



ORGANISATION EUROPEENNE POUR LA RECHERCHE NUCLEAIRE

ISR-VA/69-33

closed distribution

PROBLEMES DU VIDE DANS LES ACCELERATEURS
DE PARTICULES ET ANNEAUX DE STOCKAGE

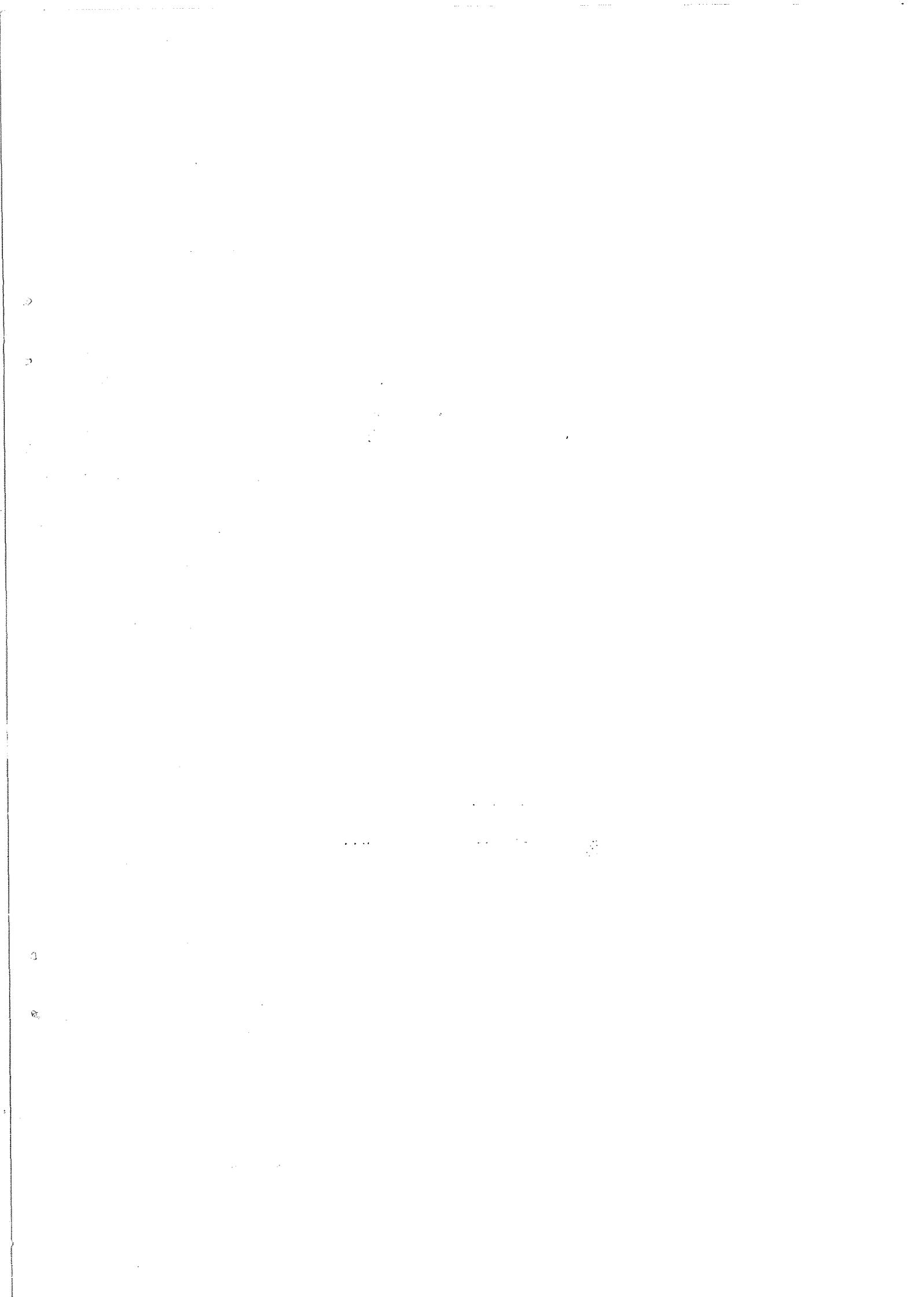
par

E. Fischer

Conférence présentée aux
Journées Germano-Suisses du Vide
Bâle, 27-29 mars 1969

Original : allemand
Traduction: C. Kostorž

Genève, juin 1969



La grande installation à accélération de particules du CERN

Les accélérateurs de particules et les anneaux de stockage sont un des nombreux domaines de l'application de la technique du vide. Jettons un coup d'oeil sur la plus grande installation à accélération de particules en Europe, celle du CERN près de Genève et discutons ensuite les problèmes du vide.

La figure no. 1 montre l'ensemble de l'installation, dont une partie est en marche depuis 10 ans, tandis que l'autre, la plus grande partie, se trouve encore en construction. Les protons produits dans une source d'ions à plasma sont d'abord accélérés dans un accélérateur linéaire jusqu'à 50 MeV et sont ensuite dirigés (pour l'instant encore) dans le grand anneau du synchrotron à protons de 200 m de diamètre. Ils circulent dans une chambre à vide de 145 mm x 70 mm d'ouverture libre à une pression moyenne de 10^{-6} torr. Ils sont tenus sur leur orbite par des aimants à déflexion et à focalisation et sont accélérés en une seconde par des résonateurs à haute fréquence jusqu'à une énergie maximale de 28 GeV. Le cycle complet d'une injection à l'autre s'élève à deux secondes. A plusieurs endroits les protons accélérés ou les particules secondaires (produites dans des cibles comme des mésons, des anti-protons et d'autres particules) sont extraits et sont utilisés pour l'étude expérimentale des particules élémentaires. Cette partie de l'installation fonctionne depuis 1959.

Pour compléter cette installation on est en train de construire un synchrotron "Booster"^{1,2)} de 50 m de diamètre, composé de quatre anneaux de chambre à vide superposés et distants de 36 cm. Dès que cette construction sera terminée, les protons de l'accélérateur linéaire seront d'abord introduits dans le synchrotron Booster. Les quatre anneaux seront remplis l'un après l'autre; puis les protons seront accélérés dans les quatre anneaux simultanément de 50 MeV à 800 MeV et seront ensuite transférés au grand synchrotron pour y obtenir leur énergie finale.

L'insertion du synchrotron Booster dans le cycle d'accélération nous permet d'augmenter considérablement l'intensité, c'est-à-dire le nombre des protons accélérés par cycle, d'environ 10^{12} à 10^{13} protons par cycle. L'intensité d'un accélérateur est, en principe, limitée par des influences de la charge d'espace pendant l'injection. Cependant, l'influence de la charge d'espace diminue avec l'augmentation de l'énergie d'injection.

La pression du gaz résiduel doit être inférieure à 10^{-7} torr dans le synchrotron Booster. Elle doit être plus basse que dans l'anneau principal, parce que l'énergie moyenne des protons dans le synchrotron Booster est plus petite et parce que la diffusion due au gaz résiduel diminue fortement avec l'augmentation de l'énergie, mais augmente avec la pression.

En même temps, un deuxième complément au synchrotron à protons est en construction. Il s'agit des anneaux de stockage à intersections^{3,4)}, prévus pour des expériences tout à fait nouvelles sur des faisceaux de protons entrant en collision. Les anneaux de stockage se trouvent dans un tunnel circulaire de 300 m de diamètre, de 15 m de largeur et de 6,5 m de hauteur. Deux anneaux de chambre à vide de 160 mm de largeur sont disposés dans un plan d'une telle façon qu'ils se croisent en huit points d'intersection sous un angle de 15° . Chacun des anneaux sera rempli avec des protons de haute énergie provenant du synchrotron, guidés dans des galeries de transfert de faisceaux (tunnel avec chambres à vide, aimants à déflexion et focalisation, etc.) jusqu'à ce que l'intensité des courants de protons atteigne 20 ampères ou plus. Cette procédure demande de 30 minutes à une heure. Ensuite, l'injection des protons sera interrompue et pendant 12 jusqu'à 24 heures des expériences sur des protons en collision frontale peuvent être effectuées à quelques uns de huit points d'intersection.

L'avantage décisif de cette machine est que l'énergie des particules en mouvement entrant en collision et disponible pour des expériences concernant par exemple la production de particules élémen-

taires nouvelles, est environ huit fois plus grande que dans des expériences conventionnelles où les protons accélérés entrent en collision avec des noyaux en état de repos. Peut-être réussira-t-on à produire par ce moyen des "anneaux de stockage à protons" des "quarks", qui sont des particules élémentaires hypothétiques, souvent discutées, avec $1/3$ et $2/3$ de la charge électrique élémentaire. Malheureusement, un faisceau de protons ayant une densité très faible est une cible particulièrement mauvaise, contrairement à une tôle métallique. Pour pouvoir observer, malgré cet inconvénient, un nombre suffisant de réactions par collision, une grande intensité de faisceaux de l'ordre de plusieurs ampères, est nécessaire.

La pression moyenne du gaz résiduel dans les anneaux de stockage ne doit pas dépasser 10^{-9} torr, afin que la durée de vie des protons stockés soit plus longue qu'une journée. Un vide de 10^{-11} torr est nécessaire aux lieux où les protons entrent en collision, afin que l'observation de la réaction de protons sur des protons ne soit pas perturbée par le bruit de fond provenant de la diffusion des protons sur les atomes du gaz résiduel.

Des galeries de transfert de faisceau supplémentaires rendront possible le guidage des protons de l'un des deux anneaux jusqu'à un grand hall de $10'000 \text{ m}^2$ destiné aux expériences. Enfin il sera encore possible de guider des protons directement du synchrotron jusqu'au même grand hall par un tunnel qui passe au-dessous des anneaux de stockage.

L'ensemble de l'installation lorsqu'elle sera en exploitation à partir de 1971/72, présentera un seul système à vide lié d'une longueur totale de 5,2 km avec des pressions de gaz résiduel entre 10^{-5} et 10^{-12} torr.

Conditions

Pour déterminer les conditions du vide d'un accélérateur ou d'une partie de celui-ci, il faut prendre en considération toutes les interactions avec les atomes du gaz résiduel qui peuvent perturber le fonctionnement de l'accélérateur ou les expériences. Au gaz résiduel, dans ce sens, n'appartient pas seulement le gaz présent dans le volume de la chambre, mais aussi le gaz qui adhère aux parois intérieures de la chambre. De telles interactions peuvent être la diffusion élastique ou non-élastique, l'ionisation, la provocation de désorption de gaz, l'échange de charge, etc.

La première condition banale qu'il faut imposer au vide d'un accélérateur de particules est que les particules survivent le cycle complet d'accélération, à partir de leur création dans la source d'ions ou d'électrons jusqu'à leur arrivée à la cible, sans qu'elles soient jetées contre la paroi de la chambre sous l'influence de la diffusion due au gaz résiduel. En ce contexte, on parle de diffusion simple, si la particule change de direction ou d'énergie si fortement lors d'une seule collision avec une molécule du gaz résiduel, qu'elle se perd. A la diffusion simple contribue non seulement la diffusion de Coulomb dans le champ électrostatique des noyaux du gaz résiduel mais aussi la diffusion nucléaire. De plus, on parle de diffusion multiple, si un grand nombre de collisions causent des déviations croissantes de l'orbite idéal et dans la suite également la perte des particules. C'est exclusivement la diffusion de Coulomb qui contribue à la diffusion multiple.

S'il s'agissait uniquement de la diffusion simple, le faisceau serait plus ou moins affaibli à la fin du cycle d'accélération selon le degré du vide, mais il aurait encore la même "émittance". L'émittance est une certaine mesure pour la qualité d'un faisceau de particules chargées, indépendante de son intensité. L'émittance est définie comme étant le produit de la largeur

du faisceau et de sa divergence d'angles, tous les deux mesurés dans une des deux dimensions perpendiculaires à l'axe du faisceau. Il existe l'émittence horizontale et l'émittence verticale. Elles sont mesurées en millimètres-milliradians. Dans un système d'optique ionique - les aimants de chaque accélérateur de particules sont un système d'optique ionique pour la focalisation du faisceau - non seulement la largeur du faisceau change avec sa progression mais aussi sa divergence d'angles. L'émittence pourtant reste toujours constante (s'il y a un bon vide), elle est une invariante du mouvement du faisceau.

On cherche toujours à garder l'émittence aussi petite que possible. Plus l'émittence dans un accélérateur est petite plus la région d'interaction du faisceau sur la cible est petite. Comme les sources de lumière ponctuelles sont particulièrement favorables pour l'optique classique, il en est de même pour les sources de particules secondaires pour la physique nucléaire. Plus l'émittence est petite plus il est facile de transférer un faisceau des particules chargées d'un accélérateur dans un autre ou dans un anneau de stockage. Pour des expériences avec des faisceaux entrant en collision dans des anneaux de stockage, il importe d'avoir un nombre de réactions par unité de temps aussi grand que possible. Plus le diamètre des deux faisceaux en collision est petit plus la probabilité de réaction est grande. Le diamètre, cependant, dépend directement de l'émittence.

Tandis que la diffusion simple due au gaz résiduel diminue l'intensité d'un faisceau, la diffusion multiple augmente l'émittence. Pour déterminer la pression maximale admissible pour le gaz résiduel dans un accélérateur de particules ou dans une partie d'un accélérateur, il faut d'abord préciser quelle perte d'intensité et quelle augmentation de l'émittence sera admise. A partir de ces données on calcule la pression maximale admissible. Dans les accélérateurs de haute énergie à focalisation forte c'est surtout l'empêchement de l'augmentation d'émittence qui détermine la pression de gaz résiduel admise.

La probabilité de diffusion d'une particule sur un atome du gaz résiduel ainsi que l'angle probable de déflexion dépendent, non seulement de l'énergie de la particule, mais aussi de la nature du gaz, c'est-à-dire du poids atomique et de la charge électrique du noyau. C'est pourquoi il ne suffit pas d'imposer une condition à la pression totale; on doit toujours considérer également la composition du gaz résiduel. La théorie de la diffusion permet de calculer pour chaque sorte de gaz un facteur de poids relatif à l'azote. La somme des pressions partielles, multipliées par le facteur de poids, donne une pression équivalente à l'azote, c'est-à-dire la pression de l'azote pur qui provoque la même diffusion que le mélange de gaz considéré:

$$P_{N_2 \text{équiv.}} = \sum_x f_x P_x \quad (1)$$

où P_x sont les pressions partielles et f_x les facteurs de poids. Il est d'usage de se référer à l'azote, bien que l'azote ne doive plus être présent dans un bon système à vide. Bien sûr, il faut calculer séparément les facteurs de poids pour chaque accélérateur et chaque mécanisme de diffusion: diffusion nucléaire, diffusions simple et multiple de Coulomb. Le tableau suivant présente, comme un exemple, ces facteurs pour les anneaux de stockage à protons du CERN pour la diffusion multiple de Coulomb.

Tableau

Gaz X	Facteur de poids f_x
H ₂	0,024
Hc	0,045
CH ₄	0,42
H ₂ O	0,65
CO	1,00
N ₂	1,00
O ₂	1,25
CO ₂	1,62
Ar	3,06

Par exemple, à pression partielle identique, l'hydrogène contribue à la diffusion multiple 50 fois moins que l'azote, tandis que l'argon 3 fois plus que l'azote.

A côté de la diffusion due au gaz résiduel il y a encore bien d'autres mécanismes perturbants, qui imposent des conditions au vide. La radiation électro-magnétique des électrons est particulièrement perturbante pour les synchrotrons à électrons et les anneaux de stockage à électrons. Une conférence particulière de ces journées traite de ce problème⁶⁾.

Un autre mécanisme perturbateur dans les anneaux de stockage est l'ionisation du gaz résiduel et la neutralisation du faisceau qui en résulte. Prenons comme exemple les anneaux de stockage à protons du CERN, actuellement en construction^{7,8)}. Un faisceau de protons d'une intensité de 20 ampères possède une charge d'espace positive avec un potentiel d'environ 3 kV au milieu du faisceau.

Les ions, produits par des collisions avec des molécules du gaz résiduel, sont repoussés et projetés dans la paroi de la chambre avec une énergie maximale de 3 keV. De cette façon, le faisceau de protons agit comme une vraie pompe ionique, qui, à vrai dire, ne remplace pas les autres pompes mais qui cependant augmente le débit de pompage du système lorsque l'intensité du faisceau est grande. Les électrons, libérés pendant l'ionisation, s'accumulent, par contre, dans le volume du faisceau jusqu'à ce que la densité d'électrons soit aussi grande que la densité de protons et le faisceau soit neutralisé. A une pression résiduelle de 10^{-9} torr, le faisceau est neutralisé en une seconde environ. Il existe des raisons graves pour qu'une neutralisation doive être évitée, plus graves que le petit désavantage du fait qu'un faisceau neutralisé ne pompe plus.

Un faisceau de protons non-neutralisé et d'énergie relativiste, a la propriété fort avantageuse que les forces répulsives, c'est-à-dire les forces défocalisantes de la charge d'espace positive sont presque totalement compensées par les forces focalisantes du champ magnétique, produit par le faisceau lui-même. Les lignes de force de ce champ forment des anneaux autour du faisceau. Cette focalisation magnétique peut être expliquée comme suit: un proton, qui quitte le faisceau sous un petit angle, croise les lignes de force du champ magnétique sous un angle droit et la force qui en résulte le renvoie vers le milieu du faisceau. Lorsque le faisceau est neutralisé par piégeage d'électrons, une troisième force s'ajoute, celle provenant de la charge d'espace négative des électrons, qui attire les protons et est donc focalisante. Cette force n'est compensée par aucun champ magnétique correspondant, parce que les électrons se trouvent presque en état de repos. La théorie montre que la focalisation du faisceau par la charge d'espace des électrons est des centaines de fois plus grande que la défocalisation faible d'un faisceau non-neutralisé. Il semble au premier coup d'oeil qu'une focalisation supplémentaire ne soit

qu'un avantage. Elle mènerait, cependant, à la perte d'une grande partie du faisceau par résonance avec la fréquence de révolution. La focalisation est déterminée par la disposition des aimants à déflexion et focalisation de la machine considérée; elle est choisie pour des anneaux de stockage du CERN d'une telle manière que la fréquence, avec laquelle les protons oscillent autour de leur orbite idéale, est 8,7 fois la fréquence de révolution. Si la focalisation est augmentée par la charge d'espace des électrons jusqu'à ce que la fréquence atteigne une valeur de neuf fois la fréquence de révolution, on entre dans une résonance harmonique. Elle cause une augmentation de l'amplitude des oscillations jusqu'à ce que les protons se heurtent à la chambre à vide. La limite théorique se trouve vers 10 ampères dans le cas des anneaux de stockage du CERN, alors que 20 ampères sont désirés et un multiple de cette intensité n'est pas exclu. En conséquence, la neutralisation du faisceau doit être évitée.

La neutralisation peut être évitée par des champs électrostatiques, par lesquels les électrons sont extraits du domaine des faisceaux de protons. La figure 2 montre la disposition des champs d'extraction aux bouts de chaque unité d'aimant. Les champs d'extraction ne présentent que 7 % de la circonférence de l'anneau. C'est la raison pour laquelle la pression du gaz résiduel joue un rôle important. Bien que les électrons possèdent une certaine mobilité dans la direction du faisceau, il faut malgré tout un certain temps, de l'ordre de 0,1 seconde, jusqu'à ce qu'ils arrivent au prochain champ d'extraction. Si la pression du gaz résiduel est trop grande, de nouveaux électrons sont produits si rapidement que le faisceau est neutralisé malgré ces champs d'extraction. Le calcul montre que le mécanisme mentionné donne une deuxième raison pour que la pression du gaz résiduel dans les anneaux de stockage à protons ne dépasse pas 10^{-9} torr (équivalent à l'azote).

Depuis quelques années des études sont en cours, dans des instituts en Amérique et en Europe, sur une nouvelle sorte d'accélérateurs de particules: ce sont les accélérateurs à ions lourds^{9,10}). Dans ces accélérateurs on ne veut pas accélérer des particules élémentaires, comme électrons et protons, mais, par contre, des ions d'atomes pris dans tout le système périodique entre l'hélium et l'uranium. L'énergie pourrait atteindre quelques MeV par nucléon. Pour obtenir un rapport e/m plus favorable, les atomes sont d'abord très fortement ionisés par la traversée de cibles; ils perdent ainsi 10, 20 ou davantage de leurs électrons. Toutefois, pendant l'accélération proprement dite, le danger existe que les ions, lorsqu'ils entrent en collision avec des molécules de gaz, attrapent de nouveau des électrons et qu'ils n'atteignent plus l'énergie finale la plus haute possible. C'est la raison, pour laquelle certains accélérateurs d'ions lourds en projet ont aussi besoin de l'ultra-vide.

Le schéma du système à vide d'un accélérateur de particules

Les systèmes à vide de tous les grands accélérateurs, comme des synchrotrons, ainsi que la plupart des anneaux de stockage, se ressemblent dans la construction fondamentale. La chambre à vide se présente sous la forme d'un long tube, de diamètre presque constant, auquel des postes de pompage identiques sont attachés à distances régulières. En première approximation on peut facilement calculer la distribution de la pression dans un pareil système (voir fig. 3). Si l'on suppose que la conductance moléculaire de la chambre et le taux de dégazage de ses parois sont partout les mêmes, on obtient comme distribution de la pression une fonction ressemblant à des arcades avec des minima près des pompes et des arcs paraboliques entre les pompes.

La pression près d'une pompe s'élève à

$$P_{\min} = P_0 + \frac{Q}{S} \quad (2)$$

où P_0 et S sont la pression finale et la capacité de pompage de la pompe et Q est la quantité de gaz totale provenant d'une période du système. Pour la différence entre le minimum et le maximum on calcule

$$\Delta P = \frac{Q}{8L} \quad (3)$$

où L est la conductance moléculaire de la chambre entre deux pompes. On obtient finalement pour la pression moyenne dans l'accélérateur

$$\bar{P} = P_0 + \frac{Q}{S} + \frac{Q}{12L} \quad (4)$$

On se réfère toujours à cette formule si on veut déterminer le système de vide d'un nouvel accélérateur.

La valeur la plus difficile à influencer dans l'équation (4) est L . On voudrait faire L aussi grand que possible, mais le diamètre de la chambre est choisi de telle façon que le faisceau de particules circulant y trouve juste sa place. On ne veut pas que l'entrefer des aimants soit inutilement large et, par conséquent, les aimants à déflexion inutilement chers (les aimants sont bien la partie la plus coûteuse d'un accélérateur de particules). Egalement la distance entre deux pompes ne peut pas être choisie librement. Il est pratiquement impossible de la faire plus petite que la longueur d'une unité d'aimant.

Si la valeur de L est connue, on pourra déterminer tout de suite la capacité de pompage la plus convenable pour les pompes. On la choisira plus grande que $12L$, pour que le deuxième terme dans l'équation (4) devienne plus petit que le troisième; mais il est inutile de faire la capacité de pompage beaucoup plus grande que $12L$.

S'il est nécessaire d'avoir des très basses pressions - comme dans les anneaux de stockage - la valeur de Q , c'est-à-dire

la désorption de gaz des parois de la chambre devient le facteur décisif. C'est également le cas dans les synchrotrons d'électrons, dans lesquels la radiation électro-magnétique du faisceau augmente considérablement la désorption de gaz⁶⁾. On peut toujours choisir des pompes, dont la pression limite est suffisamment basse et dont la capacité de pompage est suffisamment grande. Toutefois, le troisième terme $Q/12L$ ne peut être réduit qu'en faisant Q plus petit, puisque L est limité. Souvent le seul moyen qui reste est d'étuver la chambre à vide, c'est-à-dire de chauffer toute la chambre à vide pour une période d'un à deux jours à des températures allant de 100 à 300°C, selon les demandes, pour diminuer la désorption de gaz des parois intérieures des chambres.

Une chambre à vide étuvable est coûteuse en matériel et en personnel. Elle demande en plus que les aimants de déflexion aient un entrefer plus large, ce qui augmente le coût de ces aimants. L'étuvage doit être répété après chaque entrée d'air dans la chambre à la suite de modifications ou de réparations. Malheureusement, cette procédure prolonge considérablement le temps d'arrêt pendant lequel l'installation n'est pas disponible pour les expériences. C'est pourquoi on est toujours à la recherche d'autres moyens pour obtenir des pressions de plus en plus basses sans étuvage^{11,12)}.

Dans certaines circonstances, il est possible de répartir la capacité de pompage sur toute la longueur de la chambre à vide au lieu de la concentrer en plaçant des pompes en des endroits déterminés. La figure 4 montre schématiquement l'application de ce principe. Ici, des chaînes de cellules de pompe ionique sont installées à l'intérieur de la chambre à vide, des deux côtés du faisceau (éventuellement d'un seul). Pour stabiliser la décharge gazeuse de Penning on profite du champ magnétique de l'accélérateur même. On a toujours envisagé cette possibilité depuis que les pompes ioniques sont connues. Mais jusqu'à aujourd'hui elle n'a été appliquée - à ma connaissance - que pour deux anneaux de stockage à électrons et à positrons à Novossibirsk.

Il est intéressant de noter que la pompe ionique linéaire (c'est-à-dire à capacité de pompage distribuée) ne demande pas - ou guère - un agrandissement et un enchérissement de l'aimant. Pour le guidage du faisceau, on ne peut utiliser que la partie centrale de l'entrefer où le champ magnétique a la précision nécessaire. Les cellules Penning, cependant, peuvent être placées dans les "mauvaises" régions latérales du champ magnétique.

La pression moyenne dans une chambre à vide avec une pompe linéaire est donnée par

$$P = \frac{Q_1}{S_1} \quad (5)$$

où Q_1 et S_1 sont la désorption de gaz et la capacité de pompage par unité de longueur. Si l'on calcule au moyen de cette équation la pression pour un projet donné et si on la compare avec la pression moyenne, que l'on peut obtenir sans étuvage avec des pompes séparées, on note que la chambre avec pompe ionique linéaire ne rapporte un avantage essentiel que lorsqu'il s'agit d'unités d'aimants très longues, de 10 m et plus, et de petite ouverture, c'est-à-dire si la conductance moléculaire entre deux pompes est très petite.

A plusieurs reprises, on a aussi proposé des chambres à vide avec des pompes cryostatiques linéaires, mais - autant que je le sache - elles n'ont jamais été réalisées. La possibilité d'une disposition est montrée sur la figure 5¹³⁾. Un tube, refroidi avec de l'hélium liquide jusqu'à environ 2,7°K, condense ou adsorbe tous les gaz sauf l'hélium. Deux demi-coquilles cylindriques, refroidies avec de l'azote liquide, protègent le tube à hélium contre la radiation thermique. La capacité de pompage est déterminée par la largeur des deux ouvertures entre les demi-coquilles. Avec une chambre étuvée et cette disposition, il est théoriquement possible d'obtenir des pressions inférieures à 10^{-11} torr. Il y a cependant des difficultés technologiques assez

grandes qui se posent lors de la réalisation et de l'installation d'une telle pompe cryostatique.

Désorption de gaz des parois de la chambre

Nous avons vu que la désorption de gaz des parois de la chambre est souvent le facteur déterminant pour la pression que l'on peut obtenir dans les accélérateurs à particules. Ceci est surtout vrai pour des anneaux de stockage.

Le plus souvent, on utilise l'acier inoxydable comme matériel pour les chambres à vide des accélérateurs et des anneaux de stockage à protons. Quelques fois des éléments de la chambre sont en aluminium. Cependant, les métaux habituels ne se distinguent que peu entre eux par rapport à la quantité de gaz qu'ils dégagent sous vide. C'est pourquoi nous nous bornons à parler de l'acier inoxydable. L'acier inoxydable ne dégage au vide que de la vapeur d'eau, de l'hydrogène et des hydrocarbures.

De ces gaz, les hydrocarbures donnent le moins de difficultés. Il est facile de pousser la désorption spécifique des hydrocarbures au-dessous de 10^{-11} torr ℓ /sec cm^2 (après 100 heures de pompage). Pour ceci, il suffit du nettoyage usuel de tous les éléments de la chambre avec du trichlor- ou perchloréthylène, de l'eau déminéralisée et éventuellement de l'alcool. Un étuvage supplémentaire de tous les éléments à 300°C dans un four à vide, ou dans une atmosphère de gaz protecteur, réduit la désorption de gaz au-delà de la limite de détection, qui se trouve près de 10^{-15} T ℓ /sec cm^2 . En tout cas, c'est une bonne règle que d'étuver tous les éléments de la chambre pour dégager des fuites bouchées par de la graisse ou pour éliminer des tensions mécaniques après fabrication (dans le dernier cas la température d'étuvage est plus élevée). L'on peut constater qu'il est facile de créer un vide libre d'hydrocarbures, même sans l'étuvage ennuyeux de l'accélérateur après l'installation, à la condition que l'on évite des pompes à diffusion d'huile et des joints organiques.

L'hydrogène se dégage de l'acier inoxydable de qualité commerciale avec un taux de l'ordre de 10^{-12} à 10^{-11} T ℓ /sec cm^2 . Contrairement aux autres gaz, la vitesse de diffusion de l'hydrogène dans l'inox est si grande que l'épaisseur totale des parois contribue à la désorption de gaz^{14,15}). Pour cette raison, la désorption est proportionnelle à la concentration d'hydrogène, qui s'est formée pendant la production de l'acier. Pour les accélérateurs l'ordre de grandeur mentionné est négligeable, mais il est critique pour les anneaux de stockage, où il faut obtenir des pressions au-dessous de 10^{-9} torr. On peut réduire la désorption d'hydrogène à des valeurs inférieures à 10^{-12} T ℓ /sec cm^2 par l'étuvage à 300°C et au-dessus pendant quelques jours. Cependant, plus l'épaisseur de la paroi est grande plus cela devient difficile. Il est plus rationnel d'éliminer l'hydrogène déjà pendant la fabrication de la chambre au moyen d'un recuit des tôles ou des tubes à $800-1000^\circ\text{C}$ sous vide pour une durée d'environ une heure. De cette manière, la désorption de gaz de la chambre finie peut être portée au-dessous de 10^{-13} T ℓ /sec cm^2 . Cette valeur est bien acceptable pour des anneaux de stockage.

Le gaz le plus ennuyeux est en même temps le plus banal: c'est la vapeur d'eau. La vapeur d'eau est la composante dominante des gaz dans tous les accélérateurs qui ne sont pas étuvés. (Bien entendu sous la condition triviale que ne prédominent pas l'azote venant de fuites ou des vapeurs d'huile venant de mauvaises pompes à diffusion ou de joints organiques.) Le taux de dégazage de la vapeur d'eau est de l'ordre de 10^{-11} à 10^{-10} T ℓ /sec cm^2 après 10 heures de pompage et ne se diminue que très lentement avec le temps. Même après une année de pompage, la vapeur d'eau est souvent encore dominante. On peut réduire le taux de dégazage de la vapeur d'eau de l'acier inoxydable au-dessous de 10^{-15} T ℓ /sec cm^2 par l'étuvage de la chambre à vide à 150° pendant quelques heures. Une ventilation de la chambre avec de l'air de laboratoire pour la durée d'une heure suffit déjà pour provoquer une nouvelle saturation des surfaces avec de la vapeur d'eau de sorte qu'un nouvel étuvage devient nécessaire.

Ainsi nous constatons que ce n'est que la vapeur d'eau qui impose l'étuvage de la chambre installée. L'hydrogène et les hydrocarbures peuvent être éliminés avant l'installation. L'étuvage "in situ" peut éventuellement servir de sécurité pour réparer ce que l'on a manqué de faire avant l'installation afin d'éliminer l'hydrogène et les hydrocarbures. Dans ce cas, 300°C sont nécessaires.

Une question importante est de savoir si l'on peut écarter complètement la vapeur d'eau de la chambre. On économiserait de l'argent et du temps si des anneaux de stockage n'avaient plus besoin d'être étuvés pour obtenir l'ultra-vide.

Lors d'une réparation, on peut remplir la chambre d'azote sec au lieu d'air normal ou d'un autre gaz sec et maintenir un courant continu de gaz sortant de la bride, ouverte pour la réparation. Cette méthode a été essayée dans un petit anneau de stockage à électrons. Une pression au-dessous de 10^{-9} torr a été obtenue après la ventilation sans un nouvel étuvage. Cela ne résoud évidemment pas le problème de la saturation de l'intérieur de la chambre par la vapeur d'eau, lors de la première installation. Avec beaucoup d'optimisme on peut s'imaginer des manipulations pendant lesquelles toutes les sections de la chambre sont gardées continuellement soit sous vide, soit sous de l'azote sec; ceci pendant toute l'installation, à partir de l'étuvage préparatoire. Jusqu'à ce jour, personne n'a encore fait de telles manipulations.

Un jour, on réuissira peut-être à trouver un matériel ou un revêtement du matériel de la chambre qui possède une affinité pour la vapeur d'eau ou essentiellement plus grande ou bien essentiellement plus petite que celle de l'acier inoxydable. On peut être presque certain, qu'il sera possible dans l'avenir de construire des systèmes d'ultra-vide comme ceux des anneaux de stockage, ne nécessitant pas l'étuvage ennuyeux du système installé.

Pompes

Le synchrotron à protons du CERN est encore équipé de pompes à diffusion d'huile, parce qu'en 1957 une autre solution fiable ne se présentait pas. Après l'apparition sur le marché des pompes ioniques, celles-ci furent utilisées pratiquement pour tous les accélérateurs ou anneaux de stockage. L'avantage décisif des pompes ioniques est qu'elles ne nécessitent aucun entretien. En plus, ces pompes n'ont pas besoin de refroidissement, même pas pour l'ultra-vide, et elles ne demandent pas de coûteuses vannes de séparation et d'autre équipement de sécurité.

Parmi les différentes pompes ioniques on considère particulièrement avantageuses celles qui possèdent une capacité de pompage élevée pour l'argon. Il s'agit là des pompes triodes et des pompes avec cathodes en matériel différencié (par exemple, en titane et tantale). Comme il était mentionné plus haut, l'argon contribue fortement à la diffusion de Coulomb. L'argon peut toujours affluer par une fuite ou peut être réémis par une vieille pompe ionique. Une capacité de pompage élevée pour l'argon est très importante si des pompes à sublimation de titane sont installées pour renforcer les pompes ioniques aux endroits où la charge de gaz est plus élevée. Les pompes à sublimation de titane n'absorbent pas l'argon.

Pour préévacuer les accélérateurs ainsi que les anneaux de stockage, on utilise de préférence des pompes turbomoléculaires jusqu'à ce que des pompes ioniques puissent être mises en fonctionnement. Dans les petits accélérateurs, comme par exemple du type Van de Graaf¹⁶⁾, les pompes turbomoléculaires remplacent de plus en plus les pompes à diffusion à mercure avec refroidissement à l'azote.

Raccordement

Les anneaux de stockage ont besoin d'ultra-vide et par là d'étuvage. C'est la raison pour laquelle on a choisi des raccords métalliques. Un type très connu est le système de brides

nommées "ConFlat"¹⁷⁾ avec joints plats en cuivre. Pour les anneaux de stockage à protons du CERN cette bride a été adoptée avec de petites modifications¹⁸⁾.

On utilise de plus en plus les joints métalliques aussi pour les accélérateurs de particules avec vide de 10^{-6} à 10^{-7} torr, mais pour des raisons qui sont tout à fait différentes de celles pour lesquelles on les a choisies pour les anneaux de stockage. Le niveau de radioactivité dans de nombreux accélérateurs atteint de telles valeurs que les joints en caoutchouc, ou un autre élastomère, sont détruits après un certain temps¹⁹⁾. Après l'arrêt de l'accélérateur, il reste une radioactivité résiduelle qui diminue lentement, Cette radioactivité ne permet souvent que quelques minutes de travail par personne près de la machine. Il arrive aussi que l'on doive attendre quelques jours, ou semaines, jusqu'à ce que la radioactivité a suffisamment diminué pour que les réparations ou les transformations nécessaires puissent être effectuées. Ceci fait naître la demande pressante de raccordements qui puissent être ouverts ou formés dans les plus brefs délais.

De nombreux mécanismes ont été développés et sont en exploitation. La figure 6 montre l'exemple d'un raccord, qui a été développé par des ingénieurs du synchrotron à protons. Il permet de changer très rapidement de pompes²⁰⁾. On monte à l'extérieur du tunnel sur la bride de la pompe un raccord intermédiaire avec un soufflet et un mécanisme de fermeture. Puis, à l'intérieur du tunnel on accroche la pompe à la bride inférieure de la vanne au moyen de griffes faisant partie du mécanisme de fermeture. Ensuite, par la rotation de deux vis dont une n'est pas visible sur la figure, le soufflet est étiré et en même temps le raccordement de bride est effectué. Dans cet exemple, un anneau de plomb sert de joint.

L'intensité des accélérateurs existants augmente de plus en plus et celle des futurs accélérateurs est prévue très élevée dès le début des projets. Une haute intensité entraîne inévitablement une radioactivité élevée. Cela nous amène bientôt à la

situation où des sections d'un accélérateur restent après un arrêt tellement radioactives que même les manipulations les plus rapides ne sont plus possibles dans la norme fixée par la loi.

Cette situation impose le développement de raccords qui puissent être ouverts ou fermés par des manipulateurs téléguidés et contrôlés par des télécaméras²¹⁾. Le raccord, montré sur la figure 6, y est bien adapté contrairement aux brides traditionnelles avec leur couronne de vis et d'écrous. Des brides soudées qui peuvent être séparées et ressoudées plusieurs fois^{12,22)} possèdent aussi de bonnes chances. Le but final est d'être capable d'échanger des éléments complets d'un accélérateur, comme des unités d'aimant, des postes de pompage etc., sans qu'un être humain doive pénétrer dans le tunnel. En principe, on connaît la possibilité de telles réalisations, mais elles demandent encore plusieurs années de développement. Pour de nombreux problèmes on peut se baser sur les expériences faites dans la technique des réacteurs et dans l'astronautique.

Vide extrême pour des expériences sur faisceaux en collision

Dans les anneaux de stockage à protons, des problèmes particuliers doivent être résolus pour produire le vide extrême qui est nécessaire aux endroits où les collisions des protons et leurs réactions doivent être observées¹³⁾. A ces endroits, la pression partielle de l'hydrogène ne doit pas dépasser 10^{-10} torr et celle de l'azote, du monoxyde de carbone et des gaz similaires ne doit pas dépasser 10^{-11} torr pour avoir un bruit de fond suffisamment bas.

Malheureusement, pour de nombreuses expériences prévues on ne peut pas admettre que les points d'intersection des faisceaux soient obstrués par des pompes volumineuses. Il en résulte une deuxième condition: c'est que les pompes, qui produisent la pression extrêmement basse, se trouvent aussi éloignées du point d'intersection que possible, c'est-à-dire de 5 à 7 m. Cela ne demande

pas seulement que la désorption gazeuse des parois de la chambre entre les pompes soit extrêmement basse, mais aussi que les pompes elles-mêmes atteignent une pression limite au-dessous de 10^{-11} torr pour l'hydrogène et au-dessous de 10^{-12} torr pour tous les autres gaz. Depuis longtemps on avait pensé que seulement des pompes cryostatiques avec de l'hélium liquide seraient capables d'arriver à cette pression limite. Entretemps, on a trouvé que des pompes à sublimation de titane, refroidies par l'azote liquide, peuvent donner les mêmes performances, et cela à moins de frais, avec des pompes plus petites et avec moins de difficultés technologiques de toutes sortes²³⁾.

La troisième condition concerne l'épaisseur des parois de la chambre à vide. Des protons ou des particules secondaires produites par la collision des protons changent de leur direction par diffusion multiple lorsqu'elles traversent la paroi de la chambre. Ce changement de la direction devrait être plus petit que la divergence angulaire du faisceau lui-même pour ne pas donner cause à une incertitude supplémentaire dans l'interprétation des réactions observées. Une solution possible est d'assembler de grandes parties de la chambre à ces endroits par la soudure de sections de soufflets formés hydrostatiquement. Le matériel le plus convenable est l'acier inoxydable d'une épaisseur de paroi de 0,1 à 0,3 mm.

Remarque finale

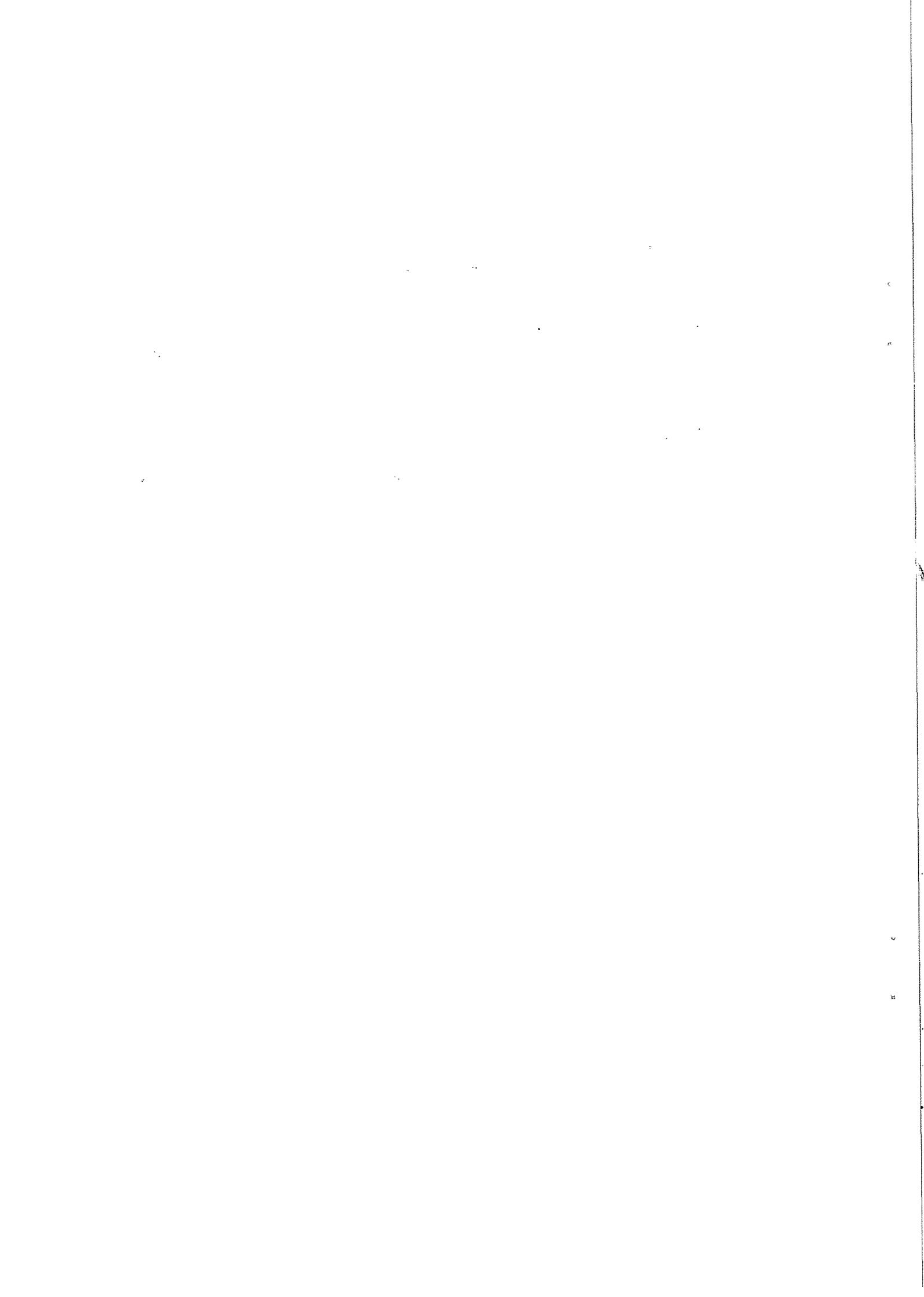
La qualité d'un système à vide pour un accélérateur est jugée principalement en fonction de sa fiabilité, autrement dit du nombre des arrêts d'opération de l'installation qui sont causés par une panne d'un des éléments du système à vide. Le synchrotron à protons du CERN a - selon cette définition - un très bon vide. Un système à vide réussi devrait être d'une telle sûreté de fonctionnement que l'on puisse dire en parodiant le slogan des Chemins de fer fédéraux: "Tout le monde parle du vide, pas nous".

Références

- 1) Study Group for CPS Improvements, CERN
The **second** stage CPS improvement study (800 MeV Booster Synchrotron), CERN report MPS/Int. DL/B 67-19 (1967).
- 2) Ch. Gould, F.J. Schittko, W. Unterlerchner
Das Vakuum-System des neuen "Booster"-Synchrotrons von CERN, Schweizerisch-Deutsche Vakuum-Tagung, Basel, 1969.
- 3) The CERN Study Group on New Accelerators
The design study of Intersecting Storage Rings (ISR) for the CERN Proton-Synchrotron, CERN report AR/Int. SG/64-9 (1964).
- 4) E. Fischer
Ultra-high vacuum for storage rings for 28 GeV protons, J.Vacuum Sci.Technol. 2, p. 142 (1965).
- 5) E. Fischer
Residual gas scattering, beam intensity and interaction rate in proton storage rings, CERN report ISR-VAC/67-16 (1967).
- 6) H. Pingel
Gasdesorption durch Synchrotronstrahlung: Der geplante DESY-Speicherring als Beispiel, Schweizerisch-Deutsche Vakuum-Tagung, Basel, 1969.
- 7) B. Angerth
Review of studies on beam neutralization in storage rings, CERN report AR/Int. SG/65-1 (1965).
- 8) E. Fischer
Clearing fields for the ISR, CERN report ISR-VAC/66-15 (1966).
- 9) University of California, Lawrence Radiation Laboratory
The Omnitron, a multi-purpose accelerator, report UCRL 16828, July, 1966.
- 10) UNILAC-Gruppe, Institut für angewandte Physik, Universität Heidelberg
UNILAC, ein Linearbeschleuniger für Atomionen beliebiger Masse, Heidelberg, 1966.

- 11) National Accelerator Laboratory,
Batavia, Illinois, USA
Proton-proton colliding-beam storage rings for the
National Accelerator Laboratory, Design study 1968.
- 12) N. Milleron
Some recent developments in vacuum techniques for accelerators and storage rings, Proceedings of the 1967 Particle Accelerator Conference, Washington D.C., preprint UCRL 17296 (University of California, Lawrence Radiation Laboratory).
- 13) R. Calder, E. Fischer
Vacuum problems related to colliding beam experiments with the CERN Intersecting Storage Rings, Proceedings of the Vth International Conference on High Energy Accelerators, Frascati, Sept. 1965.
- 14) R. Calder, G. Lewin
Reduction of stainless-steel outgassing in ultra-high vacuum, Brit.J.Appl.Phys. 18, p. 1459 (1967).
- 15) G. Lewin
Reduction of the outgassing of thick stainless-steel sheets in ultra-high vacuum by high-temperature vacuum treatment, to be published in J.Vacuum Sci.Technol.
- 16) H.G. Broe
Vacuum systems associated with the AAEC's 3 MeV accelerator, Vacuum 18, p. 637 (1968).
- 17) W.R. Wheeler, M. Carlson
Ultra-high vacuum flanges, Proceedings of the Vth National Vacuum Symposium of the American Vacuum Society, 1961, VARIAN report VR-11.
- 18) T. Wikberg
Improvements of UHV copper gaskets, to be published in J.Vacuum Sci.Technol.
- 19) M.H. Van de Voorde
Strahlenschädigung von Elastomer-Dichtungen, Schweizerisch-Deutsche Vakuum-Tagung, Basel, 1969.

- 20) P. Riboni
Communication privée (Ensemble de l'accouplement des pompes ioniques et turbomoléculaires), CERN, dessin MPS 3 D01-600-1.
- 21) M. Ellefsplass, R.A. Horne, W. Richter
Application of remote handling in the CPS tunnel, Proceedings of the 1969 Particle Accelerator Conference, Washington D.C.
- 22) J.M. Voss
Automatically and remotely welded and removable weld flange vacuum joint, CERN report ISR-VAC/67-23 (1967).
- 23) B. Angerth
Some low pressure experiments with sputter-ion and titanium sublimation pumps, Journées Germano-Suisses du Vide, Bâle, 1969.



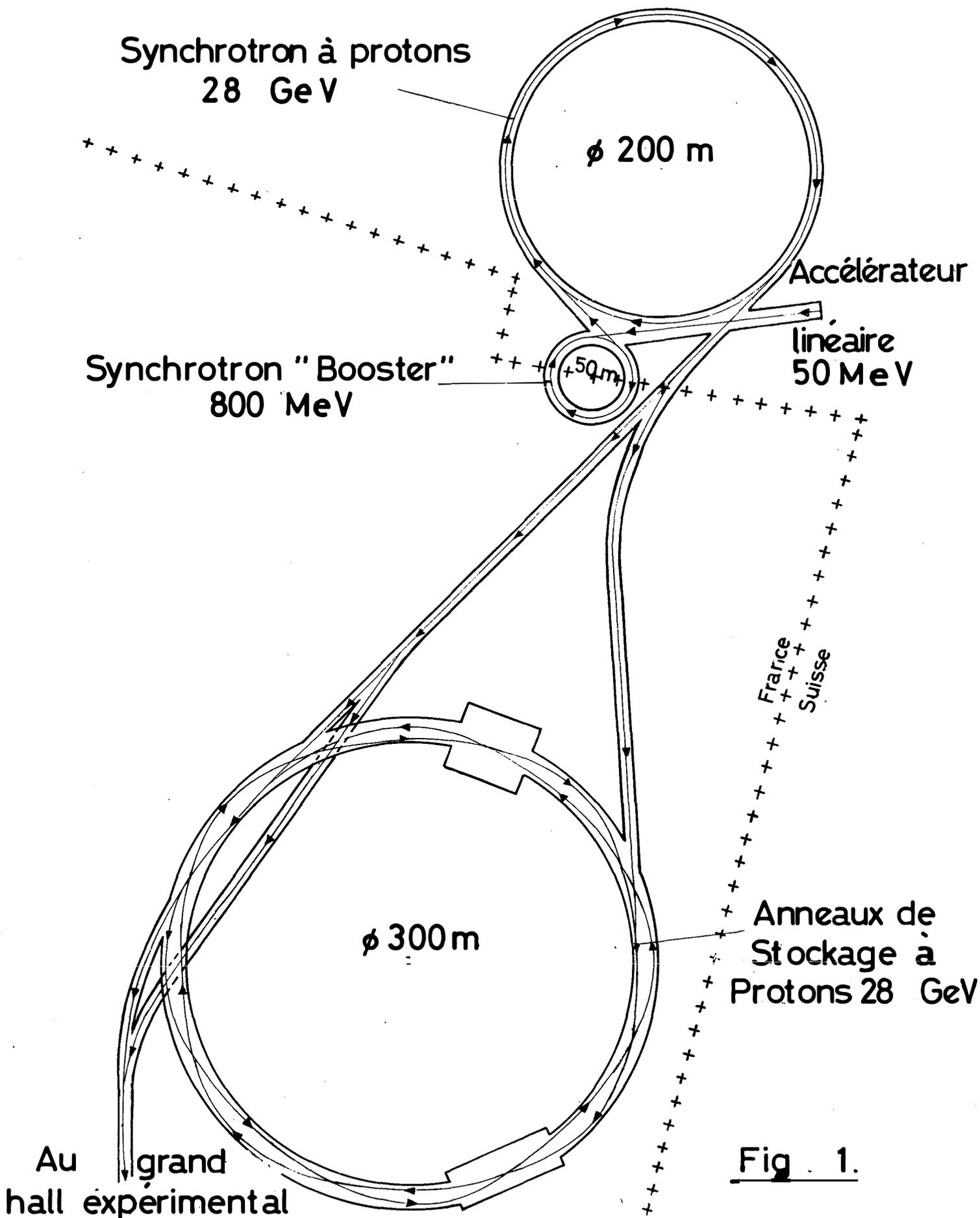


Fig. 1.

La grande installation à accélération de particules du CERN

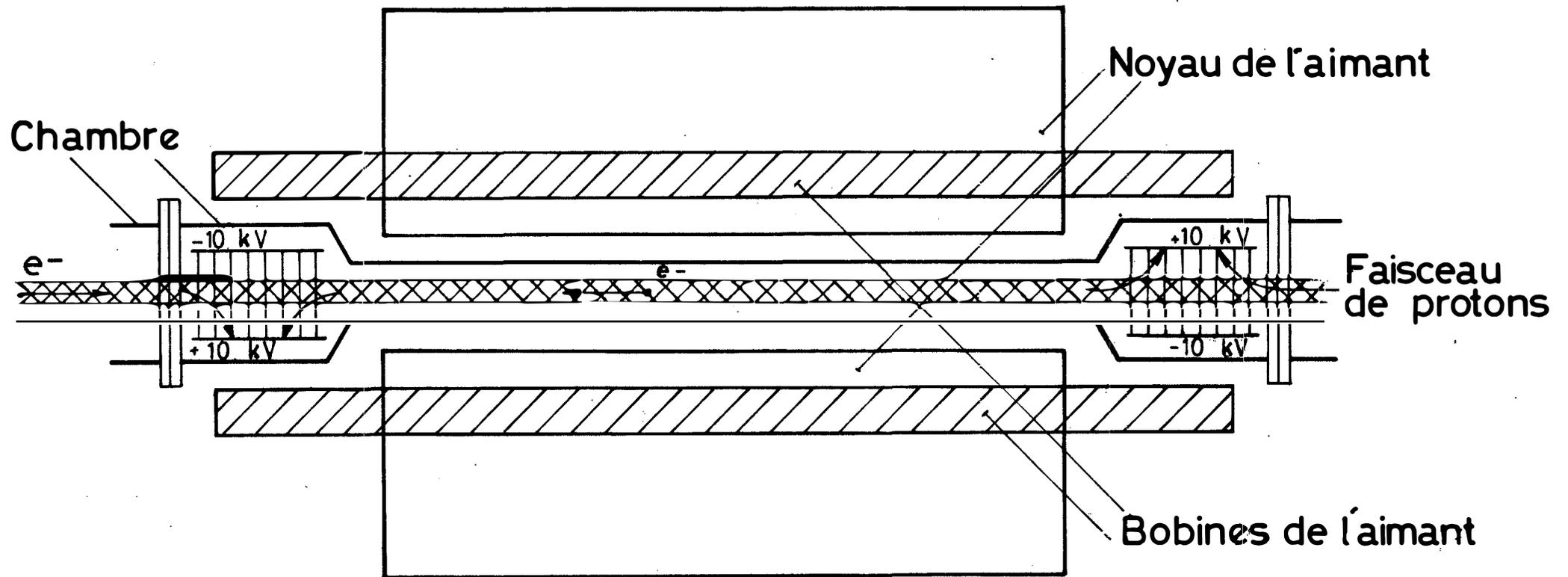
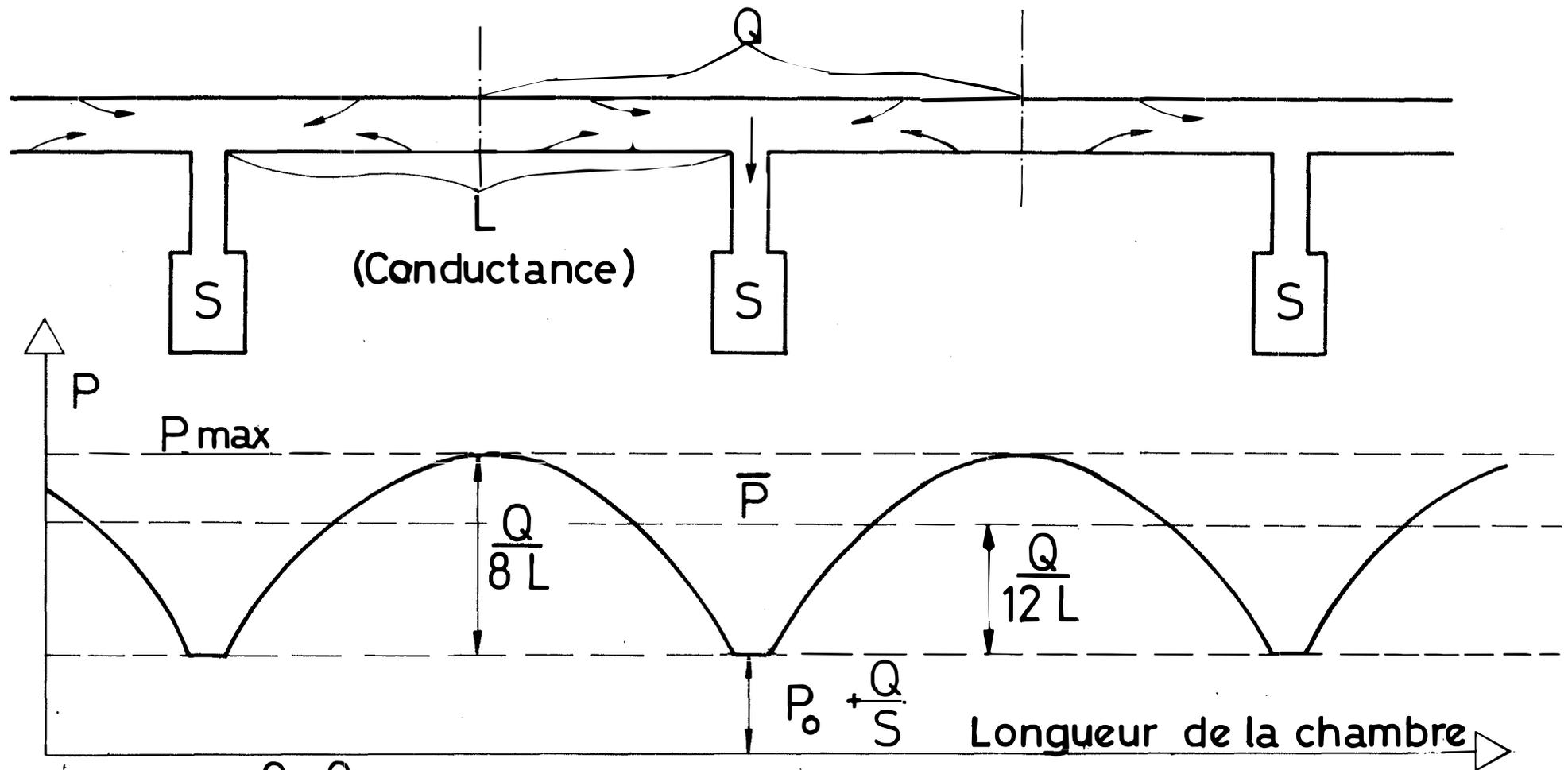


Fig .2. Champs d'extraction aux deux bouts des aimants
des anneaux de stockage du CERN



$$P_{max} = P_0 + \frac{Q}{S} + \frac{Q}{8L}$$

$$\bar{P} = P_0 + \frac{Q}{S} + \frac{Q}{12L}$$

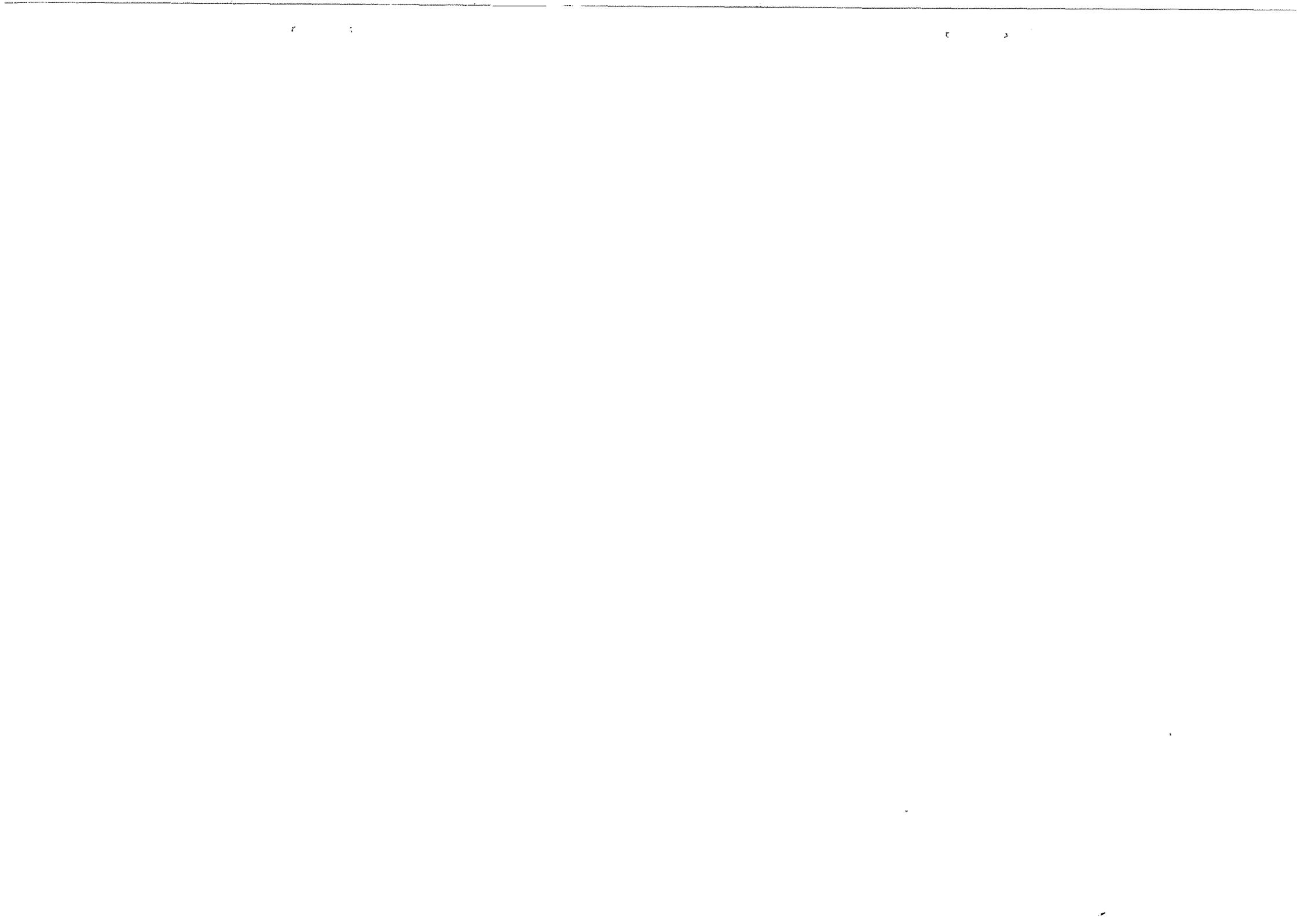
L Conductance entre deux pompes

S Capacité des pompes

P_0 Pression limite des pompes

Q Taux de dégazage par periode

Fig :3. Distribution de la pression dans un accélérateur



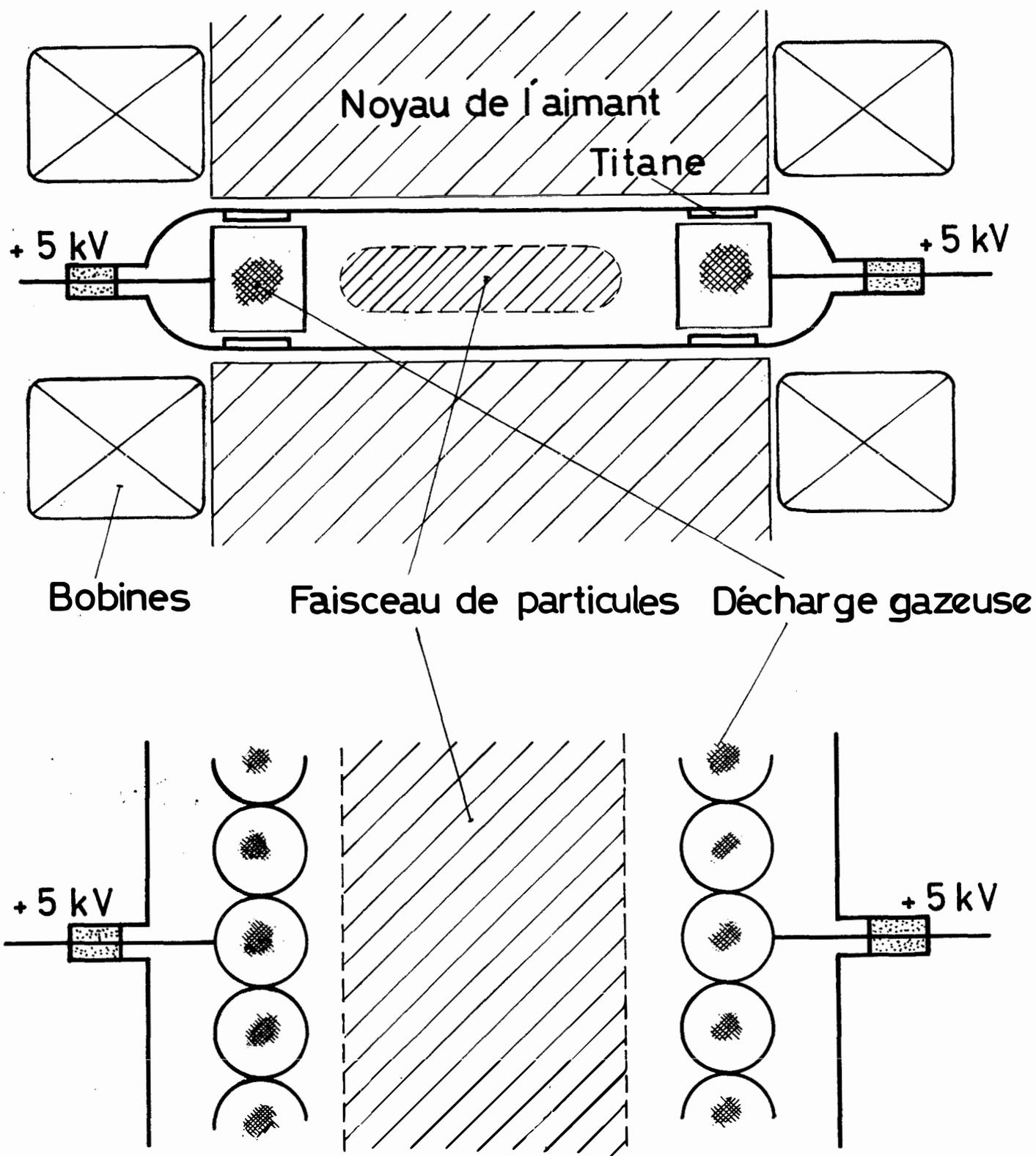


Fig: . 4. Pompe ionique linéaire

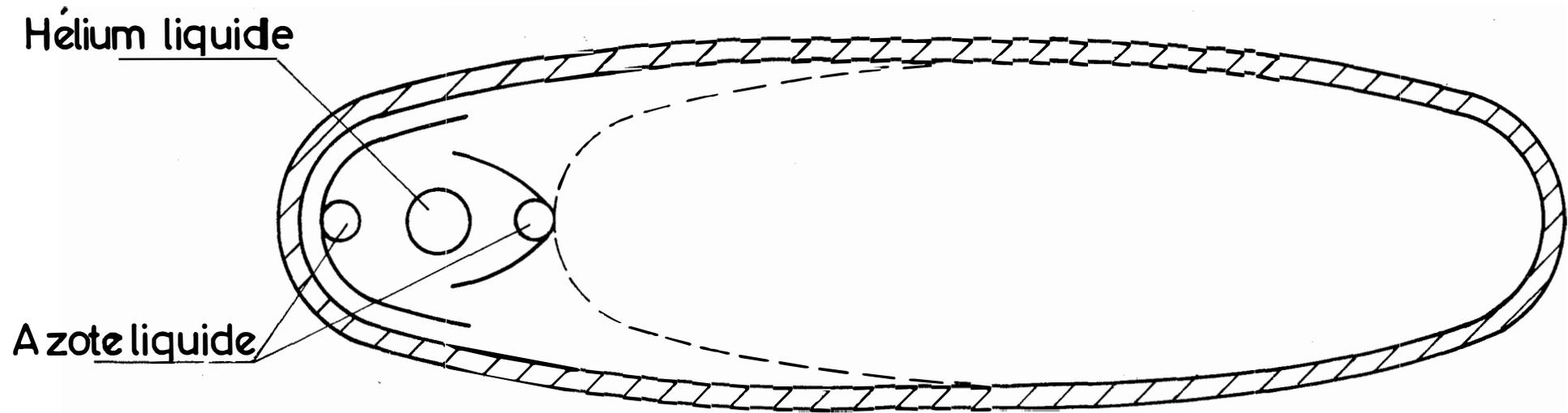


Fig : 5. Chambre à vide avec pompe cryostatique linéaire

6

7

8

9

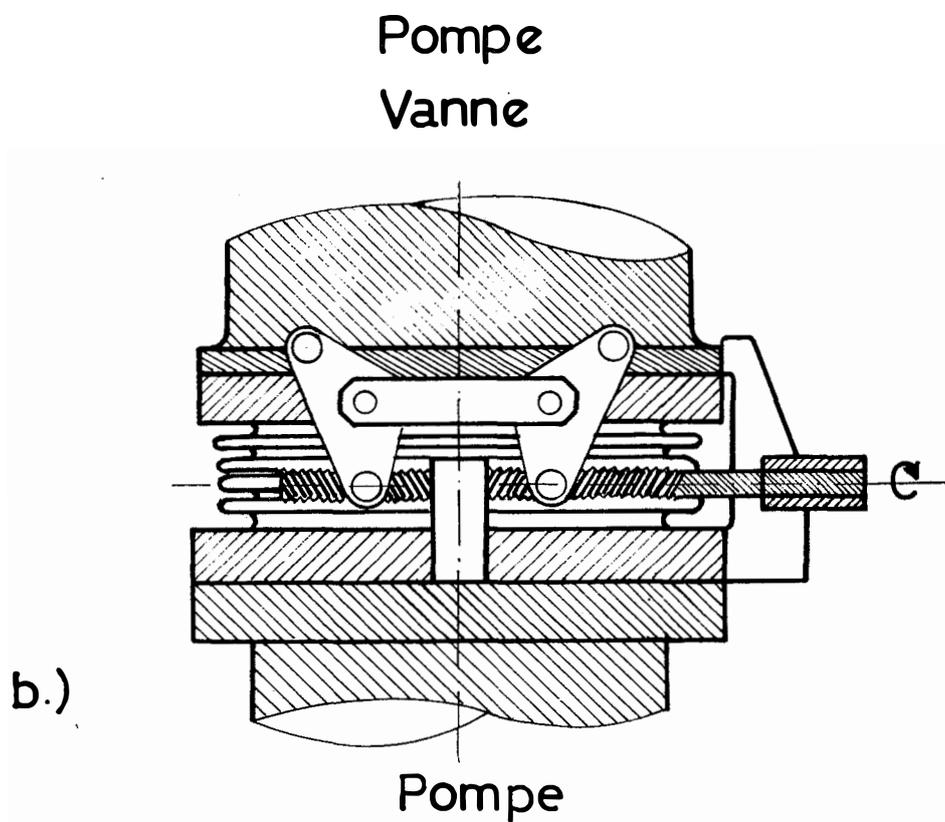
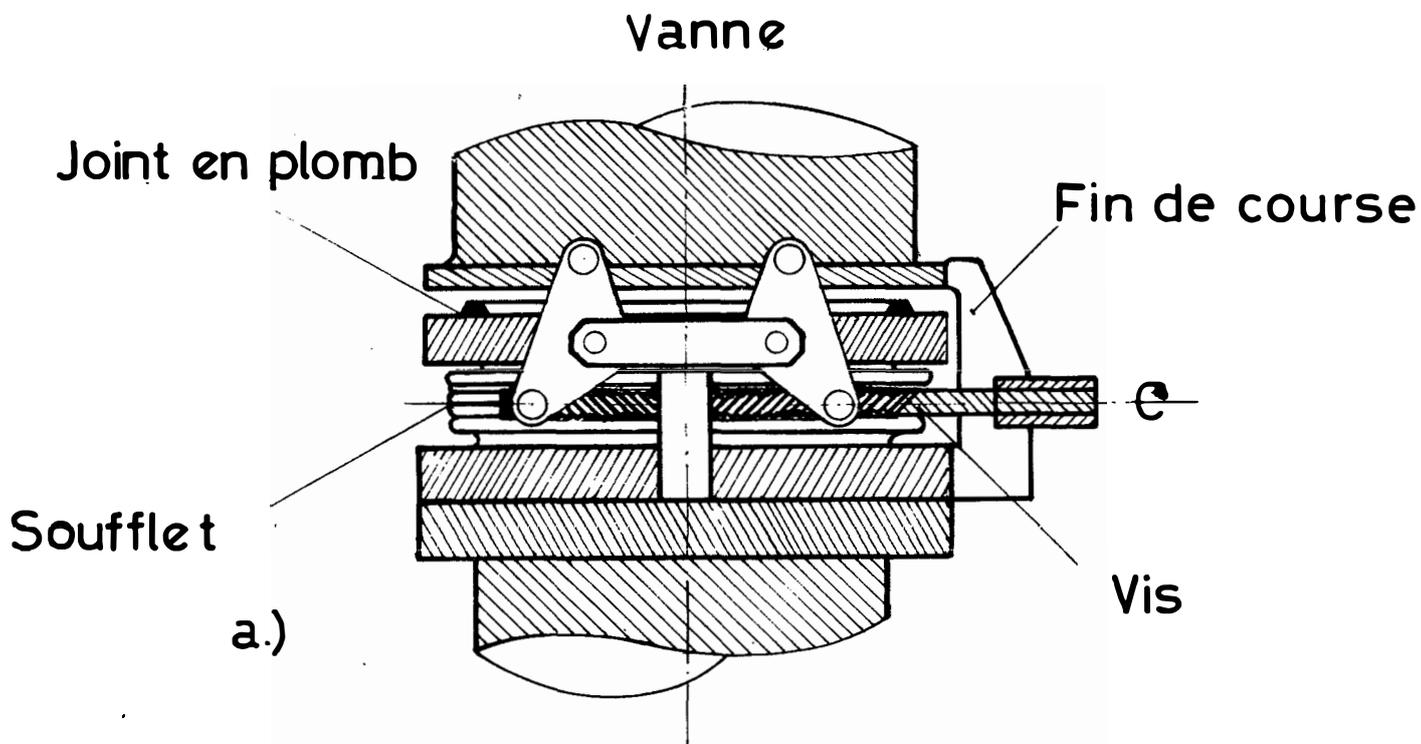


Fig 6. Raccord rapide
 a.) ouvert
 b.) fermé

