

L'électrostatique dans l'industrie *

par le Professeur Ion I. Inculet
(Western Ontario University)

Le 3^e Congrès international d'électrostatique qui s'est tenu à Grenoble du 20 au 22 avril dernier constituait la 182^e manifestation de la Fédération Européenne du Génie Chimique et consacrait les travaux effectués par son groupe de travail «Electricité statique dans l'industrie» depuis le 2^e Congrès qui s'était tenu à Francfort en mars 1973.

La conférence du Professeur I. Inculet, de l'Université du Western Ontario (Canada), sur les applications techniques de l'électricité statique fait le point sur les 4 groupes d'applications déjà d'usage courant. Il signale, en outre, des perspectives de développement très prometteuses qui devraient inciter les chercheurs et notamment ceux du génie chimique à se pencher sur les énormes possibilités qui s'ouvrent devant eux.

Le Professeur Inculet a bien voulu revoir la traduction française de son texte que nous avons préparée. Nous lui exprimons notre gratitude et sommes convaincus que de nombreux lecteurs apprécieront ce conte des Mille et Une Nuits qui nous révèle les données scientifiques les plus avancées.

Alors que notre société progresse et devient plus complexe, se dégagent de nouveaux besoins spécifiques : dans la protection de notre environnement (air, eau et sol), dans les communications, dans la production et la transformation des aliments, dans le traitement des minerais, dans la récupération et le traitement des déchets, dans le transport des matériaux et en énergie.

Aujourd'hui nous remarquons que l'électrostatique joue un rôle pratiquement dans tous les domaines cités. Elle excelle à donner à l'homme les outils pour la protection de l'environnement, et pour les communications ; elle entretient son espoir d'arriver à contrôler la fusion dans le domaine de l'énergie. Comme le prouvent les rapports de divers laboratoires mondiaux, la recherche en génie électrostatique traverse une période d'intérêt sans précédent. Quelles sont les origines de ces développements ?

C'est l'histoire traditionnelle du jeune prince qui, pour conquérir sa fiancée, doit prouver ses capacités et sa force au roi dans des épreuves variées. Dans une épreuve des plus subtiles, les hommes du roi préparent un boisseau de farine fine et de sel et enferment le prince dans une pièce avec le mélange. Ce dernier doit en séparer les constituants originaux, dans l'obscurité et avant le matin suivant, quand les inspecteurs royaux du contrôle de la qualité, armés de doubles tables d'échantillons auront à certifier que la séparation des milliards de petites particules de la taille du μm est achevée au niveau désiré.

Dans cette histoire, il advient que le prince, aussi bon qu'attentif, durant son voyage jusqu'à cette terre lointaine, sauve de la noyade la reine des fourmis. Au lieu d'opérer lui-même la séparation de la farine et du sel, il appelle à l'aide et la reine des fourmis reconnaissante envoie deux armées : l'une pour séparer le sel et l'autre pour la farine. Le travail est terminé avant le matin.

Les hommes ont longtemps médité sur les problèmes de la manipulation de très petites particules et, nos ancêtres n'avaient guère à leur disposition que le dressage des fourmis. Heureusement, au début du XX^e siècle, l'électrostatique, phénix de la science électrique, sortit des cendres volantes récupérées dans les dépoussiéreurs industriels. L'outil parfait pour les travaux à grande échelle requérant le maniement de très petites particules paraissait être découvert et, comme

** Conférence prononcée au 3^e Congrès international de l'électrostatique organisé par l'Association Nationale de la Recherche Technique et la Société de Chimie Industrielle, à Grenoble du 20 au 22 avril 1977.*

cela arrive souvent, le succès de ce nouvel outil a excité l'imagination et a stimulé la recherche pour de nouvelles applications. Des résultats se sont succédé rapidement : l'électrophotographie, la peinture électrostatique, la fabrication du papier de verre, la diélectrophorèse des matériaux biologiques, le triage des minerais, l'épandage des pesticides dans les vergers, sur les récoltes et dans les champs, etc.

Si l'on essaie de cristalliser le dénominateur commun des succès industriels dûs à l'électrostatique, nous trouvons invariablement de très faibles forces au travail sur de très petites particules de quelques μm de diamètre. Alors que de telles forces paraissent insignifiantes à notre échelle, elles sont énormes comparées à celles de gravité qui agissent sur les mêmes particules. En outre, elles peuvent travailler sur des trajectoires bien définies, repousser ou attirer des particules sur de telles trajectoires et, comme une fourmi qui rassemble une seule sorte de grains de farine ou de sel, elles peuvent être utilisées à un travail sélectif. Alors que les forces électrostatiques touchent les particules choisies, le milieu dans lequel de telles particules existent n'est généralement pas affecté.

Pour l'industrie, l'importance de ces forces paraît évidente. Et dès aujourd'hui, travaille une industrie multimilliardaire en dollars qui est basée sur elle. Il ne faut pas négliger dans cette même industrie les applications qui utilisent des phénomènes électrostatiques spéciaux dans des buts autres que ceux de manipuler de petites particules, tels que : électrets pour microphones, traitement des fibres textiles par effets corona, mandrins électrostatiques, etc...

I. Les forces électrostatiques sur les petites particules.

L'importance industrielle de telles forces a été officiellement reconnue dans une conférence tenue il y a 17 ans, à Grenoble également. (L'allocution d'ouverture était, intéressante coïncidence, prononcée par le même savant de renommée mondiale, le Professeur L. Neel). La publication des comptes-rendus de la conférence de 1960 : «La physique des forces électrostatiques et leurs applications» a depuis, avec succès, servi de référence et d'inspiration pour explorer de nouvelles voies en électrostatique.

Comme la technique engage en fin de compte des études basées sur l'interprétation et sur des calculs, revoyons très brièvement un peu de la théorie des forces sur les particules dans les cas idéaux.

I. A. Forces sur des particules sphériques conductrices du rayon r , placées dans un champ électrique uniforme E_0 dans l'air, à pression et température normales.

En se rapportant à la figure 1 :

a) Le champ électrique est déformé comme il est montré. A la surface des particules, le champ est perpendiculaire à cette surface et varie sinusoïdalement pour atteindre un maximum qui est trois fois la valeur de E_0 le long de l'axe des z .

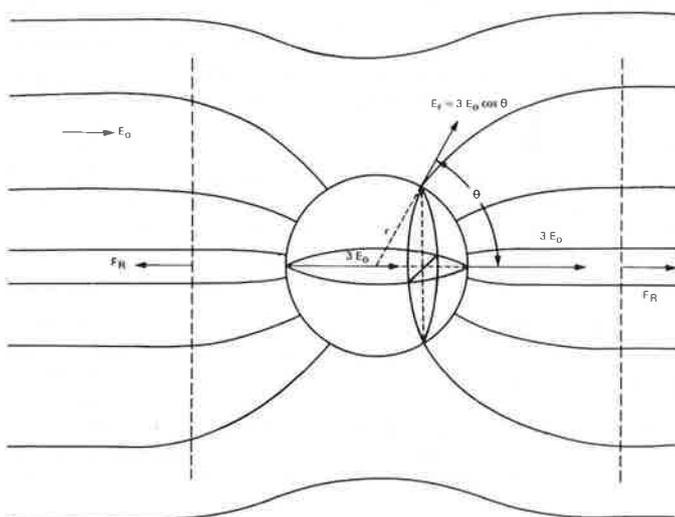


Figure 1. Particule sphérique conductrice dans un champ électrique uniforme E_0 .

b) Des forces électrostatiques résultantes F_R égales et opposées, apparaissent et tendent à scinder les particules.

c) Si la particule est liquide, la forme sera changée, elle s'allongera et si les forces électrostatiques surpassent la tension superficielle elle se cassera en deux particules ou plus, en nombre égal respectivement chargées positivement et négativement.

I. B. Force maximale sur une particule sphérique conductrice de rayon r , chargée par bombardement ionique jusqu'à saturation et placée dans un champ électrique uniforme E_0 .

En se reportant à la figure 2, cas supposé de la charge de saturation ou aucune ligne de champ n'arrive sur la particule chargée et où l'intensité du champ électrique résultant au pôle amont est $E_{Pu} = 0$:

a) Dans ces conditions, l'intensité du champ électrique résultant à la surface de la particule a également une expression sinusoïdale $E_r = 3 E_0 (1 + \cos \theta)$ et atteint la valeur maximale de $6 E_0$.

b) La force totale sur la particule est : $24 \pi \epsilon_0 r^2 E_0^2$.

Il est bon de remarquer que quelle que soit la valeur maximale de la résistance diélectrique dans ce milieu particulier (aux conditions particulières de température, pression et rayon de la sphère) on doit pour éviter la décharge de la particule, considérer une valeur pour le champ électrique appliqué uniformément qui est plus petite d'un sixième de la résistance diélectrique du milieu.

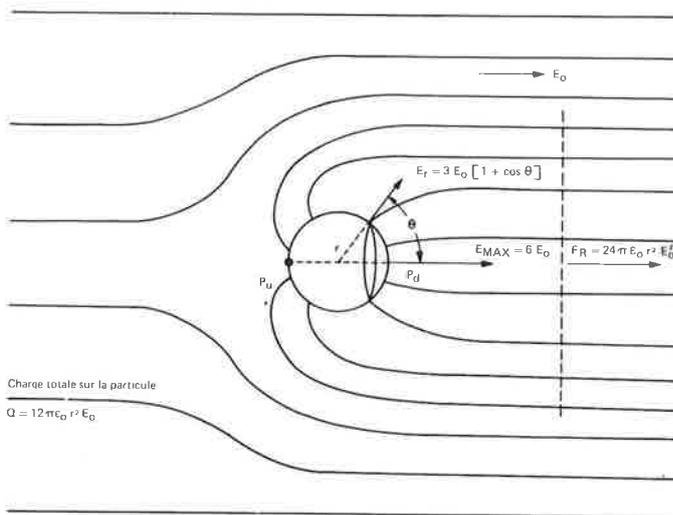


Figure 2. Particule sphérique conductrice chargée à saturation dans un champ électrique uniforme.

I. C. Taille des sphères conductrices * de rayon r que des forces électrostatiques peuvent soulever aux conditions idéales et en prenant 3 MV/m^{**} comme résistance diélectrique de l'air.

En égalisant la force électrique et la force de gravité, on trouve que le rayon maximal d'une particule sphérique de fer est d'environ 1 mm et pour une particule d'eau d'environ 8 mm.

A l'autre bout de l'échelle, de très petites particules telles qu'une gouttelette conductrice de $10 \mu\text{m}$ de rayon, peuvent être soulevées par des forces électrostatiques qui sont 400 fois plus grandes que celle de gravité.

* Pour un matériau diélectrique donné, on introduit un facteur de correction dans le calcul de la charge de la saturation. En négligeant les composantes tangentielles du champ électrique à la surface d'une sphère diélectrique placée dans un champ magnétique uniforme, la composante radiale peut être approximativement :

$$E_r = \left[2 \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right) + 1 \right] [E_0 (\cos \theta + 1)]$$

pour $\epsilon_r = 4$, $E_r = 2 E_0 (\cos \theta + 1)$. Ici dans les conditions de forces maximales, la valeur du champ électrique dans lequel on peut placer la sphère est plus grande que celle du cas d'une sphère conductrice.

** Suivant le rayon de la particule, on doit réaliser que cette valeur peut être dix fois plus grande ou même davantage.

Une particule sphérique en acier de 10 µm de rayon peut être également soulevée par l'intermédiaire d'une force électrostatique qui est 50 fois plus grande que celle de gravité.

I. D. Forces diélectrophorétiques (forces électrostatiques sur des particules dans les champs électriques non uniformes).

Elles proviennent de la polarisation de la matière. Contrairement aux forces sur la matière chargée, leur direction est indépendante de celle du champ électrique.

Dans le cas idéal d'un corps très petit, neutre, qui soit polarisable linéairement, homogènement et isotropiquement dans un champ statique conservatif à l'équilibre, la force $\vec{F} = (\vec{p} \cdot \Delta) E_0$ où \vec{p} est le vecteur du dipôle.

II. Les charges d'espace

Les charges d'espace produites par des nuages de particules chargées ont une égale importance dans les applications industrielles. Dans deux grands secteurs, le dépeussierage électrostatique et la peinture électrostatique, les charges d'espace jouent un rôle considérable du fait de l'augmentation du champ et du dépôt sur la surface qui attire la poussière ou la peinture.

Les phénomènes de charges d'espace sont plutôt remarquables par leurs effets. Considérons une charge d'espace produite par un grand nombre de petites particules qui sont individuellement chargées et distribuées uniformément en nuage.

II. A. Dispersion de nuage : si nous désignons par q la charge d'une particule, par n le nombre de particules par unité de volume au temps t, par n_0 le nombre de particules par unité de volume au temps 0 par β la mobilité des particules et par E_0 la constante électrique de l'air, on arrive à l'expression $n = \frac{n_0}{1 + n_0 q^2 \beta / \epsilon_0 t}$. L'équation indique que la densité du nuage décroît uniformément dans le temps dans tous les points du volume nuageux alors que le nuage augmente de volume.

II. B. Si la charge d'espace est produite en continu par un système central à effet couronne tel qu'un dépeussier industriel, l'intensité du champ électrique à la périphérie du nuage sera égale au champ électrique produit par la charge utile sur le fil de l'effet couronne, augmentée du champ électrique de toutes les particules chargées.

II. C. Si l'on introduit un conducteur (fil de petit diamètre) mis à la terre, dans la charge d'espace, le conducteur produit un effet couronne de polarité opposée. Ce phénomène peut être utilisé pour collecter la charge d'espace.

III. La charge électrostatique.

La charge des particules qui est essentielle dans la plupart des procédés industriels peut se réaliser de diverses façons. Les procédés d'électrisation les plus courants sont : par effet couronne, par triboélectrisation (électrisation de contact) et par polarisation. Le tableau suivant indique les appareils industriels et les procédés d'électrisation respectifs qui sont utilisés.

IV. Industrie et électrostatique

Depuis le début du siècle, des industriels ont utilisé les propriétés des particules chargées placées dans un champ électrique pour accomplir nombre de tâches qui étaient inconcevables autrefois :

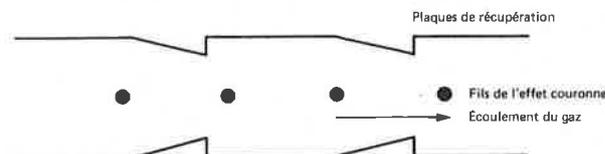
- 1) Capter des particules de cendres volantes de seulement quelques µm de diamètre dans les effluents gazeux sans entraver l'écoulement du gaz.
- 2) Peindre la face arrière d'un objet alors que le pistolet est dirigé sur la face avant.
- 3) Donner des images parfaites en répandant de l'encre en poudre sur un morceau de papier blanc et en secouant le surplus.
- 4) Séparer au vol, dans un courant d'air et à l'état sec, la pyrite du charbon, la calcite de la brucite, le carbone des cendres volantes, l'oxyde de fer de la silice, etc.

Ces quatre points recouvrent d'une façon très large les quatre principales industries utilisant l'électrostatique.

Applications industrielles	Procédés d'électrisation par		
	effet couronne	contact	polarisation
Dépeussier électrostatiques à un et deux étages	X		
Pistolets pour peinture sèche	X		
Générateurs EGD	X		
Séparateurs à lit fluidisé		X	
Pistolets pour peinture humide		X	
Microphones à électrets			X
«Xérogaphie» (électrophotographie)	X	X	X
Fabrication du papier de verre et des tissus abrasifs		X	X
Revêtement par lit fluidisé	X	X	X
Séparateurs type à tambour	X	X	
Générateurs type Van de Graaff	X	X	
Générateurs type Felici	X		X
Revêtement de surface par fibres	X		X
Dépeussier électrostatiques à deux étages et à milieu électrisé	X		X
Déchargeurs d'électricité statique	X	X	

Les dépeussier électrostatiques qui utilisent l'effet couronne pour charger les particules d'un courant gazeux et les effets des champs électriques plus ceux de la charge d'espace pour les déposer sur les plaques de récupération.

Le dépeussier électrostatique est sans aucun doute le premier des produits responsables de l'attrait des ingénieurs et des scientifiques pour la valeur industrielle de l'électrostatique. Cette industrie marque une étape avant une nouvelle croissance et un nouveau développement à la lumière des besoins de l'environnement. Pour citer H.J. White dans un article récent : «la conception des dépeussier a changé de caractère ; d'une fonction plutôt routinière et acciden-



Paramètres		Rendement massique global	Diamètre de la particule µm	Rendement de la récupération %
Température	150 °C	99,6 %	0,1	97
Surface spécifique de récupération	$\frac{55 \text{ m}^2}{\text{m}^3/\text{s}}$		0,2	93
Densité du courant	0,2 mA/m ²		0,5	92
			1,0	95
			3,0	99
			8,0	99,9
Température	400 °C	99,5 %		
Surface spécifique de récupération	$\frac{65 \text{ m}^2}{\text{m}^3/\text{s}}$			
Densité du courant	0,6 mA/m ²			

Figure 3. Rendements typiques de récupération des dépeussier électrostatiques pour cendres volantes.

telle elle est passée durant ces années à une entreprise plus sérieuse engageant de très hautes performances et des mises de fond élevées». La figure 3 donne quelques chiffres concernant les dépoussiéreurs électrostatiques modernes. Le dépoussiéreur «à chaud» qui nettoie les gaz à 400 °C présente un intérêt particulier. Le premier avantage de ce dépoussiéreur est la diminution de la haute résistivité de la cendre, caractéristique du brûlage des charbons faiblement sulfureux.

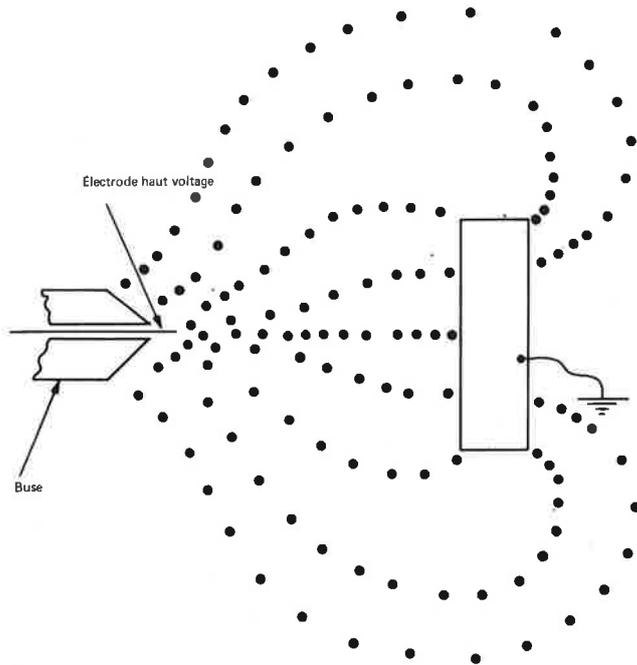


Figure 4. Peinture électrostatique.

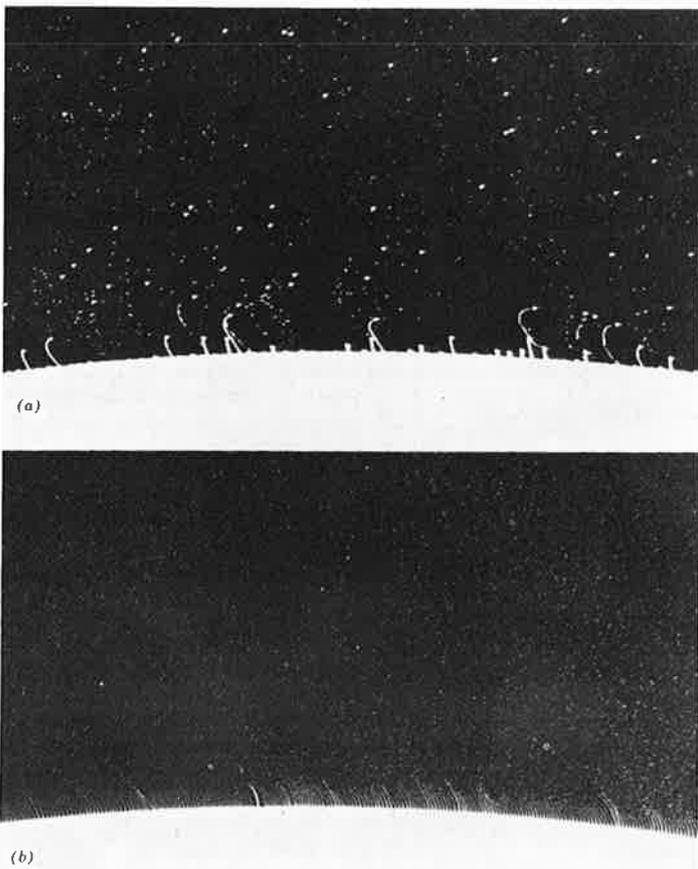


Figure 5. Formation de particules au bord du disque rotatif
(a) sans champ électrostatique
(b) dans un champ électrostatique.

La peinture électrostatique qui utilise l'effet couronne et/ou le contact électrique pour charger les gouttelettes de peinture, et les effets des champs électriques plus la charge d'espace pour déposer les gouttelettes de peinture sur la surface à peindre.

La figure 4 montre les lignes du champ électrique lors du dépôt de gouttelettes de peinture sur la face arrière de l'objet à peindre et, la figure 5, la formation des gouttelettes de peinture soumises à l'influence des champs électriques.

La formation électrostatique d'images, procédé par lequel une image électrostatique produite par des charges électrostatiques est développée pour donner une information visuelle demandée.

La figure 6 montre l'une des techniques possibles. Dans cette technique l'image électrostatique latente est produite sur une couche photoconductrice de sélénium amorphe ou d'oxyde de zinc, chargée par

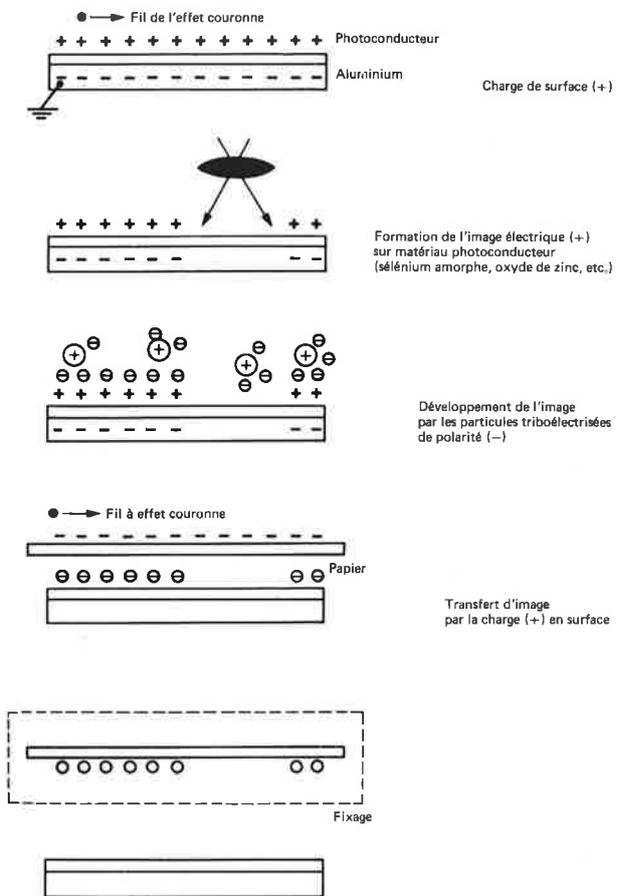


Figure 6. Etapes de la formation de l'image par électrostatique.

effet couronne et exposée à l'image lumineuse. L'image électrostatique latente fournit les forces nécessaires pour attirer les particules sélectivement chargées par triboélectricité.

Séparateurs électrostatiques : type à tambour et à lit fluidisé dans lesquels les particules chargées par effet couronne et/ou par triboélectrisation sont individualisées par des tambours rotatifs ou par fluidisation pour être séparées par des champs électriques.

La figure 7 montre de façon schématique le fonctionnement de séparateurs à tambour et à lit fluidisé.

Les quatre principales industries que l'on a mentionnées ont souvent fait l'objet d'une description complète et, ainsi, il vaut mieux s'attarder sur des applications industrielles plus récentes et moins connues.

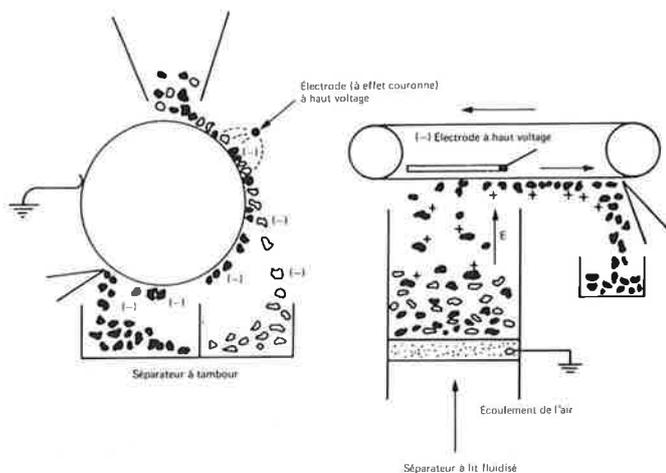


Figure 7. Séparation électrostatique de particules.

L'impression électrostatique

L'augmentation de la quantité de données produites, mises en mémoire ou extraites quotidiennement par notre société s'accompagne d'une augmentation équivalente de la demande de traitement rapide. Les systèmes d'impression mécaniques avec une frappe de 2 000 lignes/minute, ont atteint une limite maximale de vitesse, les limitations étant imposées par les forces d'inertie engagées. Dans l'impression électrostatique, les forces d'inertie engagées sont celles des gouttelettes d'encre qui ont seulement quelques μm de diamètre.

La figure 8 montre le principe de fonctionnement d'un des nombreux modèles existants ou développés pour ce marché en rapide expansion.

Le réservoir d'encre est faiblement pressurisé (quelques cm d'eau) suffisamment pour former un ménisque d'encre convexe à la sortie de la buse qui est ouverte juste assez pour empêcher que l'encre ne s'écoule. L'encre conductrice, maintenue à la terre, est attirée par les champs électriques de la grille et de l'électrode auxiliaire à courant alternatif. Quand les forces d'attraction électrostatique dépassent la tension superficielle du ménisque, il se forme des gouttelettes. Exprimé en fonction du potentiel, V , il y a formation de gouttelettes lorsque le potentiel entre les électrodes et le ménisque est :

$$V \approx 2 D \left(\frac{\gamma}{\epsilon d} \right)^{1/2}$$

ou γ = tension superficielle de l'encre,
 d = diamètre de l'orifice,
 et D = distance entre l'orifice et l'ouverture.

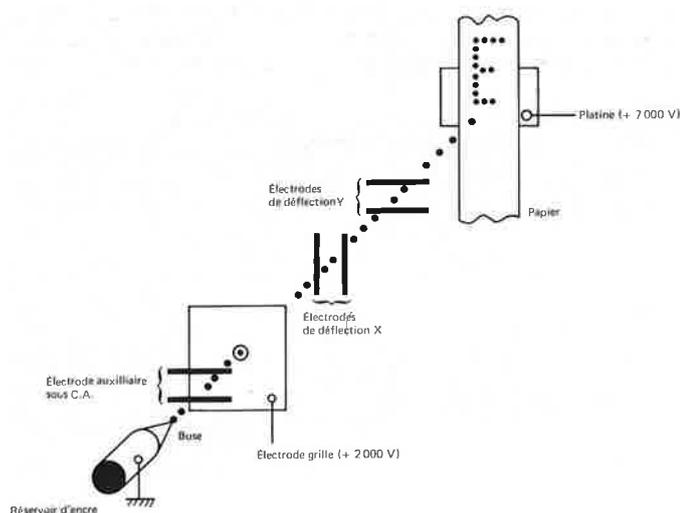


Figure 8. Schéma de la production électrostatique de gouttelettes d'encre et impression.

Les gouttelettes d'encre sont accélérées et déviées, suivant la trajectoire désirée, par diverses électrodes de façon à imprimer le signe sur le papier.

Il existe sur le marché des machines électrostatiques capables d'imprimer à la vitesse de 5 000 lignes/minute et on a même construit des unités qui peuvent imprimer jusqu'à 30 000 lignes/minute. De telles machines ont des avantages bien déterminés si l'on tient compte du bruit (le niveau sonore est seulement celui des gouttelettes d'encre frappant le papier). Aucun autre système ne peut sans doute donner une meilleure image des forces électrostatiques travaillant sur de petites particules.

La fabrication du papier de verre et des tissus abrasifs.

Un autre exemple de ce que peut faire l'électrostatique en distribuant et en collant des milliards de particules à la position voulue et uniformément est donné par la figure 9. Des particules de quartz, de carbure de silicium, de diamant, etc. sont répandues sur une chaîne en continu. Pénétrant dans le champ électrique, elles s'alignent suivant les lignes du champ, les pointes dirigées vers les électrodes. La charge électrique prise sur la chaîne semi-conductrice leur permet d'être projetées et implantées sur l'adhésif. Toutes les particules qui frappent une zone déjà recouverte par d'autres particules retombent et sont récupérées par le système.

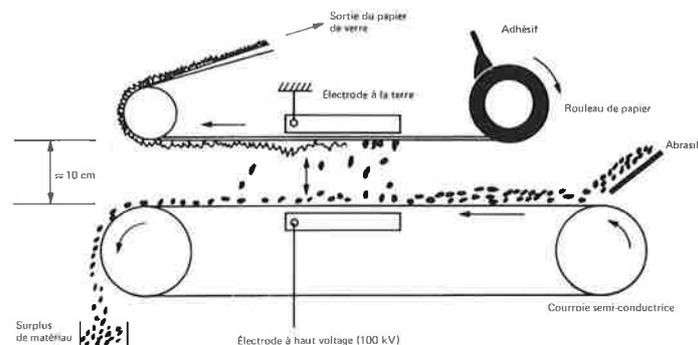


Figure 9. Principe du fonctionnement d'un équipement électrostatique pour la fabrication de papier abrasif.

Les détecteurs de particules de fumée et alarme.

Le schéma de construction est donné à la figure 10. Le fait que les particules de fumée chargées électriquement possèdent une mobilité relativement plus faible que celle des ions est à la base de la conception de ces détecteurs. En périodes normales de surveillance, deux courants continus et égaux i_1 et i_2 traversent l'air des deux chambres rendu conducteur par une substance radioactive. Une soudaine augmentation du nombre de particules dans l'atmosphère sera suivie par une augmentation immédiate de la densité des particules dans la chambre sensible et par une augmentation plus

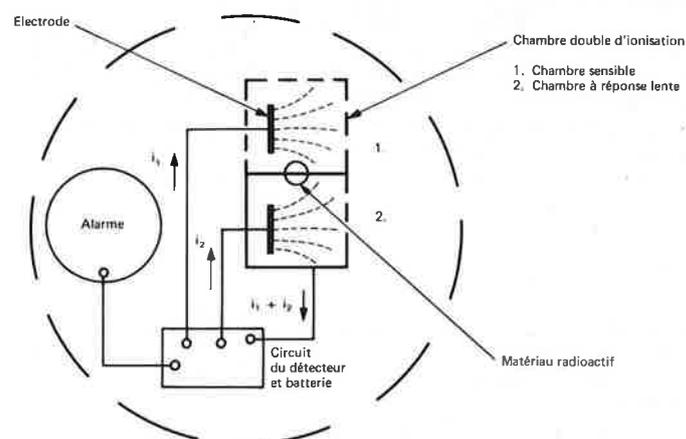


Figure 10. Détecteur de particules de fumée.

lente de la densité des particules correspondantes dans la seconde chambre. Le courant i_1 baissera par la fixation des ions sur les particules. La diminution est plus que suffisante pour actionner le circuit d'alarme ; la puissance totale du réseau est fournie par une petite pile de la taille utilisée dans les flashes.

Dernièrement, l'industrie s'est mise à produire ce système massivement. Le faible prix de revient le rend accessible pratiquement à tous ceux qui sont intéressés par un système avertisseur qui, la nuit, peut sauver sans aucun doute des vies.

Les amplificateurs à électrets.

L'application des électrets représente une facette spéciale de l'électrostatique. Alors que nous avons vu que la plus grande partie des applications industrielles concernent de fines particules, l'intérêt de l'industrie s'est également porté sur les films très minces et sur les phénomènes qui y sont associés. L'amplificateur à électrets le plus courant, le microphone schématisé à la figure 11, en est un bon exemple. Le film à électrets, de quelques μm d'épaisseur, métallisé par une couche d'or de moins de $1\mu\text{m}$, vibre à la pression du son et change de capacité (anode arrière — film métallisé). L'excellente réponse de la fréquence et la fiabilité, outre un poids très léger, ont donné la préférence à ce système pour les appareils téléphoniques d'opérateur.

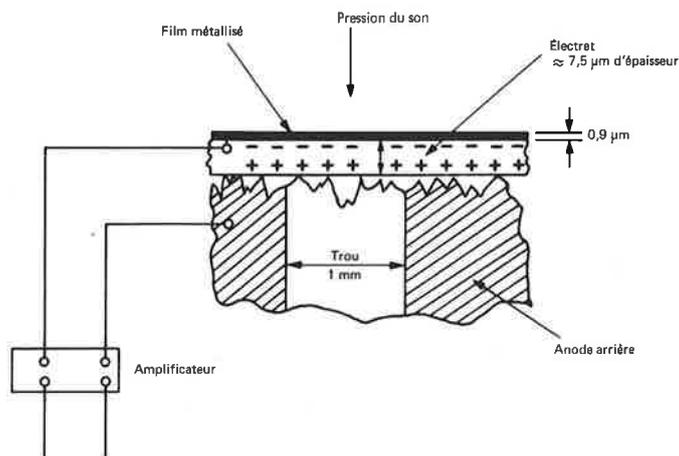


Figure 11. Microphone à électrets (schéma).

V. L'avenir

Il est plutôt difficile de dire quelles seront les nouvelles idées et les nouveaux développements qui se matérialiseront dans l'industrie à l'échelle des grandes applications déjà décrites. C'est pourquoi, j'ai choisi de mentionner trois développements relativement récents ou domaines d'investigations qui, je crois, peuvent offrir quelque chose à l'industrie.

1. Transport électrostatique de matériaux légers.

La réalisation du Professeur Masuda de l'écran électrique et la découverte complémentaire de la possibilité de transporter par électrostatique des matériaux légers qui deviennent triboélectriques sur un convoyeur fixe semble être prometteur. On montre un tel transport de matériaux triboélectrisés sur le schéma de la figure 12.

(On note que le transport est indépendant du signe de la charge. Les particules chargées positivement ou négativement seront transportées dans la même direction).

2. Effets couronnes sur des surfaces.

La préparation des surfaces et l'adhérence des peintures et des encres est un des aspects considérables pour l'industrie. Pratiquement tout ce que nous fabriquons a au moins un revêtement protecteur ; des surfaces de verre en ont sept ou plus.

On a dit que la force d'adhérence de l'encre sur les films polyéthylène est septuplée lorsque son application est suivie d'une décharge par effet couronne de trois secondes.

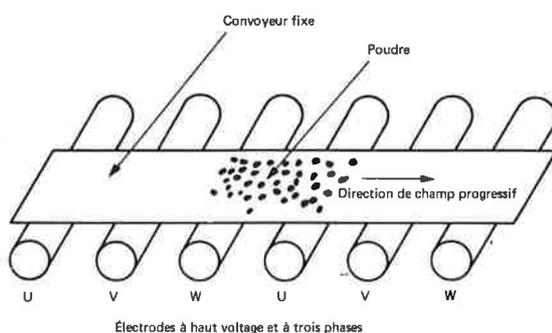


Figure 12. Convoyeur électrostatique de matériaux, triboélectrisés (Réalisation Masuda).

Dans les textiles, on a montré qu'un traitement par effet couronne augmente la résistance du fil par modification des fibres en surface. Les forces de friction entre les fibres sont augmentées.

Comme pour les surfaces métalliques sur lesquelles apparaissent par effet couronne des courants positifs ou négatifs, on doit se reporter aux figures 13 et 14. Ces photographies ne sont pas le résultat d'études systématiques. Elles représentent uniquement les surfaces du fil qui ont produit l'effet couronne aux conditions spécifiées.



Figure 13. Effets couronne (+). Surface du fil après la production d'un courant par effet couronne (+) de $140\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ pendant ≈ 15 heures.

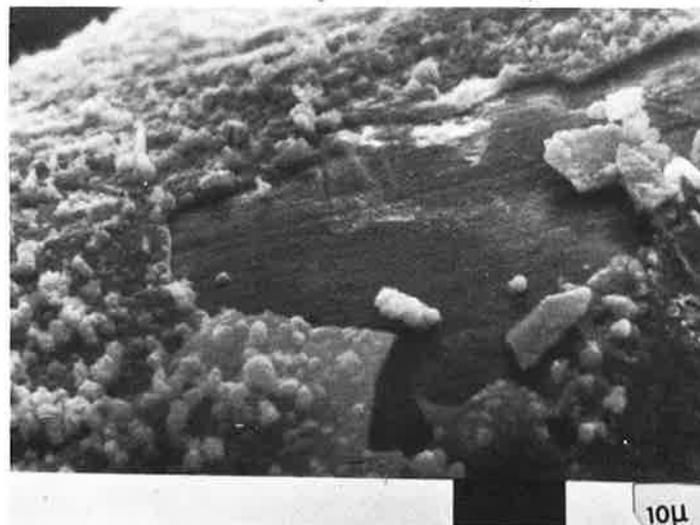


Figure 14. Effets couronne (-). Surface du fil après la production d'un courant par effet couronne (-) de $140\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ pendant ≈ 15 heures.

3. Applications électrostatiques de pesticides dans les vergers et sur les récoltes dans les champs.

Sur ce point, on constate un nouvel intérêt. Bien qu'il vaille mieux utiliser un système qui, à la fois, (a) possède un meilleur pouvoir couvrant, (b) demande moins de matériel et (c) réduise les déviations et les dépôts sur le sol, on n'a pas encore su tirer parti de l'avantage apporté par les forces électrostatiques comme on l'a vu dans le cas des peintures électrostatiques.

A l'Université du Western Ontario, on a, pour le traitement des vergers, développé un nouveau système comme on le montre sur la figure 15. Au lieu d'utiliser un grand angle de dispersion, on a mis au point une buse pour produire un jet concentré qui forme un nuage électrisé dans le feuillage des arbres. La répulsion mutuelle des particules et l'attraction par les feuilles (à la terre par le circuit de l'arbre) assurent un recouvrement supérieur sur les deux faces des feuilles.

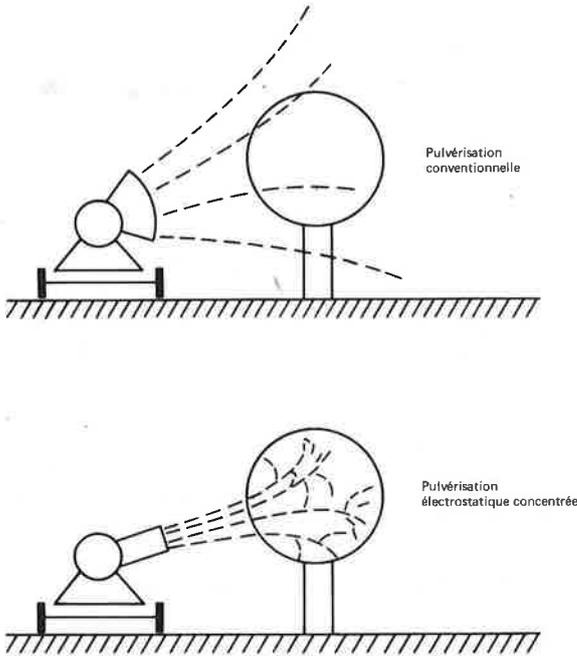


Figure 15. Pulvérisation expérimentale dans les vergers.

Finalement, dans un avenir plus lointain, lorsque l'homme aura appris à contrôler l'énergie de la fusion, l'électrostatique devrait faire un grand pas vers la production directe d'énergie électrique, un domaine dominé, aujourd'hui, exclusivement par les convertisseurs électromagnétiques.

On estime que dans un cycle de combustible (D-T-Li), 17 % de l'énergie de fusion totale libérée dans un réacteur à miroir pourraient être utilisés pour une conversion électrostatique directe de l'énergie. (Figure 16, $\alpha = 17\%$).

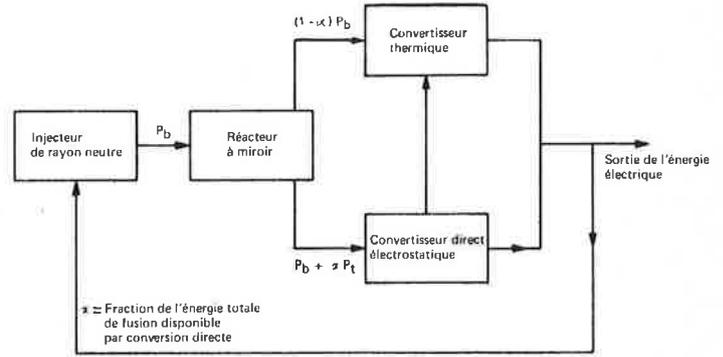


Figure 16. Schéma du courant électrique de fusion d'un réacteur à miroir.

Dans ces voies, les forces électrostatiques travailleront sur les plus petites des particules chargées : les électrons et les ions. Les ions seront séparés des électrons et recueillis sur des électrodes à haut voltage donnant facilement des courants directement utilisables. On a estimé qu'aux énergies ioniques élevées (700 keV) le rendement de la conversion pourrait atteindre 90 %.

En conclusion, cette brève revue sur l'industrie électrostatique et de quelques-uns des développements futurs possibles a permis d'établir le lien commun entre la plupart des principales applications : *le maniement des petites particules*.

Pour améliorer ces applications, comme aussi pour rechercher d'autres possibilités, on trouve des équipes d'ingénieurs multidisciplinaires en électricité, en chimie, en matériaux et des scientifiques dans les laboratoires et dans les industries disséminés dans le monde. En vérité l'avenir paraît très prometteur.