ANNALES DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

LOUIS NÉEL
LOUIS WEIL
NOËL FÉLICI

Applications nouvelles de recherches théoriques aux aimants permanents et aux machines électrostatiques

Annales de l'université de Grenoble, tome 22 (1946), p. 71-84
<http://www.numdam.org/item?id=AUG_1946__22__71_0>

© Annales de l'université de Grenoble, 1946, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Annales de l'université de Grenoble » implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (http://www.numdam.org/conditions). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM
Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
http://www.numdam.org/

APPLICATIONS NOUVELLES DE RECHERCHES THÉORIQUES AUX AIMANTS PERMANENTS ET AUX MACHINES ÉLECTROSTATIQUES

présentées par Louis NÉEL,
et ses collaborateurs Louis WEIL et Noël FÉLICI.

M. NÉEL :

Dans le laboratoire que je dirige à Grenoble (Electrostatique et Physique du métal), nous avons eu comme principal objectif de mener parallèlement des recherches de science pure et des recherches de science appliquée. C'est un lieu commun ou, tout au moins, ce devrait être un lieu commun de dire qu'il n'y a aucune ligne de démarcation entre la science pure et la science appliquée. Les spéculations les plus abstraites conduisent très souvent à des applications pratiques extrêmement importantes, tandis que les méthodes et les techniques de l'industrie sont d'un grand secours pour les chercheurs des laboratoires.

Je voudrais faire ressortir la fécondité de ces contacts entre la science pure et les techniques, entre les hommes de laboratoire et les industriels, entre les théoriciens et les hommes engagés dans l'action, et comme il n'y rien de si frappant que l'exemple, je citerai, à titre d'illustration, deux réalisations faites dans ce laboratoire, prises à dessein dans deux domaines très différents : celui des aimants permanents et celui des machines électrostatiques.

Dans le domaine des aimants permanents, des spéculations purement théoriques sur le mécanisme des phénomènes d'hystérésis ont ouvert la voie à des applications pratiques importantes. On sait, depuis les travaux de M. Weiss, que les phénomènes d'aimantation du fer, qui jouent un si grand rôle dans l'électrotechnique, ne sont dus qu'à des variations apparentes de l'aimantation : dans un

domaine suffisamment petit, le domaine élémentaire, l'aimantation garde la même grandeur qu'à la saturation : seule l'orientation de l'aimantation varie d'un domaine à l'autre.

Les phénomènes de variation d'aimantation, dont nous sommes les témoins et les utilisateurs, proviennent, en majeure partie, des déplacements des frontières qui séparent ces petits domaines qui s'agrandissent ou se rapetissent aux dépens les uns des autres. Or, des théories assez complexes, et dont l'intérêt peut paraître purement spéculatif, montrent que ces parois ne sont pas des plans géométriques mais possèdent une certaine épaisseur qui est de l'ordre du dixième de micron pour le fer. On en conclut qu'en divisant la matière magnétique en grains suffisamment petits pour que les dimensions de ces grains soient inférieures à l'épaisseur de ces frontières, les mécanismes de variation d'aimantation, dus à ce déplacement de frontière, ne pourront plus se produire : l'aimantation de tels grains sera particulièrement stable, ce seront des aimants permanents.

C'est dans cette voie que nous nous sommes engagés, avec la collaboration de MM. Weil, Aubry et d'autres encore.

M. Weil, qui a joué dans ces recherches un rôle très important, va vous parler des résultats obtenus ; je lui cède la parole.

M. WEIL parle alors des nouveaux aimants en poudre comprimée :

Autrefois, les aimants étaient longs et volumineux ; aujourd'hui ils sont courts et petits : pour créer le même champ dans le même entrefer, il faut plus de 10 fois moins d'acier spécial en un barreau plus de 10 fois moins long qu'il y a un demi-siècle.

Le progrès a été réalisé à deux points de vue : on a pu faire des aimants courts parce qu'on a su augmenter leur champ coercitif ; on a pu les rendre moins volumineux parce qu'on a su augmenter l'énergie magnétique par cm^3. Rappelons qu'on détermine cette énergie en formant le produit de l'induction B et du champ H pour diverses valeurs du champ comprises entre O et le champ coercitif (champ qui annule l'induction), en prenant sa valeur maximum et en la divisant par 8π pour l'exprimer en $ergs/cm^3$.

Pendant longtemps on ne s'était servi que d'aciers au carbone trempés, avec un champ coercitif $H_c = 20$ gauss et $(B.H)_{max.} = 0,10 . 10^6$. Au début du siècle, on a fait des additions de tungstène, puis de

chrome. Plus récemment, on a fait appel aux ferro-cobalts et enfin aux fer-nickel-aluminium additionnés ou non de cobalt et de titane. Les aimants ainsi obtenus ont des champs coercitifs de l'ordre de 500 gauss et des $(B.\ H)_{max.}$ de 1 à $1{,}6 . 10^6$, pouvant d'ailleurs être accrus encore par une orientation dans un champ magnétique à chaud.

Ces qualités nouvelles n'ont toutefois pas été acquises sans une lourde contre-partie. On travaille l'acier ordinaire au tour et à la fraiseuse, et on le trempe ensuite : avec un usinage peu coûteux on l'amène ainsi aux cotes exactes avec une bonne précision. On ne peut plus en faire autant avec les fer-nickel-aluminium : il faut les travailler complètement à l'état dur, c'est-à-dire à la meule et à la rectifieuse.

En général, on ébauche de très près la forme définitive par coulée : malheureusement, les nombreuses soufflures et tapures forcent à rejeter une fraction importante des pièces. Toutes ces difficultés font du fer-nickel-aluminium un matériau cher.

Pour en réduire le prix, on n'a pas hésité à broyer le métal coulé et à agglomérer la poudre obtenue, avec de la résine, par compression. Les grains d'alliage, très durs, ne se déforment pas sous pression et la masse d'aimant par cm^3, donc l'énergie magnétique par cm^3, est bien plus faible qu'avec le métal fondu. Dans une certaine « Tromalite » on a, par exemple, passé de 1,6 à $1 . 10^6$ pour le $(B.\ H)_{max.}$. Le fait qu'on ait entrepris une fabrication où l'on renonce à priori à 40 pour 100 de la valeur magnétique illustre bien les difficultés d'emploi des aciers à aimant modernes,

Nous avons cherché, dans notre laboratoire, une solution dans une autre voie. M. Néel avait été conduit, par des considérations théoriques, à penser que des ferromagnétiques en grains suffisamment fins devaient avoir un grand champ coercitif. Un moyen bien connu d'obtention du fer, par exemple, en très petites particules, consiste à réduire par l'hydrogène un composé du métal. Nous l'avons appliqué en collaboration avec M. Aubry, et nous avons comprimé la poudre obtenue sous une pression de quelques tonnes par cm^2 pour en faire de petits blocs : champ coercitif et énergie par unité de volume étaient effectivement comparables à ceux des fer-nickel-aluminium. En remplaçant le fer par du ferro-cobalt, nous avons même réussi à égaler les aimants du type fer-nickel-aluminium-cobalt. Deux ingénieurs d'une importante société, MM. Marquaire et Choutean se sont occupés de la réalisation industrielle

et dès à présent on fabrique des aimants d'après notre procédé.

Voici d'ailleurs quelques caractéristiques relevées sur des échantillons de production courante. Pour un premier bloc de fer, on a :

$$B_r = 7.500 \qquad H_c = 343 \qquad (B.\,H)_{max.} = 1{,}16 \cdot 10^6,$$

On peut d'ailleurs faire varier considérablement les propriétés des aimants en agissant sur les conditions de fabrication et de compression de la poudre. Voici par exemple des valeurs mesurées sur un autre bloc :

$$B_r = 5.375 \qquad H_c = 444 \qquad (B.\,H)_{max.} = 0{,}91 \cdot 10^6$$

et enfin sur un bloc fait en poudre de ferro-cobalt :

$$B_r = 7.130 \qquad H_c = 486 \qquad (B.\,H)_{max.} = 1{,}55 \cdot 10^6.$$

Ces aimants sont obtenus par compression : forme et cotes sont donc imposées par la matrice et l'on bénéficie de l'avantage que confère toujours la métallurgie des poudres, une très grande précision sans frais d'usinage. On peut garantir le 1/100e de mm. sur les cotes perpendiculaires à la direction de compression et le 1/10e de mm. sur les cotes parallèles à la direction de compression pour des séries de plusieurs milliers de pièces.

Il y a plus encore : quand on veut construire un circuit magnétique on est quelquefois tenté de donner à l'aimant une forme compliquée pour réduire la dispersion du flux, donc améliorer ce qu'on peut appeler le rendement de l'aimant. Avec les aciers modernes, toute courbure, toute cannelure posait immédiatement un problème d'usinage. Il n'en est plus de même avec les aimants comprimés pour lesquels le prix de revient de la matrice n'est jamais qu'une faible fraction du total. Avec une qualité d'aimant donnée, on peut ainsi réduire le volume utilisé.

Enfin la masse spécifique de nos aimants, au lieu d'être de l'ordre de 8 comme pour les aciers ordinaires, n'est plus que de l'ordre de 4. L'énergie magnétique par gramme est supérieure, à énergie par unité de volume égale, et permet donc un allègement des circuits magnétiques.

Nous allons vous projeter quelques aimants fabriqués actuellement. (Projection de deux aimants annulaires de 5 et 15 mm. d'épaisseur radiale, de 45 mm. de diamètre intérieur et de 10 mm. de hauteur, de quelques aimants parallélépipédiques de quelques

mm. de côté, d'un aimant d'éclairage de bicyclette ayant deux faces cylindriques, d'une pièce en U et d'une petite palette de 2 mm. d'épaisseur et de 10 mm. de diamètre montée sur un pivot d'acier par compression). La surface des aimants est aussi brillante qu'une surface de métal rectifiée ; les arêtes sont aussi fines que celles de pièces faites à la machine-outil. Le procédé est particulièrement intéressant pour les petites pièces comme la palette tournante que nous avons présentée et qu'il serait pratiquement impossible de faire en matériau ordinaire sans que son prix soit prohibitif ; mais la seule limite imposée à la taille des pièces est due à la puissance des presses qui empêche de dépasser une certaine surface : un empilement d'aimants tous rigoureusement identiques permet de réaliser n'importe quelle épaisseur.

On peut se demander si des produits obtenus par compression de poudres sont suffisamment solides. Nous pourrions vous indiquer leur résistance à l'écrasement (supérieure à 1 tonne par cm^2) ou d'autres caractéristiques mécaniques, mais il est plus suggestif de signaler que des dizaines de milliers de ces aimants sont déjà en service depuis plusieurs mois sur des éclairages de bicyclettes et que, malgré les cahots auxquels ils sont soumis, aucun n'a encore donné lieu à des doléances.

M. NÉEL reprend :

Comme second exemple de réalisation industrielle issue de recherches purement spéculatives, je citerai maintenant une petite machine électrostatique que nous avons étudiée en vue d'applications agricoles.

Depuis longtemps, on sait que l'on peut dépoussiérer un gaz au moyen d'un champ électrique. Les premières applications industrielles de ce procédé remontent à 1884. Depuis, les travaux de Cottrell en 1905, il est passé dans la pratique industrielle courante.

Là, il s'agit en somme, de précipiter en un temps très court, des particules, des poussières très fines en suspension dans le gaz et dont la précipitation naturelle demanderait des jours et même des semaines sans champ électrique.

On peut aussi naturellement utiliser le champ électrique pour accélérer la précipitation de particules plus grosses qui se déposent spontanément en quelques minutes.

Un domaine intéressant est celui des applications agricoles. Vous

savez qu'on traite, par exemple, certaines maladies de la vigne en poudrant les feuilles et les grappes de la vigne au moyen de fleur de soufre. Cette technique du soufrage soulève quelques difficultés : en effet, pour que les particules de soufre adhèrent bien sur les feuilles, il ne faut pas qu'elles soient trop grosses car si elles sont trop grosses, elles roulent sur la feuille et se perdent, elles n'adhèrent pas. On est conduit à utiliser du soufre en poussière très fine ; mais par contre, si on prend de la poussière très fine, celle-ci reste en suspension dans l'air et est entraînée par le moindre vent ; là aussi on en perd. On est donc pris entre deux exigences contradictoires et on est obligé de prendre un moyen terme, qui, comme tous les moyens termes, n'est pas très satisfaisant.

C'est en étudiant ce problème, que MM. Truffaut et Hampe, bien connus dans les milieux agricoles, eurent l'idée, il y a quelques cinq ans, d'effectuer des poudrages dans un champ électrique. Ils poursuivirent cette étude avec M. Pauthenier dont vous connaissez tous les travaux sur l'amélioration des procédés Cottrell.

L'expérience montra que l'utilisation du champ électrique permet de fixer sur les organes des végétaux cinq à dix fois plus de poudre que lorsqu'on n'utilise pas de champ.

La technique du procédé est très simple :

Pour faire du poudrage électrique, il suffit de porter la buse de pulvérisation de la soufreuse à un haut potentiel. Il va se former une effluve et le soufre, en passant dans la région ionisée, va se charger électriquement et sera ensuite précipité sur les feuilles par le champ électrique.

Chaque grain de soufre sera maintenu sur les feuilles par l'attraction de son image électrique. Les tensions à employer sont de l'ordre de 50 à 100 000 volts et les puissances sont relativement très faibles : de quelques watts à quelques centaines de watts, selon qu'il s'agit de poudreuses à dos ou de poudreuses à roues.

Tout compte fait, on améliore ainsi beaucoup le poudrage et on lui ouvre de nouveaux champs d'application qui étaient jusqu'ici réservés à la pulvérisation par voie humide, et sur cette pulvérisation, le poudrage offre de grands avantages.

Les bouillies utilisées en agriculture sont des bouillies étendues. Donc, quand un cultivateur traite un champ au moyen d'une bouillie, il transporte pour rien 99 pour 100 d'eau, soit à l'hectare des trentaines d'hectolitres d'eau. Ceux-ci peuvent être remplacés par quelques kilogrammes de poudre.

Bref, les procédés électriques constituent un progrès considérable au point de vue agricole.

Cependant, il y a une ombre au tableau : pour mettre en pratique ces procédés, il faut disposer de sources d'électricité à haute tension continue qui soient légères, transportables, robustes et aussi bon marché. Les solutions que l'électrotechnique apporte à ce problème sont peu élégantes, et compliquées : on peut par exemple utiliser un petit alternateur, un petit transformateur et un petit kénotron ; le poids et le prix de cet ensemble sont assez élevés.

En fait, aucun constructeur n'a pu fournir, jusqu'ici, d'appareils satisfaisants. Mais il existe d'autres méthodes qui permettent d'avoir facilement de hautes tensions continues : avec des machines électrostatiques. Ces machines ont malheureusement une réputation déplorable : elles passent pour être fragiles, capricieuses et d'un rendement très faible et, en fait, à part les travaux poursuivis en Amérique, par Van de Graaf, en France par Pauthenier, elles sont restées dans un oubli presque complet depuis près d'un siècle.

M. Felici, maître de recherches dans notre laboratoire, et qui poursuit depuis quatre ans ces études dans cette voie, va vous montrer maintenant que la source de choix pour avoir de hautes tensions continues est bien la source électrostatique.

Vous verrez qu'entre les prototypes qu'il a réalisés et la vieille machine de Wimshurst qui figure dans tous les manuels classiques, il y a autant de différence qu'entre les dynamos modernes et leurs ancêtres de 1860.

Avant de donner la parole à M. Felici, nous allons faire quelques expériences qui vont vous montrer l'action du champ électrique sur la précipitation des poudres. Nous ferons d'abord :

1° Un essai de poudrage sans champ électrique ;

2° Un essai de poudrage avec champ électrique établi entre le sol et un rideau de fils métalliques porté à un potentiel continu assez élevé de l'ordre de 100 000 volts.

Vous constaterez la différence entre les deux essais. Vous remarquez sur le rideau formé de fils parallèles, la présence de petites pointes qui ont pour but de créer une effluve, c'est-à-dire de créer des ions qui vont charger les particules de poudre. Les particules chargées électriquement seront précipitées sur le sol par le champ électrique.

Nous ferons ensuite deux expériences avec une soufreuse Vermorel du type utilisé en agriculture :

1° Un soufrage normal sans champ électrique.

Sur la soufreuse est fixée la petite machine dont je vous ai parlé tout à l'heure. Mettons l'appareil en court-circuit et soufrons une plaque d'aluminium : il n'y a aucune adhérence, aucune particule de soufre ne reste fixée sur l'aluminium.

Sur des feuilles de platane, l'expérience reste la même, aucune particule de poudre ne s'y fixe d'une manière durable.

2° Soufrage avec champ électrique.

Si on fait marcher la machine qui est entraînée par le levier de la poudreuse, la poudre reste fixée sur la plaque d'aluminium ou sur la feuille de platane. On voit aisément que même après l'avoir secouée, la poudre y reste fixée.

Un autre intérêt du procédé : avec le champ électrique on assure l'uniformité de la répartition de la poudre, car la poudre étant chargée électriquement, est repoussée aux endroits chargés et se dépose ailleurs.

M. FELICI parle alors des nouvelles machines électrostatiques :

Vous savez que la machine électrostatique est historiquement le premier générateur d'énergie électrique. Son évolution a été lente, elle n'a progressé qu'avec beaucoup de peine. En effet, il est traditionnel de considérer comme l'ancêtre des machines électrostatiques, le globe de soufre que Otto de Guericke a monté sur un axe à manivelle en 1640, à Magdebourg.

Il a fallu attendre un siècle pour voir ajouter à cette machine rudimentaire l'organe essentiel qu'est le collecteur, c'est-à-dire une pièce métallique isolée qui reçoit l'électricité développée par le frottement. Ceci n'a été réalisé que vers 1750 par Bose, de Magdebourg.

Bose disparut prématurément. Il vivait à une époque troublée comme la nôtre. Il fut arrêté par les Prussiens après la prise de Magdebourg, pendant la guerre de Sept Ans et mourut dans les casemates. Sa machine avait des effets étonnants pour son temps : elle pouvait enflammer de l'alcool et renverser un homme.

Il fallut attendre un nouveau siècle pour arriver aux premières machines à influence qui ont été créées en 1867 par Tœpler de l'Institut allemand de Riga et à peu près en même temps par le Berlinois Holtz. Il y eut ensuite une nouvelle période sans grand progrès jusque vers 1930, où deux physiciens que vous connaissez, Vande

Graaf en Amérique et Pauthenier en France, ont créé des machines électrostatiques adaptées à la production de tensions très élevées utiles pour les recherches atomiques.

Malgré ces progrès, les techniciens reprochent toujours aux machines électrostatiques les mêmes défauts : tout d'abord *faible puissance* spécifique (rapportée au poids ou au volume) ; ensuite *rendement très mauvais*.

Pour vous donner un exemple, je vais vous citer une machine construite par Chaumat en 1936 et qui est ce qu'il y a de mieux dans le genre. Son poids est de 15 kilogrammes. Sa puissance électrique est de 10 watts. Elle possède un disque de 42 centimètres de diamètre qui tourne à 2 500 tours par minute. Son rendement est de 19 pour 100 dans les conditions les plus favorables.

Il y a un premier fait qui s'est dégagé de l'expérience des temps passés : c'est qu'il est impossible de réaliser une machine électrostatique puissante dans l'air ordinaire à la pression atmosphérique. Il est nécessaire de remplacer cet air par un milieu fluide de rigidité diélectrique plus grande. Cet emploi n'est d'ailleurs pas nouveau. En effet, c'est Hempel de Dresde qui est le premier à avoir mis une machine électrostatique dans l'air comprimé en 1885 et à avoir remarqué l'amélioration du fonctionnement, amélioration qui résultait de la compression de l'air. Toutefois, ce procédé n'a été repris sérieusement qu'à partir de 1936 par Van de Graaf.

Cependant, malgré ces derniers progrès, malgré l'emploi de l'air comprimé, les machines électrostatiques modernes qui sont très intéressantes pour certaines applications scientifiques, ne sont pas suffisantes au point de vue électrotechnique.

Je vais donner quelques chiffres : Hempel, en 1885, à Dresde a fait passer la pression de l'air dans une machine de Tœpler, de 1 à 4 atmosphères ; la puissance était multipliée par 2,7.

Lauritsen et Fowler, en Amérique, ont réalisé en 1941 une machine travaillant sous une pression d'air de 5 atmosphères et développant 1,5 kw. Le volume occupé est de 18 mètres cubes, c'est-à-dire que la machine développe une puissance de 8/100 kw. par mètre cube. Avec l'air comprimé, la puissance est multipliée par 3 seulement. Enfin, Van de Graaf a réalisé à Cambridge en 1939 une machine qui peut passer pour la plus réussie. Cette machine occupe seulement un volume de 2,6 mètres cubes et elle travaille sous une pression d'air de 11 atmosphères, pression sous laquelle elle développe 1,25 kw, c'est-à-dire 0,5 kw par mètre cube. Sa puissance est mul-

tipliée par 20 quand on introduit l'air comprimé et son rendement est de l'ordre de 50 pour 100.

Le laboratoire, conformément à sa ligne générale de recherches, a commencé par rechercher, non par des procédés expérimentaux, mais par des moyens purement théoriques, l'augmentation de puissance que l'on pouvait espérer dans les meilleures conditions, de l'emploi de ces gaz comprimés qui étaient, de l'avis universel, indispensables, mais qui donnaient des résultats assez variables.

Cette recherche théorique a conduit à des résultats très intéressants. Elle a montré que l'augmentation théorique possible était infiniment plus grande que tout ce qui avait été réalisé jusqu'alors ; qu'il fallait opérer sous des pressions élevées et que, de cette façon, l'on devait atteindre des multiplications de puissance très grandes. En opérant dans de l'air à 20 atmosphères, on devrait pouvoir arriver à multiplier la puissance par 150. En opérant sur de l'air à 30 atmosphères ou de l'hydrogène à 60 atmosphères on devrait avoir une puissance multipliée par 300.

Après ces recherches théoriques, il s'agissait de savoir s'il existait une machine électrostatique qui, mise dans l'air comprimé sous les pressions indiquées, ait sa puissance multipliée conformément aux prévisions précédentes. Or l'expérience prouve qu'une telle machine n'existe pas. Aucune machine connue ne peut profiter de l'augmentation de puissance espérée.

La seconde tâche du laboratoire a consisté à créer des types nouveaux de machines pouvant profiter réellement de l'augmentation théorique de puissance procurée par des pressions élevées. Ces nouveaux types de machines ne sont pas radicalement différents des anciens. Ils ont avec eux une parenté de principe, de même que la turbine hydraulique a une parenté de principe avec la roue de moulin. Mais cette parenté est seulement schématique.

On a pu réaliser au laboratoire, des machines électrostatiques dont la puissance, sous 30 atmosphères, se trouve multipliée par plus de 200. Toutefois, ce chiffre, si élevé soit-il, n'est pas 300, il reste donc des progrès à faire. Mais déjà, la multiplication par 100 ou 200 permet de réaliser des puissances suffisantes pour de nombreuses applications industrielles.

Dès à présent, nous pouvons réaliser des machines dont le poids, enveloppe comprise, est de 20 à 100 kilogrammes par kw et dont l'encombrement varie de 50 à 200 kw par mètre cube. C'est dire

que ces machines tiennent une place honorable parmi les autres génératrices électriques.

Voici une reconstitution de la machine de Tœpler réalisée en 1867 :

Elle se compose de deux plateaux, un grand et un petit, qui représentent chacun une machine électrostatique complète.

Chaque plateau possède un inducteur qui est une plaque fixe recouverte de clinquant qui produit des charges électriques par influence sur le plateau mobile, charges qui viennent se déverser dans le circuit extérieur. La petite machine est excitée par la grosse et réciproquement. Cette machine produit de petites étincelles correspondant à 10 ou 15 kilovolts. On peut apprécier sa puissance à quelques centièmes de watt, quelques dixièmes tout au plus.

Vous avez, à côté de celle-ci, la machine électrostatique qui a servi tout à l'heure à poudrer. Elle est plus maniable ; dès qu'on la fait tourner à la main, elle produit un jet d'étincelles plus conséquent que celui de son ancêtre et sa puissance est des dizaines de fois supérieure. (Elle développe un courant continu de 40 à 50 microampères, sous 30 à 60 kilovolts.)

Voici une autre machine qui donne 200 watts sous 50 kilovolts ; je vous signale que la machine n'occupe qu'une très petite place de cette grosse boîte. La partie utile de l'appareil occupe en effet une tranche du cylindre, qui a seulement 6 centimètres d'épaisseur. Le reste est la place du moteur triphasé qui fait tourner la machine.

Le laboratoire a en construction des prototypes qui continuent la marche vers les puissances élevées : d'une part, une machine de 1 500 watts développant une différence de potentiel de 500 kilovolts et, enfin, deux machines de 26 kw sous la tension de 200 kilovolts. Il ne faut pas vous étonner des tensions indiquées, c'est ce qu'il y a de plus facile à obtenir.

En même temps que le problème de la puissance se trouve résolu, du même coup, le problème de rendement. En effet, contrairement à l'opinion habituelle, en raison de circonstances favorables qui sont l'absence d'hystérésis, d'effet Joule et de courants de Foucault, le rendement électrique est égal à 100 pour 100, c'est-à-dire qu'il est impossible de trouver une différence entre le travail absorbé par les forces électriques et l'énergie électrique que la machine restitue. Cette différence est inaccessible à la mesure. Il y a cependant des pertes, mais elles ne sont dues qu'aux frottements. Le gaz comprimé frotte beaucoup, mais des dispositions particulières permettent de

diminuer suffisamment ces frottements. Il est facile de les réduire à moins de 10 pour 100 de la puissance utile. A titre d'exemple, la petite machine à poudrer, avec ses engrenages a un rendement de 50 pour 100, ce qui est excellent pour une machine de 2 watts. La machine de 200 watts a un rendement de 70 à 80 pour 100. Celles que nous avons en construction auront un rendement uniforme de 90 pour 100. Les rendements indiqués sont valables à pleine charge. Si la charge est diminuée par une réduction de vitesse, le rendement croît. Il passe de 90 pour 100 à 97 pour 100 quand la vitesse est divisée par deux, et à 99 pour 100 quand elle est divisée par trois.

En tout cas, on peut considérer le rendement de 90 pour 100 comme facile à atteindre et même à dépasser.

Mais ce ne sont pas les seuls avantages de ces machines : elles en ont d'autres aussi importants en pratique : d'abord leur robustesse incomparable pour une machine tournante à courant continu, robustesse qui est plus grande que celle des dynamos à courant continu de même puissance. En effet, elles sont insensibles aux court-circuits et dans bien des dispositifs, le fonctionnement s'arrête dès qu'il y a un court-circuit, pour reprendre quand il cesse. Elles sont, en même temps, insensibles aux surtensions ; les surtensions produisent des étincelles qui ont un effet heureux, car elles servent au début à balayer les impuretés qui s'opposent à une bonne valeur du champ électrique. Dans les autres machines électriques, les étincelles détruisent les isolants et conduisent à des réparations coûteuses.

Toutefois, comme dans toute machine qui produit du courant continu, il y a des contacts tournants qui peuvent tout de même être dégradés par un fonctionnement anormal ; mais il faut que ce fonctionnement dure plusieurs heures, c'est-à-dire que l'intervention est facile et qu'elle n'a pas même besoin d'être rapide. Dans certains types d'ailleurs, un fonctionnement anormal est rigoureusement impossible, quels que soient la charge, la vitesse et le récepteur. Aucune fausse manœuvre ne pourrait détériorer la machine.

Enfin, le laboratoire, dans ses recherches, a résolu complètement une autre question qui est celle de la stabilité.

Par des dispositifs que l'on peut qualifier de rudimentaires et qui sont moins chers que le rhéostat d'excitation d'une dynamo, on peut régler toutes les propriétés de la machine électrostatique en marche et en plus, lui donner toute caractéristique qui puisse être commode pour l'emploi de tel ou tel récepteur.

Par exemple, la petite machine a poudrer possède la caractéristique série, c'est-à-dire que le courant qu'elle produit est proportionnel à la tension à ses bornes. Elle est particulièrement facile à obtenir et, d'autre part, cette caractéristique se marie très bien avec la caractéristique de l'aigrette réceptrice. On peut aussi bien obtenir la caractéristique shunt, etc.

Naturellement, le courant produit par ces machines peut être rendu rigoureusement continu et constant dans le temps, avec un taux de fluctuation aussi faible qu'on puisse le désirer.

Les nouvelles machines fonctionnent aussi bien comme moteurs. Elles constituent un nouveau type de moteur à courant continu, acceptant des tensions très élevées, qui pourraient être utilisées, par exemple, pour la traction électrique.

Enfin, en ce qui concerne les calculs, ceux-ci sont plus simples et aussi sûrs que ceux auxquels on est habitué, en électrotechnique. En effet, il y a de nombreuses causes de complications qui disparaissent : la saturation du fer, l'hystérésis du fer et l'effet Joule. Il n'y a que les éléments principaux du problème qui interviennent, ce qui fait que l'on peut pousser très rapidement le calcul dans ses détails en tenant compte de tous les éléments principaux et secondaires.

Pour résumer, on peut dire, dès à présent, en raison des progrès déjà acquis, que ces nouvelles machines électrostatiques constituent des générateurs de courant continu à haute tension, qui sont à la fois les moins chers de réalisation, les plus robustes et les plus économiques et cela, pour toute puissance de l'ordre de quelques kilowatts ou inférieure et pour toute tension depuis 10 kilovolts jusqu'à des milliers de kilovolts et elles soutiennent avec avantage la comparaison avec les dynamos à courant continu basse tension.

Naturellement, on peut se demander si l'on peut construire de ces machines pour des puissances extrêmement grandes.

Il n'y a à cela aucune impossibilité de principe, étant donnés les résultats de nos expériences actuelles. Toutefois, le fonctionnement des machines de milliers de kilowatts posera certainement de nouveaux problèmes. La question est d'ailleurs à l'étude. Si les machines de 26 kilowatts donnent de bons résultats, on entreprendra la construction d'un échelon de puissance supérieure.

DISCUSSION

M. Demenach. — Avez-vous essayé d'employer des gaz de poids moléculaire élevé ?

M. Felici. — Oui, nous les avons essayés, mais cela n'a pas donné de meilleurs résultats ; nous nous sommes orientés plutôt vers l'air, l'azote et l'hydrogène.

M. X. — Quel est l'encombrement de ces machines ?

M. Felici. — Il est déterminé par la puissance, comme je l'ai dit précédemment.

M. X. — Quel est le prix de revient de ces machines ?

M. Felici. — Il ne peut pas être établi encore, avec une grande exactitude. On peut penser qu'il sera de quelques milliers de francs par kilowatt.

M. X. — Y a-t-il des dangers d'électrocution ?

M. Felici. — Dans certains types, le courant est automatiquement supprimé quand il y a contact, d'autre part il n'y a pas de grande capacité : le danger d'électrocution n'existe que pour des appareils très puissants.

M. X. — Quel est le supplément d'effort mécanique réclamé par la machine à poudrer ?

M. Felici. — 3 à 4 watts.

M. X. — Avez-vous déjà des soufreuses en action dans le domaine agricole ?

M. Felici. — Pas encore ; en ce qui me concerne, je suis seulement réalisateur de prototypes.

M. X. — Qui exploite cette invention ?

M. Felici. — Le Centre national de la Recherche scientifique.