

## MACHINES ÉLECTROSTATIQUES PUISSANTES

Par NOËL J. FELICI.

Laboratoire d'Électrostatique et de Physique du métal, Grenoble.

**Sommaire.** — Dans cet article, qui fait suite à celui publié dans le numéro de janvier 1947 du *Journal de Physique*, l'auteur étudie les modalités de réalisation de machines électrostatiques puissantes, en ce qui concerne le *milieu diélectrique fluide* et la *disposition des transporteurs conducteurs*.

Passant en revue les différents milieux fluides l'auteur est conduit à éliminer sans appel les *liquides* dont la masse spécifique est trop grande et conduit à des frottements inadmissibles. Il écarte également le *vide* qui est théoriquement très intéressant mais actuellement encore inutilisable, les champs électriques que l'on sait y produire étant relativement faibles. Parmi les *gaz comprimés*, l'auteur retient seulement l'air et l'hydrogène qui procurent, dans la réalité, des champs utilisables de l'ordre de 500 kV : cm.

Étudiant ensuite les dispositions possibles des transporteurs et des producteurs, l'auteur rappelle la très ancienne machine de Toepler et montre comment elle peut servir de point de départ pour édifier des machines de plus en plus complexes et de plus en plus efficaces, soit du côté de la puissance, que multiplie considérablement le procédé du *double transport*, soit du côté de la tension, grâce au procédé de la *cascade*.

L'auteur énonce les règles fondamentales concernant l'*épaisseur* et le *profil* des organes conducteurs, pour les dispositions plane et cylindrique.

L'auteur termine par la *machine à barres* qui, dans l'état actuel de la question, est la machine la plus évoluée et la plus puissante, tandis que la machine de Toepler est la plus simple.

Il calcule la puissance spécifique considérable que peut développer une machine à barres, même dans un milieu de rigidité diélectrique modérée, grâce à la multiplication des *surfaces de maître-couple*, et montre ainsi combien sont vastes les possibilités encore insoupçonnées des machines électrostatiques, même s'il faut s'en tenir aux milieux isolants actuellement connus.

## II. Modalités de la réalisation.

**Introduction.** — Nous avons établi précédemment (*J. de Physique*, janvier 1947) les caractères que doit présenter, dans l'état actuel des connaissances, une machine électrostatique puissante. Ce sont :

*a.* Un milieu diélectrique fluide de grande densité d'énergie maxima et de faible masse spécifique;

*b.* Des transporteurs conducteurs, dont les parties actives aient une surface totale de maître-couple aussi grande que possible, cette surface étant utilisée au mieux dans l'espace et dans le temps, la pression électrostatique étant sur toutes les parties actives aussi voisine que possible de sa valeur maxima;

*c.* Un fonctionnement thermodynamiquement réversible, ne comportant de contacts qu'entre des conducteurs amenés préalablement au même potentiel;

*d.* Une vitesse de rotation aussi grande que possible, compte tenu du rendement et de la puissance spécifique.

Nous examinerons, dans le présent article, les modalités de réalisation pratique des deux premiers points.

**Le milieu diélectrique fluide.** — Les milieux diélectriques fluides se divisent en trois classes : les liquides, le vide, les gaz comprimés.

Les liquides ne nous retiendront pas longtemps. Bien qu'ayant fait l'objet de plusieurs essais de laboratoire [1], leur utilisation est *a priori* sans intérêt. Les liquides ne satisfont pas, en effet, à la condition fondamentale d'avoir une *faible masse spécifique*; les pertes par frottement fluide y prennent des valeurs intolérables, à moins que le mouvement des transporteurs ne soit très lent, ce qui contraint la puissance spécifique à être dérisoire. Les liquides ne se distinguent pas, en effet, par des densités d'énergie maxima considérables. La rigidité diélectrique est généralement plus petite que dans les gaz comprimés ou le vide, et la constante diélectrique ne compense que partiellement cette faiblesse. Les liquides ont enfin une conductibilité notable, souvent inadmissible, et cette tare marque fréquemment ceux qui, par une constante diélectrique exceptionnelle, pourraient donner de fallacieux espoirs.

Le vide correspond à une masse spécifique nulle et permettrait ainsi un rendement de 100 pour 100, mais il ne semble pas que la technique actuelle du vide soit capable d'assurer des résultats satisfaisants au point de vue diélectrique.

Les rigidités obtenues dans les travaux les plus récemment publiés [2] ne sont pas considérables. Elles varient entre 1000 kV : cm pour un entre-électrodes (planes) de 1 mm, et 500 kV : cm, pour un entre-électrodes de 3 mm. Pour des écartements plus grands encore, la rigidité diminue toujours et devient tout à fait insuffisante. Étant donné la difficulté et le prix de la création et du maintien du vide dans un appareil tel qu'une machine électrostatique, il est évident que l'utilisation du vide n'entrera pas en question, tant que sa rigidité ne dépassera pas largement les valeurs indiquées, et cela malgré ses possibilités au point de vue rendement. Il faut noter que les qualités diélectriques du vide sont probablement perfectibles [3] mais son utilisation pratique, à laquelle tant de bons esprits ont révé, n'est pas pour aujourd'hui.

Les gaz comprimés restent donc le seul moyen de construire des machines électrostatiques puissantes. Ces fluides sont encore très mal connus quant à leur comportement diélectrique. Étant donné leur diversité, la littérature les concernant doit être considérée comme très indigente.

Quelques points se sont toutefois dégagés. Moyennant des pressions élevées et un minimum de propreté, la rigidité diélectrique peut atteindre des valeurs considérables, comme 1000 et même 2000 kV : cm. Elle est favorisée par la présence d'éléments électro-négatifs, oxygène, fluor, chlore. Elle décroît quand l'entre-électrodes croît, mais beaucoup moins vite que dans le vide, de sorte que, pour toutes les valeurs pratiquement utilisables d'entre-électrodes, elle est, pour le moment, plus grande que dans le vide, moyennant des pressions qui n'ont rien d'exagéré. La rigidité des gaz est enfin d'autant plus sensible à la malpropreté qu'elle a atteint une valeur plus grande. Ce point est d'importance parce que c'est l'influence des impuretés qui contribue le plus à limiter les rigidités effectivement utilisables.

Une machine électrostatique est en effet un appareil naturellement sale dont le fonctionnement contribue à créer des impuretés nouvelles. C'est pourquoi les rigidités procurées par un gaz donné sont souvent inférieures à celles mesurées au Laboratoire, et cela d'autant plus que l'on cherche des performances plus élevées. La machine électrostatique est aussi un appareil beaucoup plus sensible aux qualités diélectriques d'un milieu, qu'un simple condensateur plan chargé en permanence. Elle effectue en effet par son fonctionnement même, non pas une, mais des milliers de mesures de la rigidité diélectrique par seconde. Aussi des rigidités inférieures de 10 pour 100 seulement à la valeur correcte doivent être considérées comme très satisfaisantes.

Un tel résultat demande d'ailleurs quelque peine. Un polissage méticuleux des surfaces conductrices, fait avec conscience, est de rigueur. Il doit s'appliquer

à une surface déjà soignée et non pas masquer, par un vague glaçage, les rayures laissées par le travail mécanique. Les poussières, les impuretés et les défauts des surfaces conductrices sont ensuite éliminés par d'innombrables étincelles, produites intentionnellement dans la machine en activité. Ce n'est qu'au bout de plusieurs jours que la machine, se purifiant elle-même, fournit de bonnes performances. Bien fâcheux serait alors l'incident qui obligerait à renouveler le gaz, ou — pire encore ! — à la sortir de sa boîte. Toute la mise en train est à recommencer, même si l'on a pas été contraint d'aller jusqu'à la funeste extrémité d'un démontage, cause de grossières souillures.

On comprendra maintenant sans peine que les rigidités réellement utilisables soient plus limitées que les valeurs avancées dans la littérature. On peut les comprendre entre 450 et 600 kV : cm, soit 1500 à 2000 U. E. S. de champ donnant des pressions électrostatiques de 90 à 160 g-force : cm<sup>2</sup>. Ces valeurs sont toutefois valables pour des entre-électrodes de plusieurs millimètres, de sorte que les différences de potentiel supportées par un seul intervalle de fluide peuvent dépasser 200 kV.

La plupart des gaz comprimés sont d'ailleurs incapables de fournir en pratique la limite modeste de 450 kV : cm, à commencer par les fréons et autres gaz complexes. Ces gaz, indépendamment de leur masse spécifique trop élevée, donnent des rigidités pratiques misérables (300 à 350 kV : cm) et sont de mauvaise compagnie pour une machine à transporteurs conducteurs. Quoi qu'en disent leurs partisans, ils se décomposent sous les actions électriques, étincelles ou effluves, libérant des halogènes d'effet assez fâcheux.

Peu importe qu'en abandonnant ces gaz complexes il faille prévoir des pressions importantes. La chaudronnerie de fer et même d'aluminium est aujourd'hui un art très répandu qui permet d'envisager sans hésitation des pressions qui auraient paru surprenantes au temps des premières machines électrostatiques, alors qu'on équipait le navire de bataille le *Napoléon* de chaudières timbrées pour... 60 cm de mercure !

Dans ces conditions, se présente d'abord le plus commun des gaz : l'air atmosphérique. Par une circonstance qu'il n'est pas exagéré de qualifier de providentielle (1), il se trouve que ce gaz est *exceptionnellement favorable*, d'une masse spécifique relative

(1) La rigidité « pratique » peut être augmentée de moitié quand on passe de l'azote à l'air. Cette constatation a été faite pour la première fois par l'auteur en janvier 1943, alors que, manquant d'azote, il avait, par hasard, employé une bouteille d'air comprimé prêtée par une usine. La longueur des étincelles fournies par la machine avait été presque doublée. Cette expérience est actuellement répétée involontairement quand un monteur oublie d'ajouter à l'azote la quantité d'air prescrite et s'étonne de l'indigence de sa machine.

vement faible à rigidité égale, et permettant des champs de 600 kV : cm pour des pressions de 30 à 35 atm, bien faciles à réaliser. Si l'on peut se contenter de puissances spécifiques un peu plus faibles, une pression de 20 à 25 atm est suffisante, assurant une rigidité pratique de 500 kV : cm.

L'air a le défaut d'être un peu oxydant par suite de la formation d'ozone, sans que les effets en soient aussi nuisibles que ceux des halogènes (2). On évite cet inconvénient en diminuant la proportion d'oxygène et en la réduisant à la moitié ou au quart par addition d'azote, sans que les qualités diélectriques en souffrent.

La plupart des gaz : gaz carbonique, azote, méthane, ammoniac, ne donnent que des résultats médiocres. Un seul est vraiment remarquable : l'hydrogène.

Il peut paraître surprenant de préconiser l'hydrogène, dont la rigidité est la moitié de celle de l'air à pression égale. Mais la question de pression est secondaire et s'efface devant les qualités exceptionnelles de l'hydrogène liées à sa faible masse spécifique, sa grande conductibilité thermique, l'absence de tout effet oxydant ou altérant. La pression utile est de 60 à 70 atm, procurant la même rigidité pratique que l'air à 30 atm, avec une masse spécifique sept fois plus faible. La conductibilité thermique, déjà appréciée en électrotechnique [4] est aussi importante. Les étincelles jaillissant dans l'hydrogène comprimé sont froides, comme leur aspect rougeâtre et leur faible bruit le montrent, tandis que dans l'air comprimé les étincelles sont chaudes, bruyantes et d'un blanc éblouissant. Les dégradations par étincelles sont, par suite, bien plus réduites que dans l'air, fait essentiel pour la conservation des balais et organes apparentés. (Il est évident qu'un des grands avantages des machines à transporteurs conducteurs est de permettre le ramassage du courant par un organe aussi simple et aussi petit qu'un frotteur, et que s'il fallait recourir à des appareils plus compliqués — tubes ou kénotrons — la machine perdrait beaucoup de son charme et de sa supériorité pratique sur les ensembles transformateurs-redresseur).

Nous concluons en retenant comme fluides diélectriques l'air et l'hydrogène, procurant des rigidités de 450 à 600 kV : cm, sous des tensions de 200 kV et plus. Les liquides sont à condamner sans appel et pour le vide, il convient d'attendre ses progrès en qualité et en commodité.

Les rigidités annoncées sont faibles vis-à-vis

(2) Dans les machines à transporteurs conducteurs dont le fonctionnement est thermodynamiquement réversible, il ne se forme aucune étincelle ni effluve et la production d'ozone est très réduite, même pour un réglage approché. Au contraire, les transporteurs isolants nécessitant les peignes rendent inévitable une formation importante d'ozone qui a causé à certains expérimentateurs des difficultés inattendues (destruction des lubrifiants, etc.).

des intensités usuelles de champ magnétique : 8000 à 10 000 U. E. M., pressions de 2000 à 4000 g-force : cm<sup>2</sup>, 20 fois plus grandes que les 90 à 160 g-force annoncés précédemment, mais il serait entièrement faux d'en conclure que la puissance spécifique d'une machine électrostatique sera, au mieux, 20 fois plus faible que celle d'une machine électromagnétique. Bien au contraire, elle peut être *plus grande*, à cause de la possibilité de multiplier les surfaces affectées de forces utiles, comme on va le voir tout de suite.

**La machine de Toepler.** — Pour étudier les dispositions de transporteurs conducteurs susceptibles de fournir des puissances intéressantes, nous allons prendre comme point de départ la plus simple de toutes les machines à transporteurs conducteurs, la première machine de Toepler, datant de 1865.

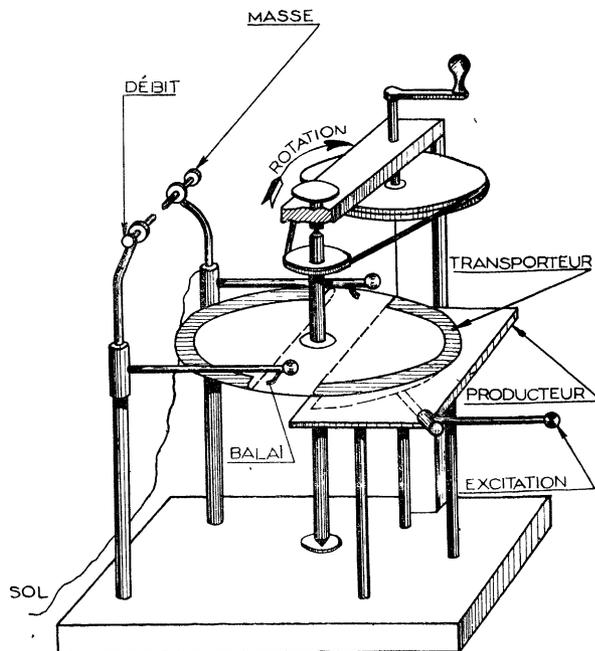


Fig. 1. — Machine originale de Toepler.

Puis, par échelons successifs, nous allons la perfectionner en augmentant la surface totale de maître-couple des parties actives et son utilisation dans le temps pour aboutir à la machine électrostatique parfaite, la machine électrostatique « à barres » dont la puissance spécifique extraordinaire représente un maximum qui paraît difficile à dépasser.

Il ne faut pas croire, d'ailleurs, que les dispositifs plus élémentaires aient perdu tout intérêt. Dans bien des cas, une puissance spécifique moyenne est déjà suffisante, et la machine de Toepler elle-

même, dûment modernisée, est utile pour bien des petites applications.

La machine originale de Toepler (*fig. 1*) se compose d'un disque de verre portant deux secteurs semi-circulaires de clinquant et tournant autour de son axe. Ces deux secteurs, qui sont les transporteurs, viennent en regard du producteur, lame de clinquant fixe avec laquelle ils forment des condensateurs variables. Le producteur étant électrisé par une cause extérieure, le fonctionnement de la machine est fort simple : Quand un transporteur forme avec le producteur une capacité croissante, il est mis en relation avec le sol par le balai de masse et se charge d'électricité par influence. Lorsque la capacité producteur-transporteur est maxima, ainsi que la charge du transporteur, cette relation se rompt et le potentiel du transporteur se met à croître à charge constante. A un instant convenable, le transporteur est mis en relation avec le circuit extérieur par le balai de débit et lui cède sa charge, qui est de moins en moins retenue par l'influence décroissante du producteur. Quand la capacité avec le producteur est minima, le débit est terminé, la relation avec le sol est rétablie et la charge recommence. Telle est l'explication du fonctionnement de cette machine si simple, à peu près dans les termes employés par Toepler lui-même [5].

Il est évident que l'appareil est très défectueux, comme étant réalisé avec des feuilles de clinquant, et que cette déficience du maître-couple l'empêchera de voir sa puissance multipliée comme il conviendrait par l'emploi d'un gaz comprimé. Il va falloir commencer par *épaissir* transporteurs et producteurs, puis donner à leurs tranches un *profil adéquat*.

Le problème de l'épaisseur est très simple. Par raison de symétrie, nous supposons le producteur formé de deux plaques influençant les transporteurs sur leurs deux faces. Portons notre attention sur l'un de ces derniers. Quand il subit, à potentiels constants, une rotation élémentaire  $d\theta$ , le travail des forces électrostatiques est  $\frac{1}{2} V^2 dc$ ,  $V$  étant la différence de potentiel producteur-transporteur,  $dc$  la variation de capacité.  $V$  par ailleurs ne peut dépasser, dans une machine parfaite, la valeur  $E_m e$ ,  $E_m$  étant la rigidité diélectrique du milieu fluide et  $e$  la distance producteur-transporteur. Le travail des forces électrostatiques a donc comme limite supérieure  $\frac{1}{2} E_m^2 e^2 dc$ . Ce travail doit pouvoir être fourni par les forces agissant sur les tranches d'un transporteur. La surface de maître-couple d'une tranche est  $2e'r$ , si  $2e'$  est l'épaisseur du transporteur,  $r$  son rayon. La pression électrostatique ne pouvant dépasser  $\frac{\varepsilon E_m^2}{8\pi}$  son travail est au plus

$$\frac{\varepsilon E_m^2}{8\pi} 2e'r \frac{r}{2} d\theta$$

si elle est constante sur la tranche, cas le plus favorable. Ce travail doit pouvoir égaler avec certitude le travail précédemment calculé  $\frac{1}{2} E_m^2 e^2 dc$ . On a donc à satisfaire l'inégalité

$$\frac{\varepsilon E_m^2}{8\pi} 2e'r \frac{r}{2} d\theta \geq \frac{1}{2} E_m^2 e^2 dc, \quad dc = \frac{\varepsilon dS}{4\pi e} = \frac{\varepsilon r^2 d\theta}{4\pi e},$$

$$\frac{\varepsilon E_m^2}{8\pi} e'r^2 d\theta \geq \frac{1}{2} E_m^2 e^2 \frac{\varepsilon r^2 d\theta}{4\pi e}$$

et il reste

$$e' \geq e.$$

On doit donc avoir, pour un transporteur, une épaisseur  $2e'$  au moins double de l'entre-électrodes  $e$ .

Ceci montre à quel point les transporteurs anciens sont mal dimensionnés. Bien loin de leur donner une telle épaisseur, on les réalisait avec des feuilles métalliques 10 ou 50 fois minces que l'entre-électrodes. Il est seulement étonnant que les conséquences d'une telle monstruosité ne soient pas plus fâcheuses. Nous avons indiqué précédemment pourquoi des machines aussi mal établies peuvent néanmoins donner des résultats à peu près satisfaisants dans l'air ordinaire.

Le dimensionnement en épaisseur obtenu pour les transporteurs est indispensable, mais le calcul ne donne pour  $e'$  qu'une limite inférieure. Cette limite est-elle utilisable ? Ou faut-il la majorer ? Ce nouveau problème est beaucoup plus difficile, car il dépend de la possibilité de réaliser sur les tranches des transporteurs un champ d'intensité constante égale à l'intensité dans l'espace inter-électrodes, là où le champ est pratiquement uniforme. Si cette possibilité existe, pour un certain profil de tranche, on pourra prendre  $e' = e$ . Autrement il faudra  $e' > e$ .

Bien que ce problème de profil à champ électrique constant semble nouveau, il a été résolu à propos de questions homologues d'hydrauliques, où l'on cherche des lignes de jet à vitesse constante. La méthode générale à employer et la solution exacte nous ont été indiquées par MM. Danel et Craya, Ingénieurs aux Ateliers Neyret-Beylier et Piccard-Pictet, Professeurs à l'École des Ingénieurs hydrauliciens.

Représentons la tranche en coupe (*fig. 2*); le profil idéal (champ constant avec  $e' = e$ ) est représenté par les équations paramétriques très simples

$$\frac{r}{e} = \frac{2}{\pi} \text{Log} \sin \zeta, \quad \frac{y}{e} = 1 - \frac{2\zeta}{\pi},$$

où l'origine est prise au sommet de la courbe.

**Multiplication des plateaux.** — La machine précédemment étudiée ne comporte qu'un seul plateau à deux transporteurs. Il est évident que l'on peut mettre autant de plateaux que l'on veut

sur le même axe. Il y aura alors à chaque producteur  $N + 1$  lames si  $N$  est le nombre de plateaux. La symétrie des lames fixes et des secteurs mobiles est alors complète, si l'on fait abstraction de lames fixes extrêmes; par égalité de l'action et

de la réaction, les lames fixes supportant des forces égales à celles appliquées aux transporteurs devront avoir la même épaisseur et le même profil que ces derniers. La puissance spécifique d'une telle machine à plateaux multiples peut déjà être importante.

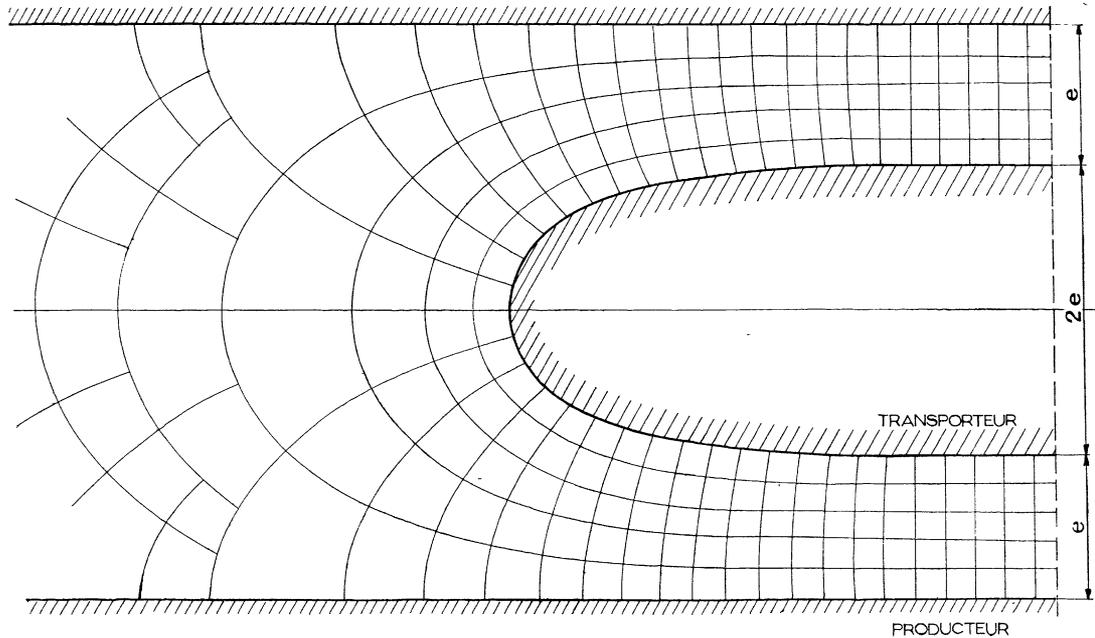


Fig. 2. — Tranche avec profil idéal.

Soit  $-V$  le potentiel d'excitation (potentiel du producteur) et  $+k.V$  le potentiel de débit.  $k$  est un nombre très important dans la théorie des machines à transporteurs conducteurs, nous l'appellerons *facteur de multiplication*. La somme  $k.V + V$  ne peut dépasser une valeur maxima, évidemment égale à  $E_m e$  (production d'étincelles entre producteurs et transporteurs). Quand la puissance est maxima on a donc  $k.V + V = E_m e = 2U$ . La charge prise par un transporteur est  $C.V$ ,  $C$  étant sa capacité maxima avec le producteur, et l'énergie produite est  $(C.V).(k.V) = kCV^2$  dans le cas le plus favorable, où la différence de potentiel aux bornes du circuit extérieur est constante et égale à  $k.V$ . Comme  $V = \frac{2U}{k+1}$  l'énergie est maxima maximorum si  $\frac{4k}{(k+1)^2}$  est maximum, c'est-à-dire si  $k = 1$  valeur remarquable.

Nous verrons plus tard que les capacités parasites et résiduelles, dont il n'a pas été tenu compte dans le raisonnement simplifié précédent, font que la valeur optima de  $k$  est quelque peu inférieure à 1.

En prenant  $k = 1$  il est facile de calculer la puissance spécifique. Par demi-tour, l'énergie produite est  $CU^2$ , et pour  $N$  tours-seconde, la puissance est  $2NCU^2$ . Si  $e$  est l'entre-électrodes,  $r$  le rayon,  $l$  la

longueur, on a  $\frac{l}{6e}$  plateaux, chacun de surface  $2\pi r^2$  et chaque secteur  $\pi r^2$  (il a deux faces). On a donc

$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi e} = \frac{\varepsilon \pi r^2}{4\pi e} \frac{l}{6e} = \frac{\varepsilon r^2 l}{24e^2},$$

$$P = 2NCU^2 = 2N \frac{\varepsilon r^2 l}{24e^2} E_m^2 e^2 = N \frac{\varepsilon r^2 l}{12} E_m^2.$$

Or le volume est  $\pi r^2 l$ . La puissance spécifique est

$$\frac{P}{\pi r^2 l} = N \frac{\varepsilon r^2 l}{12} E_m^2 \frac{1}{\pi r^2 l} = \frac{N \varepsilon E_m^2}{12\pi} = \frac{2}{3} N \left( \frac{\varepsilon E_m^2}{8\pi} \right)$$

si

$$\frac{\varepsilon E_m^2}{8\pi} = 10^5 \text{ C. G. S.}, \quad N = 25 \text{ t. s.},$$

la puissance spécifique est

$$\frac{2}{3} \cdot 25 \cdot 10^5 \frac{\text{ergs} \cdot \text{s}}{\text{cm}^3} = \frac{1}{6} \frac{\text{W}}{\text{cm}^3} = 170 \frac{\text{W}}{\text{dm}^3} = 170 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3}.$$

On voit donc que la puissance spécifique de la machine rudimentaire de Toepler peut être déjà considérable, moyennant correction de son défaut principal — l'insuffisance d'épaisseur des transporteurs — pour lui permettre de profiter des milieux à grande densité d'énergie.

**Multiplication des pôles.** — Pour augmenter la puissance spécifique de la machine de Toepler un procédé très ancien, déjà employé par Holtz, se présente à l'esprit : la multiplication des pôles. Dans le cas présent, elle consistera à remplacer les transporteurs et les producteurs d'ouverture angulaire  $180^\circ$  par d'autres d'ouverture  $180^\circ : n$ . La machine aura alors  $n$  paires de pôles au lieu d'une : chaque plateau comprendra  $2n$  secteurs au lieu

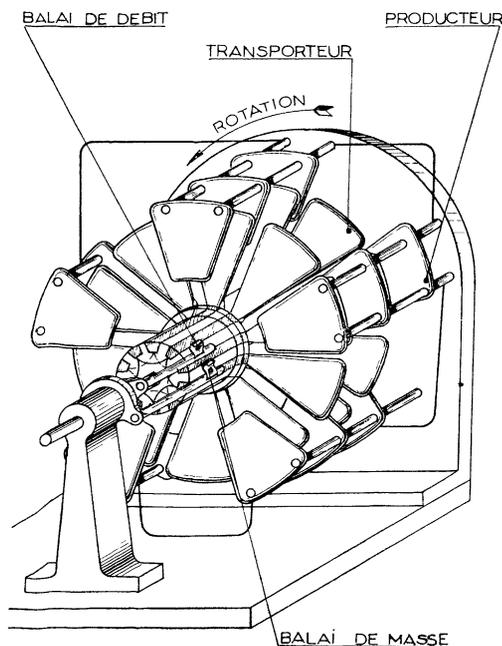


Fig. 3. — Machine à simple transport et cinq paires de pôles.

de 2, et le producteur sera formé de  $n$  groupes fixes de secteurs d'angle  $180^\circ : n$ . Pour simplifier la construction, ces  $n$  groupes seront reliés électriquement entre eux et électrisés par la même source, tandis que les secteurs d'un même plateau seront interconnectés de deux en deux. De cette façon, deux balais restent suffisants, mais au lieu de faire un angle de  $180^\circ$ , ils en feront un de  $180^\circ : n$  ou d'un multiple de cet angle. On aperçoit ici un des avantages importants, à la vérité connu depuis fort longtemps, des machines à transporteurs conducteurs : la possibilité de multiplier les pôles et les plateaux sans avoir besoin de plus de deux balais. Au contraire une machine à transporteurs isolants comprend nécessairement  $2n$  peignes pour un seul plateau et  $2np$  peignes s'il y a  $p$  plateaux.

La multiplication des pôles a pour résultat que le cycle de fonctionnement se répète après une rotation de  $180^\circ : n$  au lieu de  $180^\circ$ . La capacité utile restant en principe la même, la puissance à vitesse égale est multipliée par  $n$ . Ce fait s'inter-

prête immédiatement si l'on pense que la surface totale de maître-couple est multipliée par  $n$ , puisque chaque plateau comprend  $2n$  secteurs au lieu de 2. Les forces utiles sont donc multipliées par  $n$  et de même la puissance.

Ce résultat reste théorique parce que de nombreux effets défavorables sont eux aussi multipliés par la multiplication des pôles. La capacité utile ne reste pas constante : elle diminue en raison de l'espace perdu entre transporteurs successifs, espace qui croît avec le nombre des pôles. Plus grave encore est l'augmentation des capacités parasites entre transporteurs, qui contribuent aussi à diminuer la puissance. Il en résulte que la multiplication des pôles a une limite au delà de laquelle on ne gagne rien. Cette limite est caractérisée par le facteur polaire  $\frac{ne}{r}$  où  $e$  est l'espace inter-électrodes, et  $r$  le rayon des plateaux. Ce facteur, dans les machines de Toepler, doit rester inférieur à 0,15 et la valeur 0,10 est la plus raisonnable. Ainsi un plateau de 30 cm de diamètre, avec un intervalle inter-électrodes de 3 mm (épaisseur du plateau 6 mm) comprendra  $n = \frac{0,1 \times 150}{3} = 5$  paires de pôles ou 10 secteurs de  $36^\circ$  (fig. 3). Et la puissance ne sera pas multipliée par 5 par rapport à la machine bipolaire, mais par 3 ou 3,5 seulement.

**Le double transport.** — Dans les machines de Toepler précédemment décrites, l'utilisation dans le temps des surfaces de maître-couple est tout à fait insuffisante. Nous avons vu que l'énergie électrique maxima fournie par un transporteur au cours d'un cycle de fonctionnement est  $CU^2$  (production de la charge  $CU$  sous la tension  $U$ ). Mais si la tranche du transporteur était soumise en permanence aux forces électriques maxima (pression uniforme  $\frac{\varepsilon E_m^2}{8\pi}$  tout le temps) le travail des forces serait  $4CU^2$ . En effet, on aurait

$$d\mathcal{G} = \frac{\varepsilon E_m^2}{8\pi} er^2 d\theta$$

et pour un tour complet

$$\frac{\varepsilon E_m^2}{8\pi} 2\pi er^2 = \varepsilon E_m^2 \frac{er^2}{4} = e^2 E_m^2 \frac{\varepsilon r^2}{4e} = 4U^2 C.$$

(On a raisonné sur une machine bipolaire à un seul plateau.)

On comprend la grande différence des deux résultats précédents en examinant de près les forces auxquelles est soumis un transporteur au cours d'une de ses révolutions. Pendant l'élévation du potentiel à charge constante, les forces électriques absorbent le travail  $\frac{1}{2}CU^2$ , pendant la période de débit sous tension constante  $U$  elles absorbent  $CU^2$ , c'est à ce moment-là seulement que le maître-couple

du transporteur est utilisé à plein. Pendant la charge du transporteur sous tension nulle, les forces électriques fournissent le travail  $\frac{1}{2}CU^2$ ; on voit en effet que le transporteur entrant dans le producteur est attiré par lui. Le bilan total est bien  $CU^2$ , égal à l'énergie électrique produite. Il est très inférieur au maximum  $\frac{1}{4}CU^2$  parce que, pendant les  $\frac{3}{4}$  du temps, les forces ne fournissent que des travaux de somme nulle.

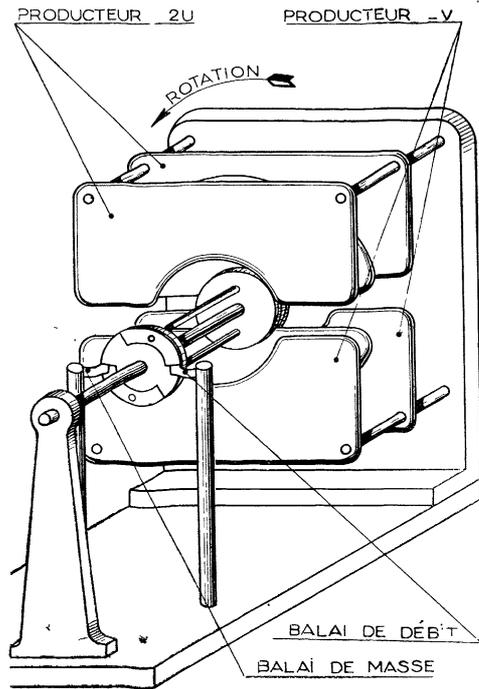


Fig. 4. — Machine à double transport.

Comment améliorer l'utilisation du maître-couple ? Un problème semblable s'est posé pour les machines à courroie de Van de Graaf. Dans les premiers modèles, seul le brin montant était chargé et supportait des forces électriques utiles; le brin descendant courait à vide et ne contribuait pas à la production d'énergie. On connaît le perfectionnement apporté par Van de Graaf : il consiste à électriser le brin descendant de façon que, ce brin supportant les mêmes forces que l'autre, la puissance soit doublée.

Le même procédé s'applique, dans son principe, aux machines de Toepler. Il faudra électriser les transporteurs successivement des deux signes et non pas d'un seul, de façon que les forces, dans deux positions symétriques d'un même transporteur au cours d'une révolution, soient les mêmes.

Pour y parvenir, il n'est pas adéquat, pour des raisons de puissance et de réversibilité d'employer le dispositif auto-exciteur utilisé habituellement

par Van de Graaf dans ses machines à courroie [6]. D'une façon plus symétrique, il faut disposer un second système producteur remplissant l'espace laissé libre par le premier. Ce deuxième producteur sera porté par une seconde source auxiliaire au potentiel  ${}_2U$ . De cette façon, la différence de potentiel maxima producteur-transporteur sera la même pour les deux producteurs qui seront absolument identiques et présenteront avec les transporteurs le même intervalle inter-électrodes  $e$ .

Le fonctionnement de la machine se présente alors de la façon suivante (fig. 4) : considérons un transporteur au moment où il est à l'intérieur du premier producteur au potentiel  $-V$ . Sa charge est  $CV$  à potentiel nul, car il est encore en relation avec le sol par le balai de masse. Quand il commence à sortir du producteur  $-V$ , cette relation se rompt et le potentiel du transporteur s'élève, plus vite encore que dans les machines à simple transport, en raison de l'influence du producteur  ${}_2U$ . Quand le potentiel est suffisant, soit  $k.V$ , le débit a lieu par un balai de débit en relation avec le circuit extérieur, qui prend contact avec le transporteur. Ce débit se poursuit jusqu'à ce que le transporteur soit entièrement à l'intérieur du producteur  ${}_2U$ , et à ce moment la charge du transporteur est  $C(k.V - {}_2U) = -CV$ . La quantité d'électricité cédée au circuit extérieur est donc  ${}_2CV$  au lieu de  $CV$  et si le débit a lieu sous la tension constante  $k.V$ , cas le plus favorable, l'énergie produite est  ${}_2kCV^2$ , quantité maxima pour  $k = 1$  et devenant alors  ${}_2CU^2$ . Dans la suite de son mouvement, le transporteur de nouveau isolé emporte la charge  $-CV$  avec lui, charge qu'il transmet au sol par le balai de masse et le cycle recommence. On aperçoit mieux la parfaite symétrie que le perfectionnement précédent apporte à la machine de Toepler en prenant pour un instant une origine des potentiels symétriques par rapport aux balais. Les balais seront alors aux potentiels  $-\frac{1}{2}k.V$  et  $+\frac{1}{2}k.V$

les producteurs à  $-V - \frac{1}{2}k.V$  et  $V + \frac{1}{2}k.V$ .

On voit que dans ce nouveau type de machine, que nous appellerons machine à double transport la puissance est théoriquement deux fois plus grande que dans la machine correspondante à simple transport. L'utilisation des maîtres-couple, sans être parfaite, est améliorée, car elle est en moyenne dans le temps de  $\frac{1}{2}$  au lieu de  $\frac{1}{4}$

Le progrès réalisé par le double transport est en fait plus grand que ce qui résulte des considérations simples qui précèdent. En effet, l'influence néfaste des capacités parasites est à peu près la même que le transport soit simple ou double. Elle est donc, en valeur relative, deux fois plus faible dans le second cas. C'est pourquoi le passage du simple au double transport, toutes choses égales

par ailleurs, multiplie la puissance par un facteur plus grand que 2, qui atteint 2,5 et même 3. L'influence diminuée des capacités parasites permet de multiplier davantage les pôles et de prendre un facteur polaire plus grand, qui peut être couramment 0,15. Il en résulte une nouvelle possibilité pratique d'augmentation de la puissance spécifique, qui est finalement quatre fois plus grande qu'avec le simple transport, pour la même vitesse de rotation.

**La cascade.** — Dans toutes les machines genre Toepler précédentes, à simple ou double transport, la tension de débit est sensiblement égale à la moitié de la différence de potentiel maxima producteur-transporteur  $2U$ . Elle est même inférieure en pratique, car le maximum de puissance a lieu pour une valeur de  $k$  notablement inférieure à 1, en raison des capacités parasites.

Il en résulte des difficultés dans la réalisation de machines pour tensions élevées. La rigidité diélectrique de tous les milieux décroît toujours quand la distance inter-électrode croît, et cette règle ne souffre aucune exception. Bien que ce défaut soit beaucoup moins marqué dans les gaz comprimés que dans le vide ou les isolants solides, il n'en existe pas moins, particulièrement dans le cas d'électrodes souillées, comme il arrive communément dans la pratique. C'est pourquoi il est peu avantageux d'employer des distances inter-électrodes correspondant à des différences de potentiel de plus de 200 kV, ce qui, dans les machines de Toepler limite la tension de débit à 80 ou 100 kV au maximum.

La cascade est un procédé qui, sans modifier sensiblement la puissance, permet de remédier à cet inconvénient et de réaliser des machines à tension élevée sans employer des différences de potentiel inter-électrodes trop grandes.

Une machine à cascade peut être à simple ou double transport. Nous choisirons un exemple de la seconde sorte, comme étant plus symétrique et plus général. La machine comprendra alors les mêmes organes qu'une machine ordinaire à double transport, seules vont différer les interconnexions entre les organes mobiles et entre les organes fixes. Si la cascade est à deux étages, cas le plus simple (fig. 5) il y aura au moins quatre groupes producteurs ou analogues, isolés les uns des autres. Le premier sera au potentiel  $-V$ , le second à  $-V + kV$ , le troisième à  $+V + 2kV$ , le quatrième à  $V + kV$ . Un transporteur situé à l'intérieur du premier producteur et relié au sol prendra une charge  $CV$ . Il emportera cette charge avec lui dans la suite de son mouvement, alors qu'il sera isolé. Quand le transporteur sera à l'intérieur du second producteur, son potentiel sera  $kV$ . Quand il pénétrera à l'intérieur du second producteur, son potentiel sera  $kV$ . Quand il pénétrera à l'intérieur du troisième produc-

teur, son potentiel atteindra rapidement  $2kV$ , et à ce moment le débit commencera, grâce à un balai de débit convenablement calé. Quand le transporteur sera entièrement à l'intérieur du troisième producteur, sa charge sera  $-CV$ , il aura donc débité  $2CV$ , et il y a bien double transport. Il

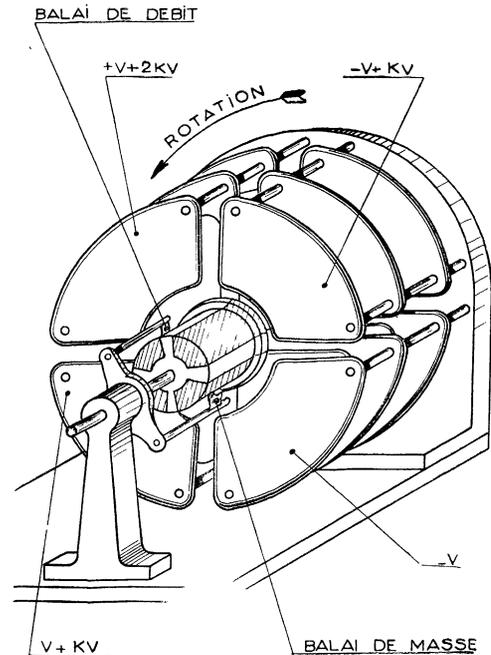


Fig. 5. — Machine à double transport et cascade.

emportera cette nouvelle charge dans la suite de son mouvement. Il prendra par suite le potentiel  $kV$  lorsqu'il sera à l'intérieur du troisième producteur, puis viendra en contact avec le balai de masse et le cycle recommencera. On voit aisément que cette disposition permet au potentiel des transporteurs de varier régulièrement de zéro à  $2kV$  et de  $2kV$  à zéro sans que jamais la différence de potentiel inter-électrodes (du moins entre électrodes fixes et mobiles partiellement en regard) dépasse  $2U = kV + V$ .

Il est facile de généraliser ce qui précède. Une machine à  $p$  étages de cascade et double transport comprendra des producteurs fixes aux potentiels suivants :  $-V$ ;  $-V + kV$ ;  $-V + 2kV$ , ...;  $-V + (p-1)kV$ ;  $+V + pkV$ ;  $V + (p-1)kV$ ;  $V + (p-2)kV$ , ...;  $V + kV$ ;  $-V$ , etc. La tension de débit sera  $pkV$  et la quantité débitée par chaque transporteur  $2CV$  (3).

(3) L'échelonnement des potentiels indiqué précédemment n'est rigoureusement valable que si les capacités parasites sont nulles. Dans la pratique il faut relever les potentiels compris entre  $-V + kV$  et  $-V + (p-1)kV$ , et rabaisser ceux entre  $V + (p-1)kV$  et  $V + kV$ , les deux extrêmes,  $-V$  et  $V + pkV$ , restant les mêmes.

La cascade est très analogue au couplage des piles en tension. De même qu'avec un certain nombre de piles on peut réaliser toutes sortes de groupements donnant la même puissance, mais avec des tensions et des débits différents, de même on peut, dans une machine de Toepler, grouper diversement producteurs et transporteurs. Soit par exemple une machine octopolaire sans cascade. Elle peut être considérée comme en couplage parallèle, ses producteurs et ses transporteurs seront interconnectés de deux en deux. Si on les couple de quatre en quatre, la machine peut être utilisée en cascade à deux étages, avec débit moitié et tension double, c'est un couplage série-parallèle. Si on laisse les transporteurs et les producteurs isolés, la machine peut fonctionner en cascade à quatre étages, avec tension quadruple et débit quart, c'est le couplage série.

Une machine de Toepler multipolaire peut donc être comparée à une batterie de piles. Selon la résistance du récepteur, il conviendra de lui appliquer un couplage ou un autre, de même qu'avec les piles il convient, pour obtenir le maximum de puissance, de réaliser un groupement dont la résistance interne soit aussi proche que possible de la résistance externe. Cette règle peut se transposer au cas des machines

de Toepler. Si le champ inter-électrodes reste fixe, ces machines possèdent, comme nous le verrons, une impédance interne qui — sauf qu'elle ne correspond à aucune dissipation d'énergie — possède les propriétés d'une résistance intérieure. On utilisera donc au mieux une machine multipolaire en amenant, par un couplage favorable, son impédance à approcher le plus possible la résistance du récepteur.

La cascade permet de réaliser sans difficulté des machines genre Toepler donnant plusieurs centaines de kilovolts, par exemple 200 kV pour des rotors de moins de 10 cm de diamètre. Des tensions très élevées supposent des machines de grandes dimensions, en raison de la présence d'un axe conducteur au potentiel du sol.

**La disposition cylindrique.** — Dans les machines précédentes, les transporteurs et producteurs sont formés de secteurs plans, réalisant des condensateurs plans à lames multiples. Cette disposition est évidemment celle qui utilise le mieux l'espace, mais elle présente certaines difficultés au point de vue construction et isolement. Quand la puissance spécifique peut être modérée, il est avantageux de recourir à la disposition cylindrique. Les transporteurs

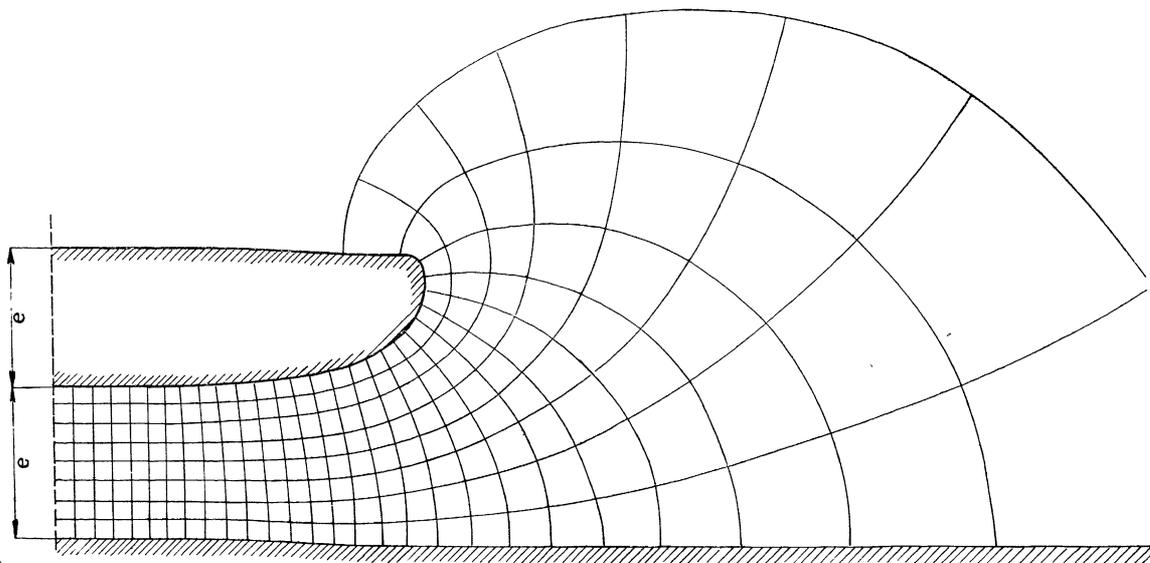


Fig. 6. — Profil pour machine cylindrique. Équation du profil :

$$r = \frac{e}{\pi} \left( \cos \theta + 2 \log \sin \frac{\theta}{2} \right), \quad r' = \frac{e}{\pi} (\theta + \sin \theta).$$

seront des segments de cylindre, de même les producteurs. Par un calcul simple, on montre que l'épaisseur minima des uns et des autres est égale à la distance inter-électrodes  $e$ . Il existe également un profil idéal pour les tranches, permettant d'atteindre effectivement l'épaisseur minima précédente, en ayant un champ constant partout (fig. 6). Ce profil est la

ligne de jet de l'ajutage rentrant de Borda, bien connu en hydraulique (fig. 6).

La disposition cylindrique paraît fort peu avantageuse quant à la puissance spécifique, le volume utile étant négligeable par rapport au volume total, contrairement à ce qui a lieu avec les machines à plateaux (fig. 7). Cette première impression est

trompeuse. Les capacités parasites sont notablement plus réduites, de telle sorte que le facteur polaire peut être utilement augmenté, jusqu'à 0,15 et 0,20,

améliorant ainsi la puissance. En outre l'isolement des producteurs et des transporteurs est beaucoup plus facile, de telle sorte que la place perdue est

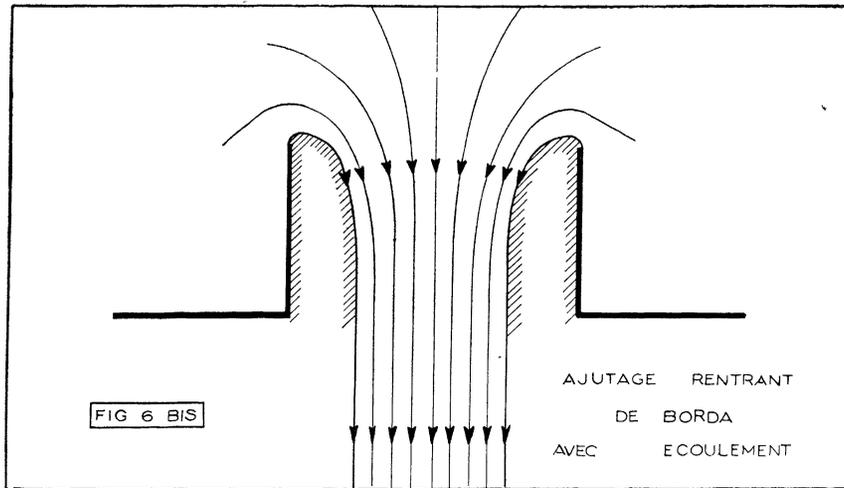


Fig. 6 bis. — Ajutage rentrant de Borda avec écoulement.

moins grande qu'on ne l'imagine. Les facilités d'isolement rendent enfin la disposition cylindrique très

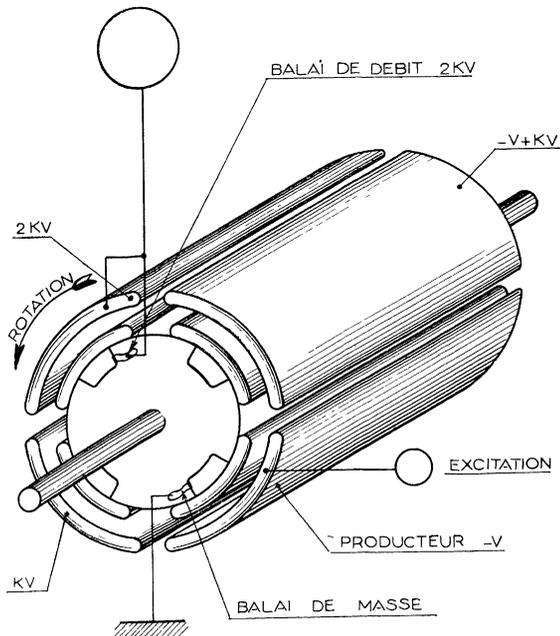


Fig. 7. — Machine cylindrique à cascade et simple transport.

commode pour la production de tensions élevées avec des rotors de petit diamètre (200 kV pour 20 cm).

**Les machines à barres.** — Les machines genre

Toepler précédemment esquissées représentent une belle gamme de possibilités recouvrant pratiquement tout le domaine des hautes tensions continues usuelles, de quelques kilovolts à plusieurs centaines (\*). Des caractéristiques comme 10 kV, 1 mA; 40 kV, 50 mA; 300 kV, 10 mA sont dans l'ordre des possibilités immédiates et sont plus avantageusement réalisées par la machine électrostatique que par les groupes transformateurs-redresseurs-filtre.

Si intéressants que puissent être de tels résultats au point de vue pratique, les machines genre Toepler, même à double transport et cascade, sont encore bien peu satisfaisantes théoriquement. Quelle que soit la disposition adoptée, les transporteurs se présentent sous la forme de plaques relativement minces, en raison des limites imposées au facteur polaire  $\frac{ne}{r}$ . La tranche de ces plaques, partie active, a été dûment dimensionnée et profilée, mais sa surface n'en reste pas moins petite par rapport à la surface totale du transporteur. Les forces utiles sont donc peu de chose par rapport aux forces inutiles, perpendiculaires au mouvement, et de ce point de vue les transporteurs sont bien mal proportionnés.

Pour améliorer cet état de choses, il faut employer des transporteurs qui, au lieu d'être plats, pré-

(\* ) Il est évident qu'il suffira, comme Holtz l'a déjà fait, d'un changement de couplage pour transformer les machines envisagées en alternateurs et moteurs alternatifs. Mais cette possibilité est tellement dépourvue d'intérêt pratique que nous la négligerons entièrement.

sentent une section arrondie plus ou moins voisine d'un cercle (*fig. 8*). De cette façon la surface de

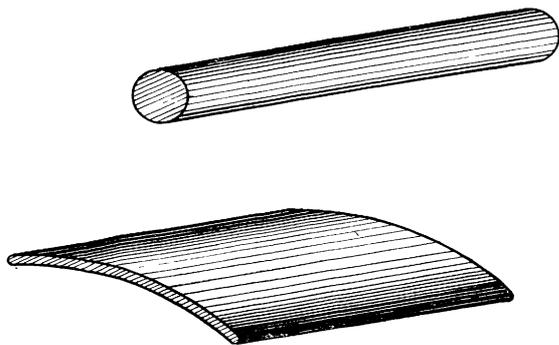


Fig. 8. — Barre et transporteur plat.

maître-couple, au lieu d'être très petite par rapport à la surface totale, lui sera comparable. Les transporteurs, au lieu d'être des secteurs ou des segments plats à tranche profilée, ressemblent à des *barres* qui se mouvraient perpendiculairement à leur

grande dimension, d'où le nom de *machines à barres* donné à cette nouvelle catégorie de machines.

Il n'est pas suffisant de donner aux transporteurs une forme raisonnable, il faut encore que leur maître-couple soit bien utilisé, que les forces électriques soient aussi grandes que possible pour une densité d'énergie maximale donnée. On ne peut y arriver avec la disposition de Toepler, parce que les capacités parasites rendraient le fonctionnement impossible.

Pour tirer le meilleur parti des barres il faut envisager le fonctionnement de la machine sous un jour nouveau. Laissant de côté pour un instant les considérations de capacités, il faut regarder les barres comme des conducteurs chargés se mouvant dans un champ perpendiculaire à leur grande dimension. La force qui en résulte est facile à calculer, et si la répartition du champ autour de la barre est connue, on pourra prévoir l'indice de forme.

Le calcul est particulièrement facile pour des barres à section *conique*, elliptique ou circulaire. Ce dernier cas, particulièrement simple, va nous servir d'exemple. Soit un cylindre circulaire infini, chargé d'électricité, plongé dans un champ uniforme  $E_0$  perpendiculaire à son axe (*fig. 9*). La

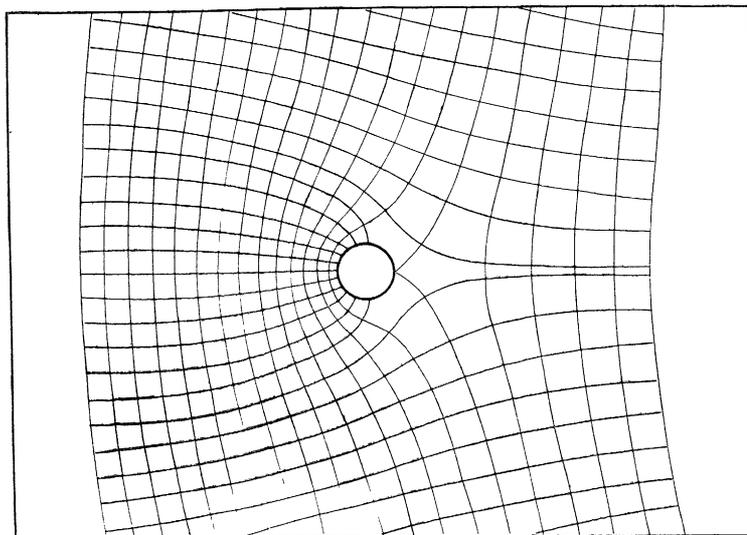


Fig. 9. — Barre circulaire dans un champ uniforme avec la charge donnant la force maxima. On voit que le champ est intense sur la moitié gauche et très faible sur la moitié droite. La force est dirigée vers la gauche.

densité d'équilibre peut être regardée comme la somme de deux densités :

1° Une densité donnant un champ nul à l'intérieur et correspondant à une charge totale égale à la charge du cylindre proposé. Cette densité est évidemment uniforme;

2° Une densité donnant un champ  $-E_0$  à l'intérieur et correspondant à une charge totale nulle. Cette densité est de la forme  $\sigma_0 \cos \theta$  d'après les

propriétés connues des quadriques. La densité totale sur le cylindre est donc  $\sigma_0 \cos \theta + \sigma_1$ . La charge par unité de longueur de barre est  $2\pi a \sigma_1$ ,  $a$  étant le rayon de la barre, et cette charge subit dans le champ  $E_0$  la force  $F = 2\pi a \sigma_1 E_0$ . La densité  $\sigma_0 \cos \theta$  donne à l'intérieur un champ uniforme  $\frac{2\pi \sigma_0}{\epsilon}$ . On a donc  $2\pi \sigma_0 = \epsilon E_0$  et  $\sigma_0 = \frac{\epsilon E_0}{2\pi}$ .

Par ailleurs le champ est maximum sur la barre au point où  $\theta = 0$ , et ce champ doit atteindre juste

la limite  $E_m$  correspondant à la rigidité diélectrique du milieu fluide. On a donc

$$\sigma_0 + \sigma_1 = \frac{\varepsilon E_m}{4\pi},$$

d'où

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon E_m}{4\pi} - \frac{\varepsilon E_0}{2\pi}$$

et

$$F = 2\pi a \varepsilon E_0 \left( \frac{\varepsilon E_m}{4\pi} - \frac{\varepsilon E_0}{2\pi} \right) = \varepsilon a \left( \frac{E_0 E_m}{2} - E_0^2 \right)$$

$F$  est maxima si

$$E_m = 4 E_0 \quad \text{ou} \quad E_0 = \frac{E_m}{4}$$

et dans ce cas

$$F = \frac{\varepsilon a E_m^2}{16}.$$

Rapportons cette force au maître-couple  $2a$ , on a

$$K = \frac{F}{S} \frac{8\pi}{\varepsilon E_m^2} = \frac{\varepsilon a E_m^2}{16 \cdot 2a} \frac{8\pi}{\varepsilon E_m^2} = \frac{\pi}{4} = 0,78.$$

L'indice de forme est donc remarquablement grand. Il est vrai que dans les machines genre Toepler il atteint l'unité, mais seulement pendant de courts instants ( $1/4$  à  $1/2$  du temps, selon le mode de transport). Ici au contraire, si  $E_0$  est constant, cet indice reste valable sans cesse. L'indice de forme est encore meilleur pour des barres elliptiques dont la section a son *petit axe* parallèle au mouvement, forme surprenante, quand on pense aux traditionnelles lames de clinquant, dont l'aplatissement a lieu dans la direction perpendiculaire. L'optimum est atteint pour un rapport d'axes de 1,62 donnant un indice de forme de 0,95 pour un champ  $E_0 = 0,34 \cdot E_m$  (fig. 10).

Reste à savoir comment on réalisera pratiquement la charge des barres et le champ  $E_0$ . La charge est facile à obtenir avec des producteurs présentant avec les barres une différence de potentiel convenable. Étant donnée la capacité considérable entre barres successives, il sera nécessaire, lors de la charge d'une barre, que les barres voisines soient au même potentiel. Les producteurs se composeront donc de plaques suffisamment larges pour influencer plusieurs barres à la fois, lesquelles seront mises en relation avec le sol ou avec un pôle par des balais convenables. Le tracé graphique des lignes de force montre que, pour les formes usuelles de barres, la charge désirable peut être obtenue sans que le champ au voisinage de la barre atteigne la rigidité diélectrique.

Une fois la barre chargée, il faut la déplacer dans le champ  $E_0$  d'intensité constante. Il serait incommodé de réaliser  $E_0$  avec un condensateur plan. Bien plus avantageux est l'emploi d'une série de barres analogues aux barres mobiles, de potentiels régulièrement échelonnés. (Ce dispositif est employé

dans les tubes à haute tension et les machines Van de Graaf à pression, pour obtenir un champ constant sur une grande longueur) [7].

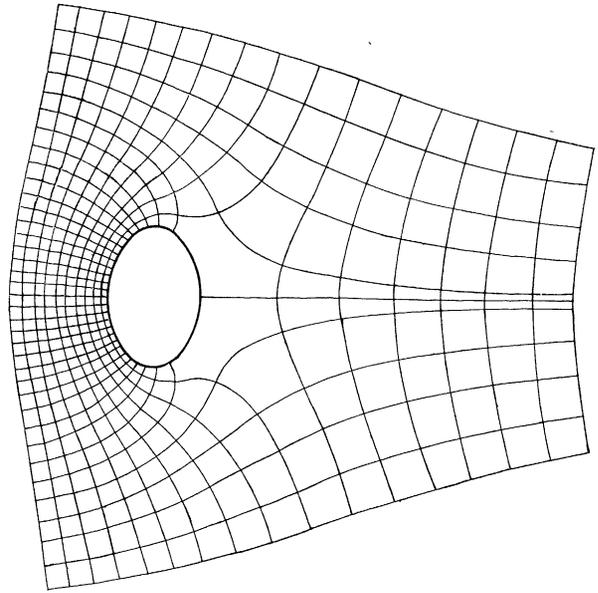


Fig. 10. — Barre elliptique optima dans le champ uniforme donnant la force maxima. Le champ est pratiquement constant sur la moitié gauche et presque nul sur la moitié droite.

Une machine à barres bipolaire à un seul plateau se présente donc de la façon suivante (fig. 11) : Un rotor formé d'un noyau isolant portant une rangée de barres disposées comme les rayons d'une roue. Un stator comprenant d'une part, deux producteurs faits de deux plaques entre lesquelles passent les barres mobiles, d'autre part, des barres fixes à potentiels échelonnés. Pendant leur passage dans les producteurs, les barres mobiles sont mises en relation avec les pôles de la machine grâce à des balais. Les producteurs ont avec ces pôles une différence de potentiel convenable pour assurer la charge. Il est évidemment souhaitable que la machine soit à double transport, toutes les barres seront alors bien utilisées.

Il est évident que les barres ne seront soumises à des forces que pendant leur voyage entre les deux haies fixes créant le champ  $E_0$  et qu'au point de vue des forces, leur présence dans les producteurs, si elle est inévitable, ne contribue pas à la puissance. On a vu que ces producteurs doivent entourer plusieurs barres à la fois, différence essentielle avec le système de Toepler, rendue nécessaire par la capacité entre barres voisines. Les deux producteurs enveloppant chacun trois ou quatre barres, il faudra, pour que la majorité des barres soit soumise à des forces, que les haies enferment des dizaines de barres, ce qui implique des tensions extraordi-

nairement élevées, à moins que le diamètre des barres ne soit minuscule. Le champ  $E_0$ , étant de l'ordre du tiers ou du quart de  $E_m$ , dépassera faci-

lement 100 kV : cm, et pour un rotor de 10 cm de diamètre, cela conduit à une différence de potentiel entre pôles de 1000 à 2000 kV.

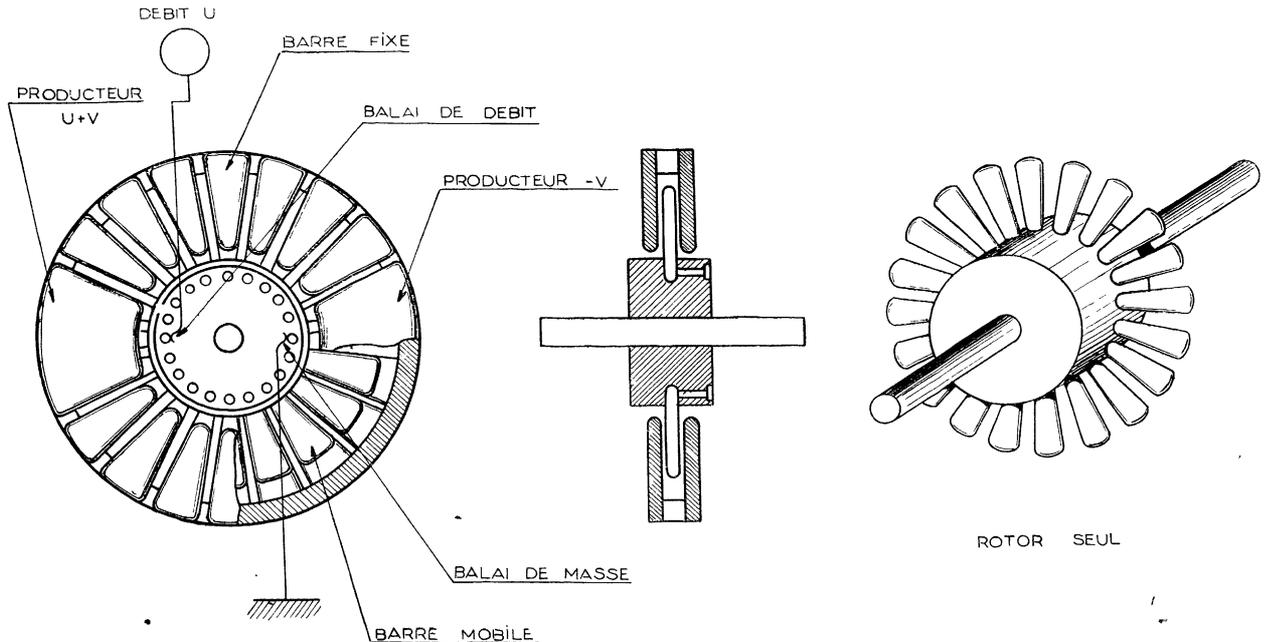


Fig. 11. — Machine à barres à un plateau.

Essayons d'apprécier la puissance spécifique d'une machine à barres. Les tracés graphiques du champ montrent que l'on a intérêt à donner à l'intervalle minimum entre barres fixes et mobiles une valeur égale à la moitié de l'axe de la section des barres qui est perpendiculaire au mouvement, règle absolument identique à celle trouvée pour les machines de Toepler. On constate également qu'on peut laisser un intervalle comparable entre barres fixes ou mobiles successives sans que le champ et l'indice de forme soient sensiblement modifiés par les influences entre barres voisines. En prenant des barres circulaires, on voit immédiatement que les règles précédentes imposent pour chaque barre mobile de rayon  $a$  et de longueur  $l$  un volume de machine au moins égal à  $2\frac{1}{2} a^2 l$ . Ce volume est affecté d'une force  $2 al \cdot K \cdot \frac{\varepsilon E_m^2}{8\pi}$  et d'une puissance  $2 al \cdot K \cdot \frac{\varepsilon E_m^2}{8\pi} \cdot v$ , où  $v$  est la vitesse linéaire. La puissance spécifique est donc

$$2 al K \frac{\varepsilon E_m^2}{8\pi} v \frac{1}{2\frac{1}{2} a^2 l} = \frac{K v}{1\frac{1}{2} a} \left( \frac{\varepsilon E_m^2}{8\pi} \right).$$

Avec un indice de forme de 0,5, un diamètre de barres de 1 cm et une vitesse de 0,5 m : s, on a, pour une densité d'énergie de  $10^5$  ergs : cm<sup>3</sup> (champ de 425 kV : cm pour  $\varepsilon = 1$ ), une puissance spéci-

fique de 2 W : cm<sup>3</sup>, ou 2000 kW : m<sup>3</sup>. Le résultat est encore plus impressionnant si l'on rapporte la puissance au poids de barres. Celles-ci occupent sensiblement le quart du volume utile. Si elles sont en aluminium plein, il en résulte une densité moyenne de 0,7 environ et une puissance massique de 4 kW : kg. On irait plus loin encore avec des barres creuses.

Bien que les résultats précédents soient seulement théoriques ils montrent suffisamment qu'avec les rigidités facilement réalisables aujourd'hui, on peut obtenir par une multiplication rationnelle des surfaces de maître-couple et leur bonne utilisation, des puissances spécifiques supérieures à celles des machines magnétiques.

**Les connexions transversales.** — La puissance spécifique remarquable des machines à barres suppose une différence de potentiel entre pôles très supérieurs à la différence de potentiel d'excitation, existant entre les barres mobiles et un producteur qui les entoure. Dans ces conditions, la capacité résiduelle des barres mobiles avec la masse, qu'il est impossible d'annuler, sauf dans une disposition genre Van de Graaf, empêche l'élévation suffisante du potentiel des transporteurs. Si en effet la capacité avec la masse est  $1/10^6$  de celle avec les producteurs, le potentiel d'une barre mobile

ne peut dépasser le décuple du potentiel d'excitation, et à cette limite elle est incapable de tout débit, la totalité de sa charge étant retenue par la capacité parasite.

Pour que le potentiel d'une barre pût s'élever correctement, il faudrait que sa charge, au lieu d'être constante, augmentât progressivement avec le potentiel à raison du supplément nécessaire par la capacité avec la masse. Cette charge supplémentaire devrait être retirée progressivement pendant l'abaissement du potentiel de la barre.

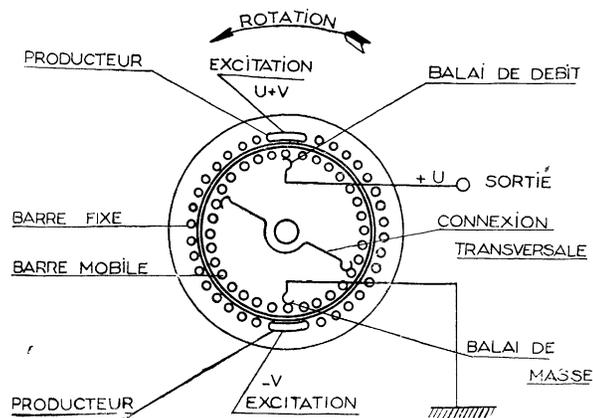
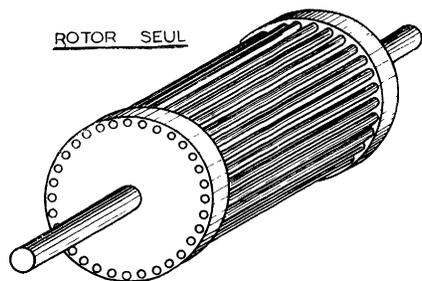


Fig. 12. — Machine vue de face.  
Machine cylindrique à barres avec connexion transversale.

connexions transversales, puisque la charge complémentaire devrait être apportée puis retirée de façon continue. Dans la pratique, une ou deux suffisent (5).

Les connexions transversales permettent de réaliser des machines à barres à disposition cylindrique (fig. 12), où le stator n'influence le rotor que d'un seul côté, tout comme dans une machine magnétique. Bien que dans ce cas, la capacité entre barres mobiles et masse soit comparable à leur capacité utile avec les producteurs, on arrive facilement à n'avoir aucun déchet de puissance du fait des capacités parasites. Ce fait est d'un haut intérêt parce que les machines à barres cylindriques sont évidemment le meilleur moyen d'obtenir des tensions élevées avec des puissances spécifiques déjà importantes et un maximum de commodités constructives.

**Conclusion.** — Nous n'avons envisagé dans cet article que les problèmes concernant le diélectrique fluide et la disposition des organes mobiles conducteurs, laissant pour plus tard la réversibilité thermodynamique et l'étude des frottements. Ce qui a

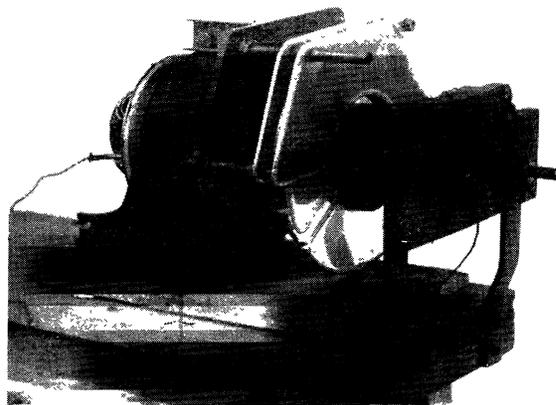


Fig. 13.

Ces considérations suggèrent une solution simple du problème. Il suffit d'établir par des frotteurs réunis électriquement entre eux, une communication entre barres montantes et descendantes. Les barres montantes recevront des descendantes le supplément de charge désirable, puis le rendront à leur tour. Ainsi, par ce simple « prêt » entièrement remboursé par la suite, les barres montantes pourront apporter leur charge utile au débit, tandis que les connexions transversales seront parcourues par des courants importants sans doute, mais ne correspondant à aucune énergie. Il en est tout à fait comme dans l'histoire du cadî prêtant son chameau pour permettre un partage testamentaire, puis le récupérant ensuite.

Il faudrait théoriquement une infinité de

été exposé suffit à démontrer que les machines à transporteurs conducteurs, pourvu qu'on les établisse convenablement en se laissant guider par la notion de maître-couple, sont susceptibles de fournir des puissances satisfaisant toutes les exigences, même avec des rigidités absolument banales. Il n'est donc pas nécessaire d'attendre d'éventuels progrès dans la technique des isolements fluides pour construire des machines électrostatiques puissantes. Si

(5) Nous employons le terme de « connexion transversale » pour éviter une confusion avec les « conducteurs diamétraux » des machines de Holtz, Voss, etc., dont le rôle est différent, bien que, d'un point de vue spéculatif, il y ait une parenté entre les deux dispositifs.

l'on obtient jamais des champs utilisables de 1000 kV : cm, tout n'en sera que mieux, mais dès à présent, il y a matière à bien des résultats honorables, de même que la machine à vapeur a révolutionné l'industrie avec des pressions de 500 g : cm<sup>2</sup>. On trouverait ridicule, aujourd'hui, celui qui, au temps de Watt, aurait prétendu attendre les chaudières modernes timbrées à 50 kg : cm<sup>2</sup>.

Ce sont pourtant des opinions de ce genre qui ont cours sur les machines électrostatiques. Plusieurs se plaignent de l'indigence des diélectriques connus et attendent des champs pratiques de 1000 kV : cm. L'exemple des machines à barres, dont la puissance spécifique peut être de plusieurs dizaines de kilowatts par mètre cube dans l'air ordinaire montre assez que cette attente est inutile. L'histoire dira dans quelle mesure l'espérance de champs extra-

ordinaires était vaine ou fondée, mais c'est l'originalité du Laboratoire d'Électrostatique que d'avoir étudié le problème en fonction des seules réalités présentes, et d'avoir montré qu'elles suffisaient à renouveler la technique.

C'est en mai 1943, pendant l'occupation, qu'a été réalisée au Laboratoire une machine de Toepler (fig. 13) travaillant avec un champ de 620 kV : cm pour 2,5 mm d'entre-électrodes. Ce résultat, obtenu avec les moyens les plus rudimentaires — l'ébonite nécessaire avait été récupérée dans un dépotoir où gisaient des débris d'appareils « fin de siècle » — a été le point de départ de réalisations toujours plus nombreuses qui montrent que, dans ce domaine, il n'était pas nécessaire d'attendre, mais qu'il fallait penser autrement.

Manuscrit reçu le 15 décembre 1947.

#### BIBLIOGRAPHIE.

- [1] JOFFE et HOCHBERG, *Journal of Physics U. R. S. S.*, 1940, vol. 2, n° 3, p. 244 et suiv.
- [2] JOHN G. TRUMP, R. J. VAN DE GRAAF, *The Insulation of High Voltages in vacuum (Journal of Applied Physics*, mars 1947, vol. 18, p. 327-332).
- [3] JOHN G. TRUMP, *Ibid.*
- [4] *Congrès international d'Électricité*, 1932, vol. 5, 3<sup>e</sup> Section, t. 2. — J. HARTMANN, *La commutation mécanique à étincelles tolérées*, p. 831.
- [5] A. TOEPLER, *Ueber die Erzeugung einer eigenthümlichen Art von intensiven elektrischen Strömen vermittelt eines Influenz-Elektrometers (Annalen der Physik und Chemie*, 1865, 5<sup>e</sup> série, vol. 5, p. 469-473).
- [6] JOHN G. TRUMP, R. J. VAN DE GRAAF, *A compact Pressure Insulated Electrostatic X-Ray Generator (Physical Review*, 1939, vol. 55, p. 1162).
- [7] JOHN G. TRUMP, *Ibid.*