

L'ÉLECTROSTATIQUE

par R. MOREL (*).

CELUI qui recherche une définition précise de l'électrostatique risque fort d'être déçu ou mal informé.

Délaissant les notions abstraites et purement mathématiques des cours de physique dont les applications pratiques ne sont guère évidentes, il apprendra peut-être qu'il s'agit de l'étude de l'électricité statique puis, poussant plus loin ses investigations, certains textes contemporains lui expliqueront encore, comme au XVIII^e siècle, que celle-ci est essentiellement produite par le frottement. De là à associer ce phénomène banal aux techniques électrostatiques les plus évoluées il n'y aura qu'un pas, sans doute facile puisque l'expérience montre qu'il est bien souvent franchi.

Il est vrai que des manifestations physiques apparemment différentes ont laissé croire pendant longtemps qu'il existait plusieurs types de *fluides* électriques et, malgré une conception maintenant précise des phénomènes, l'électricité statique conserve encore sa légende, son empreinte tantôt désuète et tantôt mystérieuse :

« D'un conducteur électrisé par le soufre, il émane une matière fluide, capable d'impulsion et de s'enflammer ; car elle se montre sous la forme d'aigrette lumineuse, et elle pousse en avant les liqueurs, la fumée, la flamme, les poussières, etc. Je dis que ce fluide est la matière électrique ; et si l'on me le conteste, je demande qu'on m'apprenne donc ce que c'est » (1).

Désormais, l'électrostatique n'est plus qu'un chapitre de l'électricité moderne, concernant l'étude des charges et des champs électriques, les moyens de les produire et les applications que l'on peut en faire. Cette définition demeure vaste et beaucoup de techniques feraient appel à l'électrostatique sans le savoir si l'habitude ne lui désignait, dans la pratique, des limites plus restreintes : c'est ainsi que la « technique électrostatique », dont le développement industriel progresse rapidement, est généralement associée à l'idée de *haute tension continue*, paramètre nécessaire à la manifestation tangible des phénomènes que cette technique cherche à exploiter.

Deux voies complémentaires sont tracées dans ce domaine : l'une a pour but de produire les hautes tensions continues au moyen des générateurs électrostatiques ; l'autre vise les applications de ces hautes tensions continues ou plus exactement des charges et des champs électriques qu'elles permettent de mettre en œuvre.

Dans les deux cas, le principe de base auquel on fait appel est le même : une charge électrique placée dans

un champ est soumise à une force, orientée suivant les lignes de force du champ et égale au produit de la charge par le champ. La liaison de grandeurs électriques et mécaniques suggère immédiatement le parti que l'on peut tirer de ce principe. Si la charge est transportée dans le champ par une force extérieure, son potentiel augmentera et une énergie mécanique sera convertie en énergie électrique : on aura créé un générateur électrostatique. Si la charge — ou une particule de matière chargée — est abandonnée dans le champ aux forces qui la sollicitent, elle se déplacera, se divisera, s'orientera, se précipitera finalement en des points bien déterminés ; on pourra agir de la sorte sur des particules trop petites pour être manipulées commodément par les procédés conventionnels et créer des installations électrostatiques de dépoussiérage, de peinture, de triage...

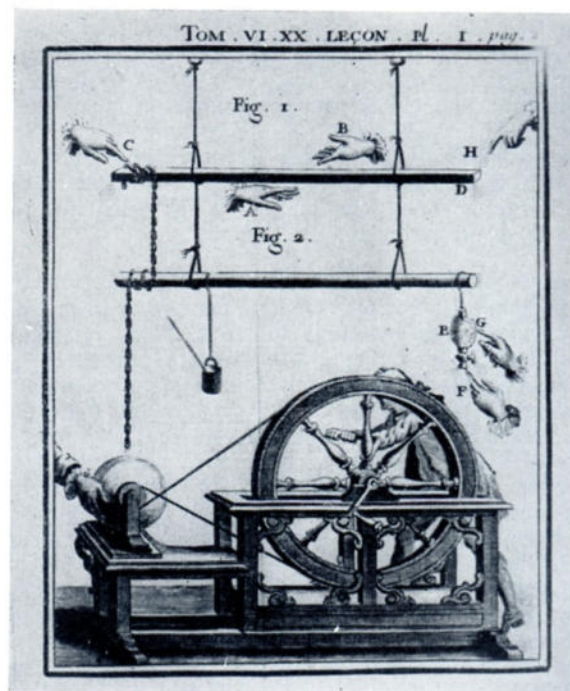


FIG. 1.

L'électrostatique est une technique nouvelle mais ce n'est pas une science récente : cette gravure du XVIII^e siècle montre une machine électrostatique à frottement, reliée à des dispositifs mettant en évidence l'effet de la « matière électrique ».

(*) Ingénieur en chef à la S.A.M.E.S.

(1) *Leçons de physique expérimentale*, par M. l'abbé NOLLET, 1764, 20^e leçon.

LES GÉNÉRATEURS ÉLECTROSTATIQUES

Premiers générateurs d'électricité connus, les *machines électrostatiques* figuraient voici plus d'un siècle parmi les instruments traditionnels des physiciens. Arrivés prématurément, à une époque où les connaissances techniques et les besoins industriels ne pouvaient assurer leur essor, ces générateurs se sont effacés devant les possibilités plus immédiates de l'électromagnétisme et il a fallu que cette technique fût largement exploitée pour que l'on songeât de nouveau à tirer parti de sa sœur aînée.

Électromagnétisme et électrostatique sont en effet deux voies parallèles de conversion d'énergies. Un conducteur traversé par un courant et placé dans un champ magnétique se trouve sollicité par une force qui est à la base de tous les appareils électromagnétiques permettant de convertir, dans un sens ou dans l'autre, les énergies mécanique et électrique. De la même façon, un corps recouvert de charges, placé dans un champ électrique, est soumis à une force d'origine électrostatique qui présente d'intéressantes analogies avec la précédente et qui permet en particulier de réaliser des conversions similaires. Une meilleure compréhension des phénomènes électromagnétiques, une technologie bénéficiant de circonstances favorables (2), des ordres de grandeur tension/courant correspondant à des besoins plus immédiats, ont conduit à un développement spectaculaire de cette voie au détriment de l'autre. Alors que l'une convient parfaitement à la production de courants importants sous des tensions modérées, une remarquable symétrie réserve à l'autre un champ d'application bien déterminé : celui des hautes tensions (plus particulièrement des hautes tensions continues) et des courants limités, que la science et l'industrie demandent de plus en plus. Un heureux concours de circonstances se manifeste actuellement : le générateur électrostatique fait son apparition à l'échelle industrielle à un moment où l'on a précisément besoin de lui et l'on ne sait pas, entre l'organe et la fonction, quel est celui qui précipitera le développement de l'autre.

Jusqu'à présent, le seul moyen *conventionnel* utilisé pour produire les hautes tensions continues faisait appel au montage transformateur haute tension, redresseurs, condensateurs de filtrage. Ce procédé, excellent pour des tensions modérées, conduit très rapidement à des difficultés, à des encombrements et à des prix élevés lorsque les besoins en tension s'accroissent. On peut dire qu'avec lui le « kilovolt » continu se paie très cher et le danger qui accompagne ce genre de montage, en raison des courants instantanés trop importants qu'il peut fournir (3) devait parfois freiner son utilisation dans le monde industriel.

Le générateur électrostatique est, au contraire, un générateur naturel de courants limités — on pourrait dire dosés — sous de hautes tensions continues et c'est dans la gamme des tensions élevées, au-delà par exemple de 50 kV, qu'il trouve son véritable champ d'application.

(2) Par exemple l'existence de matériaux ferromagnétiques permettant de travailler avec des inductions, donc des puissances spécifiques, particulièrement élevées.

(3) Rappelons que ce ne sont pas les kilovolts qui sont dangereux mais le courant qu'ils peuvent faire passer, si celui-ci n'est pas systématiquement limité par le générateur.

Principe :

Dans tout générateur électrostatique, l'énergie est obtenue sous forme de haute tension par le déplacement mécanique de charges, fixées sur un organe mobile appelé transporteur. Ce transporteur peut être un corps conducteur, chargé puis déchargé au moyen d'un collecteur assurant la commutation de la machine; il peut être aussi un corps isolant, chargé en surface au moyen de charges (ions) empruntées au milieu gazeux ambiant. Dans le premier cas, la machine est dite à *transporteurs conducteurs* mais, sauf cas particuliers (4), on lui préfère actuellement la machine à *transporteur isolant* dont nous décrirons plus en détail une forme moderne de réalisation (5).

L'élément générateur proprement dit se compose de trois organes essentiels (fig. 2).

— **Le rotor**, cylindre creux en matériau isolant, à la surface duquel les charges électriques sont déposées et où elles se fixent. Ce rotor, entraîné par un moteur asynchrone de type courant, assure le transfert des charges dans le champ; c'est la seule pièce en mouvement du générateur (fig. 3).

— **Les ioniseurs**, lames métalliques minces dont la tranche extrêmement fine vient se placer suivant une génératrice du rotor et à une distance très faible de celui-ci. Ce sont les ioniseurs qui créent et déposent (ioniseurs de charge), puis captent (ioniseurs de débit) les charges électriques transportées à la surface du rotor.

(4) Machines fonctionnant sous vide, pour la propulsion spatiale, par exemple.

(5) Générateurs de la Société Anonyme de Machines Électrostatiques (S.A.M.E.S., Grenoble).

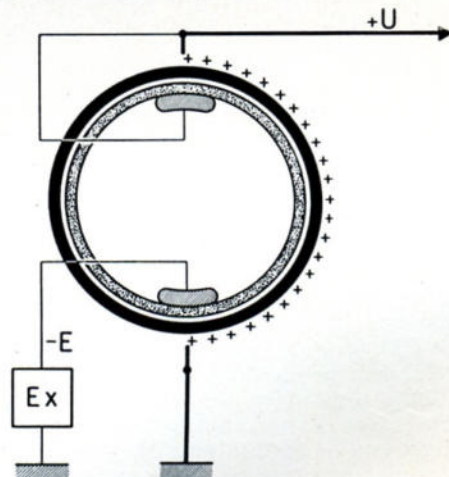


FIG. 2. — Sous l'influence de l'inducteur d'excitation, des charges électriques (ions) sont déposées par l'ioniseur de charge sur le rotor, puis entraînées par celui-ci dans un champ tangentiel.

Au cours du transfert, le potentiel des charges s'accroît en même temps qu'un travail mécanique emprunté au moteur d'entraînement est converti en énergie électrique.

Après un parcours correspondant au demi-pas polaire de la machine (ici un demi-tour), les charges sont enlevées du rotor par les ioniseurs de débit et vont alimenter le circuit récepteur.

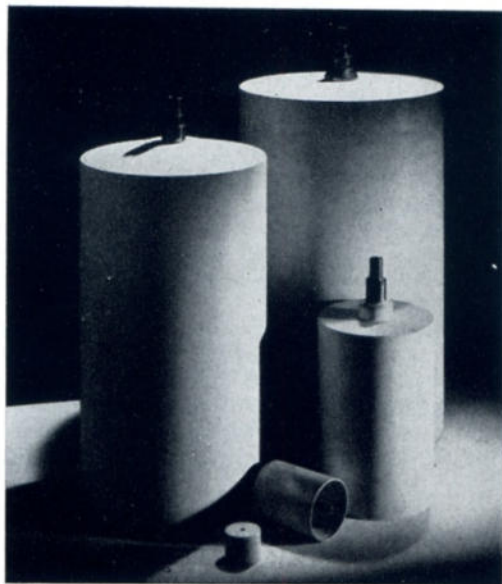


FIG. 3.

— **Les inducteurs** faisant apparaître sur l'arête vive des ioniseurs (6) le champ électrique intense nécessaire à leur fonctionnement : sous l'effet de ce champ intense, le gaz ambiant est fortement ionisé et ce sont les ions ainsi libérés qui constituent les charges mises en œuvre dans la machine.

Le rotor passe alternativement en face d'ioniseurs de charge et de débit, où il se trouve respectivement chargé, puis déchargé.

Ces opérations peuvent avoir lieu une ou plusieurs fois par tour, suivant le nombre de pôles du générateur. Le rotor d'un générateur à 2 pôles est chargé, puis déchargé une seule fois; celui d'un générateur à $2n$ pôles, n fois.

Un cylindre répartiteur de potentiel, interposé entre les organes métalliques inducteurs et la face du rotor, joue dans ce type de machine un rôle important. Le matériau de très légère conductivité qui le constitue (7) assure une répartition homogène des potentiels au sein de la machine et la présence de ce répartiteur cylindrique au milieu d'un rotor de même forme donne à l'ensemble une géométrie fonctionnelle : l'interstice entre les cylindres, homologue de l'entrefer d'une machine électromagnétique, présente l'épaisseur constante et réduite (8) qu'une bonne exploitation énergétique du milieu gazeux rend nécessaire.

(6) Rappelons, d'une façon générale, que le champ électrique à la surface d'un conducteur est inversement proportionnel à son rayon de courbure. C'est la raison pour laquelle on emploie des pièces volumineuses et arrondies (sphères, tores) lorsqu'on veut éviter l'ionisation du gaz et des effluves qui se traduiraient par une fuite d'électricité; on utilise au contraire des lames, des fils fins, des pointes... pour ioniser et assurer volontairement le passage d'un courant d'ions à travers un gaz.

(7) Généralement un verre, dont la résistivité est de l'ordre de $10^{13} \Omega \times \text{cm}$.

(8) La réduction de l'interstice (en général quelques dixièmes de mm) permet d'y localiser un champ électrique plus important et de tolérer sur l'autre face du rotor une densité d'électricité transportée supérieure.

Un générateur auxiliaire dit d'*excitation* (9), auquel on demande de fournir une tension de 20. ou 30 kV (pratiquement sans puissance) est chargé d'appliquer une différence de potentiel suffisante entre inducteurs et ioniseurs de charge, pour faire apparaître sur l'arête de ceux-ci le champ intense créant l'ionisation locale et pour assurer le dépôt des ions (de signe opposé à celui de l'inducteur) à la surface du rotor. Cette méthode de production des charges n'a plus rien à voir avec le frottement, que la tradition associe encore trop souvent aux générateurs électrostatiques...

Transportées des pôles de charge aux pôles de débit, dans un champ à composante tangentielle, les charges prélevées à la masse voient leur potentiel s'accroître progressivement; une énergie mécanique empruntée au moteur d'entraînement est simultanément convertie en énergie électrique, qui se retrouve sous forme potentielle dans les charges recueillies sous les pôles de débit, véritables portes de sortie de cet ascenseur un peu particulier pour charges électriques.

Il est intéressant de remarquer le mécanisme de l'apport et du retrait des charges ioniques, assurant la commutation sans aucun contact matériel, source de frottement et d'usure. Le circuit électrique se ferme à l'intérieur du générateur à travers les coupures gazeuses séparant l'arête des ioniseurs de la surface du rotor. Ces coupures sont franchies au prix d'une chute de potentiel relativement faible (10), préférable à un quelconque frottement.

Le point de vue énergétique :

Les performances d'une machine électromagnétique sont essentiellement conditionnées par la valeur de ses « ampères-conducteurs » — ou pour un enroulement déterminé par la densité de courant que l'on peut y admettre — et par l'induction magnétique dans son entrefer. L'utilisation du cuivre fixe le premier facteur et l'emploi du fer, métal remarquable de l'électromagnétisme, permet d'accroître le second.

De même, l'intérêt d'un générateur électrostatique est conditionné par la densité d'électricité transportée sur son rotor (11) et par le champ électrique tangentiel admissible à la surface de celui-ci, dans l'interstice ou *entrede* séparant rotor et stator inducteur. Pour accroître ces deux facteurs *simultanément*, il est nécessaire que le générateur travaille dans un milieu de forte rigidité diélectrique, tolérant la présence de champs électriques importants et maintenant en place les charges transportées sous une forte densité à la surface du rotor. Les gaz comprimés, dont la rigidité croît avec la pression, peuvent constituer ce milieu et apporter dans une certaine mesure aux générateurs électrostatiques bien conçus (12) ce que le fer et le cuivre apportent aux machines électromagnétiques.

(9) Dans certains cas, ce générateur peut être une petite machine, également du type électrostatique.

(10) L'énergie qui se dissipe dans ces zones constitue la seule perte appréciable du générateur.

(11) Limitée par la composante radiale du champ $E_r = 4\pi\sigma$, que cette densité d'électricité σ fait apparaître dans l'interstice rotor-stator.

(12) Une conception et une géométrie rationnelles sont indispensables pour tirer parti du milieu gazeux de forte rigidité.

C'est pourquoi les générateurs électrostatiques modernes fonctionnent dans une enceinte pressurisée (13). Pour des raisons qu'il serait trop long d'expliquer en détail, c'est l'hydrogène, sous des pressions de 15 à 20 atm, qui a été choisi pour « vitaliser » le générateur décrit précédemment et lui donner ses performances énergétiques. C'est pourquoi également ce type de générateur se présente toujours sous la forme d'un cylindre parfaitement étanche, avec des entrées basse tension d'un côté et une sortie haute tension de l'autre (unité hermétique).

Pour expliquer sommairement le choix de l'hydrogène, disons simplement que ce gaz réalise un excellent compromis entre la nécessité d'une bonne rigidité diélectrique et celle d'une mobilité d'ions suffisante, assurant sans chute de tension exagérée le passage des charges entre ioniseurs et rotor. Mais indépendamment de ce point de vue électrique, l'hydrogène présente aussi des qualités annexes remarquables : faible densité conduisant à des pertes mécaniques négligeables, bonne conduction thermique, non-agressivité chimique et possibilité d'une excellente conservation des organes qui lui sont confiés.

Quelques précisions et quelques chiffres.

- Le courant débité par le générateur décrit est proportionnel à la surface active de son rotor, à sa vitesse de rotation, au nombre de pôles et à la « densité » des charges électriques déposées à sa surface. Cette densité — limitée par la rigidité du gaz dans l'interstice — est elle-même une fonction rapidement variable de la tension d'excitation appliquée entre inducteurs et ioniseurs de charge. C'est en jouant sur cette tension qu'il est facile d'assurer la régulation automatique du générateur (fig. 4).
- La tension maximum que l'on peut obtenir est à peu près proportionnelle à la distance entre pôles (donc, pour un rotor de diamètre donné, inversement proportionnelle au nombre de pôles) et au champ électrique tangentiel admissible sur le rotor, tout au long de la trajectoire des charges. L'ordre de grandeur du champ tangentiel indiqué sur le tableau I (15 à 20 kV/cm) permet de se rendre compte de la facilité avec laquelle on peut obtenir des tensions élevées. Chaque centimètre parcouru permet d'accroître le potentiel des charges d'au moins 15 kV : 20 ou 25 cm de parcours, correspondant à un rotor de 14 cm de diamètre, suffiront pour obtenir avec toute la sécurité voulue une tension dépassant 300 kV... Bien entendu, ce simple calcul ne doit pas être extrapolé au-delà de certaines limites fixées par des conditions de répartition du champ et d'isollements annexes. Il demeure valable pour des tensions atteignant 600 kV et peut-être bientôt 1 MV (14).

(13) Le vide poussé peut également, dans certains cas, constituer un milieu énergétique favorable; on songe à l'utiliser pour la propulsion spatiale, dans des fusées ioniques dont le générateur HT trouverait ainsi sur place le milieu nécessaire.

(14) Les machines à courroie (Van de GRAAFF), utilisées parfois pour l'alimentation d'accélérateurs de particules, permettent de dépasser ces chiffres : les ions déposés sur une courroie isolante sont transportés suivant une trajectoire rectiligne qu'il est facile d'allonger et des tensions de 6 MV ont été obtenues. Mais la conception cylindrique, qui conduit à un ensemble bien défini géométriquement et mécaniquement, est favorable au courant, à la puissance et à l'endurance.

— Le rendement est exceptionnellement élevé : les pertes mécaniques sont pratiquement inexistantes (moins de 1 %) et les pertes électriques se réduisent à la puissance dissipée autour des ioniseurs, lors du franchissement par les charges de la coupure gazeuse.

Bien entendu, cette position privilégiée est valable pour le générateur électrostatique proprement dit et non pas pour le moteur (généralement un moteur asynchrone classique) qui l'entraîne. Dans un groupe convertisseur moteur électromagnétique-générateur électrostatique, c'est toujours le premier qui présente les plus fortes pertes.

Le tableau I indique l'ordre de grandeur des différents paramètres caractérisant les générateurs électrostatiques modernes à rotor cylindrique. Il donne également les performances énergétiques de quelques machines typiques, en fonction de la taille de leur rotor définie par leur diamètre ou « calibre » (15).

La régulation des générateurs électrostatiques :

La symétrie des phénomènes électromagnétiques et électrostatiques se traduit, en matière de génération de

(15) Suivant les modèles, les rotors ont une longueur comprise entre une fois et une fois et demi leur diamètre.

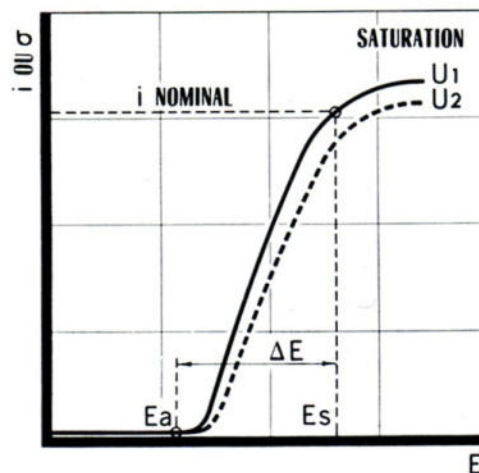


FIG. 4. — Caractéristique d'excitation d'un générateur.

Le courant dans le circuit extérieur apparaît pour une certaine valeur de la tension d'excitation E_a (seuil d'amorçage), permettant aux ioniseurs d'entrer en fonction. Selon la taille des machines, E_a est compris entre 12 et 18 kV.

Après le seuil d'amorçage, le courant croît rapidement (la machine se comporte comme un amplificateur), puis atteint une valeur de saturation correspondant à la densité maximum d'électricité qu'il est possible de déposer sur le rotor sans dépasser dans l'interstice la rigidité du gaz comprimé. La tension d'excitation E_s est alors, selon la taille des machines, de 18 à 35 kV.

Le dispositif de régulation d'un générateur a pour but de piloter la tension d'excitation à l'intérieur de la zone $\Delta E = E_s - E_a$, de manière à engendrer à tout moment les charges réclamées sous tension constante par le circuit de débit.

Pour une tension d'excitation déterminée, le courant débité décroît légèrement, sous l'effet de flux parasites, lorsque la tension aux bornes de la machine augmente (effet de « recul » du courant).

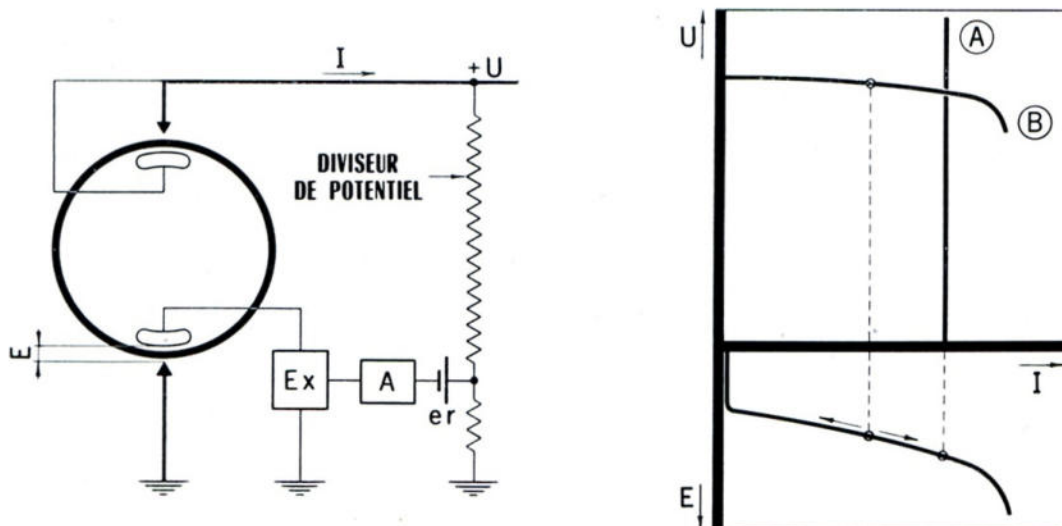


FIG. 5. — Régulation de tension (principe) : A) Caractéristique en charge naturelle, à courant constant. B) Caractéristique en charge modifiée, à tension constante.

Une fraction déterminée de la tension aux bornes U , prélevée sur le diviseur de potentiel, est comparée à une tension de référence er . La différence, plus ou moins amplifiée par l'amplificateur A , commande la tension d'excitation E . L'asservissement de E à U permet de convertir la caractéristique en charge « à courant constant » en caractéristique « à tension constante ».

courant, par une différence fondamentale dont les conséquences matérielles sont importantes. Alors qu'une tension déterminée est induite dans un cas par le mouvement (le courant débité étant celui demandé par le récepteur), c'est une quantité d'électricité donnée qui est transportée dans l'autre. A excitation constante, un générateur électromagnétique présente donc une caractéristique en charge $U(I)$ à « tension constante » (aux chutes près), bien adaptée aux besoins des récepteurs habituels; un générateur électrostatique possède au contraire une caractéristique naturelle à « courant constant », ce qui veut dire qu'à excitation fixe il lui faut débiter un courant déterminé, indépendant du récepteur. C'est donc la tension aux bornes qui s'adapte aux besoins de celui-ci et il est bien évident qu'une telle caractéristique est rarement acceptable dans la pratique.

C'est pourquoi tout générateur électrostatique doit être pourvu d'un dispositif annexe de régulation, permettant de donner artificiellement à sa caractéristique $U(I)$ une forme identique à celle que le générateur électromagnétique possède naturellement. C'est là une différence essentielle.

Le dispositif de régulation se ramène toujours à une boucle de contre-réaction, qui asservit en permanence la tension d'excitation du générateur à sa tension de sortie : la densité d'ions déposée sur le rotor et par conséquent le courant débité sont dosés en fonction des besoins du récepteur, de telle sorte que la tension aux bornes se maintient constante (fig. 5).

Il est généralement souhaitable de faire appel, pour assurer cette fonction de régulation, aux possibilités illimitées de l'électronique industrielle et la figure 6 montre un exemple typique de circuit, couramment utilisé avec les générateurs décrits précédemment (16).

Vers la haute stabilité :

Le générateur électrostatique auquel on ne demande aucune performance particulière de stabilité doit malgré tout posséder un régulateur annexe : le besoin de déplacer sa caractéristique $U(I)$ ne doit pas être confondu, malgré l'identité des moyens mis en œuvre, avec la nécessité éventuelle de stabiliser la tension à ses bornes.

Cependant, l'adjonction inévitable du régulateur — que l'on serait parfois tenté de regretter — est un premier pas vers la stabilisation et il est relativement facile d'aller plus loin dans cette voie. Le générateur électrostatique se prête bien à la stabilisation en raison du dosage permanent, facile et précis, des charges déposées sur son rotor. Aucune énergie accumulée dans un circuit magnétique ou dans un condensateur ne vient entraver l'action de la chaîne stabilisatrice et la commande d'une machine de n'importe quelle taille se fait à partir de son circuit d'excitation, qui ne consomme pratiquement pas de puissance et présente une impédance élevée (17).

Il suffit, en principe, de placer dans la boucle de contre-réaction du dispositif précédent un amplificateur de gain élevé, pour accomplir le pas supplémentaire vers la haute stabilité et atteindre dans ce domaine des performances exceptionnelles. Bien entendu, des précautions sévères doivent être prises : d'une part, la qualité et la stabilité propre des organes utilisés doivent être homogènes avec les performances que l'on prétend

(16) Certaines machines simplifiées peuvent se contenter d'une contre-réaction par tube stabilisateur à gaz ou même par éclateur.

(17) Les techniques électroniques sont dans ces conditions d'une utilisation commode et efficace.

TABLEAU I

	Diamètre du rotor	Diamètre (mm)	70	140	240	300
Champ tangentiel le long du rotor...	15 à 20 kV/cm	U_{max} kV (1)	90	100 à 300	75 à 400	75 à 600
Champ radial dans l'interstice rotor-stator.....	20 à 30 kV/mm					
Densité d'électricité transportée sur le rotor.....	2 $\mu\text{Cb}/\text{dm}^2$	I_{max} mA (1) et (2)	0,25	4 à 1	25 à 4	50 à 4
Courant débité par paire de pôles...	1 à 2 mA/dm d'ioniseurs (3)					
Puissance utile.....	200 W/dm ² de rotor (3)	P_{max} W (2)	20	400	2 000	4 000
Rendement.....			80 à 95 %			

(1) Fonction du nombre de pôles équipant le générateur.
 (2) A la vitesse de 2 800 tr/mn (entraînement par moteur asynchrone deux pôles 50 Hz).
 (3) A la vitesse tangentielle maximum admissible pour le rotor.

imposer au générateur; d'autre part, l'accroissement de gain d'une boucle fermée se traduit par des risques d'instabilité dynamique et le système ne manquerait pas d'osciller en l'absence du condensateur auxiliaire C_1 (fig. 6) shuntant l'espace de transfert des charges électriques.

Il est à noter que les capacités annexes ajoutées dans le circuit haute tension demeurent faibles (500 à 2 500 μF au total, suivant les cas) et qu'elles n'altèrent pas sensiblement les mérites du générateur électrostatique dont la capacité interne extrêmement réduite n'accumule pas d'énergie dangereuse.

Avec les générateurs équipés de circuits de régulation simplifiés, à gain suffisamment réduit pour rendre inutile tout condensateur annexe, les fluctuations de tension sont de l'ordre de 1 % de la tension nominale (18). Elles sont à peu près indépendantes du courant demandé et se maintiennent en valeur absolue quelle que soit la valeur réglée de la tension. Avec des circuits de régulation à gain élevé et capacités annexes, la stabilité n'est plus limitée que par la qualité des organes utilisés.

(18) Générateurs SAMES, série moyenne stabilité.

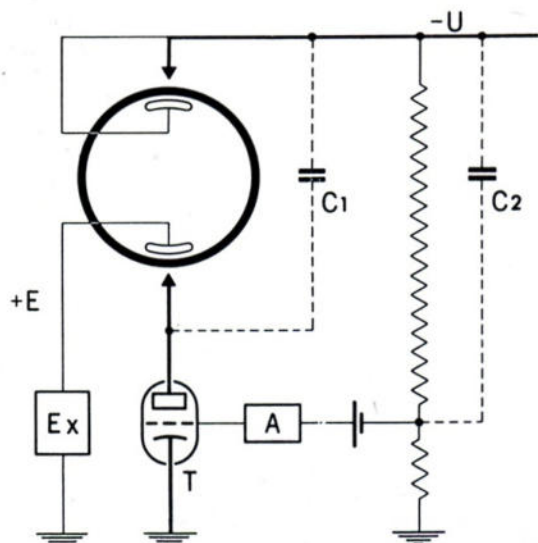


FIG. 6. — Régulation d'un générateur de polarité négative.

La source d'excitation E_x fournit une tension fixe $+E$ appliquée à l'inducteur; une triode haute tension T , insérée dans le circuit de l'ioniseur de charge, porte celui-ci à un potentiel variable et commande la différence du potentiel inducteur-ioniseur en fonction de sa polarisation grille. Si U varie de ΔU , le circuit de régulation provoque une variation d'excitation $\Delta E = -k_e \Delta U$ (k_e = gain « extérieur » de la boucle).

On peut accroître la stabilité de tension en augmentant l'amplification, mais le condensateur C_1 devient alors nécessaire pour assurer la stabilité dynamique du système, compromise par le temps de transfert des charges sur le rotor. A l'emplacement figuré ci-dessus, C_1 est particulièrement efficace; placé entre sortie HT et masse, une valeur $(k_e + 1)$ fois plus grande serait nécessaire pour s'opposer aux « accrochages ». (Dans les générateurs à haute stabilité, k_e est de l'ordre de 10.)

Le condensateur C_2 corrige la courbe de réponse du diviseur en fonction de la fréquence et contribue à réduire certaines fluctuations.

A court terme (quelques secondes au maximum), les fluctuations de tous ordres, périodiques ou non, ne dépassent pas 10^{-5} de la tension nominale; une variation de la tension d'alimentation de 10 %, ou bien le passage de la marche à vide à la marche à pleine charge, se traduisent par des fluctuations du même ordre (19). A long terme, la stabilité de la haute tension est celle des éléments de référence qui la définissent à l'intérieur du système bouclé : diviseur de potentiel et tension de comparaison. En dehors de la période initiale d'échauffement, l'emploi d'un diviseur équipé de résistances à couche de carbone et d'une référence de tension par piles ou tubes à gaz conduit à des dérives de l'ordre de 10^{-4} par heure. L'utilisation de diviseurs à résistances métalliques permet de réduire ce chiffre et avec des précautions particulières (contrôle thermostatique des éléments de référence), la dérive lente n'excéderait pas les fluctuations à court terme.

L'association des notions de haute stabilité et de haute tension continue est maintenant courante et les générateurs électrostatiques trouvent là un terrain favorable à leur emploi. Que ce soit pour accélérer des particules de manière homocinétique et leur donner une énergie parfaitement définie, pour les dévier d'un angle bien déterminé ou les focaliser avec précision, pour améliorer le pouvoir séparateur d'un microscope électronique et assurer la netteté de son image pendant toute la durée d'une prise de vue, pour effectuer certains essais diélectriques, etc., les techniques modernes ont besoin de stabilités toujours plus grandes. La seule limite, dans ce domaine, sera celle imposée par la stabilité propre des éléments de référence.

A titre d'exemple, la figure 8 montre un petit générateur pour optique électronique et essais diélectriques, susceptible de fournir une tension maximum de 80 kV avec des fluctuations inférieures au volt.

(19) Générateurs SAMES, série haute stabilité.

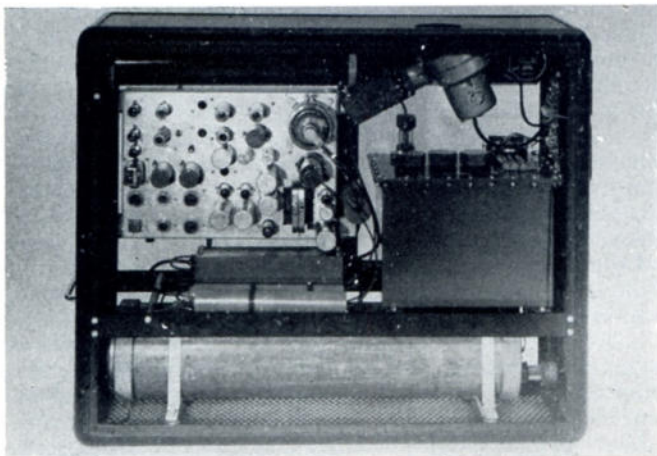


FIG. 7.

L'association de l'électronique et de l'électrostatique. Dans ce générateur (125 000 V), l'unité hermétique visible à la partie inférieure est associée à des circuits électroniques relativement complexes, destinés à résoudre des problèmes de régulation et de stabilisation particuliers.

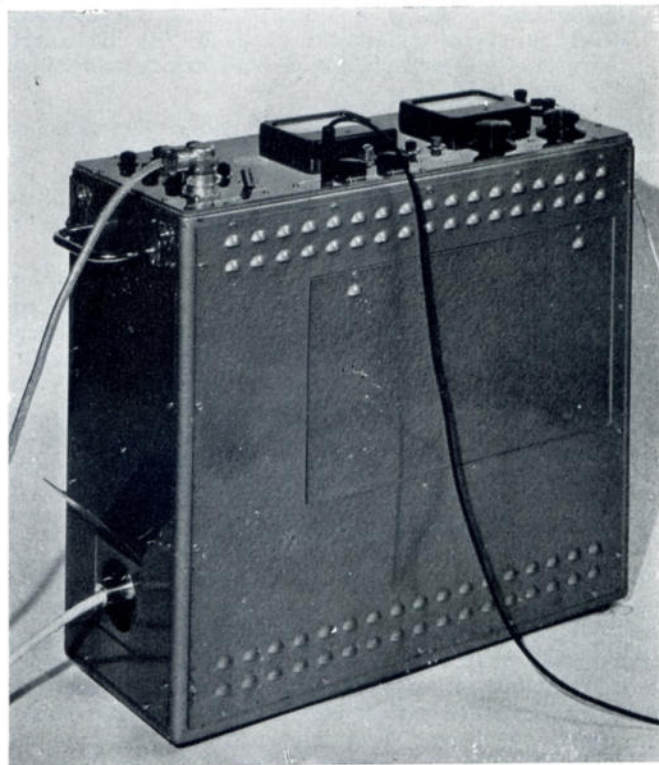
Un peu de technologie :

Une séparation fonctionnelle des organes conduit à diviser les générateurs décrits en deux parties bien distinctes :

- l'unité hermétique, renfermant dans l'enceinte pressurisée tous les organes spécifiquement électrostatiques et haute tension;
- les auxiliaires, comprenant tous les organes et circuits d'excitation, de régulation, de contrôle, de protection.

Le générateur électrostatique lui-même, renfermé avec son moteur d'entraînement dans l'unité hermétique, fait largement appel aux résines synthétiques modernes et particulièrement aux résines époxy, dont les qualités mécaniques et électriques sont remarquables. La présence de champs considérables, le besoin d'une excellente définition géométrique et la nécessité de « faire de la mécanique » avec des matériaux isolants (20) devaient naturellement conduire à une sélection sévère de ceux-ci.

(20) L'interstice rotor-stator n'excède pas quelques dixièmes de millimètre.



(Doc. S.A.M.E.S.)

FIG. 8.

Générateur électrostatique portable à très haute stabilité de tension : le « Samtron 80 » (80 000 V, 0,8 mA, stabilité 10^{-8}). Les organes de commande sont ici groupés avec le générateur lui-même. En bas, à gauche, la sortie haute tension par câble amovible.

Le rotor, en plus des contraintes mécaniques et électriques qu'il supporte, se trouve soumis à l'action destructive des effluves assurant la charge et la décharge de sa surface. Seules des résines présentant de bonnes qualités thermiques, convenablement modifiées au moyen de charges minérales, résistent à l'agressivité de ce phénomène.

Le cylindre répartiteur de potentiel qui joue un rôle fondamental pose aussi un problème très particulier, car la résistivité du matériau qui doit le constituer (10^{12} à $10^{13} \Omega \times \text{cm}$) tombe dans une gamme inhabituelle. Ce matériau « semi-conducteur » est difficile à obtenir. Seuls certains verres ou certains composés à base de verres présentent actuellement la légère conductibilité recherchée, de manière systématique, stable et reproductible.

Les avantages des générateurs électrostatiques :

Par rapport aux générateurs traditionnels à redresseurs et condensateurs de filtrage, les générateurs électrostatiques présentent un certain nombre d'avantages systématiques :

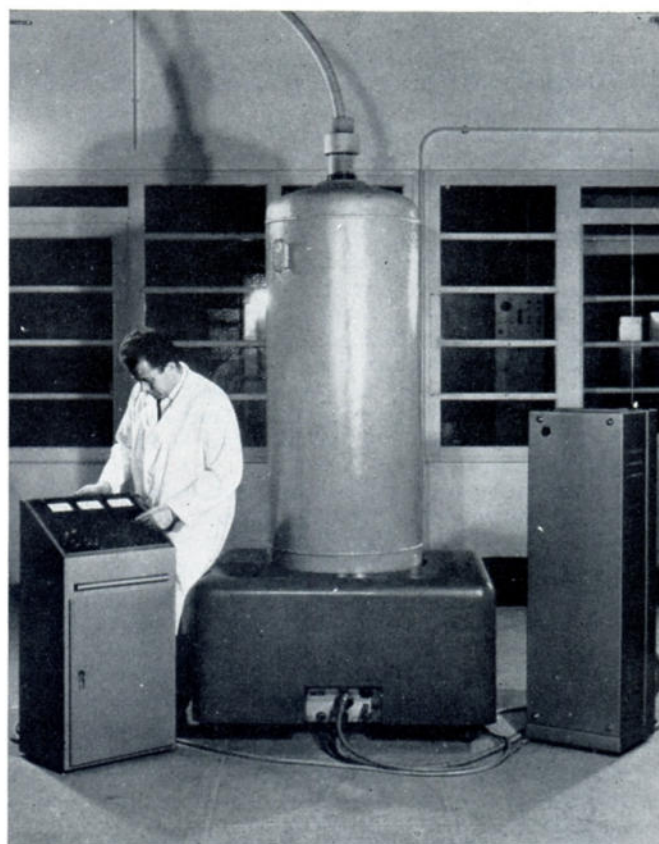
- Absence de condensateurs de filtrage et apport continu des charges électriques, engendrées au fur et à mesure des besoins. Toute accumulation d'énergie, dangereuse ou gênante est évitée.
- Impossibilité de toute surintensité, permanente ou momentanée, même en court-circuit. Le courant débité ne peut dépasser la capacité de transport du rotor et aucune défaillance d'organes de protection n'est à craindre.
- Innocuité pour le personnel et pour les organes récepteurs alimentés.
- Génération directe d'un courant continu, ne présentant pas les ondulations résiduelles des systèmes à redresseurs.
- Stabilisation facile de la tension et possibilité d'atteindre des performances remarquables dans ce domaine. La puissance utile du générateur n'a pas à « traverser » le circuit de stabilisation, qui n'agit que sur l'excitation de la machine.
- Valeur modérée des dimensions et du poids, compte tenu des tensions atteintes.

Le domaine du générateur électrostatique :

Dans la compétition qui l'oppose parfois au générateur conventionnel à redresseurs, le générateur électrostatique possède un domaine qui lui est propre : celui des tensions élevées et des courants modérés. Alors que les difficultés de construction des systèmes à redresseurs croissent rapidement en fonction de la tension, ce facteur intervient peu sur le générateur électrostatique.

Une frontière reste pourtant difficile à tracer. Elle se déplace peu à peu en raison des progrès de la technique électrostatique et elle varie surtout en fonction de conditions annexes, sans rapport avec les notions de tension et de courant.

Dans la mesure où il est possible de citer des chiffres, on peut dire que l'intérêt du générateur électrostatique à rotor cylindrique apparaît vers une cinquantaine de



(Doc. S.A.M.E.S.)

Générateur 600 000 V, 4 mA. Stabilité 1 %. Au centre, l'unité hermétique avec, à la partie supérieure, la sortie haute tension par câble; à gauche, le pupitre de commande; à droite, l'armoire des circuits auxiliaires.

kilovolts; cet intérêt s'accroît progressivement, jusqu'à la tension maximum permise par l'élément unitaire (21) (de l'ordre actuellement de 600 kV pour un rotor de 300 mm de diamètre, peut-être de 800 à 1 000 kV dans l'avenir avec des rotors de 500 mm). Convenant parfaitement à la production de courants de quelques milliampères, le générateur cylindrique permet encore d'atteindre, lorsqu'il est équipé d'un grand nombre de pôles, une cinquantaine de milliampères (22).

La nécessité d'une haute stabilité de tension, le besoin d'un encombrement modéré, d'une innocuité certaine, élargissent sensiblement ces limites.

Ajoutons pour mémoire que le générateur électrostatique fonctionne suivant un cycle réversible et son emploi en moteur, directement alimenté en haute tension continue, est possible. Des puissances encore insuffisantes et des besoins limités n'ont pas conduit, dans ce domaine, à des réalisations industrielles.

(21) Au-delà, il demeure possible de coupler en série plusieurs éléments.

(22) Sous la forme du générateur à courroie, les tensions peuvent atteindre plusieurs mégavolts, mais les courants sont généralement inférieurs au milliampère.

LES PRÉCIPITATIONS ÉLECTROSTATIQUES



L'HABITUDE conduit désormais à ranger dans cette catégorie les techniques qui font appel aux forces d'origine électrostatique, s'exerçant sur des particules de matières chargées et placées dans un champ.

Ces forces, dont nous allons passer en revue les applications possibles, supposent l'existence de deux paramètres qu'il est essentiel de bien noter : une charge et un champ. Tous les appareils, toutes les installations tirant parti des forces électrostatiques doivent donc réaliser deux opérations qui se confondent d'ailleurs bien souvent, soit que les organes de charge aient aussi pour mission de créer le champ, soit que les particules chargées interviennent ensuite elles-mêmes pour le faire apparaître ou tout au moins pour le modifier.

Les particules peuvent être chargées par influence, ce qui suppose qu'elles sont relativement conductrices et qu'un contact électrique (23) peut être établi avec elles. Elles peuvent être également chargées, si elles sont isolantes, par un dépôt superficiel d'ions qui ne manque pas de se produire lorsque les particules traversent une zone gazeuse fortement ionisée. Des ions se déposent en surface, comme sur le rotor transporteur des générateurs décrits précédemment, et ils s'y trouvent retenus par leur propre *image électrique*.

Le champ peut être créé, de son côté, par une différence de potentiel suffisante appliquée entre des électrodes convenablement situées. Ces électrodes peuvent être séparées du dispositif de charge précédent mais, dans bien des cas, elles sont au moins partiellement communes. Souvent, aussi, les particules chargées agissent elles-mêmes comme une infinité de petites électrodes (charge d'espace) qui créent ou modifient le champ en *lançant* leurs propres lignes de force.

La plupart des techniques de précipitation sont appliquées à des particules de matière, solide ou liquide, trop petites pour être manipulées par d'autres procédés; on fait plus rarement appel aux forces électrostatiques pour agir sur des objets de dimensions appréciables, bien qu'une exception spectaculaire soit citée plus loin. Dans le cas des fines particules, en effet, les forces électrostatiques sont difficilement remplaçables : elles

deviennent prépondérantes par rapport à d'autres forces (comme la pesanteur) lorsque les dimensions diminuent et elles peuvent être dirigées infailliblement vers des points précis.

- Quantitativement, une particule de matière assimilée à une sphère de rayon a , possédant un pouvoir inducteur spécifique ε , peut prendre et conserver dans un champ E une quantité d'électricité maximum :

$$q = \frac{3 \varepsilon}{\varepsilon + 2} E a^2.$$

Elle est alors soumise à une force $f = q E$, dont la valeur diminue seulement avec le carré de son rayon alors que d'autres sollicitations d'ordre mécanique (pesanteur, force centrifuge...) diminuent comme son cube (24). Cette force la véhiculera suivant une trajectoire bien définie.

- En présence d'autres particules chargées de même signe, des forces de répulsion se manifestent en raison inverse du carré des distances (loi de Coulomb), donnant aux particules d'un nuage électrisé une répartition homogène dans l'espace et assurant, en cas d'impact sur une électrode à champ sensiblement constant, un dépôt uniforme.
- Sous l'effet du champ E à sa surface (25), chaque particule est soumise à une « pression électrostatique »

$$\frac{E^2}{8 \pi}$$

qui tend à la faire éclater et à la diviser davantage. Cette manifestation est parfois mise à profit pour créer, avec ou sans l'aide de forces mécaniques, des brouillards de particules liquides. Sous l'influence de la même pression, une couche liquide recouvrant

(24) Une particule de 10μ de rayon, densité 2,5, est soumise dans un champ de 3 000 V/cm à une force électrostatique égale à vingt fois son propre poids. Avec un rayon de 1μ , ce rapport atteindrait théoriquement 200.

(25) Le champ moyen dans l'air admissible entre les électrodes d'une installation industrielle est de l'ordre de 2 à 8 kV/cm, selon l'état d'ionisation du milieu ambiant, la nature et la quantité des particules présentes. Mais le champ peut atteindre localement des valeurs beaucoup plus élevées : 50 à 100 kV/cm sur une surface de faible rayon de courbure (fil ioniseur, particule de matière, etc.). Les actions locales peuvent de ce fait devenir relativement importantes.

(*) Voir *Ingénieurs et Techniciens*, n° 147, octobre 1961.

(23) Ce contact électrique n'a pas toujours besoin d'être matériel : une zone ionisée peut assurer là encore la liaison avec les particules.

TABLEAU II

Catégorie	Particules intéressées	Types d'opérations	Fonctions utilisées						Observations
			1	2	3	4	5	6	
Recouvrements, dépôts et dispersions électrostatiques	Liquides	● Peinture.	+	+	+	(a)			(a) En liaison éventuellement avec des forces d'origine mécanique.
		● Émaillage en phase liquide.	+	+					
		● Huilage.	+	+					
		● Aérosols.	+	+	+	(a)			
		● Traitement des végétaux.	+	+					
	Solides (poudres)	● Poudrage agricole des végétaux.	+	+			+	(b)	(b) Au moins à titre transitoire.
		● Traitement des céréales.	+	+			+		
		● Fumage de produits alimentaires.	+	+			+		
		● Poudrage de câbles, tôles, feuilles diverses (anti-adhésion).	+	+			+		
		● Émaillage à sec.	+	+			+		
		● Revêtements plastiques.	+	+			+		
		● Xérographie.	+	+			+		
	Solides (divers)	● Métallisation sous vide.	+						(c) Fonction principalement recherchée
		● Flochage des tissus, papiers, etc.	+	+				+	
		● Toiles et papiers abrasifs.	+	+				+	
Extraction et égouttage électrostatiques	Liquides	● Égouttage des films de peinture déposés par trempé.				+			
	Solides	● Dépoussiérage de surfaces.				+			
Captations électrostatiques	Liquides	● Captation et précipitation des brouillards.	+						
	Solides	● Traitement des fumées et des gaz industriels.	+				+		
		● Dépoussiérage de locaux.	+				+		
Séparation, triage et classification électrostatiques	Solides	● Récupération de produits.	+				+		
		● Triage des minerais.	+				+		
		● Triage des graines.	+						
		● Triage de produits alimentaires (farines, etc.).	+				+		
	Solides	● Classification de particules par taille.	+						

(1) Forces électrostatiques transportant les particules dans une direction déterminée.

(2) Forces de répulsion s'exerçant entre particules de même signe et assurant leur dispersion.

(3) Pression électrostatique s'exerçant à la surface d'un film liquide ou d'une gouttelette et contribuant à sa division.

(4) Répulsion entre une couche superficielle et l'électrode qu'elle recouvre (analogue à 3).

(5) Attraction s'exerçant entre des particules chargées et une surface servant d'électrode (signes opposés).

(6) Couple de redressement orientant les particules allongées.

une électrode aura tendance à être arrachée : tout se passera comme si l'électrode, chargée de même signe, la repoussait.

- En présence d'une surface chargée de signe opposé, des particules seront au contraire attirées et y adhéreront dans la mesure où les charges se maintiendront.
- Enfin, si une particule présente dans un certain sens une dimension prédominante, l'apparition d'un moment l'orientera dans le sens des lignes de force du champ et c'est dans une position perpendiculaire qu'elle se présentera à la surface d'une électrode.

Ainsi, les forces électrostatiques peuvent entraîner des particules, les conduire en des points définis, les répartir uniformément dans l'espace, participer à leur division, les arracher ou les précipiter sur une surface, les orienter suivant un sens déterminé. Selon le but final recherché, on fera appel à l'une ou à plusieurs de ces possibilités et la technique de précipitation se décomposera elle-même en plusieurs branches caractéristiques, résumées sur le tableau II. Voici quelques exemples concrets :

Peinture électrostatique (26). — C'est une des applications les plus spectaculaires, qui progresse actuellement de façon rapide. Le brouillard de peinture est généralement fourni par actions combinées de forces mécaniques et électrostatiques, certaines installations

(26) Pour plus de détails au sujet de cette technique, voir *Développements récents en peinture électrostatique*, par R. MOREL. *Revue Peintures, Pigments, Vernis*, vol. 36, n° 12, décembre 1960, p. 727 à 739.

FIG. 10.

Équipement portatif de peinture électrostatique (Statron SAMES). On remarquera à l'extrémité du pistolet la tête centrifuge de dispersion. Au sol, le générateur électrostatique 90 000 V 0,2 mA qui permet d'alimenter sans aucun danger le pistolet.

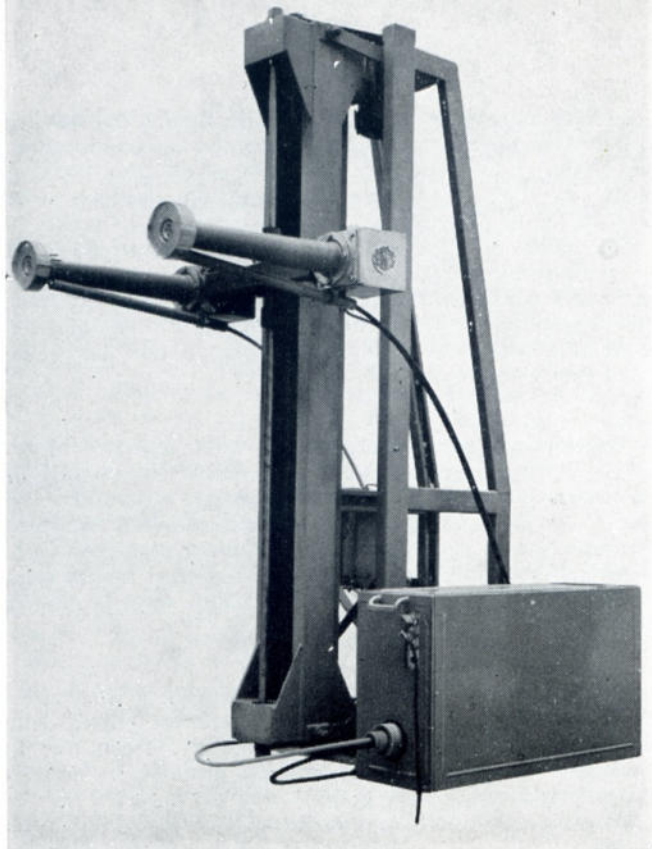


FIG. 11.

Équipement pour installation automatique de peinture électrostatique (Mégastatron SAMES). Les deux têtes peuvent être montées de différentes façons, selon le problème à traiter, et plusieurs postes identiques peuvent équiper les chaînes importantes. Ici, les têtes sont fixées sur un robot qui leur imprime un mouvement ascendant et descendant, permettant de couvrir une large surface. Les pièces à peindre sont suspendues à un monorail et l'opération de peinture est automatique. On remarquera, en bas, le générateur électrostatique d'alimentation, de dimensions particulièrement réduites ; il permet de fonctionner industriellement et en l'absence de tout danger sous une tension de 150 000 V. Une valeur aussi élevée est utile pour ce genre d'installation.

utilisant seulement ces dernières. Les fines particules chargées se précipitent infailliblement sur les objets à peindre qui se trouvent recouverts uniformément et presque automatiquement. Le contournement des objets par les particules revenant peindre leur face arrière est tout à fait remarquable ; les pertes de matière sont extrêmement réduites et les temps de travail sensiblement diminués.

Deux types d'installations existent actuellement : les équipements portatifs (voir fig. 10) qui ont permis à la technique électrostatique de se généraliser et de pénétrer profondément dans l'industrie ; les équipements fixes (voir fig. 11), avec lesquels il est possible de résoudre le problème de l'automatisation des chaînes de peinture : les objets, accrochés à un convoyeur, se peignent sans aucune intervention manuelle en attirant les particules du nuage électrisé.

Dans les appareils représentés, le nuage de peinture est formé au moyen d'une tête rotative portée sous tension (90 à 150 kV par rapport aux objets laissés au potentiel de la masse). Sous l'effet de la force centrifuge, la peinture s'étire sous forme d'un film qui se divise en filets puis en particules, fortement chargées lorsqu'elles s'échappent de la tête. Les forces électrostatiques améliorent leur division et contribuent à la formation d'un

brouillard homogène, qui se précipite finalement sur les objets à la masse. La *figure 12* montre le phénomène. On distingue la formation des filets et du brouillard, à partir de l'électrode rotative dont on aperçoit une fraction de la périphérie.

En raison de l'économie considérable de produits et de main-d'œuvre (30 à 80 %) et accessoirement de certains avantages annexes tels que salubrité et commodité d'emploi, cette technique se développe rapidement et tend à s'étendre à d'autres liquides que les peintures (27).

Traitement des végétaux. — Le brouillard insecticide formé par des particules liquides (pulvérisation) ou solides (poudrage), chargé par passage dans une zone ionisée, se précipite de manière efficace sur les végétaux au potentiel du sol. Rendement, meilleur recouvrement, adhérence marquée dans le cas des poudres, feront sans doute apparaître un jour l'électrostatique dans le monde agricole.

Poudrage industriel. — La déposition à la surface de pièces ou d'objets divers d'un matériau pulvérulent est rendue plus facile et surtout plus efficace par le champ électrique. Comme pour les liquides, le champ dirige infailliblement la poudre vers les objets à recouvrir; mais en plus, la poudre se dépose et adhère sous forme d'une couche uniforme, que les forces électrostatiques maintiennent en place aussi longtemps que les charges électriques demeurent.

La *figure 13* représente un appareil de poudrage électrostatique industriel, dans lequel le produit pulvérulent, véhiculé par une légère surpression d'air, se charge à la sortie du canon en passant près d'une électrode d'ionisation. Le nuage électrisé se précipite alors sur tout objet au potentiel de la masse, dont il recouvre régulièrement la surface.

Une application caractéristique du poudrage électrostatique est la « plastication » de supports ou d'objets divers. La plastication, formule d'avenir permettant d'assurer la protection et la décoration au moyen de films plastiques, doit être faite en principe sur des objets préalablement chauffés, de telle sorte que les poudres thermoplastiques (28) projetées fondent et se transforment en film au fur et à mesure de leur déposition. Avec le champ électrique, les poudres déposées à froid adhèrent parfaitement et leur fusion peut avoir lieu au cours d'une opération ultérieure. Toute perte sensible de produit est d'autre part évitée.

Citons encore parmi les applications industrielles, bénéficiant largement du processus électrostatique : le poudrage de feuilles, de tissus, de plaques, dont on veut éviter la tendance au collage; le talcage, dans un but similaire, de produits divers (tôles, câbles électriques); l'émaillage à sec, etc.

Flocage. — Les procédés mécaniques de flocage permettaient depuis longtemps de recouvrir des tissus, papiers ou objets préalablement encollés, au moyen de fibres textiles de longueur calibrée, voisine du millimètre

(27) Cette technique peut être également employée pour transformer par séchage accéléré un liquide en une poudre fine.

(28) Polyéthylène, polyamides, acétate de polyvinyle, etc.

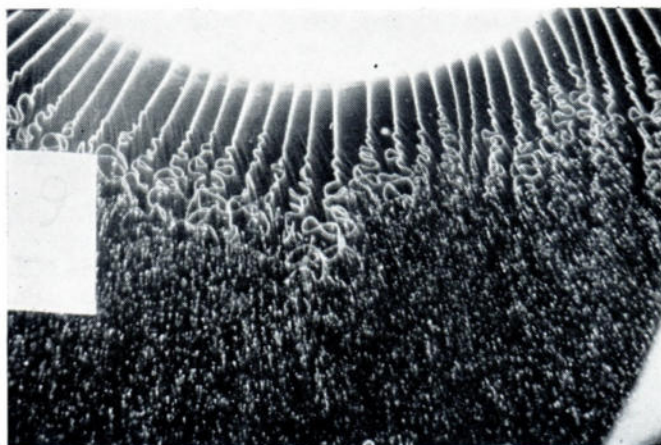


FIG. 12.

Pulvérisation d'un liquide sous l'effet des forces centrifuge et électrostatique combinées. L'électrode de dispersion, dont on aperçoit partiellement le bord, est un disque de 80 mm de diamètre, tournant à 2 900 tr/mn et porté sous tension (90 kV par rapport à la masse). Débit de liquide 4 l/h. Photographie ultra-rapide SAMES. Durée d'exposition 8 μ s.



FIG. 13.

Équipement portatif pour poudrage électrostatique industriel (STAJET SAMES). De haut en bas : le réservoir de poudre équipé d'un vibreur de décolmatage; le pistolet avec sa buse fixe portée sous tension; le générateur électrostatique d'alimentation (90 000 V, 0,2 mA).

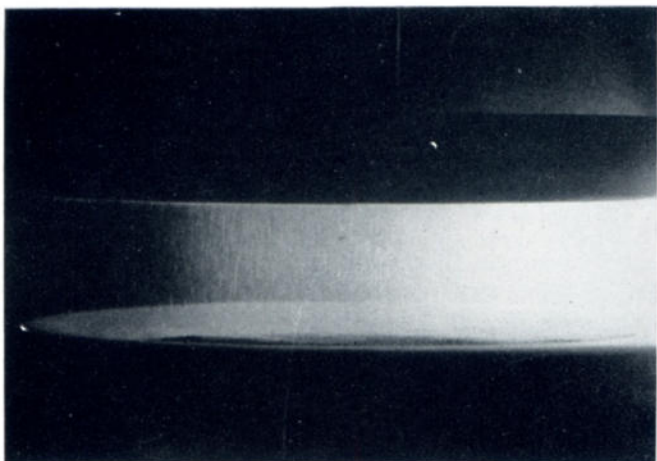


FIG. 14.

Le « flochage » électrostatique. Les fibres déposées sur le plateau inférieur se dressent et se précipitent sur la surface encochée située au-dessus. Elles s'y plantent dans une position rigoureusement perpendiculaire.

ou de quelques millimètres (flocs). Le champ électrique, très largement utilisé maintenant, assure leur déposition beaucoup plus facilement et surtout oriente les fibres qui viennent se « planter » perpendiculairement à la surface encochée, donnant un aspect velouté caractéristique (fig. 14).

Papiers abrasifs. — Là encore, l'effet directif du champ permet la précipitation et l'orientation des grains abrasifs qui viennent se coller à la surface des supports dans une position dressée. Les produits fabriqués maintenant par ce procédé présentent, en raison de l'orientation des grains, davantage de mordant et d'efficacité.

Égouttage. — Le procédé de peinture au trempé laisse subsister à la surface des pièces une couche d'épaisseur souvent trop importante, qui s'accompagne vers la base de gouttelettes ou de bourrelets séchant avant d'avoir pu se détacher. L'application en surface d'un champ électrique provoque l'arrachement immédiat de la peinture en excédent et régularise l'épaisseur de la couche.

Dépoussiérage et filtrage électrostatiques. — Cette technique devient d'une actualité brûlante, en raison de la masse inquiétante de poussières de toute sorte qui envahissent les régions fortement industrialisées. Lorsque l'on songe que les fumées d'une centrale à charbon pulvérisé de 125 000 kW entraîneraient chaque jour, en l'absence de précautions, 200 t de poussières diverses, on comprend mieux le besoin impératif d'une filtration efficace et aussi totale que possible : une diminution du rendement de l'appareil dépoussiéreur de 1 % se traduit au cours de la journée par deux tonnes supplémentaires de poussières déversées sur la région... L'exemple de la centrale thermique est spectaculaire et situe bien le problème; mais ce n'est pas le seul cas où le besoin d'arrêter des poussières se manifeste. De nombreuses industries en déversent quotidiennement des quantités insoupçonnées dans l'atmosphère et la législation a dû s'emparer de ce problème pour rendre obligatoire l'emploi de systèmes dépoussiéreurs.

Parfois, des poussières doivent être retenues pour d'autres raisons et les problèmes ne sont plus à la même échelle : ce sont par exemple de fines particules de matériaux précieux qu'il faudra récupérer, ou bien la poussière ambiante dont il faudra interdire l'entrée dans une salle où s'effectuent des traitements délicats.

Dans tous les cas, la filtration se heurte à une difficulté en raison des particules les plus fines qui échappent à l'action des procédés mécaniques; sous peine d'entraîner des pertes de charge considérables, le rendement de ceux-ci reste limité et les poussières les plus fines, qui sont souvent les plus gênantes, ne sont pas arrêtées. C'est ici que le filtrage électrostatique peut prendre le relai. Observé dès 1824, son principe fut étudié à partir de 1880 et des installations industrielles fonctionnent déjà depuis plusieurs dizaines d'années.

La plupart des dépoussiéreurs actuels sont dérivés du système Cottrell, dont le fil porté sous tension (50 à 70 kV) dans l'axe d'un tube ou entre des plaques au potentiel de la masse est désormais classique. Le gaz à traiter passe autour du fil et les poussières en suspension sont chargées dans la zone fortement ionisée qui l'entoure; elles se précipitent alors et se trouvent retenues sur les plaques d'où il convient de les détacher périodiquement. Dans ce dispositif, les fonctions charge et champ sont typiquement confondues mais dans certaines installations à « ionisation préalable », on cherche quelquefois à les séparer.

Réservés d'abord aux installations importantes dans lesquelles ils jouaient un rôle vital, les filtres électrostatiques, dont l'intérêt croît lorsque la taille des particules à retenir diminue, trouveront d'autres applications. A l'opposé de la centrale thermique, ces filtres commencent à équiper par exemple de petites installations domestiques de conditionnement d'air...

Triage électrostatique. — L'action électrostatique différente, qui s'exerce sur des particules ne possédant pas les mêmes propriétés physiques, peut permettre dans certains cas un triage efficace de produits difficilement séparables par d'autres procédés. Les facteurs physiques qui rendent la sélection possible sont généralement la résistivité et le pouvoir inducteur spécifique; la densité intervient aussi puisqu'elle permet, par la combinaison des forces électriques et de la pesanteur, de rendre sélective la trajectoire des particules sollicitées par ces deux actions.

L'application à la séparation de certains produits en poudre est immédiate mais le triage électrostatique ne se limite pas là : des minerais, dont il est difficile d'extraire par les procédés conventionnels l'élément intéressant, bénéficient parfois de ce procédé. Il faut naturellement commencer par les broyer, de telle sorte que les particules soient à la mesure des forces électrostatiques et que, la probabilité jouant, on puisse estimer que chaque particule ne renferme que l'un des constituants. Utilisé jusqu'à présent pour la concentration des minerais relativement précieux, à traiter par petites quantités, il est possible que le triage électrostatique trouve dans l'avenir un champ plus vaste d'applications. Certaines mines de fer, ayant des conditions locales d'exploitation particulières, expérimentent par exemple ce procédé.

Dans la plupart des cas, les forces électrostatiques, combinées ou non avec des forces mécaniques, assurent

complètement la séparation. Elles ont alors une double fonction : fonction de discrimination d'abord, puisque ce sont elles qui, à partir de propriétés physiques différentes, désignent le lot vers lequel une particule déterminée doit être envoyée; fonction d'exécution ensuite, puisqu'elles se chargent de la conduire dans le tiroir correspondant. Parfois, cependant, la sélectivité provenant des forces électrostatiques est insuffisante et la première de ces fonctions doit être confiée à un autre « cerveau », sensible à d'autres facteurs physiques, couleur ou aspect par exemple; l'électrostatique se contente alors de la fonction d'exécution, à partir des ordres reçus.

Un procédé original permet par exemple de séparer,

dans un lot de graines, celles qui ont un aspect glacé et celles qui ne l'ont pas. Une cellule photo-électrique observe les graines tombant en chute libre, à cadence accélérée, et commande automatiquement le potentiel d'une pointe qui charge au passage, par ionisation superficielle, celles d'une certaine espèce. Ainsi « marquées », elles s'en vont, déviées par les forces électrostatiques, vers le sac correspondant.

Dans d'autres cas, on pourra demander aux forces électrostatiques de séparer des particules de même nature mais de tailles différentes : elles assureront une classification dans une gamme de dimensions difficilement accessible aux procédés mécaniques.

QUELQUES AUTRES APPLICATIONS

Les forces électrostatiques peuvent agir dans d'autres cas et une certaine analogie avec les forces électromagnétiques conduit parfois très loin l'imagination. Alors que ces dernières deviennent facilement importantes, grâce à l'utilisation des matériaux de forte perméabilité, les premières sont cependant limitées par les propriétés diélectriques moins remarquables du milieu ambiant; il n'est pas toujours possible, en effet, de travailler dans les milieux de forte rigidité qui accroissent, comme dans les générateurs sous pression de gaz, l'ordre de grandeur des forces. C'est pourquoi les forces électrostatiques sont surtout appliquées aux particules de petite taille.

L'aimant électrostatique est pourtant une exception intéressante et un exemple typique de la généralisation des phénomènes : les plateaux magnétiques, destinés à maintenir des pièces en acier au cours de leur usinage, possèdent maintenant leur équivalent agissant par attraction électrostatique. Des pièces de toute nature (à la seule condition de posséder une face plane et conductrice au moins superficiellement) peuvent être agrippées de la sorte et maintenues avec des forces atteignant plusieurs kilogrammes par centimètre carré. De faibles interstices diélectriques, dans lesquels il est possible de localiser un champ intense, permettent d'arriver à ce remarquable résultat (29).

Mais en dehors de sa manifestation directe sous forme de forces (30), l'électrostatique ou tout au moins les hautes tensions continues qui lui sont si intimement associées trouvent bien d'autres applications. Certaines ont un avenir assuré; d'autres sont trop nouvelles pour qu'une opinion valable puisse être émise; quelques-unes, enfin, paraissent encore du domaine de l'anticipation ce qui ne veut pas dire que ce sont les moins sérieuses...

Accélérateurs et déflecteurs de particules. —

Nous retrouvons là encore une utilisation directe de la force exercée par le champ sur une charge, mais la nature bien spéciale des particules auxquelles on l'applique permet difficilement une assimilation aux techniques précédentes : il s'agit de particules élémentaires, ions ou électrons, que les techniques modernes exploitent sans cesse davantage.

L'un des besoins essentiels consiste à accélérer ces particules afin de leur communiquer une vitesse et une énergie considérables. La façon la plus directe et la plus naturelle de le faire consiste à les injecter dans un « tube accélérateur » dans lequel on entretient un vide poussé et un champ électrique longitudinal élevé; sous l'effet de ce champ, les particules sont accélérées et possèdent en fin de course une énergie exprimée par la différence de potentiel totale appliquée entre les extrémités du tube.

Ce type d'accélérateur, utilisé dès les débuts de la physique nucléaire, est encore précieux lorsque l'énergie à communiquer aux particules demeure limitée : 100 keV à quelques mégaélectronvolts par exemple (31). Au-delà, le problème de l'isolement haute tension n'est pas résolu et l'on ne sait pas produire ou utiliser des tensions continues supérieures à quelques millions de volts. Les accélérateurs linéaires, puis les grandes machines à trajectoires circulaires (cyclotrons, synchrotrons, etc.) prennent donc la relève pour pénétrer dans le domaine des énergies plus élevées (25 MeV à 25 GeV et bientôt davantage).

Dans cette course aux hautes énergies, cependant, le domaine des accélérateurs électrostatiques demeure intact et toute une catégorie de besoins continuera à être satisfaite par ce type de matériel relativement simple.

Les accélérateurs d'ions (protons ou deutons) permettent l'étude des réactions nucléaires dans le domaine

(29) Ce champ est produit par un générateur haute tension extérieur. Depuis longtemps, on a également cherché à créer l'homologue de l'aimant permanent. Certains matériaux, coulés sous champ électrique, conservent une polarisation diélectrique appréciable mais leur dérive dans le temps demeure importante (*électrets*).

(30) Un colloque international sur *La Physique des forces électrostatiques*, le premier du genre, a eu lieu à Grenoble, en septembre 1960, sous l'égide du Centre National de la Recherche Scientifique. Il a permis de mettre en relief l'intérêt de ces forces dans de nombreux domaines.

(31) Le maximum atteint avec les accélérateurs alimentés au moyen d'un générateur électrostatique à courroie (Van de GRAAFF) se situe vers 6 MeV. Sous la forme *tandem*, dans laquelle le signe des particules accélérées est inversé au milieu du parcours, l'énergie atteint 12 MeV pour la même différence de potentiel mise en œuvre.

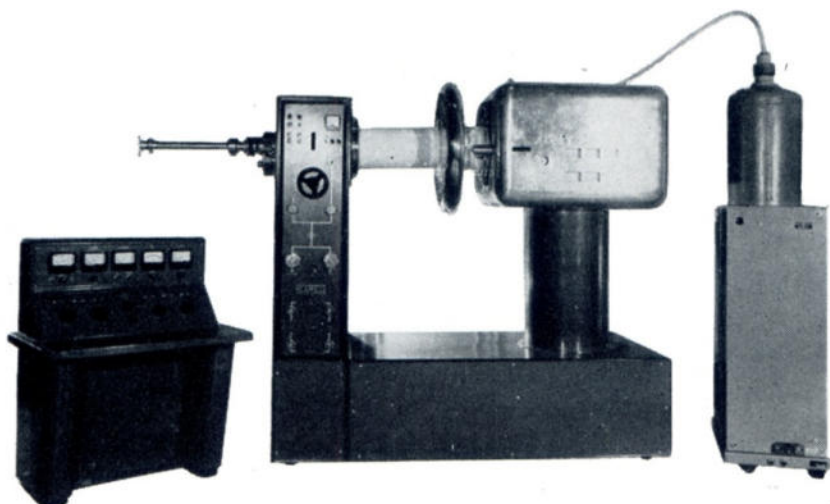


FIG. 15. — Un accélérateur d'ions 300 keV (type L, SAMEs). On distingue dans la partie centrale le tube accélérateur proprement dit, terminé à droite par la source d'ions et à gauche par le dispositif de pompage et par la cible. La source d'ions (protons ou deutons), du type haute fréquence, est renfermée dans l'électrode isolée, mise sous tension au moyen du générateur électrostatique (300 000 V) de droite. La cible est au potentiel de la masse. A gauche, le pupitre de commande de l'ensemble. Cet accélérateur permet d'envoyer sur la cible un faisceau d'ions, continu ou pulsé, d'environ 0,5 mA sous une énergie de 300 keV. Équipé d'une cible au deutérium ou au tritium, il constitue un générateur de neutrons commode et puissant.

des basses énergies; en plaçant une cible de deutérium ou de tritium à l'extrémité du tube, ils deviennent surtout d'excellentes sources de neutrons, puissantes et souples, dont la physique nucléaire a de plus en plus besoin (voir fig. 15).

Les accélérateurs d'électrons permettent d'effectuer différents traitements par irradiation (réticulation, greffe, stérilisation, etc.) et l'emploi d'une anticathode comme cible en fait des générateurs de rayons X de grande énergie.

Dans un domaine similaire, ce sont aussi des électrons, accélérés par le champ électrique issu des hautes tensions continues, qui sont mis en œuvre dans les microscopes électroniques (32).

Indépendamment de sa fonction accélératrice, le champ permet aussi d'agir sur les faisceaux de particules chargées, ions ou électrons : les lentilles électrostatiques les focalisent, les déflecteurs les dévient, les séparateurs assurent le tri de certaines d'entre elles.

Propulsion ionique. — La propulsion par réaction issue d'une combustion chimique a des limites, en raison de la vitesse d'éjection relativement faible des gaz à la sortie des tuyères. Cette vitesse limitée doit être compensée par la mise en œuvre d'une masse énorme de combustible et les tonnes de matière brûlées par les fusées, pour échapper à l'attraction terrestre, ne leur permettent guère d'emporter ce qu'il leur faudrait ensuite pour naviguer dans l'espace. Cette navigation peut en réalité se faire au moyen de forces modestes mais, pour limiter dans toute la mesure du possible la masse des produits à emporter, il était naturel que l'on songeât à les éjecter à une vitesse considérable.

Beaucoup d'espoirs sont maintenant fondés sur le principe de la réaction par ions, fortement accélérés par le champ électrique et éjectés à grande vitesse au moyen d'un accélérateur rappelant ceux décrits précédemment. Le véhicule spatial serait équipé d'un générateur de haute tension continue (20 à 500 kV), tirant son énergie d'une batterie solaire ou d'un petit réacteur nucléaire, et alimentant un accélérateur d'ions lourds (césium) éjectés vers l'arrière avec une vitesse pouvant atteindre une fraction notable de celle de la lumière (33).

L'emploi de dispositifs électrostatiques est envisagé; le générateur s'accommoderait très bien du vide ambiant comme milieu de forte rigidité et ses pertes énergétiques réduites pourraient être évacuées sans trop de difficultés.

Actions atmosphériques. — « Le temps n'est plus un accident, le produit du hasard ou le reflet du caprice des dieux » (34). Déjà, des résultats sont acquis, concernant la possibilité d'agir sur la nature et de modifier les climats grâce à la pluie provoquée. Les méthodes actuelles d'insémination des nuages au moyen de noyaux artificiels se perfectionnent et de nouvelles techniques apparaîtront, dans lesquelles les charges électriques auront sans doute leur rôle à jouer. Des études complexes — car la nature ne se laisse pas contrôler facilement — sont entreprises dans ce sens, un peu partout dans le monde.

Dans le même ordre d'idée, il n'est pas impossible de pouvoir dissiper un jour les brouillards par action électrostatique : l'émission de particules chargées peut provoquer l'attraction et le rassemblement des fines particules liquides (coalescence électrique), conduisant à la précipitation locale des nappes de brouillard (35).

Les traitements par ionisation et par étincelage. — Des vertus physiologiques sont attribuées aux ions créés artificiellement au sein de l'air ambiant et aux étincelles percutant certaines zones du corps humain. Là encore, des travaux sont signalés un peu partout mais l'homme, comme les phénomènes atmosphériques, est soumis à des lois capricieuses : l'effet statistique et

(32) Sous des énergies de 50 à 100 keV, exceptionnellement 1 ou 1,2 MeV. La définition précise de l'énergie à communiquer aux électrons pour obtenir un bon pouvoir séparateur et une bonne stabilité des réglages nécessite l'emploi d'un générateur haute tension d'alimentation très hautement stabilisé : les fluctuations, pendant la durée d'une pose ne doivent pas excéder 10^{-5} .

(33) A noter qu'un jet compensateur d'électrons doit être évacué simultanément, pour éviter que le potentiel du véhicule augmente indéfiniment sous l'effet de l'éjection de charges d'un seul signe.

(34) Louis ARMAND, président de l'Euratom.

(35) Expériences PAUTHENIER.

la besogne fastidieuse d'une longue expérimentation doivent précéder les conclusions.

Ces traitements, du reste, ne s'appliquent pas qu'à l'homme : les résines plastiques sur lesquelles l'encre « ne prend pas » peuvent bénéficier de l'impression, après avoir été soumises à une effluation intense qui modifie leur état de surface.

L'électrostatique parasite :

L'homme se donne beaucoup de peine pour tirer parti des phénomènes de la physique, mais il s'en donne parfois davantage encore pour éviter leur manifestation naturelle et spontanée. L'électrostatique n'échappe pas à cette règle et il faut bien dire que, jusqu'ici, beaucoup de techniciens la connaissaient principalement sous ce deuxième aspect.

A cause des phénomènes triboélectriques, qui se manifestent en particulier sous l'effet du frottement et qui sont trop souvent confondus avec l'électrostatique elle-même (36), des corps ou des objets s'électrisent au cours de leur manipulation ou de leurs déplacements; pour peu qu'ils soient isolants (ou isolés), ils se recouvrent de charges électriques superficielles indésirables.

Les feuilles, les fils ou les poudres, textiles ou autres, ont alors tendance à se coller par attraction électrostatique et le fonctionnement des machines qui les mettent en œuvre se trouve perturbé; des émulsions

(36) La triboélectricité n'a pas vraiment reçu d'applications en raison de son caractère mal défini; ses manifestations sont généralement de nature parasite.

photographiques se trouvent voilées par la lueur de décharges superficielles; des véhicules, des citernes, accumulent des charges qui, libérées brusquement sous forme d'une étincelle peuvent conduire aux pires accidents, explosions ou incendies.

Il a donc fallu chercher à se débarrasser des charges indésirables, soit en évitant leur production, soit en les évacuant vers la masse au fur et à mesure de leur formation. C'est ainsi que des matériaux, normalement isolants, ont été rendus conducteurs ou *antistatiques* par incorporation d'additifs convenables.

Pourtant, le traitement du matériau lui-même n'est pas toujours possible et des dispositifs spéciaux doivent parfois équiper les machines qui l'utilisent. Ces dispositifs se ramènent toujours à un système de balayage, captant les charges développées superficiellement. La captation peut être assurée par un contact direct, mais il est souvent préférable de donner à ce contact un caractère immatériel, en créant autour de l'objet à décharger une zone rendue conductrice par ionisation locale, au moyen d'un corps radioactif (radium D) ou d'une électrode portée sous tension.

Quelquefois parasite, très souvent utile, l'électrostatique fait donc maintenant partie des réalités industrielles. Longtemps freinée par une mauvaise connaissance des phénomènes — dont l'enseignement a disparu des écoles — et par une méfiance naturelle à l'égard des hautes tensions, cette technique nouvelle connaîtra un développement certain. L'apparition de générateurs issus de la même famille, commodes et systématiquement non dangereux, facilitera dans bien des cas son essor.

