

Développements récents et évolution future des générateurs électrostatiques

par Noël J. FELICI



Noël Joseph FELICI est né à Marseille le 18 mai 1916. Après des études secondaires au Lycée de Constantine, et deux années de spéciales à Marseille et Paris, il fut admis à l'Ecole normale supérieure en 1934. Quatre ans plus tard, il quittait l'Ecole avec l'agrégation des sciences physiques, ayant en même temps rassemblé les éléments de sa thèse de doctorat sur la théorie électromagnétique des supraconducteurs, travail vivement encouragé par M. Louis de BROGLIE. Appelé en novembre 1938 sous les drapeaux, il ne put soutenir effectivement cette thèse qu'en janvier 1940.

Rendu en septembre à la vie civile, il obtint aussitôt une bourse du C.N.R.S. et rejoignit l'année suivante le laboratoire que le professeur NEEL s'efforçait de reconstituer à Grenoble.

Passionné dès l'enfance par la science électrique, Noël FELICI avait été frappé par l'aspect harmonieux, parfaitement satisfaisant pour l'esprit, que revêt la théorie classique des champs dans le cas des charges électriques en équilibre. Après en avoir tiré parti pour l'étude des supraconducteurs, et montré qu'ils représentent, non pas une manifestation étrange ou aberrante, mais une forme parfaite du champ électromagnétique, réciproque du champ électrique des conducteurs en équilibre, selon le principe de dualité, il pensa que ce dualisme devrait aussi se refléter dans l'électrotechnique, où les machines fondées sur le champ électrique étaient systématiquement ignorées.

Toutefois, ces idées se heurtaient à un scepticisme enraciné que des expériences de laboratoire, même réussies, parvenaient à peine à ébranler. Aussi Noël FELICI comprit-il la nécessité de transposer jusque dans la réalité quotidienne la symétrie idéale aperçue à travers des équations abstraites et de consacrer désormais une grande partie de son activité de recherches au perfectionnement des machines électrostatiques et à la solution des innombrables problèmes posés par leur réalisation pratique.

Sur le vu des premiers résultats, obtenus de 1942 à 1945, Frédéric JOLIOT fit décider la création à Grenoble d'un laboratoire d'électrostatique du C.N.R.S. Mais c'est seulement en 1951/1952 que l'intérêt des machines à cylindre dans l'hydrogène, dont il est question dans le présent article, fut mis en évidence et leur mise au point réclama encore plusieurs années.

Noël FELICI est professeur titulaire à la Faculté des Sciences de Grenoble et Conseil scientifique du Commissariat à l'énergie atomique.

Le présent article est traduit de l'original anglais paru dans la revue *Direct Current* de décembre 1959.

L'un des concepts les plus passionnants que l'observation quotidienne de la nature ait suggéré à l'homme est celui de symétrie. Notre propre corps nous a donné les premiers exemples de formes symétriques, quoique non identiques; l'insertion des feuilles sur les tiges de nombreuses plantes réalise des vis et des hélices des deux genres. L'importance de la symétrie pour une meilleure compréhension des lois fondamentales de la nature est allée croissant depuis le début de l'ère scientifique : par deux fois, le prix Nobel a récompensé de remarquables contributions dans ce domaine de la physique théorique.

Plus généralement on peut considérer la symétrie comme un des nombreux aspects de la dualité. Celle-ci est devenue familière aux esprits mathématiques; la théorie des transformations réciproques en constitue une base solide, qu'on peut illustrer par des exemples tirés du champ même de la géométrie élémentaire. La dualité a aussi été sentie par de nombreux philosophes comme essentielle à une compréhension satisfaisante des lois fondamentales de la Nature, au moins dans les perspectives de l'esprit humain. Les « contraires » de la physique d'Aristote, le Ying et le Yang de la philosophie chinoise classique, les « atomes » et le « vide » de Démocrite et de Lucrèce présentent des caractères sinon de dualité, du moins de complémentarité car ce sont là des paires dont les termes ne peuvent se concevoir isolément. Un problème évident se pose au sujet du sens véritable de ces couples complémentaires. Sont-ils seulement des catégories correspondant à une attitude spécifique de l'esprit humain vis-à-vis de la nature, ou les composants ultimes des choses ? Le grand philosophe chinois Lao-Tsé, peut-être le plus profond penseur de tous les temps, prenait une position intermédiaire, mais très intéressante : il admettait un principe fondamental unique, une essence ultime des choses, situées au delà de la connaissance ordinaire, mais engendrant par un processus de différenciation les « contraires » que découvre l'expérience quotidienne. Lao-Tsé ne prétend pas cependant que ce principe soit absolument inaccessible à la connaissance humaine, mais seulement qu'il ne peut être atteint, pensé, en même temps que ses incarnations dualistiques. Cette façon de voir a une certaine analogie avec l'interprétation probabiliste de la mécanique ondulatoire, quoique là ce soient les complémentaires eux-mêmes (ondes et corpuscules) qui ne peuvent être simultanément accessibles à l'expérience, tandis qu'un principe commun, dont ils procéderaient tous deux, semble de toute façon hors de l'atteinte de l'esprit humain, en dépit des efforts de quelques penseurs isolés.

Mais dans aucun chapitre peut-être de la physique théorique, la dualité n'a été l'objet d'un intérêt aussi constant qu'en électromagnétisme. Bien avant que l'expérience nous suggérât quelque idée des liens réels entre électricité et magnétisme, ceux-ci étaient traités parallèlement dans tous les ouvrages de physique. Pendant un temps, des chercheurs essayèrent de mettre en évidence une interaction possible entre les pôles d'un aimant et ceux d'une pile voltaïque. Au contraire, Ampère écrit :

« à l'égard des deux états d'un circuit voltaïque suivant qu'il est interrompu ou qu'on y rétablit la continuité... dans le premier cas, les deux extrémités se constituent dans l'état de tension et produisent des attractions et des répulsions ordinaires; dans le second, la tension électrique disparaît ainsi que les attractions et répulsions ordinaires mais dans le nouvel état qui s'établit et que j'ai appelé courant électrique comme d'autres physiciens, il se manifeste de nouvelles attractions et répulsions, toutes différentes des premières, lesquelles cessent aussitôt

« qu'on interrompt de nouveau le circuit et que les autres attractions et répulsions, celles de la tension, reparaissent aux deux extrémités du fil interrompu. »

Il ne vint pas à l'idée d'Ampère qu'une certaine tension demeurait pour surmonter l'inévitable résistance du circuit, mais son idée de complémentarité entre les champs électrique et magnétique statiques était correcte. Dans les supraconducteurs par exemple, des courants permanents peuvent circuler sans qu'il soit besoin pour cela d'aucune force électromotrice et ils nous donnent le pendant exact des champs électriques créés par des charges électriques immobiles et invariables. Cependant, c'est près d'un siècle plus tard que l'idée d'un principe général de dualité, embrassant l'ensemble des phénomènes électromagnétiques, commença à trouver quelque écho. Enfin, la théorie de la relativité d'Einstein ouvrit de nouveaux horizons en éclairant d'une lumière nouvelle tout l'électromagnétisme et en surmontant la plupart des difficultés rencontrées par les théories antérieures. Le principe de dualité ou de réciprocité appartient désormais aux notions classiques de la science, et l'importance croissante des dispositifs à haute fréquence l'a popularisée jusque parmi les ingénieurs du rang. Dans les traités d'électronique par exemple, on présente les transistors comme réciproques, au moins approximativement, des tubes à vide.

On pourrait encore dire bien des choses sur la dualité électromagnétique, mais il faut admettre que, pour utile et suggestif qu'il soit, le principe usuel de dualité n'épuise absolument pas le problème. Le parallélisme direct entre charges électriques et magnétiques n'est pas vide de tout sens, et par suite, si étrange que cela puisse paraître à un esprit épris de logique, il y a de nombreuses raisons pour admettre l'existence de plusieurs sortes de dualités électromagnétiques, peut-être en somme d'une « dualité » entre dualités.

Si complexe que puisse paraître l'aspect théorique du problème, on ne saurait nier l'importance universelle de la dualité, même du point de vue des applications pratiques. C'est l'attitude même de pensée qui fit prendre conscience à de nombreux physiciens de la dernière grande lacune de l'électro technique : l'absence d'applications importantes des forces électrostatiques macroscopiques. L'apparition prématurée de la « machine à influence » fut une malchance historique, car on ne pouvait à l'époque apprécier sa signification théorique et encore moins son intérêt pratique. Beaucoup de gens intéressés par les applications de l'électricité ne s'avisèrent jamais que les machines à influence pourraient jouer un rôle quelconque. Et même, dans des traités théoriques récemment publiés en Europe, on trouve dans l'introduction historique : « le premier dispositif qui ait produit des courants électriques est la pile de Volta, et la première machine capable de transformer de l'énergie mécanique en énergie électrique fut l'alternateur à aimant tournant de Pixii », oubliant que la machine à frottement de Benjamin Franklin en faisait autant un siècle plus tôt, sans parler de la roue de Franklin, un bel exemple — et le premier sans doute — de moteur électrique.

On peut trouver de nombreuses excuses à cette sotte attitude. Ni la physique ni la technique, jusqu'à l'orée de ce siècle, n'étaient capables de résoudre les problèmes posés par les très hautes tensions que la machine à influence fournit nécessairement. Il est naturel qu'une source de haute tension à faible intensité ait semblé peu utile à des gens ignorants des techniques d'isolement et qu'ils aient préféré comme le coq du bon La Fontaine le grain de la pile voltaïque à la perle du générateur électrostatique créant directement du courant continu à haute tension. Pour les mêmes

raisons, les autres dispositifs « électrostatiques », si efficaces et prometteurs aujourd'hui, connurent la même infortune. La pulvérisation électrostatique des liquides, par exemple, qui joue depuis peu un rôle de premier plan dans de larges secteurs de l'industrie était bien connue il y a deux siècles. Elle tomba ensuite dans un oubli total et, durant des décades, les ingénieurs se consacrèrent à la tâche ingrate d'améliorer des méthodes inefficaces de pulvérisation, jusqu'à ce que quelques pionniers, reprenant une vieille expérience de l'abbé Nollet datant de 1750, montrèrent l'efficacité stupéfiante de la pulvérisation électrostatique qui, en moyenne, économise 70 % des dépenses en peinture et en main d'œuvre (fig. 1).

Recherches sur l'Électricité 5^e Dis. Pl. 1. Pag. 354.

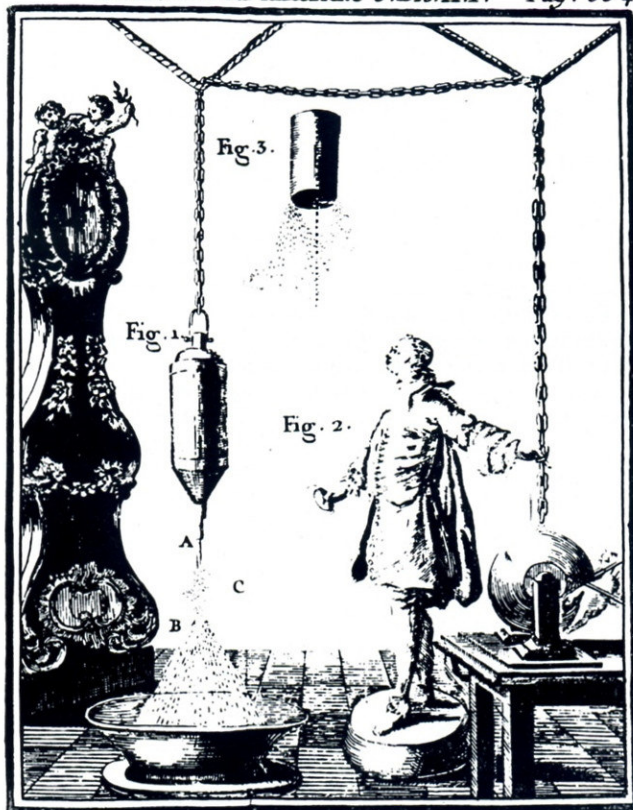


FIG. 1. — EXPÉRIENCE DE PULVÉRISATION ÉLECTROSTATIQUE.

Le courant continu à haute tension est engendré par le ballon de verre tournant (frotté à la main !) et distribué aux différents dispositifs pulvérisateurs par la chaîne isolée.

DESCRIPTION DUALISTE D'UN CONVERTISSEUR ROTATIF D'ÉNERGIE.

Dans toute machine qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique (ou inversement) des forces tangentielles d'origine électromagnétique agissent sur la surface du rotor. La puissance spécifique de la machine peut s'exprimer en fonction de la force électromagnétique (force tangentielle par unité de surface) et de la vitesse linéaire.

On peut considérer toute force électromagnétique comme engendrée par l'interaction d'un champ de force et d'une charge électrique (resp. magnétique) ou d'un courant électrique (resp. magnétique) et d'un champ d'induction. On

admet communément que seuls les courants et les charges électriques sont « réels » alors que leurs pendants magnétiques restent des notions fictives. Il est vrai que la physique corpusculaire ne nous montre que des charges électriques et des dipôles magnétiques qui sont, plus ou moins, liés à des mouvements d'électricité. Même dans le cas d'un neutron, on peut représenter son moment magnétique comme le résultat du mouvement relatif d'un proton et d'un méson π^- , couple de particules que le neutron est susceptible d'engendrer pendant de courts intervalles de temps. Il est cependant nécessaire de conserver les notions de charge et de courant des deux espèces, non seulement pour l'amour de la symétrie, mais encore pour une meilleure compréhension des phénomènes électromagnétiques. Cela signifie qu'on doit considérer deux sortes de dualités :

- a) La dualité croisée, qu'on peut appeler de première espèce; par exemple corrélation entre charge électrique et courant électrique, champ électrique et induction magnétique, etc...
- b) La dualité élémentaire, ou de seconde espèce, où charges, champs, inductions, électriques et magnétiques, sont traités parallèlement.

Il est vrai que dans nombre de problèmes théoriques ou pratiques, la dualité de première espèce semble plus féconde mais on ne peut en aucune façon écarter la seconde, comme imaginaire ou vide de sens. Aucune des deux ne peut rendre compte de l'ensemble des corrélations possibles entre phénomènes électromagnétiques, ni être compatible avec l'autre. Nous devons donc reconnaître que notre esprit ne saurait embrasser à la fois tous les aspects de l'électromagnétisme; lorsque certains d'entre eux apparaissent clairement à nos yeux, un voile nous dérobe la vue des autres, au point qu'ils en paraissent insaisissables, et réciproquement, comme il arrive aux ondes et corpuscules de la mécanique quantique.

Dans une machine purement magnétique, comme la plupart de celles que nous connaissons, la force électromagnétique résulte de la composante normale de l'induction magnétique B_N et de la densité linéaire de courant électrique i ($f = B_N \cdot i$); ou bien de la composante tangentielle du champ magnétique H_T de la densité des charges magnétiques μ ($f = H_T \cdot \mu$). Les deux formules sont mathématiquement équivalentes puisque :

$$B_N = 4\pi \mu,$$

$$H_T = 4\pi i.$$

Cependant chaque formule reflète un aspect différent des phénomènes. B_N et μ sont tous deux limités par la saturation du fer, mais, alors que des courants électriques de densité i doivent être présents pour créer la force, cette dernière n'est pas, dans les machines réelles, appliquée aux courants eux-mêmes. Grâce à la denture des rotors, les points d'application des forces sont déplacés vers l'extrémité des dents, ce qui donne un sens physique à la formule $f = H_T \mu$. On peut dire aussi que f est créée par l'existence simultanée d'une composante tangentielle du champ H_T et d'une composante normale de l'induction B_N :

$$f = \frac{1}{4\pi} H_T B_N$$

Le réciproque d'une machine purement magnétique est évidemment une machine purement électrique, ou électrostatique. D'après la dualité de première espèce, on peut remplacer les courants électriques de densité linéaire i par des charges électriques de densité superficielle σ , cependant

qu'une composante tangentielle du champ électrique E_T remplace l'induction magnétique normale B_N , et on a

$$f = E_T \sigma$$

Ce résultat est évidemment réciproque de seconde espèce de

$$f = H_T \mu$$

Il est bon de noter que chaque sorte de dualité reflète certains traits fondamentaux de la machine. Il est vrai qu'une densité de charge σ doit être répartie sur le rotor, et soumise à un champ tangentiel E_T pour réaliser la conversion de l'énergie. Il est vrai aussi, cependant, que B_N et D_N , H_T et E_T jouent à maints égards des rôles similaires, et forment avec la composante associée des figures géométriques quasi identiques. Aussi bien dans les machines électromagnétiques qu'électrostatiques B_N et D_N sont beaucoup plus grands que H_T et E_T ; c'est-à-dire que les lignes de force font toujours, en traversant l'interstice entre stator et rotor, un petit angle avec la normale à la surface de ce dernier. B_N et D_N sont tous deux limités par quelque propriété fondamentale de la matière : saturation magnétique ou claquage électrique. Il en résulte que les deux composantes normales ont des limites définies, qu'on ne peut dépasser en pratique, sinon par l'usage de meilleurs matériaux, alors que E_T et H_T dépendent beaucoup de la conception de la machine et peuvent être beaucoup améliorés par une étude attentive de détails apparemment secondaires.

La dualité de seconde espèce entre B_N et D_N etc, paraît donc importante à maints égards, mais il est bon de noter que les grandeurs électriques associées c'est-à-dire la force électromotrice pour B_N et l'intensité du courant pour D_N sont réciproques de première espèce. Ainsi les relations entre les deux espèces de dualités paraissent très embrouillées; et une théorie de l'électromagnétisme qui en donnerait une description claire et logique aurait un grand prix à la fois pour les savants et les ingénieurs.

LIMITATIONS PHYSIQUES DES MACHINES ÉLECTROSTATIQUES.

Les limitations physiques des diverses grandeurs ci-dessus ont une importance extrême dans la pratique. D_N semble la plus importante d'entre elles, car elle détermine le rendement en courant, qui a été jusqu'ici le point faible du générateur électrostatique.

L'induction électrique est déterminée par l'intensité du champ électrique et la constante diélectrique. Il pourrait sembler naturel d'utiliser un isolant de constante diélectrique ou permittivité élevée pour remplir l'espace entre le stator et le rotor, en réalisant ainsi, selon la dualité de première espèce, le pendant électrostatique des noyaux de fer de haute perméabilité. Malheureusement on ne dispose pas aujourd'hui de milieux fluides de haute permittivité et assez résistants (c'est-à-dire qui aient un temps de relaxation supérieur à la durée d'un cycle de travail de la machine). Tous les liquides de constantes diélectriques plus grandes que, par exemple 10 ou 12, ont des conductivités ioniques élevées et des temps de relaxation bien inférieurs à 10^{-2} seconde et le bénéfice tiré de l'usage d'un liquide de faible permittivité est trop limité et ne peut racheter les difficultés qu'entraîne forcément l'emploi d'un liquide. Nous verrons que l'espoir d'obtenir des liquides de permittivité élevée dans un état de pureté ionique exceptionnel n'est pas aussi utopique qu'il pouvait sembler il y a 10 ans. L'eau mise à part, aucun liquide isolant n'a jamais été obtenu débar-

rasé d'impuretés électrolytiques. Il est certain que les résultats des mesures de résistivité des liquides « purs » sont trop faibles de plusieurs ordres de grandeur et ne sont que le reflet d'un degré de contamination variable, dénué de tout sens physique. Bien mieux, les progrès incroyables de la chimie moderne nous ont mis sur la voie d'un procédé pratique d'obtention de liquides d'un degré de pureté ionique inouï. Cependant nous devons accepter le fait déplaisant qu'il faut encore se limiter pour le moment à des gaz, de permittivité unité.

Parmi eux, les gaz « électronégatifs », qui comprennent dans leur molécule des éléments oxydants comme les halogènes ou l'oxygène, sont favorisés par une valeur exceptionnelle de la rigidité diélectrique. Il peut sembler naturel de les utiliser dans les générateurs électrostatiques. D'une façon inattendue toutes les expériences menées avec eux ces vingt dernières années n'ont donné que de médiocres résultats, en ce qui concerne l'intensité du courant, et l'on a fait peu de progrès dans ce sens jusqu'au moment où on s'est décidé à les abandonner pour l'hydrogène, qui est pourtant le gaz moléculaire ayant la plus faible rigidité.

C'est dans le problème de la commutation qu'il faut trouver la raison de ce fait apparemment étrange. Comme seules les machines électrostatiques à courant continu peuvent, pour le moment, avoir quelque intérêt, la commutation, c'est-à-dire le processus de charge du rotor par des couches d'électricité de signes opposés, prend une importance décisive. Tant qu'on emploiera pour cela des peignes ou des lames, les gaz donnant des ions lourds de faible mobilité rendront la commutation difficile, surtout sous haute pression. L'hydrogène, au contraire, dont les ions sont exceptionnellement mobiles, permet un transfert de charges aisé et efficace. On ne peut échapper à cette alternative qu'en utilisant des secteurs conducteurs, au lieu de rotors isolants ou de courroies, avec des balais de commutation semblables à ceux usuellement employés dans les machines électromagnétiques à courant continu. Pour autant qu'on le sache, la réalisation d'un tel système de balais pour hautes tensions, adapté à un travail industriel prolongé, est un problème difficile. Les étincelles de rupture ne suscitent pas de sérieuses difficultés dans les générateurs électrostatiques, à cause de la très faible énergie magnétique du circuit, mais les décharges capacitatives inévitables à la fermeture entraînent une érosion continue, la pollution des surfaces soumises à des champs électriques élevés, et un mauvais fonctionnement bien avant que la machine ait fourni une durée de service raisonnable.

Ainsi nous devons accepter ce fait troublant que non seulement tous les liquides de forte constante diélectrique, mais encore la plupart des gaz apparemment les mieux adaptés ont dû être écartés jusqu'à présent; et en contradiction avec l'affirmation que le fluide utilisé doit permettre les plus grandes valeurs possibles de l'induction électrique, les meilleurs résultats pratiques ont été obtenus jusqu'ici avec l'hydrogène, gaz de très faible rigidité diélectrique, si l'on met à part le cas exceptionnel des gaz rares.

Si peu satisfaisante qu'elle puisse paraître à l'esprit, la technique actuelle a néanmoins permis de fabriquer des générateurs électrostatiques concurrentiels pour plusieurs applications et ceci est réconfortant. La marge de progrès possible, telle qu'elle est soulignée par le rapport entre les inductions électriques réalisables dans l'hydrogène et, par exemple, dans le nitrobenzène est véritablement énorme, et ce progrès est d'autant plus passionnant que la technologie actuelle donne déjà des résultats très prometteurs.

COMMUTATION IONIQUE DANS LES GÉNÉRATEURS ÉLECTROSTATIQUES.

Nous avons maintenant l'intention d'examiner avec quelques détails le mécanisme de la commutation ionique, dont nous avons fait ressortir l'importance pour une bonne performance en courant.

Commutation à faible mobilité :

Supposons d'abord qu'on opère dans un gaz, sous pression, avec un grand espace entre les pointes ionisantes (ou la lame) et la surface du rotor (ou de la courroie). Toutes ces conditions sont justement réalisées dans les machines à courroie. On peut appeler ce type de commutation « commutation à faible mobilité » car son trait distinctif est la très faible mobilité des ions positifs et négatifs, à cause de leur poids moléculaire et de la pression. Son influence sur la commutation est encore accusée par la grande distance que doivent parcourir les ions depuis les pointes ionisantes jusqu'à la surface qu'ils doivent charger. La charge d'espace résultant d'un flux d'ions donné est très importante par suite de la mobilité réduite et de l'écartement notable des pointes et du rotor. Au lieu de voyager tout droit en un étroit pinceau, les ions s'étalent latéralement et couvrent une large bande de la surface du rotor. Reportons-nous à la figure 2. Nous voyons que la densité de charge effective σ est donnée par

$$4 \pi \sigma = E_n - E_r$$

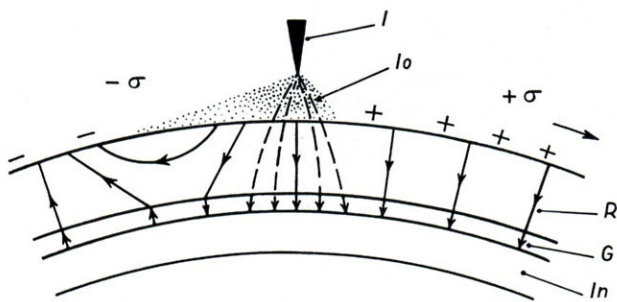


FIG. 2. — COMMUTATION A FAIBLE MOBILITÉ.

Le flux d'ions I_0 est dévié à gauche, dans le sens contraire du mouvement du rotor R par les forces tangentielles des densités $\pm \sigma$ et sa propre charge d'espace. La ligne neutre à la surface du rotor (lieu des points où $\sigma = 0$) est repoussée loin de l'ioniseur I. Le champ dans l'intervalle G face à l'ioniseur est presque uniforme et égal à E_n (ou E_m); il inclut une importante contribution du champ ionisant (lignes de force pointillées).

I_m , inducteur, à un potentiel négatif par rapport à I.

où E_n est le champ dans l'interstice entre rotor et inducteur (1) et E_r représente le champ nécessaire pour entraîner les ions malgré leur faible mobilité. E_n ne peut excéder E_m , intensité maximum du champ ou rigidité diélectrique du gaz, et E_r est du même ordre de grandeur. Il est vrai que

(1) Nous utilisons le symbole E_n pour l'intensité effective du champ dans l'intervalle pointes-rotor, pour éviter la confusion avec E_N de la précédente section. Les deux symboles sont équivalents si :

- 1) la composante normale est uniforme, c'est-à-dire à quelque distance du dispositif de commutation;
- 2) le champ existe seulement sur un côté du rotor. S'il y avait des composantes normales sur les deux faces, l'expression correcte pour $4 \pi \sigma$ serait $4 \pi \sigma = E_N + E'_N$.

le long d'une ligne de force donnée le champ décroît des pointes au rotor, mais il faut se souvenir que le champ ionisant est bien plus élevé au voisinage d'une pointe fine ou d'un bord vif qu'entre des surfaces planes. Pour toutes ces raisons E_r n'est pas du tout une petite fraction de E_m , mais lui reste comparable. En fait E_r est modérément inférieur à E'_m , le champ ionisant sur les pointes, qui est à son tour beaucoup plus grand que E_m . Cela veut dire aussi que la tension excitatrice U_e , égale à l'intégrale du champ entre l'ioniseur et l'inducteur, est en général élevée. U_e comprend deux termes :

1° U_r , intégrale du champ ionisant entre les pointes et le rotor.

$$2^\circ E_n \left(\frac{e_r}{\varepsilon} + e_g \right)$$

où :

e_r = épaisseur du rotor,

e_g = interstice entre rotor et inducteur.

$$U_e = U_r + E_n \left(\frac{e_r}{\varepsilon} + e_g \right)$$

Les deux termes sont du même ordre et U_r peut atteindre 40 à 60 kV.

Si l'on introduit un « rendement en densité » du dispositif commutateur, quotient de la densité de charge effective par son maximum théorique $E_m/4 \pi$, on voit que l'efficacité de la commutation à faible mobilité doit être très faible, surtout sous pression. On trouve communément des valeurs aussi petites que 0,1 ou 0,2 dans les générateurs à courroie.

Commutation à haute mobilité.

Ce type de commutation est présent lorsque le transfert de charge entre ioniseur et rotor est assez facile pour minimiser les phénomènes de charge d'espace, rendant leur influence négligeable. Les moyens convenables pour la réaliser sont :

- 1° Choix d'un gaz où les deux sortes d'ions sont très mobiles;
- 2° Réduction au minimum de l'intervalle entre ioniseur et rotor;
- 3° Pression modérée.

La condition 1° est remplie au mieux par l'hydrogène pur. L'azote est moins bon, et les gaz « électronégatifs » donnent les plus mauvais résultats. 2° exige l'emploi de lames et non de rangées de pointes, car la distance tangentielle de certaines régions de la surface du rotor à la pointe la plus proche ne peut être réduite suffisamment. Elle exige aussi un rotor parfaitement équilibré. 3° nous rappelle que la pression est un facteur défavorable. En réalité, on peut réaliser la commutation à haute mobilité dans un gaz très électronégatif comme l'air ou CO_2 sous 2 ou 3 atmosphères, pourvu que les conditions géométriques et mécaniques soient parfaitement remplies. A plus haute pression cependant, seul l'hydrogène reste satisfaisant. Au-dessus de 30 atm l'hydrogène lui-même ne peut assurer une commutation parfaite, car les conditions géométriques (distance entre lame et rotor) deviennent de plus en plus strictes et ne peuvent être conciliées avec un fonctionnement sûr.

Quand une commutation parfaite est réalisée, le flux d'ions est confiné dans un volume très étroit le long de la lame ionisante, et l'ensemble du phénomène vu parallèlement à l'arête de la lame, paraît presque « ponctuel ». Les zones positive et négative du rotor ne sont plus séparées

par une large zone bombardée par les ions, mais viennent très près l'un de l'autre, et leur distance est, de toutes façons, très inférieure à l'épaisseur du rotor.

Grâce à la constante diélectrique du matériau dont est fait le rotor, les deux zones ont une capacité mutuelle importante et sont réunies par un flux électrique important. L'allure générale du champ électrique (fig. 3) montre que, au voisinage de la zone de commutation, les lignes de force dues aux densités de charge $\pm \sigma$ ne traversent pas l'interstice rotor-inducteur mais se combinent sans sortir du rotor. Par suite toutes les conséquences déduites dans le cas de la faible mobilité perdent toute validité et les limitations correspondantes de σ sont levées.

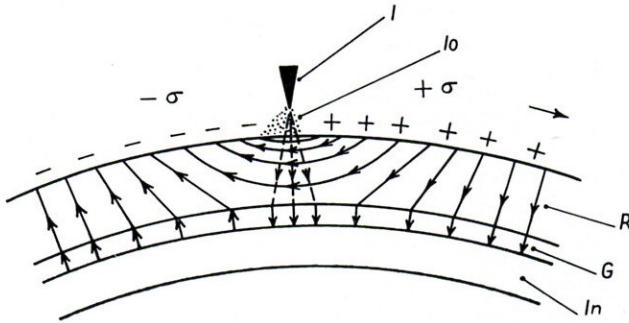


FIG. 3. — COMMUTATION A HAUTE MOBILITÉ.

La ligne neutre tombe presque en face de l'ioniseur et subit seulement un faible déplacement aux forts courants. Le champ, dans l'intervalle face à l'ioniseur (lignes de force pointillées) est celui correspondant à la tension minimale d'ionisation. Aucune ligne de force provenant des densités σ ne traverse l'interstice dans cette région. C'est seulement à une distance comparable à l'épaisseur du rotor que le champ y devient uniforme et égal à E_n (ou E_m).

a) Le champ E_r qui entraîne les ions n'intervient plus dans l'expression de σ , puisque les lignes de force, dues à σ dans la région restreinte où agit E_r , ne pénètrent pas dans l'interstice rotor-inducteur.

b) La tension excitatrice U_e ne comprend aucun terme important en E_n . Si la commutation était parfaitement symétrique par rapport à la lame ionisante, U_e serait indépendant de σ et E_n .

En fait le flux d'ions est déformé en sens inverse du mouvement du rotor par le fort champ tangentiel des densités $\pm \sigma$ et par suite U_e dépend un peu de σ . Mais l'intensité du courant croît toujours très rapidement avec U_e et l'on peut dire que la machine est, dans une large mesure, auto-excitée, parce que le flux électrique est entretenu par les densités de charge elles-mêmes, plus que par l'inducteur extérieur. On a affaire à quelque chose d'analogue à l'excitation compound des dynamos, puisque le champ auto-excitateur est étroitement lié à σ , c'est-à-dire au courant (fig. 4). On peut aussi parler d'une réaction positive dans le système de lignes de force autour de la zone de commutation. Le pourcentage de réaction peut être défini comme $100 - \alpha$, où $100/\alpha$ est le rapport des valeurs expérimentales de dI/dU_e aux valeurs théoriques, en supposant un champ uniforme dans tout le volume du rotor en face de l'ioniseur. α est souvent aussi petit que 10 ou 20 %; il arrive parfois que le pourcentage de réaction dépasse la valeur critique de 100; en d'autres termes, la machine devient complètement auto-excitée et le courant, qui n'est plus gouverné par U_e , saute brusquement d'une faible valeur à une plus grande. On peut prévenir aisément le phénomène en pla-

çant des résistances dans les conducteurs connectant les ioniseurs aux bornes.

Par suite de la réaction positive, la tension excitatrice U_e reste plus basse que prévu pour toutes les valeurs de σ . En d'autres termes, si l'on cherche à calculer U_r à partir de la formule $U_r = U_e - E_n (e_r/\epsilon + e_g)$, celle-ci donnera un résultat négatif de grande valeur absolue. Une autre conséquence intéressante est que U_e dépend très peu de l'épaisseur du rotor et de l'interstice avec l'inducteur, mais est très sensible au bon réglage de la lame ionisante. Celui-ci est essentiel pour U_r , et de plus il détermine l'épaisseur de la zone de commutation, c'est-à-dire l'influence entre régions adjacentes, positive et négative, et par suite le pourcentage d'auto-excitation.

Des transitions discontinues de la commutation à haute mobilité à une sorte de faible mobilité ont été observées. Aux fortes intensités, en court-circuit, le flux d'ions devient parfois instable et s'étale brusquement sur une grande surface. On entend un sifflement caractéristique, cependant que le courant débité tombe notablement. Le retour à un fonctionnement correct s'obtient en réduisant un instant U_e et I . En pratique, ce genre d'instabilité disparaît dès que la machine fournit de la tension, car on voit facilement que le champ tangentiel E_T s'oppose à l'étalement latéral des ions.

Le trait principal de la commutation à haute mobilité est surtout son rendement η en densité très élevé. Non seulement σ peut atteindre $E_m/4\pi$, mais on enregistre souvent en pratique des valeurs de σ qui lui sont supérieures de 30 à 40 %; c'est-à-dire $\eta > 1$. Il n'y a là dedans rien qui soit réellement en désaccord avec les lois fondamentales du champ électrique. $E_m/4\pi$ est une référence convenable pour σ tant qu'on envisage le cas de la faible mobilité, car

$$\frac{E_m - E_r}{4\pi} < \frac{E_m}{4\pi}$$

σ U.E.S.

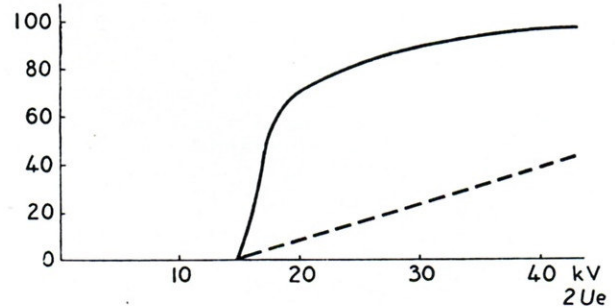


FIG. 4. — DENSITÉ DE CHARGE EN FONCTION DE LA TENSION D'EXCITATION.

Trait plein : courbe expérimentale d'une machine réelle.

Trait pointillé : ligne droite théorique en supposant U_r constant et négligeant l'autoexcitation (c'est-à-dire, champ uniforme dans l'intervalle en face de l'ioniseur) et en calculant U_e par la formule

$$U_e = U_r + E_m \left(\frac{e_r}{\epsilon} + e_g \right)$$

Abscisses : tension d'excitation totale $2U_e$ (une tension d'excitation U_e doit être appliquée aux deux bornes, pour assurer une charge du rotor symétrique en densités $+$ et $-$; on double ainsi le courant par rapport à la disposition asymétrique. Dans les machines cylindriques, un résultat similaire peut être obtenu avec une seule source d'excitation. Cette source doit cependant donner une tension de $2U_e$).

Mais si E_r perd toute influence sur σ , il n'y a plus de raison de prendre $E_m/4\pi$ comme limite. Le rotor ayant deux faces et chacune pouvant être soumise à E_m , la vraie limite est $E_m/2\pi$. Pour que σ atteigne des valeurs comparables, U_e doit rester bien inférieur à $E_m (e_r/\varepsilon + e_g)$. S'il en est ainsi, la surface du rotor qui a été chargée atteint un très haut potentiel dans la région où le champ est presque uniforme, à quelque distance de l'ioniseur; elle devient capable d'envoyer un nouveau faisceau de lignes de force vers tout objet au potentiel du sol. Si en particulier on dispose une pièce auxiliaire à une petite distance du rotor dans cette région, des lignes de force seront attirées, surtout si le matériau choisi a une légère conductivité qui l'empêche de prendre un trop haut potentiel (fig. 5). On peut penser

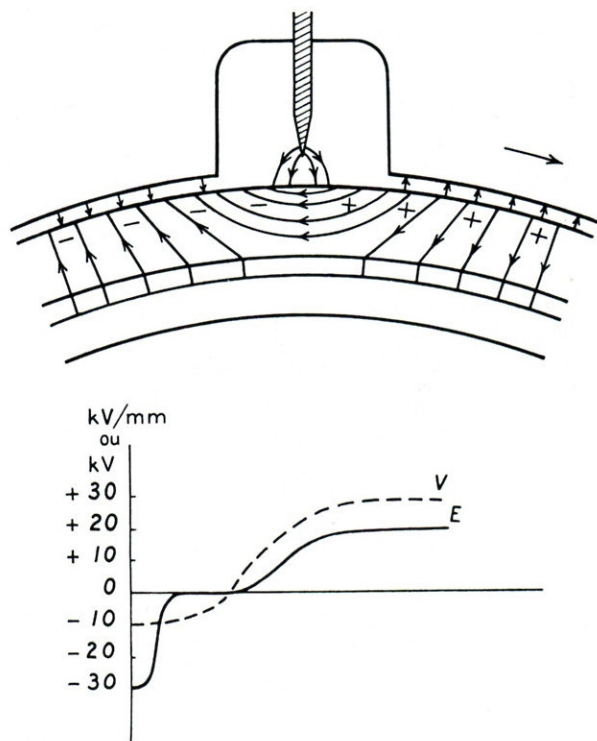


FIG. 5. — SYSTÈME DONNANT « DOUBLE FACE », ET DIAGRAMME DE LA COMPOSANTE VERTICALE DU CHAMP, ET DU POTENTIEL DE LA SURFACE SUPÉRIEURE DU ROTOR, EN FONCTION DE LA DISTANCE À LA LAME IONISANTE.

Trait pointillé : potentiel de la surface du rotor par rapport à l'ioniseur, quand on se déplace vers la droite (direction du mouvement du rotor). Ce potentiel, négatif en face de l'ioniseur (chute de tension dans la décharge couronne) atteint de grandes valeurs positives à quelque distance, là où le champ dans l'intervalle est presque uniforme.

Trait plein : composante verticale du champ à la surface supérieure du rotor. En face de l'ioniseur, cette composante est très grande et négative (égale à $-E_r$). Elle change cependant de signe lorsque le potentiel des charges positives $+\sigma$ est devenu assez grand par rapport aux surfaces immobiles voisines, permettant à σ de dépasser $E_m/4\pi$.

qu'on obtiendrait les mêmes résultats en plaçant de petits inducteurs auxiliaires au voisinage immédiat de l'ioniseur; mais, outre sa complexité qui le rend difficile à réaliser (ces inducteurs devraient être disposés également du côté haute tension, etc...), ce montage ne fonctionne jamais convenablement, sans parler de son absence de sécurité, car des

décharges ont lieu aisément entre ioniseur et inducteurs auxiliaires.

La commutation à haute mobilité nous donne la solution longtemps cherchée du problème de charger un rotor « des deux côtés ». Le rotor n'est pas évidemment physiquement chargé sur ses deux faces car ce n'est qu'une question de flux électrique : le courant est égal à la dérivée de ce flux $I = d\Phi/dt$, tout à fait comme la f.é.m. des machines électromagnétiques $e = d\Phi/dt$.

Nous sommes maintenant prêts à comprendre pourquoi l'hydrogène, grâce au type de commutation qu'il favorise, donne des résultats remarquables en pratique, malgré sa faible rigidité diélectrique.

La rigidité diélectrique de l'hydrogène pur, dans un intervalle de quelques dixièmes de millimètre, peut être évaluée à 24 kV/mm à 15 atm, ou 30 kV/mm à 20. Pour $\eta = 1$, σ vaudrait 64 et 80 UES. Dans la pratique industrielle, σ atteint couramment 80 UES avec pas plus de 25 kV d'excitation sous 15 atm. On a obtenu des densités de charge de 110 UES avec le dispositif amélioré de la figure 5. En accord avec la discussion ci-dessus, si on porte la pression à 20 atm, le courant débité en souffre à moins qu'on ne veuille à une perfection géométrique exceptionnelle, c'est-à-dire une distance extrêmement petite entre rotor et ioniseur.

Une vérification très intéressante de la théorie ci-dessus a été réalisée avec une machine expérimentale travaillant dans deux atmosphères différentes. Grâce à l'utilisation d'un rotor cylindrique étanche avec stator interne, l'interstice pouvait être rempli d'un gaz électronégatif à très haute rigidité diélectrique (mélange d'azote et de SF_6) tandis que la commutation était au contraire toujours réalisée dans l'hydrogène, sous une faible surpression pour éviter toute fuite de SF_6 vers les ioniseurs.

On a trouvé que la courbe d'excitation $I (U_e)$ était formée de deux segments de pentes très différentes. D'abord un segment quasi vertical avec une autoexcitation de presque 100 %, ou plus (instabilités), jusqu'à une densité de charge de 70 à 80 UES, puis un coude brusque, suivi d'un autre segment correspondant à une autoexcitation nulle (fig. 6). En excitant la machine jusqu'au maximum permis par l'isolement général, on obtint une densité de charge de près de 140 UES, sans que la courbe s'aplatisse le moins du monde en dénotant une saturation prochaine. On observait le sifflement caractéristique de l'instabilité de la décharge et de son étalement latéral, lorsqu'on atteignait le coude de la courbe; on a aussi trouvé que la nature de la surface du rotor (verniss divers) et la constante diélectrique du matériau du rotor avaient une influence très notable sur le phénomène.

Cette expérience nous a appris que les conditions de stabilité du mécanisme à haute mobilité ont bien plus d'importance que la rigidité diélectrique du gaz de l'interstice rotor-inducteur. Dès qu'on n'a plus de commutation « ponctuelle », chaque accroissement de la densité de charge doit se payer par un accroissement inacceptable de la tension d'excitation.

Nous avons dit qu'on obtenait facilement 80 UES avec 25 kV, mais il fallait 90 kV pour 140 UES, laissant peu de marge pour une tension de débit. De plus, la décharge sifflante détériore rapidement la surface du rotor, abaissant le coude critique de la courbe $I (U_e)$ et simulant une espèce de saturation qui n'a aucun rapport avec la rigidité diélectrique du gaz remplissant l'interstice (fig. 6).

L'influence de la permittivité du rotor est aussi intéressante. Elle montre que l'instabilité du flux d'ions dépend

beaucoup du très fort champ tangentiel existant en face de l'ioniseur, entre les zones positive et négative du rotor. Plus grande est la permittivité du rotor, plus grand est le flux diélectrique qui peut réunir les deux zones pour une intensité donnée du champ tangentiel. Une longue expérience pratique des machines cylindriques a montré avec certitude que le courant « maximum » dépend notablement de la constante diélectrique du rotor, au moins jusqu'à 6 ou 8, malgré l'influence nuisible des flux de dispersion qui est bien entendu favorisée par la permittivité du rotor.

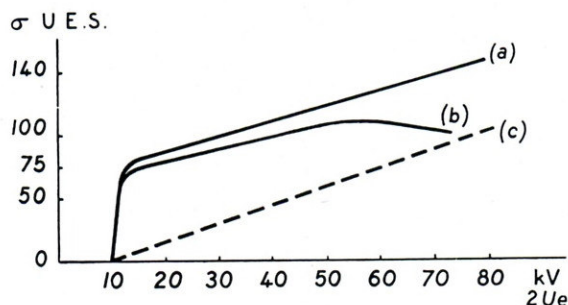


FIG. 6. — DENSITÉ DE CHARGE EN FONCTION DE LA TENSION D'EXCITATION DANS LA MACHINE A DEUX GAZ.

- (a) Surface utile du rotor en bon état;
- (b) Surface utile du rotor en mauvais état après 10 mn de fonctionnement à courant maximum.
- (c) Droite théorique, correspondant à une autoexcitation nulle à U_r constant : en fait U_r ne peut être constant mais croît en réalité avec le courant, réduisant encore la pente du segment à autoexcitation nulle.

On voit donc que, d'une façon assez inattendue, la limite de σ en fonction de la rigidité diélectrique de l'interstice rotor-inducteur E_m et la limite de stabilité du mécanisme à haute mobilité sont presque les mêmes dans l'hydrogène sous 15 à 20 atm et conduisent à un maximum de l'ordre de 100 UES. Dans les gaz électronégatifs, au contraire, les deux limites diffèrent beaucoup dès que la pression dépasse la pression atmosphérique, et le plus souvent, il n'y a plus place pour le mécanisme efficace de commutation. Par exemple, une addition de 2 % de SF_6 à l'hydrogène pur abaisse le pourcentage d'autoexcitation de 50 % ou plus, même pour des courants faibles. On voit clairement maintenant pourquoi on ne peut produire de forts courants que dans l'hydrogène pur.

On voit aussi clairement que les possibilités de la commutation ionique sont quasiment épuisées et que tout pas en avant vers de plus hautes densités de charge exige d'abord des progrès fondamentaux dans le problème de la commutation plutôt que la découverte de gaz nouveaux de rigidités diélectriques inouïes. Nous sommes encore incapables d'utiliser les possibilités du mélange $N_2 + SF_6$, qui permettrait au moins 200 UES. Cependant il ne faudrait pas considérer cela comme désespérant. On a, dans le monde entier, consacré si peu d'efforts à ces problèmes, en comparaison des dépenses gigantesques englouties pour tant d'autres études, si grande est encore la part de l'observation empirique faite par des individus isolés, dans les progrès réalisés jusqu'à présent qu'il nous faut considérer que le développement des machines électrostatiques suit encore les errements de l'âge préatomique. Le fait que des machines de conception médiocre, d'un point de vue strictement scientifique, puissent entrer sérieusement en compétition avec les produits d'une techno-

logie avancée, est vraiment réconfortant lorsque nous pensons à l'immensité du progrès qui est encore devant nous.

GÉNÉRATEURS ÉLECTROSTATIQUES A FORT COURANT.

Comme on l'a expliqué ci-dessus, seul l'usage de l'hydrogène permet pour le moment d'obtenir des courants importants malgré sa rigidité diélectrique très limitée. Le laboratoire du C.N.R.S. avec l'assistance de la S.A.M.E.S. a fait des efforts pour appliquer cette technique à des machines réelles de puissance appréciable. On s'est également intéressé à la réalisation de machines multipolaires donnant de très forts courants, du moins pour les ordres de grandeurs électrostatiques.

On n'a construit à l'heure actuelle que des machines cylindriques. Une structure de ce type entraîne une stricte limitation de la taille, à cause du rôle essentiel de la distance rotor-ioniseur. La dilatation élastique due aux forces centrifuges, favorisée par le faible module d'élasticité des matériaux organiques, est un facteur limitatif. Pour une vitesse standard de 3 000 tr/mn le rotor peut avoir un diamètre maximum de 35-40 cm. La longueur du cylindre peut cependant être beaucoup plus grande, si on choisit une structure « en tambour » (cylindre clos aux deux bouts) plutôt qu'en « cloche » (fig. 7). La stabilité dynamique du rotor en tambour est évidemment bien plus grande, et il est bien moins exposé à se déformer latéralement sous l'action des forces centrifuges, même s'il est très long. Cependant, le rotor « en tambour » n'est pas utilisable aux très fortes tensions, car les arbres doivent servir de conducteurs électriques pour le stator interne, et ne peuvent être isolés à un potentiel flottant intermédiaire comme dans le modèle en cloche. En

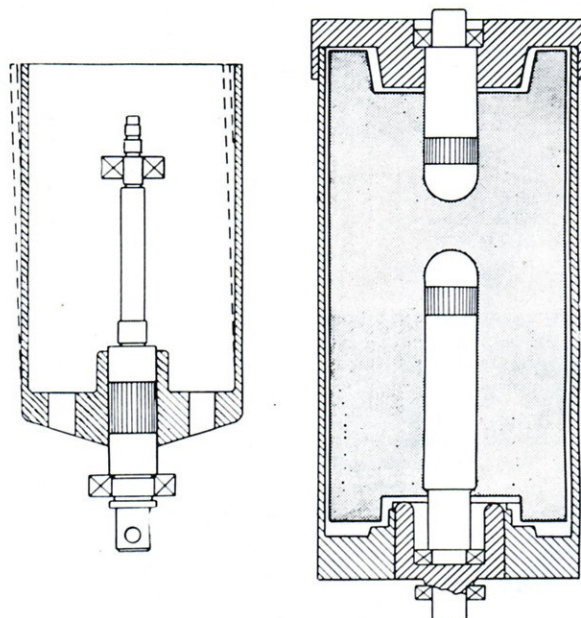


FIG. 7. — CONSTRUCTIONS « EN CLOCHE » ET EN « TAMBOUR ».

En grisé, le stator interne. Les deux demi-axes isolés fournissent les connexions nécessaires et les bornes de sortie.

général, les machines bipolaires qui, à diamètre donné, fournissent la tension la plus haute, doivent avoir une structure en cloche, mais toutes les machines à 4 pôles ou plus peuvent être construites en tambour, avec une amélioration considérable de la précision géométrique.

La longueur utile du rotor, c'est-à-dire la distance entre les lames ionisantes ne peut dépasser une fois et demie le diamètre pour la cloche; pour le tambour au contraire, deux fois et demie est une valeur raisonnable. Ainsi, pour des rotors de 35 cm une longueur de 90 cm est acceptable, soit une surface utile de l'ordre de 10^4 cm^2 .

La force tangentielle moyenne est $E_T \sigma$; $\sigma \sim 80 \text{ UES}$; avec la valeur très prudente $E_T = 15 \text{ kV/cm} = 50 \text{ UES}$ on a 4 000 dynes par cm^2 et comme la vitesse linéaire peut atteindre environ 5 000 cm/s, on a une puissance spécifique par unité de surface de 2 W/cm^2 . La surface maximum du rotor qu'on peut admettre avec sécurité étant de 10 000 cm^2 , la puissance maximum par unité, pour une structure cylindrique et un isolement à l'hydrogène, se trouve être 20 kW.

On pourrait, il est vrai, envisager des machines plus importantes, mais une réduction draconienne de la vitesse serait inévitable, et la puissance utile, au lieu d'être proportionnelle au cube des dimensions linéaires, comme ce serait le cas à vitesse angulaire constante, dépendra d'un exposant plus faible, par exemple le carré si on suppose une vitesse linéaire constante. Le poids « spécifique » et le prix du kW croîtraient avec la taille, et nous voyons donc que l'ordre de grandeur de 20 kW par unité constitue un optimum en prix et puissance spécifiques. Tant qu'il s'agit de machines cylindriques, il vaudrait mieux pour de grandes puissances monter en parallèle plusieurs générateurs plutôt que de construire une unité éléphanterque de faible rendement à maints égards.

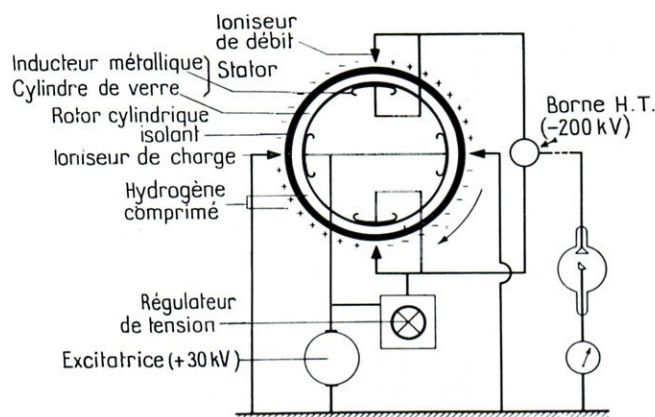


FIG. 8. — SCHÉMA D'UN GÉNÉRATEUR A CYLINDRE.

Le couplage en parallèle du générateur électrostatique est d'ailleurs très facile. Un seul régulateur électronique peut commander autant d'unités qu'il le faut sans aucune modification de structure. Cela signifie qu'une batterie de générateurs à commande électronique a le plus bas prix par kW, car le système électronique est presque aussi coûteux que chaque unité électrostatique. C'est encore plus vrai dans le cas de machines parfaitement stabilisées, où l'électronique doit être très élaborée.

Le courant de sortie quant à lui est proportionnel au nombre de pôles, la puissance restant à peu près constante tant que le pas polaire est assez grand pour permettre d'isoler les inducteurs sans diminuer la composante tangentielle moyenne entre ioniseurs E_T .

Le minimum pour ce faire est d'environ 5 cm. Si $E_T = 15 \text{ kV/cm}$, la tension minimum est 75 à 95 kV. Une unité de 20 kW est alors capable de donner au moins 200 mA.

À l'heure actuelle aucune machine réelle n'a atteint un chiffre pareil, mais la question est en évolution et la construc-

tion de nombreuses unités en cours. Un rotor de 24 cm a pu donner 100 kV, 30 mA ou 270 kV, 8 mA. Un autre de 30 cm a fonctionné de façon très satisfaisante à 300 kV, 10 mA et fut essayé un court moment à 400 kV; on attend 60 à 70 mA d'une unité analogue dans un proche avenir. Il est difficile d'obtenir des verriers français des cylindres de verre centrifugé; cela a entravé le progrès vers de plus hautes puissances en nous empêchant de profiter de toute la longueur permise aux rotors en tambour par leur stabilité mécanique. Jusqu'à présent la plupart des stators cylindriques en verre ont été fabriqués par l'antique méthode de soufflage à la bouche qui limite la masse de verre initiale de telle sorte qu'on ne peut fabriquer de cylindres dépassant environ 30 cm. Les résultats ci-dessus ont été obtenus avec des rotors courts, de moins de 30 cm de longueur utile. Nous voudrions cependant souligner que la présente limitation n'est pas du tout technique (car des cylindres de verre bien plus grands sont des produits courants), mais est due à la difficulté bien connue de convaincre une industrie tournée vers la production de série d'inclure dans ses programmes la fabrication de prototypes.

GÉNÉRATEURS A DISQUES.

Le rotor cylindrique a été choisi pour ses avantages mécaniques évidents, mais la dilatation centrifuge dans la direction même du champ ionisant est très fâcheuse, car elle empêche de bien définir la distance, si critique, des lames ionisantes à la surface du rotor dès qu'on dépasse un diamètre de 35 cm environ.

La structure en disques n'est pas du tout intéressante aux petits diamètres. En raison des espaces nécessaires entre ioniseurs, axe, bords des disques, etc..., seule une étroite zone de la surface des disques reste utilisable, et comme la distance entre disques doit être importante, pour pouvoir loger ioniseurs, inducteurs etc..., cette zone a une aire bien plus petite que celle d'un cylindre de diamètre analogue et de longueur égale à l'espacement des disques.

Mais pour des diamètres de 60 cm ou plus et si on recherche des tensions moyennes (100 ou 200 kV), les conclusions diffèrent. Non seulement la surface utile d'un empilement de disques est supérieure à celle d'un cylindre de volume équivalent, mais les forces centrifuges sont maintenant perpendiculaires au champ ionisant et ne peuvent, dans une machine parfaitement équilibrée, interférer avec l'espacement vital entre rotor et lames. La vitesse linéaire et la surface du rotor peuvent toutes deux être beaucoup plus grandes que celles d'un grand cylindre de taille comparable, et la puissance de sortie croîtra à nouveau comme le cube des dimensions. Il paraît possible de réaliser des unités donnant (par exemple) 200 kW et plusieurs ampères et enfermées dans un récipient sous pression de moins de 3 000 l.

GÉNÉRATEURS ÉLECTROSTATIQUES CONTRE REDRESSEURS.

Ceci est la question vitale pour l'avenir industriel et commercial des générateurs électrostatiques. La machine électrostatique est de fait une intruse dans un domaine où la plupart des besoins sont satisfaits par des systèmes redresseurs. Elle est de plus handicapée par ses bases scientifiques relativement faibles en face de la masse énorme de travaux que les plus brillantes équipes de physiciens et d'ingénieurs ont consacrés aux tubes électroniques, redresseurs à gaz et aux semi-conducteurs. Il serait déraisonnable d'essayer de prévoir l'avenir de la compétition dans un domaine où toutes les techniques évoluent si rapidement, mais on peut poser quelques principes généraux.

Dans tout générateur électrique, on doit créer physiquement une intégrale du champ électrique au moins égale à la tension désirée. Dans les piles voltaïques et les machines tournantes cette intégrale, à part la faible influence de la résistance interne, est juste égale à la tension. Dans les circuits redresseurs, l'intégrale doit être « virtuellement » le double dans le cas le plus simple; nous devons fournir un redresseur dont la tension inverse de crête totale est deux fois la tension entre bornes. Dans de nombreux circuits redresseurs, ce rapport est supérieur à 2, par exemple 4, ou 6.

Il faut non seulement fournir le redresseur mais encore assurer l'isolement. Plus généralement, on peut dire que pour créer une tension donnée, il faut payer au moins pour la réalisation technique de l'intégrale ci-dessus : c'est là le prix minimum.

Dans le cas d'une basse tension continue, ce prix est virtuellement zéro. Le plus petit espace d'air peut tenir jusqu'à 400 V sans claquage. Les dépenses sont donc déterminées seulement par la capacité spécifique en courant de l'équipement. Il n'est donc pas étonnant que les convertisseurs tournants à basse tension luttent difficilement contre les redresseurs. Dans le générateur, on doit créer un flux magnétique inutile par ailleurs, et la masse de la machine est sans rapport avec sa tension. Tout redresseur ayant une suffisante capacité en courant est un dangereux rival, dès qu'il possède la petite tension inverse de crête indispensable.

La situation est bien plus favorable pour les générateurs électrostatiques. Tant que le nombre de leurs pôles reste dans des limites raisonnables, leur volume et leur prix sont déterminés par l'intégrale du champ tangentiel E_T , égale à la tension, plus que par la puissance utile. Les moyens techniques nécessaires pour isoler la tension ne sont en aucune façon plus coûteuse que ceux exigés par les redresseurs, puisqu'on a affaire au cas le plus favorable, de tension continue constante. On voit donc que la lutte peut vraisemblablement tourner en faveur des machines électrostatiques quand la puissance demandée est à peu près celle d'une unité dont les dimensions correspondent à la tension désirée.

Inversement, ce raisonnement montre l'importance extrême de la puissance spécifique dans la compétition. Autrefois, une machine capable de fournir 100 ou 200 kV donnait un courant aussi petit que 0,1 mA. Il fallait une batterie de plusieurs douzaines de machines de Wimshurst, pour obtenir quelques milliampères. Comme la masse et le prix d'une telle batterie n'étaient nullement en rapport avec sa tension, la situation était tout à fait semblable à celle d'une grosse dynamo vis-à-vis d'un redresseur au silicium. Aucune application industrielle réclamant 100 ou 200 kV ne pouvant se contenter de 0,1 mA, la machine de Wimshurst n'avait aucune chance de jouer un rôle dans la pratique.

Avec l'avènement des générateurs électrostatiques modernes, ce chiffre a été multiplié par 10, dans les machines à courroie, et presque par 100 pour les générateurs cylindriques, isolés dans l'hydrogène. C'est-à-dire que la machine à courroie est très compétitive dans le domaine des milliampères, et le cylindre jusque vers 10 ou 20 mA. Allant plus loin, il faut mettre en parallèle de plus en plus de courroies ou de cylindres, et la compétition devient de moins en moins favorable.

Les générateurs électrostatiques peuvent être intéressants d'une autre façon. Il faut payer pour créer une intégrale donnée du champ électrique, mais il faut aussi payer pour filtrer et stabiliser les courants. S'il faut éliminer les onduations, il faut payer pour de gros condensateurs, et (ou) des redresseurs polyphasés, et (ou) une régulation électronique complexe. Il se trouve que les générateurs électrostatiques peuvent réaliser facilement une stabilité très élevée

qui répond à leur nature propre. De plus le réglage électronique est bien plus simple et plus efficace qu'avec les circuits électromagnétiques, car l'électrostatique et l'électronique sont apparentées; et une machine puissante peut être commandée par une triode bon marché comme une 6 BK 4. Pour ces raisons, on peut dire que les générateurs électrostatiques peuvent être une solution très attrayante dans le domaine des courants assez forts, de 50 à 100 mA, si une tension constante ou mieux bien stabilisée, est nécessaire. Leurs perspectives seront au contraire moins bonnes si on n'a besoin que d'intensité sans stabilité, ni réglage, comme par exemple pour la charge des condensateurs.

CONCLUSION.

Cet article voudrait donner une vue d'ensemble raisonnable de l'état actuel du développement et des directions nécessaires des progrès futurs. Nous avons vu que la puissance spécifique est toujours un facteur essentiel, et que les générateurs électrostatiques ne seraient jamais entrés dans la pratique si elle n'avait été améliorée de plusieurs ordres de grandeur.

Nous devons aussi nous souvenir que l'état actuel de la technique ne reflète en rien les possibilités ultimes de ces machines. Le fait que l'hydrogène, un gaz de faible rigidité diélectrique, soit préféré au rebours de toutes les prévisions théoriques, révèle combien la technique actuelle suit encore les voies de l'empirisme, et est incapable de tirer parti des principes scientifiques les mieux établis.

Nous affirmons avoir obtenu dans l'hydrogène plus de 100 UES. Mais des gaz électronégatifs pourraient multiplier ce chiffre par 3, si le problème de la commutation était convenablement résolu. Et une machine à plusieurs disques, à secteurs conducteurs interconnectés, pourrait donner dans un tel milieu plus de 0,3 kW par litre, comme John G. Trump l'a reconnu dès 1930.

Et nous ne serons peut-être pas toujours limités aux isolants gazeux. La chimie moderne dont les progrès sont vraiment étonnants nous a indiqué la voie à suivre pour résoudre un problème qui, il y a quelques années encore, apparaissait aussi impossible que la bombe atomique et les voyages interplanétaires en 1860.

Les ingénieurs électriciens n'ont jamais pu utiliser les nombreux liquides organiques « isolants » à cause de leur conductivité ionique. Seule l'huile minérale, c'est-à-dire les mélanges d'hydrocarbures, et quelques composés chlorés ont reçu droit de cité dans la technologie électrique. Leurs constantes diélectriques sont 2 et 4,5 respectivement. Toutes les tentatives pour utiliser d'autres liquides, de permittivités supérieures, ont échoué.

La conductivité ne semble cependant pas une propriété intrinsèque de ces liquides. L'eau a seule été obtenue dans un état de pureté tel que la conductivité mesurée reflète réellement une ionisation spontanée. Des mesures indirectes des constantes de dissociation révèlent que les alcools méthylique et éthylique sont encore ionisés mais à un bien moindre degré, la résistivité du dernier étant de l'ordre de 10^{10} à $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$. Il est d'ailleurs naturel de s'attendre à une notable dissociation de ces liquides, qui réagissent spontanément avec les métaux alcalins, libérant l'hydrogène par transfert d'électron entre protons et atomes métalliques.

Mais tous les liquides de permittivité élevée ne réagissent pas sur le sodium. Cette sorte de réaction semble liée bien plus à une structure spéciale de la molécule (H mobile lié à un O ou influencé par des liaisons multiples) qu'au moment dipolaire électrique qui détermine la permittivité macroscopique. On ne peut déceler aucun proton libre dans

le nitrobenzène malgré une constante diélectrique de 36, supérieure à celles des alcools méthylique et éthylique. Cependant le nitrobenzène n'est pas un isolant technique car sa résistivité est 10^7 à $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$, correspondant à un temps de relaxation de 10^{-4} s environ.

Il semble certain que la conductivité mesurée des liquides organiques n'est pas du tout liée à leur dissociation propre, mais est seulement due à la pollution. Un physicien ingénieur fit en 1913 des efforts remarquables pour clarifier ce problème. Avec une obstination acharnée, il appliqua les techniques de purification les plus élaborées de son époque à des liquides très polaires, comme l'acétone, SO_2 , etc..., passant des semaines et des mois à éliminer des causes minimes de pollution. Il comprit pourtant clairement qu'il ne pourrait atteindre l'état parfait de pureté, et en conclut correctement que toute amélioration des techniques de purification entraînerait une augmentation de résistivité, et que tous les nombres donnés pour les résistivités de liquides polaires prétendus purs n'avaient aucune signification et étaient trop petits de plusieurs ordres de grandeur.

La principale difficulté de telles expériences est l'incroyable sensibilité des liquides polaires à de très faibles traces d'impuretés. Une concentration de 10^{-11} d'électrolyte dissocié suffit pour expliquer les conductivités trouvées par Carvallo. Cela semblait aussi bannir tout espoir d'une utilisation pratique de ces liquides, car tout appareillage technique créerait assez de pollution pour détruire en un court instant le résultat d'un travail long et pénible. Comme me le dit en 1952 avec quelque humour M. C.G. Garton (aujourd'hui Chef du département de physique des matériaux ERA, Leatherhead) « vous passerez des mois à purifier un tel liquide, et le fruit de vos efforts sera anéanti en quelques minutes — ou secondes — dès que le liquide viendra en contact avec une quelconque pièce de métal oxydé ou même l'air humide ».

Un tel propos signifiait clairement que toute tentative pour utiliser des liquides devait être abandonnée. Cependant je continuai à caresser un faible espoir que la chimie ferait un nouveau miracle, et je suis heureux d'avoir vécu assez pour le voir.

Pour obtenir de l'eau pure, Kohlrausch dut réaliser près de 100 rectifications sous vide avec un soin incroyable. Mais depuis l'avènement des échangeurs d'ions synthétiques, nous pouvons tirer au robinet de l'eau aussi pure que celle de Kohlrausch, à des débits de dizaines de litres par minute, et les piles-piscine, par exemple, ont besoin d'une telle eau par tonnes.

Dès qu'on eut appliqué les échangeurs d'ions à ces « impossibles » liquides polaires, on put penser que le miracle si longtemps espéré était arrivé. Avec un appareil très grossier, on obtint un écoulement continu d'acétone plus résistante que l'unique échantillon de Carvallo. Car il est vrai que la remarque désespérante de M. Garton n'est plus valable ici. On n'a plus affaire à une méthode statique de purification, comme la rectification, mais dynamique, et la résis-

tivité mesurée reflète un équilibre dynamique entre pollution et dépollution, comme dans nombre de phénomènes vitaux. On peut se demander avec étonnement comment la nature peut maintenir une concentration si précise d'ions variés dans notre sang, malgré tant de causes perturbatrices. Nous savons, maintenant, que de nombreux mécanismes, assurés par des organes essentiels comme les reins, doivent être sans cesse à l'œuvre pour obtenir un si merveilleux résultat. Les échangeurs d'ions peuvent faire de même avec des liquides polaires en éliminant constamment les ions comme font nos reins pour Na^+ et Cl^- .

De fait on a préparé de l'acétone et du nitrobenzène plus isolants de plusieurs ordres de grandeur que les meilleurs résultats jamais obtenus; comme l'acétone réagit sur les métaux alcalins, elle doit tout de même être dissociée et ne peut être envisagée comme isolant. Des résistivités aussi élevées que $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ ont été néanmoins obtenues. Le nitrobenzène semble pouvoir atteindre un plus haut degré de pureté d'une façon régulière et sûre. Des résistivités de $5 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ ont été obtenues régulièrement à des débits de plusieurs litres à l'heure. Il semble aussi moins sensible à la pollution. Il faut se rendre compte que ce chiffre est tout à fait comparable à ceux indiqués pour les isolants liquides commerciaux de faible permittivité. Le temps de relaxation correspondant, (1,5 s) est assez grand pour un générateur électrostatique, où le temps de transfert n'excède pas 10^{-2} s.

Il serait bien entendu naïf de croire le problème résolu, et de s'attendre dans un proche avenir à voir des transmissions d'énergie en courant continu par des générateurs électrostatiques isolés au nitrobenzène. Mais le fait qu'une voie a été trouvée nous rappelle que les perspectives de ces générateurs ne sont nullement limitées à la pulvérisation de peinture, aux essais électriques ou à la recherche nucléaire. Les forces fantastiques liées au champ coulombien des électrons ne se plient pas volontiers au service de l'industrie, car elles sont rebelles, à cause de leur incroyable puissance, au joug d'un travail sûr et régulier. Cependant elles ont été récemment mises à profit pour des applications économiquement importantes, la pulvérisation électrostatique de peinture et les machines à haute tension portatives en sont des exemples significatifs. Rappelons-nous que ce sont là les présages d'une nouvelle ère de l'électrotechnique, où la symétrie de la dualité électromagnétique sortira enfin des froides limbes de la théorie pour s'incarner dans de nombreuses et utiles applications, et faire éclater sa puissance cachée pour le bien de l'humanité.

RÉFÉRENCES

- [1] John G. TRUMP : Vacuum electrostatic engineering. *M.I.T.*, 1933.
- [2] Jean CARVALLO : Conductibilité électrique des liquides purs. *Annales de Physique*, 1914.
- [3] Noël J. FELICI : *Direct Current*, June 1953.

Extrait de **nucleus**

N° 5, Septembre-Octobre 1961

92, Rue Bonaparte **DUNOD PARIS** (VI^e)