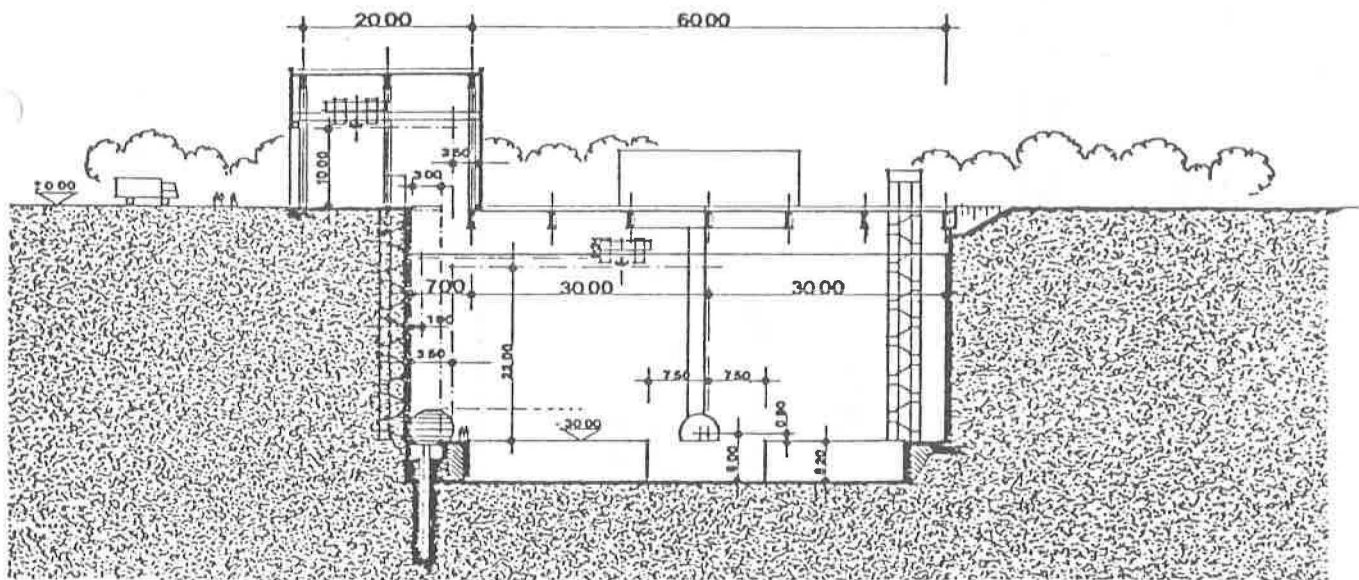


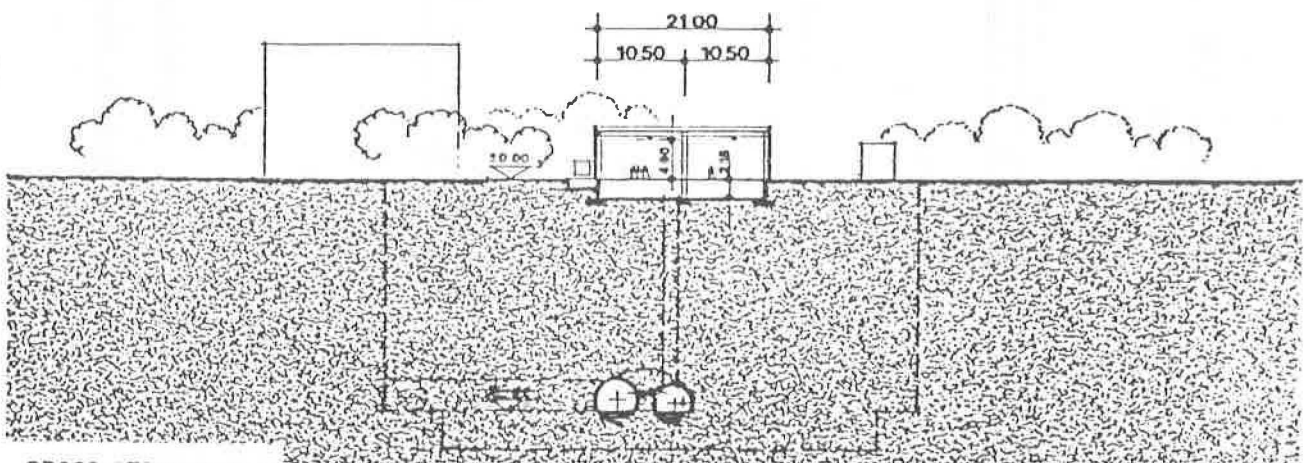
Fig. 5. Halls d'expérimentation souterrains



CROSS SECTION 1-1



CROSS SECTION 2-2

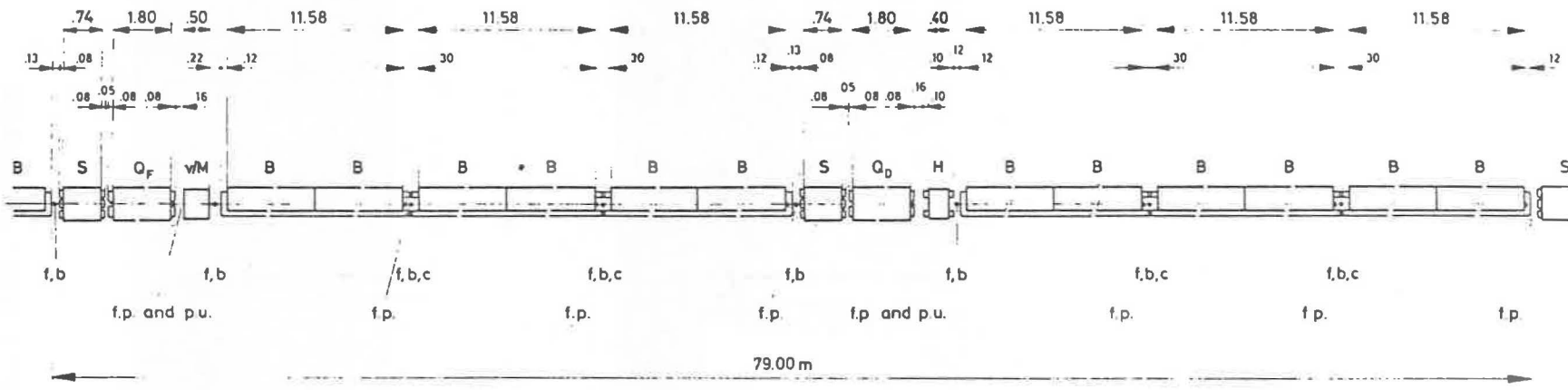


CROSS SECTION 3-3

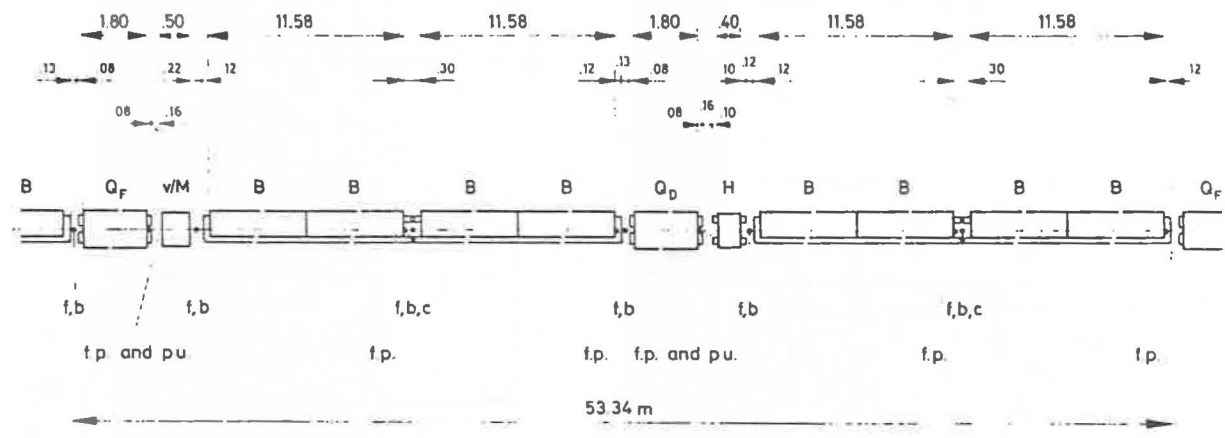


Fig. 6. Hall d'expérimentation construit après excavation depuis la surface

79/133/5/F



STANDARD CELL



DISPERSION SUPPRESSOR CELL

- B - bending magnet
- Q_F, Q_D - quadrupoles
- S - sextupole
- H - horizontal-field dipole
- M - multipole
- f - flange
- b - bellows
- c - connections
- f.p - fixed point
- p.u. - pick-up
- v - valve

Fig. 7. Période régulière de la maille et période dispersion-suppresseur

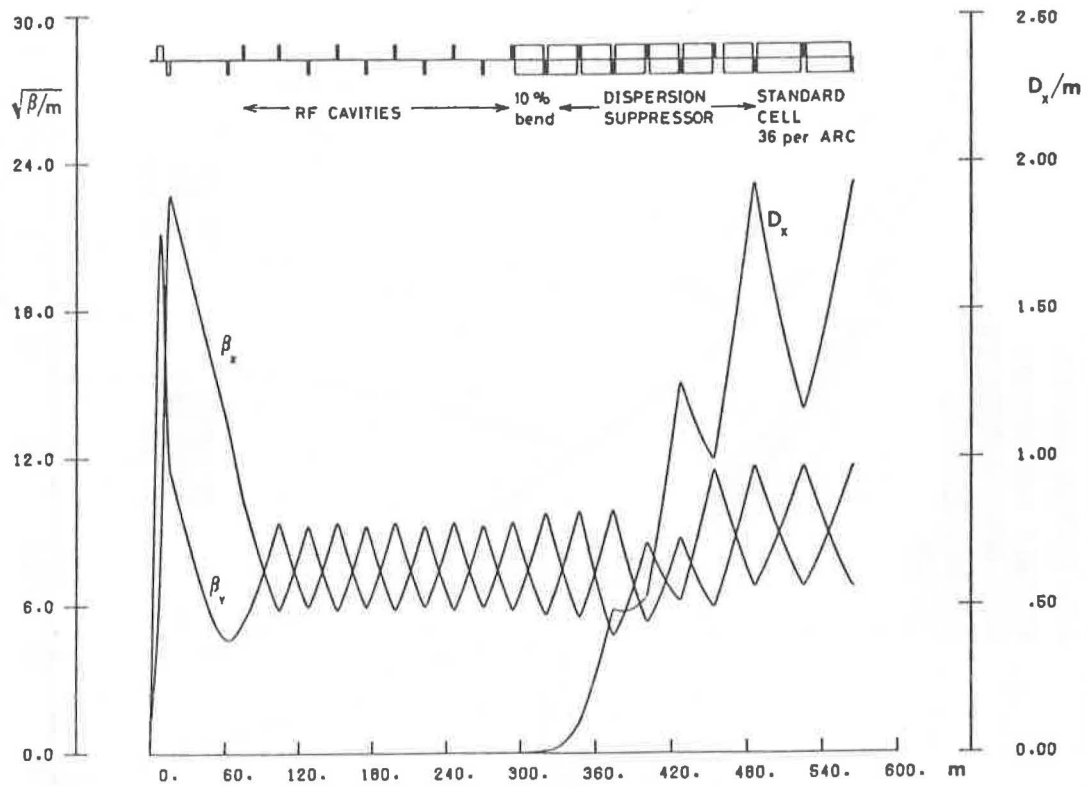


Fig. 8. Maille et fonctions de la maille à proximité du point de collision

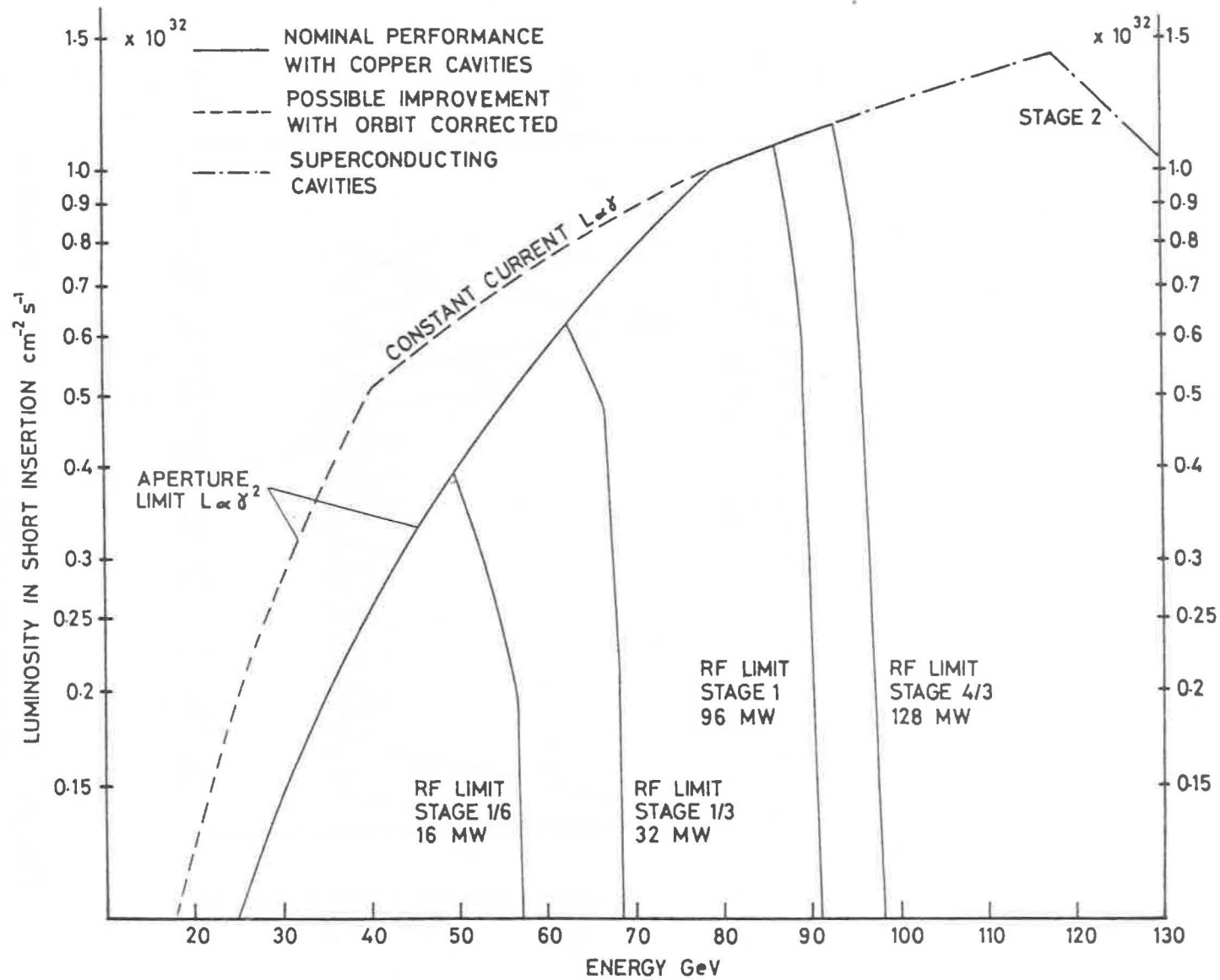


Fig. 9. Luminosité en fonction de l'énergie pour les différentes étapes

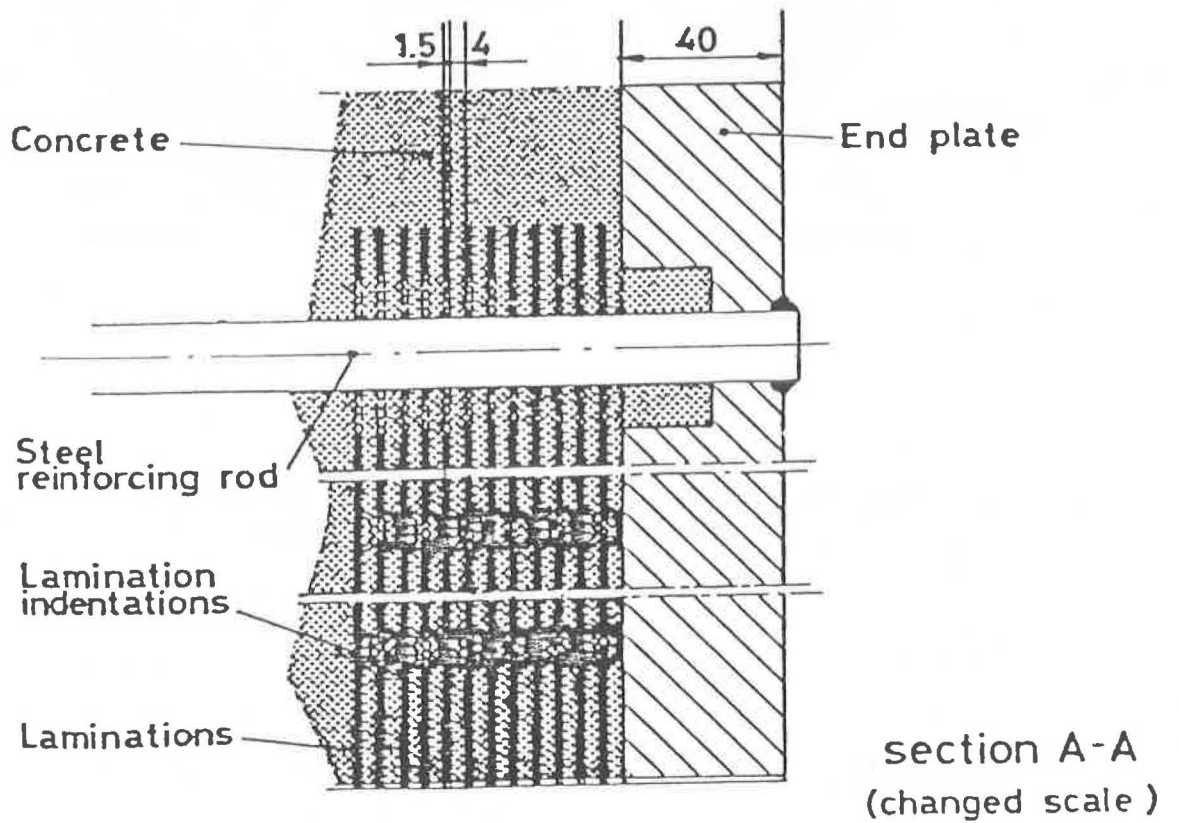
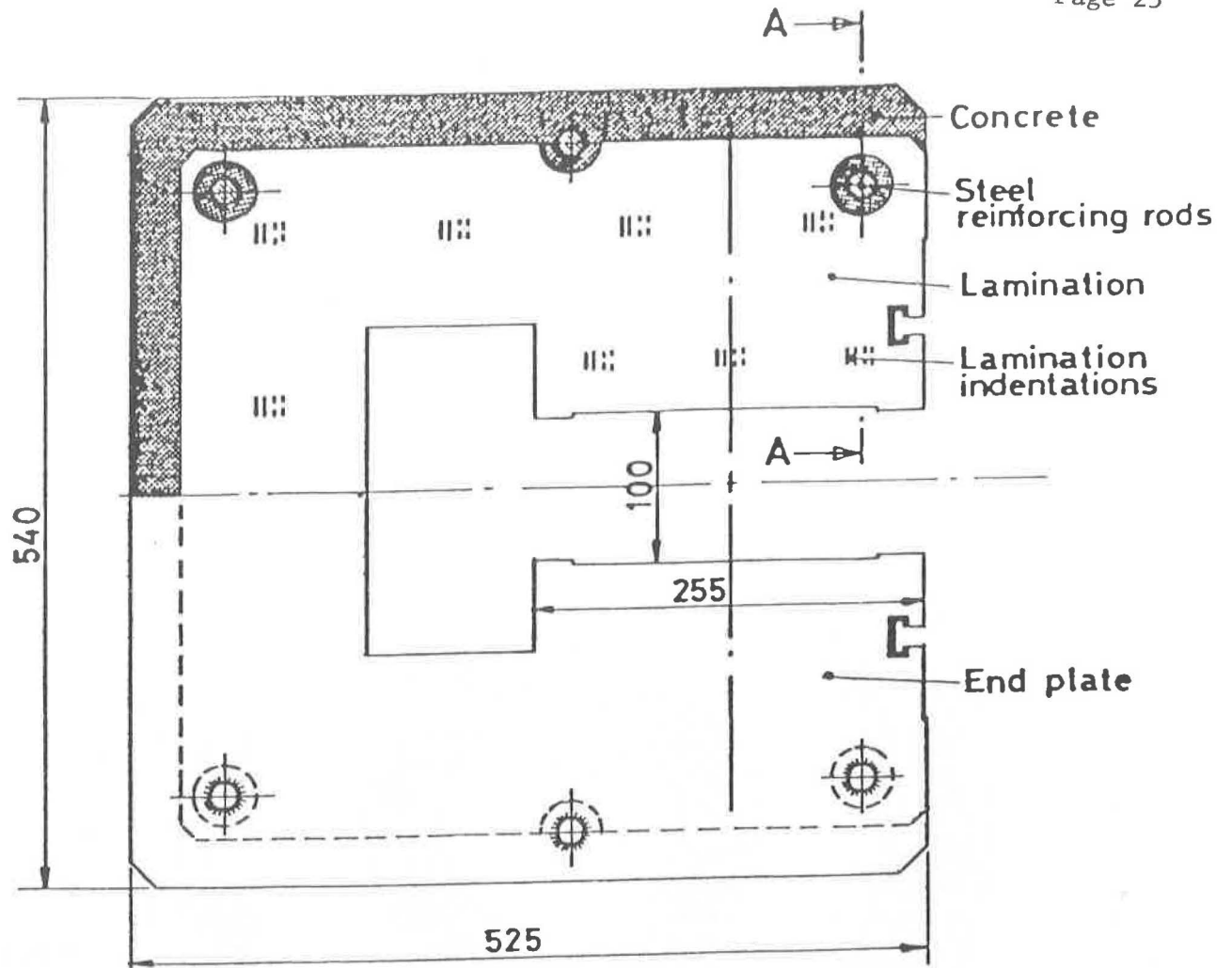


Fig. 10. Culasse d'aimant en acier et béton

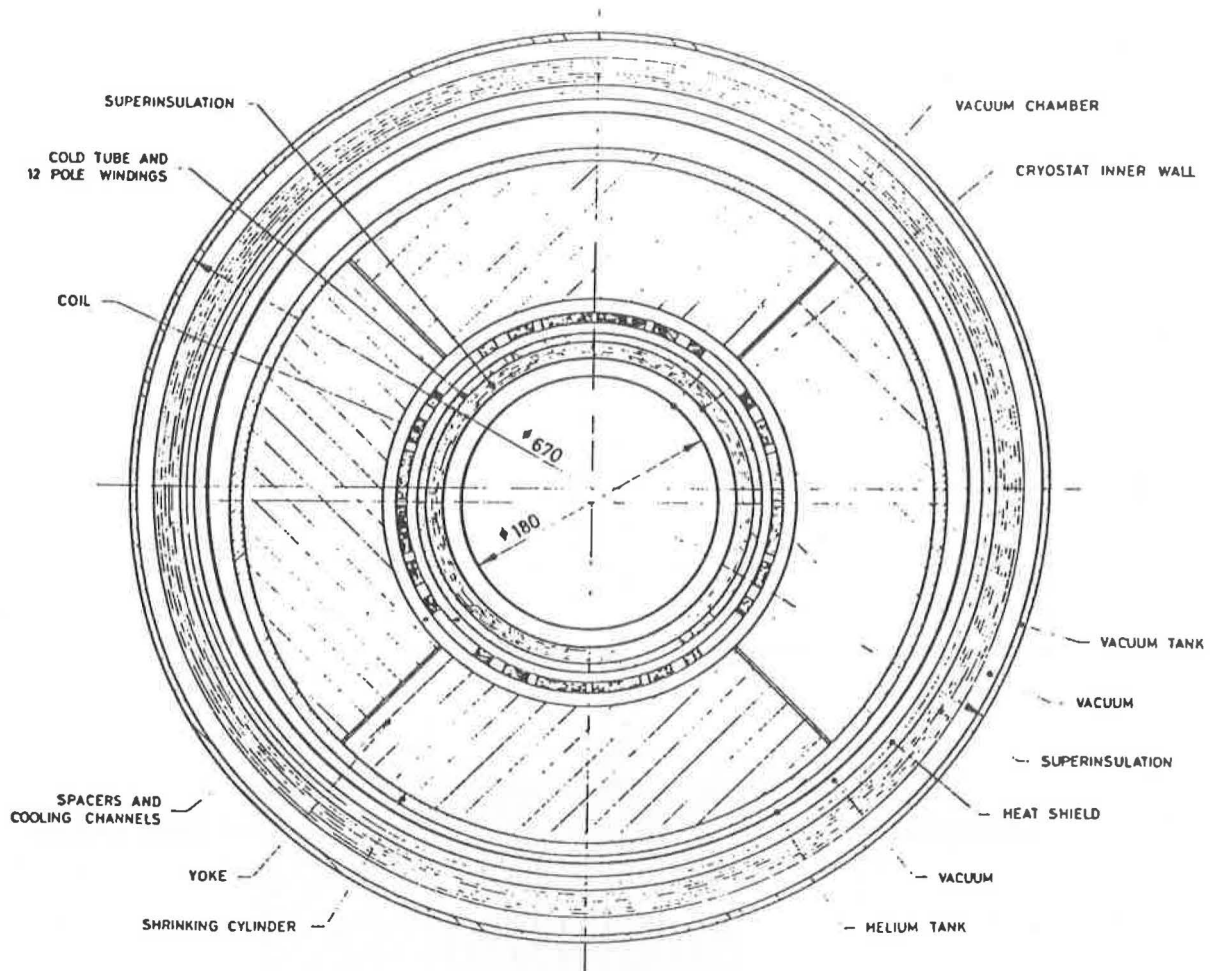


Fig. 11. Coupe d'un quadrupôle pour la section intermédiaire supraconductrice

79/133/5/F

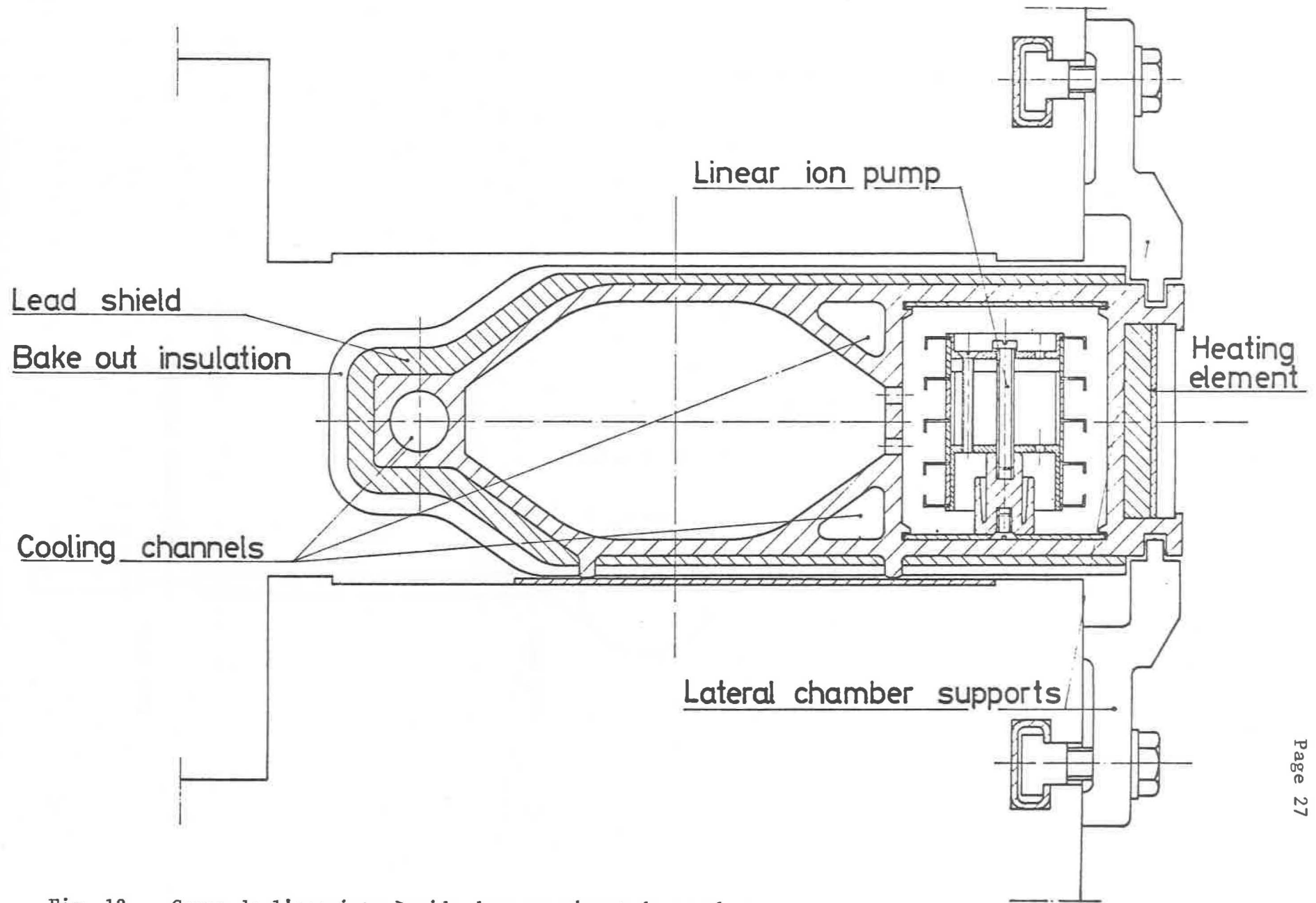


Fig. 12. Coupe de l'enceinte à vide dans un aimant de courbure

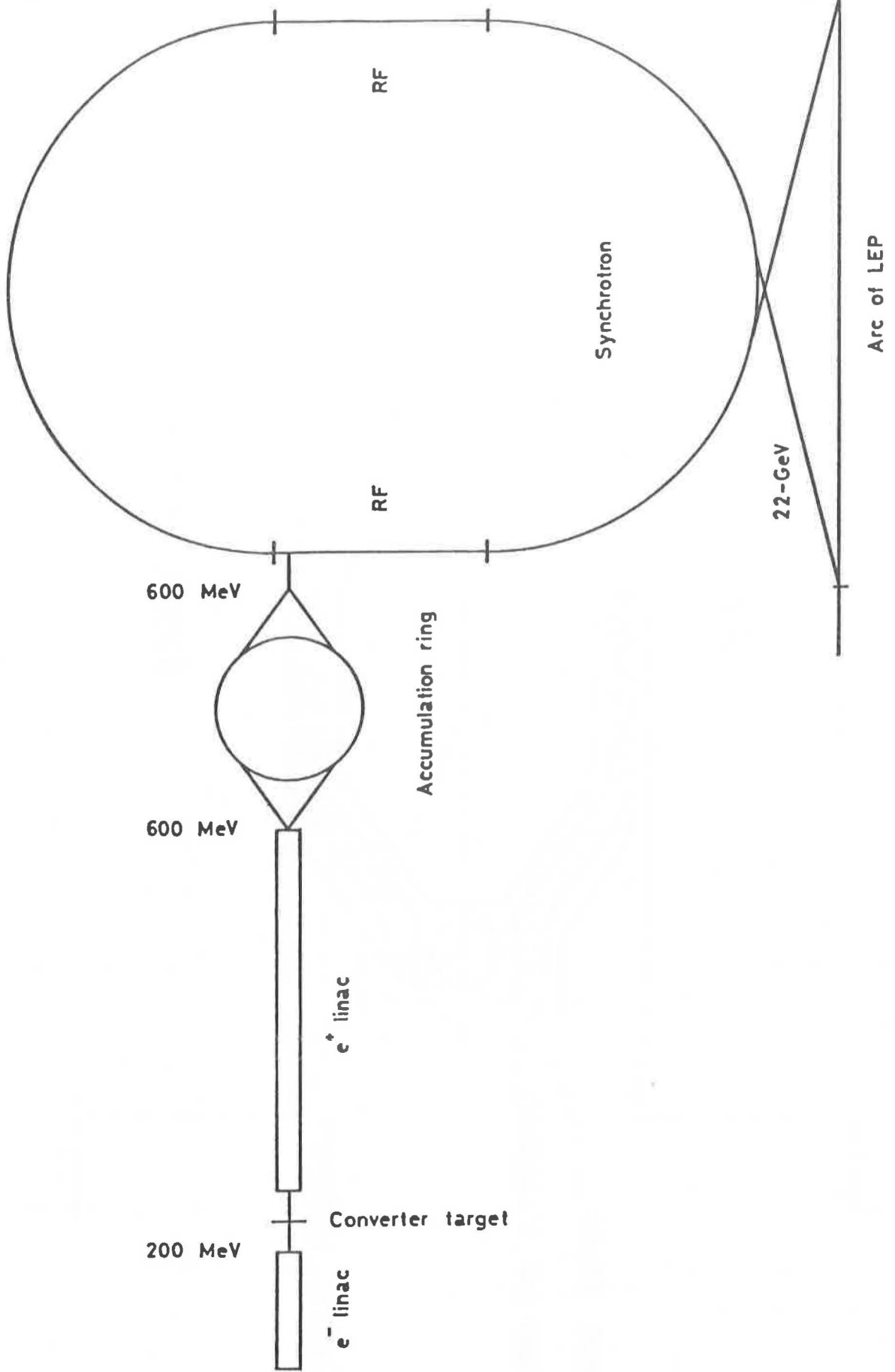


Fig. 13. Schéma de la disposition générale de l'injecteur

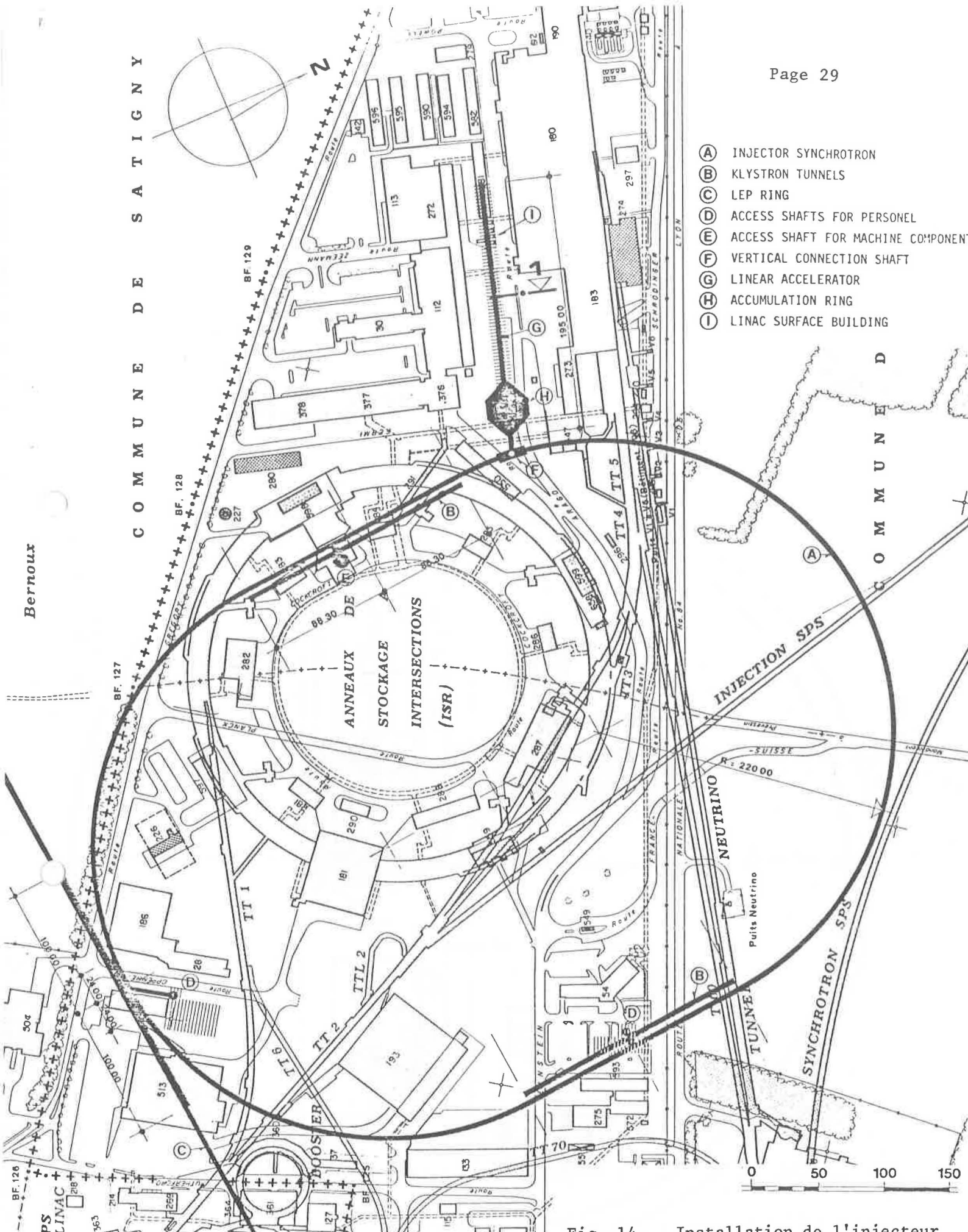


Fig. 14. Installation de l'injecteur sous le site actuel des ISR

79/133/5/F

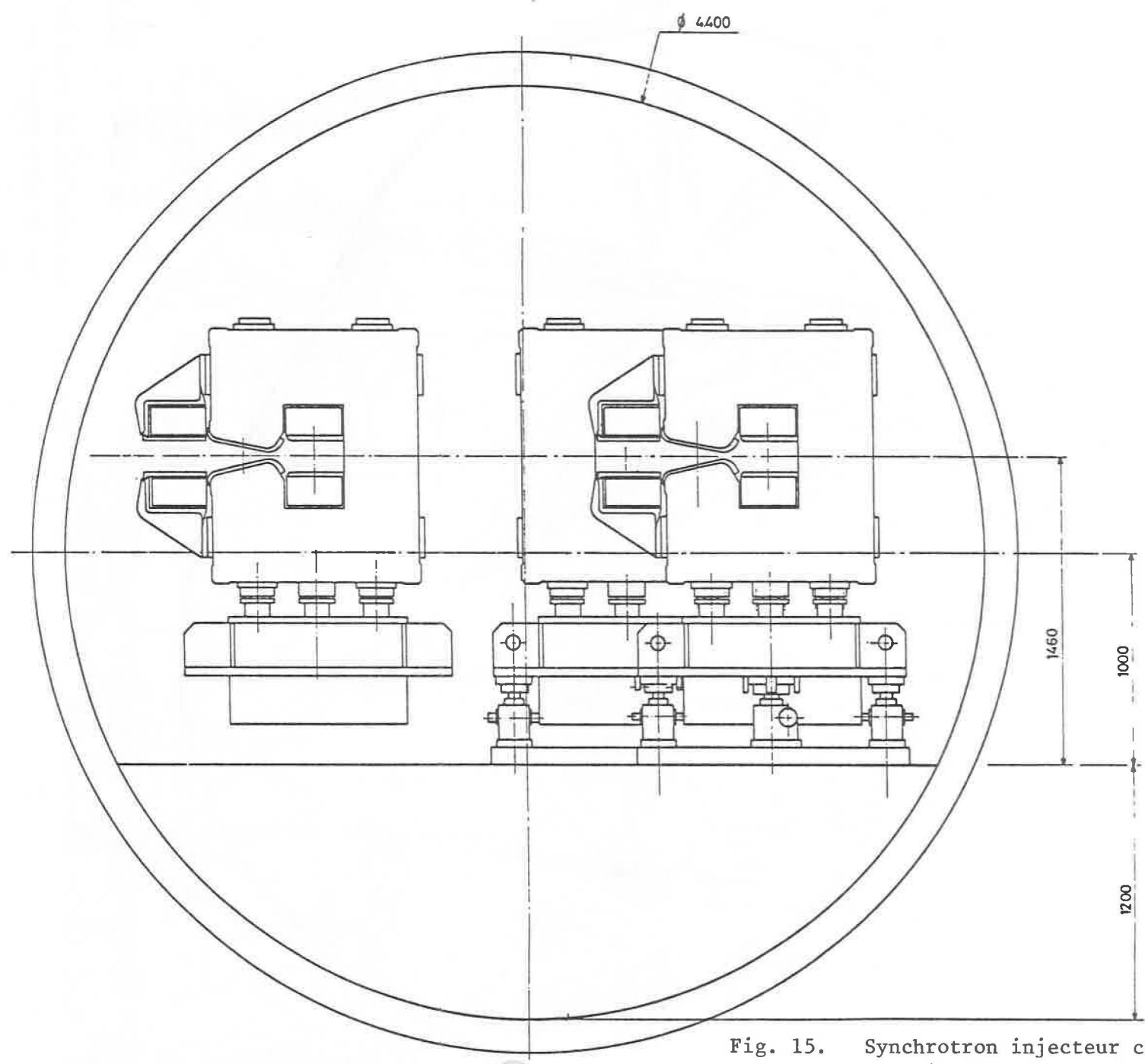


Fig. 15. Synchrotron injecteur construit en utilisant les aimés des ISR (à gauche: position d'un aimant au cours du transport).

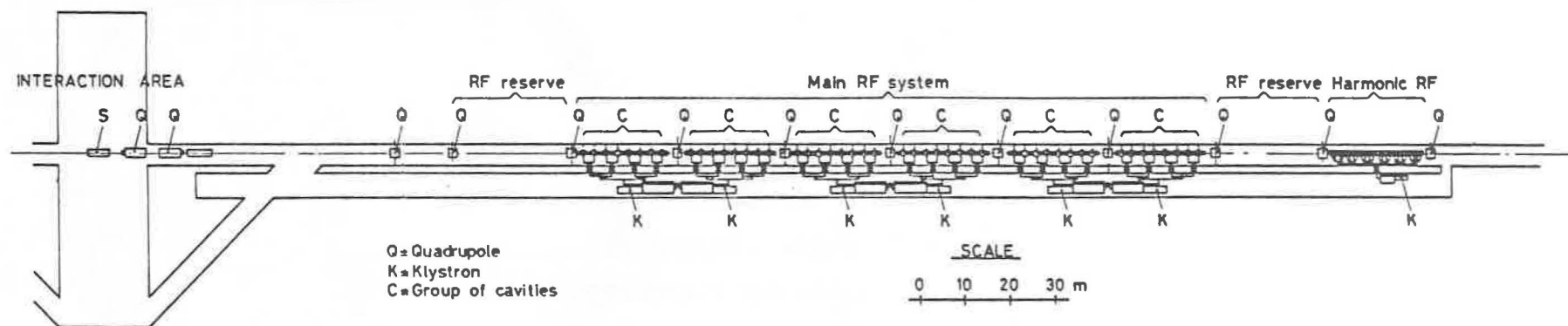


Fig. 16. Un des 16 postes HF, avec les cavités et les klystrons

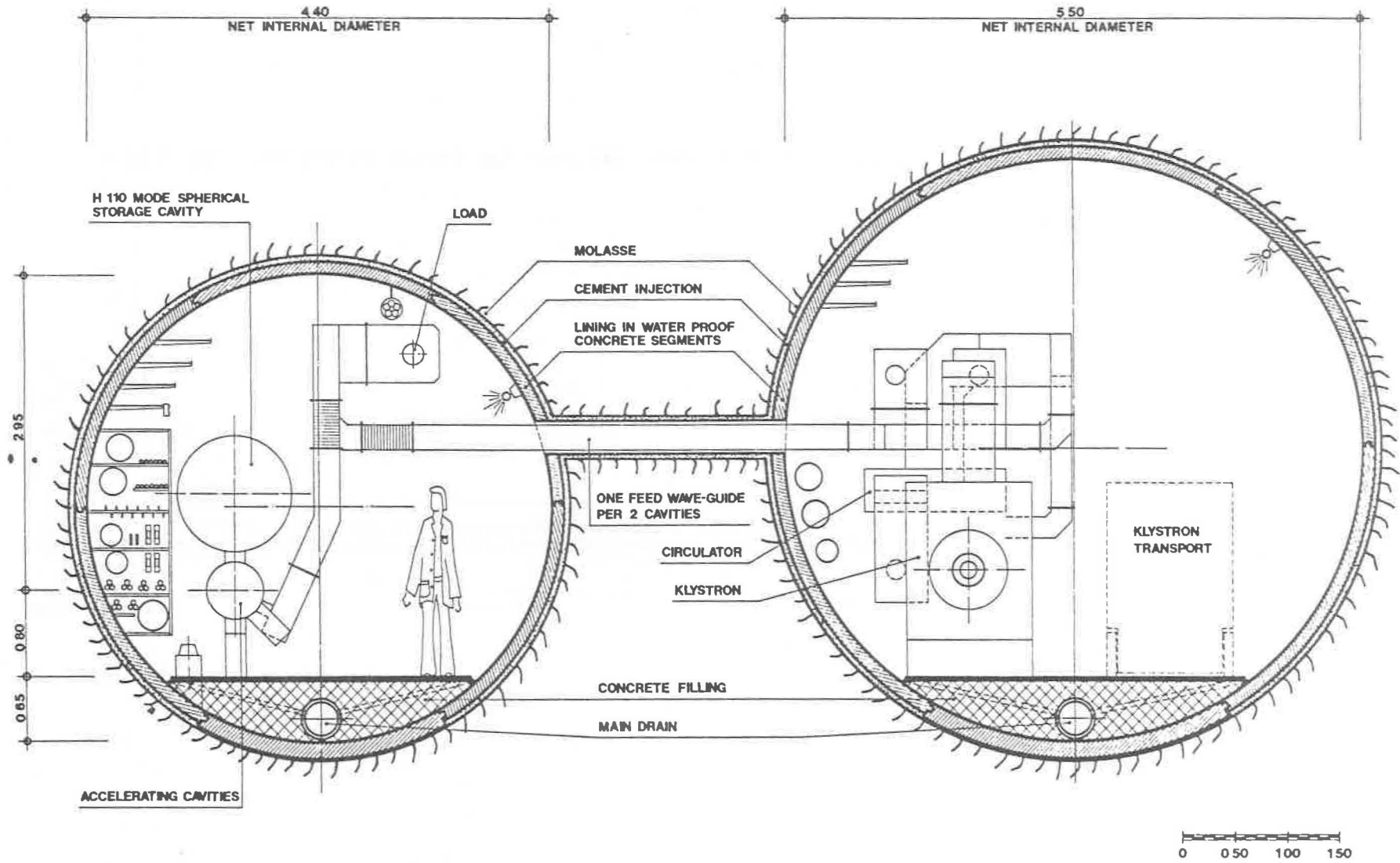


Fig. 17. Tunnel principal au niveau d'un poste HF avec le tunnel abritant les klystrons

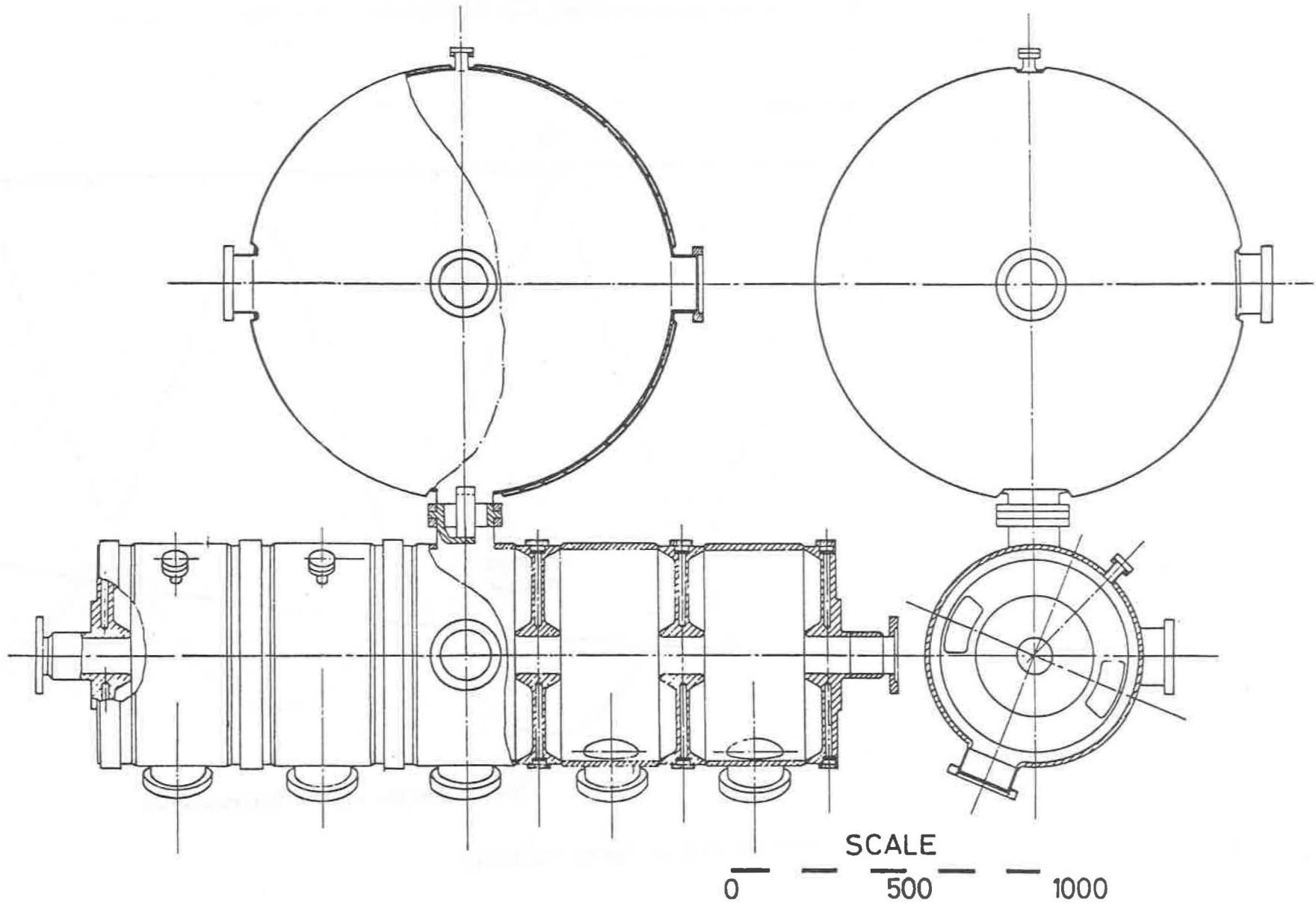


Fig. 18. Cavité HF avec cavité de stockage sphérique

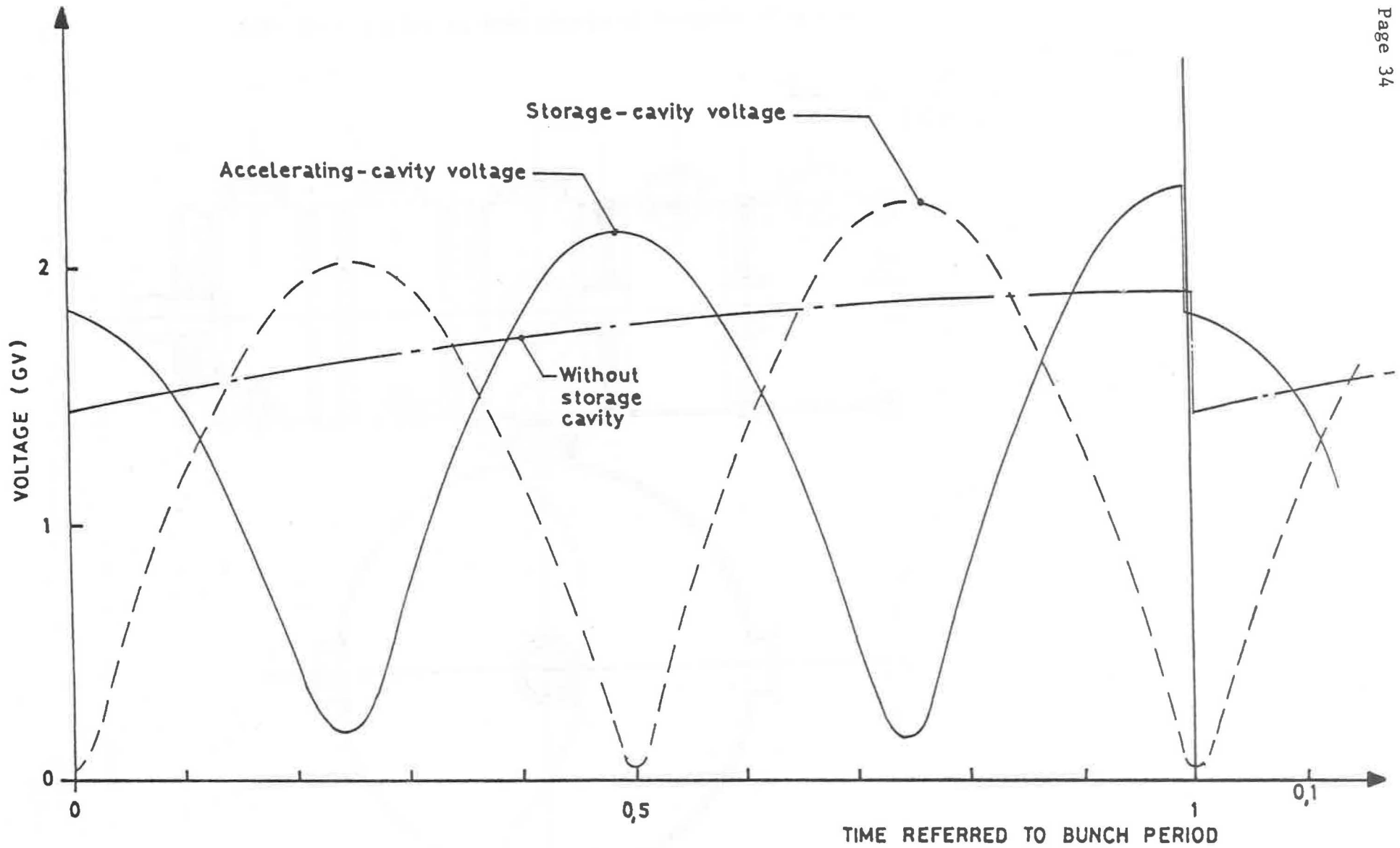


Fig. 19. Modulation des tensions dans les cavités,
compris charge par le faisceau

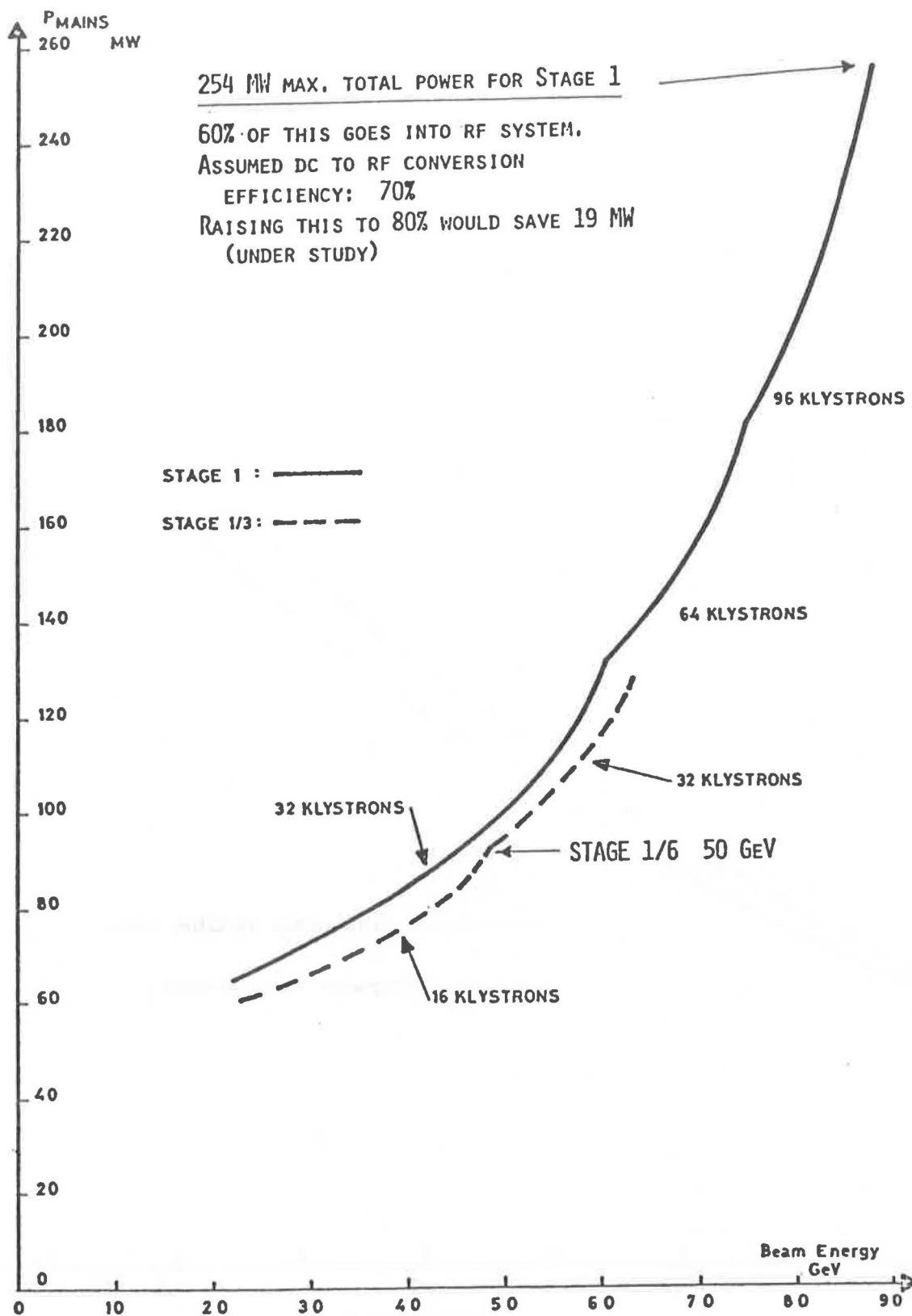


Fig. 20. Puissance en entrée pour le LEP en fonction de l'énergie du faisceau

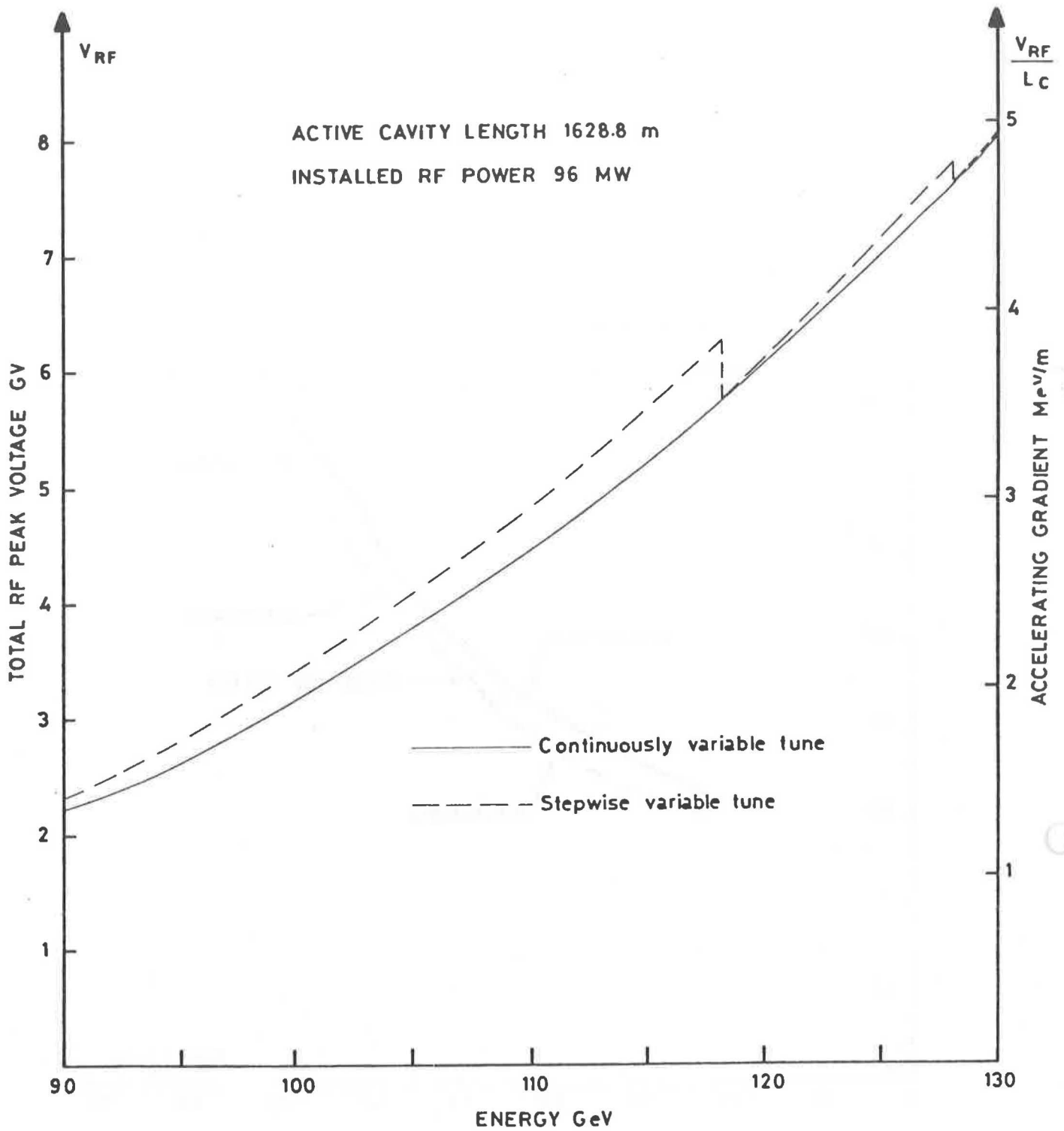


Fig. 21. Tension HF de crête et champ accélérateur au-dessus de 90 GeV

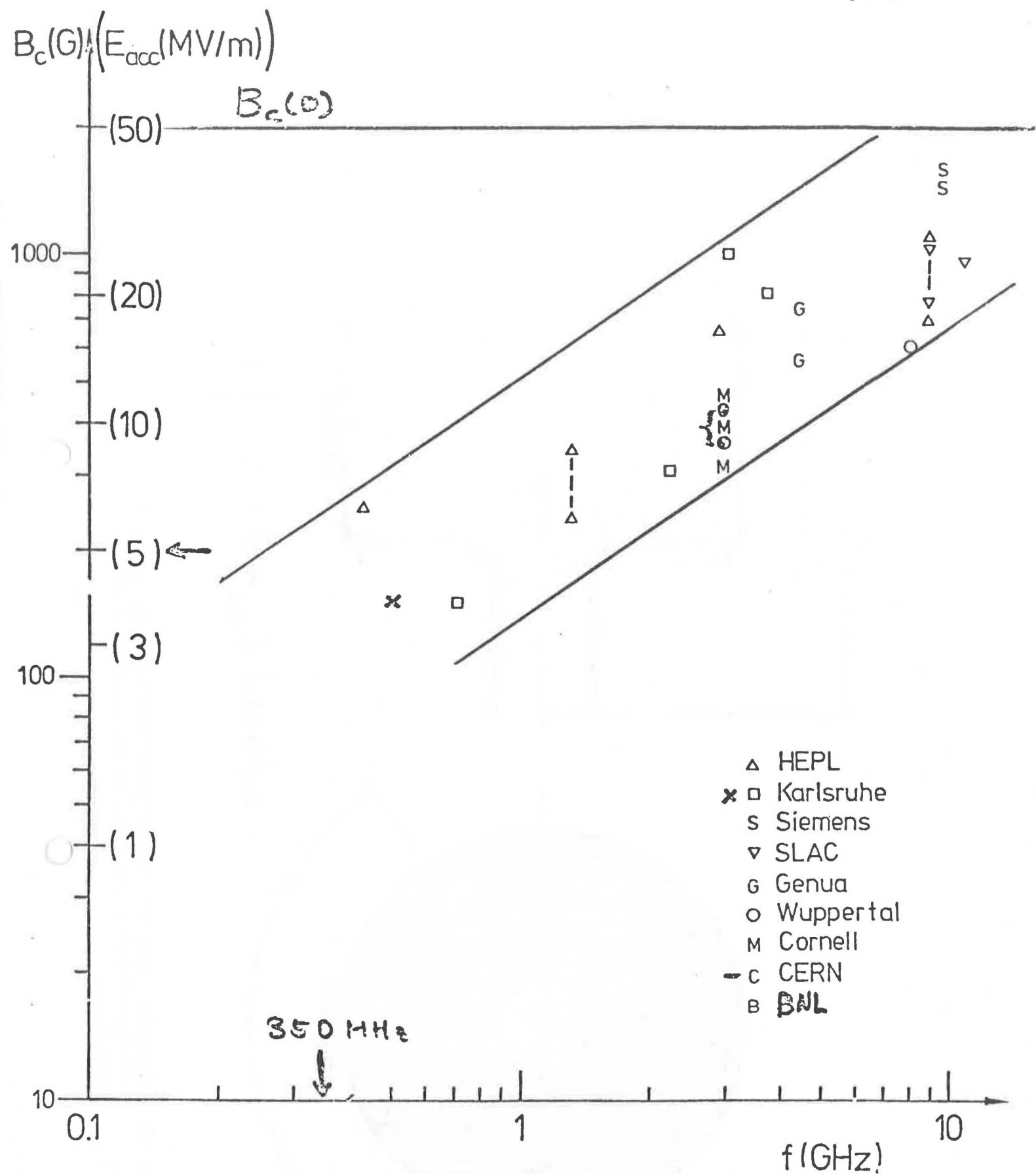


Fig. 22. Champs accélérateurs obtenus sur des modèles de laboratoire de cavités supraconductrices à différentes fréquences

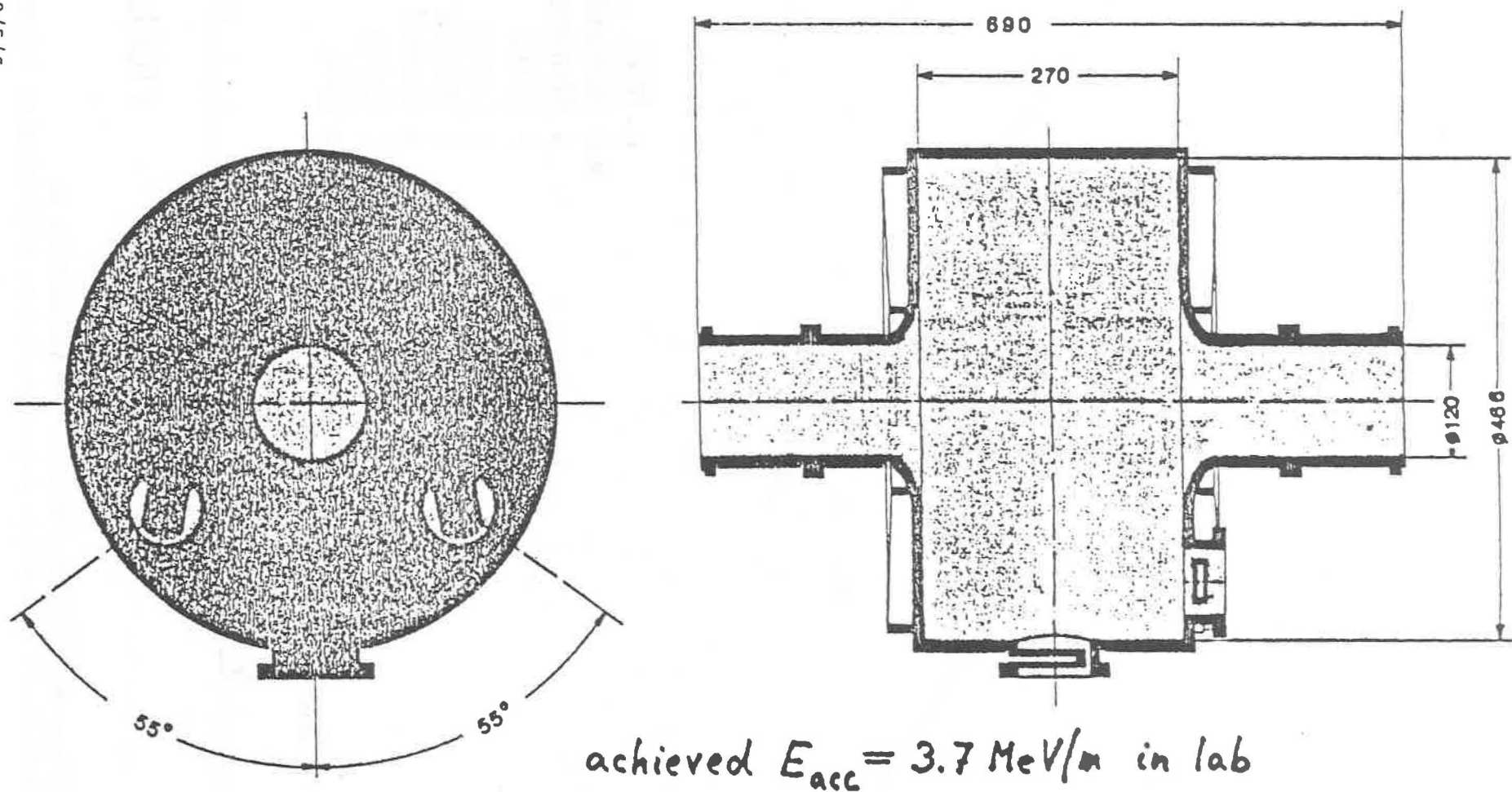


Fig. 23. Cavité d'essai supraconductrice construite par le Kernforschungszentrum à Karlsruhe, en vue des essais sur DORIS, à Hambourg

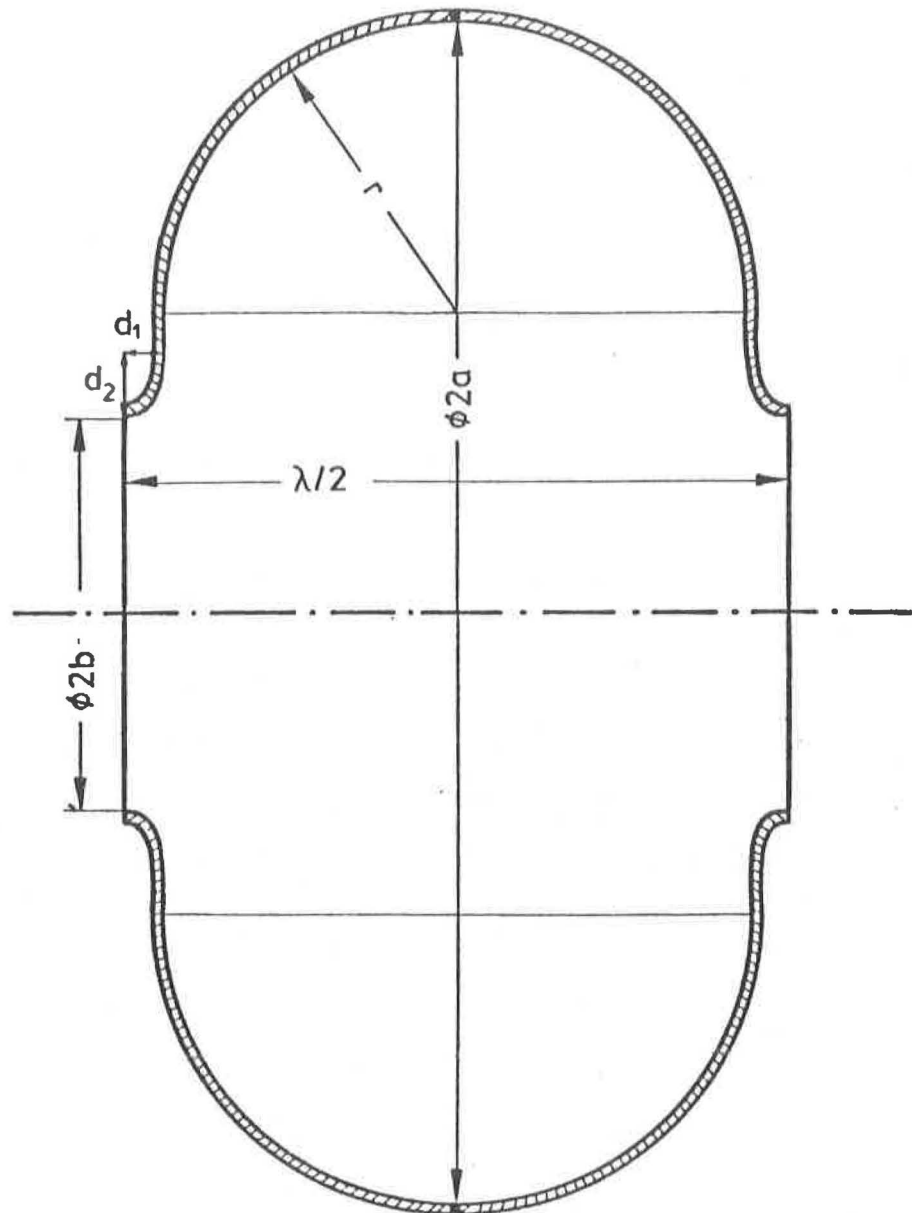


Fig. 24. Cavité supraconductrice construite par le groupe CERN-Universität de Wuppertal

CONSEQUENCES DU PROJET DE CONSTRUCTION DU LEP

SUR LES ACTIVITES DE RECHERCHE DU CERN

J.B. Adams

Introduction

1. Le rapport CERN/ISR-LEP/79-33 décrit en détail l'étude technique d'une grande machine à collision de faisceaux électron-positon (LEP) qui semble être le prochain grand accélérateur devant être construit au CERN pour répondre aux besoins de la communauté des physiciens européens des hautes énergies. Ce rapport, appelé ci-après le "Livre rose", estime à 1064 millions de francs suisses aux prix de 1979 les dépenses d'équipement pour l'étape 1/3 du LEP et indique qu'à l'énergie correspondant à ce stade, qui est de 62 GeV par faisceau, les premières expériences de physique pourraient commencer dans la septième année qui suivrait l'approbation du projet. Outre des considérations techniques, d'autres facteurs, qui ne sont pas étudiés dans le Livre rose, pourraient constituer des limitations affectant la durée de la période initiale de construction du LEP. Ce sont les budgets globaux du CERN, les effectifs disponibles au CERN et le niveau d'exploitation requis pour les autres activités de recherche du Laboratoire pendant la période de construction.
2. La présente note décrit les conséquences du projet de construction du LEP sur les activités de recherche du CERN, pendant la période de construction, sous la forme d'un modèle qui se fonde sur certaines hypothèses concernant les budgets globaux du CERN et la main-d'oeuvre disponible. Elle expose également le problème de la consommation d'énergie électrique du CERN qui pourrait à l'avenir se révéler une source de restriction des activités du Laboratoire plus importante qu'à l'heure actuelle.

Hypothèses de base

3. Pour construire un modèle significatif de la période de construction du LEP, il est nécessaire de définir les contraintes fondamentales qui s'exerceront pendant cette période.
4. En premier lieu, on suppose que les budgets globaux du CERN se stabiliseront à un niveau constant. Lorsque cette idée avait été émise pour la première fois par les Directeurs généraux il y a plus d'un an, le chiffre qu'ils avaient proposé était de 600 millions de francs suisses par an aux prix de 1978. Il avait été dit que le LEP pourrait être construit et qu'un programme de physique adéquat pourrait être conduit avec les machines SPS et PS pendant la période de construction du LEP, mais qu'il faudrait fermer les machines ISR et SC au début de cette période.

5. Dans le courant de la présente année, l'avenir de l'installation ISOLDE, qui utilise le SC, a été examiné et deux solutions ont été avancées. L'une consiste à transférer l'installation, probablement sous une forme améliorée, auprès de la machine du SIN et l'autre à exploiter le SC uniquement pour l'installation ISOLDE après le début de la construction du LEP. Aucune décision n'a encore été prise, mais on a supposé, aux fins du modèle, que le SC resterait en exploitation uniquement pour ISOLDE.
6. Les hypothèses financières actuelles pour la période de construction du LEP s'établissent donc ainsi:
 - les budgets globaux du CERN seront à un niveau constant de 610 millions de francs suisses par an aux prix de 1979 (équivalent à 600 millions de francs suisses par an aux prix de 1978);
 - les ISR seront fermés lorsque la construction du LEP commencera;
 - le SC sera exploité uniquement pour ISOLDE après le début de la construction du LEP.
7. La deuxième hypothèse importante concerne les effectifs du CERN. Les plans actuels en matière d'effectifs visent à ralentir la réduction des années précédentes, en majorant de 2 millions de francs suisses par an le budget du personnel de 1980 et des années suivantes, et à stabiliser dès que possible les effectifs. Vers le milieu des années 1980, le nombre des membres du personnel approchant de l'âge de la retraite augmentera considérablement chaque année et certains pourront être remplacés par des jeunes, dont les traitements seront inférieurs à ceux du personnel prenant sa retraite. Il sera donc possible de stabiliser les effectifs dans la première moitié des années 1980 en augmentant le budget du personnel de 2 millions de francs suisses par an. Si ces mêmes effectifs constants peuvent être maintenus dans la seconde moitié des années 1980, on pourra alors stabiliser les budgets du personnel. Dans cette hypothèse, les effectifs (y compris ceux du personnel de laboratoire) qui représentent actuellement 3550 années-hommes diminueront jusqu'à un niveau constant de 3430, tandis que le budget du personnel progressera de 272 millions de francs suisses (aux prix de 1979) en 1980 jusqu'à un niveau constant de 284 millions de francs suisses dans le milieu des années 1980. Il n'est pas tenu compte dans ces calculs des conséquences financières possibles du présent examen des traitements et des conditions sociales du personnel du CERN par le Comité des Finances. On suppose que toute augmentation correspondante dans les dépenses de personnel sera ajoutée aux budgets.
8. Sur la base de ces hypothèses, on a établi, pour la période de construction du LEP, un modèle qui montre que les contraintes financières et les limitations affectant les années-homme disponibles influencent la durée de la construction du LEP et restreignent les autres activités de recherche de l'Organisation.

Modèle pour la période de construction du LEP

9. Ayant défini les hypothèses ci-dessus, on peut entreprendre de construire le modèle sur une base financière en dressant un tableau des budgets globaux, des budgets du personnel et des budgets du matériel qui en découlent pendant les années de construction du LEP, en prenant par exemple l'année 1982 comme début de la période de construction. Le résultat de ce calcul montre que le budget moyen du matériel dans les années de la construction du LEP s'établit à 329 millions de francs suisses par an aux prix de 1979.
10. La prochaine étape consiste à répartir le budget des matériaux entre les activités de construction du LEP et les activités de recherche que le CERN poursuivra pendant cette période (SPS, PS, SC pour ISOLDE, théorie). Il existe évidemment de nombreuses possibilités de répartition, et chacune aura des conséquences différentes. Ce que présente le modèle est un compromis raisonnable entre le désir exprimé par la communauté des physiciens européens des hautes énergies que le LEP soit mis en exploitation à l'étape 1/3 dès que possible, et la nécessité pour cette même communauté de maintenir ses activités de recherche au CERN à un niveau aussi élevé que possible pendant la construction du LEP.
11. Sur un budget moyen de 329 millions de francs suisses par an disponible pour les matériaux, 139 millions de francs suisses par an sont affectés dans ce modèle à la construction du LEP et 190 millions de francs suisses par an aux autres activités de recherche. Les conséquences de cette répartition sont étudiées dans les paragraphes qui suivent.
12. Le coût d'une machine LEP à l'étape 1/3 est estimé à 1064 millions de francs suisses, auquel on doit ajouter 100 millions de francs suisses au titre de la contribution des budgets du CERN au coût de l'installation des expériences avec le LEP. Si cette contribution au coût des expériences représente, comme dans les années précédentes, environ la moitié du coût total de celles-ci, l'autre moitié étant financée par les pays membres, un montant de 200 millions de francs suisses sera disponible pour l'étude technique et l'installation des expériences avec le LEP pendant la période de construction de la machine. On pourra ainsi installer six ou sept expériences si leur coût unitaire moyen, y compris celui de leur infrastructure technique, représente environ 30 millions de francs suisses par an. Avec un budget moyen du matériel de 139 millions de francs suisses par an pour le LEP et ses expériences, la construction s'étendrait sur 8,4 années, alors que le Livre rose propose un calendrier, jugé techniquement réalisable, de sept ans. Comme les dépenses de matériel pour un grand projet tel que le LEP se maintiennent en général pendant un certain temps après la première mise en exploitation de la machine, les premières expériences de physique avec le LEP pourraient commencer, selon le modèle, vers la fin de la huitième année de construction, et non dans le courant de la septième année, comme il est dit dans le Livre rose.

13. Un montant de 190 millions de francs suisses est affecté aux activités de recherche au CERN pendant la construction du LEP. Il est évident que la majorité de ce budget du matériel doit servir à l'exploitation des autres accélérateurs et à leurs expériences et qu'on pourra trouver fort peu de crédits pour de nouveaux projets d'équipement. Etant donné que d'ici 1982 toutes les dépenses actuelles pour les améliorations et extensions des machines PS et SPS (y compris le projet $p\bar{p}$) seront terminées, un montant de 10 millions de francs suisses par an seulement est affecté aux nouveaux projets d'équipement sans lien avec le LEP et ses expériences, tandis que les 180 millions de francs suisses restants sont affectés en totalité aux dépenses d'exploitation des autres activités de recherche du CERN et aux dépenses de matériel correspondant à des frais généraux pour toutes les activités, y compris la construction du LEP. On notera que les 10 millions de francs suisses alloués chaque année aux nouveaux projets autres que le LEP devront couvrir la part du CERN dans les nouvelles expériences pour les activités de recherche au PS et au SPS, les dépenses de matériel incombant au CERN pour le financement d'expériences européennes avec des machines autres que celles du CERN, telles que le Tevatron ou ISABELLE, ainsi que les nouvelles extensions ou modifications concernant le PS, le SPS et les installations de calcul électronique du CERN.

14. On peut avoir une idée de l'effet de cette affectation des budgets du matériel aux activités de recherche du CERN pendant les années de construction du LEP en comparant une année type de la construction de cette machine avec la situation dans la présente année. Le résultat, exprimé en millions de francs suisses aux prix de 1979, est indiqué dans le tableau ci-dessous.

	<u>1979</u>	<u>Année type de construction du LEP</u>
Etude technique et construction du LEP (y compris les expériences)	3	139
Dépenses d'exploitation pour les activités de recherche (accélé- rateurs, expériences et frais généraux du CERN)	215	180
Projets autres que le LEP	102	10
Total	<u>320</u>	<u>329</u>

Comme on l'a déjà indiqué, la forte réduction qui affecte les projets autres que le LEP est consécutive à l'achèvement des projets d'amélioration et d'extension actuels (principalement le projet $p\bar{p}$), et elle est indispensable pour récupérer des crédits en vue de financer la construction du LEP. La réduction des dépenses d'exploitation pour les activités de recherche au CERN pendant les années de construction du LEP est due en partie à la mise à l'arrêt des ISR et à l'exploitation du SC uniquement

pour ISOLDE, mais ces réductions seront compensées par de nouvelles dépenses d'exploitation, par exemple pour les nouvelles installations pp̄ pour le SPS, y compris l'anneau AA, et pour LEAR. Compte tenu de tous ces éléments, le niveau actuel des dépenses d'exploitation, soit 215 millions de francs suisses, peut être ramené à 196 millions de francs suisses. Les 16 millions de francs suisses qui doivent encore être déduits pour ramener les dépenses d'exploitation à 180 millions de francs suisses par an ne peuvent être trouvés que grâce à des réductions effectives par rapport aux niveaux d'exploitation actuels des activités de recherche du PS et du SPS et, même si cette réduction ne paraît pas importante, elle affecte malheureusement le volume de la recherche possible. Elle pourrait se traduire, par exemple, par des réductions dans les heures d'exploitation de l'ensemble PS/SPS et par la mise à l'arrêt de certaines des grandes installations d'expérimentation de cet ensemble qui sont actuellement en service. Une réduction du nombre d'heures de fonctionnement des accélérateurs et de leurs expériences se traduit essentiellement par une diminution des dépenses de matériel dans le domaine des biens de consommation tels que l'électricité et l'eau, les films de chambres à bulles et les éléments à durée de vie limitée. On mesurera les conséquences d'un arrêt de l'exploitation de certaines des installations d'expérimentation actuelles lorsqu'on saura que les dépenses de matériel pour l'exploitation de BEBC représentent environ 8 millions de francs suisses par an, y compris la consommation d'énergie électrique, et que l'exploitation du Hall Ouest avec ses expériences correspond à des dépenses de matériel d'environ 6 millions de francs suisses par an. Il est évident que les modalités de la réduction de 16 millions de francs suisses par an à appliquer aux dépenses d'exploitation devront être décidées en fonction de l'ordre de priorité existant alors en matière de recherche.

15. La troisième étape de la construction du modèle consiste à déterminer si les hypothèses qui ont été faites en matière d'effectifs permettent d'avoir du personnel en nombre suffisant pour construire le LEP et installer ses expériences et pour poursuivre les autres activités de recherche du CERN.

16. A la différence du SPS, le LEP n'est pas constitué d'un anneau principal unique; c'est un ensemble de machines qui exigent chacune du personnel pour leur étude technique, leur construction et leur mise en exploitation. Il possède deux linacs, un anneau de stockage à positons, un synchrotron injecteur bien plus grand que les ISR et un anneau principal d'une circonférence quatre fois et demie supérieure à celle du SPS. Une estimation récente des effectifs nécessaires à la construction du LEP donne un chiffre de 580 personnes et il faudra également une centaine de personnes pour la préparation des expériences avec le LEP (ce dernier chiffre correspond sensiblement au nombre de personnes affectées actuellement à la préparation des expériences pp̄). Si l'on ajoute les effectifs nécessaires à la poursuite des autres activités de recherche du CERN pendant la construction du LEP et le personnel de la catégorie des services requis pour le LEP et pour les autres activités de recherche, on obtient un total supérieur aux effectifs disponibles pendant la construction du LEP, qui sont de 3430 personnes, selon l'hypothèse faite au début

de cette étude. Il apparaît donc que les effectifs constitueront également une limitation pour le calendrier de la construction du LEP, à moins qu'on puisse prendre des mesures pour réduire encore les effectifs nécessaires aux autres activités de recherches pendant la construction du LEP.

17. En conclusion, ce modèle d'affectation des ressources, à la fois financières et humaines, se traduit par un plan cohérent qui est compatible avec les hypothèses faites au sujet des budgets globaux du CERN et du personnel disponible. Ses principales caractéristiques sont les suivantes:

- une période de construction du LEP supérieure d'un an et demi environ au calendrier technique indiqué dans le Livre rose;
- une réduction du niveau d'exploitation actuel du SPS et du PS et de leurs expériences pendant la construction du LEP, qui représente, sur le plan financier, une diminution de 8% des coûts d'exploitation et dont les conséquences pratiques pourraient être la fermeture de certaines des grandes installations d'expérimentation actuelles de ces machines ainsi qu'une réduction des temps de fonctionnement annuels des machines. Il est évident qu'on ne devra prendre de telles mesures que dans le cas où tous les autres moyens de réduire les coûts d'exploitation n'auraient pas produit l'effet requis.

Variantes du modèle

18. Le modèle employé dans cette note illustre les problèmes que posera la recherche d'un équilibre entre les budgets du matériel affectés au LEP et ceux affectés aux activités de recherche qui se poursuivront dans cette période. Les contraintes sur le plan financier et sur celui des effectifs, qui ont été prises pour hypothèse dans le modèle, ne permettent pas de construire le LEP dans le délai proposé dans le Livre rose, en maintenant simultanément les autres activités de recherche à leur niveau actuel. Il faudrait pour cela que les budgets globaux du CERN fussent supérieurs de 41 millions de francs suisses par an environ à notre hypothèse de 610 millions de francs suisses par an. Même si ces crédits supplémentaires étaient rendus disponibles, les effectifs pourraient s'avérer insuffisants pour mener à bien l'ensemble des programmes. Lorsqu'ils ont proposé que le LEP soit construit avec des budgets globaux de 610 millions de francs suisses (ou 600 millions de francs suisses aux prix de 1978), les Directeurs généraux étaient conscients des problèmes qui en résulteraient et ils ont souligné que les années de construction du LEP seraient des années maigres au CERN du point de vue des activités de recherche intéressant la communauté des physiciens européens des hautes énergies. Depuis lors, les budgets de l'Organisation ont été réduits, et celui de 1979 représente 590 millions de francs suisses.

19. Les variantes du modèle présenté dans cette note peuvent être résumées ainsi:
- S'efforcer d'augmenter le niveau des budgets du CERN pendant les années de construction du LEP jusqu'à environ 650 millions de francs suisses par an, pour pouvoir respecter le calendrier fixé dans le Livre rose et maintenir les autres activités de recherche à leur niveau actuel.
 - Répartir différemment les budgets du matériel entre la construction du LEP et les autres activités de recherche, dans les limites d'un budget global du CERN de 610 millions de francs suisses par an, soit pour accélérer la construction du LEP au détriment des activités de recherche, soit pour maintenir le niveau actuel des dépenses pour les autres activités de recherche en augmentant la durée de la construction du LEP. Le modèle montre d'ailleurs très bien quels avantages on retirerait en réduisant encore le coût du LEP et en recherchant des possibilités de diminuer encore les dépenses d'exploitation.

La contrainte de la consommation d'énergie

20. Aux contraintes en matière de budgets et de main-d'oeuvre, qui ont toujours limité les activités du CERN, il s'est ajouté récemment une nouvelle contrainte qui promet d'être encore plus lourde de conséquences dans les années à venir. Elle concernerait le niveau admis ou acceptable de la consommation d'énergie électrique d'un laboratoire tel que le CERN. A l'heure actuelle, la consommation d'électricité du CERN représente quelque 660 GW·h par an et lorsque le LEP entrera en exploitation à l'étape 1/3, avec une énergie d'environ 60 GeV par faisceau, elle augmentera dans la proportion d'environ 30% par rapport au niveau actuel. Si la politique actuelle de réduction de la consommation d'énergie électrique dans les Etats Membres devait se poursuivre ou même peut-être s'intensifier à l'avenir, il serait improbable que la consommation du CERN ne fût pas remise en question.
21. Depuis plusieurs années déjà, le CERN a pris des mesures pour réduire sa consommation d'électricité, sans lesquelles on estime qu'aujourd'hui ses besoins dépasseraient de plus de 100 GW·h par an le niveau actuel de 660 GW·h. Ces économies ont été obtenues surtout par l'emploi d'aimants supraconducteurs pour les grands spectromètres et les grandes chambres à bulles et par l'exploitation des lignes de faisceau du SPS en régime pulsé. L'année dernière, l'étude technique concernant le LEP a été fortement influencée par la nécessité de réduire la consommation électrique de cette machine.

22. Si l'exploitation du LEP à l'étape 1/3 n'entraîne pas une augmentation excessive de la consommation électrique, le passage à l'étape suivante, correspondant à des énergies d'environ 86 GeV par faisceau, se traduit par une augmentation appréciable de la consommation d'énergie. La puissance électrique fournie au LEP passera d'un niveau légèrement inférieur à 100 MW à environ 250 MW, si cette étape suivante comporte la réalisation d'un système d'accélération HF équipé de cavités en cuivre. Ce qu'on espère, c'est qu'on pourra disposer de cavités supraconductrices à cette date, c'est-à-dire dans une dizaine d'années, et le CERN a mis sur pied un programme énergétique de développement de cette technique nouvelle, en collaboration avec plusieurs laboratoires nationaux. On estime qu'un programme de recherche valable et raisonnable pourra se poursuivre au CERN dans les années 1980 avec le LEP et l'ensemble PS/SPS sans dépasser une consommation totale d'électricité d'environ 1000 GW·h par an.
23. Lorsqu'on étudie la question de la consommation d'énergie au CERN, il importe d'employer la référence qui convient. Le CERN est le seul laboratoire international de physique des hautes énergies en Europe. Même au niveau national, après la fermeture d'un grand nombre de grands accélérateurs dans les Etats membres, DESY est le seul à exploiter actuellement de grands accélérateurs pour la physique des hautes énergies. La consommation d'électricité du CERN doit donc être considérée en relation avec la consommation dans ses douze Etats membres. Le rapport est de l'ordre de 1 à 2000.

Conclusions

24. Dans la présente note, on s'est efforcé d'exposer les conséquences du projet LEP en élaborant un modèle des activités du CERN pendant la période de construction de cette machine. Ce modèle se fonde sur des hypothèses concernant les budgets globaux du CERN, qui ont été émises précédemment par les Directeurs généraux, et sur la main-d'oeuvre disponible, telle qu'elle découle de l'actuelle politique de l'emploi au CERN.
25. Le modèle montre que le LEP pourrait être construit au CERN sur une période légèrement plus longue que le calendrier technique indiqué dans le Livre rose, si l'on réduisait quelque peu le niveau actuel des activités de recherche au PS et au SPS et si l'on exploitait le SC uniquement pour l'installation ISOLDE.
26. Les budgets globaux et la main-d'oeuvre disponible sont les principales contraintes appliquées au modèle. Avec ces contraintes, il est nécessaire de parvenir à un équilibre entre la durée de la construction du LEP et les réductions à apporter aux activités de recherche du SC, du PS et du SPS pendant la période de construction.

27. Le modèle montre clairement les orientations selon lesquelles le travail devra se poursuivre à l'avenir. Il faudra, d'une part, réduire encore les dépenses initiales pour la construction du LEP jusqu'à la date où les premières expériences de physique pourront commencer, car cette date revêt une importance capitale pour la communauté des physiciens européens, et, d'autre part, explorer toutes les possibilités de réduire les dépenses de matériel pour les activités de recherche pendant la période de construction du LEP, sans affecter la qualité des résultats scientifiques, ce qui permettra de dégager des crédits supplémentaires pour les dépenses de matériel du LEP et de réduire, par conséquent, la durée de sa construction. En ce qui concerne la réduction des dépenses de construction du LEP jusqu'à la date de la première mise en exploitation pour la recherche, on peut envisager le maintien du délai de sept ans pour la construction, si le LEP est construit jusqu'à l'étape 1/6 (49 GeV par faisceau), si l'on installe uniquement quatre zones d'expériences et quatre expériences au lieu de huit et si l'actuel Hall Ouest est fermé pour la recherche avec le SPS et employé comme hall d'assemblage pour le LEP. Cette question sera étudiée et débattue de nouveau avec le Comité des Directives scientifiques au début de l'année prochaine.
28. Le modèle ne s'efforce pas d'aller au-delà de l'achèvement du LEP à l'étape 1/3. En d'autres termes, il porte uniquement sur les dix prochaines années. On a cependant vérifié que les activités de recherche tant avec le LEP qu'avec l'ensemble PS/SPS pourront continuer, avec les mêmes contraintes sur le plan financier et sur celui des effectifs, après la période initiale de construction du LEP. Lorsque le LEP sera entré en exploitation à l'étape 1/3, à la fin des années 1980, la Direction du CERN pourra envisager plusieurs options. On pourrait, soit porter l'énergie du LEP à 86 GeV par faisceau en ajoutant de nouvelles cavités HF en cuivre, soit, de préférence, adopter des cavités HF supraconductrices si ces dernières sont alors disponibles. Il se pourrait également que l'évolution de la recherche montre qu'il serait préférable de faire entrer en collision le faisceau d'électrons du LEP avec le faisceau de protons du SPS, ou, à plus long terme, de construire une machine à collision proton-antiproton dans le tunnel du LEP. Les options sont nombreuses, mais il vaut mieux s'en remettre à l'avenir quant au choix de la meilleure.
29. L'attention est appelée sur le fait que la consommation d'énergie électrique du CERN pourrait ultérieurement devenir une contrainte plus sérieuse pour l'exploitation du Laboratoire qu'à l'heure actuelle.
30. Enfin, il convient de souligner que dans cette note on s'est borné à présenter un modèle possible des années de construction du LEP. Sa principale utilité est de montrer que le LEP peut être construit, même en tenant compte des hypothèses qui ont été faites au sujet des contraintes sur le plan financier et sur celui des effectifs. Le modèle est également utile en ce sens qu'il montre dans quels domaines se rencontreront les principales difficultés pendant cette période et, par conséquent, quelles doivent être les orientations pour les futures études.

Et puisque la période en cause est très longue et que la planification n'est pas une science exacte, il est salubre de terminer cette étude en citant ce mot:

"Toute prédiction est incertaine, surtout lorsqu'elle concerne l'avenir."
