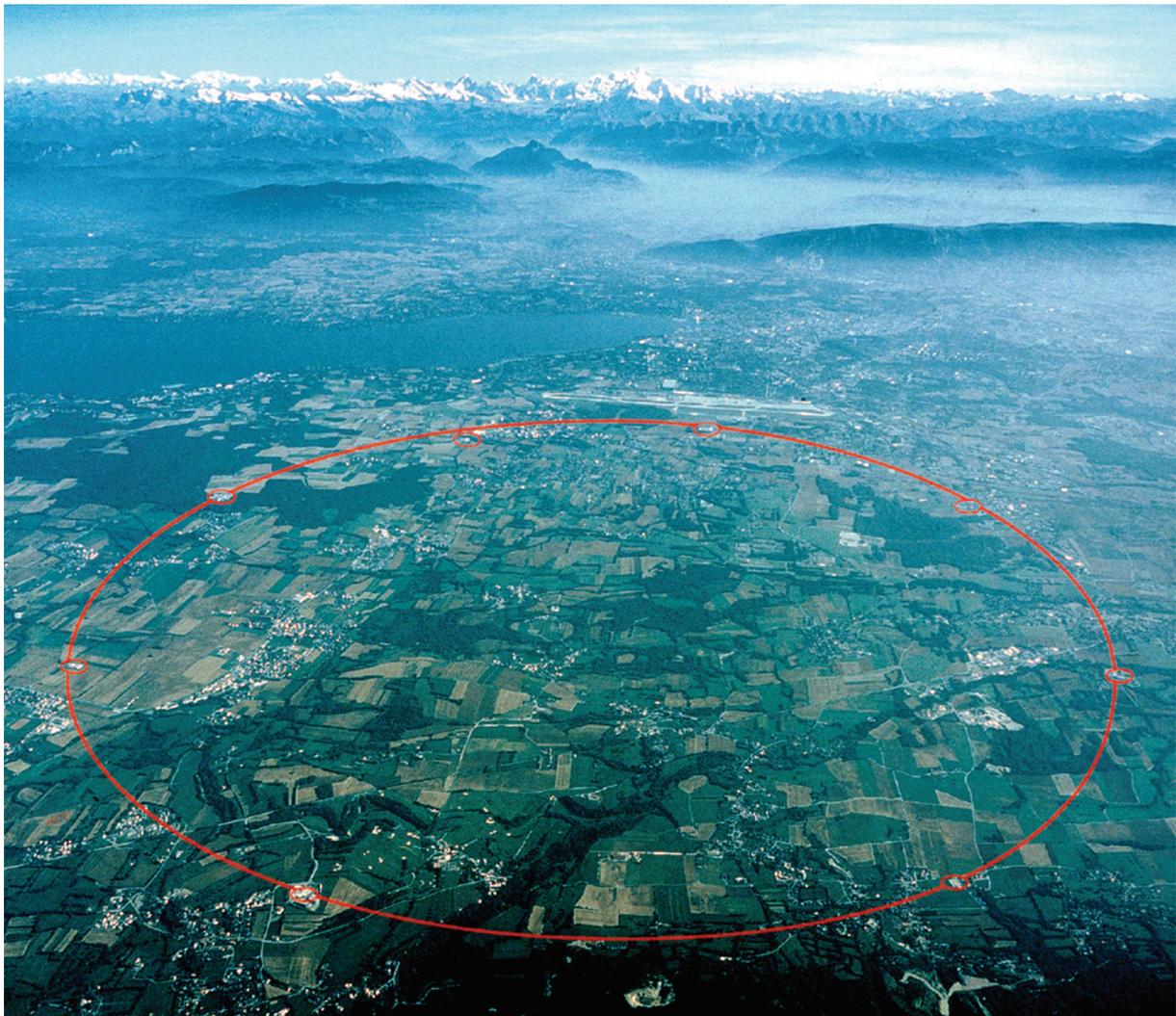


Les accélérateurs du CERN

Günther Plass

Dans ce qui suit, j'essayerai de retracer ces 50 ans de construction d'accélérateurs au CERN ; on commencera par un survol des inventions de différents types d'accélérateurs durant le vingtième siècle et finira en jetant un bref coup d'oeil sur les projets en cours ou envisageables au CERN dans les années à venir. Ceci sera le dessert, après l'entrée très intéressante servie par Franco Bonaudi et l'avalanche de résultats en physique de particules, présentée en tant que plat de résistance par Daniel Treille.



Le siècle des accélérateurs

Tout a commencé avec les découvertes par J. J. Thomson, en 1897, de l'électron et par L. Bequerel, en 1898, de la radioactivité.

Quelques années plus tard, E. Rutherford était le premier à irradier des feuilles d'or avec des rayons alpha afin de comprendre la structure des atomes. En trouvant, en 1911, que l'essentiel de la masse d'un atome est concentré dans un minuscule noyau, il a inauguré la recherche nucléaire. L'intérêt de disposer de faisceaux d'énergie variable et bien orientés au lieu du rayonnement naturel, a donné lieu à des tentatives de construire des accélérateurs. La découverte par P. Hess des rayons cosmiques et des réactions qu'ils peuvent engendrer a, dans les années 30, encore renforcé la demande pour des faisceaux de protons et d'électrons d'énergies plus élevées.

Dans le Tableau 1 est résumé l'essentiel des systèmes d'accélérateurs proposés entre les années 20 et 80 du 20^{ème} siècle. (Il n'est pas toujours facile de définir un nom ou une date précise parce que certaines publications initiales étaient d'accès difficile.) Sont écrits en **gras** les types d'accélérateurs qui ont été réalisés au CERN.

Les accélérateurs linéaires et les cyclotrons ont trouvé un emploi dans le domaine médical et sont produits aujourd'hui à l'échelle industrielle. Les synchrotrons à gradient alterné (AGS) sont devenus les plus importants pour le CERN comme pour d'autres laboratoires de recherche fondamentale, chacun a ses caractéristiques propres et ils ont été construits en multiples variantes. Notons la cinquantaine de sources de rayons synchrotroniques au monde, toutes des AGS à électrons.

Mis à part quelques exceptions (p. ex. V. de Graaf), tous les accélérateurs utilisent des champs de haute fréquence pour l'accélération des particules. Quelques idées d'autres mécanismes, évoquées autour de 1960, ont été vite abandonnées ; seul l'accélérateur à plasma revient aujourd'hui sous la forme du « laser beat-wave accelerator » (PLBW), ce qui est possible grâce à l'existence, récente, de lasers de très haute puissance et d'une durée de l'impulsion très courte. Plusieurs équipes ont ainsi réussi récemment à obtenir dans ces expériences des « faisceaux » de 10^9 électrons jusqu'à 200 MeV avec une dispersion inférieure à 10 % ; la zone du plasma excitée par les faisceaux laser était de l'ordre du millimètre, ce qui prouve l'existence de champs au-delà de 100 GeV/m dans le plasma ! Mais ce ne sont pas encore, et de loin, des accélérateurs utilisables.

Tableau 1 : Histoire d'un siècle d'accélérateurs

Les Années 1920		Diverses recherches
1928	R. WIDEROE	Accélérateur linéaire résonant
	COCKROFT WALTON	Générateur à cascades
	V. DE GRAAF	Accélérateur électrostatique
	LAWRENCE LIVINGSTON	Cyclotron
1935	THOMAS	Cyclotron à secteurs focalisants
1940	KERST	Betatron
1945	MCMILLAN	Stabilité de la phase accélératrice
	VEKSLER WIDEROE	Synchrotron Synchro-cyclotron
	VEKSLER	Microtron
1950/52	CRISTOFILOS COURANT LIVINGSTON SNYDER	Synchrotron à focalisation forte
1956	KERST O'NEILL WIDEROE	Collisionneur circulaire (anneaux de stockage)
Env. 1960		FFAG : champs fixes, gradient alterne Accélérateurs à plasma Accélérateurs à effet collectif « Smokatron »
1965	TIGNER	Collisionneur linéaire
1966	BUDKER STRINSKI	Amortissement de faisceaux d'ions par électrons
1968/72	V. DER MEER	Amortissement stochastique de faisceaux
1970	KAPCHINSKIJ	Quadrupôle à haute fréquence (RFQ)
1979	TAJIMA DAWSON	Plasma beatwave accelerator
1982/84	SESSLER SCHNELL	Collisionneur linéaire avec accélérateurs à faisceaux double

Les machines réalisées au CERN

En 50 ans (52 ans si l'on compte la « préhistoire ») et dans le cadre de 8 grands projets, c'est-à-dire

le SYNCHRO-CYCLOTRON (SC)

le SYNCHROTRON à PROTONS (PS)

le COLLISIONNEUR CIRCULAIRE à PROTONS (anneaux de stockage, ISR)

le SUPERSYNCHROTRON à PROTONS (SPS)

le projet des ANTIPROTONS (ppbar)

le COLLISIONNEUR CIRCULAIRE e^+/e^- (LEP)

le COLLISIONNEUR CIRCULAIRE de HADRONS (LHC)

et le COLLISIONNEUR LINEAIRE e^+/e^- (CLIC)

nous avons construit au CERN environ 2 douzaines d'accélérateurs, tous types confondus, la majorité étant des anneaux de type AGS. (Le compte exact dépend de la définition de ce qu'on appelle un accélérateur.) Un nombre qui m'a d'ailleurs autant surpris qu'il a surpris quelques collègues auxquels j'ai demandé une estimation.

SC et PS

La construction du Synchro-Cyclotron (SC) avait été décidée en été 1952 déjà, bien qu'il n'existait ni une organisation formelle, ni un site où cette machine pourrait être implantée. Elle devait pourtant être construite le plus vite possible afin d'attirer au plus tôt le noyau de physiciens, qui devraient préparer en même temps le programme des expériences à réaliser avec le synchrotron (PS) également envisagé.

Le SC (Photo 1), terminé en 1957, fut constamment amélioré (remplacement du diapason par un condensateur rotatif, nouveau faisceau éjecté, etc.). Il a connu des programmes de recherche (physique des pions, $g-2$ (Photo 2), physique nucléaire) pendant 33 ans et a finalement été mis hors service en 1991 quand des perspectives meilleures se sont ouvertes pour les recherches les plus importantes avec ISOLDE (le séparateur d'isotopes) auprès du Booster du PS.

Au printemps 1952, un groupe d'étude avait également été mis en route pour un synchrotron à protons (PS), qui devait être conçu comme une extrapolation, à une énergie de 10 GeV, du Cosmotron (2 GeV) de Brookhaven et du Bévatron (5 GeV) de Berkeley (Photos 3, 4). Ce groupe, en déplacement à Brookhaven au mois d'août, a été mis au courant de l'invention d'une focalisation bien améliorée du faisceau, focalisation qui devrait permettre de réduire radicalement les dimensions de la chambre à vide et donc de l'aimant du synchrotron (Photo 5). Il s'avérait qu'au lieu d'une machine lourde de 30 000 ou 40 000 tonnes d'acier pour un synchrotron de 10 GeV, une machine de 30 GeV n'en demanderait que 3000 tonnes !

En contrepartie, une grande précision de la fabrication, une très bonne stabilité du support (Photo 6) et une très bonne précision de l'alignement (Photo 7) s'avéraient nécessaires. Ces exigences sont restées primordiales pendant toutes ces années (Photo 8), mais l'expérience a montré que la stabilité du rocher sous la région de Genève, la molasse, était suffisante même sans le système de support compliqué de la Photo 6.

Au retour de Brookhaven, le groupe d'experts a reçu l'accord du Conseil Provisoire pour orienter les études dans cette nouvelle direction, appelée à champ alterné (AGS) ou focalisation forte, une décision courageuse qui s'est avérée une décision clef pour toute l'évolution du CERN. Non seulement à cause de la masse réduite d'acier à implanter, mais aussi parce que les dimensions réduites du faisceau permettent son éjection complète du synchrotron et son transfert vers d'autres machines, ce qui serait inimaginable autrement.

Un travail intense commença dans plusieurs laboratoires et universités européens et, dès octobre 1953, une première équipe s'installait dans des locaux provisoires à l'Institut de Physique à Genève. Le très bon esprit de collaboration qui s'est installé dès le départ dans les équipes multinationales (Photo 9) est resté, avec le courage des décideurs et la confiance des États, une clef du succès du laboratoire.

Les travaux sur le site de Meyrin commencèrent en mai 1954. La Convention entra en force en fin septembre, il y a 50 ans. En mi-56, 140 personnes travaillaient déjà dans les groupes du PS, et dès 1957 des composants de la machine arrivaient à Meyrin. Le montage de l'anneau PS était terminé en juillet 1959 et la première accélération à l'énergie de 24 GeV fut réussie en novembre (Photos 10, 11).

Des programmes d'amélioration (Tableau 2) virent bientôt le jour et amenèrent les premiers changements importants (Photos 12, 13) du PS. Changements qui ont continué suivant les nécessités des projets successifs, qui ont modifié et multiplié les fonctions du PS et qui ont donné la preuve de la flexibilité du principe AGS. Voir quelques exemples de changements et des résultats obtenus (Photos 14 à 27).

Tableau 2 : Tout (ou presque) a été modifié ou remplacé, et de nouveaux systèmes ont été ajoutés

Remplacements divers pour cause d'irradiation
Systèmes d'éjection lente et rapide
Raccourcissement du cycle de 3 sec. à 1 sec. → nouvelle alimentation pour l'aimant nouveau système d'accélération
Refonte du système à vide Nouvelles instrumentations pour l'observation du faisceau Contrôles par ordinateurs
Nouvelles zones expérimentales (avec leurs faisceaux externes) Transfert du faisceau vers les ISR Transfert du faisceau vers le SPS
Et pour augmenter l'intensité du faisceau, les projets du BOOSTER et LINAC 2 ont été réalisés

ISR ou/et SPS

Dès l'achèvement des projets initiaux, la question de l'avenir du laboratoire s'est posée. Il fut rapidement entendu qu'on ne devait pas se contenter de la simple opération des machines terminées. Deux lignes possibles de développement ont été discutées à ce moment dans les conférences internationales : un synchrotron d'une énergie de 200 à 300 GeV ou des anneaux de stockage (collisionneur circulaire), les deux pouvant être alimentés en protons par le faisceau du PS.

Les discussions entre les partisans de l'un ou l'autre aspect de l'alternative se passaient dans une atmosphère passionnée. L'énergie limitée disponible dans l'interaction d'un faisceau de 300 GeV avec une cible fixe, mais avec un taux d'événements convenable, était opposée à l'énergie de $2 \times 25 = 50$ GeV dans un collisionneur (qui correspondait à un accélérateur de l'ordre de 2000 GeV) mais à un taux d'interaction faible et, pour une première machine du genre, incertain. Aussi, si le premier aspect de l'alternative était considérée comme une « simple » extrapolation du PS, le second par contre, paraissait une voie nouvelle et courageuse, comparable à la décision pour le PS dix ans plus tôt.

Après deux ans d'intenses échanges d'arguments et après la mise en place de l'ECFA (European Committee for Future Accelerators) la décision d'aller de l'avant avec les ISR a été prise. Cette machine fut construite entre 1965 et 1970. De forts arguments pour ne pas négliger des domaines importants de la physique, tel que la physique des neutrinos, ont pourtant continué à être avancés et ont abouti au début de 1970 à la décision de construire aussi le SPS.

À quel endroit en Europe la « machine de 300 GeV » devait-elle être construite ? La question de savoir s'il fallait ou non mettre en place un deuxième laboratoire pour la grande machine—pour raisons géologiques ou politiques—s'entremêlait avec la discussion du type de recherche à entreprendre. Avec Colin Ramm, mon chef de division en ce temps (1961), nous examinâmes les plans de la région jusqu'à Lausanne pour trouver un endroit assez plat pour une machine de quelque 2 km de diamètre. Quelle surprise ce fût quand j'arrivais un jour avec la conclusion que les terrains près du CERN, de l'autre côté de la route de Meyrin, étaient les seuls qui s'y prêtaient d'une façon presque idéale, surtout si la machine était construite en souterrain : des ingénieurs de l'entreprise du barrage Grande-Dixence, consultés, nous ont encouragé à utiliser un tunnelier... Cela valait la peine d'attendre quelques années avant de sortir une telle proposition de son tiroir !

À la réflexion, il était essentiel de construire les deux machines. La construction des ISR fut couronnée de succès ; la qualité du vide, essentiel pour son fonctionnement, ainsi que les courants de protons stockés (au-dessus de 50 ampères), ont largement dépassé les prévisions initiales (Photos 28 à 30). Les expériences avec une telle machine, par contre, demandaient un temps d'apprentissage ; d'importantes découvertes n'ont été publiées que tardivement par manque de confiance en face de résultats imprévus. L'achèvement des ISR a été aussi un facteur essentiel dans la décision, très courageuse, de lancer au CERN le projet ppbar. L'arrêt de la machine en 1984 ne fut admis par la communauté scientifique que sous une pression budgétaire extrême.

Le CERN serait impensable aujourd'hui sans le SPS (Photos 31 à 34). La « machine à 300 GeV », la première au CERN avec aimants à fonctions séparées (dipôles et quadripôles), n'a pas tardé longtemps avant de produire des protons de 450 GeV. La physique faite avec ses faisceaux, des neutrinos aux ions lourds, ses transformations en collisionneur pour protons et antiprotons, en accélérateur d'électrons et positrons pour LEP et comme injecteur pour le LHC, démontrent que cette machine fait partie de l'infrastructure scientifique de base du laboratoire au même titre que le PS.

ppbar et LEAR

Les expériences ppbar constituent sans doute le plus important succès obtenu avec le SPS, et un des plus grands du CERN. Proposées par Carlo Rubbia dès la fin de la construction du SPS, elles ont mobilisé les ressources de presque tout le laboratoire pour organiser :

- la construction de l'anneau ICE (Initial Cooling Experiment) pour le développement de la technique de l'amortissement du faisceau, vérifié pour la première fois dans les ISR (Photo 35) ;
- les modifications du PS comme source d'antiprotons (faisceau très dense de protons à 26 GeV sur cible pour production d'antiprotons de 3.5 GeV, etc.) ;
- la construction de l'accumulateur d'antiprotons (AA, Photo 36), équipé du premier système puissant d'amortissement du faisceau ;
- la transformation du SPS en collisionneur (opération en continu à 270 GeV, zones expérimentales en cavernes, etc.) ;
- et la construction des plus grands ensembles d'expériences de ce temps.

Je n'ai pas à insister ici sur l'importance de la découverte des bosons Z et W en tant que clef de voûte du Modèle Standard de la physique des particules.

La disponibilité d'antiprotons a également ouvert la possibilité d'expériences avec antiprotons de basse énergie. Pendant que quelques physiciens enthousiastes ont obtenu l'acceptation d'un tel programme de recherche, une petite équipe de physiciens à la machine du PS a conçu et construit l'anneau LEAR (Low Energy Antiproton Ring), destiné à ralentir à environ 100 MeV les antiprotons (Photo 37). L'intérêt pour des énergies de plus en plus basses n'a jamais cessé ; aujourd'hui c'est l'anneau AD (Antiproton Decelerator) suivi d'un RFQ (Radio-Frequency Quadrupole) décélérateur (Photo 38) qui permet de descendre à l'énergie de quelques MeV.

LEP

En 1974 déjà, Burton Richter du SLAC, lors d'une visite de recherche, avait lancé l'idée de construire un grand synchrotron à électrons au CERN. Par la suite, l'ECFA a formé des Groupes de Travail qui ont étudié diverses versions d'une telle machine. Une machine à 100 GeV (en 1977), jugée trop grande et trop chère, fut suivie de la proposition d'une machine à 70 GeV (en 1978), jugée un peu trop petite, et d'une autre à 86 GeV (1979). Finalement, en 1981, le Conseil a accepté le projet LEP (Large Electron-Positron collider) : une machine à construire en deux étapes et avec un budget restreint au strict minimum. Équipé de 4 cavernes pour expériences au lieu de 8, le LEP devait d'abord accélérer les électrons (et positrons) à 50 GeV pour l'étude du boson Z^0 . Dans une deuxième étape il devait être équipé d'un système d'accélération supraconducteur afin d'accélérer les faisceaux aux environs de 100 GeV pour l'étude des bosons W.

Afin de réduire le coût du projet, l'intention contenue dans les pré-études de construire aussi un nouveau système d'injecteurs (linac et synchrotron de 20 GeV) a été remplacée par l'utilisation des synchrotrons existants, PS et SPS, modifiés pour l'accélération d'électrons et équipés d'un nouveau linac (Photo 39), plus un anneau d'accumulation de positrons.

La position du LEP par rapport au SPS avait été choisie pour qu'avec un minimum de tunnels supplémentaires, les protons du SPS puissent être conduits vers le LEP afin d'étudier les collisions e-p. Cette position avait le désavantage qu'une longue partie du tunnel (env. 12 km) se trouvait sous le Jura, la partie la plus distante se trouvant à une profondeur de 1000 mètres sous les cimes de la montagne. Nous avons alors appris que le risque de rencontrer des cavernes ou des failles souterraines pleines de grandes quantités d'eau était considérable, mettant en péril les équipes de travailleurs (et peut-être le projet entier) dans un tunnel sans sorties naturelles. Nous avons donc proposé la position actuelle, moins profondément enfouie sous le Jura, avec une sécurité accrue mais à un coût supérieur pour la liaison éventuelle avec le SPS. Les projets d'expériences e-p au LEP n'ont pas été poursuivis !

Les aimants du LEP, pour une fois, ne posaient pas le problème d'obtenir le champ magnétique le plus élevé possible, mais par contre, celui de créer un champ bien uniforme à une induction très basse ; cela à cause du grand rayon de courbure qu'il a fallu choisir afin de limiter les pertes d'énergie dues au rayonnement synchrotronique des électrons. La solution économique du problème a été trouvée en faisant des aimants « dilués » constitués de 27 % de tôles d'acier et 73 % de béton (Photo 40).

Le système de pompage du vide représentait une des plus grandes difficultés du projet LEP, la conductance de la chambre à vide étant limitée, et le champ magnétique trop faible pour un pompage ionique distribué. Le pompage par getter, (Photo 41) installé dans les dipôles tout autour de la machine, fut la solution simple et efficace, essentielle pour permettre un excellent résultat de la machine.

Le système d'accélération avec cavités en cuivre pour la phase 1 comportait des « cavités de stockage » où, avec un faisceau de 4 paquets (un paquet tout les 6.5 km !), l'énergie RF était stockée à faibles pertes entre les passages des paquets (Photo 42). Le développement ciblé de cavités RF supraconductrices a été entamé au courant des années 70 déjà. Après une période utilisant des cavités en tôles de niobium (supraconducteur à basse température), les meilleurs résultats ont été obtenus avec des cavités en cuivre recouvertes d'une mince couche de niobium, profitant de la meilleure conductibilité thermique du cuivre. Deux cent soixante-douze cavités supraconductrices ont été installées pour la phase 2 du LEP, qui ont permis d'atteindre une énergie de 104.5 GeV.

La planification du projet prévoyait un processus logique comportant deux tunneliers opérant en sens opposé à partir du point bas, à coté de l'aéroport (ainsi qu'un chantier indépendant sous le Jura) suivis par les équipes de finition, puis celles pour l'installation de la machine. Ce processus fut toutefois complètement bouleversé par une longue grève au début des travaux, grève qui a retardé l'excavation du puits bas, et par les aléas du génie civil : des venues d'eau ont retardé, malgré l'emploi de la méthode « classique » de charges explosives précédées de sondages à l'avancement, la progression du tunnel dans le secteur du Jura. Il a donc fallu engager le percement du tunnel aux endroits où un puits était déjà disponible et réorganiser en conséquence l'installation de la machine. Malgré ces aléas, les faisceaux faisaient les premiers tours dans le LEP (Photo 43) sept ans et demi après le lancement du projet et un mois plus tard les premiers bosons Z^0 furent observés dans les quatre expériences (Photo 44).

Le LEP a pleinement rempli les espoirs concernant les mesures à très grande précision de paramètres du Modèle Standard. Mais qui dit précision, dit aussi sensibilité : la déformation de l'anneau due aux marées lunaires de la terre ferme a été enregistrée, ainsi que des courants de terre induits par le passage du TGV entre Meyrin et Satigny ! Il reste pourtant un regret, celui d'avoir manqué de peu (*peut-être*) une découverte tant attendue, celle du boson de Higgs, faute d'avoir installé toutes les cavités supra qui auraient pu trouver place dans le tunnel (Photo 45). Le boson de Higgs fera donc partie du domaine du LHC.

Technologies

Comme on l'a vu en parcourant un par un les projets réalisés, la construction d'un accélérateur fait appel à un bon nombre de technologies ; des exigences extrêmes ont souvent été imposées afin d'obtenir les meilleurs résultats des machines. Dans certains domaines, un progrès technologique général a été indispensable, comme le développement rapide de l'électronique analogique et digitale et les outils et machines numériques qui en découlent. Dans d'autres domaines, des développements effectués au CERN, souvent en collaboration mais aussi en compétition avec les laboratoires d'autres pays, ont produit des avancées qui, en leur temps, étaient remarquables et certaines le sont restées. Mentionnons, sans être exhaustif :

- le vide de l'ordre de 10^{-12} Torr tout autour des ISR et les alimentations stabilisées à 10^{-7} ;
- des cavités RF à dépôt de niobium produisant 7.5 MV/m et le pompage par getter du vide du LEP ;
- la métrologie à grande distance pour toutes nos machines en surface et souterrains ;
- le développement de dipôles supraconducteurs de 9 T, refroidis par hélium suprafluide, pour LHC ;
- le système d'accélération CLIC dont les cavités 30 GHz donnent un champ de 150 MV/m.

Beaucoup de détails et beaucoup de travail se cachent derrière ces quelques chiffres, mais le temps qui m'est alloué ne me permet pas de détailler plus.

Les projets d'avenir

À court terme

C'est en 2006 que devra être mis en route le premier des projets en cours, le CNGS (CERN Neutrinos for Gran Sasso). Des neutrinos produits par le faisceau du SPS dans une déviation de la section droite SS 4 seront envoyés en direction du laboratoire souterrain du Gran Sasso, à 730 km de distance. L'interaction des neutrinos avec la matière est si faible que le faisceau y arrivera pratiquement sans atténuation, et quelques-uns de ces neutrinos produiront des réactions dans les détecteurs qui y sont installés (Photo 46), et avec lesquels on pourra mesurer l'intensité des « oscillations de neutrinos ».

Le concept d'un collisionneur de très haute énergie, le Large Hadron Collider (LHC), était évoqué dès les années 70 et son installation dans le tunnel du LEP prévue dès le début de ce projet. Comme pour les projets précédents, des groupes de travail de l'ECFA ont délibéré des questions scientifiques en cours, des expériences susceptibles d'y trouver des réponses, ainsi que des spécifications correspondantes à donner à la machine. Une énergie des protons de 7 TeV, a été arrêtée, correspondant à une induction magnétique de 8.3 Tesla pour les dipôles, niveau d'induction que le Conseil a approuvé comme base du projet en 1996.

La valeur de 8.3 Tesla (plus la marge de sécurité de 10 % qui doit lui être ajoutée !) s'est avérée un but difficile à atteindre ; preuve en est la durée des travaux de développement qui, commencés au milieu des années 80, ont pris presque 20 ans avant de pouvoir lancer la fabrication en série des dipôles (Photo 47, 48). Il a fallu abaisser la température d'opération à 1.9° K afin de transformer l'hélium liquide en état superfluide ; pour pouvoir maintenir cette température, un écran absorbant le rayonnement synchrotronique a dû être introduit dans la chambre à vide. (À noter que 40 ans d'études acharnées se sont écoulés depuis la découverte, au début des années 60, des supraconducteurs « durs », c'est-à-dire compatibles avec des champs élevés, découverte saluée avec beaucoup d'enthousiasme actuellement !)

De nombreuses autres difficultés ont dû être surmontées, tels que la stabilité de faisceaux très intenses, les problèmes d'absorption, en cas d'imprévu, de faisceaux très puissants et de l'énergie énorme contenue dans les dipôles, et l'invention d'une technique inédite pour l'excavation de cavernes de très grande portée. Le grand moment de l'achèvement du projet est maintenant prévu pour mi-2007 : la Photo 49 montre le schéma du réseau de machines du CERN à ce moment.

À long terme

Il existe plusieurs options pour la décennie suivant l'achèvement du LHC (et son payement complet !), soit :

- des améliorations de l'intensité et/ou densité du faisceau du LHC ou
- une refonte complète du LHC avec des aimants qui supportent un champ sensiblement plus élevé (<15 Tesla ?), ou
- la construction d'une « usine à neutrinos/muons », ou
- la réalisation, après les tests en cours et en projet, d'un collisionneur e^+e^- linéaire, en développement au CERN sous le sigle CLIC (Compact Linear Collider).

Le choix parmi ces options ne pourra certainement pas se faire avant de voir les résultats de quelques années d'expériences sur le LHC. Pour l'instant, on ne peut faire que quelques observations :

- la première et la troisième des options citées ci-dessus passeraient probablement par la construction d'un « **injecteur de courant fort** », un linac d'environ 2.2 GeV pour lequel il est prévu d'utiliser les cavités supraconductrices du LEP2. Ce linac pourrait, dans une première étape, servir pour augmenter l'intensité dans la chaîne PS/SPS/LHC, et servir aussi pour alimenter une possible « **usine à neutrinos** », dont un aperçu schématique est donné dans la Photo 50.
- la deuxième option serait probablement réservée pour le cas d'indication très claire que l'on se trouve avec le LHC, juste en-dessous d'un seuil d'énergie dont le dépassement promettrait des résultats importants. Il est toutefois difficile d'imaginer un « grand » saut en énergie, compte tenu des forces en jeu et de l'énergie contenue dans le champ de tels aimants.

Le développement en cours d'un **collisionneur e^+e^- linéaire** (« **CLIC** ») constitue sans doute l'atout le plus important pour l'avenir du CERN. Il repose sur le concept, jamais réalisé à ce jour, d'un « accélérateur à double faisceau », consistant à alimenter des cavités accélératrices de très haute fréquence (30 GHz) par un faisceau primaire (« drive beam »), lesquelles cavités produiront un champ RF de 150 MV/m pour le faisceau principal (« main beam »), soit quatre fois supérieur au meilleur champ estimé dans d'autres projets d'un tel collisionneur.

Sans pouvoir entrer dans les détails du concept dans le cadre de cette présentation, il est intéressant de noter que :

- les travaux d'étude progressent bien (Photo 51) ;
- l'ensemble de la machine fonctionne à température ambiante ;
- un collisionneur de 3 TeV, dont la longueur totale serait inférieure à 40 km (Photo 52), pourrait se loger dans un tunnel aux environs du CERN, avec sa zone expérimentale, ainsi que les préaccélérateurs, dans la zone du labo de Prévessin ;
- toute la puissance requise pour l'accélération du faisceau principal serait fournie par le « drive beam ».

Le sigle « **CLIC** » prendrait ainsi, en français cette fois, une toute nouvelle signification (Photo 53) !



1959

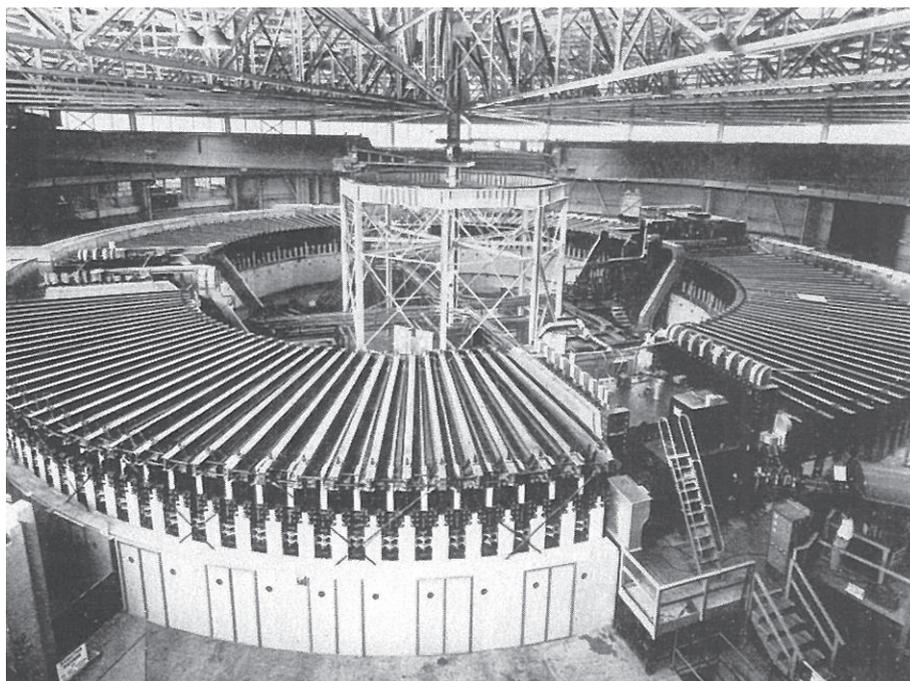
1975



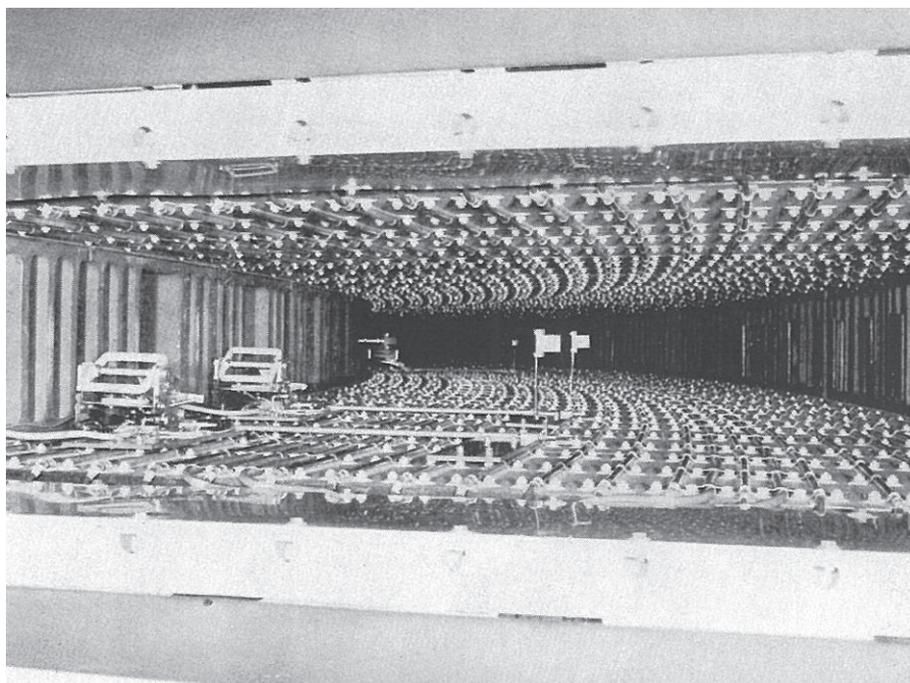
Photo 1—Le SC



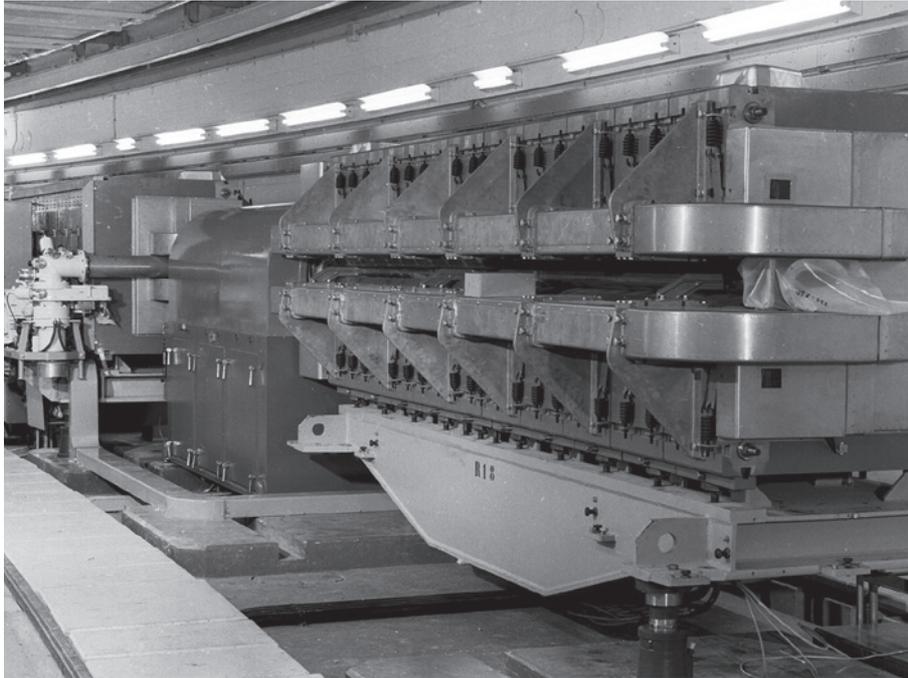
Photo 2—Physiciens, très contents au SC...



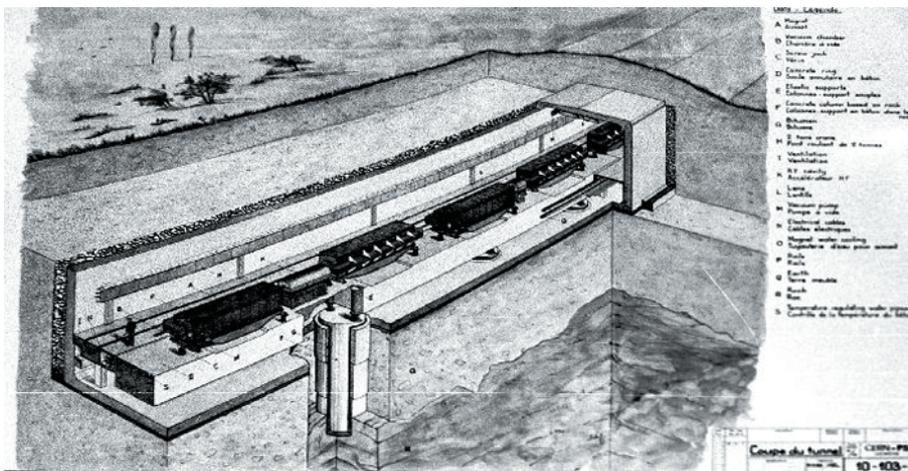
*Photo 3—Le Bévatron (6 GeV)
La 1^{ère} machine pour faire des antiprotons*



*Photo 4—La chambre à vide du Bévatron
Largeur : 1.5 m, hauteur : 0.3 m*



*Photo 5—Un des 100 aimants du PS
La chambre à vide (à peine visible) mesure 15 cm × 7 cm*



*Photo 6—Le PS
Lors de la conception, précision et stabilité étaient le souci primordial. Exemple : le système de support*



*Photo 7—Il n'y a que la précision qui compte ...
1959 : 0.1 mm pour 100 m $\rightarrow 10^{-6}$*



*Photo 8—1984 : 1 mm pour 10 km $\rightarrow 10^{-7}$
Le réseau géodésique LEP servait d'étalon du GPS*



Photo 9—On m'a accepté dans une équipe de jeunes « experts »



Photo 10—Vue extérieure du PS, 1960...



Photo 11—...la fierté de son jeune chef de projet ! (25/11/1959)

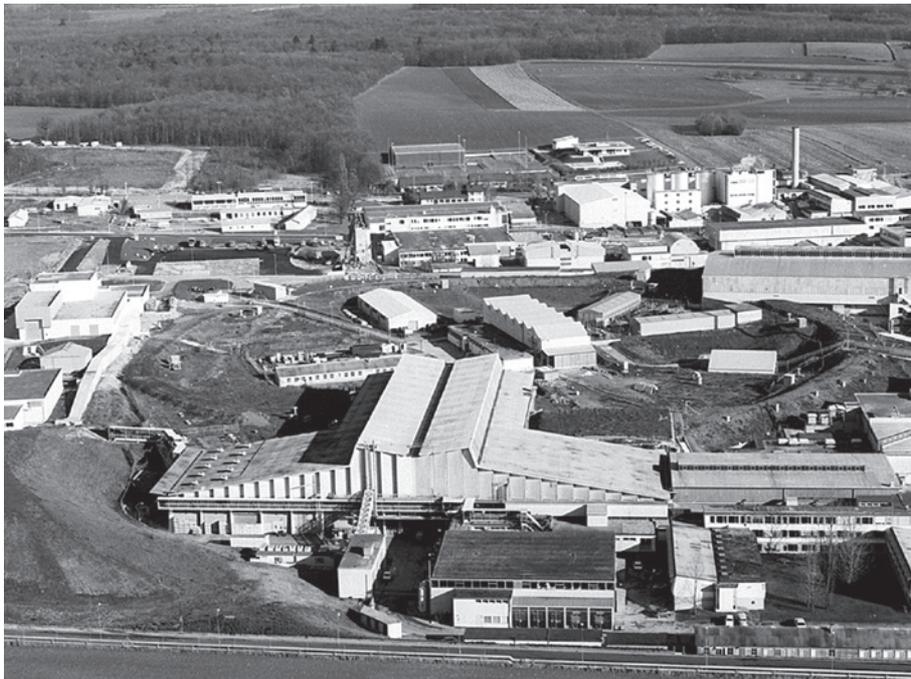


Photo 12—Mais il ne devait pas rester ainsi :15 ans plus tard tout (ou presque) a été bouleversé...

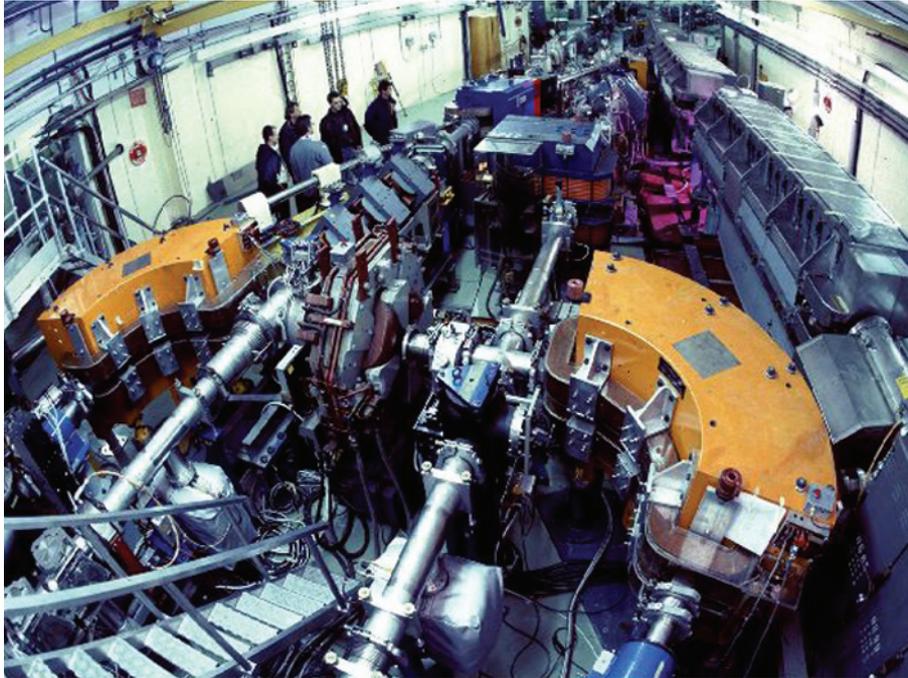
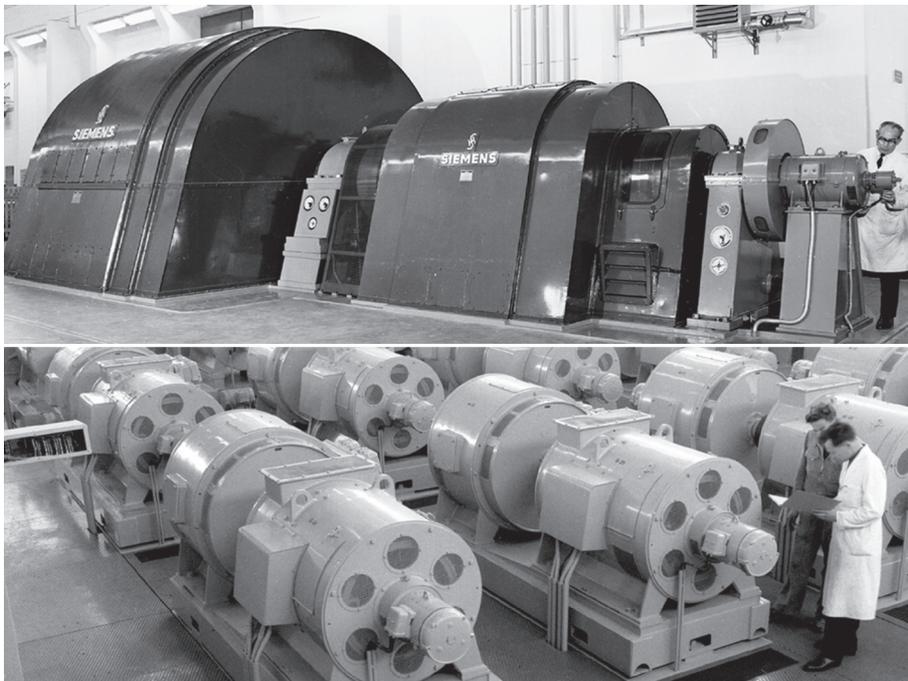


Photo 13—À chacun de trouver son chemin... (zone d'injection)



*Photo 14—La nouvelle génératrice (1969) marche encore aujourd'hui (haut)
Elles, par contre, ont été remplacées par des thyristors (bas)*

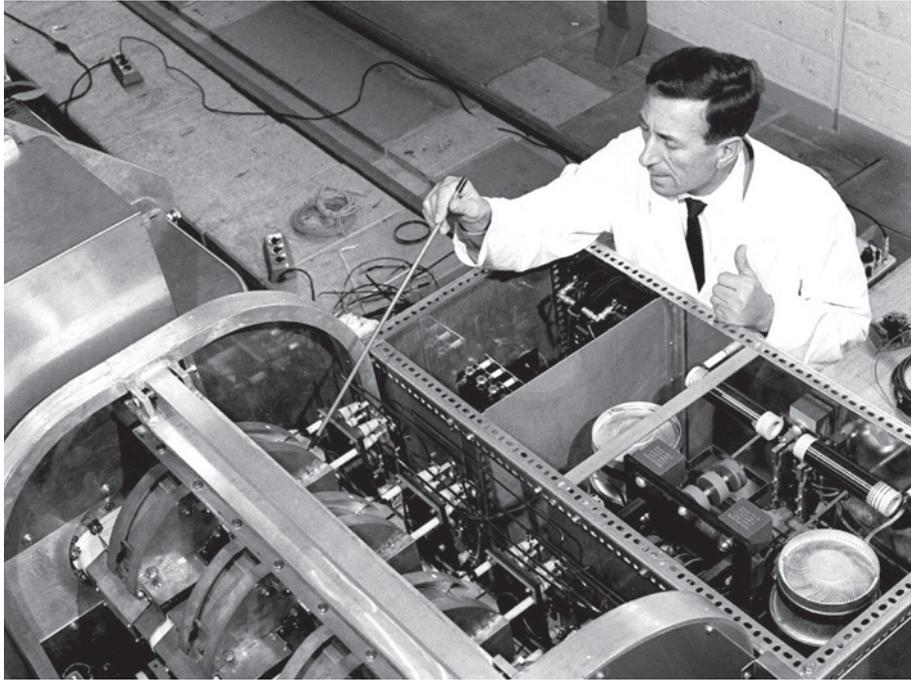


Photo 15—Un équipement délicat dans le tunnel

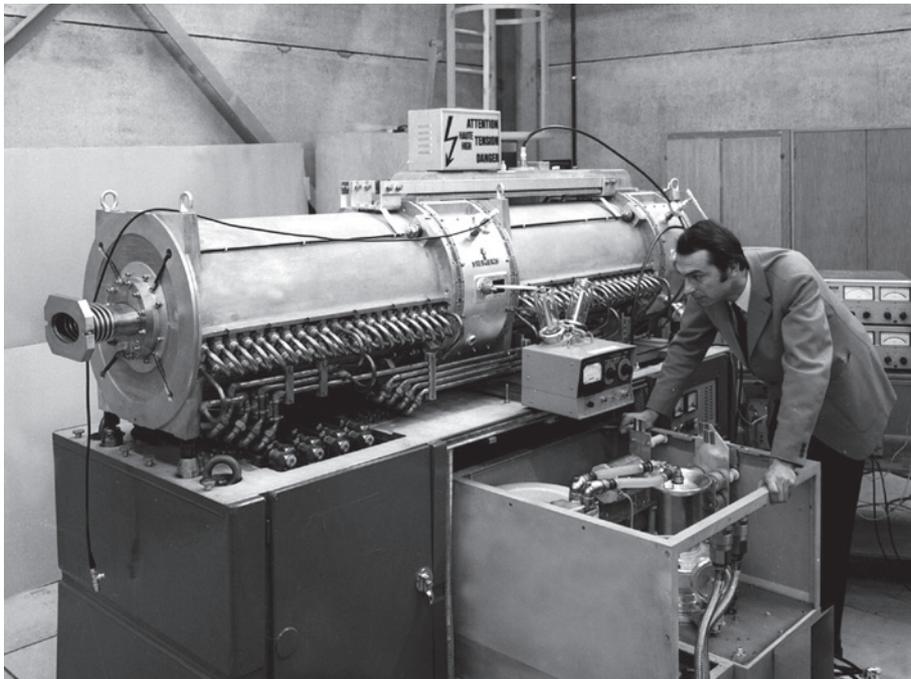


Photo 16—Et la nouvelle version (1972) inerte à l'irradiation

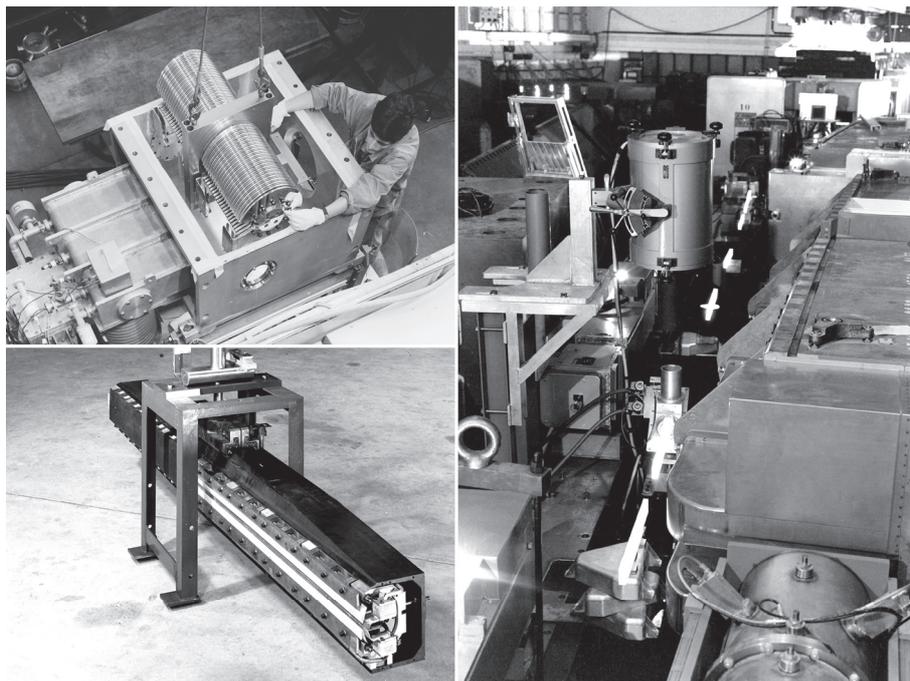
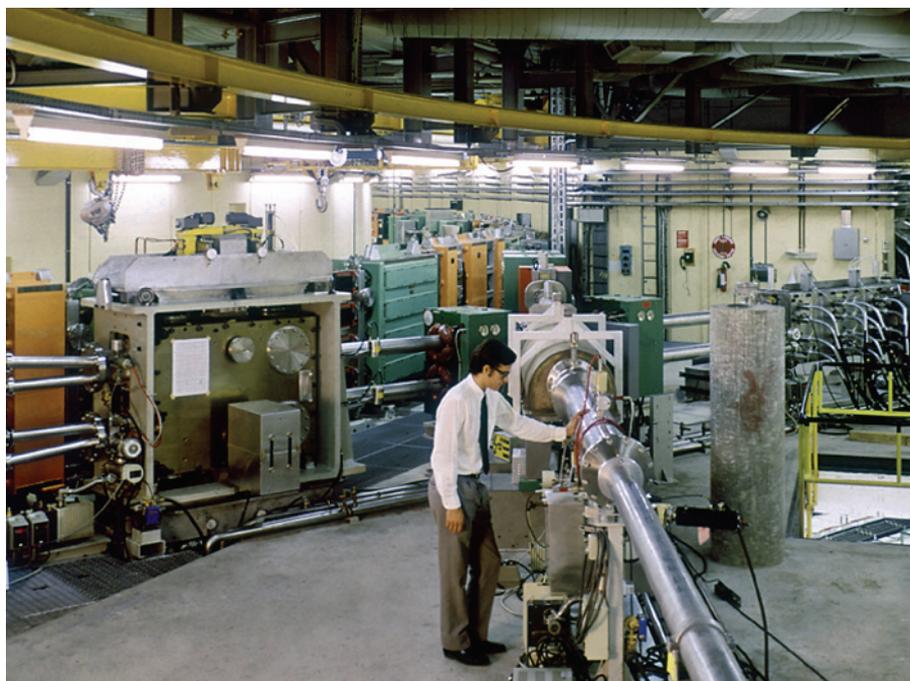


Photo 17—Les aimants d'éjection et en 1963 le premier faisceau éjecté



*Photo 18—Un tout nouveau accélérateur fut ajouté : le BOOSTER (1972)
Quatre anneaux superposés*

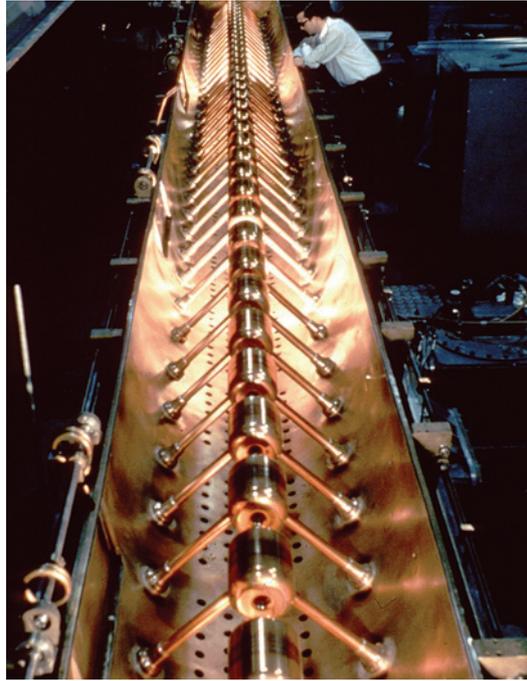


Photo 19—LINAC 1 vue intérieure



Photo 20—...était remplacé en 1976 par une structure satisfaisante le (saint) esprit de la mécanique



Photo 21—Le préaccélérateur Cockcroft-Walton de 750 kV (1975)

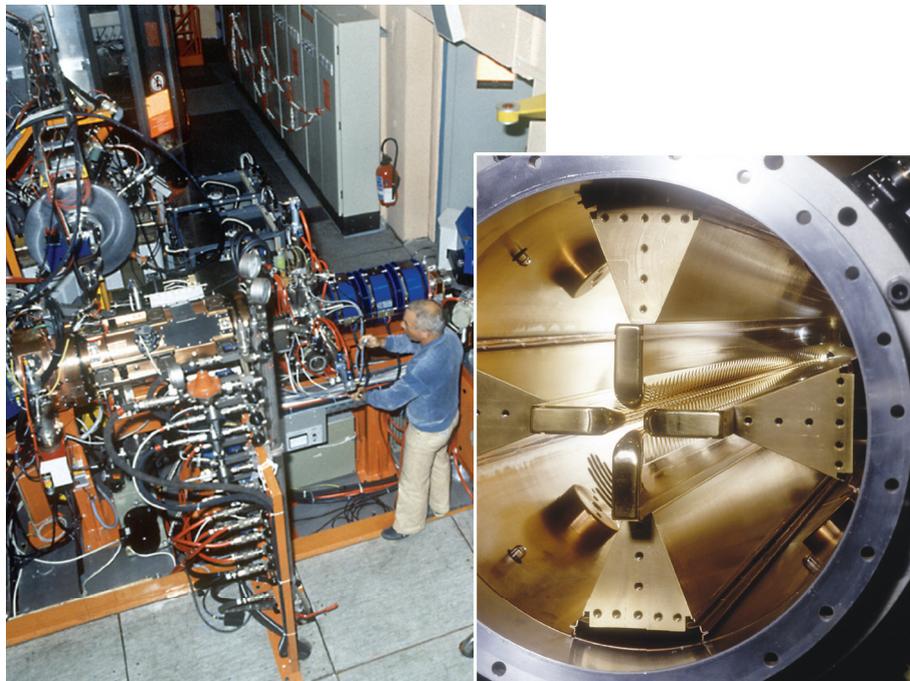


Photo 22—Le Cockcroft-Walton est remplacé par un RFQ

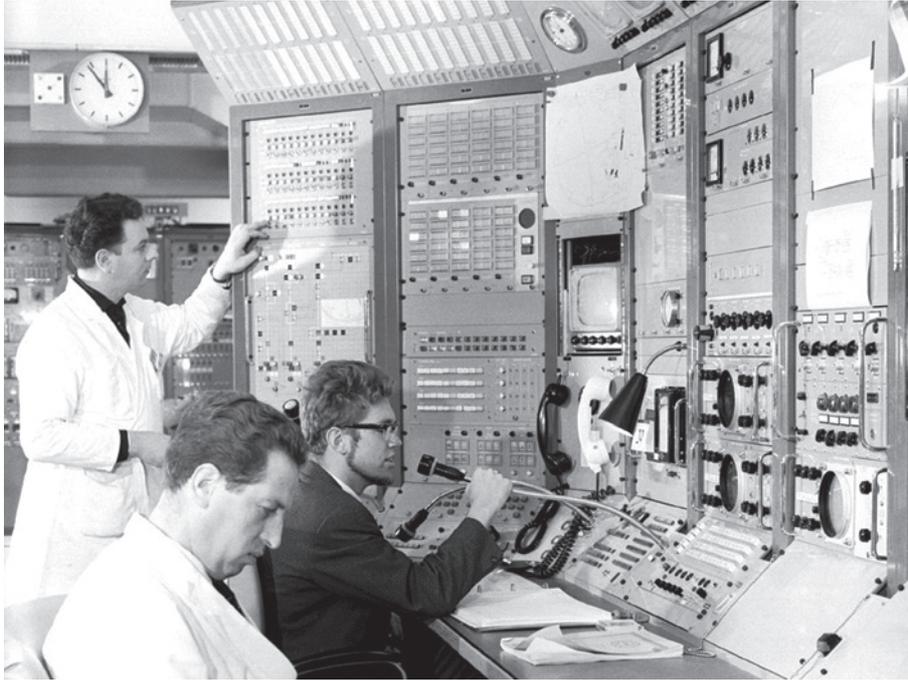


Photo 23—La Salle de Contrôle du PS (1961)

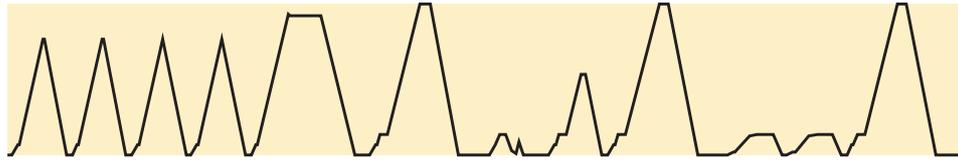


Photo 24—...a subi quelques modifications (1995)

Permet de diriger des faisceaux de particules différentes
à des destinations différentes à l'intérieur d'un
« supercycle »

PS
supercycle

duration:
19.2 s



Particule	Pb	Pb	Pb	Pb	p	p	pbar	p	p	e+	e-	p
PS user	SPS	SPS	SPS	SPS	EAST HALL	AAC	LEAR	MD	AAC	SPS LEP	SPS LEP	AAC

Photo 25—Contrôle par ordinateurs du PS

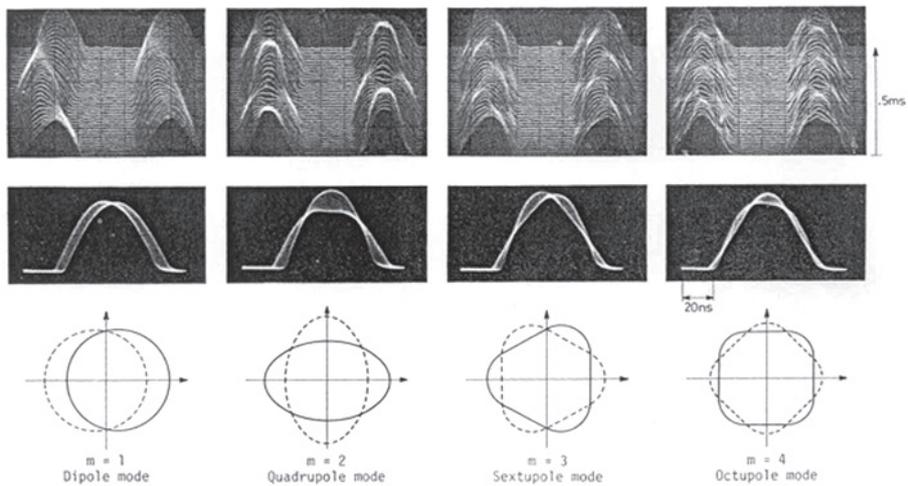


Photo 26—Instrumentation améliorée
Observation d'oscillations des paquets de protons du BOOSTER

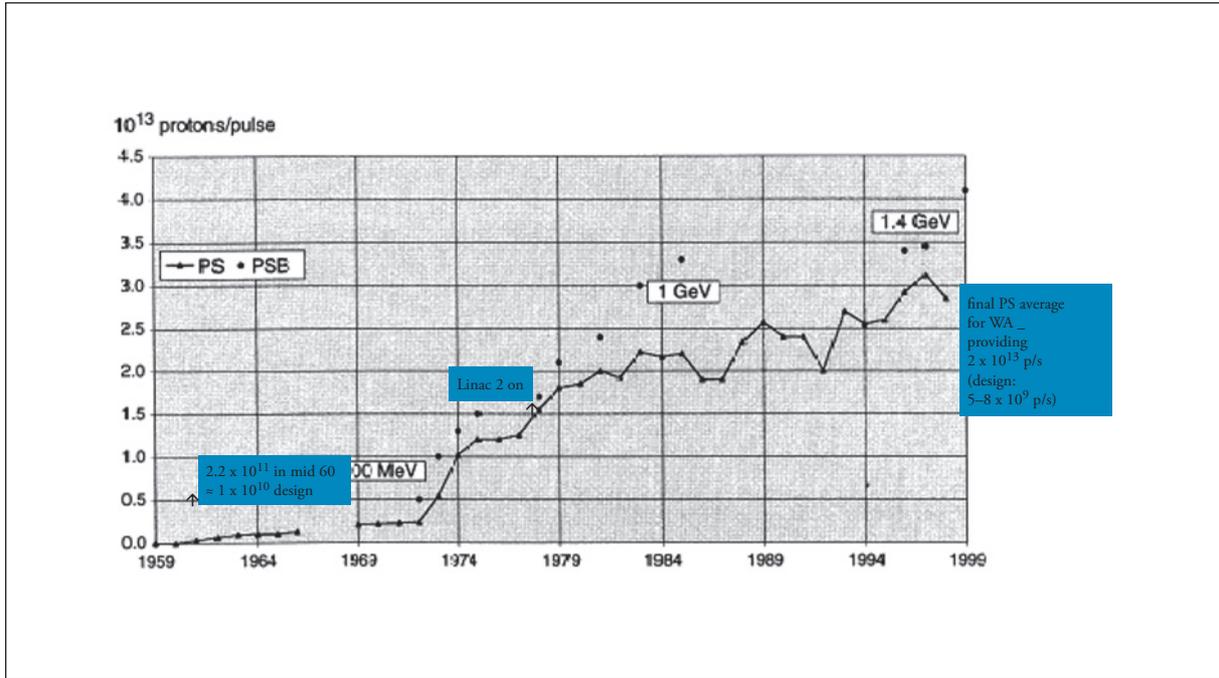


Photo 27—Intensités accélérées par PS et BOOSTER

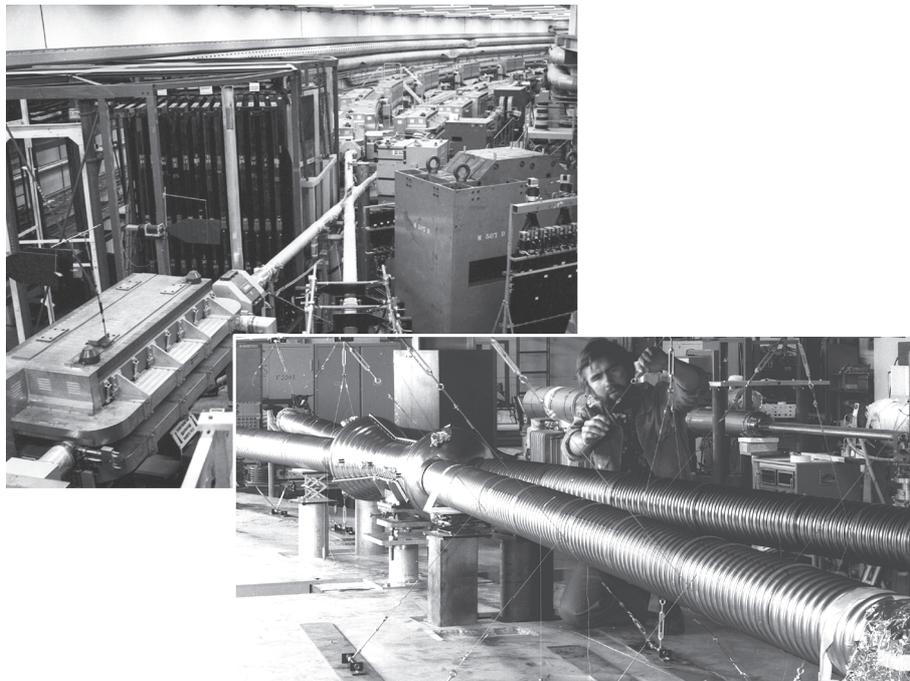


Photo 28—Intersection 1



Photo 29—Intersection 5

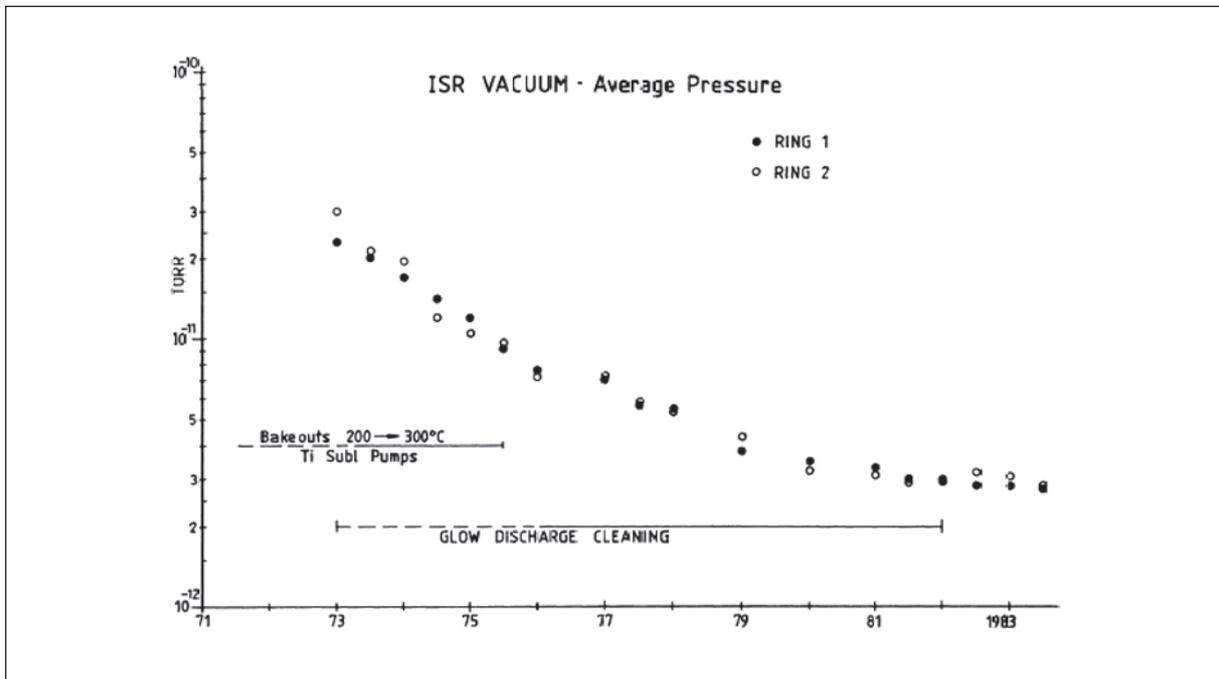


Photo 30—La technologie de l'ultra-vide
Spécification initiale : 10^{-9} Torr



Photo 31—SPS, le 1er accélérateur entièrement en tunnel profond



Photo 32—On est bien arrivé ! Au centimètre près grâce au travail des géomètres !



Photo 33—Les aimants à fonctions séparées poussés à 20 kg

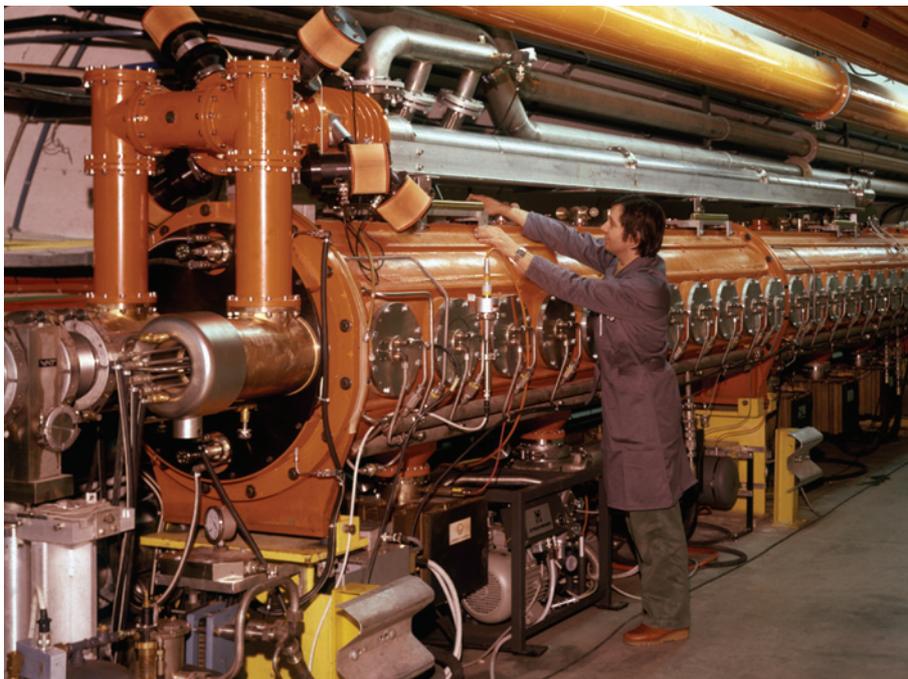


Photo 34—Les cavités à ondes progressives

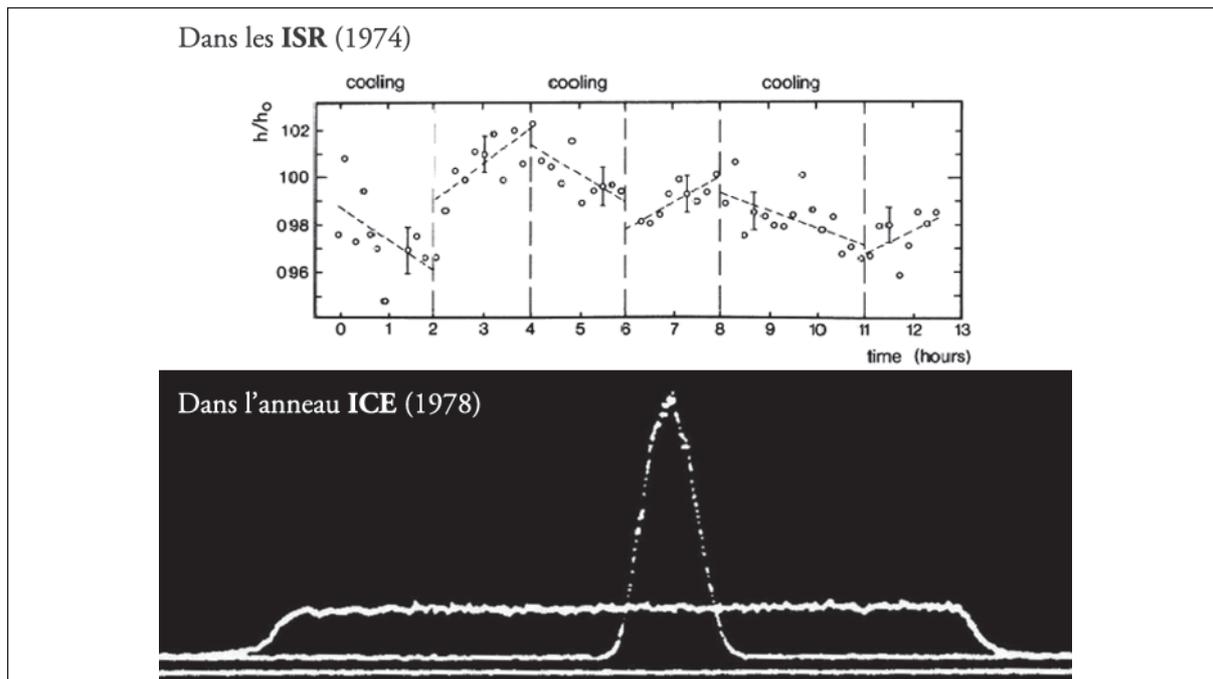


Photo 35—Démonstrations de l'amortissement stochastique, proposé par S. v. der Meer en 1968



Photo 36—Construction d'un accumulateur d'antiprotons

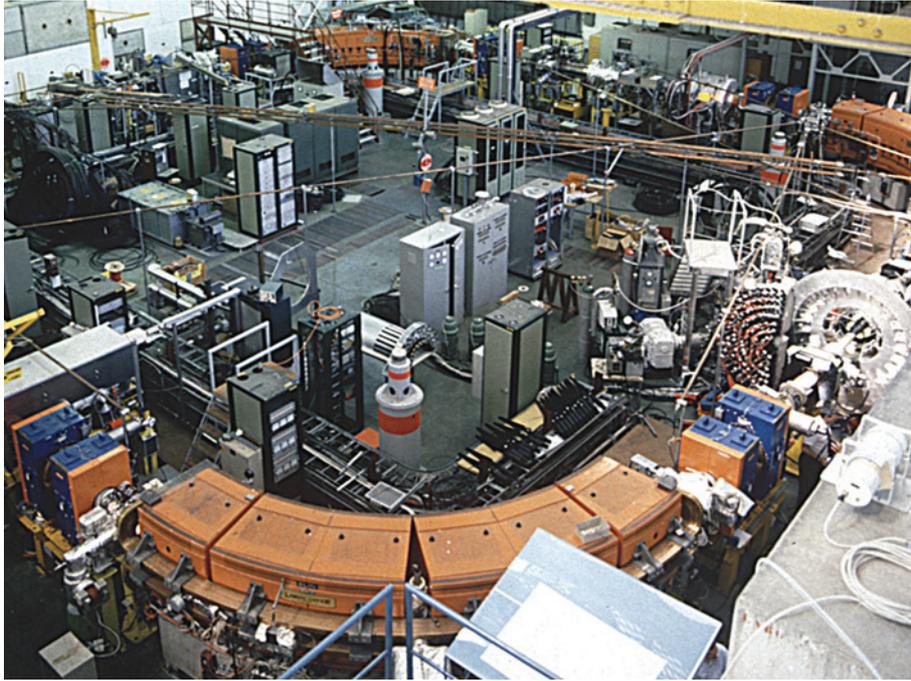


Photo 37—Les antiprotons de basse énergie dans LEAR (Low Energy Antiproton Ring)



Photo 38—Bientôt à la vitesse d'un promeneur ? Un RFQ décélérateur d'antiprotons

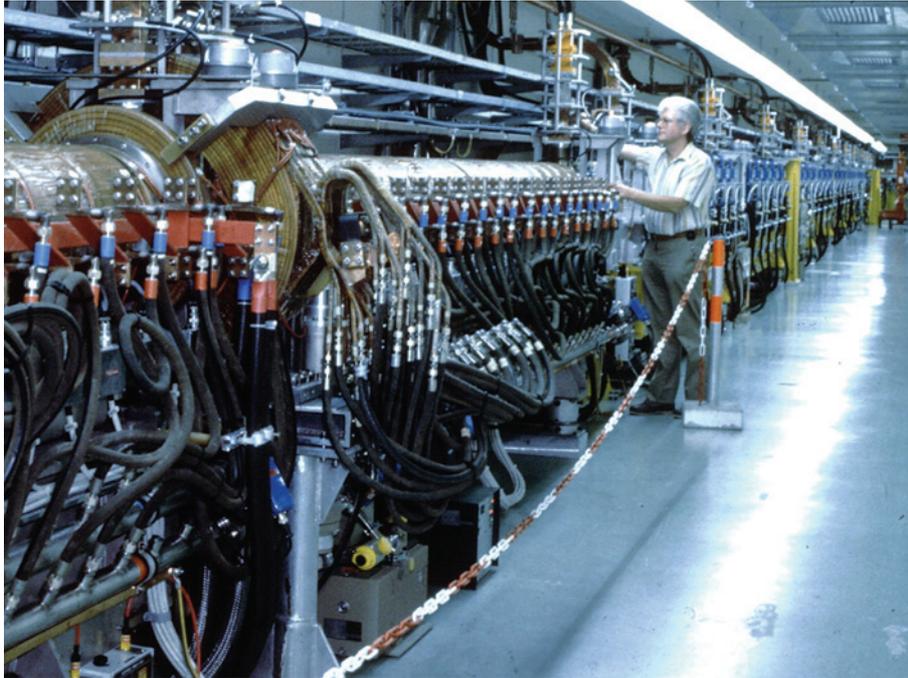


Photo 39—Un nouvel injecteur e^+e^- s'ajoute au PS



Photo 40—Les dipôles « en béton » (pour 80 %)

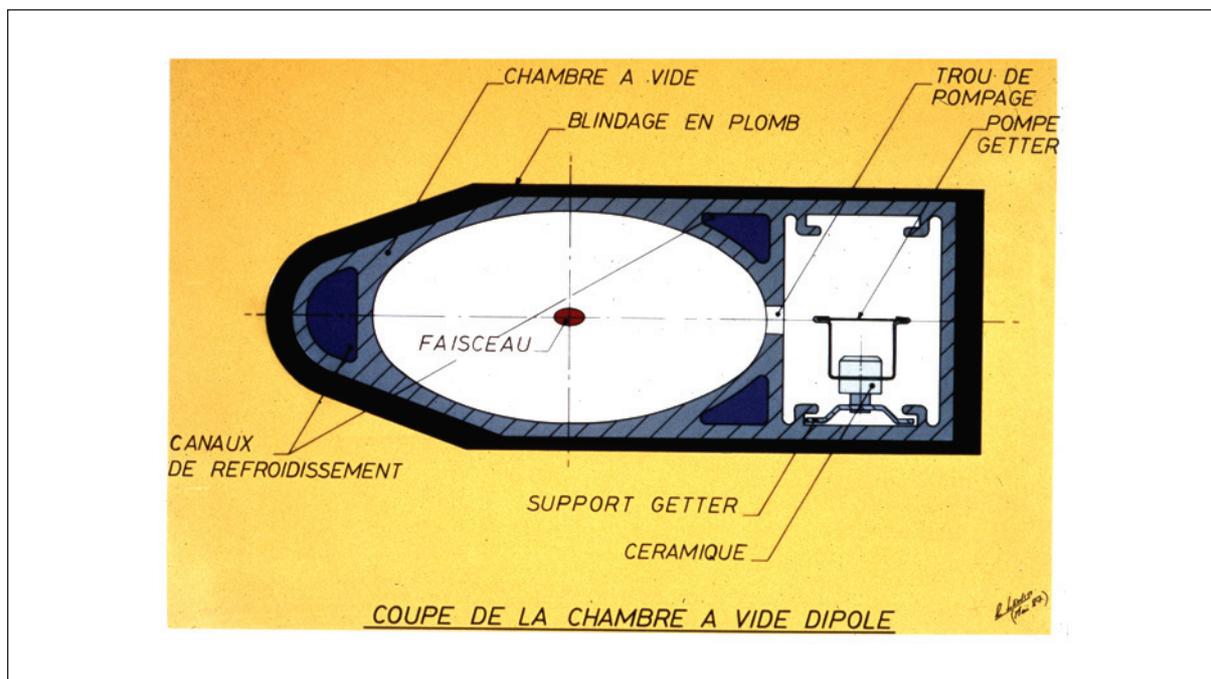


Photo 41—La chambre à vide avec pompe getter et blindage en plomb

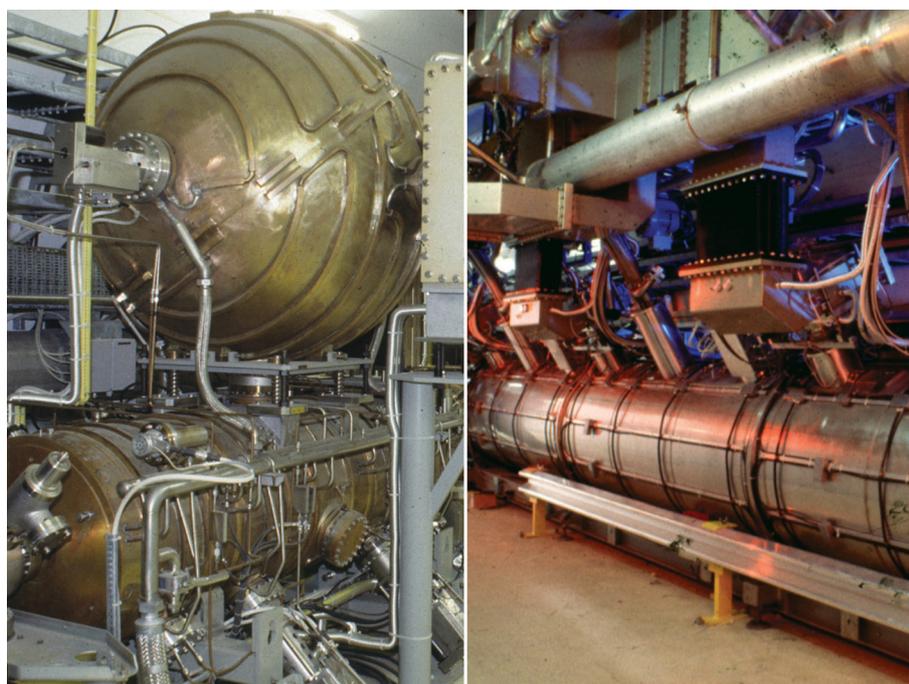


Photo 42—Cavités RF à stockage pour LEP1 et cavités supra pour LEP2



Photo 43—Et un certain 14 juillet tout cela a fini par marcher !



Photo 44—Et on y trouve des évènements spectaculaires ! (Souvenir de Sevilla 1993)

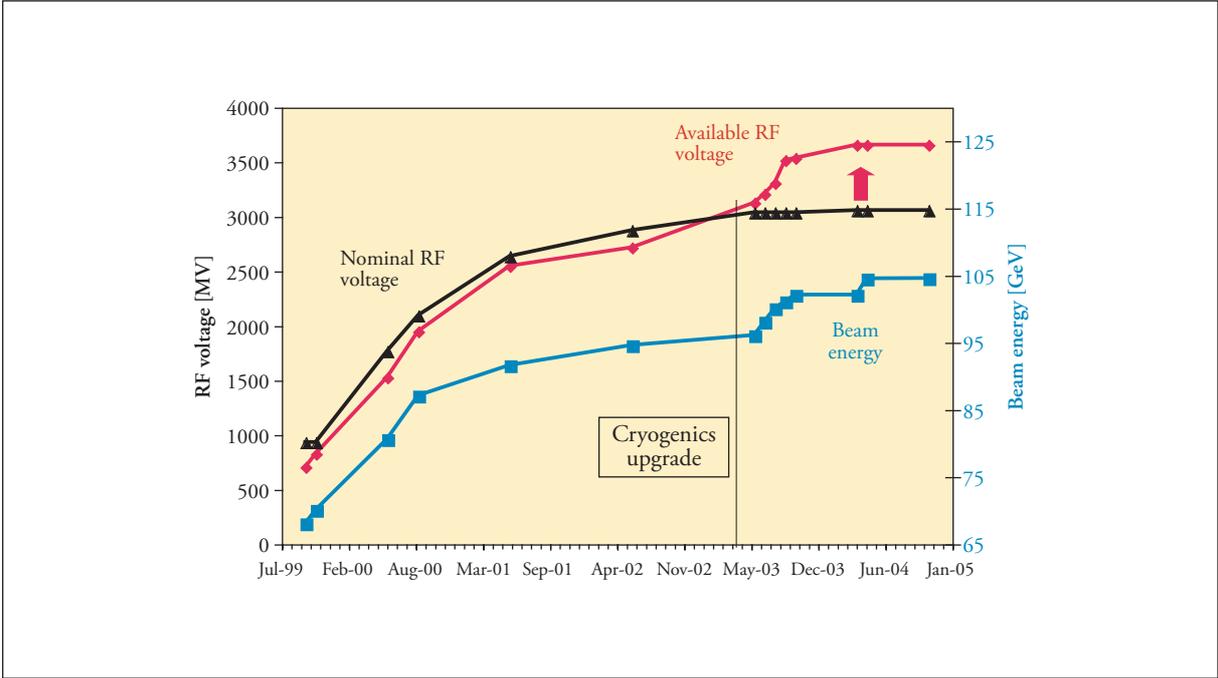


Photo 45—LEP, énergie maximum des faisceaux
 A-t-on fermé le LEP trop tôt ? A-t-on acheté assez de cavités ?

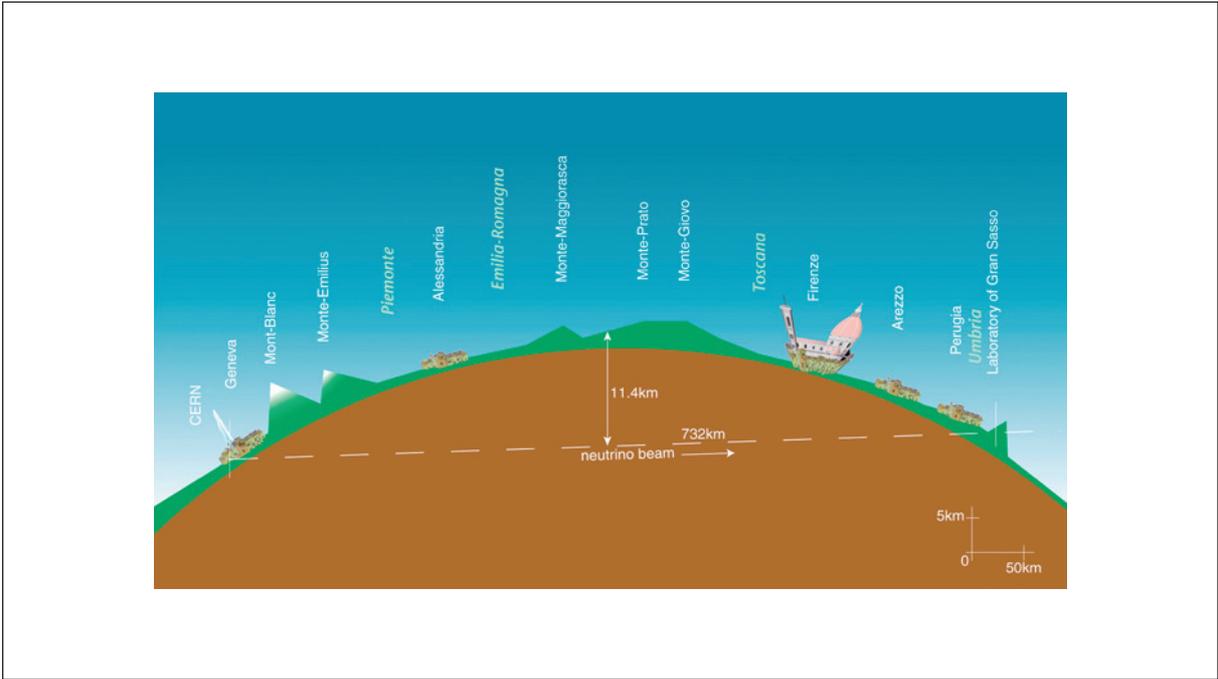


Photo 46—CNGS : des neutrinos de LSS 4 aux expériences sous le Gran Sasso !



Photo 47—LHC, les dipôles arrivent...



Photo 48—...et sont installés dans le tunnel

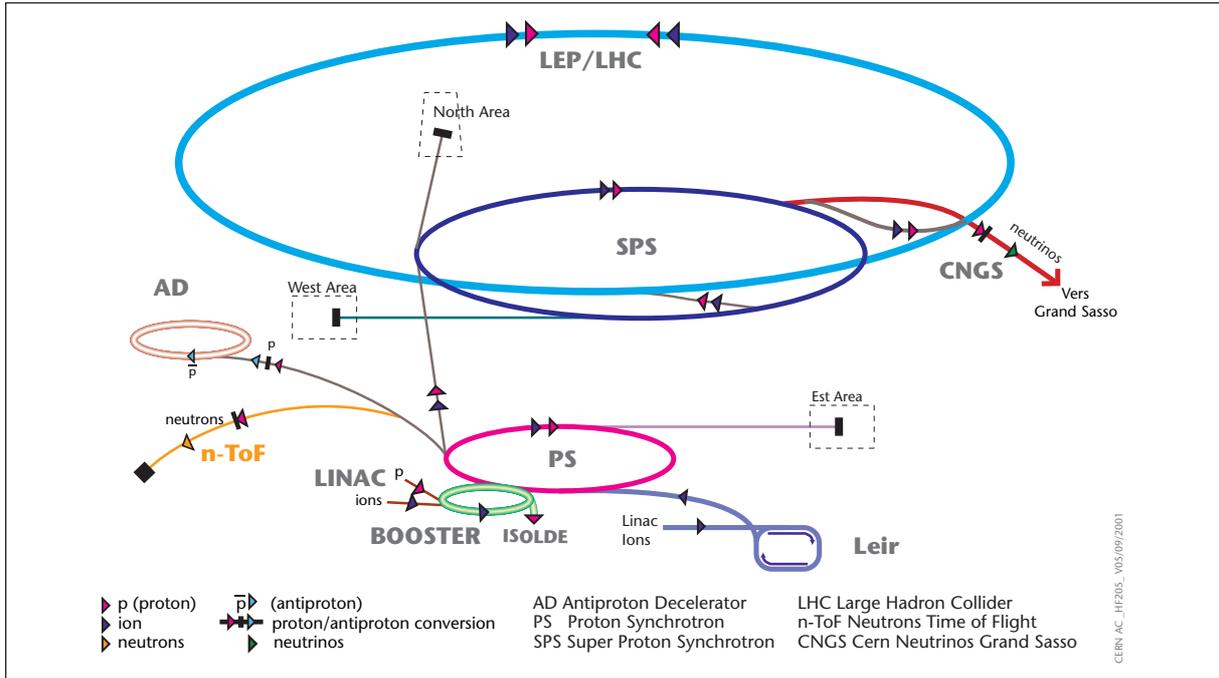


Photo 49—Les accélérateurs du CERN en 2007

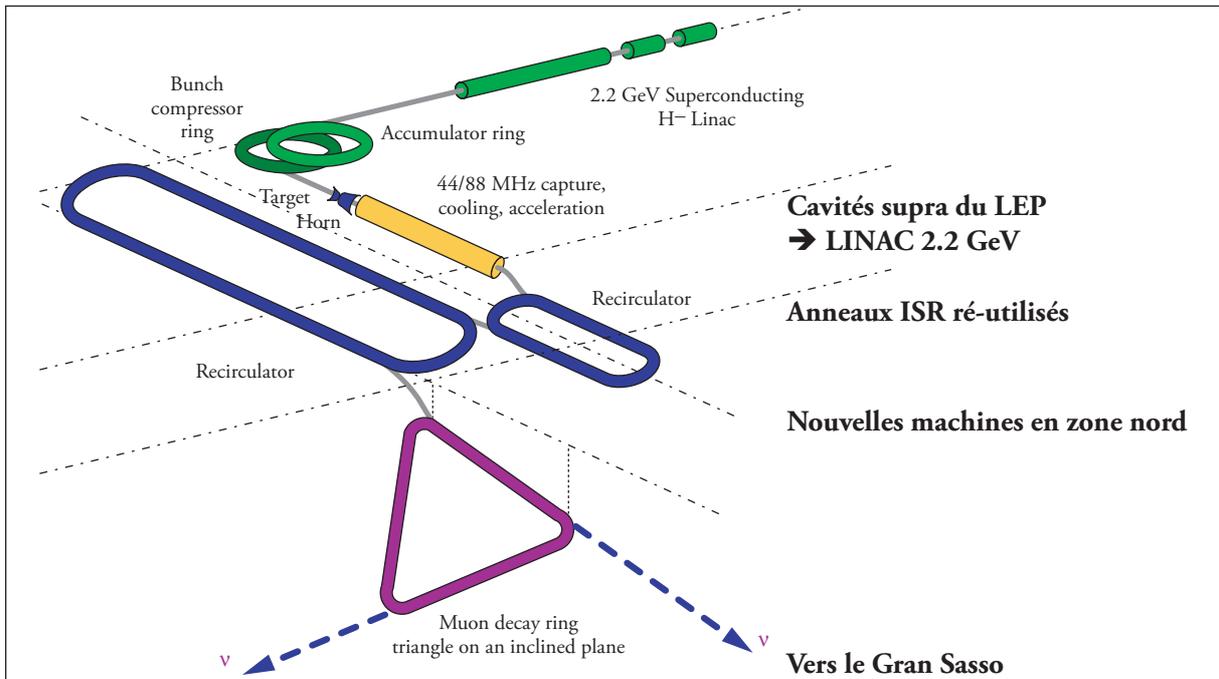


Photo 50—Usine à neutrinos (exemple)



Photo 51—CLIC, bientôt 20 ans d'études et on s'approche du but
Les chambres à vide du LEP et du CLIC

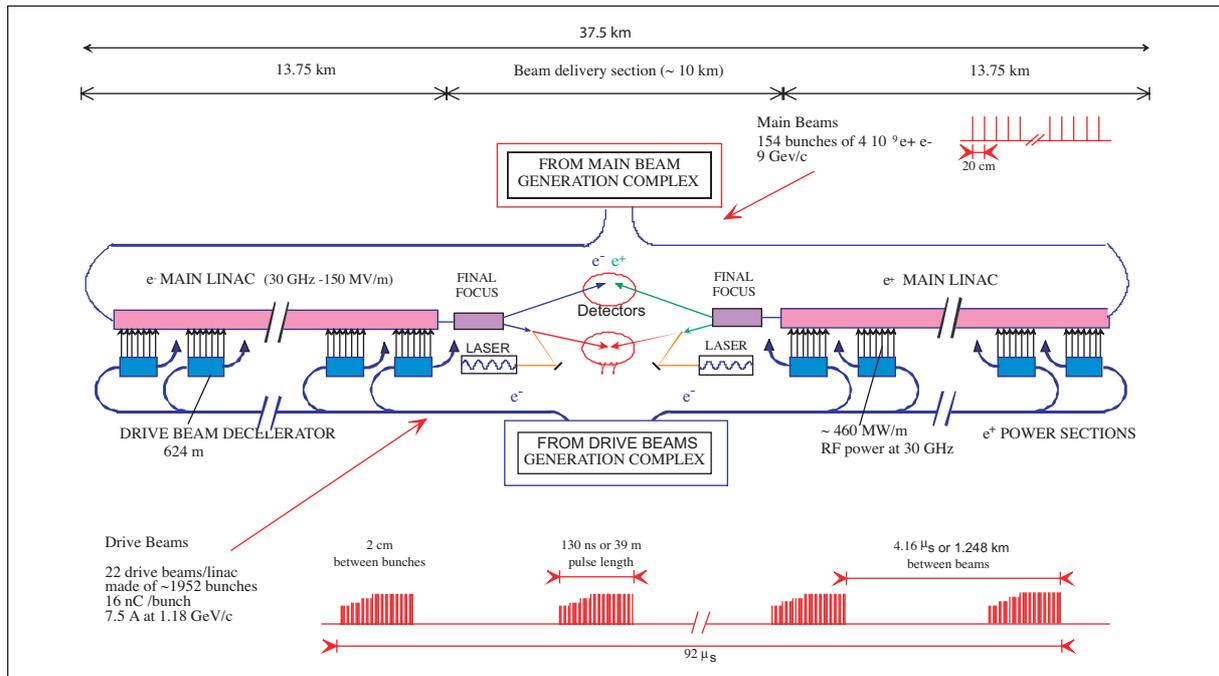


Photo 52—Schéma d'installation du grand ensemble CLIC à 3 TeV c.m.

- **CNGS**, CERN neutrinos pour Gran Sasso, en 2006
- Le **LHC** va commencer son fonctionnement en 2007
- Une vraie usine à neutrinos ?
par décomposition de muons ?
par ions radioactifs ?
Études en cours, à voir dans quelques années
- **CLIC**, le Collisionneur Linéaire International au CERN

Photo 53—L'avenir

