



Charge et trajectoires des particules dans les séparateurs électrostatiques

Adrian-Paun Samuila

► To cite this version:

Adrian-Paun Samuila. Charge et trajectoires des particules dans les séparateurs électrostatiques. Energie électrique. Université Joseph Fourier (Grenoble I), 1997. Français. <NNT : >. <tel-01591928>

HAL Id: tel-01591928

<https://hal.science/tel-01591928v1>

Submitted on 22 Sep 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

THESE

présentée par

Adrian-Paun SAMUILA

Ingénieur de l'Université Technique de Cluj-Napoca

pour obtenir le titre de DOCTEUR
de l'Université Joseph Fourier - Grenoble 1
et de l'Université Technique de Cluj-Napoca (Roumanie)
(thèse en co-tutelle)

Spécialité :
PHYSIQUE

CHARGE ET TRAJECTOIRES DES PARTICULES DANS LES SEPARATEURS ELECTROSTATIQUES

Date de soutenance :
23 mai 1997

Composition du jury :

Gleb DRAGAN	Rapporteur
Gérard TOUCHARD	Rapporteur
Jean-Pierre GOSSE	Examinateur
Radu MUNTEANU	Examinateur
Robert TOBAZEON	Examinateur
Lucian DASCALESCU	Directeur de thèse
Alexandru IUGA	Directeur de thèse
Radu CRAMARIUC	Invité
Adrien LACCHIA	Invité

Thèse préparée au sein du
Laboratoire d'Electrostatique et de Matériaux Diélectriques
C.N.R.S. & Université Joseph Fourier Grenoble
Laboratoire de Champs Electriques Intenses
Université Technique de Cluj-Napoca

REMERCIEMENTS

Cette thèse en co-tutelle a été préparée au Laboratoire d'Electrostatique et de Matériaux Diélectriques, Unité Mixte de Recherche du CNRS et de l'Université Joseph Fourier - Grenoble, sous la direction de Monsieur le Professeur **Lucian DASCALESCU** et au Laboratoire de Champs Electriques Intenses de l'Université Technique de Cluj-Napoca sous la direction de Monsieur le Professeur **Alexandru IUGA**. Qu'ils reçoivent l'assurance de ma sincère reconnaissance pour l'aide et les précieux conseils qu'ils m'ont prodigués durant la réalisation de ce travail.

Mes vifs remerciements s'adressent aussi à Monsieur **Robert TOBAZEON**, Directeur de Recherche CNRS, qui m'a reçu dans son équipe, m'a aidé et m'a encouragé tout au long de la réalisation de cette thèse.

J'exprime ma sincère reconnaissance à Monsieur le Professeur **Gleb DRAGAN**, Membre de L'Académie Roumaine, Président de la Société Roumaine d'Electrostatique et à Monsieur **Gérard TOUCHARD**, Professeur à l'Université de Poitiers, Directeur du Laboratoire de Physique et de Mécanique des Fluides, qui m'ont fait l'honneur d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse.

Je remercie très vivement Monsieur le Professeur **Jean Pierre GOSSE**, Directeur du Laboratoire d'Electrostatique et de Matériaux Diélectriques jusqu'en décembre 1996, qui a contribué à la coopération scientifique avec le Laboratoire de Champs Electriques Intenses de l'Université Technique de Cluj-Napoca et qui a accepté de représenter l'Université Joseph Fourier dans le jury de thèse.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur le Professeur **Radu MUNTEANU**, Doyen de la Faculté d'Electrotechnique et représentant de l'Université Technique de Cluj-Napoca dans le jury, pour le soutien et l'amitié qu'il n'a cessé de me témoigner.

Je tiens à remercier Monsieur **Adrien LACCHIA**, Directeur Général de la Société SAMES et Monsieur **Radu CRAMARIUC**, Directeur Général de ICPE ELECTROSTATICA S.A., qui ont suivi avec intérêt ce travail et m'ont fait l'honneur de participer au jury de thèse.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur **Pierre ATTEN**, Directeur de Recherche CNRS, à Monsieur **Petru NOTINGHER**, Professeur à l'Université POLITEHNICA de Bucarest, à Monsieur **Jean FILLIPINI**, Directeur de Recherche CNRS et à Monsieur **Pascal RAIN**, Maître de Conférences à l'Université Joseph Fourier pour les discussions enrichissantes et les suggestions qu'ils m'ont faites.

C'est avec reconnaissance que je remercie Monsieur **André DENAT**, Directeur du Laboratoire d'Electrostatique et de Matériaux Diélectriques pour l'accueil amical qu'il m'a réservé et pour ses efforts de trouver les moyens financiers sans lesquels la soutenance de cette thèse n'aurait pas été possible.

Je tiens également à remercier Monsieur le Professeur **Gheorghe LAZEA**, Président de l'Université Technique de Cluj-Napoca, Monsieur le Professeur **Emil SIMION**, Chef du Département d'Electrotechnique et Monsieur le Professeur **Roman MORAR**, Chef du Collectif Electrotechnique et Machines Electriques qui ont soutenu en permanence la coopération avec l'Université Joseph Fourier et m'ont fait bénéficier de leur expérience scientifique par des conseils avisés.

Je tiens à remercier Monsieur le Professeur **Alain NEMOZ**, Responsable du Département Relations Internationales de l'Université Joseph Fourier, qui a apporté un soutien important au programme de coopération dans le domaine de l'électrostatique appliquée entre Grenoble et Cluj-Napoca. Qu'il trouve ici l'expression de ma très sincère reconnaissance.

Mes remerciements s'adressent aussi à mes collaborateurs de l'industrie : ICME S.A. Bucarest - Monsieur **Theodor STAN**, Directeur et Monsieur **Florin PETCU**, Chef Département Recherche et Développement; ROMCAB S.A. Targu Mures - Monsieur **Iosif CSORVASY**, Chef Département Recherche et Développement; CARPCO Inc. Jacksonville - Monsieur **Frank KNOLL**, Président; ICPM S.A. Cluj-Napoca - Monsieur **Ioan CUGLESAN**, ingénieur de recherche, dont l'aide financier a permis la réalisation d'une partie de ce travail.

Je remercie mes collègues du Laboratoire de Champs Electriques Intenses de l'Université Technique de Cluj-Napoca : Monsieur **Vasile NEAMTU**, maître de conférences, Monsieur **Ilie SUARASAN**, chargé de recherche, Madame **Michaela MIHAILESCU**, enseignant-chercheur associé, Monsieur **Dan RAFIROIU**, maître de conférences, Monsieur **Costel PETRU**, technicien, pour l'aide amicale qu'ils m'ont donné.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur **Claude MARTEAU**, à Monsieur **Jean Louis BELY**, à Monsieur **Gérard LAULIER** et à Monsieur **François MONTANVERT** dont l'aide et les nombreuses conseils pratiques ont contribué à la mise au point des dispositifs expérimentaux.

Enfin, je remercie tous les membres du Laboratoire d'Electrostatique et de Matériaux Diélectriques de Grenoble pour l'accueil qu'ils m'ont réservé et les nombreuses services qu'ils m'ont rendus.

Ce travail a pu être fini grâce à 16 mois de bourses offerts par le **Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche** dans le cadre d'un Réseau Formation-Recherche pour les Pays d'Europe Centrale et Orientale et par le **Conseil Régional Rhône-Alpes** dans le cadre d'un programme TEMPRA. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude.

Introduction

La séparation des matériaux granulaires représente un domaine important d'applications industrielles de l'électrostatique. Le tri des particules ayant des caractéristiques électriques différentes est produit par les forces qui agissent sur les objets chargés ou polarisés dans un champ électrique assez intense. La diversité des installations et des technologies de séparation électrostatique est impressionnante. Ralston [1] est le premier qui a essayé de les présenter dans une monographie publiée en 1961. Depuis, les ouvrages de Olofinskij [2], Lawer et Dyrenforth [3], Mesenjasin [4], Inculet [5], Knoll et Taylor [6], Gill [7], ont reflété la multitude des applications qui ont été développées par divers groupes de recherche, en liaison avec l'industrie. Carpco Inc. [8] et Eriez [9] aux Etats Unis, Mineral Deposits [10.] en Australie, Lurgi [11] en Allemagne, assurent actuellement une large gamme de séparateurs industriels pour la préparation des minéraux, le recyclage des matériaux, la purification des grains.

En Roumanie, les premiers séparateurs électrostatiques industriels pour les minéraux ont été réalisés par l'Institut de Recherche et Développement en Electrotechnique (ICPE) à Bucarest, sous la direction du professeur Florin Tanasescu et du docteur Radu Cramariuc. Au Laboratoire de Champs Electriques Intenses de l'Université Technique de Cluj-Napoca, les professeurs Roman Morar, Alexandru Iuga, Lucian Dascalescu et leurs collaborateurs ont breveté plusieurs installations et procédés de séparation électrostatique [12, 13] qui sont actuellement utilisés pour le recyclage des matériaux métalliques et isolants (déchets de câbles électriques).

Les études théoriques concernant la séparation électrostatique ne sont pas nombreuses. Les plus importantes sont les contributions de Delon [14], Meinander [15], Iuga [16] et Dascalescu [17...19]. Dans la plupart des cas, compte tenu de la multitude des facteurs physiques qui interviennent, la modélisation théorique doit s'accompagner d'une étude expérimentale. De cette façon, les recherches effectuées dans les laboratoires universitaires de Western Ontario, Cagliari ou Cluj-Napoca ont ouvert la voie de développements technologiques remarquables et assurent le progrès continu de ce domaine.

L'objectif de cette thèse est de contribuer à une meilleure compréhension des phénomènes physiques spécifiques aux procédés électrostatiques de séparation des matériaux granulaires, notamment la charge des particules isolantes en champ ionisé. En abordant l'analyse numérique et l'étude expérimentale du comportement des particules conductrices et isolantes dans des champs électriques divers, ce travail a apporté des conclusions utiles à l'amélioration des installations et des technologies de séparation électrostatique.

Dans le premier chapitre, une méthode originale est utilisée pour le calcul numérique de la charge à saturation des particules isolantes en champ ionisé, dans des

conditions spécifiques aux séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante. Un modèle numérique est proposé aussi pour l'analyse de la dynamique du processus de charge d'une particule lorsqu'elle traverse la zone de champ ionisé.

Le deuxième chapitre présente les résultats des mesures effectuées sur une installation qui assure la modélisation expérimentale des conditions de charge des particules dans un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante. L'étude a mis en évidence les facteurs qui influencent la quantité de charge acquise par des particules isolantes situées sur une électrode, en champ ionisé. Les performances de divers types d'électrodes ionisantes sont évaluées par la distribution du courant sur la surface de l'électrode collectrice.

Les équations du mouvement des particules conductrices et isolantes dans un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante sont établies dans le chapitre 3. Les résultats de l'étude expérimentale du comportement des particules conductrices en champ harmonique aussi bien qu'en champ ionisé sont analysés systématiquement en vue de préciser l'influence des divers facteurs physiques sur le champ de décollement des particules et sur la tension de claquage.

Le quatrième chapitre présente quelques applications technologiques de la séparation électrostatique. Pour la récupération du laiton de déchets industriels, les meilleurs résultats ont été obtenus en utilisant une électrode de type matrice de pointes ionisantes qui assure une zone étendue de champ ionisé et améliore ainsi les conditions de charge des particules. L'étude des trajectoires des particules dans une installation industrielle de séparation électrostatique a mis en évidence la multitude des facteurs électriques, mécaniques, de matériau et d'environnement qui influent sur l'efficacité d'un procédé de récupération des matériaux métalliques et isolants de déchets industriels.

Dans le cas du procédé de séparation mica-feldspath-quartz, c'est la forme des particules qui influence leur charge et leurs trajectoires. En raison de la différence entre les forces d'image électrique pour les paillettes de mica d'une part, et pour les granules isométriques de feldspath et quartz d'autre part, le mineral granulé peut être soumis à une opération de séparation électrostatique afin d'augmenter la concentration de mica.

Chapitre 1

Analyse des processus de charge des particules

Chapitre 1. Analyse des processus de charge des particules

1.1. Analyse des processus de charge des particules dans les séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante.....	9
1.1.1. Champ électrique dans les séparateurs électrostatiques.....	9
1.1.2. Caractérisation des mélanges de matériaux granulaires soumis à la séparation en champ électrique.....	11
1.1.3. Modélisation des processus de charge des particules.....	12
1.2. Calcul numérique de la charge à saturation des particules isolantes en champ ionisé.....	16
1.2.1. Méthode de calcul de la charge à saturation pour des particules isolantes à proximité d'une électrode.....	17
1.2.2. Calcul de la charge à saturation des particules sphériques.....	19
1.2.3. Calcul de la charge à saturation des particules cylindriques.....	22
1.3. Influence de la forme de l'onde haute tension sur la charge acquise par des particules isolantes lorsqu'elles traversent une zone de champ ionisé.....	24
1.3.1. Méthode de calcul numérique.....	24
1.3.2. Charge des particules sous tension redressée double-alternance.....	25
1.3.3. Influence du phénomène de répulsion des ions.....	28

1.1. Analyse des processus de charge des particules dans les séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante

Dans les séparateurs électrostatiques, la valeur et le signe portée par la charge des particules détermine les trajectoires de celles-ci. Par conséquent, une meilleure compréhension des phénomènes physiques impliqués dans le processus de charge des particules permettra d'améliorer les performances des installations et des technologies de séparation électrostatique.

L'analyse des processus de charge des particules est centrée sur la séparation électrostatique dans les installations à électrode cylindrique tournante. Ce type de séparateur est approprié pour le tri électrostatique d'une large gamme de mélanges de matériaux granulaires et c'est pour cela qu'il est le plus souvent utilisé.

Une analyse systématique des zones de champ électrique et de leur rôle dans un processus de séparation électrostatique est présentée dans le §1.1.1. La conductivité et la permittivité des particules mais aussi, leurs forme et taille sont les principaux paramètres qui caractérisent les mélanges granulaires soumis à la séparation en champ électrique (§1.1.2). Ces paramètres influencent la charge des particules, d'où l'intérêt de discuter, dans le paragraphe 1.1.3, les limites des divers modèles qui ont été proposés pour l'étude des processus de charge par contact ou en champ ionisé.

1.1.1. Champ électrique dans les séparateurs électrostatiques

Le rôle du champ électrique dans les séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante est double : charger les particules et contrôler les trajectoires de celles-ci. Dans ce type d'installations, le champ est généré par une ou plusieurs électrodes [20, 21] connectés à la haute tension [22], l'électrode cylindrique étant reliée à la terre (Fig. 1.1).

A l'aide d'un vibrotransporteur, les granules à séparer sont déposés sur la surface de l'électrode cylindrique tournante. En traversant la première zone de champ électrique, générée par une ou plusieurs électrodes ionisantes (Fig. 1.2), les particules sont soumises à un intense flux d'ions. La charge acquise par les particules dépend de plusieurs paramètres, le plus important étant la conductivité. Les particules conductrices transfèrent rapidement la charge acquise à l'électrode cylindrique reliée à la terre tandis que les particules isolantes restent chargées et, à cause de la force image électrique, adhèrent à la surface du cylindre.

La deuxième zone de champ électrique (la zone de champ harmonique) est générée par une électrode tubulaire, à grand rayon de courbure. Ce type d'électrode sera appelé "électrode électrostatique". Le champ harmonique ne modifie pas la charge des particules isolantes qui, grâce à la force Coulomb, adhèrent mieux à la surface de l'électrode cylindrique et tournent avec celle-ci. Par contre, en contact avec le cylindre métallique, les particules conductrices acquièrent une charge de même signe que lui et seront attirées, par la force Coulomb, vers l'électrode électrostatique. Les forces électriques et mécaniques détachent les particules conductrices de la surface du cylindre et leurs trajectoires seront influencées par le champ harmonique qui les éloigne vers la droite par rapport au cylindre.

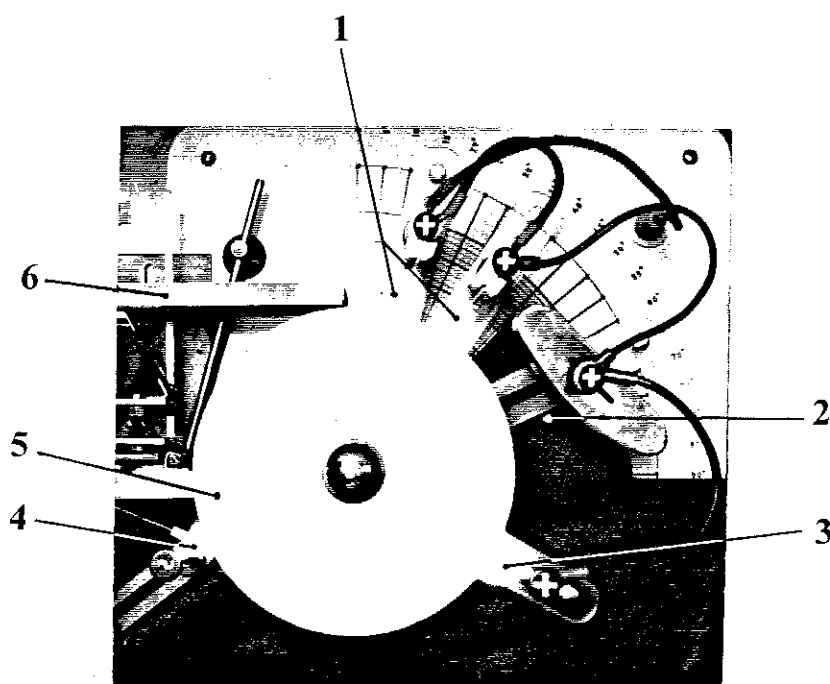


Fig. 1.1. Zones de champ électrique autour de l'électrode cylindrique tournante reliée à la terre. 1. - première zone de champ ionisé (champ ionisé principal); 2. - zone de champ harmonique; 3. - deuxième zone de champ ionisé (champ ionisé auxiliaire); 4. - troisième zone de champ ionisé (champ ionisé de neutralisation); 5. - électrode cylindrique reliée à la terre; 6. - vibrotransporteur.

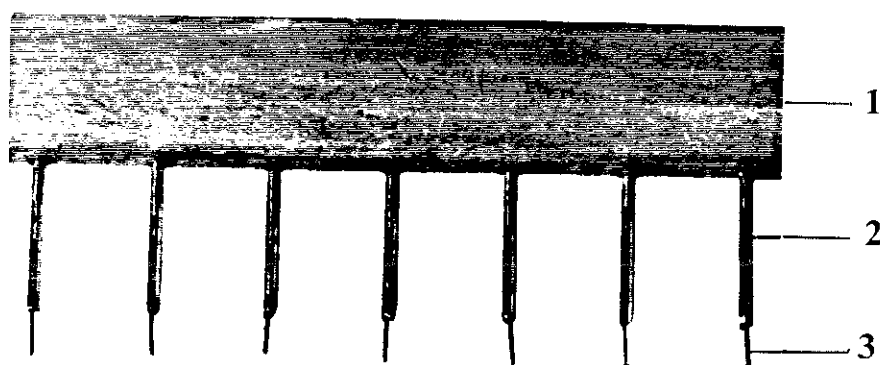


Fig. 1.2. Electrode à pointes ionisantes, utilisée dans les séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante pour générer, par décharge couronne, une zone de charge d'espace. 1. - support métallique à grand rayon de courbure ($\phi = 20$ mm); 2. - support métallique tubulaire de la pointe ionisante; 3. - pointe ionisante en fil de tungstène.

Pour certains mélanges granulaires, une zone de champ ionisé supplémentaire est nécessaire en vue de renforcer la charge acquise par les particules isolantes et la force image électrique qui les maintient sur la surface du cylindre.

Une autre zone de champ ionisé est produite entre l'électrode de neutralisation [23] et l'électrode cylindrique mise à la terre, afin de décharger les particules isolantes et les détacher de la surface du cylindre. La polarité est opposée à celle du champ ionisé principal mais, le plus souvent, l'électrode de neutralisation est alimentée par une tension alternative. La plupart des particules isolantes se détachent de l'électrode cylindrique dans la zone du champ de neutralisation, à cause de la diminution de la charge et de la force image électrique. Celles qui restent collées sur la surface du cylindre sont détachées par une brosse.

Quoique plusieurs zones de champ électrique soient impliquées dans le processus de séparation électrostatique dans les installations à électrode cylindrique tournante, deux cas se présentent : champ ionisé et champ harmonique. C'est pourquoi, l'analyse théorique et l'étude expérimentale seront concentrées sur la charge et les trajectoires des particules en champ ionisé, aussi bien qu'en champ harmonique.

1.1.2. Caractérisation des mélanges de matériaux granulaires soumis à la séparation en champ électrique

Dans les séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante, le tri de deux composants d'un mélange granulaire est réalisé en fonction de la conductivité des particules. Plus l'écart des conductivités des deux composants est grand, plus les résultats de la séparation sont meilleurs. Cette condition est nécessaire mais elle n'est pas suffisante. La taille et la forme des particules sont d'autres paramètres, très importants, du processus de séparation électrostatique (Fig. 1.3).

La taille des particules dans les séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante doit être plus grande que 0,1 mm et ne doit pas dépasser quelques millimètres. Pourtant, des technologies spéciales ont été mises au point pour le tri des matériaux granulaires dont la granulométrie est en dehors des ces limites [8, 24].

La diminution de la dispersion granulométrique de matériau à séparer fait obtenir de meilleurs résultats [25]. Dans le cas de particules isolantes, les dimensions plus proches de la limite inférieure sont un avantage car il est plus facile de les maintenir collées sur la surface de l'électrode cylindrique. Les particules conductrices de petite taille seront plus affectées par la force du champ électrique et leurs trajectoires seront plus éloignées vers la droite par rapport au cylindre.

En ce qui concerne la forme des particules, la diversité présentée par les matériaux granulaires soumis au processus de séparation est très grande. Dans la plupart des cas pratiques, une approximation grossière à des formes sphérique - pour les particules isométriques et cylindrique - pour les particules allongées, est satisfaisante. C'est pour cela que dans l'étude présentée, ces deux formes des particules ont été prises en compte.

Les particules isolantes de forme aplatie adhèrent mieux sur la surface de l'électrode cylindrique grâce au renforcement de la force image électrique [26]. Les particules conductrices de forme allongée peuvent facilement produire le claquage entre les électrodes [27...30] et ce phénomène doit être évité.

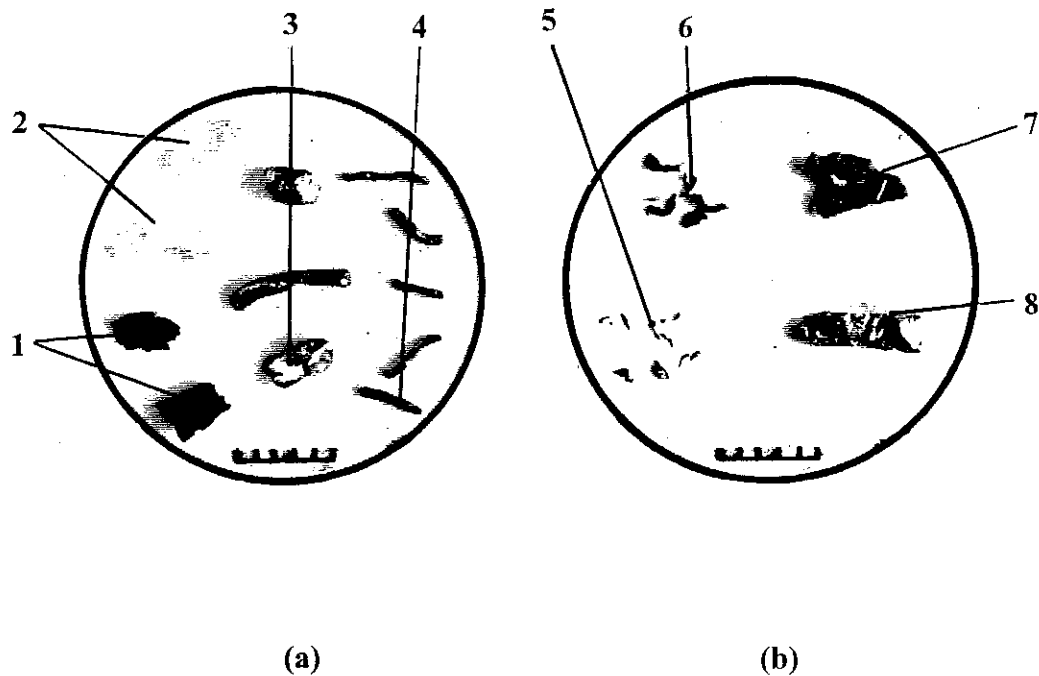


Fig. 1.3. a). Forme et taille des particules d'un mélange granulaire métal-isolant, provenant de déchets de câbles électriques. b). Particules fines adhérant sur la surface des granules de grande taille. 1. - particule de polychlorure de vinyle (PVC); 2. - particule de polyéthylène (PE); 3. - granule de cuivre; 4. - fils de cuivre; 5. - particules fines de cuivre; 6. - particules fines de PVC; 7. - particule fine de cuivre sur un granule de PVC; 8. - particule fine de PE sur un granule de cuivre.

1.1.3. Modélisation des processus de charge des particules

Le flux d'ions est le plus efficace procédé de charge des particules, en champ ionisé et la décharge couronne est le plus convenable moyen de produire le champ ionisé. Aussi, pendant les dernières années, des études systématiques ont été effectuées en vue d'améliorer les performances des électrodes ionisantes [20, 21] et de modéliser le processus de charge des particules par flux d'ions [31...38].

Le premier modèle théorique du processus de charge des particules en champ ionisé a été proposée par Pauthenier [39]. Les hypothèses qu'il a utilisé correspondent aux conditions de charge des particules dans les précipitateurs électrostatique:

- la particule est de forme sphérique;
- le mouvement de la particule est libre, à grande distance d'électrodes;
- la particule tourne autour de son axe;
- la charge acquise par la particule est uniformément distribuée sur sa surface.

L'équation établie par Pauthenier pour caractériser le processus de charge d'une particule sphérique, en champ ionisé, dans les hypothèses énoncées, est:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{\tau} Q_s \left(1 - \frac{Q}{Q_s} \right)^2 \quad (1.1)$$

Q_s est la charge à saturation et τ est la constante de temps, donnée par la relation $\tau = \frac{4\epsilon_0}{kq}$; q est la densité de la charge d'espace et k la mobilité des ions. La valeur de la charge à saturation Q_s peut être calculée avec la formule:

$$Q_s = 4\pi\epsilon_0 \frac{3\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} R^2 E_0 \quad (1.2)$$

où E_0 est l'intensité du champ électrique non - affecté par la présence de la particule, ϵ_r est la permittivité de la particule et R est le rayon de celle-ci.

Les conditions de charge des particules dans les séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante sont différentes par rapport aux précipitateurs électrostatiques: les granules à trier ne se trouvent plus à grande distance des électrodes, mais en contact avec celles-ci. Une approche théorique du processus de charge dans ces conditions a été réalisé par Meinander [15] pour le demi-ellipsoïde de révolution (Fig. 1.4):

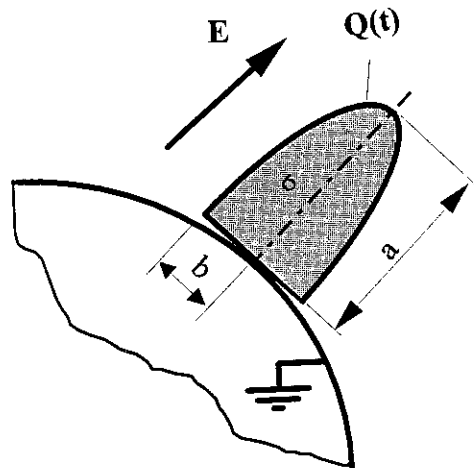


Fig. 1.4. Paramètres du processus de charge en champ ionisé, d'un demi-ellipsoïde de révolution en contact avec l'électrode cylindrique reliée à la terre.

La particule de conductivité σ , est soumise aux deux mécanismes de charge : flux d'ions et induction électrostatique (par contact). Selon l'étude de Meinander, le processus global de charge est caractérisé par l'équation:

$$Q(t) = \pi b^2 q(t) \quad (1.3)$$

ou $q(t)$ obéit à l'équation:

$$\frac{dq(t)}{dt} = -\frac{1}{\tau} q(t) + \frac{\left[\sigma - \frac{J}{E}(1 + \chi) \right]}{1 + N\chi} E \quad (1.4)$$

où χ est la susceptibilité de la particule, N est le facteur de dépolarisation (fonction de demi-axes a et b de la particule) et J est la densité de courant. La constante de temps τ est donnée par la relation:

$$\tau = \frac{\varepsilon_0(1 + N\chi)}{\sigma N + \frac{J}{E}[1 - N]} \quad (1.5)$$

La charge à saturation correspond à:

$$Q_s = \frac{\sigma - \frac{J}{E}(1 + \chi)}{\sigma N + \frac{J}{E}(1 - N)} \pi \varepsilon_0 b^2 E \quad (1.6)$$

Pour une particule isolante ($\sigma \approx 0$) le processus de charge par flux d'ions est dominant et la charge à saturation est:

$$Q_s = -\frac{1 + \chi}{1 - N} \pi \varepsilon_0 b^2 E \quad (1.7)$$

Dans le cas d'une particule conductrice ($\sigma \approx \infty$) la charge est acquise par contact (induction électrostatique):

$$Q_m = \frac{1}{N} \pi \varepsilon_0 b^2 E \quad (1.8)$$

Des formules analytiques ont été établies pour quelques formes symétriques des particules conductrices, chargées par contact avec une électrode dans un champ électrique sans charge d'espace [40].

Par exemple, la charge d'une sphère est:

$$Q_m = \frac{2}{3} \pi^3 \varepsilon_0 R^2 E \quad (1.9)$$

et la charge d'un cylindre couché:

$$Q_m = 2\pi \varepsilon_0 R L E \quad (1.10)$$

Les relations analytiques de calcul de la charge acquise par les particules par contact ou par flux d'ions, peuvent être utilisées seulement pour quelques formes de particules, et dans certaines hypothèses particulières. Pour une forme quelconque de particule, chargée en champ harmonique ou en champ ionisé, seul le calcul numérique permet d'évaluer la charge.

1.2. Calcul numérique de la charge à saturation des particules isolantes en champ ionisé

La charge des particules en champ ionisé a été étudiée récemment en liaison avec des applications de l'électrostatique parmi lesquelles la purification des gaz industriels [41...43] ou le poudrage électrostatique [44...47]. Dans le cas du processus de séparation électrostatique des matériaux granulaires sur des installations à électrode cylindrique tournante [48...51], les particules sont en contact avec le cylindre métallique relié à la terre (Fig. 1.5).

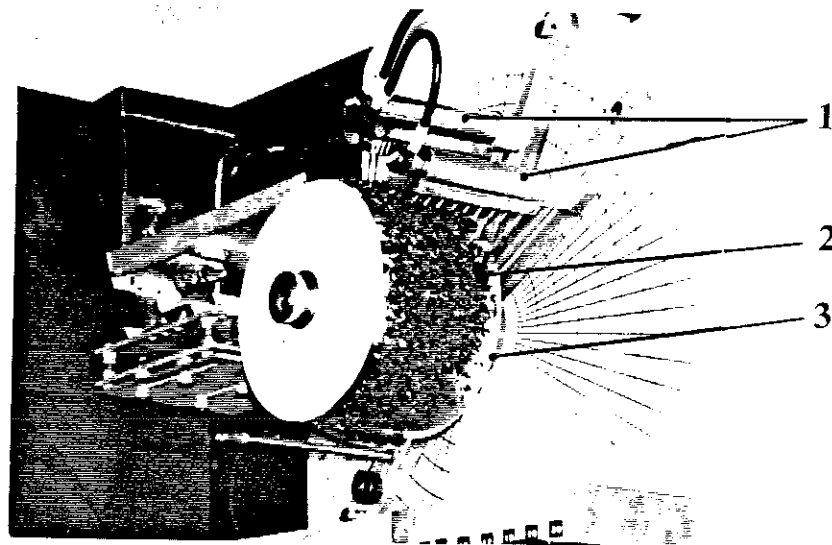


Fig. 1.5. Particules sur la surface de l'électrode cylindrique, dans un séparateur électrostatique 1.- électrode ionisante; 2.- particules de PVC; 3.- électrode cylindrique relié à la terre.

La formule établie par Pauthenier pour la charge à saturation d'une particule sphérique ne peut être utilisée à cause de la non-uniformité du champ, lorsque la particule et l'électrode sont très proche. Une méthode de calcul de la charge à saturation des particules posées sur une électrode ou à proximité de celle-ci est présentée dans le §1.2.1. Les calculs ont été effectués pour des particules sphériques (§ 1.2.2) et aussi, pour des particules cylindriques (§ 1.2.3). Plusieurs valeurs de la permittivité ont été prises en compte.

1.2.1. Méthode de calcul de la charge à saturation pour des particules isolantes à proximité d'une électrode

Le processus de charge d'une particule sphérique isolante en champ ionisé est présenté schématiquement sur la Fig. 1.6. Un vibrotransporteur dépose les particules sur la surface de l'électrode cylindrique tournante qui les porte vers la zone de champ ionisé.

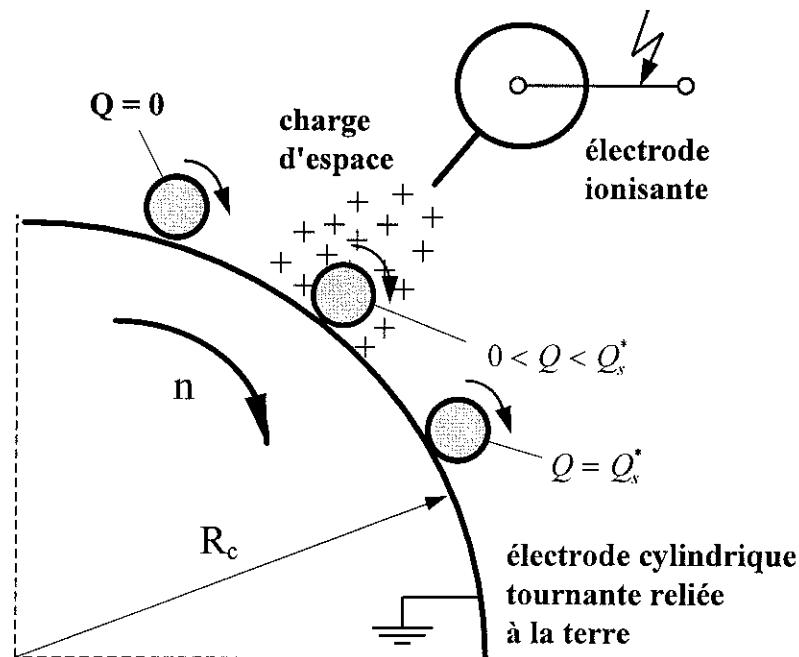


Fig. 1.6. Principe du processus de charge des particules isolantes en champ ionisé, dans un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante.

Les hypothèses suivantes sont nécessaires pour établir un modèle physique simplifié du processus de charge d'une particule sphérique située dans le champ ionisé d'un séparateur électrostatique (Fig. 1.7a) :

1. la particule est située sur une électrode plane;
2. il n'y a pas de transfert de charge électrique entre la particule et l'électrode;
3. à cause du mouvement de roulement de la particule sur la surface du cylindre, la charge acquise est uniformément distribuée sur la surface de celle-ci;
4. l'intensité du champ électrique E_0 et la densité de charge d'espace au niveau de l'électrode où la particule se trouve, sont constantes;
- 5 la non-uniformité du champ électrique produite par la présence de la charge d'espace est négligeable;
6. les ions suivent la direction des lignes du champ (l'effet des autres forces que la force Coulomb est négligeable).

La charge Q acquise par la particule et uniformément distribuée sur la surface avec la densité q_s , est représentée par une charge ponctuelle, placée dans le centre de la sphère (Fig. 1.7b).

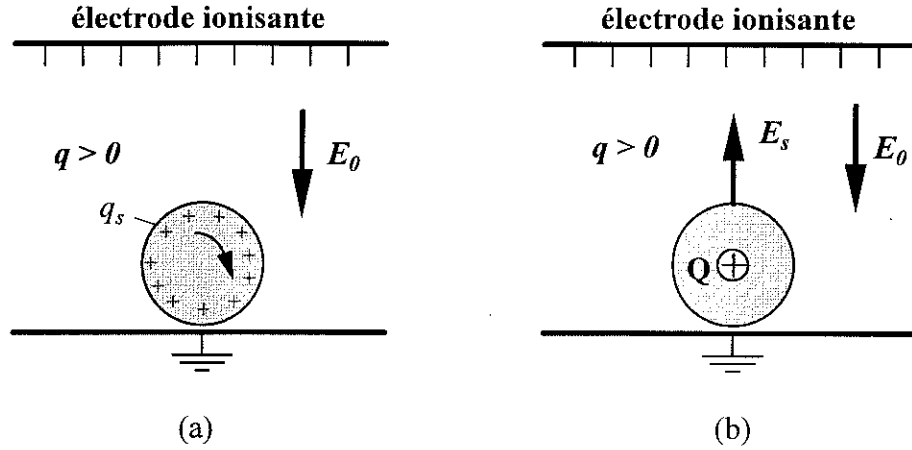


Fig. 1.7. Hypothèses pour le calcul de la charge à saturation Q_s^* d'une particule sphérique isolante, en contact avec une électrode dans un champ ionisé (E_0 - intensité du champ, q - densité de la charge d'espace). a) - la particule tourne autour de son axe et la charge acquise est uniformément distribuée sur la surface, avec la densité q_s ; b) - la charge de la particule est concentrée en une charge ponctuelle, placée dans le centre de la sphère.

Le processus de charge de la particule est décrit par l'équation:

$$\frac{dQ}{dt} = - \int_{(S)} kqE_r dS \quad (1.11)$$

ou S est la surface de la sphère soumise au flux d'ions (la surface sur laquelle les ions peuvent s'accumuler) et E_r est la composante radiale du champ total E . Le champ E est obtenu par la superposition du champ extérieur E_{ext} (le champ en présence de la particule non - chargée) et le champ E_s produit par la charge Q acquise par la particule.

La charge à saturation Q_s^* de la particule posée sur l'électrode s'obtient quand $\frac{dQ}{dt} = 0$, c'est-à-dire, lorsque le courant de charge est nul. Dans ce cas, la surface S devient nulle - il n'y a aucun point sur la surface de la sphère où E_r soit dirigé vers la particule. E_r peut être calculé par la superposition de la composante radiale du champ extérieur E_{ext} et le champ E_s dont la direction est radiale:

$$E_r = E_{\text{ext}} + E_s \quad (1.12)$$

Pour un point P sur la surface de la sphère (Fig. 1.8a), E_{ext} est dirigé vers la sphère ($E_{\text{ext}} < 0$) et sa valeur est constante. Par contre, le champ E_s est positif ($E_s > 0$) et sa valeur croît avec la charge acquise par la particule. La valeur maximale du champ E_{ext} s'obtient sur le pôle B de la sphère (Fig. 1.8b) donc, le processus de charge cesse quand:

$$E_s = -E_{\text{ext}}(B) \quad (1.13)$$

Cette condition signifie $E_r = 0$ et le courant de charge, aussi bien que la surface S deviennent nuls.

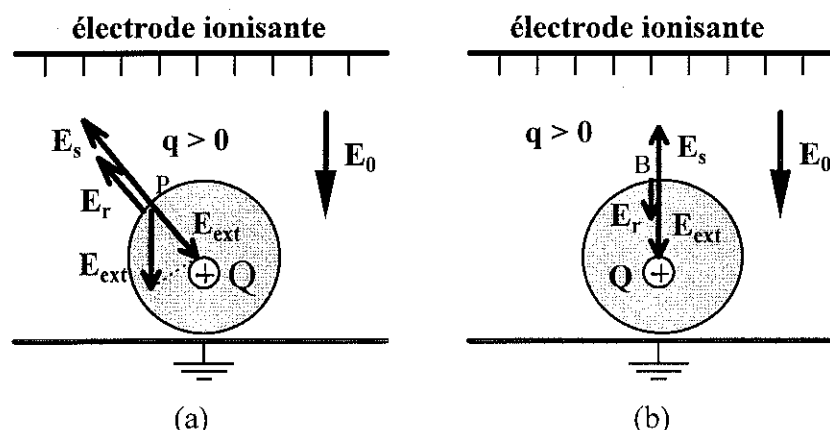


Fig. 1.8. Calcul de la composante radiale du champ total E_r , à la surface de la particule sphérique chargée en champ ionisé avec la charge Q , pour un certain point P (a) et pour le pôle B de la sphère (b).

Basé sur le raisonnement présenté ci-dessus, le calcul numérique de la composante radiale du champ total E_r sur le pôle B , permet l'évaluation de la charge à saturation Q_s^* de la particule posée sur une électrode. Le même raisonnement peut être utilisé aussi pour l'évaluation de la charge à saturation Q_s^x d'une particule située à une distance "x" de l'électrode [50].

1.2.2. Calcul de la charge à saturation des particules sphériques

Le logiciel "Charge Simulation Program" (CSP), élaboré par le professeur Levin et ses collaborateurs de Worcester Polytechnic Institute [52], est un outil efficace d'analyse des champs électriques bi-dimensionnels [53, 54]. L'utilisateur a la possibilité de dessiner la configuration géométrique des électrodes, ainsi que la forme de la particule. Il peut imposer les potentiels des électrodes et la charge portée par la particule. L'avantage du CSP est qu'il permet une évaluation directe de la charge des particules en contact avec une électrode et de la force électrique globale agissant sur un objet quelconque situé dans le champ.

La Figure 1.9 présente le modèle utilisé pour l'étude du cas où une particule sphérique isolante de rayon $R = 1,5$ mm et de permittivité ϵ_r , est située dans le champ électrique produit entre deux électrodes planes situées à une distance $s = 30$ mm. E_{CSP} et R_{CSP} sont les valeurs du champ et du rayon de la particule dans ce modèle qui consiste en deux électrodes disque dont le diamètre est 2,5 fois la distance " s_{CSP} " entre les électrodes ($s_{CSP} = 1$ - unité relative de longueur). L'électrode inférieure est reliée à la terre ($V = 0$) et l'électrode supérieure est connectée à une source haute tension ($V = 100$), de sorte que $E_{CSP} = 100$. La particule sphérique de rayon $R_{CSP} = (R/s) s_{CSP} = 0,05 s_{CSP}$ est placée à différentes distances "x" de l'électrode inférieure. Quelques valeurs ont été prises en compte pour la permittivité ϵ_r de la particule.

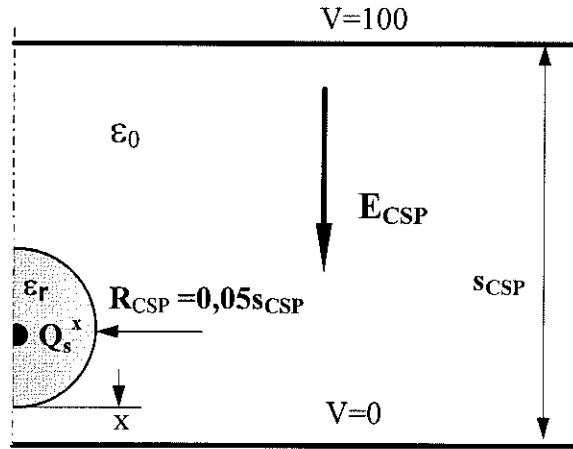


Fig.1.9. Configuration géométrique avec symétrie de révolution, utilisée pour le calcul de la charge de saturation Q_s^x d'une particule isolante sphérique, située à une distance "x" de l'électrode affectée d'un champ électrique uniforme (ϵ_r - permittivité relative de la particule; ϵ_0 - permittivité du milieu).

La charge Q acquise par la particule a été concentrée dans le centre, dans une petite sphère conductrice de rayon $r = 0,001s$ (charge ponctuelle). Deux valeurs, Q_1 et Q_2 ont été imposées pour la charge Q et le logiciel CSP a calculé les valeurs du champ électrique sur le pôle B, E_1 et E_2 (à cause de la symétrie, le champ au pôle B n'a que composante radiale E_r). Compte tenu de la dépendance linéaire entre Q et E ($Q \sim R^2 E$), la charge à saturation Q_s^x qui correspond à $E_r(B) = 0$, s'obtient avec la relation:

$$Q_s^x = k_Q^s \frac{E_1 Q_2 - E_2 Q_1}{E_1 - E_2} \quad (1.14)$$

ou k_Q^s est le facteur d'échelle CSP:

$$k_Q^s = \frac{E}{E_{CSP}} \left(\frac{R}{R_{CSP}} \right)^2 \quad (1.15)$$

Les calculs effectués pour la particule sphérique mettent en évidence la croissance de la charge à saturation Q_s^x avec la décroissance de la distance x entre la particule et l'électrode (Fig. 1.10). Plusieurs valeurs de la permittivité ϵ_r ont été prises en compte et les calculs ont été effectués aussi pour une particule conductrice. Le calcul n'a pas pris en considération la possibilité d'apparition des claquages entre la particule et l'électrode de polarité opposée.

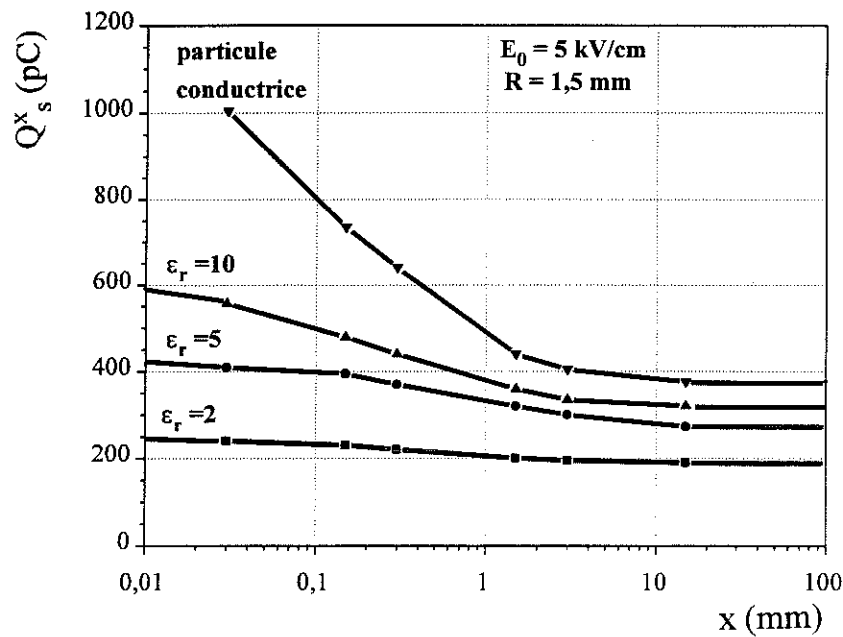


Fig. 1.10. Charge à saturation Q_s^* d'une particule isolante sphérique ($R = 1,5$ mm, permittivité ϵ_r), située à une distance " x " d'une électrode plane, dans un champ ionisé d'intensité $E_0 = 5$ kV/cm.

Le Tableau 1.1 présente une comparaison entre les valeurs calculées avec CSP pour la charge à saturation d'une particule sphérique posée sur une électrode (Q_s^*) et pour la charge de la même particule située à grande distance des électrodes (Q_s') dans un champ électrique donné (5 kV/cm). La charge à saturation Q_s^* calculée avec CSP est en bon accord avec la valeur Q_s calculée avec la formule de Pauthenier (1.2).

La charge à saturation Q_s^* de la particule isolante posée sur une électrode, est comparée aussi avec la charge Q_m d'une particule conductrice de même taille, en contact avec une électrode. Le rapport Q_s^*/Q_m croît avec la permittivité de la particule.

Tableau 1.1. Comparaison entre les valeurs calculées avec CSP pour la charge à saturation acquise en champ ionisé d'intensité $E_0 = 5$ kV/cm, par une particule isolante sphérique ($R = 1,5$ mm) posée sur une électrode (Q_s^*) et placée à demi distance entre les électrodes (Q_s'). Les valeurs Q_s sont calculées avec la formule de Pauthenier.

ϵ_r	2	5	10	∞
Q_s^* [pC]	239	410	557	1004
Q_s' [pC]	191	273	319	374
Q_s [pC]	187	268	312	375
Q_s^*/Q_s'	1,25	1,5	1,75	2,68
Q_s^*/Q_m	1,16	2,00	2,71	4,88

Note: $Q_m = 20,67\epsilon_0 R^2 E_0 = 205,5$ pC ($R = 1,5$ mm, $E_0 = 5$ kV/cm).

1.2.3. Calcul de la charge à saturation des particules cylindriques

La méthode de calcul présentée dans le § 1.2.1 peut être appliquée aussi pour le calcul numérique de la charge à saturation des particules cylindriques posées sur l'électrode, ou située à proximité de celle-ci.

La configuration géométrique utilisée pour le calcul de la charge à saturation Q_s^x d'une particule cylindrique placée à une distance "x" de l'électrode a une symétrie plane (Fig. 1.11).

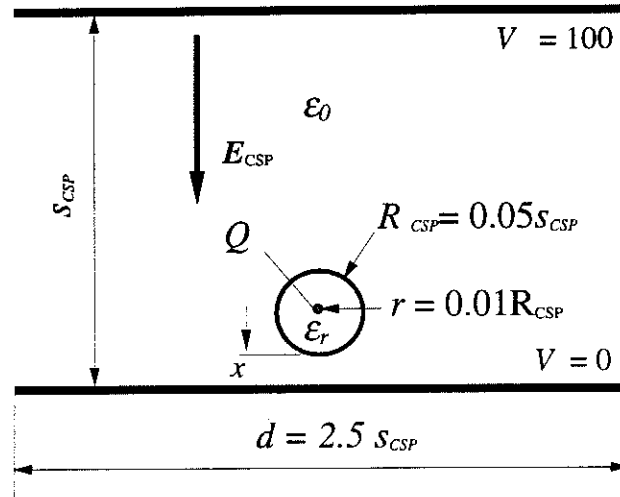


Fig. 1.11. Configuration géométrique avec symétrie plane, utilisée pour le calcul numérique de la charge à saturation Q_s^x d'une particule isolante cylindrique, placée à une distance "x" d'une électrode, dans un champ ionisé. (ϵ_r - permittivité relative de la particule; ϵ_0 - permittivité du milieu).

Les électrodes ont été modélisées par deux plaques de largeur $d = 2,5s_{CSP}$ ($s_{CSP} = 1$ - distance entre les électrodes) et la particule cylindrique de rayon $R_{CSP} = 0,05s_{CSP}$ a été placée à proximité de l'électrode inférieure, à une distance "x". Le potentiel de l'électrode supérieure est 100 (reliée à une source haute tension) et celui de l'électrode inférieure est 0 (reliée à la terre). La charge Q acquise par la particule, uniformément distribuée sur sa surface, a été concentrée sur un fil conducteur de rayon $r = 0,01R_{CSP}$, placée dans l'axe du cylindre. Les calculs ont été effectués pour plusieurs valeurs de la permittivité ϵ_r .

L'évaluation de la charge à saturation Q_s^x a été réalisée en imposant les valeurs $Q1$ et $Q2$ [C/m] pour la charge Q sur le fil conducteur et en calculant avec CSP les valeurs correspondantes $E1$ et $E2$ de l'intensité du champ électrique sur le pôle B de la particule:

$$Q_s^x = Lk_Q^c \frac{E1Q2 - E2Q1}{E1 - E2} \quad (1.16)$$

ou k_Q^s est le facteur d'échelle CSP:

$$k_Q^c = \frac{E}{E_{CSP}} \frac{R}{R_{CSP}} \quad (1.17)$$

et L est la longueur de la particule cylindrique, $E_{CSP} = 100$ et $R_{CSP} = 0.05$ (Fig. 1.11).

Comme pour les particules sphériques, la charge à saturation de la particule cylindrique isolante croît lorsque la particule s'approche de l'électrode (Fig. 1.12). Elle croît aussi avec la valeur de la permittivité relative ϵ_r . La valeur maximale s'obtient pour la particule conductrice. Le calcul n'a pas pris en considération la possibilité d'apparition des claquages entre la particule et l'électrode de polarité opposée.

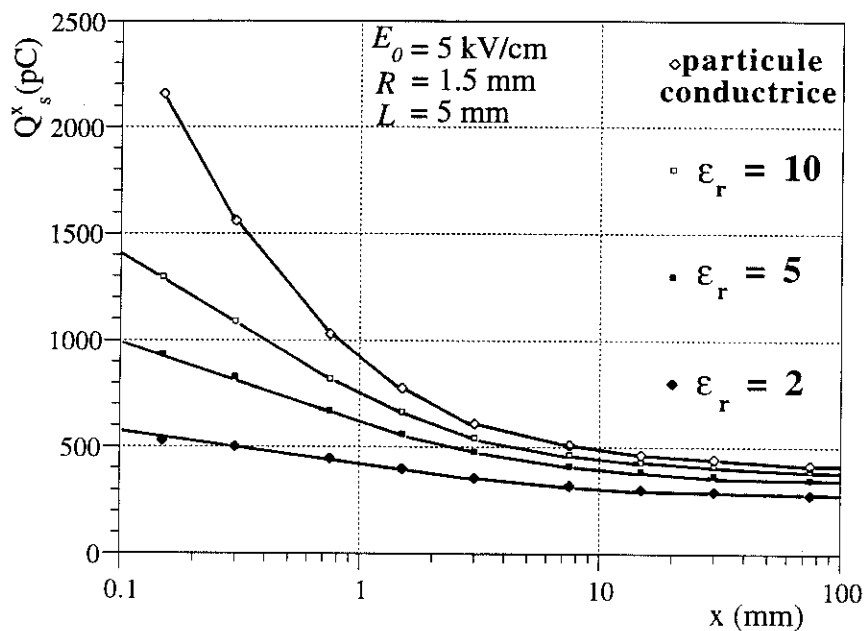


Fig. 1.12. Charge à saturation Q_s^* de la particule isolante cylindrique ($R = 1,5$ mm, $L = 5$ mm, permittivité relative ϵ_r), située à une distance " x " d'une électrode plane, dans un champ ionisé d'intensité $E_0 = 5$ kV/cm.

1.3. Influence de la forme de l'onde haute tension sur la charge acquise par des particules isolantes lorsqu'elles traversent une zone de champ ionisé

Plusieurs facteurs influencent la valeur de la charge acquise par une particule isolante dans le champ ionisé d'un séparateur à électrode cylindrique tournante. Un des plus importants est la durée du passage dans la zone de champ ionisé (temps de charge t_{charge}). Pour un certain régime de fonctionnement du séparateur, le temps de charge est bien défini: il est relié à la vitesse, au rayon de l'électrode cylindrique tournante ainsi qu'à l'extension de la zone de décharge couronne [37].

La charge des particules dépend aussi d'autres facteurs, parmi lesquels les caractéristiques d'émissivité des électrodes ionisants, la forme de l'onde et la valeur de la haute tension [34].

Des études antérieures sur la charge des particules en champ ionisé prennent en compte des conditions spécifiques aux diverses applications [31, 35, 55, 56]. Comme la plupart des générateurs haute tension pour les séparateurs électrostatiques utilisent le redressement double-alternance [22] il est très important d'étudier le processus de charge des particules dans ces conditions.

En utilisant une méthode de calcul numérique basée sur l'équation de Pauthenier (§ 1.3.1) l'évolution de la charge d'une particule sphérique peut être évaluée par rapport à la charge à saturation (§ 1.3.2). Quelques aspects concernant l'influence du phénomène de répulsion des ions sur le processus de charge sont présentés dans le § 1.3.3.

1.3.1. Méthode de calcul numérique

Le processus de charge des particules dans un séparateur électrostatique n'est pas continu. Dans le cas d'une alimentation haute tension redressée double-alternance, il y a des intervalles de temps où le champ extérieur est moins fort que le champ généré par la charge déjà acquise par la particule. Par conséquent, durant ces intervalles de temps, le processus de charge cesse et la charge reste constante (Fig. 1.13).

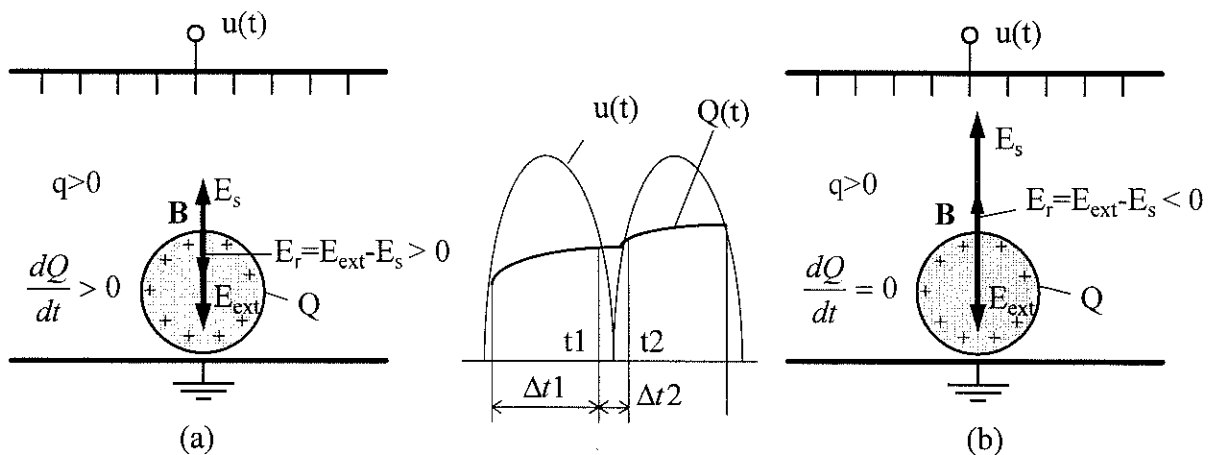


Fig. 1.13. La particule se charge ($dQ/dt > 0$) quand le champ résultant E_r sur le pôle B est positif (a); le processus de charge cesse ($dQ/dt = 0$) quand $E_r \leq 0$ (b).

Le modèle mathématique simplifié du processus de charge est basé sur les hypothèses suivantes:

- ① le champ électrique dans la zone de charge est uniforme;
- ② la densité de charge d'espace est constante et son effet sur l'intensité du champ est négligeable;
- ③ la charge acquise par la particule est uniformément distribuée sur la surface;
- ④ le champ électrique varie dans le temps comme $u(t) = U_m |\sin(\omega t)|$, ω : pulsation de la haute tension.
- ⑤ la charge à saturation Q_s est proportionnelle au champ $E = E_m |\sin(\omega t)|$ donc fonction de temps t ($Q_s = Q_s^m |\sin(\omega t)|$), où Q_s^m est la charge qui serait acquise par la particule dans un champ ionisé d'intensité E_m , après un temps de charge infini long.

Dans ces conditions l'évolution de la charge d'une particule sphérique en champ ionisé pourrait être exprimée par l'équation [39]:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{\tau Q_s(t)} [Q_s(t) - Q(t)]^2 \quad (1.18)$$

ou τ est la constante de temps de demi-charge.

En remplaçant l'expression de $Q_s(t)$ dans l'équation de charge on obtient:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{\tau} Q_s^m |\sin(\omega t)| \left[1 - \frac{Q}{Q_s^m |\sin(\omega t)|} \right]^2 \quad (1.19)$$

Avec un changement de variable, la relation (1.19) devient:

$$\frac{d(Q / Q_s^m)}{dt} = \frac{1}{\tau} |\sin(\omega t)| \left[1 - \frac{Q / Q_s^m}{|\sin(\omega t)|} \right]^2 \quad (1.20)$$

L'équation différentielle (1.20) décrit l'évolution de la charge pendant les intervalles de charge Δt_1 (Fig. 1.13), quand $Q_s(t) = Q_s^m |\sin(\omega t)| > Q(t)$. Si $Q(t) \geq Q_s^m |\sin(\omega t)|$ (Δt_2 , Fig. 1.13) le processus de charge cesse, la charge Q reste constante, donc:

$$\frac{d(Q / Q_s^m)}{dt} = 0 \quad (1.21)$$

1.3.2. Charge des particules sous tension redressée double-alternance

Dans un séparateur électrostatique usuel, la zone de champ ionisé s'étend sur un arc d'environ 18° à la surface de l'électrode cylindrique tournante dont la vitesse typique est 100 tr/min. Une particule entraînée par cette électrode traverse la zone de champ ionisé en

$$t_{charge} = \frac{18}{360} \frac{60}{100} = 0,03s$$

L'équation différentielle (1.20) a été intégrée numériquement pour $t \in (0, t_{\text{charge}})$, $\omega = 314 \text{ rad/s}$ et $\tau = (0,1; 1; 10) \text{ ms}$. Le logiciel écrit en TurboPascal utilise une procédure Runge-Kutta du quatrième ordre, avec pas d'intégration variable. Les résultats des calculs sont présentés sur la figure 1.14.

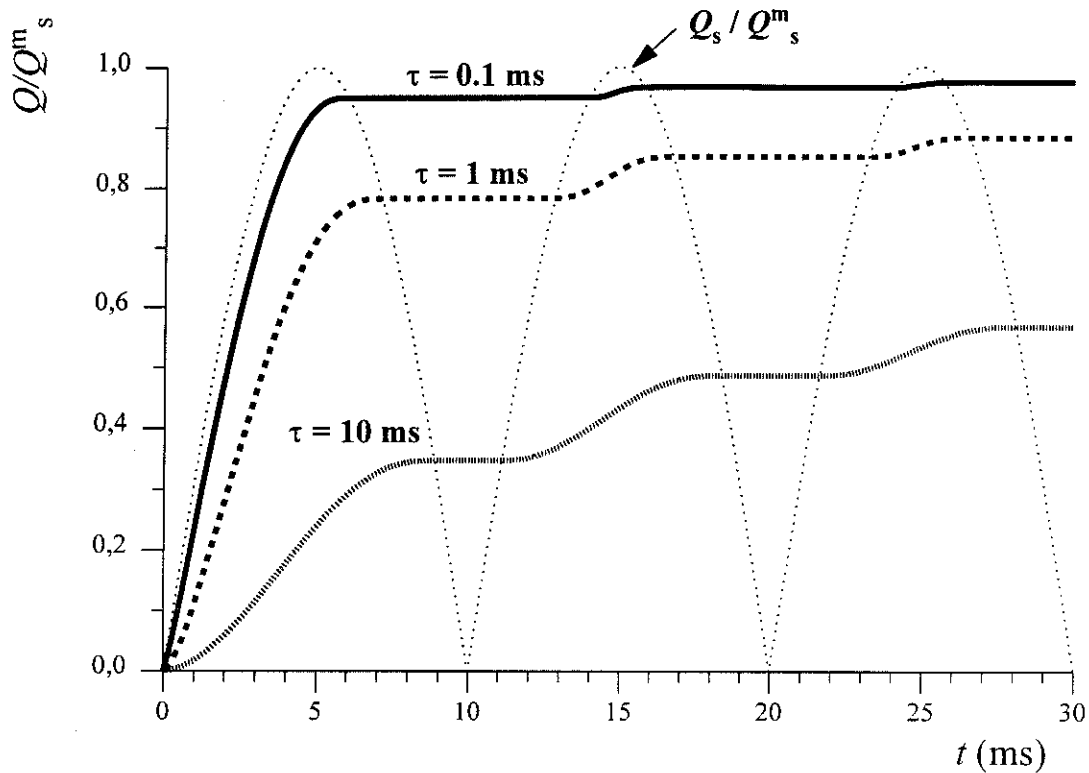


Fig. 1.14. Evolution de la charge d'une particule sphérique, en champ ionisé produit par une électrode reliée à une source haute tension redressée double-alternance. Le paramètre des courbes est la constante de temps de demi-charge τ .

En fonction du type d'électrodes ionisantes, la valeur réelle de la constante de temps τ est située dans l'intervalle (1...10) ms. Comme τ est donnée par la relation: $\tau = 4\epsilon_0 \frac{E}{J}$, pour accroître la charge acquise par la particule à la fin du processus de charge dans la zone de champ ionisé, il faut augmenter le champ électrique (croît la charge à saturation) mais aussi, le courant (le processus de charge est plus rapide).

Pour une valeur $\tau = 0,1 \text{ ms}$ le courant de charge $\frac{dQ}{dt}$ est très fort et le processus de charge s'effectue pratiquement pendant la première demi-alternance (Fig. 1.15). Dans ce cas, la particule quitte la zone de champ ionisé avec une charge assez rapprochée de la charge à saturation Q_s^m (Fig. 1.16). Plus la constante τ croît, plus le rapport Q / Q_s^m entre la charge acquise par la particule et la charge à saturation, diminue.

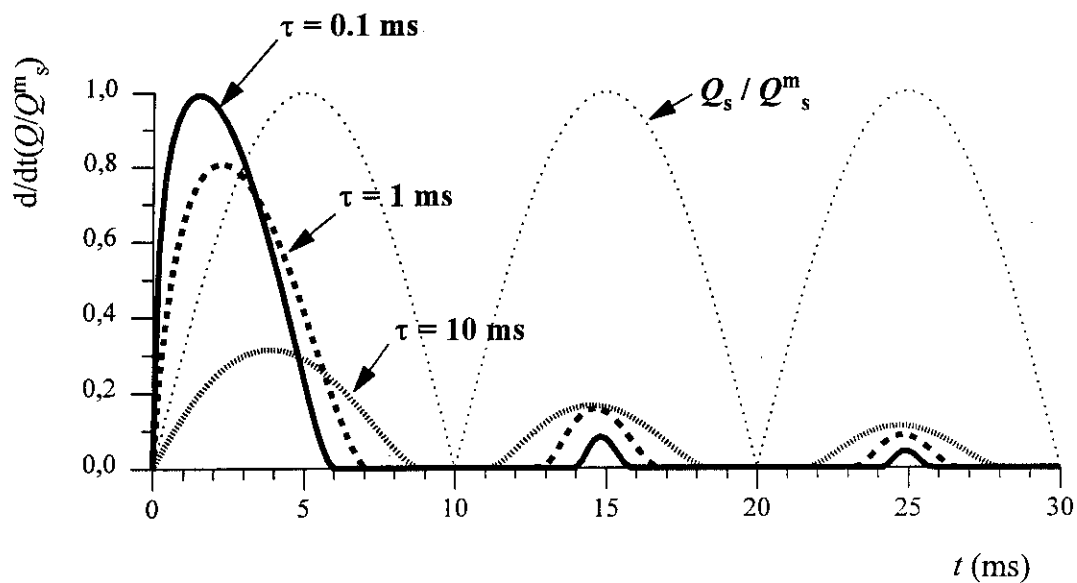


Fig. 1.15. Evolution du courant de charge de la particule sphérique en champ ionisé, pour trois valeurs de la constante de temps τ . Le champ ionisé est produit par une électrode portée à une tension redressée double-alternance.

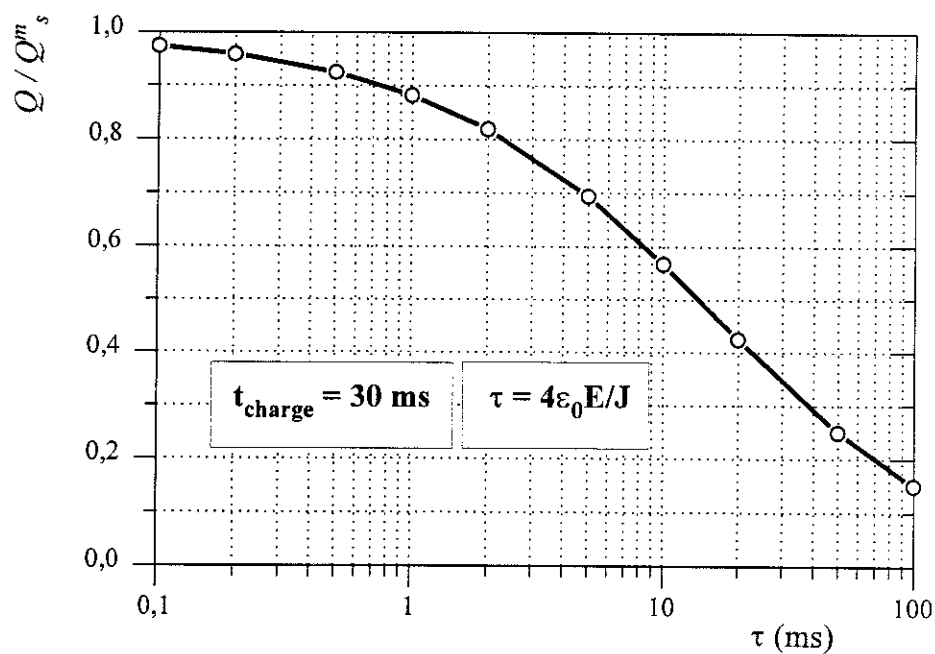


Fig. 1.16. Influence de la constante de temps τ du processus de charge, sur la charge d'une particule sphérique dans un champ ionisé produit par une électrode reliée à une source haute tension redressée double-alternance.

Les calculs montrent que la charge acquise par la particule dans la zone de champ ionisé d'un séparateur électrostatique croît avec:

- l'intensité du champ électrique E qui produit l'augmentation de la charge à saturation Q_s ;
- l'augmentation de la densité de courant J , due à la diminution de la constante de temps τ ,

En pratique, l'intensité du champ est limitée par le claquage entre les électrodes et la densité de courant dépend des caractéristiques des électrodes. Dans les cas où des valeurs de la charge au dessus des limites imposées par le champ et par la densité du courant admissibles sont nécessaires, l'augmentation du temps de charge s'impose comme la seule solution. Diverses configurations d'électrodes ont été proposées pour assurer une zone étendue de champ ionisé et, par conséquent, des temps de charge supérieurs.

1.3.3. Influence du phénomène de répulsion des ions

Le processus de charge des particules dans un séparateur électrostatique alimenté par une haute tension redressée double-alternance est discontinu. Durant les intervalles de temps Δt_2 (Fig. 1.13), le champ extérieur est inférieur au champ produit par la particule chargée, les ions d'autour de la particule sont repoussés [34] et la charge acquise par la particule reste constante. Une zone libre de charge d'espace va entourer la particule (fig. 1.17) et ce phénomène de répulsion des ions peut retarder la reprise du processus de charge et diminuer ainsi la charge acquise par la particule dans la zone de champ ionisé.

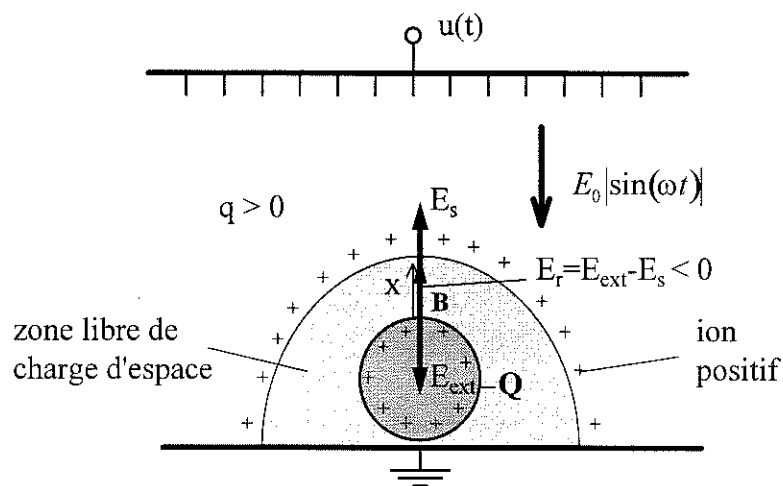


Fig. 1.17. Zone libre de charge d'espace autour d'une particule chargée, due à la diminution du champ extérieur au-dessous du champ produit par la charge déjà acquise par la particule.

Le processus de charge cesse à la fin de l'intervalle Δt_1 (Fig. 1.13) quand le champ résultant sur le pôle B de la particule est nul:

$$E_{rB}(t_1) = -E_{SB}(t_1) + E_{0B}|\sin(\omega t_1)| = 0 \quad (1.22)$$

ou $E_{SB}(t_1)$ est le champ électrique créé sur le pôle B par la charge acquise par la particule jusqu'à $t = t_1$ et E_{0B} est le champ électrique sur le pôle B avec la particule non-chargée. Pour $t > t_1$, la charge de la particule reste constante $Q(t) = Q(t_1)$.

Le mouvement aller-retour des ions sur la direction du pôle B de la particule est produit par l'action du champ résultant E_r . La vitesse est donnée par l'équation:

$$\frac{dx}{dt} = -kE_r(x, t) \quad (1.23)$$

ou k est la mobilité des ions et

$$E_r(x, t) = -E_s(x, t_1) + E(x)|\sin(\omega t)| \quad (1.24)$$

où $E_s(x, t_1)$ est le champ créé à la distance x du pôle B, par la charge $Q(t_1)$.

Le logiciel de calcul de l'évolution de la charge a été modifié pour introduire en calcul le phénomène de répulsion des ions. Pour comparaison avec les résultats du § 1.3.2 on a utilisé les mêmes valeurs pour t_{charge} , ω et τ . Les différences entre les résultats des deux méthodes de calcul sont de l'ordre de grandeur de 0,1 %. Donc, dans les hypothèses énoncées, la charge des particules dans un champ ionisée généré par des électrodes portées à une tension redressée double-alternance n'est pas sensiblement modifiée par le phénomène de répulsion des ions.

Conclusions du chapitre 1.

1. La charge des particules isolantes sphériques et cylindriques posées sur ou à proximité d'une électrode affectée d'un champ ionisé peut être évaluée par calcul numérique. La méthode proposée utilise le logiciel "Charge Simulation Program" pour l'analyse numérique du champ électrique.
2. A cause de la non-uniformité du champ électrique produite par la présence de l'électrode à proximité de la particule, la charge à saturation croît avec la diminution de la distance entre la particule et l'électrode. Cette croissance est plus importante pour les particules de permittivité élevée.
3. Quand la particule sphérique est placée à grande distance des électrodes, la charge à saturation calculée numériquement avec la méthode proposée est en bon accord avec la valeur obtenue avec la formule de Pauthenier.
4. L'équation de charge d'une particule sphérique, établie par Pauthenier, peut être utilisée pour modéliser le processus de charge en champ ionisé, en tenant compte de la forme de l'onde haute tension. Lorsque les électrodes sont alimentées par une tension redressée, double-alternance, l'évolution de la charge n'est pas continue. Chaque fois que le champ extérieur devient plus faible que le champ produit par la charge déjà acquise par la particule, le processus de charge cesse temporairement.
5. La charge acquise par une particule dans la zone de champ ionisé d'un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante croît avec l'intensité du champ électrique et aussi, avec la densité de courant. Le temps de charge et donc, la charge de la particule en sortant de la zone de champ ionisé peut être modifié par l'extension de la zone de décharge couronne, en utilisant plusieurs électrodes ou une électrode de type matrice de pointes ionisantes.
6. Le phénomène de répulsion des ions, produit une zone libre de charge d'espace autour de la particule chargée, lorsque le champ extérieur devient inférieur au champ généré par la charge déjà acquise par celle-ci. L'influence sur la charge finale acquise par la particule n'est pas sensible si le système d'électrodes est alimenté par une haute tension redressée double-alternance.

Chapitre 2

Etude expérimentale de la charge des particules isolantes en champ ionisé

Chapitre 2. Etude expérimentale de la charge des particules isolantes en champ ionisé

2.1. Caractérisation des électrodes ionisantes.....	33
2.1.1. Distribution de la densité de courant sur la surface de l'électrode collectrice.....	33
2.1.2. Evaluation de l'efficacité des électrodes ionisantes selon la distribution de courant.....	36
2.1.3. Influence de la configuration géométrique des électrodes ionisantes sur la distribution du champ électrique.....	40
2.2. Mesure de la charge des particules isolantes pour différentes configurations d'électrodes ionisantes.....	46
2.2.1. Dispositif expérimental pour l'étude de la charge des particules dans un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante reliée à la terre....	46
2.2.2. Charge des particules isolantes dans le champ ionisé produit par des électrodes à pointes ionisantes.....	48
2.2.3. Evaluation de l'efficacité des électrodes ionisantes en fonction de la charge acquise par les particules.....	52
2.3. Mesure de la charge des particules isolante en champ ionisé pour différentes valeurs des paramètres expérimentaux.....	56
2.3.1. Influence de l'amplitude de la haute tension et de la distance entre les électrodes.....	57
2.3.2. Influence de la vitesse de rotation de l'électrode cylindrique et de la vitesse de la particule.....	60
2.3.3. Influence des propriétés des matériaux, des conditions environnementales et du revêtement isolant de l'électrode cylindrique.....	62

2.1. Caractérisation des électrodes ionisantes

La dynamique du processus de charge des particules isolantes dans la zone de champ ionisé d'un séparateur électrostatique dépend fortement de la densité de charge d'espace. Des nouveaux types d'électrodes à pointes ionisantes [20, 21, 37] ont été proposés afin d'augmenter la densité de charge d'espace et lui assurer une distribution plus uniforme.

L'étude de la distribution de la densité de courant dans le plan d'une électrode collectrice [57...61] est une méthode efficace pour l'évaluation de la densité de charge créée par une électrode ionisante. Des mesures ont été réalisées pour plusieurs configurations d'électrodes à pointes ionisantes (§ 2.1.1) et ont permis l'évaluation de l'efficacité de celles-ci (§ 2.1.2). Les effets produits par la modification de certains paramètres géométriques ont été expliqués en utilisant les résultats de l'analyse numérique du champ électrique (§ 2.1.3).

2.1.1. Distribution de la densité de courant sur la surface de l'électrode collectrice

La distribution de la densité de courant produit par une électrode à pointes ionisantes face à une électrode collectrice plane a été étudiée en utilisant le dispositif expérimental présenté sur la Fig. 2.1.

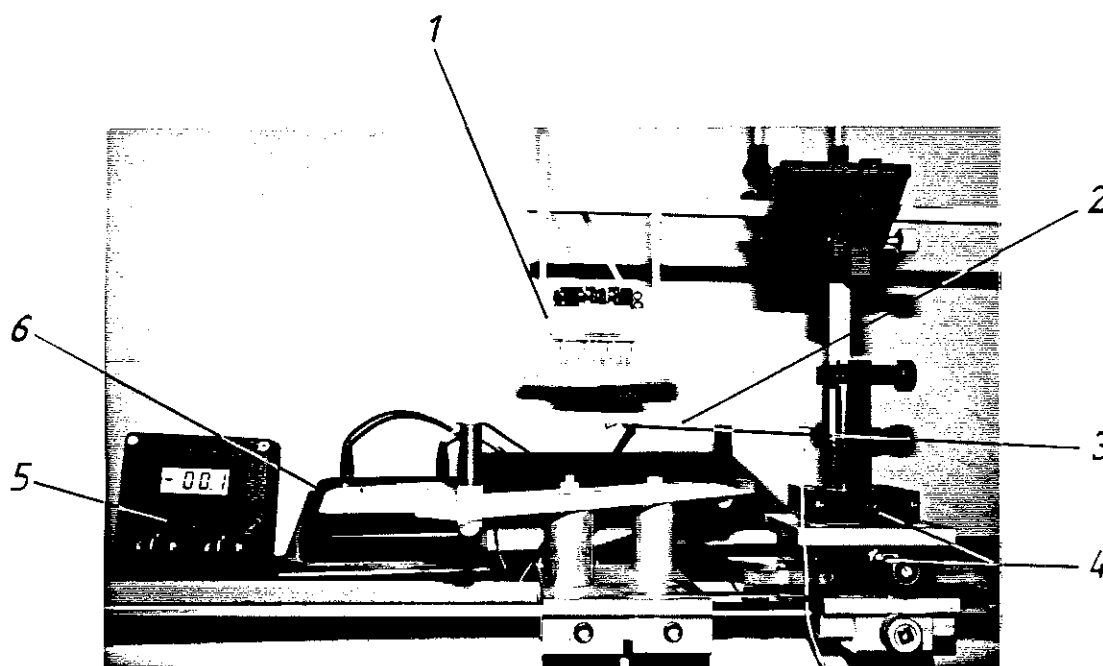


Fig. 2.1. Dispositif expérimental pour la mesure de la densité de courant dans un plan collecteur face à une électrode ionisante. 1) - électrode ionisante; 2) - électrode plane reliée à la terre; 3) - sonde de mesure du courant; 4) - dispositif micrométrique de translation, en coordonnées x-y; 5) - nano-ampèremètre pour la mesure du courant dans la sonde; 6) - micro-ampèremètre pour la mesure du courant total.

L'électrode à pointes ionisantes est reliée à une source haute tension SPELLMAN, réversible et réglable dans le domaine (0...50) kV. L'électrode plane reliée à la terre est une plaque de circuit imprimé, double couche, (dimensions 200x200 mm). La couche supérieure est reliée à la terre par un micro-ampèremètre pour la mesure du courant total de l'électrode ionisante et l'autre est reliée à la terre. La distance entre les deux électrodes est réglable dans le domaine (0...50) mm. La sonde de mesure est un fil de cuivre émaillé, de diamètre 0,5 mm, fixé au centre de l'électrode plane (Fig. 2.2). La sonde est reliée à la terre par un nano-ampèremètre pour la mesure de la densité locale du courant avec la relation: $J = I_{\text{sonde}} / A_{\text{sonde}}$, I_{sonde} étant le courant mesuré et A_{sonde} étant la surface de la sonde. La plaque est fixe et l'électrode ionisante est mobile. Elle peut se déplacer en deux directions perpendiculaires x-y, grâce à un dispositif micrométrique. L'axe "y" est défini par les projections des pointes ionisantes sur le plan collecteur.

La distribution du courant a été mesurée d'abord pour une électrode à quatre pointes ionisantes en ligne (Fig. 2.2). Les pointes ionisantes sont tubulaires (diamètre extérieur 0,8 mm et diamètre intérieur 0,5 mm) fixés dans des pièces isolantes en polyéthylène, à 15 mm l'un de l'autre ($p = 15 \text{ mm} = \text{pas de l'électrode}$).

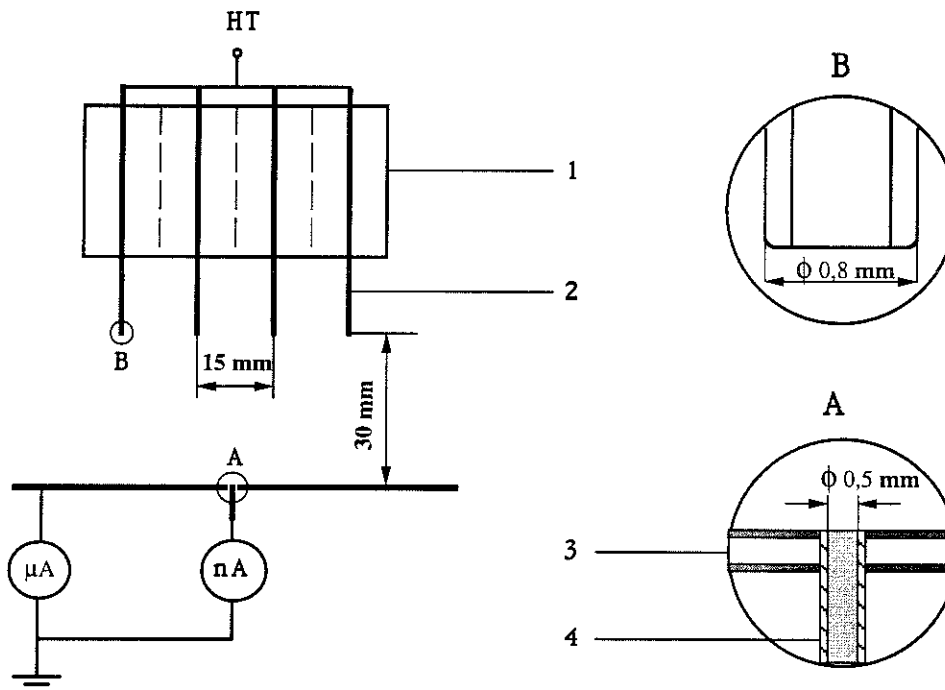


Fig. 2.2. Schéma de mesure de la distribution de la densité de courant produit par une électrode à quatre pointes ionisantes en ligne. 1) - support isolant en polyéthylène; 2) - pointe ionisante tubulaire (pas de l'électrode $p = 15 \text{ mm}$); 3) - électrode plane reliée à la terre; 4) - sonde de mesure.

La distribution de la densité de courant sur la surface de l'électrode collectrice a été étudiée pour une distance entre les électrodes $s = 30 \text{ mm}$ (s - distance entre les pointes ionisantes et l'électrode plane). L'électrode ionisante est portée à une tension négative de 21 kV et le courant total mesuré est égal à $120 \mu\text{A}$. A l'aide du dispositif micrométrique, la densité de courant a été mesurée pour une surface de $125 \times 40 \text{ mm}$, symétriquement placée par rapport aux pointes ionisantes (Fig. 2.3).

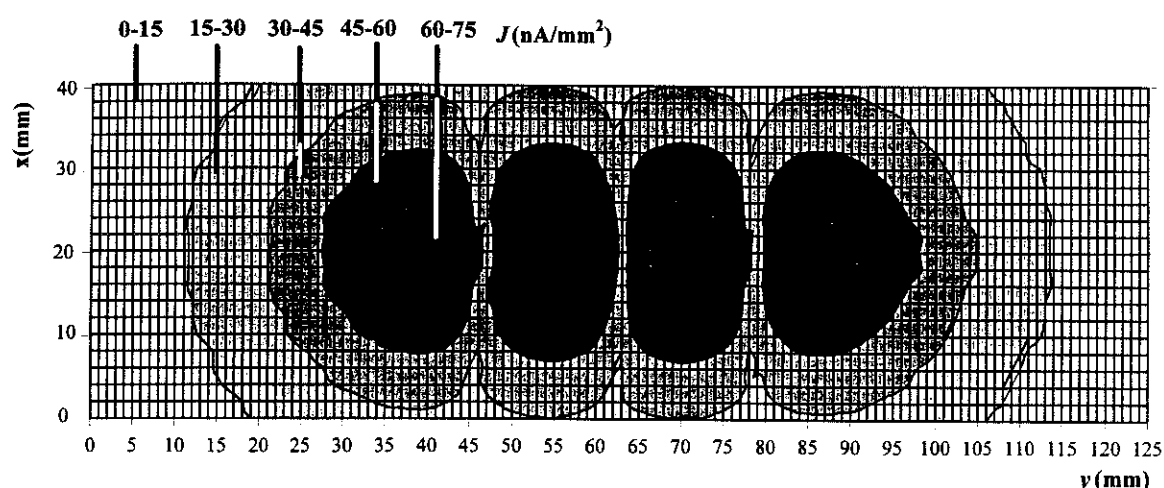


Fig. 2.3. Distribution de la densité de courant sur la surface de l'électrode collectrice face à une électrode à quatre pointes ionisantes tubulaires, placées à $x = (40-55-70-85)$ mm.

La deuxième expérience, a été effectuée avec une électrode à deux lignes de pointes ionisantes décalées d'un demi-pas. La distance entre l'électrode ionisante et l'électrode plane, aussi bien que la polarité et la valeur de la haute tension sont restées les mêmes ($s = 30$ mm, $U = 21$ kV, polarité négative). Le courant a augmenté jusqu'à $140 \mu\text{A}$.

Pour ce type d'électrode ionisante, les mesures ont mis en évidence des zones très étroites, placée a demi-distance entre les deux lignes de pointes ionisantes, où la densité de courant est très faible, pratiquement nulle (Fig. 2.4 et Fig. 2.5). Des mesures similaires ont été effectuées pour une électrode à trois lignes de pointes ionisantes (Annexe 1).

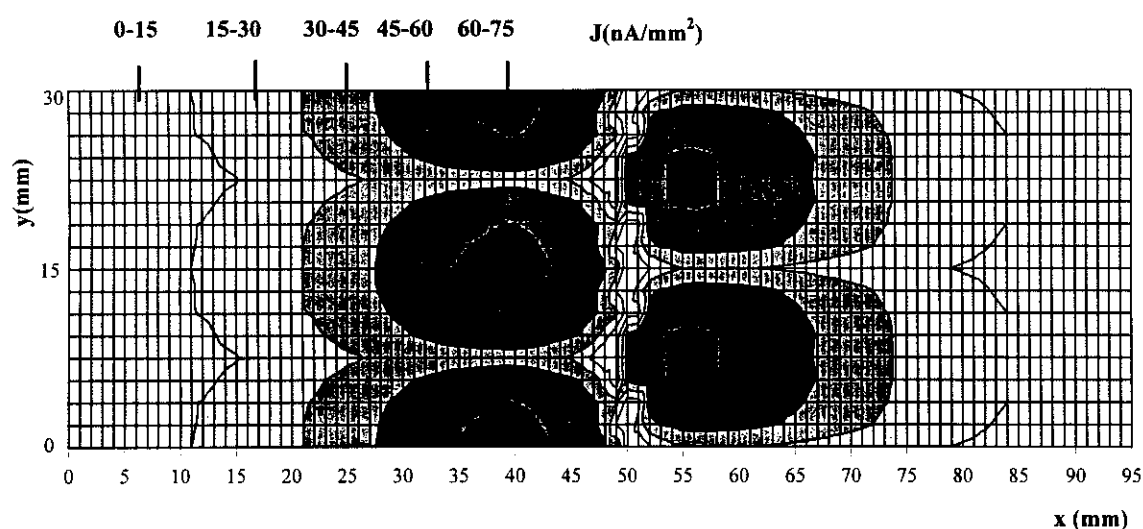


Fig. 2.4. Distribution de la densité de courant dans le plan d'une électrode collectrice face à une électrode à deux lignes de pointes ionisants décalées d'un demi-pas.

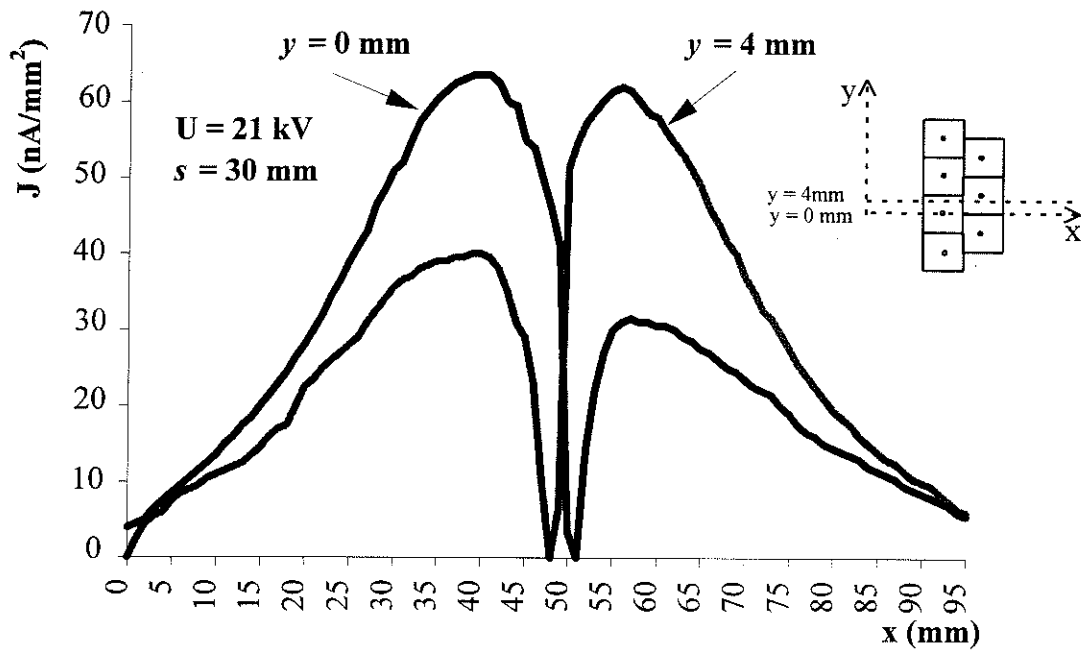


Fig. 2.5. Distribution de la densité de courant sur l'axe "x" et sur une parallèle à celui, dans le plan d'une électrode collectrice face à une électrode à deux lignes de pointes ionisantes.

2.1.2. Evaluation de l'efficacité des électrodes ionisantes selon la distribution de courant

Dans les séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante, les trajectoires des particules dans la zone de champ ionisé sont perpendiculaires à l'axe "y" définie par la projection d'une ligne de pointes ionisantes sur l'électrode cylindrique tournante. La charge acquise par les particules en traversant cette zone de champ ionisé dépend de la valeur moyenne de la densité de charge d'espace le long de ces trajectoires. Les valeurs moyennes J_m de la densité de courant le long des diverses trajectoires des particules pourraient donc être utiles pour l'évaluation de l'efficacité de divers types d'électrodes ionisantes. Sur la Fig. 2.6 ces valeurs sont représentées en fonction de la position "y" de la trajectoire, pour deux modèles d'électrodes à quatre pointes ionisantes en ligne.

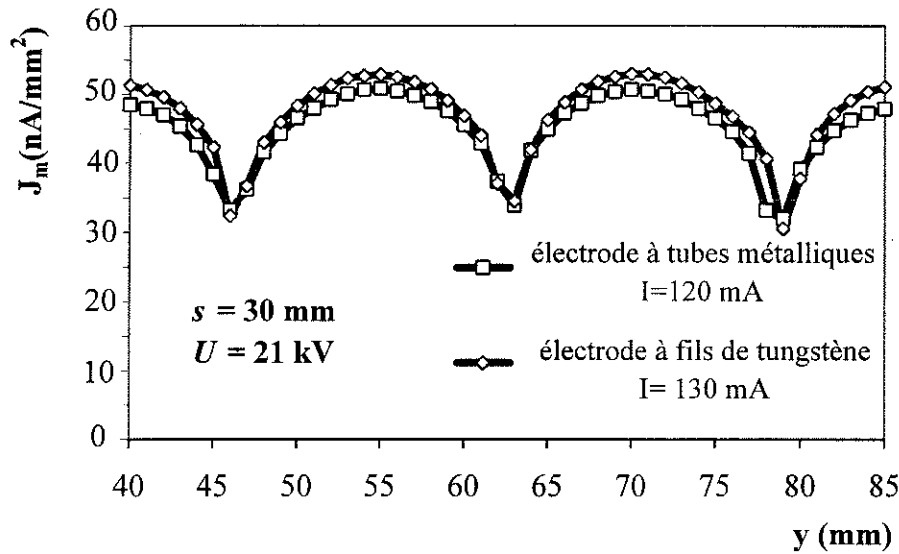


Fig. 2.6. Comparaison entre les valeurs moyennes de la densité de courant calculées sur des directions perpendiculaires à celle des pointes ionisantes, pour les électrodes ionisantes à tubes métalliques et à fils de tungstène.

Les valeurs moyennes de la densité de courant sont calculées pour une zone de 20 mm de part et d'autre de la ligne des pointes ionisantes. Les mesures ont été effectuées dans des conditions similaires ($s = 30$ mm, $U = 21$ kV, polarité négative). Le courant généré par l'électrode à fils de tungstène ($I = 130$ μ A) est supérieur au courant de l'autre électrode ($I = 120$ μ A) ce qui explique la petite différence entre les valeurs moyennes de la densité de courant.

La configuration des électrodes à une ligne de pointes ionisantes n'est pas très avantageuse en ce qui concerne l'uniformité sur l'axe "y" de la valeur moyenne de la densité de courant. Le coefficient de non-uniformité de la distribution de la densité de courant, K_{nu} , est défini comme:

$$K_{nu} = J_{m,max}/J_{m,min} \quad (2.1)$$

où $J_{m,max}$ est la valeur moyenne maximale et $J_{m,min}$ la valeur moyenne minimale de la densité du courant sur la direction des trajectoires des particules. On obtient $K_{nu} = 1,53$ pour l'électrode à tubes métalliques et $K_{nu} = 1,74$ pour l'électrode à fils de tungstène.

Des résultats meilleurs ont été obtenus avec des électrodes à deux lignes de pointes ionisantes décalées d'un demi-pas (Fig. 2.7).

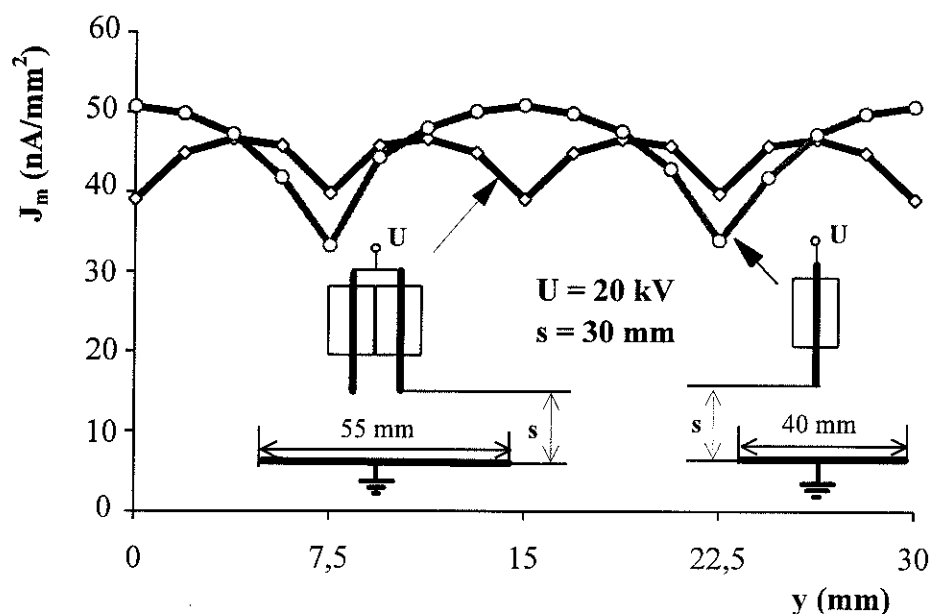


Fig. 2.7. Valeur moyenne de la densité de courant sur la direction perpendiculaire sur la ligne des pointes ionisantes, pour des électrodes à une ligne et a deux lignes de pointes ionisantes tubulaires, décalées d'un demi-pas.

L'électrode à deux lignes de pointes ionisantes offre une zone de décharge couronne plus étendue et de meilleures conditions de charge du point de vue de l'uniformité de la distribution de la densité de courant. Le coefficient de non-uniformité vaut $K_{nu} = 1,17$ pour cette électrode. Le même coefficient calculé pour l'électrode ionisante à trois lignes de pointes ionisantes vaut $K_{nu} = 1,35$ (Annexe 1).

Pour plusieurs types d'électrodes ionisantes, les pointes ionisantes sont fixés sur une pièce métallique à grand rayon de courbure, appelée "élément électrostatique". C'est pourquoi, l'étude expérimentale de la distribution de la densité de courant a porté aussi sur une électrode à pointes ionisantes, prévue avec un tel élément (Fig. 2.8). La présence de l'élément électrostatique à une distance "h" de pointes ionisantes modifie sensiblement les caractéristiques courant-tension de l'électrode (Fig. 2.9).

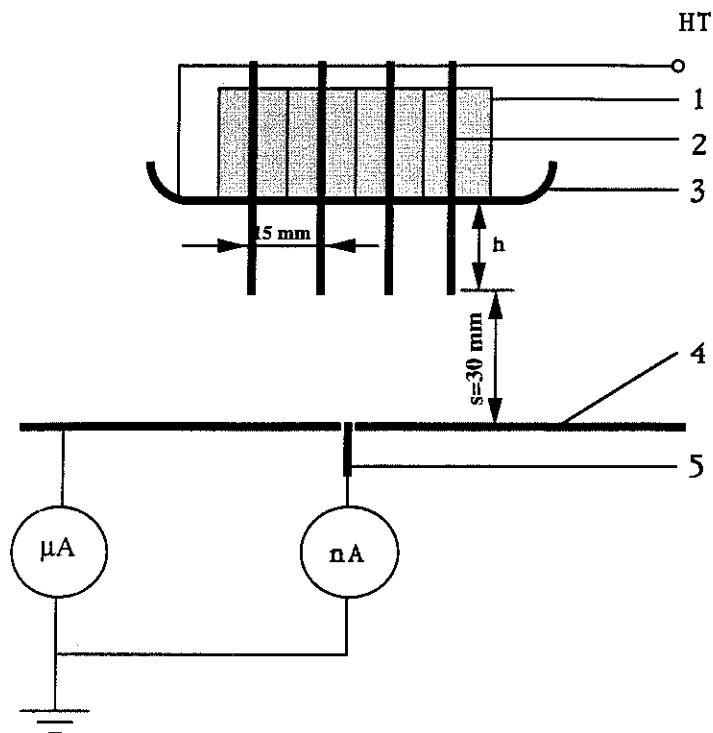


Fig. 2.8. Schéma de mesure de la distribution de la densité de courant pour une électrode à quatre pointes ionisantes et élément électrostatique. 1. - support isolant; 2. - pointe ionisante tubulaire; 3. - élément électrostatique; 4. - électrode plane reliée à la terre; 5. - sonde de mesure du courant.

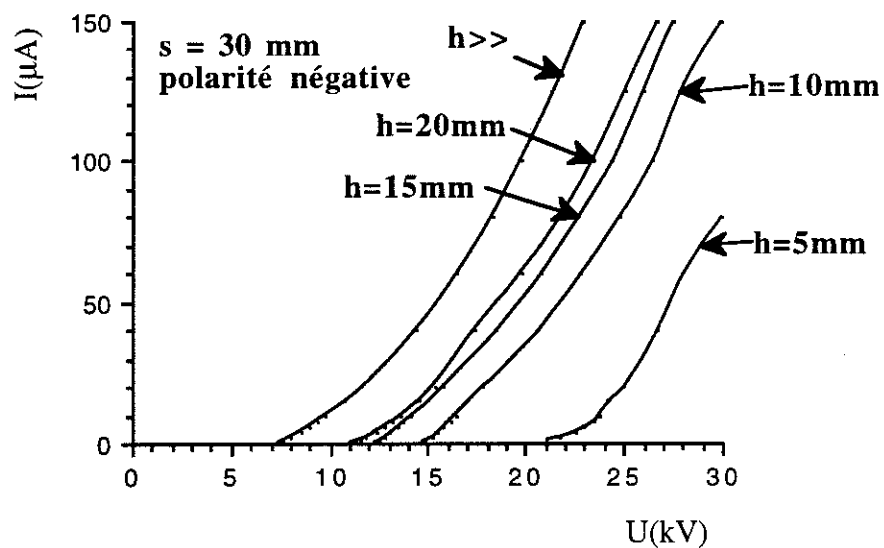


Fig. 2.9. Caractéristiques $I(U)$ de l'électrode à quatre pointes ionisantes tubulaires, en présence d'un élément électrostatique placée à une distance " h " de pointes ionisantes.

La diminution de la distance h augmente la tension de seuil couronne et réduit le courant produit à une tension donnée. Cet effet est constaté sur le graphe donné sur la Fig. 2.10.

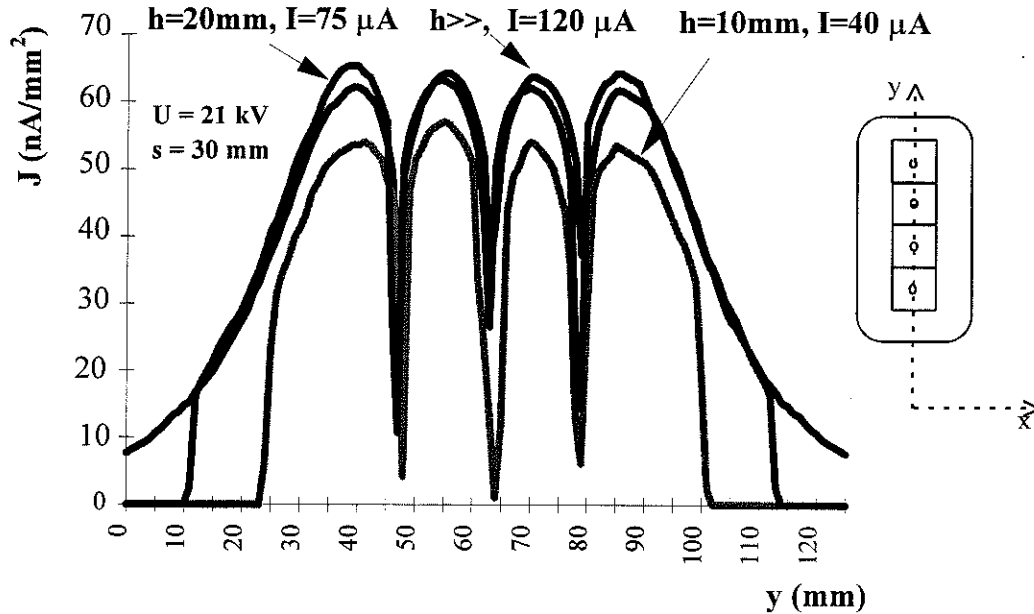


Fig. 2.10. Distribution de la densité de courant dans l'axe y du système d'électrodes, pour diverses distance " h " entre l'élément électrostatique et les pointes ionisantes.

Les mesures montrent que, dans les conditions de l'expérience (Fig. 2.8), la diminution de " h " au-dessous de 20 mm produit une décroissance rapide de la densité de courant, aussi bien que de la largeur de la zone de champ ionisé.

2.1.3. Influence de la configuration géométrique des électrodes ionisantes sur la distribution du champ électrique

Les résultats des expériences présentées dans le § 2.1.2 ont montré que les caractéristiques d'une électrode à pointes ionisantes sont sensiblement modifiées par la présence d'un élément électrostatique. La tension de seuil couronne, le courant et la distribution de la densité de courant sur la surface de l'électrode collectrice dépendent de la distance " h " entre l'élément électrostatique et les pointes ionisantes.

Le logiciel CSP a permis l'analyse numérique du champ électrique pour une configuration géométrique pointe ionisante-plan, en présence d'un élément électrostatique (Fig. 2.11). La pointe ionisante tubulaire a été modélisée par un cylindre creux, avec les bords arrondis à un rayon $r = \frac{R}{4}$.

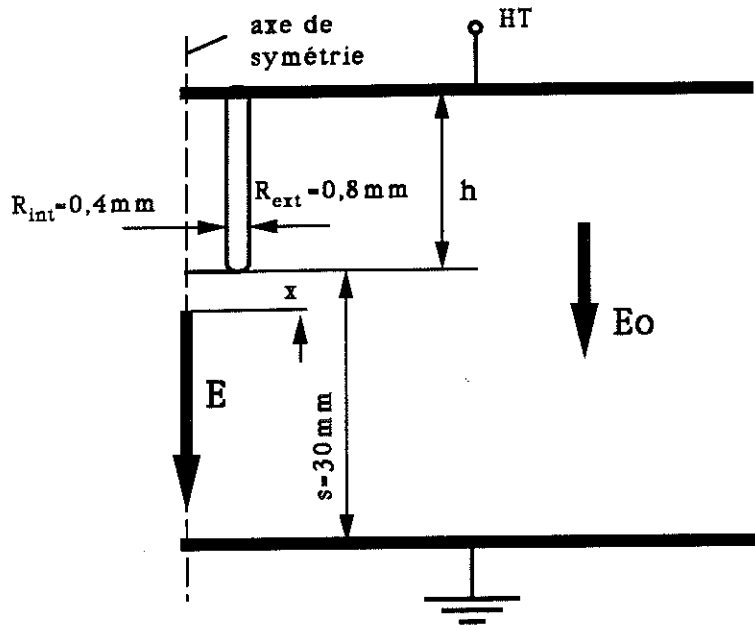


Fig. 2.11. Calcul numérique du champ électrique pour la configuration pointe ionisante tubulaire face à une électrode plane, en présence d'un élément électrostatique.

La distribution du champ électrique sur l'axe pointe ionisante-plan est modifiée par la présence et la position de l'élément électrostatique (Fig. 2.12).

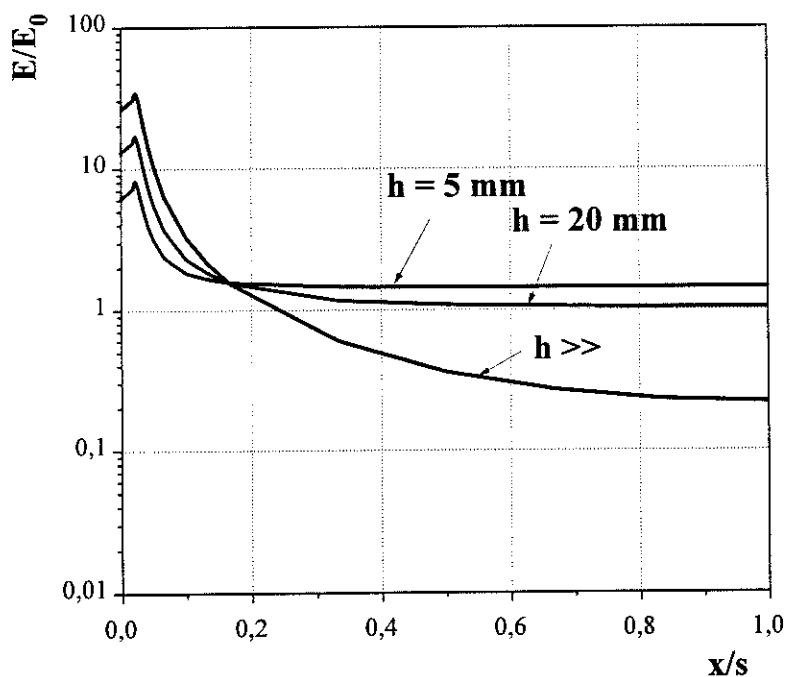


Fig. 2.12. Renforcement du champ électrique E/E_0 dans l'axe de la pointe ionisante, pour trois position différentes de l'élément électrostatique (E_0 est la valeur du champ entre les électrodes, à grande distance de la pointe ionisante, dans le cas $h = 20$ mm).

Le renforcement du champ (E/E_0) dans l'axe de la pointe ionisante est maximum en l'absence de l'élément électrostatique : $E/E_0 = 34,02$ et décroît rapidement en présence de l'élément électrostatique et avec la diminution de "h": $E/E_0 = 16,87$ pour $h = 20$ mm et $E/E_0 = 8,12$ pour $h = 5$ mm. La situation est inversée au niveau du plan; en l'absence de l'élément électrostatique le rapport E/E_0 a la valeur 0,22 et croît en présence de l'élément électrostatique: $E/E_0 = 1,04$ pour $h = 20$ mm et $E/E_0 = 1,44$ pour $h = 5$ mm. Les résultats des ces calculs expliquent les résultats des mesures présentées dans les figures 2.9 et 2.10, concernant la diminution du courant avec la diminution de "h".

La distribution du champ électrique à proximité de la pointe ionisante montre que le renforcement du champ est maximum dans la zone de courbure de rayon r (Fig. 2.13).

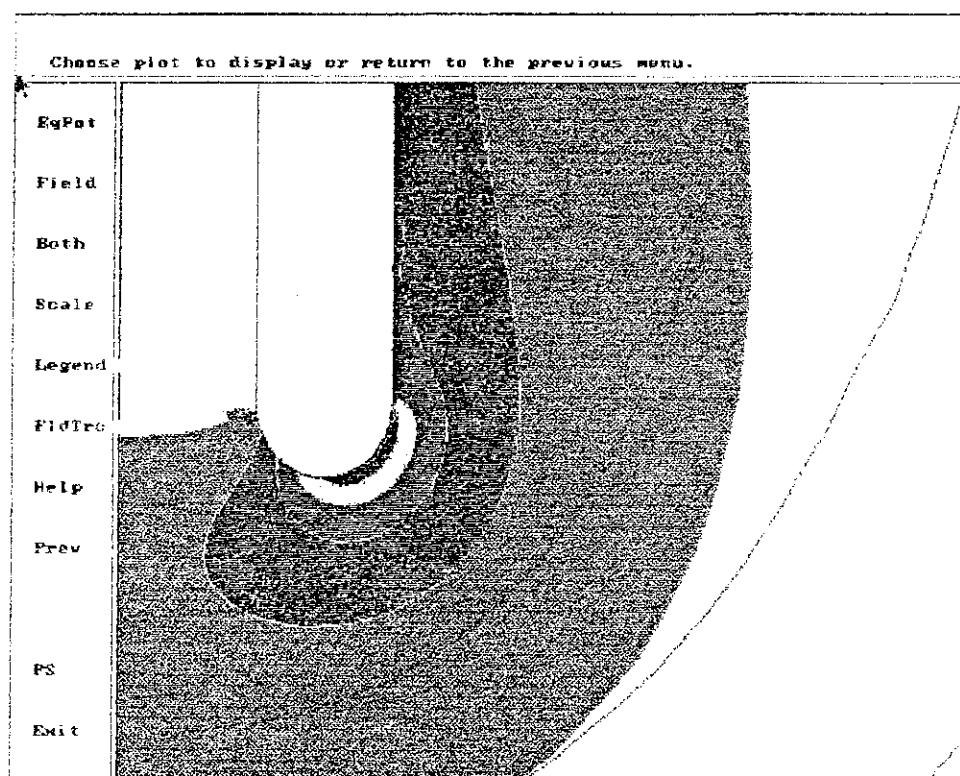


Fig. 2.13. Distribution du champ électrique autour de la pointe ionisante tubulaire, en l'absence de l'élément électrostatique.

L'effet de la proximité entre les pointes ionisantes sur la distribution du champ électrique a été analysé numériquement, en utilisant le logiciel CSP et une configuration géométrique avec symétrie plane (Fig. 2.14). Les pointes ionisantes sont des lames qui ont le même profil que les tubes métalliques.

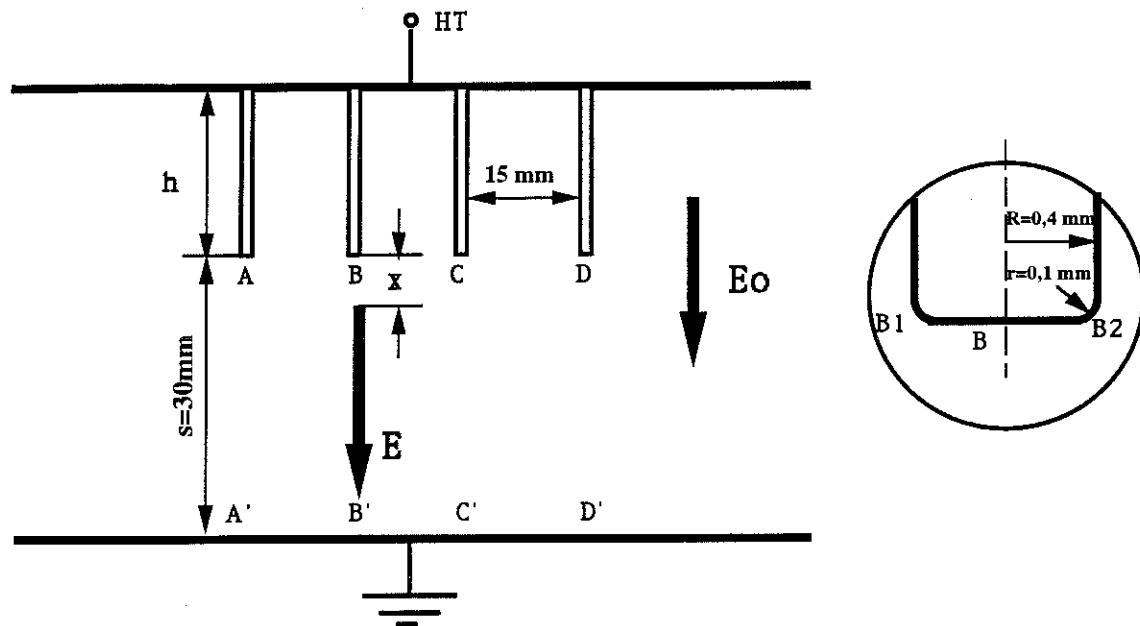


Fig. 2.14. Configuration géométrique avec symétrie plane, utilisée par CSP pour le calcul du champ électrique en système électrode à lames ionisantes - plan.

Les résultats du calcul numérique (Tableau 2.1) sont en bon accord avec ceux de la Fig. 2.14 et confirment l'influence de la présence et de la position de l'élément électrostatique sur le renforcement du champ électrique.

Tableau 2.1. Renforcement du champ électrique en configuration électrode à lames ionisantes - plan (Fig. 2.14) à l'extrémité des pointes ionisantes et au niveau de l'électrode plane.

h	B	$B1$	B'
$h \gg$	5,22	10,67	1,50
$h = 20 \text{ mm}$	5,11	10,47	1,52
$h = 5 \text{ mm}$	4,74	6,96	1,58

Les valeurs du Tableau 2.1. mettent en évidence que dans le cas de l'électrode à lames ionisantes, l'influence de la présence et de la position d'un élément électrostatique est moins fort. La présence de plusieurs pointes ionisantes produit un renforcement du champ au niveau de l'électrode plane même en l'absence de l'élément électrostatique ($E/E_0|_{B'} = 1,50$ pour $h \gg$). L'effet de bord se manifeste par des valeurs plus élevées du renforcement du champ pour les pointes ionisantes A et D. L'allure des lignes du champ et des équipotentielles confirme les remarques ci-dessus (Fig. 2.15).

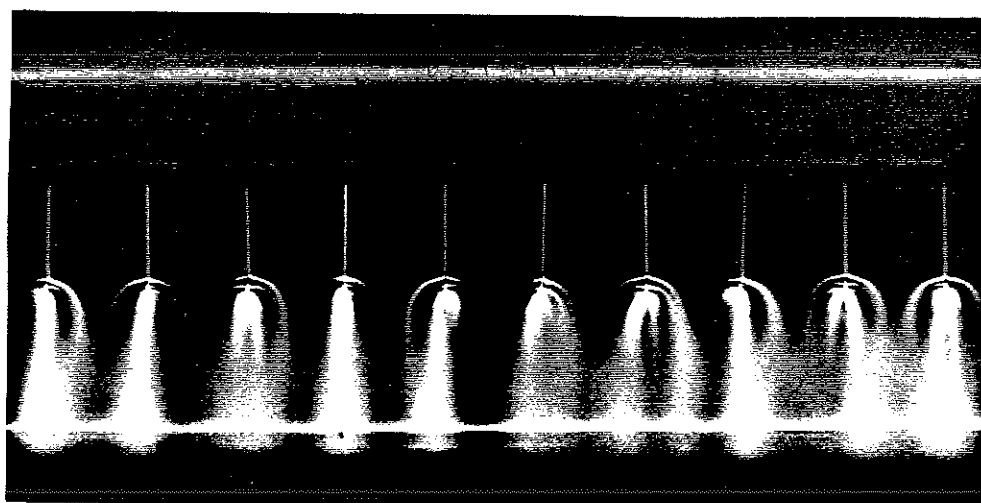
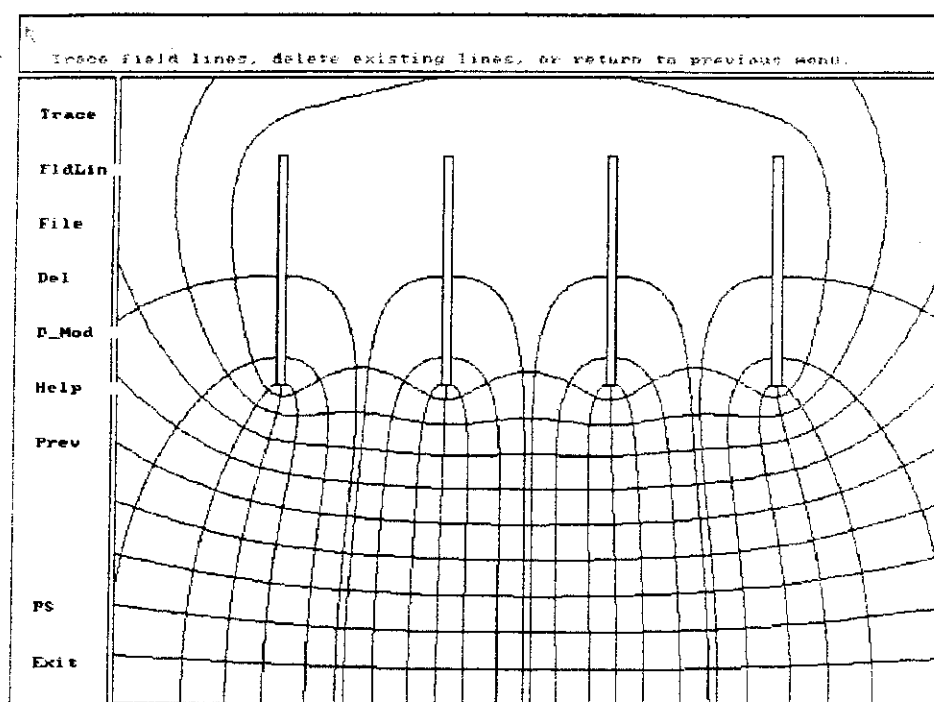


Fig. 2.15. a). Allure des lignes du champ électrique et des lignes équipotentiels pour une configuration d'électrode à lames ionisantes-plan, en présence d'un élément électrostatique; b). décharge couronne entre l'électrode à pointes ionisantes et une électrode plane reliée à la terre.

Un des paramètres qui influence la distribution et le renforcement du champ électrique pour les électrodes à pointes ionisantes est la distance entre les pointes (le pas "p").

L'analyse numérique du champ électrique a montré que, plus le pas "p" est grand, plus le renforcement du champ au tour des pointes ionisantes augmente et plus le renforcement du champ au niveau de l'électrode plane diminue (Tableau 2.2).

Tableau 2.2. Renforcement du champ électrique en configuration électrode à lames ionisantes - plan (Fig. 2.14) pour une distance $p = 45$ mm entre les lames et en l'absence de l'élément électrostatique.

	B	B1	B'
$h = \infty$	7,99	16,5	1,21
$h = 20$ mm	7.03	13,7	1,33

L'allure des lignes du champ électrique et des lignes équipotentiels montre, aussi, la diminution de l'effet de proximité avec la croissance de la distance entre les pointes ionisantes (Fig. 2.16).

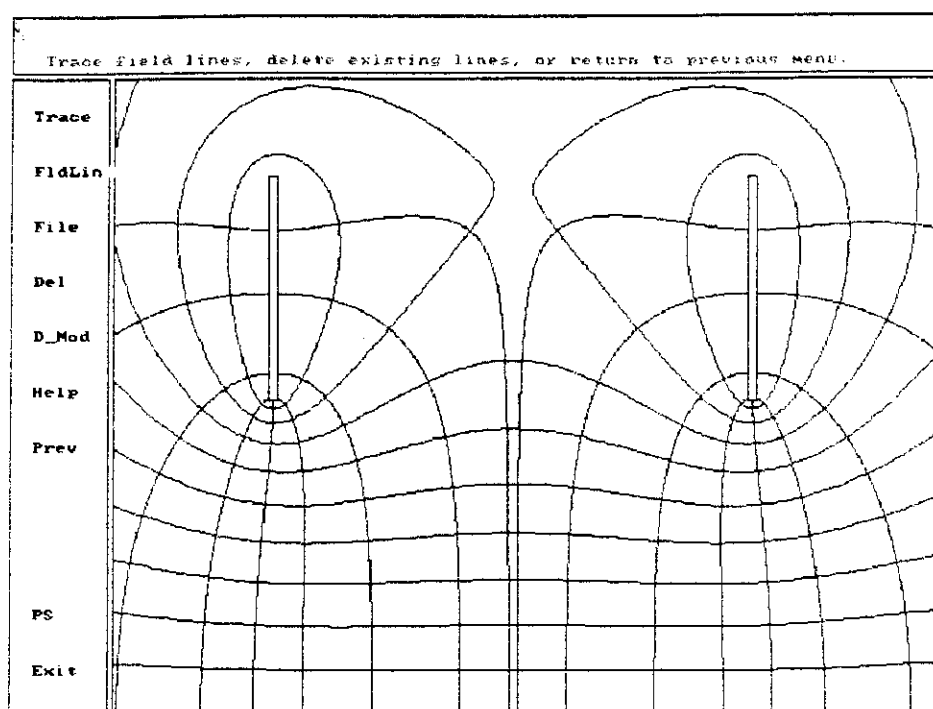


Fig. 2.16. Allure des lignes du champ électrique et des lignes équipotentiels pour une configuration électrode à lames ionisantes- électrode plane, à une distance augmentée ($p = 45$ mm) entre les lames et en l'absence de l'élément électrostatique.

L'étude théorique de la distribution du champ électrique pour quelques configurations des électrodes ionisantes a confirmé les résultats de l'étude expérimental. Pour les électrodes à pointes ionisantes, la diminution de la distance entre les pointes détermine le renforcement du champ électrique au niveau de l'électrode plane et la diminution du champ autour de la pointe ionisante.

2.2. Mesure de la charge des particules isolantes pour différentes configurations d'électrodes ionisantes

L'étude théorique du processus de charge ne peut pas prendre en compte tous les paramètres en jeu, comme par exemple, la configuration géométrique de l'électrode ionisante et, par conséquent, une étude expérimentale approfondie est nécessaire. Le dispositif expérimental proposé au § 2.2.1 modélise les conditions réelles de charge des particules isolantes dans les séparateurs électrostatiques de laboratoire ou industriels.

Un premier groupe d'expériences a été effectué avec une électrode à deux lignes de pointes ionisantes (§ 2.2.2). Le deuxième groupe d'expériences (§ 2.2.3), montre que les mesures de charge peuvent être utilisées pour l'évaluation de l'efficacité des différents types d'électrodes ionisantes.

2.2.1. Dispositif expérimental pour l'étude de la charge des particules isolantes dans un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante reliée à la terre

Le processus de charge des particules dans les séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante reliée à la terre présente des particularités importantes par rapport aux autres applications de l'électrostatique. D'une part, la charge à saturation d'une particule isolante posée sur une électrode en champ ionisé est plus grande que la charge de la même particule, dans le même champ, mais à grande distance des électrodes. D'autre part, le processus de charge en champ ionisé est accompagné par un processus de décharge par contact de la particule avec l'électrode.

Le dispositif expérimental pour l'étude du processus de charge des particules dans les séparateurs électrostatiques (Fig. 2.17) doit modéliser les conditions spécifiques aux séparateurs industriels. La charge d'espace est obtenue par une décharge couronne produite entre une électrode ionisante reliée à une source haute tension et une électrode cylindrique reliée à la terre. La distance entre les électrodes est ajustable dans les limites (10...50) mm et la vitesse de rotation du cylindre peut être modifiée de 40 à 60 tr/mn. Les particules sont déposées sur la surface de l'électrode cylindrique par un vibrotransporteur qui les fait traverser la zone de champ ionisé. Après le détachement de la surface du cylindre dû à la force centrifuge et à la force de pesanteur, la particule est captée dans une cage de Faraday et la charge acquise est mesurée par un électromètre.

Le dispositif permet de changer facilement l'électrode ionisante en vue d'étudier l'influence de la configuration du système d'électrodes sur la charge acquise par la particule. D'autres paramètres (vitesse de rotation du cylindre, valeur et polarité de la haute tension, vitesse de la particule) peuvent être modifiés pour étudier leur influence sur la charge acquise par les particules. La source haute tension est réglable (0...50) kV, (0...2) mA et réversible. La valeur de la tension est mesurée avec un kilovoltmètre électrostatique (0...50) kV (Fig. 2.18).

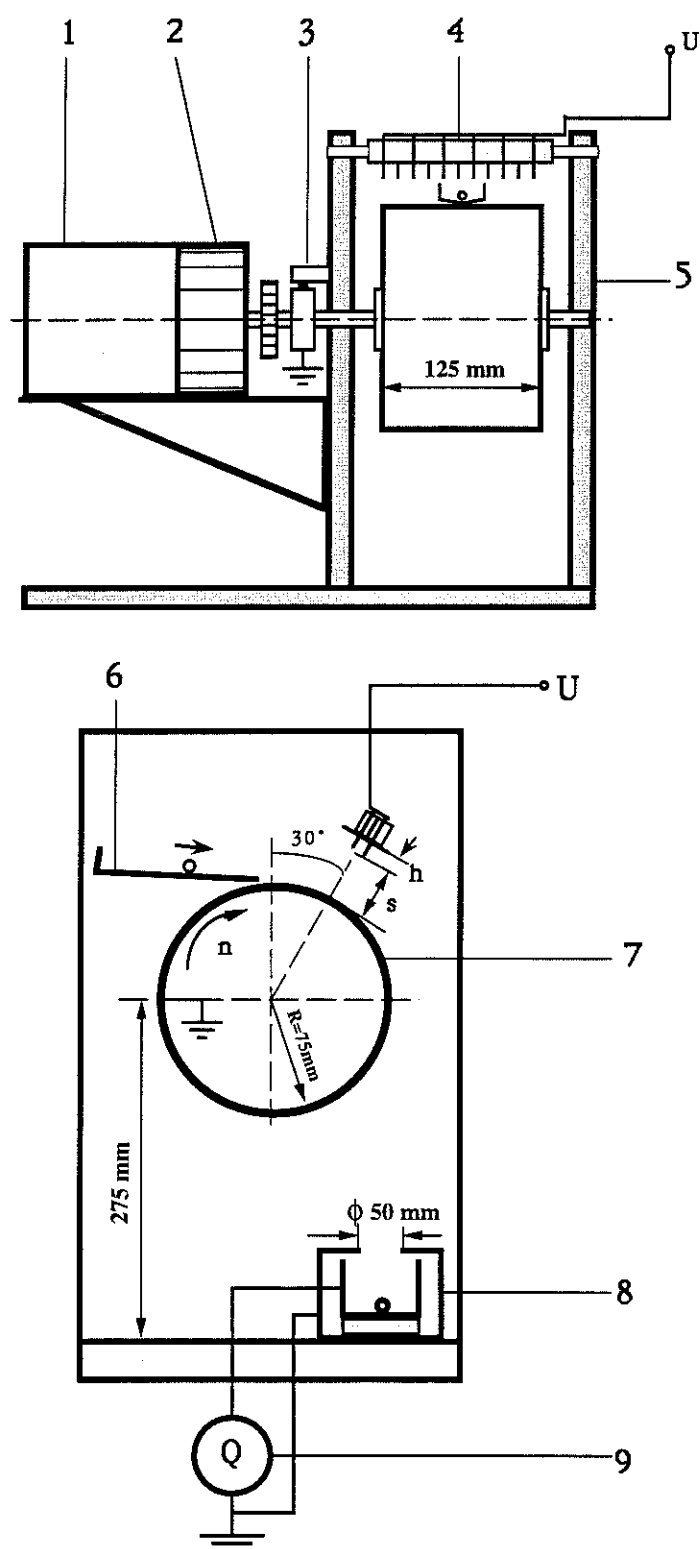


Fig. 2.17. Dispositif expérimental pour l'étude de la charge acquise par les particules isolantes dans les séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante reliée à la terre. 1. - moteur électrique; 2. - réducteur; 3. - liaison à la terre de l'électrode cylindrique tournante; 4. - électrode ionisante; 5. - support isolant; 6. - vibrotransporteur; 7. - électrode cylindrique tournante; 8. - cage de Faraday; 9. - électromètre.

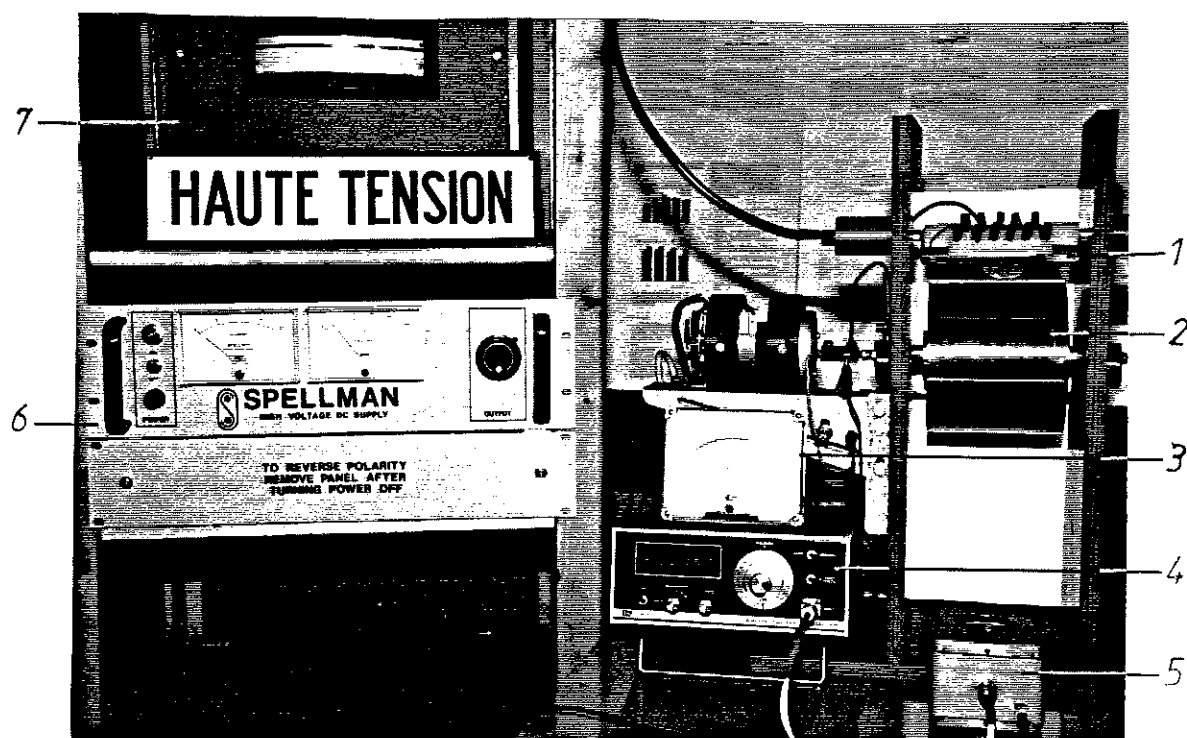


Fig. 2.18. Dispositif expérimental pour la mesure de la charge des particules isolantes en champ ionisé, à la surface d'une électrode cylindrique tournante reliée à la terre. 1. - électrode ionisante; 2. - électrode cylindrique tournante reliée à la terre; 3. - micro-ampèremètre pour la mesure du courant; 4. - électromètre; 5. - cage de Faraday; 6. - source haute tension; 7. - kilovoltmètre électrostatique.

2.2.2. Charge des particules isolantes dans le champ ionisé produit par des électrodes à pointes ionisantes

Une électrode à deux lignes de pointes ionisantes décalées d'un demi-pas crée un champ ionisé caractérisé par une distribution assez uniforme de la densité de courant dans le plan de l'électrode collectrice opposée (l'électrode cylindrique tournante reliée à la terre dans le cas du dispositif représenté sur la Fig. 2.18). L'analyse numérique du champ montre que la présence d'un élément électrostatique associé aux pointes ionisantes à haute tension produit un renforcement du champ électrique au niveau de l'électrode reliée à la terre et assure donc, les meilleures conditions de charge. Un tel modèle d'électrode ionisante (Fig. 2.19) a été préparé pour équiper le dispositif expérimental présenté sur la Fig. 2.17.

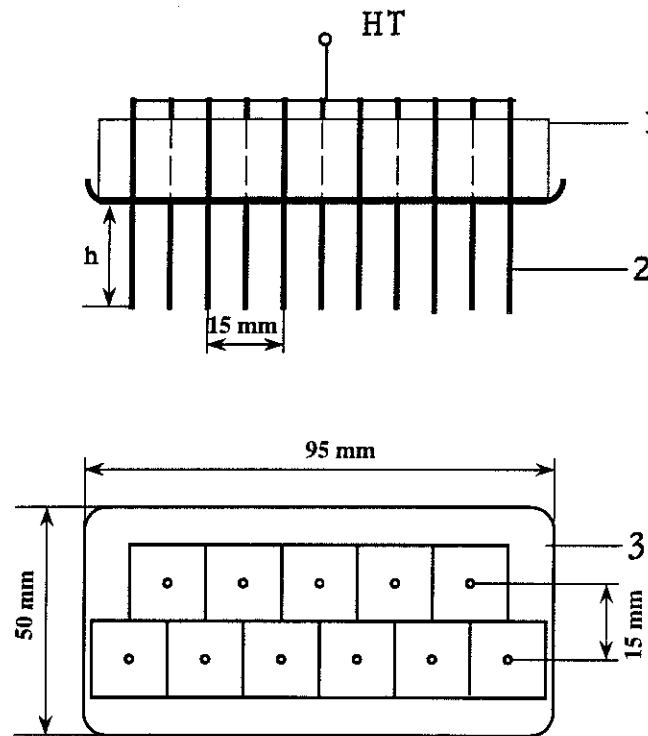


Fig. 2.19. Electrode à deux lignes de pointes ionisantes décalées d'un demi-pas. 1. - support isolant en polyéthylène; 2. - pointe ionisante tubulaire (diamètre extérieur 0,8 mm, diamètre intérieur 0,5 mm); 3. - élément électrostatique.

Comme pour l'électrode à une seule ligne de pointes ionisantes (Fig.2.9) les caractéristiques $I(U)$ de ce modèle d'électrode ionisante dépendent de la distance "h" entre l'élément électrostatique et les pointes ionisantes.

La diminution de la distance "h" produit la croissance rapide de la tension de seuil couronne. Sans l'élément électrostatique ($h \gg$), la tension de seuil couronne a pour valeur minimale : 7,8 kV. Le seuil couronne a augmenté à 9,4 kV pour $h = 20$ mm et jusqu'à 21 kV pour $h = 5$ mm.

L'influence de la valeur "h" sur le courant injecté est très importante. Par exemple, sous une tension $U = 20$ kV le courant vaut 150 μA en absence de l'élément électrostatique, 125 μA pour $h = 20$ mm et 75 μA pour $h = 10$ mm. Pour $h = 5$ mm, la décharge couronne n'est pas encore amorcée ($I = 0$).

L'électrode à deux lignes de pointes ionisantes a été utilisée avec le dispositif expérimental présenté sur la figure 2.17 pour charger des particules sphériques isolantes en polyamide (rayon $R = 1,5$ mm). La valeur de la charge acquise par les particules dépend de la valeur de la haute tension, elle est influencée aussi par le paramètre "h" (Fig. 2.20).

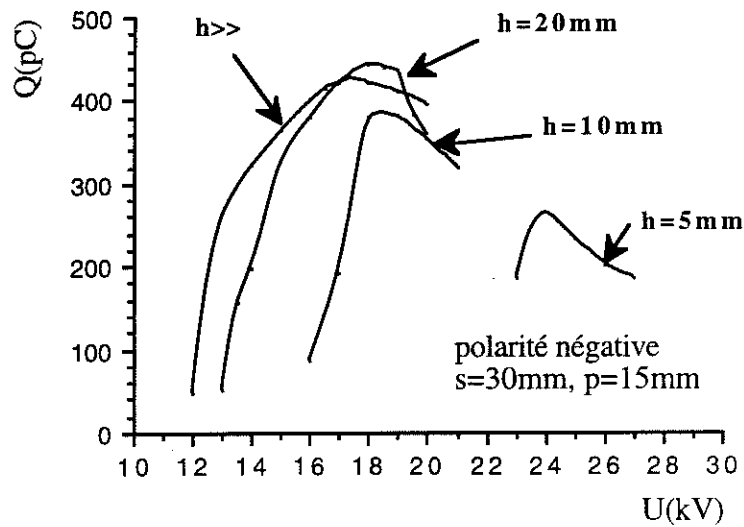


Fig. 2.20. Charge acquise par une particule sphérique en polyamide ($R = 1,5 \text{ mm}$) en fonction de la valeur de la haute tension, pour diverses distances " h " entre les pointes ionisantes et l'élément électrostatique (le dispositif expérimental de la Fig. 2.17 est équipé d'une électrode à deux lignes de pointes ionisantes tubulaires, décalées d'un demi-pas).

A une valeur $U = 16 \text{ kV}$, la charge acquise par la particule vaut 379 pC pour $h = 20 \text{ mm}$ et seulement 87 pC pour $h = 10 \text{ mm}$. Bien que la diminution de " h " intensifie le champ électrique, la décroissance du courant fait que le processus de charge est plus lent. Dans les conditions de l'expérience, les valeurs maximales pour la charge des particules ont été obtenues pour $h = 20 \text{ mm}$. Le phénomène d'auto - décharge est présent à des valeurs plus élevées de l'intensité du champ électrique. Plus " h " diminue, plus la valeur maximale de la charge acquise par les particules décroît.

La dynamique du processus de charge est responsable aussi, de la différence entre les caractéristiques $Q(U)$ obtenues pour la même particule sphérique en polyamide ($R = 1,5 \text{ mm}$) en polarité positive et négative de la source haute tension (Fig. 2.21).

Dans les conditions de l'expérience, la tension de seuil couronne est $9,4 \text{ kV}$ en polarité négative et 11 kV en polarité positive. Pour une valeur donnée de la tension, le courant est plus fort en polarité négative (Fig. 2.22). Par conséquent, le processus de charge est plus rapide en polarité négative et la particule acquiert une charge plus grande.

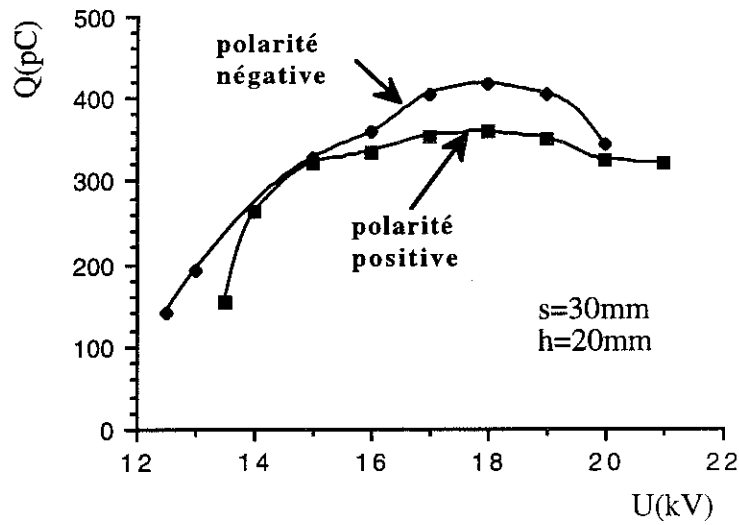


Fig. 2.21. Charge acquise par une particule sphérique en polyamide ($R = 1,5 \text{ mm}$) en fonction de la valeur de la haute tension, pour les deux polarités. Le dispositif expérimental est équipé d'une électrode à deux lignes de pointes ionisantes tubulaires et l'élément électrostatique est placé à $h = 20 \text{ mm}$ de pointes ionisantes.

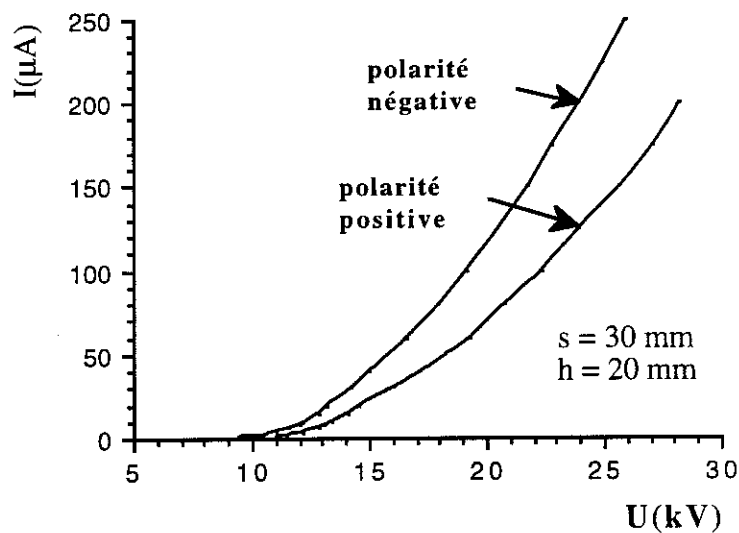


Fig. 2.22. Caractéristiques $I(U)$ de l'électrode à deux lignes de pointes ionisantes tubulaires, en polarité positive et négative.

2.2.3. Evaluation de l'efficacité des électrodes ionisantes en fonction de la charge acquise par les particules

L'intensité du champ électrique et la densité de courant, deux facteurs qui déterminent la valeur de la charge des particules en champ ionisé, dépendent du type de l'électrode ionisante.

Les différents types d'électrodes peuvent être expérimentalement comparés en fonction de la charge acquise par les particules [62], si les expériences s'effectuent dans des conditions identiques (position de l'électrode, vitesse du cylindre, conditions d'environnement, vitesse de la particule, forme d'onde et polarité de la haute tension, etc.).

Dans un premier groupe d'expériences, l'électrode à pointes ionisantes tubulaires a été comparée du point de vue de l'efficacité dans le processus de charge avec une autre, dont les pointes ionisantes sont des fils de tungstène de diamètre 0,2 mm (Fig. 2.23). Ce dernier type d'électrode ionisante est déjà utilisée dans les séparateurs industriels pour le tri des déchets de câbles électriques et, aussi, dans des séparateurs de laboratoire [20, 21, 63, 64].

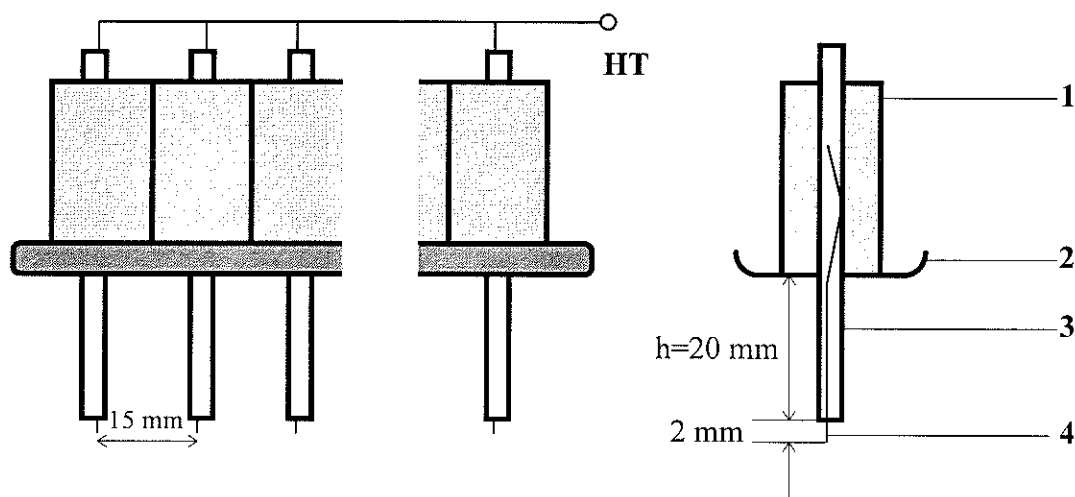


Fig. 2.23. Electrode à pointes ionisantes en fils de tungstène. 1. - support isolant en polyéthylène; 2. - élément électrostatique; 3. - support métallique tubulaire; 4. - fil de tungstène $\phi = 0,2$ mm.

Les caractéristiques $I(U)$ des deux électrodes (Fig. 2.24) mettent en évidence une tension de seuil couronne plus basse pour l'électrode à fils de tungstène, dont les pointes ionisantes ont des rayons de courbure plus petits.

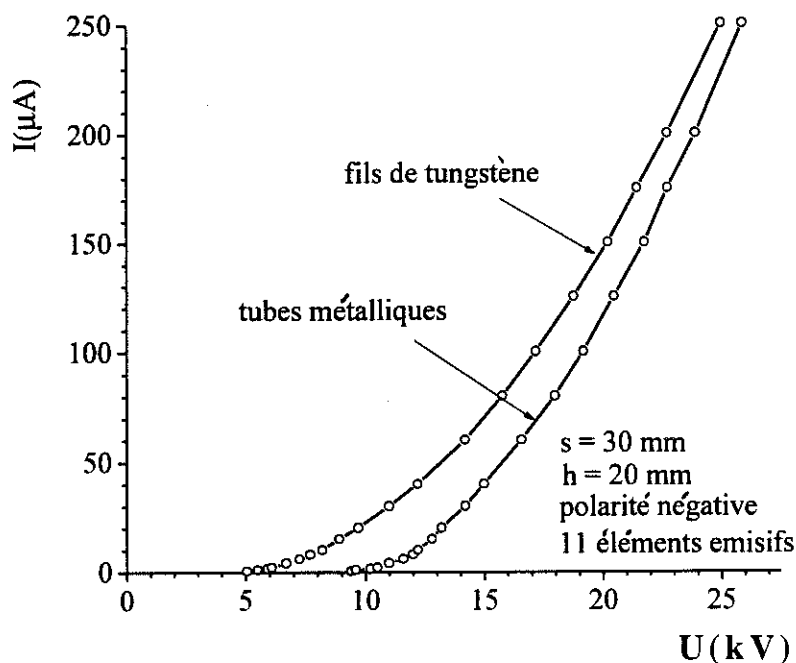


Fig. 2.24. Caractéristiques $I(U)$ des électrodes à pointes ionisantes tubulaires et en fils de tungstène, en présence d'un élément électrostatique placé à $h = 20 \text{ mm}$ des pointes ionisantes.

A une tension donnée, l'électrode à fils de tungstène génère un courant plus élevé que l'électrode à tubes métalliques. Par conséquent, la charge acquise par la particule sphérique en polyamide ($R = 1,5 \text{ mm}$) est plus grande quand le champ ionisé est généré par ce type d'électrode ionisante (Fig. 2.25).

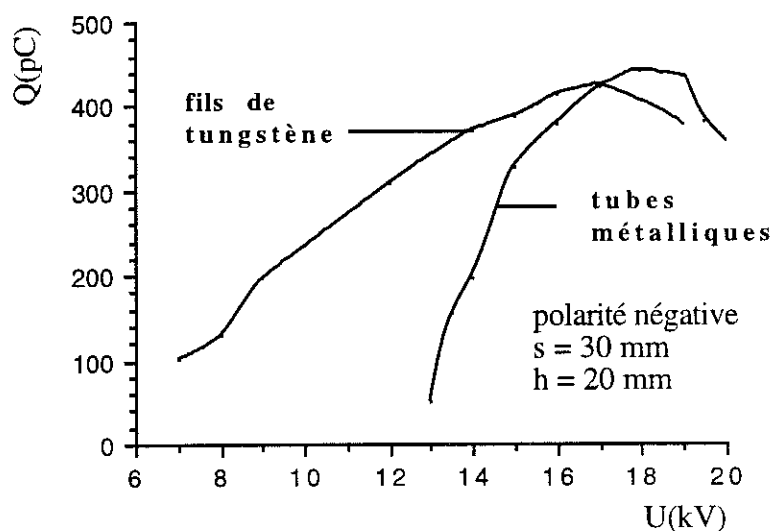


Fig. 2.25. Charge acquise par une particule sphérique en polyamide ($R = 1,5 \text{ mm}$) dans le champ ionisé généré par des électrodes ionisantes à tubes métalliques et à fils de tungstène.

Les paramètres de réglage du dispositif expérimental ont les valeurs: $s = 30$ mm (distance entre les pointes ionisantes et l'électrode cylindrique reliée à la terre); $n = 60$ tr/mn (vitesse de rotation du cylindre); $p = 15$ mm (distance entre les pointes ionisantes); haute tension de polarité négative; $h = 20$ mm (distance entre l'élément électrostatique et les pointes ionisantes).

Les mêmes paramètres de réglage du dispositif expérimental ont été utilisés pour comparer, dans un deuxième groupe d'expériences, l'efficacité de l'électrode à deux lignes de pointes ionisantes décalées d'un demi-pas et l'efficacité de l'électrode à une seule ligne de pointes ionisantes. Les deux électrodes avaient des pointes ionisantes tubulaires et étaient équipées d'éléments électrostatiques placés à 20 mm des pointes ionisantes.

Dans les conditions de l'expérience, pour des tensions inférieures à 14 kV, le courant généré par l'électrode à une seule ligne de pointes ionisantes est supérieur (Fig. 2.26). Ainsi, la densité de la charge d'espace est plus grande et la constante de temps du processus de charge est plus petite. Le renforcement du champ au niveau de l'électrode mise à la terre croît aussi avec la densité de charge d'espace et, par conséquent, la charge acquise par la particule sphérique en polyamide ($R = 1,5$ mm) est plus grande (fig. 2.27).

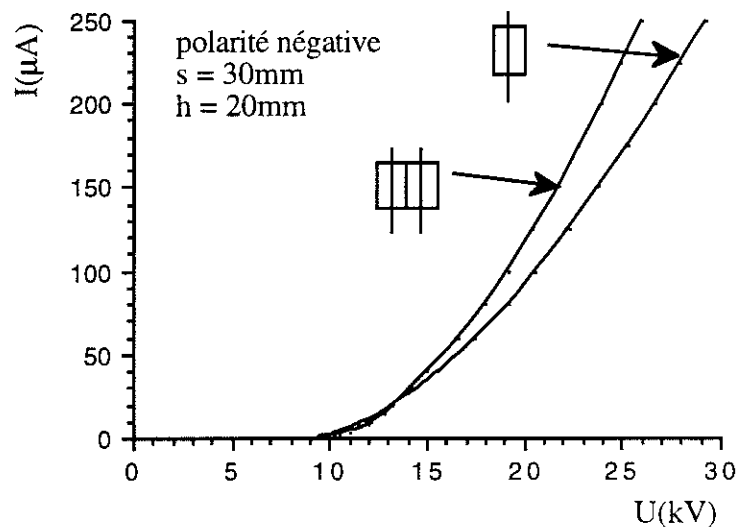


Fig. 2.26. Caractéristiques $I(U)$ pour des électrodes à une et à deux lignes de pointes ionisantes tubulaires ($\phi = 0,8$ mm).

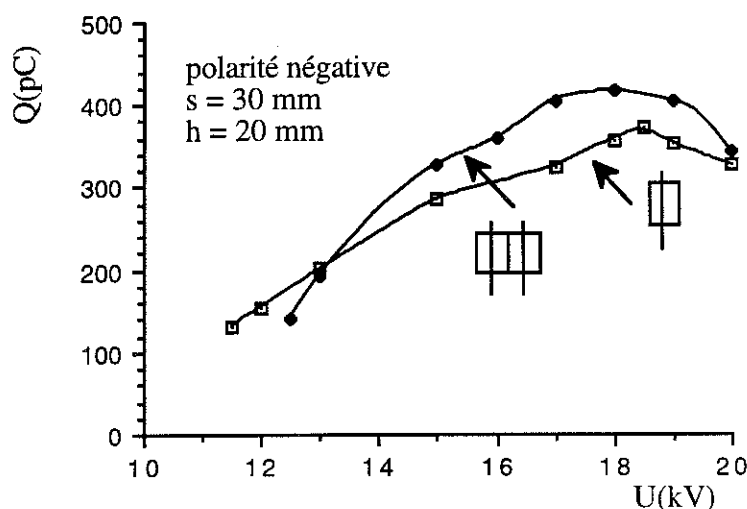


Fig. 2.27. Charge acquise par une particule sphérique en polyamide ($R = 1,5$ mm) dans le champ ionisé généré par des électrodes à une et à deux lignes de pointes ionisantes tubulaires ($\phi = 0,8$ mm).

Pour des tensions au-dessus de 14 kV, le courant est plus grand pour l'électrode à deux lignes de pointes ionisantes. Par conséquent, la charge acquise par la particule est plus grande.

Chaque point sur les courbes $Q(U)$ représente la valeur moyenne de dix mesures. Si on prend, par exemple, les valeurs maximales de la charge pour les deux électrodes, la dispersion des valeurs mesurées a été de $(-4...+3)\%$ autour de la valeur moyenne dans le cas de l'électrode à deux lignes de pointes ionisantes et $(-11...+10)\%$ dans l'autre cas. Cette remarque, qui met en évidence une meilleure uniformité des conditions de charge des particules de la première électrode par rapport à l'autre, est en bon accord avec les conclusions du sous chapitre 2.1.

2.3. Mesure de la charge des particules isolantes pour différentes valeurs des paramètres expérimentaux

Les performances d'un processus de séparation (pureté des produits, taux de récupération des matériaux) dépendent essentiellement de l'efficacité des mécanismes de charge mise en jeu. La configuration de l'électrode ionisante n'est pas le seul facteur à influencer la quantité de charge acquise par une particule dans un séparateur électrostatique [65].

Le but de l'étude expérimentale sur le processus de charge des particules dans les séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante a été de clarifier le rôle de quelques paramètres qui caractérisent le régime de fonctionnement de ces installations: amplitude de la haute tension et distance entre les électrodes (§ 2.3.1), vitesse de rotation du cylindre (§ 2.3.2), certaines propriétés des matériaux et facteurs de l'environnement (§ 2.3.3), sur la charge acquise par les particules.

Le dispositif expérimental présenté sur la Fig. 2.17 a été utilisé pour cette étude (Fig. 2.28).

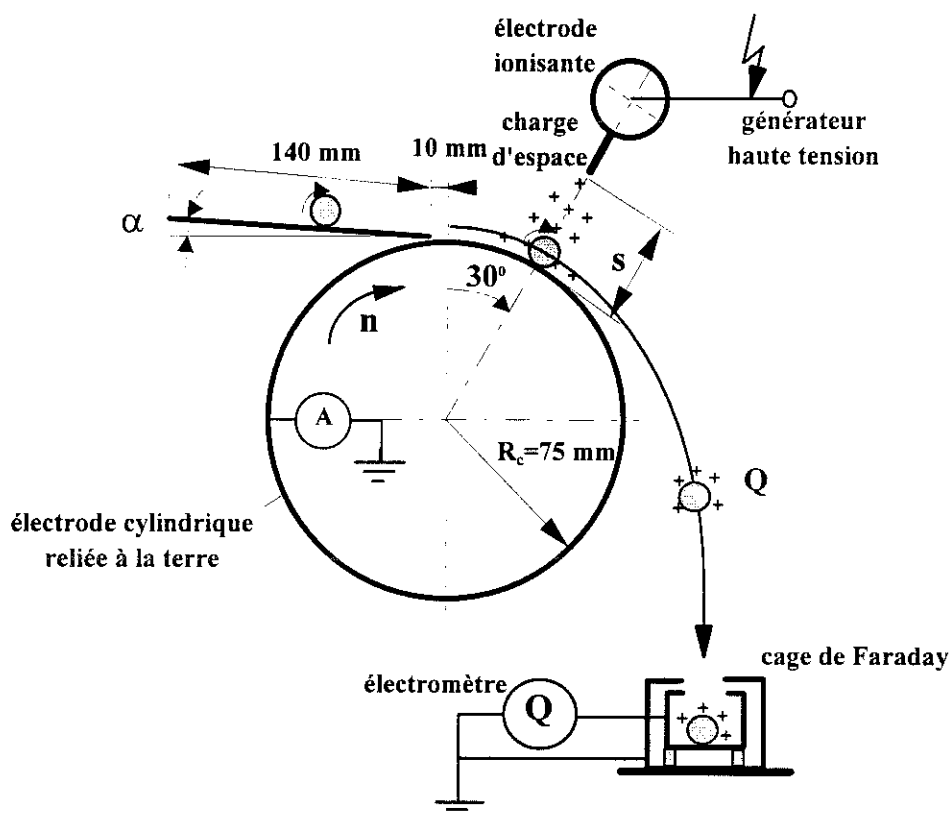


Fig. 2.28. Principe de mesure de la charge des particules dans des conditions spécifiques aux séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante.

Afin d'assurer des conditions de charge similaires aux installations industrielles, le dispositif expérimental est équipé d'une électrode à pointes ionisantes. Les onze pointes ionisantes en fil de tungstène ($\phi = 0,15 \text{ mm}$) sont placées en ligne, avec le pas $p = 10 \text{ mm}$ (Fig. 2.29). L'électrode ionisante est connectée à une source haute tension réglable et sa position par rapport à l'électrode cylindrique reliée à la terre peut être modifiée entre 10 mm et 50 mm.

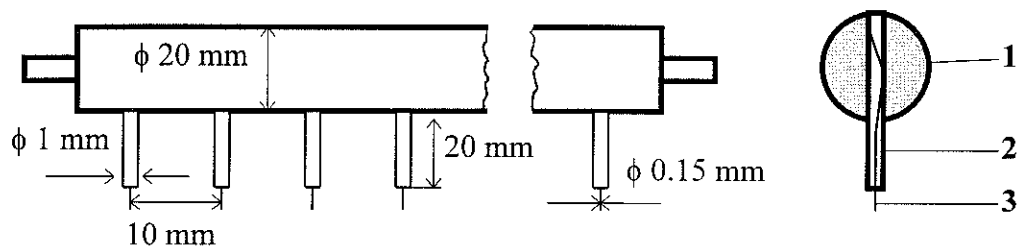


Fig. 2.29. Electrode à pointes ionisantes en fil de tungstène. 1. - support métallique tubulaire, à grand rayon de courbure; 2. - support tubulaire de la pointe ionisante; 3. - pointe ionisante en fil de tungstène.

2.3.1. Influence de l'amplitude de la haute tension et de la distance entre les électrodes

La valeur de la charge acquise par les particules isolantes par flux d'ions dépend directement de l'intensité du champ électrique. Dans les séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante reliée à la terre, ce paramètre est fonction de U (amplitude de la haute tension) et de " s " (distance entre les électrodes). Pour le premier groupe d'expériences, l'intervalle entre les électrodes a été fixé à $s = 15 \text{ mm}$ et la vitesse de rotation du cylindre à $n = 60 \text{ tr/mn}$. La charge des particules sphériques en polyamide ($R = 1,5 \text{ mm}$) a été mesurée pour diverses valeurs de la haute tension et du courant (Fig. 2.30). Chaque point sur le graphique $Q(U)$ représente la valeur moyenne de dix mesures.

En l'absence de la décharge couronne ($I = 0$), la particule acquiert la charge par impact (avec le transporteur, le cylindre, etc.); elle est négative, de signe opposé à l'électrode ionisante. Le processus de charge commence dès que la tension dépasse le seuil couronne (Fig. 2.30b) et le signe de la charge acquise par la particule est positif (polarité de l'électrode ionisante).

L'augmentation de la tension détermine le renforcement du champ électrique et la charge acquise par la particule croît. A des tensions élevées, le renforcement local du champ entre la particule chargée et l'électrode cylindrique de signe opposé est la cause d'une auto-décharge qui diminue la charge déjà acquise par la particule. (Fig. 2.30 a).

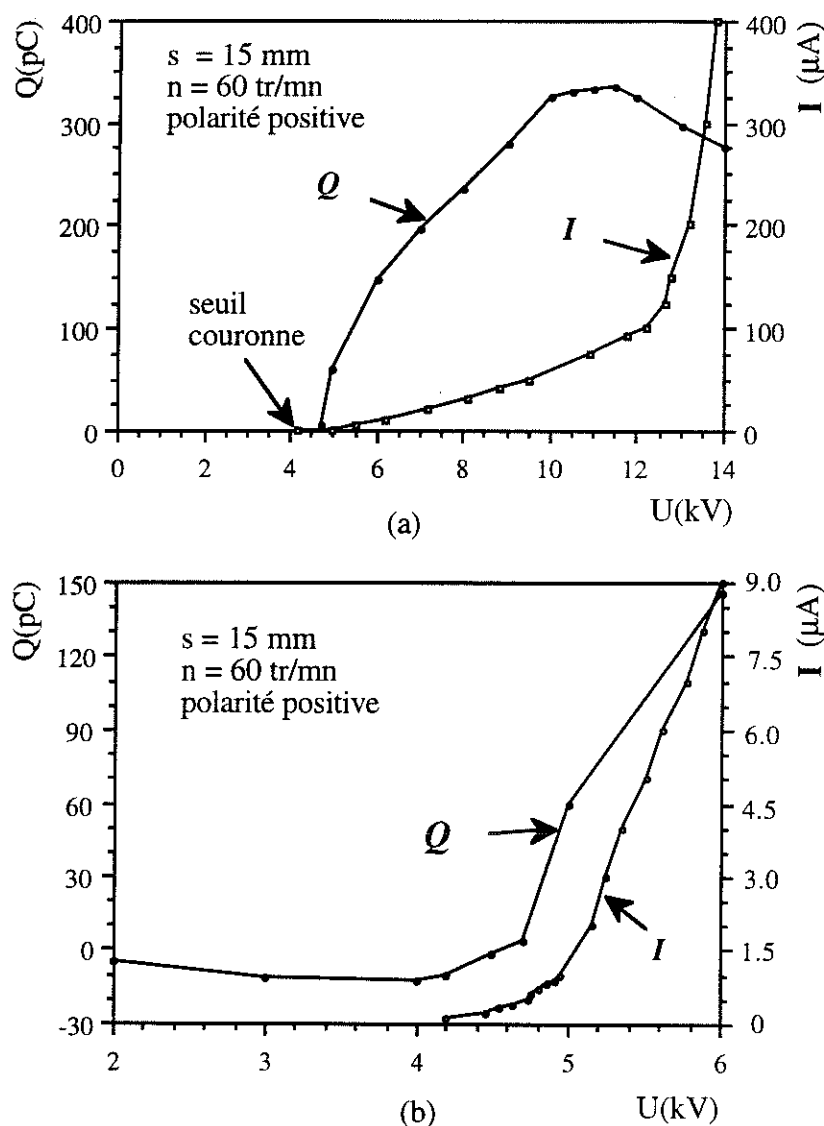


Fig. 2.30. a). Charge acquise en champ ionisé par une particule sphérique en polyamide ($R = 1,5$ mm) en fonction de la valeur de la haute tension et caractéristique $I(U)$ de l'électrode ionisante; b). mesures dans la zone du seuil couronne.

Les mesures effectuées pour d'autres valeurs de la distance " s " entre les pointes ionisante et l'électrode cylindrique reliée à la terre ont confirmé les résultats présentés ci-dessus (Fig. 2.31). A une tension constante, la croissance de l'intervalle " s " fait diminuer le champ électrique et le courant injecté; par conséquent, la charge acquise par la particule décroît. En revanche, le phénomène d'auto-décharge décrit antérieurement limite la charge à une même valeur maximale pour toutes les distances " s " entre les électrodes. Le seuil de tension auquel cette charge limite est atteinte croît avec la distance " s ".

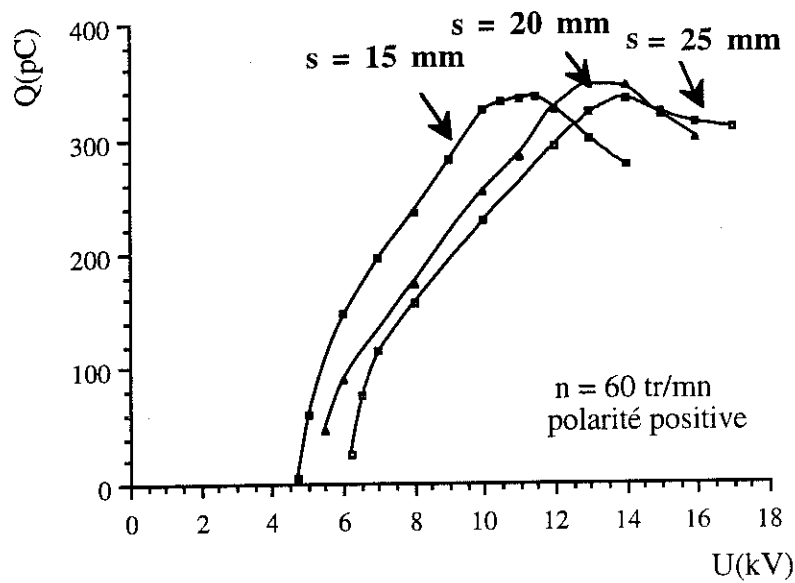


Fig. 2.31. Charge acquise en champ ionisé par une particule sphérique en polyamide ($R = 1,5$ mm) en fonction de la valeur de la haute tension, pour différentes valeurs de l'intervalle "s" entre les électrodes.

Des mesures similaires ont porté sur des particules de PVC aplaties, de rayon $R = 1,5$ mm et longueur $L = 1$ mm. Ces particules se fixent très bien sur la surface du cylindre et dans le domaine des tensions utilisées dans les expériences, le phénomène d'auto-décharge ne limite pas la charge (Fig. 2.32).

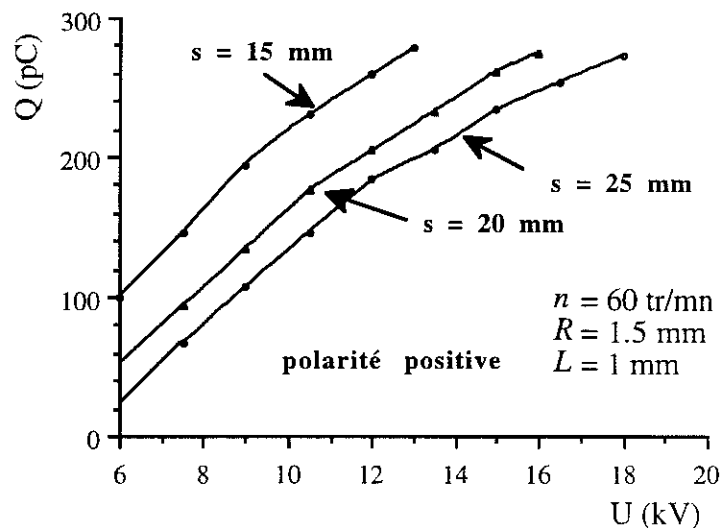


Fig. 2.32. Charge acquise en champ ionisé par une particule cylindrique aplatie ($R = 1,5$ mm, $L = 1$ mm) en PVC, en fonction de la tension de l'électrode ionisante, pour trois valeurs de l'intervalle "s" entre les électrodes.

2.3.2. Influence de la vitesse de rotation de l'électrode cylindrique et de la vitesse de la particule

La charge acquise par une particule dans la zone de champ ionisé d'un séparateur électrostatique a été évaluée dans § 1.3.2. Les résultats obtenus montrent que l'un des paramètres importants du processus de charge est le temps de charge t_{charge} [66]- le temps durant lequel la particule est soumise au flux d'ions. De ce point de vue, la valeur de la charge peut être modifiée par la vitesse à laquelle le cylindre tournant entraîne les particules dans la zone de champ ionisé.

Les expériences de mesure de charge sont réalisées pour deux valeurs de la vitesse de rotation du cylindre, sur des particules sphériques ($R = 1,5$ mm) en polyamide (Fig. 2.33) et cylindriques ($R = 1,5$ mm $L = 5$ mm) en PVC (Fig. 2.34).

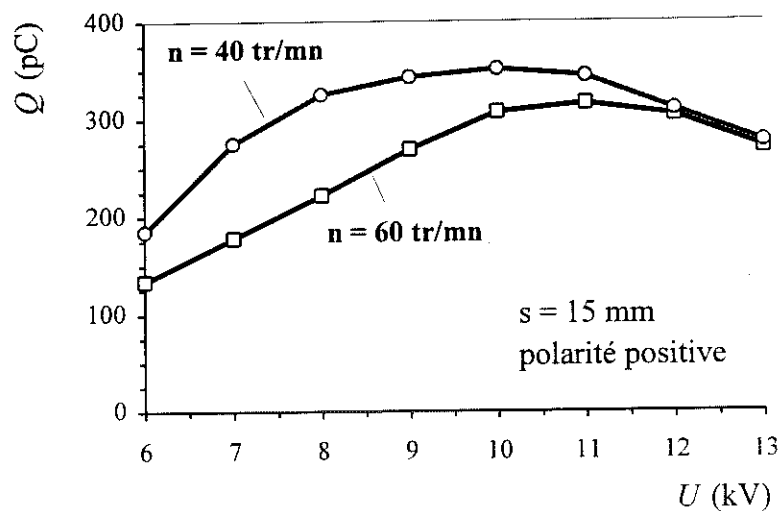


Fig. 2.33. Charge acquise en champ ionisé par une particule sphérique ($R = 1,5$ mm) en polyamide, en fonction de la tension de l'électrode ionisante, pour deux valeurs de la vitesse de rotation du cylindre.

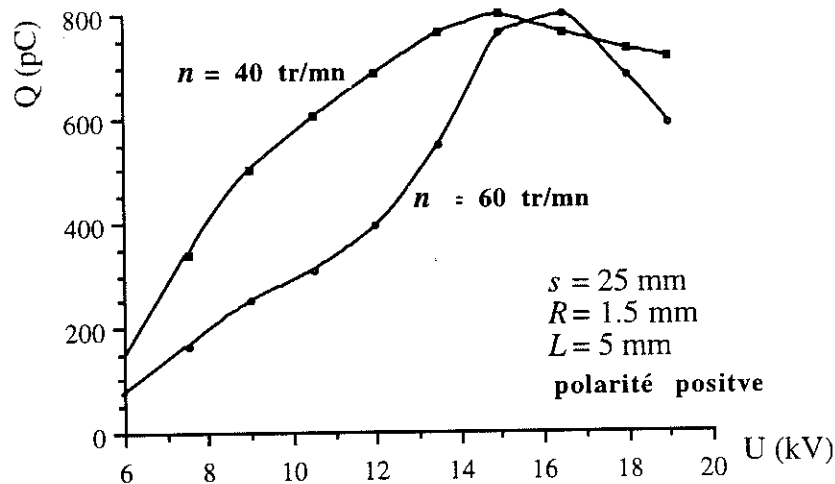


Fig. 2.34. Charge acquise en champ ionisé par une particule cylindrique ($R = 1,5$ mm, $L = 5$ mm) en PVC, en fonction de la tension de l'électrode ionisante, pour deux valeurs de la vitesse de rotation du cylindre.

Les résultats présentés ci-dessus démontrent la possibilité d'augmenter la charge acquise par les particules dans la zone de champ ionisé d'un séparateur électrostatique par la diminution de la vitesse du cylindre tournant. Cette remarque est valable seulement pour des tensions modérées parce que, dans le domaine de la charge limite, les différences ne sont pas significatives.

Dans les séparateurs électrostatiques étudiés le processus de charge est favorisé par le mouvement de roulement des particules sur la surface du cylindre, parce qu'une surface plus grande de la particule est exposée au flux d'ions. Si le cylindre tourne à une vitesse constante, le mouvement de roulement dépend de la vitesse de la particule au moment où elle est déposée sur la surface du cylindre.

La charge acquise par des particules sphériques en polyamide ($R = 1,5$ mm) a été mesurée pour différentes valeurs de la vitesse des particules, à la sortie d'un transporteur incliné d'un angle " α " variable (Fig. 2.35)

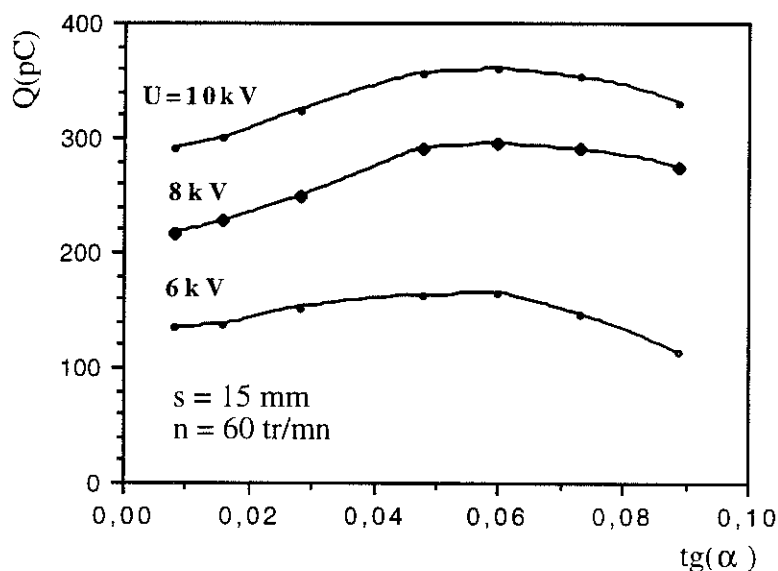


Fig. 2.35. Charge acquise en champ ionisé par une particule sphérique en polyamide ($R = 1,5$ mm) en fonction de l'angle " α " du transporteur incliné qui la dépose à une vitesse variable sur la surface de l'électrode cylindrique tournante.

Pour des vitesses de la particule au-dessous d'une certaine limite, qui dans les conditions de l'expérience correspond à $\tan \alpha = 0,06$, la charge acquise par la particule croît avec la vitesse, favorisée par le mouvement de roulement. La charge maximale obtenue pour trois valeurs de la haute tension correspond à la même valeur de $\tan \alpha$. Au-dessus de cette limite, la charge acquise par la particule décroît, essentiellement à cause de la diminution du temps de charge t_{charge} .

2.3.3. Influence des propriétés des matériaux, des conditions environnementales et du revêtement isolant de l'électrode cylindrique

Le tri des composants d'un mélange granulaire est possible si les particules ont des caractéristiques physiques différentes. La permittivité relative influence la valeur de la charge à saturation; la conductivité, et plus particulièrement la conductivité superficielle, influence le processus de décharge de la particule en contact avec l'électrode reliée à la terre et, par conséquent, la charge acquise par la particule. D'autres paramètres comme la forme et la taille des particules, l'état de la surface (humidité, poussière), les conditions d'environnement, influencent aussi, de manière directe ou indirecte, la valeur de la charge.

La charge acquise dans la zone de champ ionisé par des particules de même forme et de même taille, dépend des caractéristiques des matériaux. Si les deux types de particules sont des cylindres en PE et PVC ($R = 1,5 \text{ mm}$, $L = 5 \text{ mm}$) la charge acquise est plus grande pour le PVC, dont la permittivité est supérieure (Fig. 2.36).

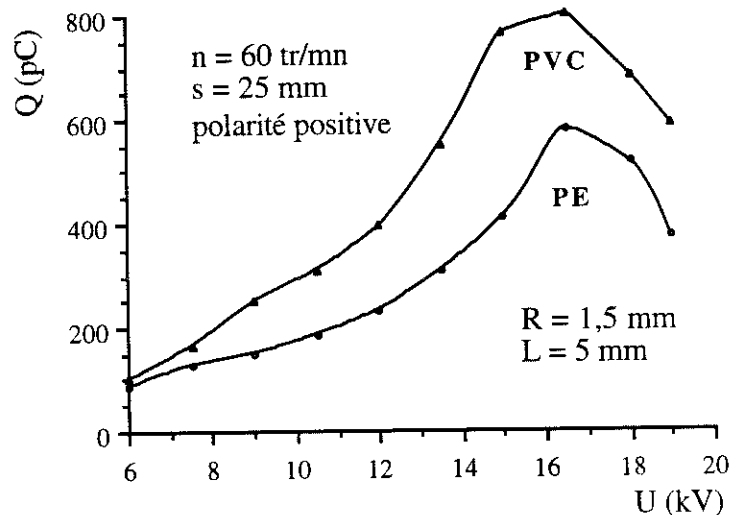


Fig. 2.36. Charge acquise en champ ionisé par des particules cylindriques en PE et PVC ($R = 1,5 \text{ mm}$, $L = 5 \text{ mm}$) en contact avec l'électrode reliée à la terre, en fonction de l'amplitude de la haute tension appliquée aux électrodes.

Le processus de charge des particules dans les séparateurs électrostatiques s'effectuant dans l'air atmosphérique, il est influencé par les conditions environnementales, notamment par l'humidité atmosphérique " w " [67, 68]. Les courbes représentées sur la Fig. 2.37 montrent qu'à des valeurs modérées de la tension d'alimentation des électrodes, la modification des caractéristiques courant-tension avec l'humidité " w " est favorable au processus de charge des particules. Cependant, le phénomène d'absorption d'eau dans une couche superficielle modifie la conductivité des particules et accélère la décharge de celles-ci au contact avec l'électrode reliée à la terre. Par conséquent, la charge limite acquise par la particule diminue avec l'humidité " w ".

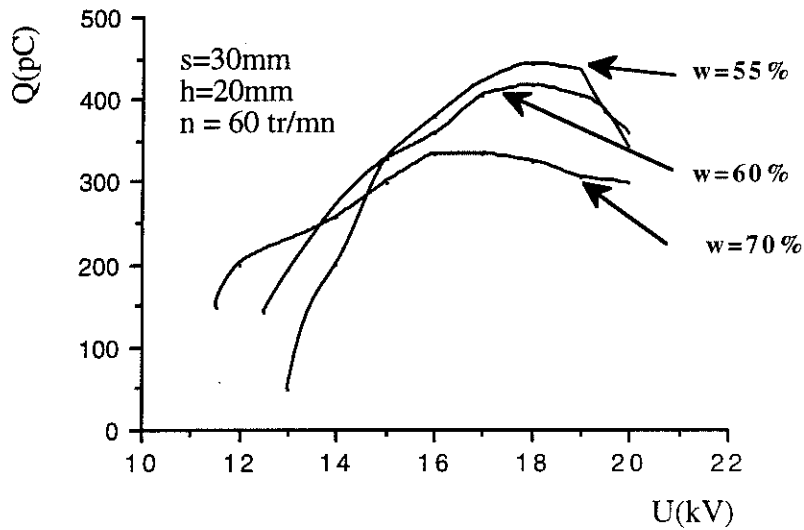


Fig. 2.37. Charge acquise en champ ionisé par une particule sphérique en polyamide ($R = 1,5 \text{ mm}$) en fonction de l'amplitude de la haute tension, pour trois valeurs de l'humidité atmosphérique " w ". Le dispositif expérimental est équipé d'une électrode à deux lignes de pointes ionisantes tubulaires.

Certaines installations de séparation électrostatique sont équipées d'une électrode cylindrique tournante revêtue d'un isolant [26]. La charge des particules posées sur une telle électrode a été étudié avec le dispositif représenté sur la figure 2.38.

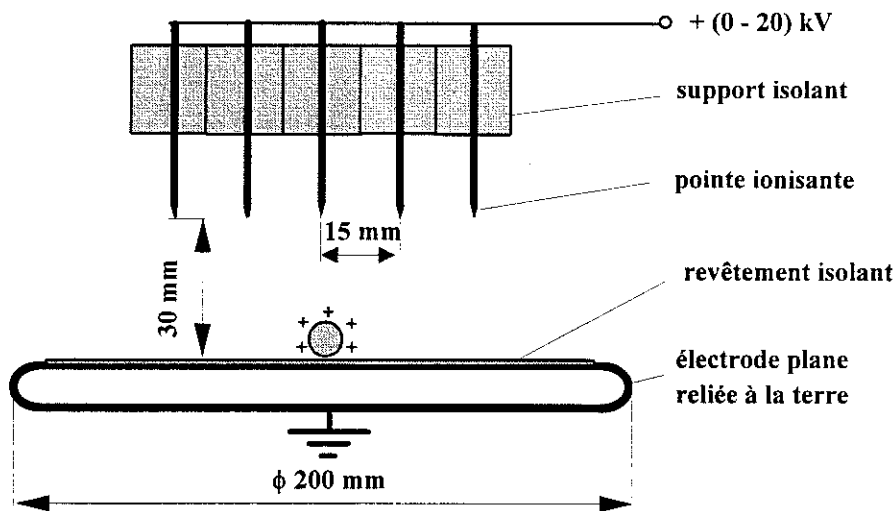


Fig. 2.38. Schéma du dispositif expérimental pour l'étude de la charge des particules posées sur une électrode plane revêtue d'un isolant. La décharge couronne est produite par une électrode de type matrice de pointes ionisantes (5x5 pointes ionisantes en acier, de diamètre de 1 mm et de rayon $10 \mu\text{m}$).

La particule sphérique en polyamide ($R = 1,5 \text{ mm}$) est déposée sur la surface de l'électrode plane et soumise à l'action de la décharge couronne pour 10 secondes. A l'aide d'une pince isolante, la particule est enlevée de la zone du champ ionisé et déposée dans une cage de Faraday connectée à l'électromètre pour la mesure de la charge. Deux séries d'expériences ont été effectuées pour comparer la charge acquise par la particule posée sur l'électrode plane, sans et avec un revêtement isolant (Fig. 2.39).

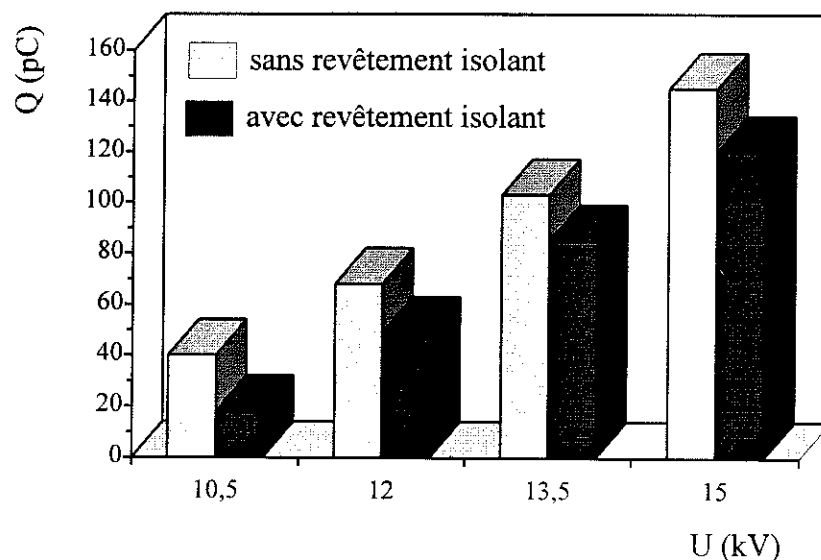


Fig. 2.39. Charge acquise en champ ionisé par une particule sphérique en polyamide ($R = 1,5 \text{ mm}$), posée sur la surface d'une électrode plane, sans et avec un revêtement isolant (U - tension de l'électrode ionisante).

Le flux d'ions générés par la décharge couronne charge aussi la surface du revêtement isolant. Par conséquent, la distribution du champ électrique autour de la particule posée sur une telle surface est modifiée, produisant la diminution de la charge acquise par la particule.

Conclusions du chapitre 2

1. La distribution de la densité de courant d'une électrode à pointes ionisantes sur la surface de l'électrode collectrice est fortement déterminée par sa configuration géométrique. A partir des mesures expérimentales de cette distribution on peut évaluer l'efficacité des électrodes et formuler des recommandations pratiques concernant la construction des électrodes ionisantes.
2. L'analyse numérique du champ électrique pour quelques configurations d'électrodes à pointes ionisantes a confirmé les résultats de l'étude expérimentale et a mis en évidence l'influence de certains paramètres géométriques sur les performances des électrodes. Les résultats de cette étude ont conduit à la proposition d'un nouveau modèle d'électrode à pointes ionisantes qui a été testé sur les séparateurs de laboratoire.
3. Compte tenu de la multitude des paramètres et des variables qui influencent la charge acquise par les particules, l'étude théorique doit être complétée par une étude expérimentale approfondie, en utilisant des dispositifs qui modélisent les conditions de charge spécifiques aux séparateurs industriels.
4. L'efficacité des différents types des électrodes ionisantes peut être évaluée en comparant la charge acquise par des particules calibrées, traversant le champ ionisé généré par celles-ci. Les électrodes à deux lignes de pointes ionisantes décalés d'un demi-pas ont les meilleures caractéristiques et ont été proposées pour équiper les séparateurs électrostatiques de laboratoire et industriels.
5. La charge acquise par une particule dans la zone de champ ionisé d'un séparateur électrostatique, croît avec la tension de l'électrode ionisante. Au dessus d'une valeur limite, la charge diminue à cause du phénomène d'auto-décharge. Dans les conditions de l'expérience, ce phénomène ne se produit pas pour des particules de forme aplatie.
6. L'étude expérimentale montre que la charge des particules isolantes dans les séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournant est influencée par les facteurs suivants :
 - a. permittivité de la particule;
 - b. vitesse de rotation de l'électrode cylindrique;
 - c. vitesse de la particule au moment où elle est déposée sur la surface de l'électrode cylindrique tournante;
 - d. humidité atmosphérique;
 - e. présence d'un revêtement isolant sur l'électrode reliée à la terre.

Chapitre 3

Trajectoires des particules en champ électrique

Chapitre 3. Trajectoires des particules en champ électrique

3.1. Analyse des trajectoires des particules dans le séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante.....	70
3.1.1. Equations du mouvement.....	70
3.1.2. Analyse des trajectoires des particules conductrices	72
3.1.3. Analyse des trajectoires des particules isolantes.....	74
3.2. Mouvement des particules conductrices en champ harmonique.....	77
3.2.1. Modèle physique et mathématique.....	78
3.2.2. Calcul numérique du champ de décollement.....	81
3.2.3. Etude expérimentale du comportement des particules conductrices en champ harmonique.....	82
3.3. Mouvement des particules conductrices en champ ionisé.....	86
3.3.1. Modèle physique et mathématique.....	87
3.3.2. Etude expérimentale du comportement des particules sphériques.....	91
3.3.3. Etude expérimentale du comportement des particules cylindriques.....	95

Les trajectoires des particules dans un champ électrique sont déterminées par la charge portée par celles-ci et par la distribution du champ [69...72]. La pureté des matériaux obtenus par séparation électrostatique d'un mélange granulaire dépend des trajectoires suivies par chaque particule chargée depuis l'introduction dans la zone de champ électrique jusqu'à la récupération dans le collecteur des produits [5, 61, 73, 74]. Plus l'éventail de trajectoires des deux composantes (Fig. 3.1) est étendu, plus la pureté des produits de la séparation est meilleure. Ceci explique l'intérêt d'effectuer une étude approfondie des facteurs qui influencent les trajectoires des particules dans les séparateurs. L'analyse théorique du sous-chapitre 3.1 est complétée par la modélisation numérique du mouvement des particules conductrices en champ harmonique (sous-chapitre 3.2), comme en champ ionisé (sous-chapitre 3.3), et par des travaux expérimentaux.

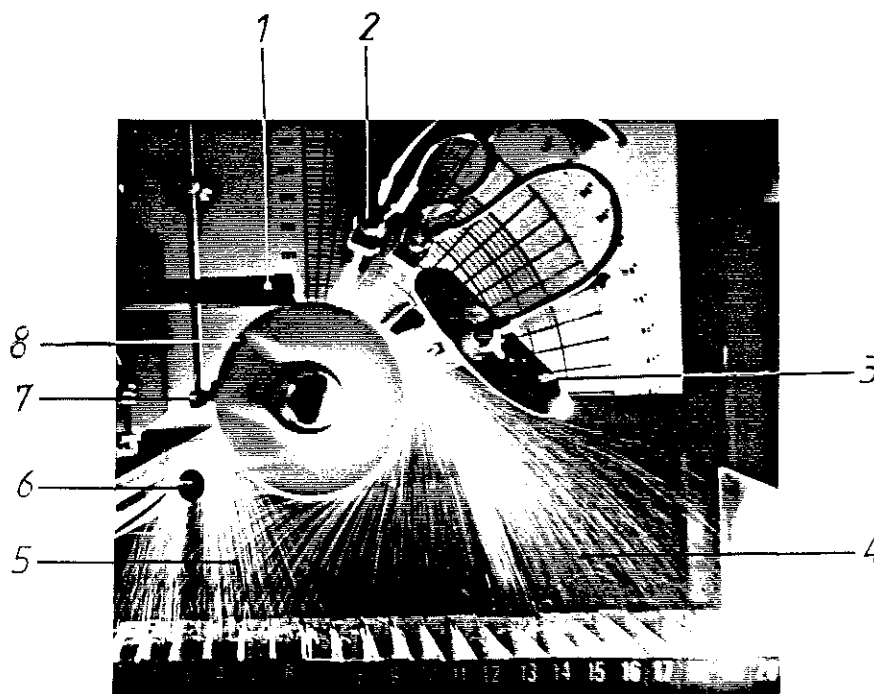


Fig. 3.1. Trajectoires des particules dans un séparateur électrostatique de laboratoire, à électrode cylindrique tournante. 1. - vibrotransporteur; 2. - électrode ionisante; 3. - électrode électrostatique; 4. - particules conductrices; 5. - particules isolantes; 6. - électrode de neutralisation; 7. - brosse; 8. - électrode cylindrique tournante reliée à la terre.

3.1. Analyse des trajectoires des particules dans le séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante

Le but de l'analyse théorique développée dans ce sous-chapitre est d'améliorer le modèle mathématique des trajectoires des particules dans un groupe important de séparateurs électrostatiques.

Les formes générales des équations du mouvement des particules dans le séparateur électrostatique à électrodes cylindrique tournante sont établies dans le § 3.1.1. Les problèmes spécifiques concernant les trajectoires des particules conductrices et isolantes sont discutés respectivement aux § 3.1.2 et § 3.1.3.

3.1.1. Equations du mouvement

Le mouvement d'une particule en contact avec l'électrode cylindrique tournante d'un séparateur électrostatique est décrit par les équations:

$$x = x_0 + R_c \sin \left[\frac{2\pi n}{60} (t - t_0) \right] \quad (3.1.a)$$

$$y = y_0 + R_c \cos \left[\frac{2\pi n}{60} (t - t_0) \right] \quad (3.1.b)$$

où t_0 est le moment où la particule est déposée sur la surface du cylindre, au point de coordonnées $x = x_0$, $y = y_0 + R_c$; R_c est le rayon du cylindre; x_0 , y_0 coordonnées du centre du cylindre et "n" vitesse de rotation du cylindre, en tr/mn.

Arrivée dans la zone de champ électrique intense, la particule est soumise aux forces suivantes (Fig. 3.2 et Fig. 3.3):

- force électrique F_q
- force image électrique F_i
- force centrifuge F_c
- force de la pesanteur F_g

La force du champ électrique a soit le sens de la normale extérieure à la surface de l'électrode cylindrique tournante (pour les particules conductrices chargées par contact), soit le sens de la normale intérieure à la même surface (pour les particules isolantes chargées en champ ionisé).

La force image électrique est toujours orientée vers l'axe de l'électrode reliée à la terre, tandis que la force centrifuge tend à détacher la particule de la surface du cylindre tournant. Le décollement se produit lorsque la résultante des forces électriques et mécaniques sur la direction radiale est nulle. Après le décollement, la force centrifuge devient nulle et, en négligeant la force aérodynamique, le mouvement de la particule est décrit par les équations:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{qx} \quad (3.2a)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_{qy} - mg \quad (3.2b)$$

avec les conditions initiales:

$$\frac{dx}{dt}(0) = v_0 \cos \beta \quad (3.3.a)$$

$$\frac{dy}{dt}(0) = v_0 \sin \beta \quad (3.3.b)$$

$$x(0) = R_c \sin \beta + x_0 \quad (3.4.a)$$

$$y(0) = R_c \cos \beta + y_0 \quad (3.4.b)$$

où: m - masse de la particule, β - angle de décollement, $v_0 = \frac{2\pi n}{60} R_c$ - vitesse de la particule lors du décollement de la surface du cylindre.

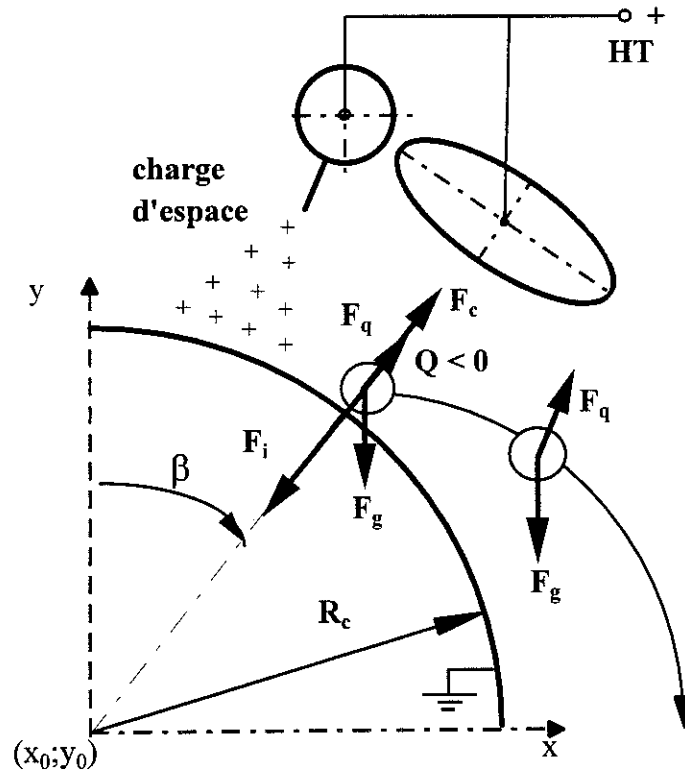


Fig. 3.2. Forces électriques et mécaniques qui agissent sur une particule conductrice chargée par contact avec l'électrode cylindrique tournante reliée à la terre.

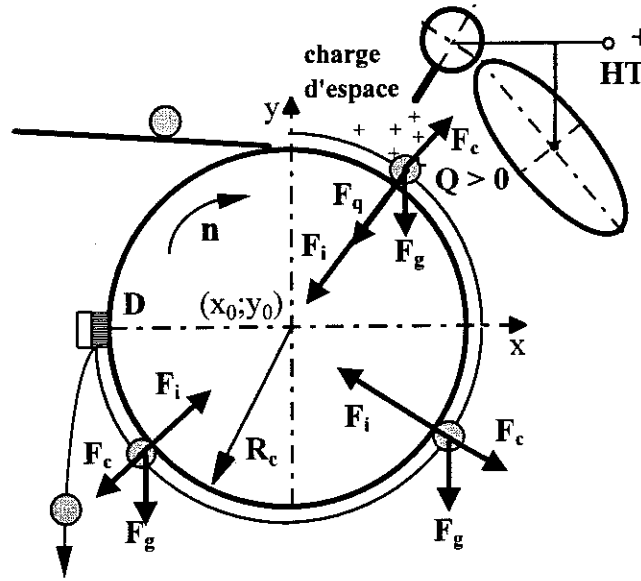


Fig. 3.3. Forces électriques et mécaniques agissant sur une particule isolante posée sur l'électrode cylindrique tournante reliée à la terre et chargée par flux d'ions dans la zone de champ ionisé.

3.1.2. Analyse des trajectoires des particules conductrices

La condition de décollement d'une particule conductrice s'exprime par l'équation:

$$F_i + F_g \cos \beta - F_q - F_c = 0 \quad (3.5)$$

d'où l'angle de décollement β :

$$\beta = \arccos \left[\frac{(F_c + F_q - F_i)}{F_g} \right] = \arccos \left[\frac{F_c + F_{el}}{F_g} \right] \quad (3.6)$$

avec $F_{el} = F_q - F_i$.

Dans les études concernant la séparation électrostatique [1...4, 16, 19], les forces F_q et F_i qui s'exercent sur une particule sphérique de rayon R sont exprimées par les formules approchées suivantes :

$$F_q = Q_m E \quad (3.7)$$

$$F_i = \frac{Q_m^2}{4\pi\epsilon_0 (2R)^2} \quad (3.8)$$

Ces deux relations sont valables si on peut considérer que la charge est répartie de façon homogène sur la surface, donc on peut la situer au centre de la sphère. Cette hypothèse n'est pas correcte dans le cas d'une particule conductrice chargée par contact avec l'électrode. En effet, la force électrique résultante F_{el} qui s'exerce sur une particule sphérique en contact avec une électrode diffère de la valeur déterminée avec $F_{el} = F_{q'} - F_{i'}$, $F_{q'}$ et $F_{i'}$ étant données par les relations (3.7) et (3.8). Par exemple, pour la particule conductrice sphérique, la force résultante F_{el} est donnée par la formule [75]:

$$F_{el} = 0,832 Q_m E \quad (3.9)$$

où $Q_m = \frac{2\pi^3}{3} \epsilon_0 R^2 E$ est la charge de la particule conductrice en contact avec l'électrode, en champ uniforme d'intensité E . La relation 3.9 devient:

$$F_{el} = 17,2 \epsilon_0 R^2 E^2 \quad (3.10)$$

Cette valeur est 1,41 fois plus grande que $(F_{q'} - F_{i'})$.

En utilisant la valeur de la force F_{el} évaluée avec $F_{q'} - F_{i'}$, l'angle de décollement d'une particule sphérique de cuivre ($\rho = 8900 \text{ kg/m}^3$) de rayon $R = 0,5 \text{ mm}$, est $\beta_1 = 63,6^\circ$. Avec la formule F_{el} donnée par (3.10) l'angle β a une valeur différente: $\beta_2 = 59,6^\circ$. On a considéré que l'intensité du champ est $E = 5 \text{ kV/cm}$ et que l'électrode cylindrique de rayon $R_c = 75 \text{ mm}$ tourne à une vitesse $n_1 = 60 \text{ tr/mn}$. Si on augmente la vitesse du cylindre jusqu'à $n_2 = 80 \text{ tr/mn}$, on obtient $\beta_1 = 47,4^\circ$ et $\beta_2 = 42,4^\circ$.

Des calculs similaires, pour une particule conductrice de forme cylindrique, posée horizontalement sur l'électrode donnent:

$$F_{el} = 0,715 Q_m E = 0,715 (2\pi \epsilon_0 R L E) E = 4,49 \epsilon_0 R L E^2 \quad (3.11)$$

et pour le cylindre posée verticalement sur l'électrode:

$$F_{el} = \frac{\ln\left(\frac{L}{R}\right) - 0,5}{\left[\ln\left(\frac{2L}{R}\right) - 1\right]} Q_m E = \pi \epsilon_0 L^2 \frac{\ln\left(\frac{L}{R}\right) - 0,5}{\left[\ln\left(\frac{2L}{R}\right) - 1\right]^2} E^2 \quad (3.12)$$

où R et L sont le rayon et la longueur de la particule cylindrique.

Dans la relation (3.12) le cylindre dressé a été assimilé à un demi-ellipsoïde de révolution allongé. Un calcul plus précis de la force F_{el} pour la particule conductrice cylindrique posée verticalement sur l'électrode a été effectué avec le logiciel CSP (Annexe 2). Ce logiciel peut être utilisé pour évaluer la force F_{el} pour d'autres formes de particules présentant symétrie plane ou de révolution.

Après le décollement de la particule, la force résultante électrique F_{el} reste encore sous l'influence de l'électrode reliée à la terre. La valeur de la force F_{el} dépend de la distance "x" entre la particule et l'électrode (Fig. 3.4) et plus "x" croît, plus F_{el} s'approche de la valeur $F_q = Q_m E$. Dans le cas de la particule conductrice sphérique, le rapport F_{el}/F^* tend vers $\frac{Q_m E}{0,832 Q_m E} = 1,20$. Ce résultat est en bon accord avec les calculs de Félici [40] et Anis et Srivastava [77].

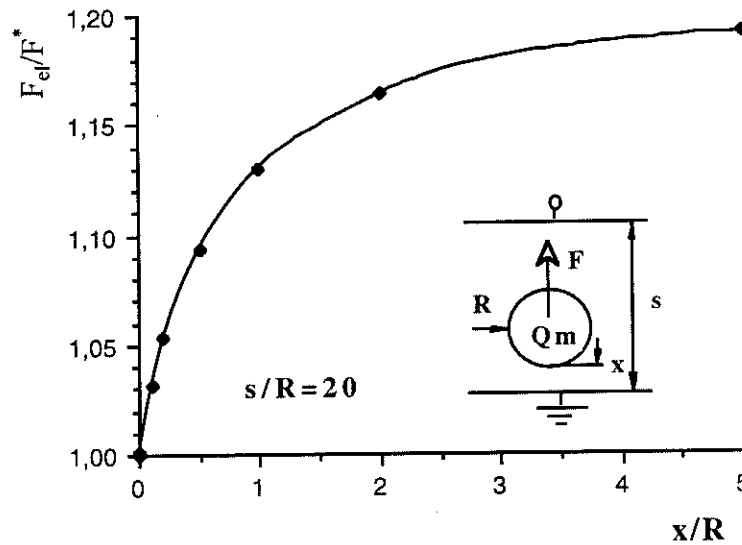


Fig. 3.4. Force résultante électrique F_{el} qui s'exerce sur une particule conductrice sphérique chargée par contact avec l'électrode, après le décollement (F^* est la force agissant sur la particule en contact avec l'électrode).

Pour un calcul plus précis des trajectoires des particules, dans les équations (3.2a) et (3.2b) F_{qx} et F_{qy} doivent être remplacées par F_{elx} et F_{ely} qui seront calculées numériquement, en fonction de la forme de la particule conductrice et de la charge acquise par contact avec l'électrode.

3.1.3. Analyse des trajectoires des particules isolantes

Un régime efficace de fonctionnement d'un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante s'obtient si les particules isolantes, chargées dans la zone de champ ionisé, restent "collées" sur la surface du cylindre jusqu'à la brosse (Fig. 3.5).

Dans le cas contraire, le détachement se produit à un angle qui correspond à valeur nulle de la composante radiale du système des forces agissant sur la particule:

$$F_i + F_q + F_g \cos \beta - F_c = 0 \quad (3.13)$$

La valeur de l'angle de détachement est donc:

$$\beta = \arccos \left[\frac{(F_c - F_q - F_i)}{F_g} \right] \quad (3.14)$$

Si la particule reste collée sur la surface du cylindre et dépasse la zone de champ électrique, la force F_q devient nulle et l'angle β s'exprime par la relation:

$$\beta = \arccos \left[\frac{(F_c - F_i)}{F_g} \right] \quad (3.15)$$

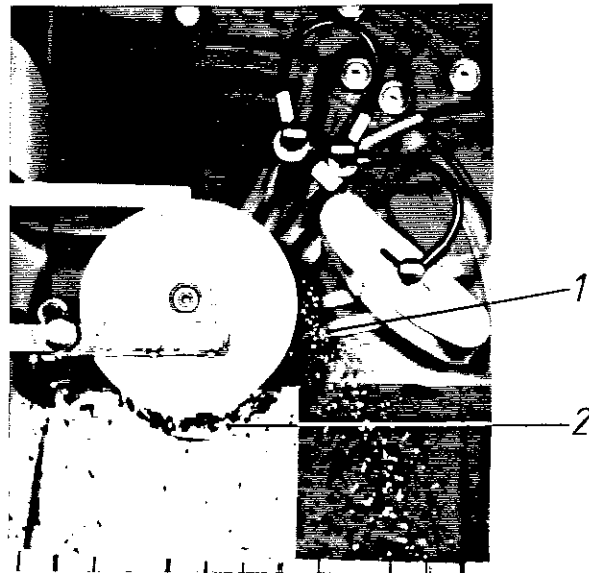


Fig. 3.5. Trajectoires des particules dans un séparateur électrostatique. 1. - particules conductrices détachées de la surface du cylindre; 2. - particules isolantes collées sur la surface du cylindre.

Le calcul précis de la force électrique résultante $F_{el} = F_q + F_i$ peut s'effectuer numériquement, en imposant la valeur de la charge de la particule (sous-chapitre 1.3). Cette charge, acquise sous l'effet du flux d'ions dans la zone de champ ionisé, dépend de la constante de temps du processus de charge τ (§ 1.3.2) qui est fonction de la densité de charge d'espace. La mesure de la densité de courant de la décharge couronne donne les informations nécessaires pour évaluer la valeur de τ et, ainsi, pour calculer la charge de la particule par rapport à la charge à saturation.

Le calcul de la charge à saturation sera effectué aussi numériquement, en tenant compte de la position de la particule par rapport à l'électrode (sous-chapitre 1.2).

Dès que la particule quitte la zone de champ ionisé et que le processus de charge cesse, la charge décroît à cause du contact entre la particule et l'électrode cylindrique reliée à la terre. L'évolution de la charge est donnée par l'équation:

$$Q(t) = Q_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right) \quad (3.16)$$

où Q_i est la charge acquise par la particule en sortant de la zone de champ ionisé et τ_d est la constante de temps du processus de décharge. Le temps de décharge t_d où la particule reste en contact avec l'électrode entre la zone de champ ionisé et le point "D" où la particule décolle (Fig. 3.3), dépend de la vitesse de rotation "n" du cylindre. Si par exemple, $n = 100$ tr/mn, $t_d \cong 0,3$ s donc, pour un processus efficace de séparation, les particules isolantes doivent rester collées sur la surface du cylindre au moins 0,3 secondes. La diminution relative de la charge pendant le temps t_d a été calculée selon la relation (3.16), en fonction de quelques valeurs de la constante de temps de décharge τ_d (Tableau 3.1).

Tableau 3.1. Diminution relative de la charge d'une particule isolante par contact avec le cylindre tournant reliée à la terre, entre la zone de champ ionisé et le point "D", selon la constante de temps du processus de décharge τ_d ($n = 100$ tr/mn; $t_d = 0,3$ s).

τ_d (s)	100	10	1
$\frac{Q(t_d)}{Q_i}$	0,99	0,97	0,74

La valeur de la constante τ_d dépend de plusieurs facteurs dont les plus importants sont la permittivité et la conductivité de la particule, sa forme et sa taille, la grandeur de la zone de contact entre la particule et l'électrode reliée à la terre, l'état de surface de la particule (humidité, poussière), etc. Pour des particules cylindriques de PVC nous avons évalué expérimentalement la constante de temps du processus de décharge τ_d à environ 8 s (Annexe 3), c'est-à-dire que la diminution de la charge Q après $t_d = 0,3$ s est de 4% environ et la diminution de la force image électrique F_i est de 7% environ.

Par conséquent, dans le cas des particules isolantes, la diminution de la force image électrique par la décroissance de la charge n'est pas le facteur le plus important dans le détachement des particules à $\beta < 270^\circ$ (avant le détachement mécanique par la brosse). dans la relation (3.15), la force de pesanteur et la force centrifuge sont plus importants.

3.2. Mouvement des particules conductrices en champ harmonique

Plusieurs études ont porté sur le comportement des particules conductrices en champ électrique sous tension continue ou alternative, la plupart en liaison avec la diminution de la tension de claquage des appareils à haute tension [76...88].

Le but du travail présenté dans ce sous-chapitre est d'améliorer la compréhension du comportement des particules conductrices en champ harmonique. Les conditions dans lesquelles une particule conductrice décolle de l'électrode avec laquelle elle est en contact sont discutées au § 3.2.1. Le champ de décollement a pu être calculé à l'aide d'une méthode originale qui utilise le calcul numérique de la force agissant sur la particule conductrice (§ 3.2.2). L'étude expérimentale est en bon accord avec le calcul numérique concernant le champ de décollement et établit quelques conditions concernant le claquage produit par les particules allongées (§ 3.2.3).

Dans le plus simple des séparateurs électrostatiques, le champ électrique est produit entre une électrode à grand rayon de courbure ("électrode électrostatique"), connectée à une source haute tension continue (Fig. 3.6).

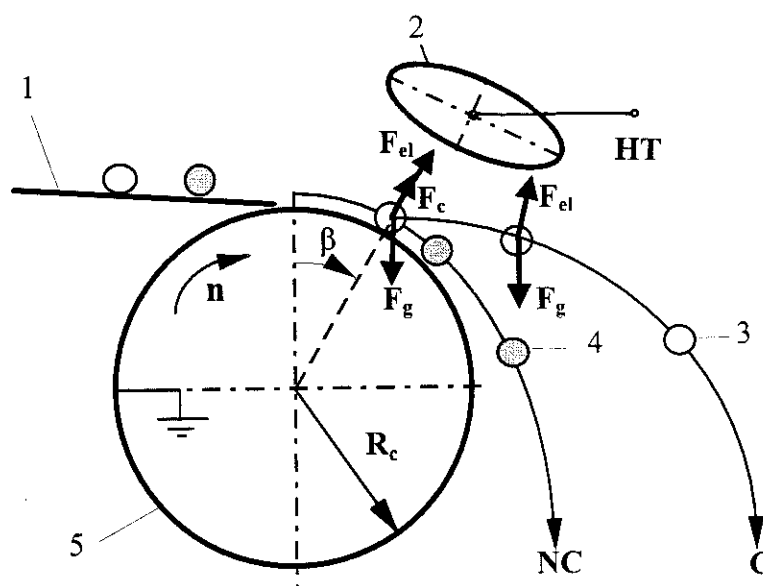


Fig. 3.6. Régime électrostatique d'un séparateur à électrode cylindrique tournante. 1. - vibrotransporteur; 2. - électrode électrostatique à profil elliptique; 3. - particule conductrice; 4. - particule isolante; 5. - électrode cylindrique tournante reliée à la terre.

Un vibrotransporteur dépose les particules sur la surface de l'électrode cylindrique tournante qui les porte vers la zone de champ harmonique. Chargées par contact avec l'électrode reliée à la terre, les particules conductrices décollent de la surface du cylindre et sont attirées vers l'électrode électrostatique. Les particules isolantes, non chargées, ne subissent que l'action des forces mécaniques et se déplacent sur des trajectoires différentes.

3.2.1. Modèle physique et mathématique

Compte tenu du rapport qui existe entre la taille typique (de 0,1 à 5 mm) des particules conductrices et les dimensions usuelles des électrodes (rayon du cylindre 75-125-175 mm), un système de deux électrodes planes et parallèles est approprié pour modéliser le champ harmonique d'un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante (Fig. 3.7).

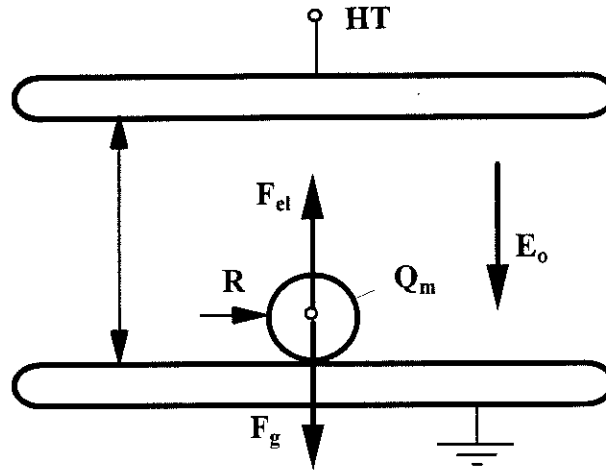


Fig. 3.7. Modèle plan-parallèle du champ harmonique d'un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante.

Une particule conductrice en contact avec une électrode, emporte une charge Q_m proportionnelle à l'intensité du champ électrique E . Cette charge dépend de la forme et de la taille de la particule [40]. Son signe est celui de l'électrode et la force électrique F^* tend à soulever la particule. La valeur de la force F^* est inférieure à $F = Q_mE$ qui agit sur la particule à grande distance de l'électrode. La particule décolle à une certaine valeur du champ E_d , quand $F^* = F_g = mg$. Le Tableau 3.2 présente les valeurs de la charge Q_m , la force du champ électrique F^* et le champ de décollement E_d pour des particules sphériques et cylindriques. Les valeurs du champ de décollement correspondent au cas de la particule posée sur une électrode plane, horizontale (Fig. 3.7). Dans le cas réel, d'un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante (Fig. 3.6), où la particule subit en plus la force centrifuge F_c , le champ de décollement E_d est donné par l'équation:

$$F_{el}(E_d) + F_c = F_g \cos \beta \quad (3.17)$$

ou:

$$F_{el}(E_d) + mR_c \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 = F_g \cos \beta \quad (3.18)$$

Tableau 3.2. Charge de contact Q_m , force du champ électrique F^* et champ de décollement E_d pour les particules sphériques et cylindriques en contact avec l'électrode.

	Sphère (rayon R)	Cylindre (rayon R , longueur L)	
		position horizontale	position verticale
Q_m	$\frac{2\pi^3}{3}\epsilon_0 R^2 E$	$2\pi\epsilon_0 RLE$	$\frac{\pi\epsilon_0 L^2 E}{\ln\left(\frac{2L}{R}\right) - 1}$
F^*	$17,2\epsilon_0 R^2 E^2$	$4,49\epsilon_0 RLE^2$	$\frac{\pi\epsilon_0 L^2 E^2 \left[\ln\left(\frac{L}{R}\right) - 0,5 \right]}{\left[\ln\left(2\frac{L}{R}\right) - 1 \right]^2}$
E_d	$0,49\sqrt{\frac{R\rho g}{\epsilon_0}}$	$0,836\sqrt{\frac{R\rho g}{\epsilon_0}}$	$\frac{\left[\ln\left(2\frac{L}{R}\right) - 1 \right] \sqrt{\frac{R^2}{L} \rho g}}{\sqrt{\ln\left(\frac{L}{R}\right) - 0,5}}$

Si la particule conductrice est une sphère, la relation (3.18) devient:

$$17,2\epsilon_0 R^2 E_d^2 + mR_c \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 = mg \cos \beta \quad (3.19)$$

et pour le champ de décollement on obtient:

$$E_d = \sqrt{\frac{1}{4,1\epsilon_0} \left[R\rho g \cos \beta - R_c R \rho \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 \right]} \quad (3.20)$$

Une relation similaire est obtenue pour la particule conductrice cylindrique en position horizontale sur l'électrode:

$$E_d = \sqrt{\frac{1}{1,43\epsilon_0} \left[R\rho g \cos \beta - R_c R \rho \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 \right]} \quad (3.21)$$

Le champ de décollement d'une particule conductrice en contact avec l'électrode cylindrique tournante reliée à la terre, dépend de ses caractéristiques (R , ρ), de sa position (angle β) aussi bien que des paramètres de réglage de l'installation (R_c , n).

Après le décollement, les particules conductrices cylindriques en champ harmonique, s'alignent parallèlement aux lignes du champ électrique (Fig. 3.8).

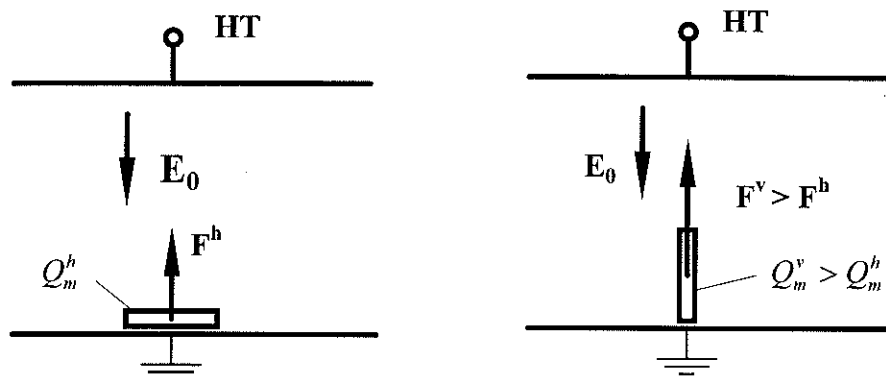


Fig. 3.8. La particule cylindrique en position horizontale sur l'électrode décolle et bascule en position verticale, selon la direction des lignes du champ électrique.

En supposant que la particule reste en contact avec l'électrode, sa charge et la force du champ électrique augmentent, la particule sera fortement entraînée vers l'électrode opposée. Au sommet de la particule se produit un très fort renforcement du champ qui peut déclencher le claquage entre les électrodes. Le renforcement du champ, l'augmentation de la charge et de la force dépendent des caractéristiques géométriques de la particule (Tableau 3.3).

Tableau 3.3. Augmentation de la charge (Q), de la force (F) et renforcement du champ électrique (E/E_0) à l'extrémité de la particule conductrice cylindrique en position horizontale (^{h}) sur l'électrode, en champ harmonique, lorsqu'elle décolle et bascule en position verticale (^{v}).

L/R	10	20	30	40
Q^v/Q^h ($\times 10^{-12}$ C)	3,21 (65,8/20,5)	4,50 (184,3/41,0)	5,76 (354,2/61,5)	6,92 (567,5/81,9)
F^v/F^h ($\times 10^{-6}$ N)	4,30 (37,1/8,6)	6,17 (106,6/17,3)	8,07 (209,1/25,9)	9,85 (340,5/34,6)
$(E/E_0)^v/(E/E_0)^h$	2,46 (6,4/2,6)	4,03 (10,4/2,6)	5,52 (14,3/2,6)	7,00 (18,1/2,6)

Le calcul a été effectué en utilisant le logiciel CSP, pour des particules conductrices cylindriques ($R = 0,25$ mm, $\rho = 1800$ kg/m³) qui décollent à $E_d = 5,9$ kV/cm.

3.2.2. Calcul numérique du champ de décollement

Le calcul du champ de décollement E_d d'une particule conductrice dans un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante, implique une évaluation précise de la force électrique F_{el} (relation 3.17). Le calcul analytique ne peut être effectué que pour quelques formes de particules (par exemple : sphère, cylindre "couché", en conformité avec les relations 3.20 et 3.21). Pour une particule conductrice quelconque, le calcul de la force F_{el} donc, du champ E_d , peut s'effectuer avec un logiciel d'analyse numérique des champs électriques tri-dimensionnels. Le logiciel CSP est un outil de calcul approprié dans le cas des particules dont la forme présente une symétrie plane ou de révolution [89]. Soit F_{CSP} la force calculée avec CSP pour une certaine distance s_{CSP} entre les électrodes et un certain champ E_{CSP} . Dans une configuration réelle, caractérisée par un intervalle "s" entre les électrodes et une intensité "E" du champ électrique, la force F_{el} est donnée par la formule:

$$F_{el} = \left(K_{CSP} \frac{E}{E_{CSP}} \right)^2 F_{CSP} \quad (3.22)$$

où K_{CSP} est le facteur d'échelle de la configuration géométrique $\left(K_{CSP} = \frac{R}{R_{CSP}} = \frac{s}{s_{CSP}} \right)$. Le champ de décollement E_d d'une particule conductrice en contact avec l'électrode plane (Fig. 3.7) peut être calculé avec la relation:

$$E_d = \frac{1}{K_{CSP}} E_{CSP} \sqrt{\frac{mg}{F_{CSP}}} \quad (3.23)$$

Dans le cas d'une particule conductrice qui traverse la zone de champ harmonique d'un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante; la relation (3.18) devient:

$$\left(K_{CSP} \frac{E_d}{E_{CSP}} \right)^2 F_{CSP} + mR_c \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 = mg \cos \beta \quad (3.24)$$

et le champ de décollement sera calculé avec la relation:

$$E_d = \frac{1}{K_{CSP}} E_{CSP} \sqrt{\frac{mg \cos \beta - mR_c \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2}{F_{CSP}}} \quad (3.25)$$

La méthode présentée ci-dessus pour le calcul du champ de décollement a été vérifiée dans le cas d'une particule sphérique pour laquelle il existe une relation analytique (Tableau 3.2).

Le calcul numérique du champ de décollement a été effectué pour des particules conductrices cylindriques posées verticalement sur l'électrode, en champ harmonique et comparé au calcul analytique (Tableau 3.4). La relation analytique (Tableau 3.2) correspond à un demi-ellipsoïde de révolution. C'est pour cela, le calcul analytique du champ de décollement est plus précise pour des particules allongées (valeurs élevées du rapport L/R).

Tableau 3.4. Calcul analytique et numérique du champ de décollement d'une particule conductrice cylindrique (rayon $R = 0,25$ mm, masse volumique $\rho = 1800$ kg/m³, longueur L) posée verticalement une électrode plane, en champ harmonique.

L/R	10	20	30	40
E_d^{an} (kV/cm)	3,32	2,68	2,34	2,11
E_d^{num} (kV/cm)	2,85	2,38	2,08	1,88
E_d^{num}/E_d^{an}	0,86	0,88	0,88	0,89

3.2.3. Etude expérimentale du comportement des particules conductrices en champ harmonique

Premièrement, cette étude a vérifié la précision de la méthode expérimentale de mesure du champ de décollement pour des particules sphériques. Deuxièmement, les mesures effectuées sur le décollement des particules cylindriques ont mis en évidence un bon accord entre les résultats expérimentaux et les valeurs calculées numériquement. L'étude expérimentale du comportement des particules conductrices en champ harmonique a permis d'établir l'influence des caractéristiques physiques des particules sur le claquage qui peut se déclencher lors du décollement.

Le dispositif expérimental (Fig. 3.9) utilise deux électrodes en forme de disque dont le diamètre est 200 mm et l'épaisseur 10 mm. Les bords sont arrondis ($r = 5$ mm) et la surface bien lisse, afin d'éviter une injection de courant par décharge couronne.

La distance entre les électrodes est fixée en variant la longueur des deux supports isolants (parallélépipèdes en polyéthylène). Un kilovoltmètre Hallmark Standard Inc., (0...50) kV, a été utilisé pour mesurer la tension fournie par la source SPELLMAN (0...50 kV, 2mA, réglable et réversible). Des particules sphériques en résine ($R = 0,55$ mm, $\rho = 1400$ kg/m³), polyéthylène ($R = 1,2$ mm, $\rho = 1100$ kg/m³) et polyamide ($R = 1,5$ mm, $\rho = 1400$ kg/m³) ont été recouvertes de peinture d'argent pour obtenir des sphères conductrices. Le champ de décollement a été expérimentalement déterminé pour différentes distances entre les électrodes (Fig. 3.10). Les résultats des mesures sont en bon accord avec les valeurs calculées numériquement, selon la méthode présentée ci-dessus.

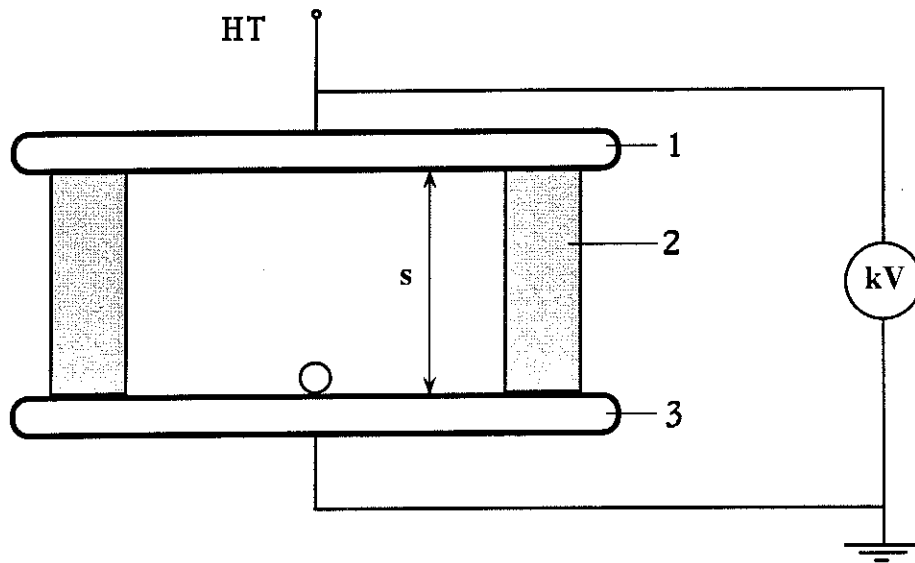


Fig. 3.9. Dispositif expérimental utilisé pour l'étude du mouvement des particules conductrices en champ harmonique. 1. - électrode plane supérieure reliée à haute tension; 2. - support isolant; 3. - électrode plane inférieure, reliée à la terre.

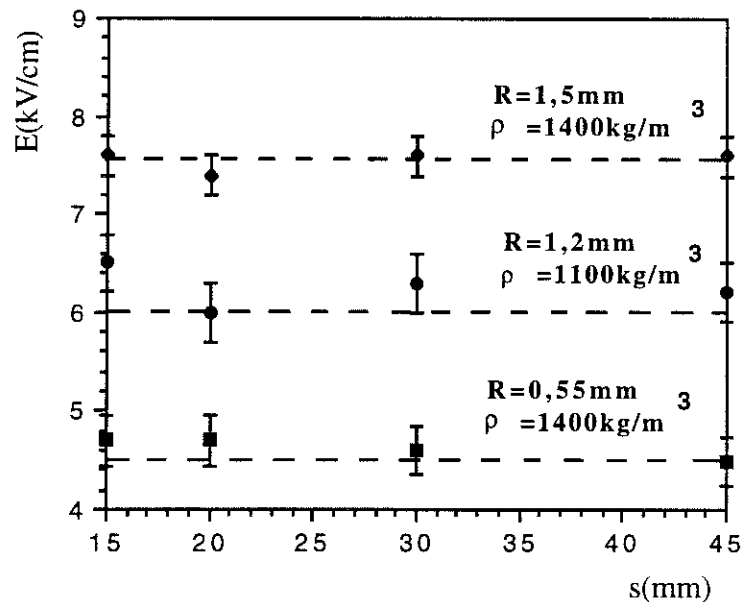


Fig. 3.10. Comparaison entre le champ de décollement déterminé expérimentalement, et les résultats du calcul numérique (ligne pointillée) pour des particules conductrices sphériques en contact avec l'électrode plane, en champ harmonique.

Le décollement des particules cylindriques a été étudié pour les deux cas: position horizontale et position verticale sur l'électrode. La première série d'expériences a porté sur des cylindres en graphite ($R = 0,25 \text{ mm}$, $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$) et en aluminium ($R = 0,25 \text{ mm}$, $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$) posés horizontalement sur l'électrode (Fig. 3.11). Les résultats mettent en évidence une tendance à l'augmentation du champ de décollement avec le rapport L/R .

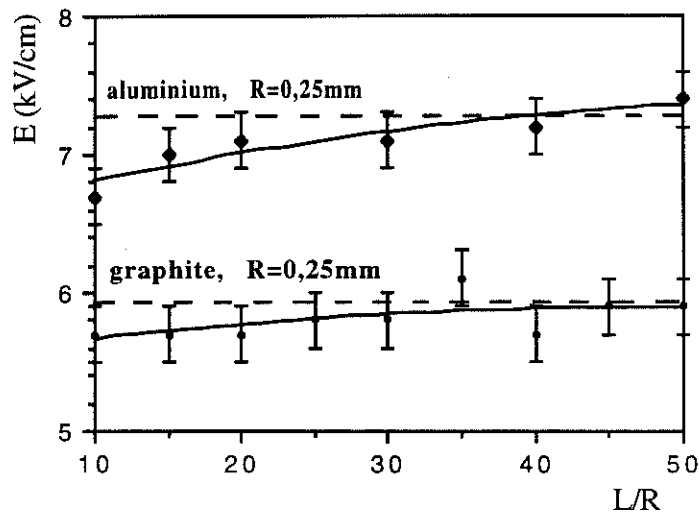


Fig. 3.11. Champ de décollement déterminé expérimentalement et calculé numériquement (ligne pointillée), pour des particules conductrices cylindriques posées horizontalement sur l'électrode plane, en champ harmonique.

Le champ de décollement E_d^h croît avec la longueur de la particule, bien que la valeur calculée soit constante (elle ne dépend pas de L). Plus la longueur de la particule croît, plus la différence entre la valeur mesurée et la valeur calculée du champ de décollement diminue. Cette différence entre les valeurs calculées et mesurées du champ de décollement en Fig. 3.11 est due au fait que le calcul numérique considère la longueur du cylindre infinie et les mesures ont porté sur des particules de longueur finie ($L/R = 2,5 \dots 7,5$).

L'étude expérimentale du comportement des particules conductrices cylindriques en position verticale sur l'électrode, en champ harmonique, a porté sur des cylindres en polyéthylène de rayon $R = 1,2 \text{ mm}$ et de longueur $L = 3 \dots 9 \text{ mm}$, recouverts de peinture d'argent. Les valeurs expérimentales du champ de décollement sont en bon accord avec le calcul numérique effectué avec le logiciel CSP (Fig. 3.12).

Dans certaines conditions, la particule posée horizontalement sur l'électrode peut déclencher le claquage lors du décollement. La valeur critique de la longueur (L_{cr}) est donnée par l'intersection des caractéristiques de décollement (E_d) et de claquage (E_{cl}) (Fig. 3.13), et pour des particules cylindriques de même rayon dépend de leur masse volumique. Les particules plus pesantes ont des valeurs plus grandes du champ de décollement.

Par conséquent, le renforcement du champ à l'extrémité de la particule "dressée" (Tableau 3.3) produit des conditions plus favorables pour le claquage et la longueur critique est plus petite.

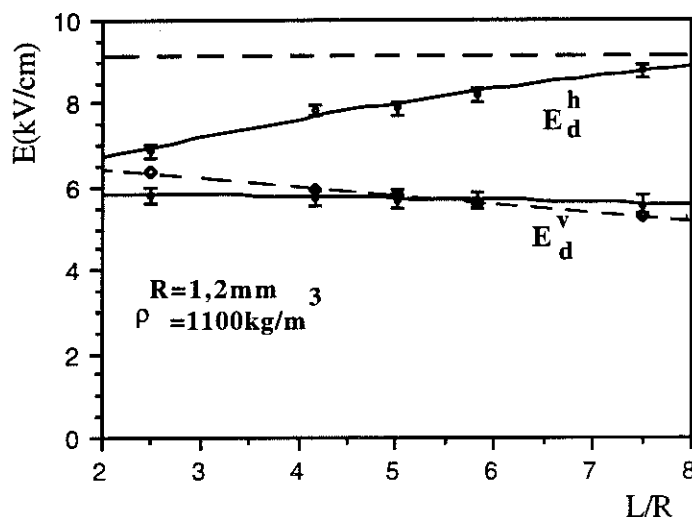


Fig. 3.12. Valeurs expérimentales et valeurs calculées numériquement (ligne pointillée) pour le champ de décollement des particules conductrices de rayon $R = 1,2 \text{ mm}$, en position verticale E_d^v et horizontale E_d^h sur une électrode plane.

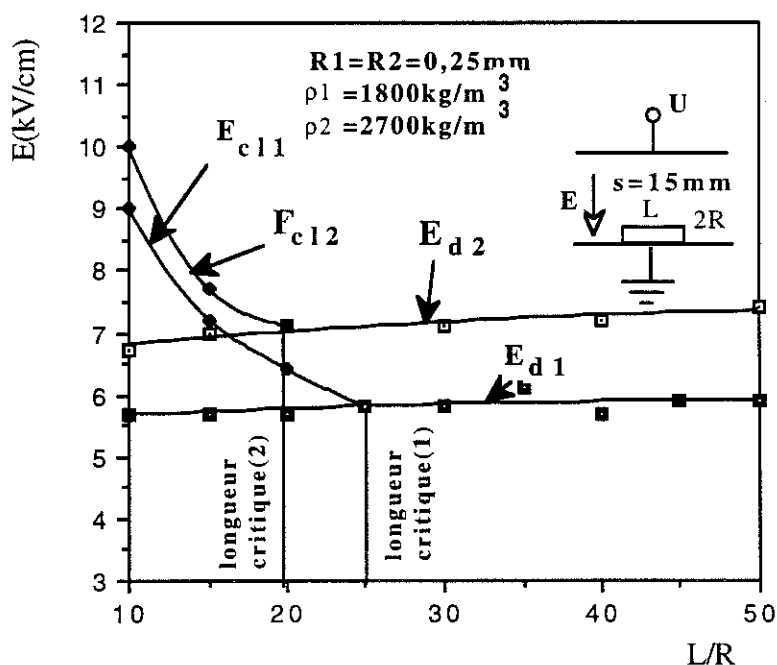


Fig. 3.13. Caractéristiques de décollement (E_d) et de claquage (E_{cl}) pour des particules cylindriques en graphite (1) et en aluminium (2), de rayon $R = 0,25 \text{ mm}$.

3.3. Mouvement des particules conductrices en champ ionisé

Le champ ionisé est utilisé pour charger les particules isolantes dans un nombre important d'applications industrielles de la séparation électrostatique [5...7, 48, 90,91]. La plus simple électrode ionisante est un fil métallique de faible rayon de courbure, connecté à une source haute tension (Fig. 3.14).

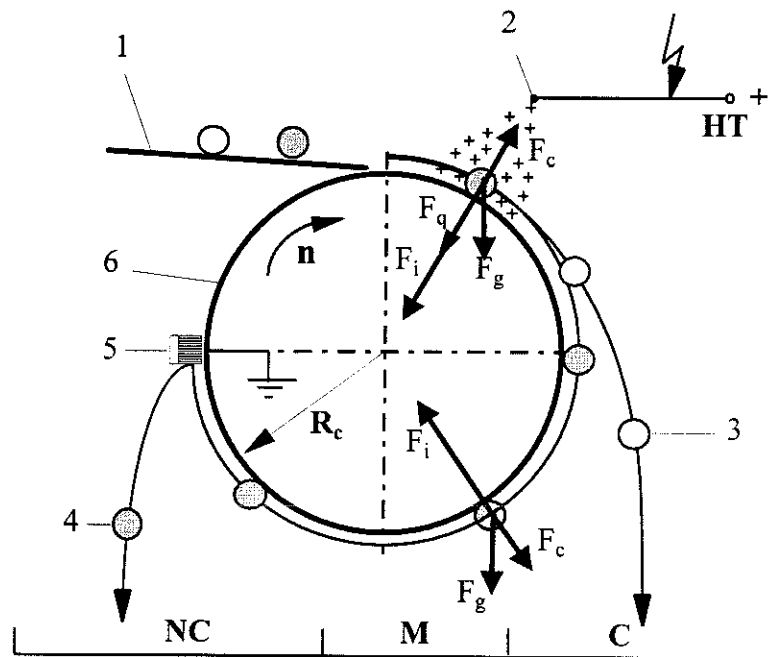


Fig. 3.14. Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à champ ionisé et électrode cylindrique tournante reliée à la terre. 1. - vibrotransporteur; 2. - électrode ionisante (fil métallique), reliée à la source haute tension; 3. - particule conductrice; 4. - particule isolante; 5. - électrode cylindrique reliée à la terre.

La charge d'espace créée par la décharge couronne entre l'électrode ionisante et l'électrode reliée à la terre modifie la distribution du champ électrique et, en même temps, le comportement des particules conductrices par rapport au champ harmonique [17, 27, 28, 92...94].

Les particularités du comportement des particules conductrices en champ ionisé sont reflétées dans un modèle mathématique introduit au § 3.3.1. Les prédictions théoriques ont été confirmées par les résultats des études expérimentales présentées dans le § 3.3.2 pour les particules sphériques et dans le § 3.3.3 pour les particules cylindriques.

3.3.1. Modèle physique et mathématique

Le mouvement des particules conductrices dans le champ ionisé d'un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante est en réalité, plus compliqué que la Fig. 3.14 ne le présente. Expérimentalement, on peut observer que les particules rebondissent sur le cylindre (Fig. 3.15), avant de s'écarter de celui-ci, attirées par l'électrode haute tension.

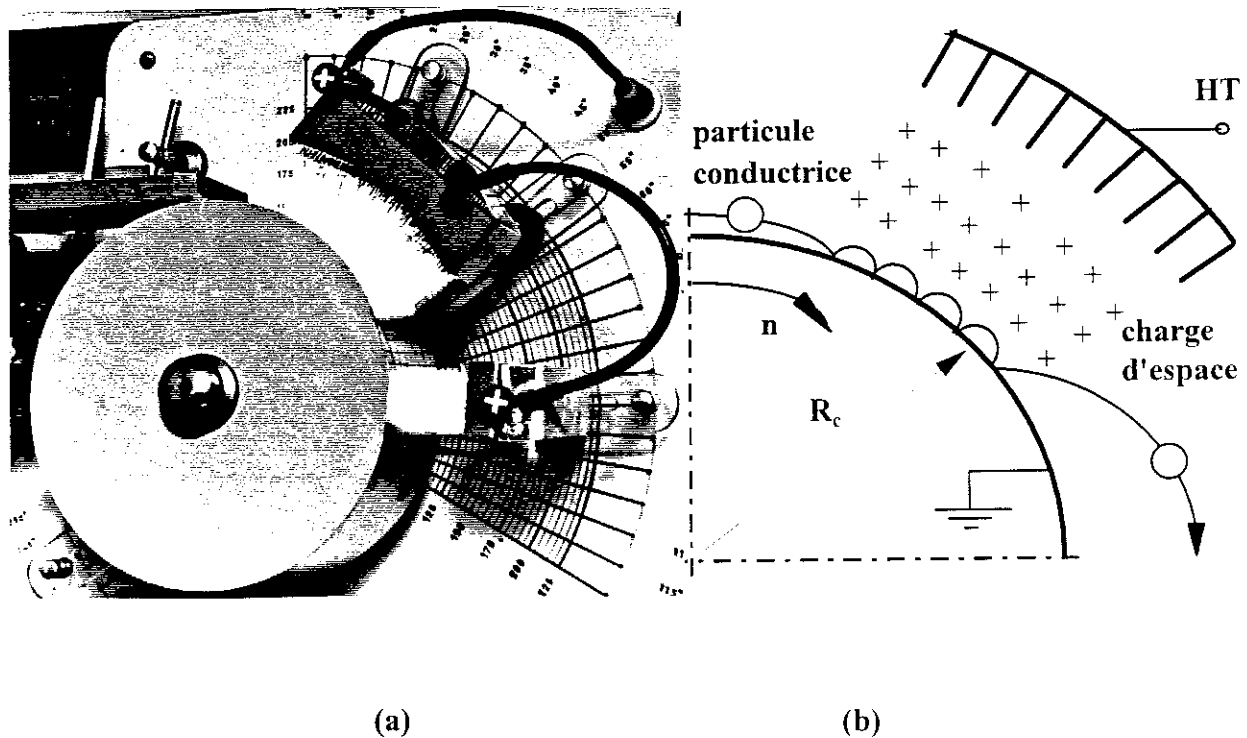


Fig. 3.15. a). Aspect de la décharge couronne produite par les électrodes ionisantes d'un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante; b). représentation schématique du mouvement des particules conductrices dans la zone de champ ionisé.

Le comportement des particules conductrices sphériques dans la zone de champ ionisé d'un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante peut être étudié en utilisant un modèle représenté sur la Fig. 3.16: une "matrice de pointes ionisantes" face à une électrode plane reliée à la terre.

En contact avec l'électrode plane reliée à la terre, la particule conductrice emporte la charge Q_m (Tableau 3.2), de même signe que l'électrode et est soumise à une force de soulèvement $F_{ej} = F^*$ (Tableau 3.2). Si cette force dépasse la force de pesanteur, la particule décolle et se dirige vers l'électrode ionisante.

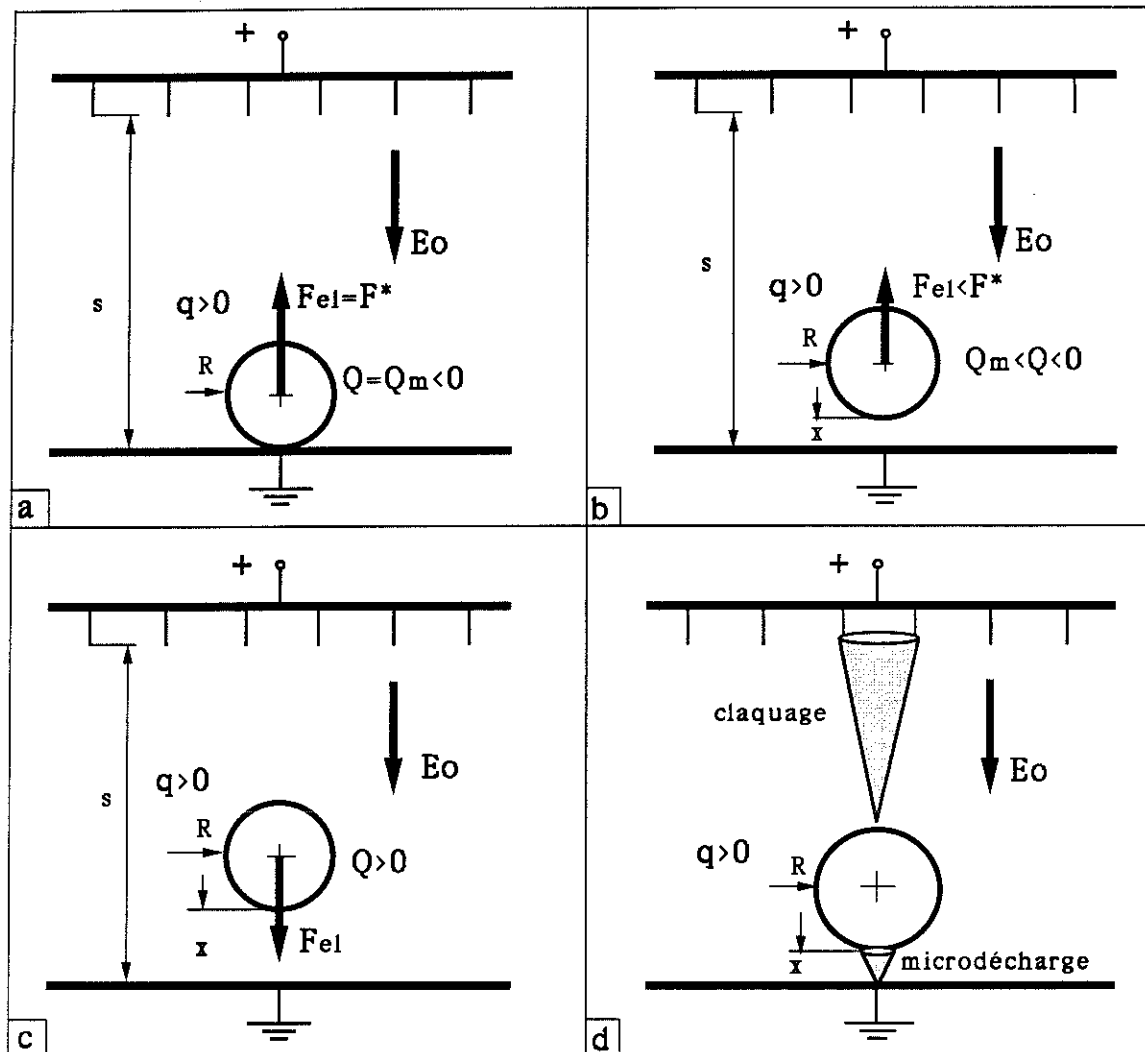


Fig. 3.16. Modélisation du comportement d'une particule conductrice sphérique en champ ionisé. a. - charge par contact et décollement vers l'électrode opposé; b. - diminution de la charge sous l'action du flux d'ions; c. - changement du signe de la charge et de la force; d. - micro-décharge produite entre la particule chargée et l'électrode de signe opposé.

Après décollement, sous l'action du flux d'ions la charge de la particule diminue en conformité avec la relation (1.1). La force F_{el} diminue aussi et la vitesse du mouvement ascendant se réduit. La charge finit par changer le signe et la force électrique freine le mouvement ascendant. La particule revient vers l'électrode plane. Lorsque la particule s'approche de l'électrode de polarité opposée une micro-décharge peut se produire entre les deux objets. [95]. Le canal conducteur fait que la particule a le même potentiel que l'électrode et, par conséquent, un fort renforcement du champ se produit à l'extrémité de la particule. Dans certaines conditions, la micro-décharge peut déclencher le claquage entre les électrodes [96].

La densité de la charge d'espace "q" modifie la distribution du champ électrique entre les électrodes. L'intensité du champ électrique E et la densité de charge d'espace q peuvent être calculées avec les relations [97]:

$$E(x) = \sqrt{\frac{2J(s-x)}{k\epsilon_0} + E_c^2} \quad (3.26)$$

$$q(x) = -\frac{J}{k} \frac{1}{\sqrt{\frac{2J(s-x)}{k\epsilon_0} + E_c^2}} \quad (3.27)$$

où k - mobilité des ions, J - densité de courant, s - distance entre les électrodes, x - coordonnée verticale (x = 0 - l'électrode plane, x = s - l'électrode ionisante), E_c - intensité du champ au niveau de l'électrode ionisante.

Dans l'hypothèse d'une très forte injection de charges, E_c = 0 et la valeur de l'intensité du champ à la surface de l'électrode plane reliée à la terre est:

$$E_p = \sqrt{\frac{2Js}{\epsilon_0 k}} \quad (3.28)$$

Le potentiel de l'électrode ionisante est:

$$V_c = \int_0^s E dx = \frac{2}{3} s \sqrt{\frac{2Js}{k\epsilon_0}} \quad (3.29)$$

et la valeur du champ moyen:

$$E_0 = \frac{U}{s} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2Js}{k\epsilon_0}} \quad (3.30)$$

Par conséquent, le rapport entre le champ à la surface de l'électrode plane reliée à la terre et le champ moyen est:

$$\lambda = \frac{E_p}{E_0} = 1,5 \quad (3.31)$$

Pour des électrodes ionisantes dans l'air atmosphérique, l'hypothèse E_c = 0 n'est pas réalisée et donc, la distribution du champ (Fig. 3.17) correspond à:

$$1 < \lambda < 1,5 \quad (3.32)$$

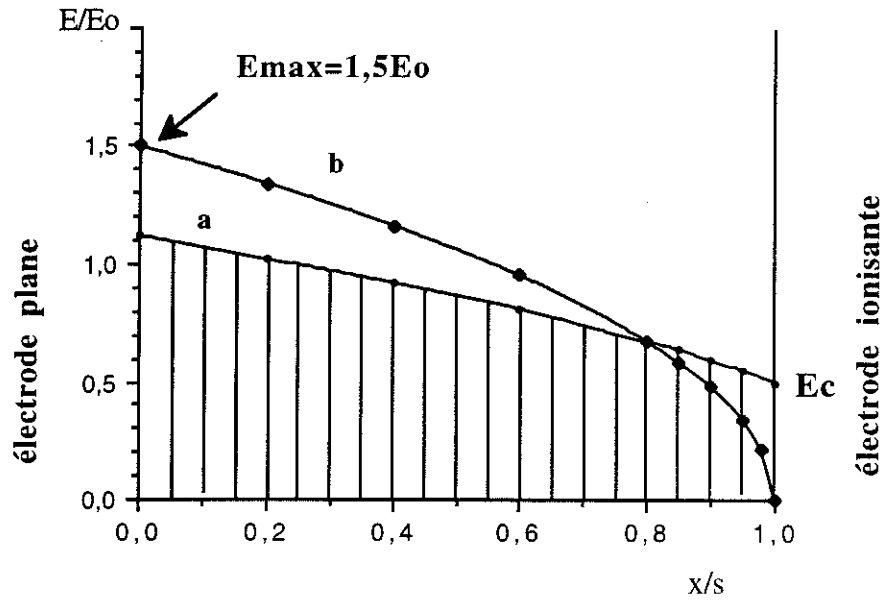


Fig. 3.17. Distribution du champ électrique dans l'intervalle entre l'électrode ionisante et l'électrode plane. a: $1 < \lambda < 1,5$ ($E_c \neq 0$); b: $\lambda = 1,5$ ($E_c = 0$).

La charge de la particule et la force électrique résultante en champ ionisé peuvent être calculées en utilisant les relations établies en champ harmonique, avec un coefficient de correction λ . Par exemple, la charge d'une sphère conductrice en contact avec une électrode affectée d'un champ ionisé est:

$$Q_m^c = \lambda \frac{2\pi^3}{3} \varepsilon_0 R^2 E_0 \quad (3.33)$$

et la force du champ électrique:

$$F_{el} = 17,2 \lambda^2 \varepsilon_0 R^2 E_0^2 \quad (3.34)$$

Le champ de décollement peut être calculé avec la relation:

$$E_d^c = \frac{U_d}{s} = \frac{1}{\lambda} 0,494 \sqrt{\frac{R \rho g}{\varepsilon_0}} \quad (3.35)$$

3.3.2. Etude expérimentale du comportement des particules sphériques

Le dispositif expérimental utilisé pour l'étude du comportement des particules conductrices en champ ionisé (Fig. 3.18) comporte une électrode de type matrice de pointes ionisantes (25 aiguilles d'acier, $\phi = 1$ mm, rayon de la pointe $10 \mu\text{m}$). Les aiguilles sont fixées dans un support modulaire de polyéthylène. L'électrode reliée à la terre est un disque en aluminium (diamètre 200 mm, épaisseur 10 mm) avec les bords arrondis (rayon 5 mm) et la surface bien lisse. Le support isolant assure une distance réglable entre les deux électrodes.

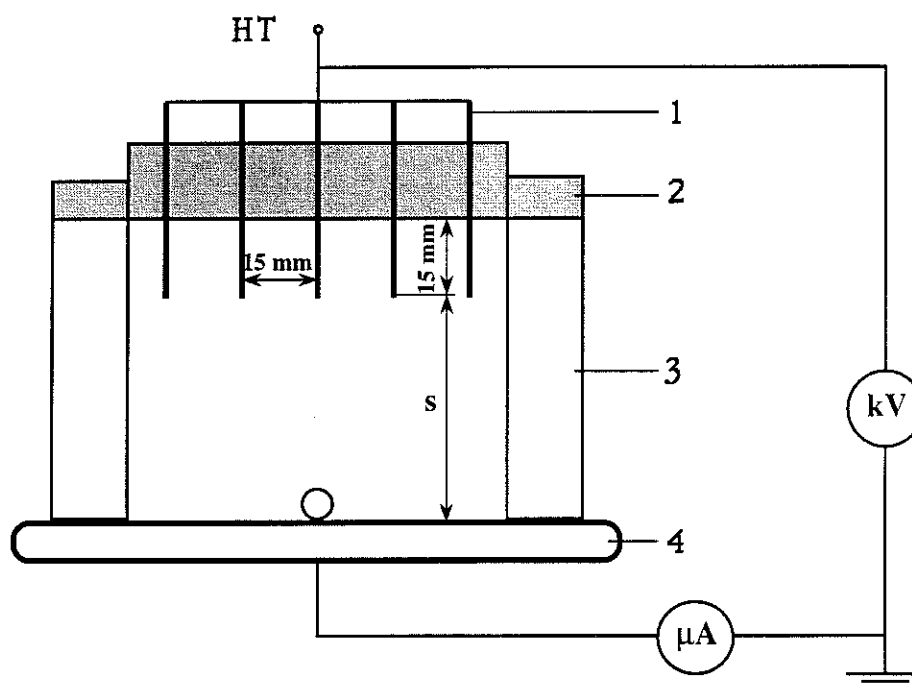


Fig. 3.18. Dispositif expérimental utilisé pour l'étude du mouvement des particules conductrices dans un champ ionisé. 1. - pointe ionisante en acier; 2,3 - supports isolants; 4. - électrode plane reliée à la terre.

La figure 3.19 présente les caractéristiques $I(U)$ de l'électrode ionisante fixée à une distance $s = 30$ mm de l'électrode plane. Elles sont semblables aux autres électrodes, de même type [20, 21, 37]. On peut remarquer une tension de seuil couronne plus basse en polarité négative et, jusqu'à environ 18 kV, un courant plus grand qu'en polarité positive. Cela signifie que la densité de la charge d'espace est plus grande et, par conséquent, que le champ électrique est plus intense à la surface de l'électrode plane. La tension de claquage est 21,4 kV en polarité positive et plus de 30 kV (la limite des mesures) en polarité négative.

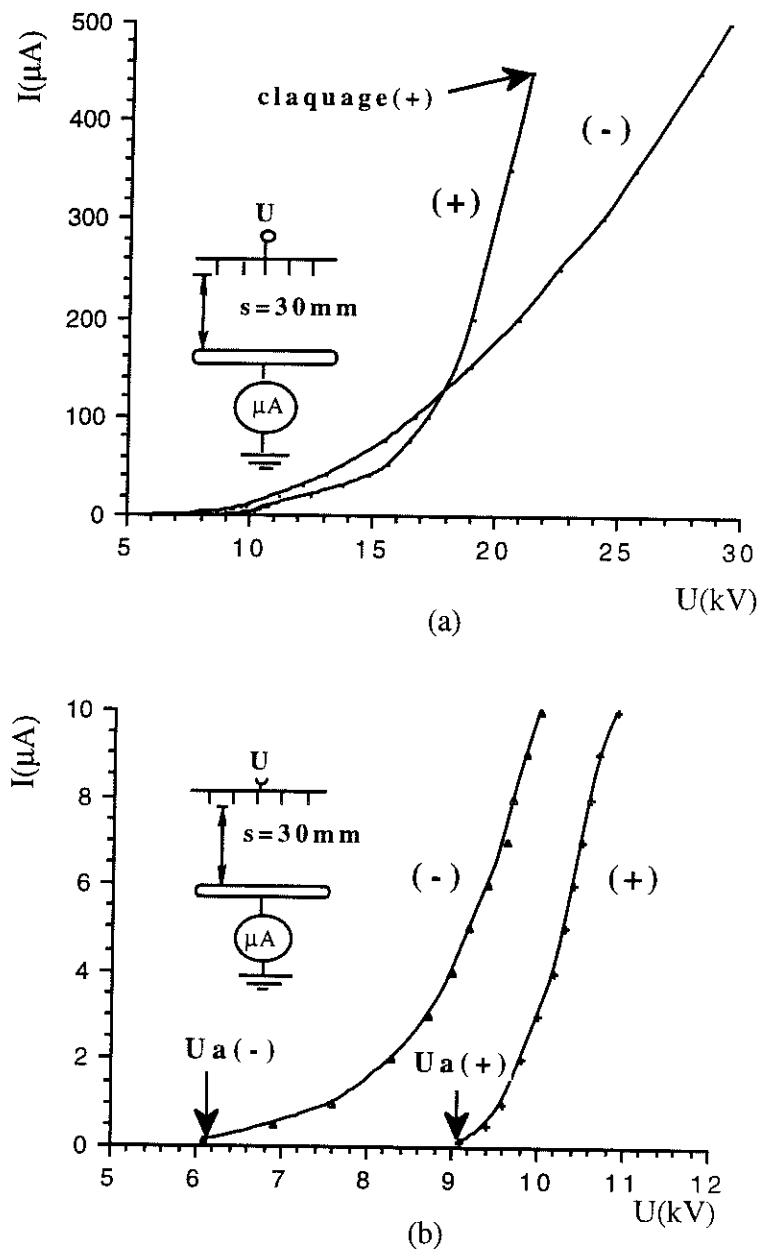


Fig. 3.19. a). Caractéristiques $I(U)$ de l'électrode de type matrice de pointes ionisantes, pour les deux polarités; b). détail dans le domaine du seuil couronne.

Le décollement des particules sphériques en champ ionisé a été étudié pour les deux polarités. Les résultats représentés sur la Fig. 3.20 montrent que la tension de décollement est plus basse en polarité positive, à cause d'une valeur plus élevée de la densité de charge d'espace.

Cette observation est en bon accord avec la caractéristique $I(U)$ de l'électrode: pour les valeurs de U auxquelles se produit le décollement, le courant, la densité de charge d'espace et donc l'intensité du champ électrique à la surface de l'électrode collectrice sont plus élevés en polarité positive.

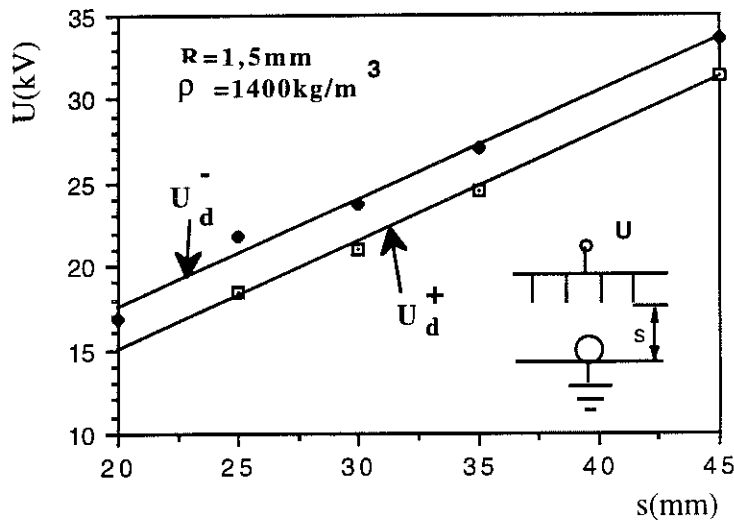


Fig. 3.20. Tension de décollement de la particule conductrice sphérique en champ ionisé, par une polarité positive (U_d^+) ou négative (U_d^-) de la charge d'espace.

Des expériences faites avec différentes configurations d'électrodes [20, 21, 34] et en l'absence des particules conductrices ont mis en évidence qu'en polarité positive le claquage se produit à des tensions beaucoup plus basses qu'en polarité négative (Fig. 3.21, courbe 1-polarité négative et courbe 4-polarité positive). Par exemple, à une distance $s = 25 \text{ mm}$ entre les électrodes le claquage se produit respectivement à 18 kV en polarité positive et à 42 kV en polarité négative.

En polarité négative, la présence des particules conductrices modifie sensiblement la tension de claquage, les sphères libres étant plus dangereuses que celles fixes (Fig. 3.21 courbes 2 et 3).

En polarité positive, la tension de claquage n'est pas sensiblement influencée par la présence de la sphère conductrice. Le claquage se produit toujours à partir de pointes ionisantes. Pour les particules utilisées, le champ de décollement est bien proche du champ de claquage, la présence et le mouvement des particules n'influence pas la rigidité diélectrique de l'intervalle entre les électrodes.

3.3.3. Etude expérimentale du comportement des particules cylindriques

Le comportement des particules conductrices cylindriques en champ ionisé est aussi influencé par la présence de la charge d'espace. Le mouvement de ces particules présente quelques aspects particuliers (Fig. 3.22).

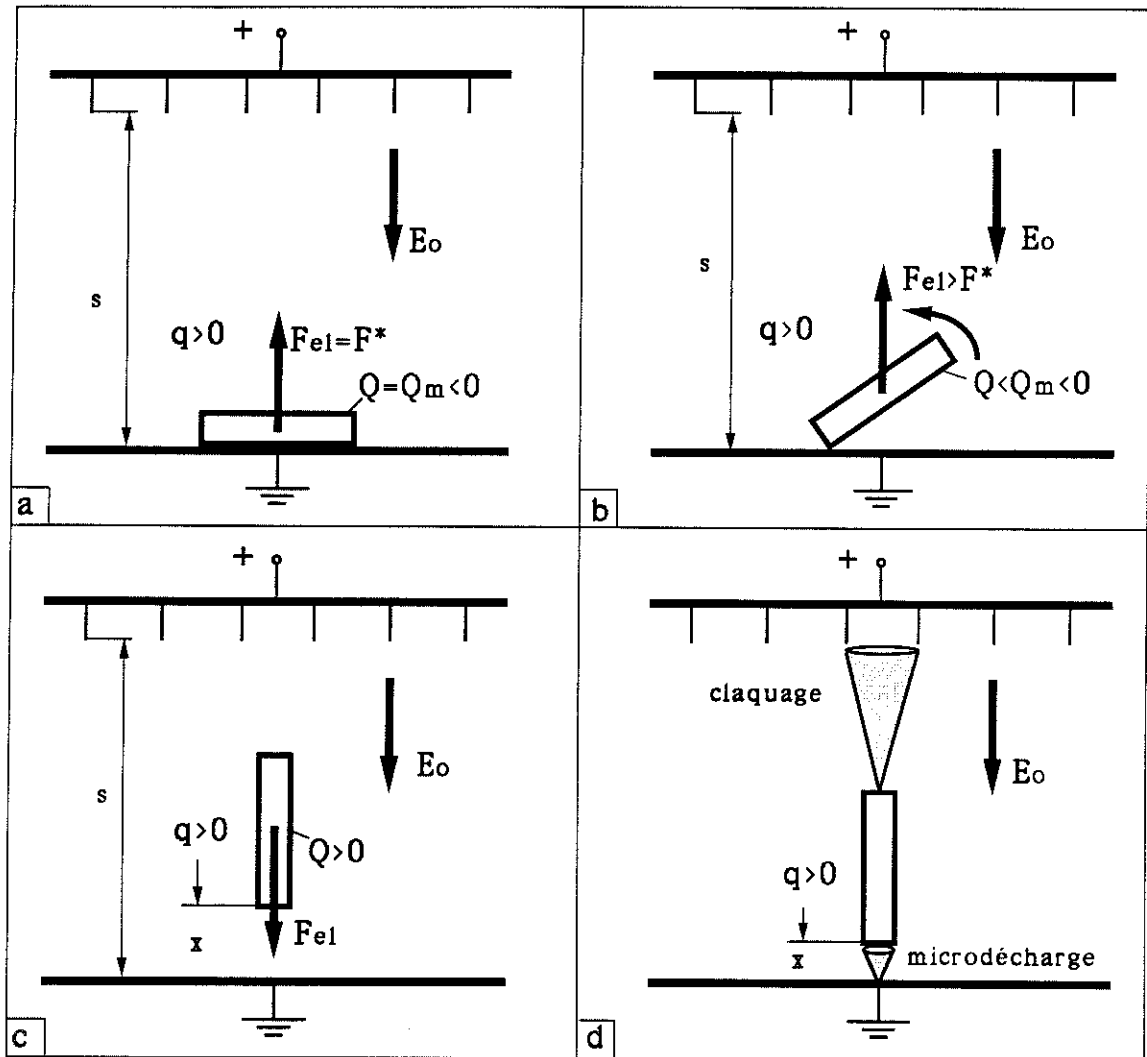


Fig. 3.22. Mouvement d'une particule conductrice cylindrique en champ ionisé. a. - charge par contact avec l'électrode; b. - décollement et augmentation de la charge et de la force électrique; c. - changement du signe de la charge par l'action du flux d'ions; d. - micro - décharge entre la particule et l'électrode et claquage.

En contact avec l'électrode reliée à la terre, la particule conductrice cylindrique emporte la charge Q_m (Tableau 3.2), de même signe que l'électrode. Si la force électrique $F_{el} = F^*$ (Tableau 3.2) agissant sur la particule dépasse la force de pesanteur F_g , la particule décolle et bascule en position verticale (direction des lignes du champ).

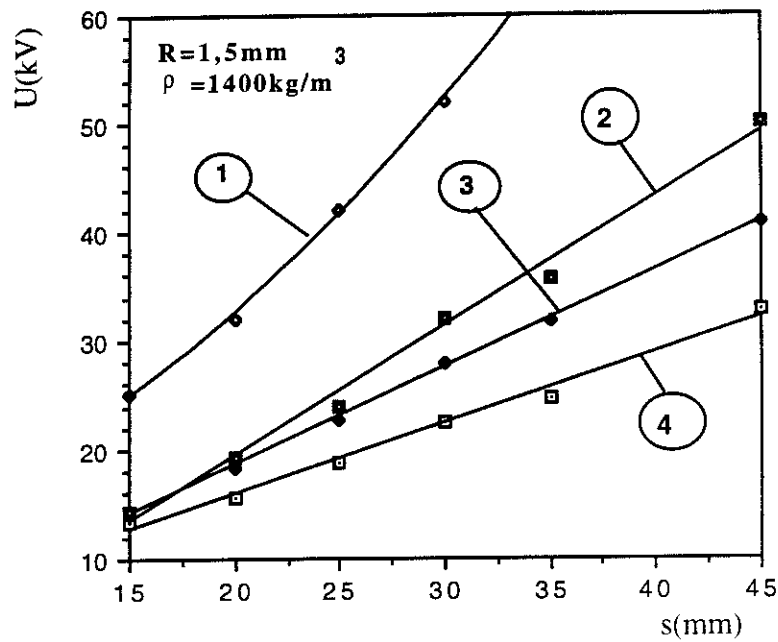


Fig. 3.21. Tension de claquage d'un système électrode de type matrice de pointes ionisantes face à une électrode plane, sous tension continue et en présence d'une particule conductrice sphérique ($R = 1,5 \text{ mm}$, $\rho = 1400 \text{ kg/m}^3$). 1. - polarité négative, sans particule; 2. - polarité négative, en présence d'une particule fixée sur l'électrode plane reliée à la terre; 3. - polarité négative, en présence d'une particule libre, mobile; 4. - polarité positive, en présence d'une particule libre, mobile.

La particule quitte l'électrode et est soumise à un flux d'ions qui diminue la charge et peut éventuellement lui changer le signe. La force électrique F_{el} change aussi de signe et la particule sera attirée vers l'électrode plane. A cause du renforcement local du champ, une micro-décharge se produit entre la particule chargée et l'électrode de signe opposé. Cette micro-décharge peut déclencher le claquage.

Le décollement des particules conductrices cylindriques en champ ionisé a été étudié pour la position horizontale sur l'électrode (Fig. 3.23), aussi bien que pour la position verticale (Fig. 3.24). Dans les deux cas, le décollement en polarité positive et négative de l'électrode ionisante a été comparé au décollement en champ harmonique. Les expériences ont porté sur des particules cylindriques en polyéthylène ($R = 1,2$ mm, longueur L), recouvertes de peinture à l'argent.

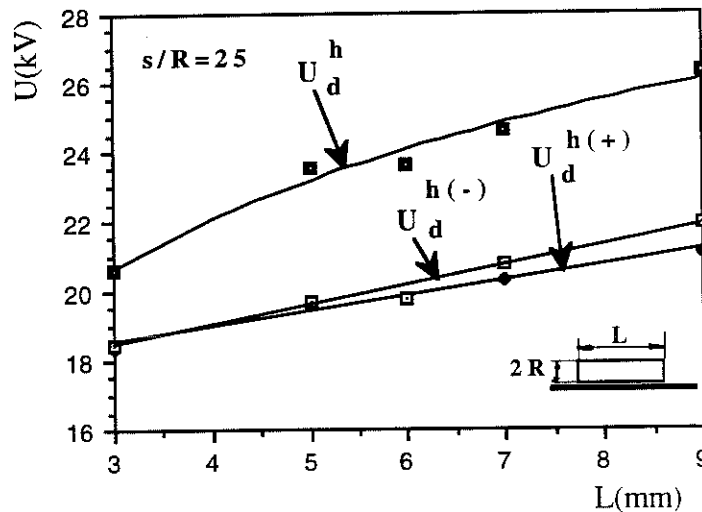


Fig. 3.23. Tensions de décollement U_d en champ ionisé, en fonction de la longueur L des particules cylindriques ($R = 1,2$ mm, $\rho = 1100$ kg/m³) posées horizontalement sur l'électrode plane reliée à la terre. ($U_d^{h(+)}$ et $U_d^{h(-)}$ sont les tensions de décollement en polarité positive et négative de la charge d'espace, U_d^h est la tension de décollement en champ harmonique).

Sous l'effet du renforcement du champ à la surface de l'électrode plane en présence de la charge d'espace, le décollement en champ ionisé se produit à des tensions plus basses. Dans nos conditions expérimentales, ces tensions ont été supérieures à 18 kV, domaine où la densité de la charge d'espace est plus grande en polarité positive (Fig. 3.19). C'est pourquoi, la tension de décollement en champ ionisé est plus basse en présence d'une charge d'espace positive.

La tension de décollement des particules cylindriques posées verticalement sur l'électrode décroît avec la longueur L (Fig. 3.24). Le domaine des tensions de décollement qui correspond aux conditions réelles de l'expérience est de 16 kV à 18 kV; la tension de décollement est plus basse en polarité négative à cause de la densité de charge d'espace plus élevée qu'en polarité positive (Fig. 3.19). Pour les deux polarités, la tension de décollement en champ ionisé est plus basse qu'en champ harmonique, en raison du renforcement du champ produit par la charge d'espace.

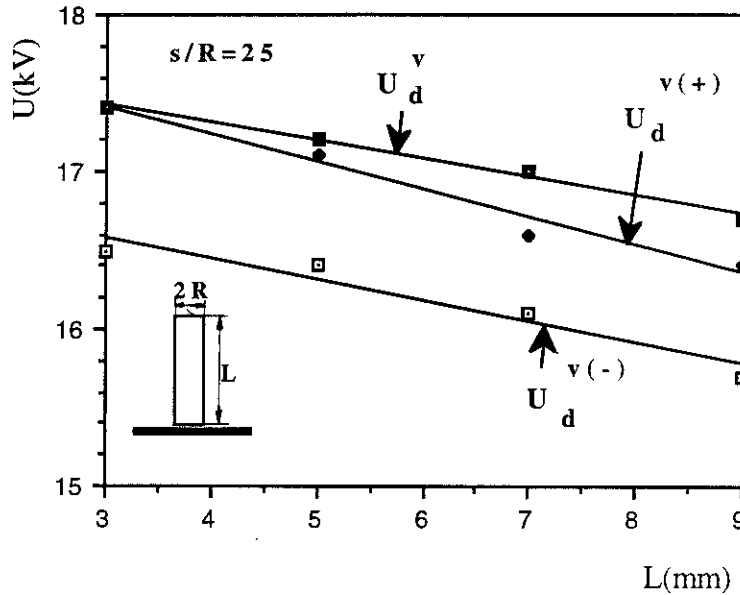


Fig. 3.24. Tensions de décollement U_d en champ ionisé, en fonction de la longueur L des particules cylindriques ($R = 1,2$ mm, $\rho = 1100$ kg/m³) posées verticalement sur l'électrode plane reliée à la terre. ($U_d^{v(+)}$ et $U_d^{v(-)}$ sont les tension de décollement en polarité positive et négative de la charge d'espace, U_d^v est la tension de décollement en champ harmonique).

En présence des particules cylindriques ($R = 1,2$ mm, $L = 3 \dots 9$ mm, masse volumique $\rho = 1100$ kg/m³) posées verticalement sur l'électrode, les tensions de claquage sont plus élevées que celles de décollement (Fig. 3.25), c'est-à-dire, le claquage ne se produit pas lors du décollement. Ce n'est pas le même cas pour les particules posées horizontalement. La longueur de la particule qui produit le claquage lors du décollement ("longueur critique") s'obtient à l'intersection des courbes U_d et U_{cl} . Cette longueur critique a été $L_{cr} = 5$ mm en polarité négative et $L_{cr} = 5,5$ mm en polarité positive de l'électrode ionisante.

Des expériences concernant le comportement des particules conductrices cylindriques en champ ionisé ont porté aussi sur des particules en graphite ($R = 0,25$ mm, $\rho = 1800$ kg/m³). On a trouvé que la tension de décollement en position horizontale croît avec la longueur de la particule (Fig. 3.26), comme en champ harmonique. En polarité négative, sous l'effet de la densité de charge d'espace plus élevée (Fig. 3.19), le champ est plus intense et le décollement de la particule plus facile.

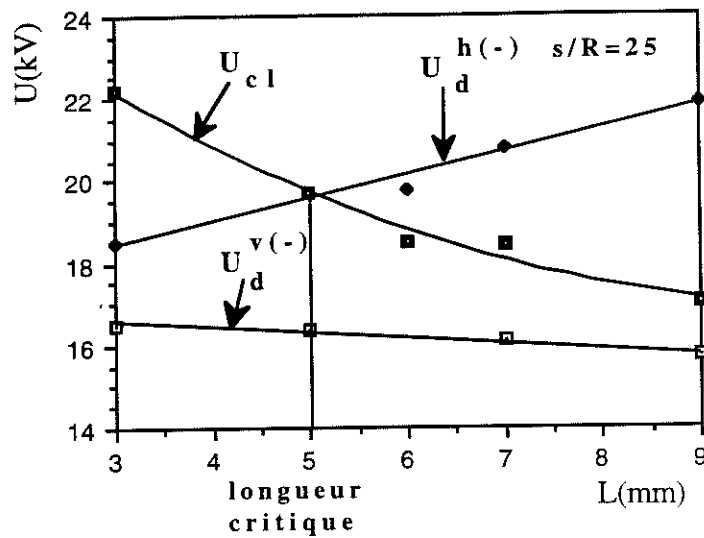


Fig. 3.25. Tensions de décollement (U_d) et de claquage (U_{cl}) en fonction de la longueur L d'une particule cylindrique ($R = 1,2$ mm, $\rho = 1100$ kg/m³), en champ ionisé, polarité négative. ($U_d^{h(-)}$: tension de décollement en position horizontale; $U_d^{v(-)}$: tension de décollement en position verticale).

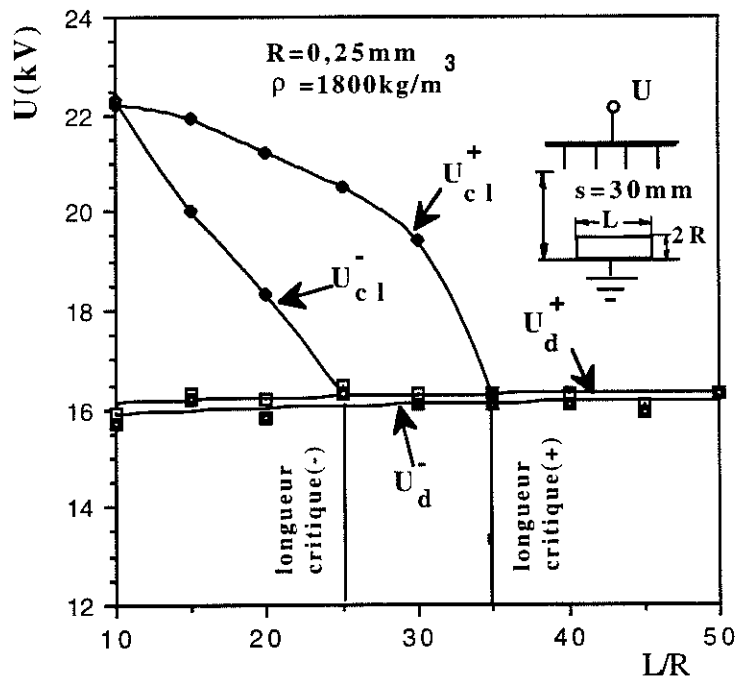


Fig. 3.26. Tension de décollement (U_d) des particules conductrices cylindriques ($R = 0,25$ mm, $\rho = 1800$ kg/m³, longueur L), en polarité positive et négative de l'électrode ionisante et tension de claquage entre les électrodes (U_{cl}), en présence des particules conductrices.

Les résultats présentés sur la Fig. 3.26 mettent en évidence que la taille critique du cylindre, (le rapport L/R auquel se produit le claquage lors du décollement) ne dépend pas seulement de la masse volumique de la particule mais aussi, de la polarité de la charge d'espace.

La tension de claquage en présence de la particule cylindrique est plus basse en polarité négative qu'en polarité positive. Apparemment, ce résultat est en désaccord avec les caractéristiques $I(U)$ de l'électrode (Fig. 3.19), où le claquage en polarité positive se produit à des tensions sensiblement plus faibles qu'en polarité négative. En effet, la présence de la particule allongée en position verticale produit un très fort renforcement du champ à l'extrémité (Tableau 3.3) ce qui facilite l'apparition d'une décharge couronne inverse, à partir de l'extrémité de la particule. C'est cette décharge couronne inverse qui déclenche le claquage et peut expliquer pourquoi en polarité négative de l'électrode ionisante (décharge couronne positive à l'extrémité de la particule) la tension de claquage est réduite par rapport au cas où l'électrode ionisante est en polarité positive (décharge couronne négative à l'extrémité de la particule).

Conclusions du chapitre 3

1. Le logiciel "Charge Simulation Program" est un outil de calcul bien adapté pour l'évaluation des forces électriques qui s'exercent sur des particules conductrices de formes variées, posées sur une électrode affectée d'un champ électrique harmonique. L'équation d'équilibre des forces permet ensuite le calcul du champ électrique auquel les particules peuvent décoller de la surface de l'électrode. L'étude expérimentale est en bon accord avec le calcul numérique du champ de décollement pour les particules sphériques, aussi bien que pour les particules cylindriques en position verticale sur l'électrode.
2. En fonction des caractéristiques géométriques et de la masse volumique des particules cylindriques, le décollement de celles-ci peut s'accompagner du claquage. Les particules cylindriques dont le rapport longueur/rayon dépasse une valeur critique provoquent le claquage lors du décollement. Les résultats expérimentaux sont en bon accord avec le calcul numérique du renforcement du champ à l'extrémité de la particule cylindrique basculée en position verticale.
3. Le comportement des particules conductrices en champ ionisé présente des aspects particuliers par rapport au comportement en champ harmonique: la charge d'espace modifie la distribution du champ et provoque la variation de la charge des particules après décollement. Le mouvement de la particule consiste en une série de rebonds à la surface de l'électrode, confirmées par l'observation des trajectoires des particules dans les séparateurs électrostatiques de laboratoire.
4. Le décollement d'une particule en champ ionisé peut être étudié avec les relations établies pour le champ harmonique, en introduisant un coefficient " λ " qui caractérise le renforcement du champ électrique à la surface de l'électrode collectrice, en présence de la charge d'espace. Les mesures expérimentales confirment les prédictions théoriques: la tension de décollement est plus basse lorsque la densité de courant et la densité de charge d'espace sont plus fortes.
5. Dans les conditions expérimentales données, la rigidité diélectrique de l'intervalle entre les électrodes en champ ionisé en polarité positive n'est pas sensiblement influencée par la présence des particules conductrices sphériques. En revanche, en polarité négative de l'électrode ionisante, la présence d'une particule, notamment d'une particule libre, produit une forte diminution de la tension de claquage.
6. La présence des particules conductrices allongées (cylindriques) dans l'intervalle entre les électrodes diminue sensiblement la rigidité diélectrique. Plus le rapport longueur/rayon croît, plus la tension de claquage diminue. L'amplitude de la tension de claquage est moins élevée en polarité négative de l'électrode ionisante.
7. L'ensemble des observations concernant le comportement des particules dans les modèles de champ harmonique et ionisé permet une meilleure compréhension des trajectoires des particules dans le cas réel d'un séparateur électrostatique.

Chapitre 4

Applications technologiques

Chapitre 4. Applications technologiques

4.1. Charge des matériaux granulaires dans une zone étendue de champ ionisé.	
Récupération du laiton de déchets industriels.....	103
4.1.1. Schéma technologique de récupération du laiton	103
4.1.2. Procédé de séparation utilisant une zone étendue de champ ionisé.....	106
4.1.3. Résultats de la séparation.....	109
4.2. Trajectoires de séparation des particules métalliques et isolantes.	
Recyclage des déchets de câbles électriques.....	116
4.2.1. Facteurs qui influencent les trajectoires de séparation.....	116
4.2.2. Influence de l'humidité superficielle des particules sur le processus de séparation.....	120
4.2.3. Amélioration du régime de fonctionnement d'une installation industrielle de séparation métal-isolant.....	127
4.3. Trajectoires de séparation mica-feldspath-quartz selon le coefficient de forme des particules.....	134
4.3.1. Procédé de séparation électrostatique selon le coefficient de forme des particules.....	134
4.3.2. Trajectoires de séparation mica-feldspath-quartz en champ ionisé.....	139
4.3.3. Influence du revêtement isolant de l'électrode cylindrique.....	141

4.1. Charge des matériaux granulaires dans une zone étendue de champ ionisé. Récupération du laiton de déchets industriels

Les déchets industriels représentent une importante source de matériaux et les procédés modernes de récupération développent de plus en plus des nouvelles applications [13, 90, 98...101]. La récupération du cuivre et du laiton de déchets industriels a de réels avantages car l'utilisation des matériaux récupérés nécessite moins de 40 % de l'énergie consommée pour obtenir le cuivre de minéraux [102]. Aux Etats Unis, par exemple, 45 % du cuivre et de ses alliages proviennent de l'industrie de récupération.

L'une des plus importants sources de déchets de laiton sont les fonderies des métaux non-ferreux. Une entreprise de niveau moyen, produit chaque année 300 tonnes environ de déchets avec un contenu élevé en cuivre et autres alliages métalliques. Le processus de récupération est complexe, il comprend plusieurs étapes et la séparation électrostatique est appliquée a la fin du schéma technologique dans le but d'augmenter le contenu en laiton de certaines classes granulométriques (§ 4.1.1). Les expériences ont porté sur plusieurs mélanges granulaires contenant particules conductrices de laiton et non-conductrices de quartz, sable, scories, en utilisant un séparateur de laboratoire à zone étendue de champ ionisé (§ 4.1.2). Les résultats mettent en évidence la possibilité d'utiliser la séparation électrostatique pour concentrer le laiton à une pureté de 95 %.(§ 4.1.3).

4.1.1. Schéma technologique de récupération du laiton

Dans les fonderies de matériaux non-ferreux les scories de laiton sont le principal déchet industriel d'où le cuivre et des d'alliages métalliques peuvent être récupérés. A cause du caractère hétérogène des scories, le processus de récupération est complexe. Le schéma technologique comprend comme première étape une granulation grossière. Le produit de taille + 10 mm, qui pratiquement ne contient que du laiton, est approprié pour la récupération et est introduit à nouveau dans le four électrique. La classe granulométrique (0...10) mm contient encore beaucoup de laiton (Tableau 4.1).

Tableau 4.1. Principaux composants des scories de laiton, classe granulométrique (0...10)mm.

CLASSE	QUANTITE	COMPOSITION	
		composant	quantité [%]
(1...10) mm	(32...35) %	laiton	70...80
		zinc	2,5
		scorie	10
		sable	8...9
(0...1) mm	(68...65) %	zinc	1
		laiton	20...30
		scorie	20...40
		sable	30...50
		fer	0...2

Le schéma technologique proposé par l'Institut de Recherche et Développement Minière de Cluj-Napoca pour obtenir des produits à forte concentration de laiton à base de classe granulométrique (0...10) mm, comprend des opérations de tri volumétrique, granulation sélective, tri gravitationnel, séchage, séparation magnétique et électrostatique (Fig. 4.1).

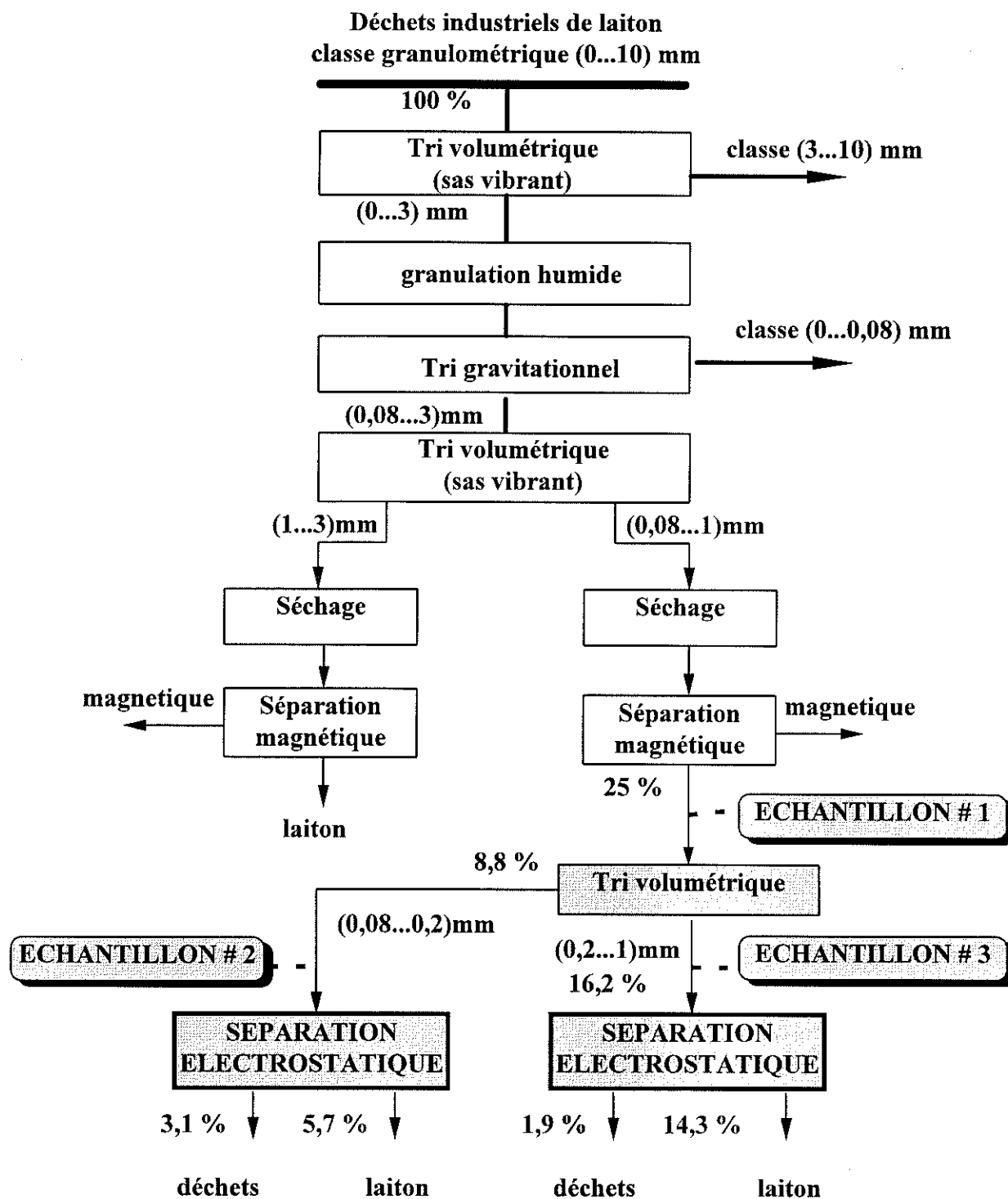


Fig. 4.1. Schéma technologique de récupération du laiton de déchets industriels et points de provenance des échantillons.

Les particules très fines ($\sim 0,08$ mm) ne sont pas appropriées pour la séparation électrostatique dans des installations à cylindre tournant car les forces d'adhésion entre les particules et le cylindre sont du même ordre de grandeur que les forces électriques. Le contenu en laiton de cette classe est assez réduit, les principaux composants sont les scories, le quartz et l'oxyde de zinc. Les particules ayant des dimensions supérieures à 1 mm sont trop grandes pour le triage électrostatique car les forces électriques sont trop faibles pour changer, de manière significative, leurs trajectoires. Seule la classe granulométrique (0,08...1) mm est appropriée pour le tri électrostatique sur des séparateurs à électrode cylindrique tournante.

L'échantillon # 1 a été collecté après la séparation magnétique de la classe (0,08...1) mm. Par cette opération, les particules magnétiques (fer et oxyde de fer) sont retenues et le mélange granulaire résultant (Fig. 4.2) est adéquat pour le tri électrostatique.

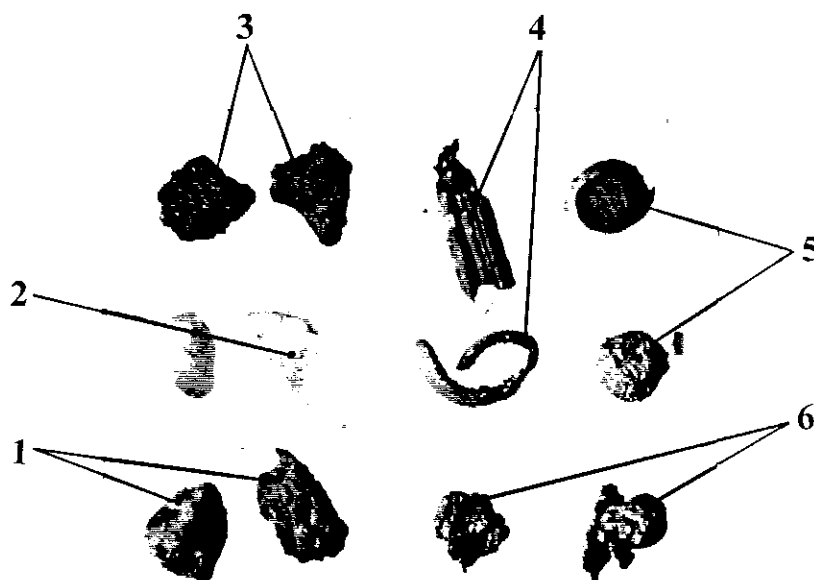


Fig. 4.2. Particules composant l'échantillon # 1. 1. - scories; 2. - quartz; 3. - matériau réfractaire; 4. - copeau de laiton; 5. - sphérule de laiton; 6. - laiton avec des inclusions non - métalliques.

Les autres échantillons (# 2 et # 3) ont été obtenus par tri volumétrique de l'échantillon # 1 en deux composants à dispersion granulométrique réduite: (0,08...0,2) mm et (0,2...1) mm. La composition chimique des trois échantillons est présenté dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2. Composition chimique des échantillons granulaires de déchets industriels de laiton, en fonction de la taille des particules.

CLASSE	MASSE [%]	COMPOSITION CHIMIQUE [%]				
		Cu+Zn+Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO+MgO	K ₂ O+Na ₂ O
(0,08...1) mm	25	80,0	14,3	4,4	1,1	0,1
(0,08...0,2) mm	8,8	67,2	26,1	4,3	1,3	0,1
(0,2...1) mm	16,2	86,9	7,4	4,8	0,8	0,1

Du point de vue des caractéristiques électriques, les particules qui composent le mélange granulaire (Fig. 4.2) sont soit conductrices (copeau et sphérules de laiton), soit non-conductrices (granules de quartz). Les particules de scories peuvent avoir un comportement "conducteur" ou "isolant" en fonction de la présence d'inclusions métalliques.

4.1.2. Procédé de séparation utilisant une zone étendue de champ ionisé

Le tri électrostatique des échantillons décrits au § 4.1.1 a été effectué sur l'électroséparateur de laboratoire ELSEP [12]. Cette installation permet de modifier les principaux paramètres du régime de fonctionnement : amplitude de la haute tension (0...75 kV), courant continu; polarité positive ou négative; diamètre de l'électrode cylindrique (150 - 200 - 250) mm; vitesse de rotation du cylindre (0...600) tr/mn; débit d'alimentation du matériau par vibrotransporteur en corrélation avec la vitesse du cylindre; chauffage réglable pour le matériau granulaire; type du champ électrique (ionisé, harmonique, ionisé + harmonique); type, nombre et position des électrodes.

Pour la séparation de l'échantillon # 1 (0,08...1) mm, le séparateur ELSEP a été équipé d'une électrode cylindrique de diamètre 150 mm, une électrode ionisante (fil en tungstène ϕ 0,2 mm et élément électrostatique tubulaire ϕ 25 mm) et une électrode électrostatique tubulaire ϕ 25 mm (Fig. 4.3).

La distance entre le fil en tungstène de l'électrode ionisante et l'électrode cylindrique reliée à la terre a été fixée à $s_1 = 40$ mm, la même que la distance s_2 entre l'électrode électrostatique et le cylindre. Les angles de position des électrodes actives ont été $\alpha_1 = 30^\circ$ pour l'électrode ionisante et $\alpha_2 = 60^\circ$ pour l'électrode électrostatique. Les deux électrodes actives sont portées à une tension négative de 20 kV. Le matériau granulaire, collecté dans 20 boîtes, est partagé en trois produits: "conducteur" (C), "mixte" (M) et "non-conducteur" (NC).

La configuration du séparateur ELSEP présentée sur la Fig. 4.3. est une version "standard". Elle correspond aux séparateurs électrostatiques industriels et le but des tests effectués a été d'établir expérimentalement les paramètres du régime de fonctionnement qui, dans une telle configuration, permettent d'obtenir les meilleurs résultats.

L'avantage d'un séparateur de laboratoire avec configuration versatile est qu'il permet de réaliser des configurations "non-standard", en fonction des caractéristiques physiques des composants du mélange granulaire à séparer.

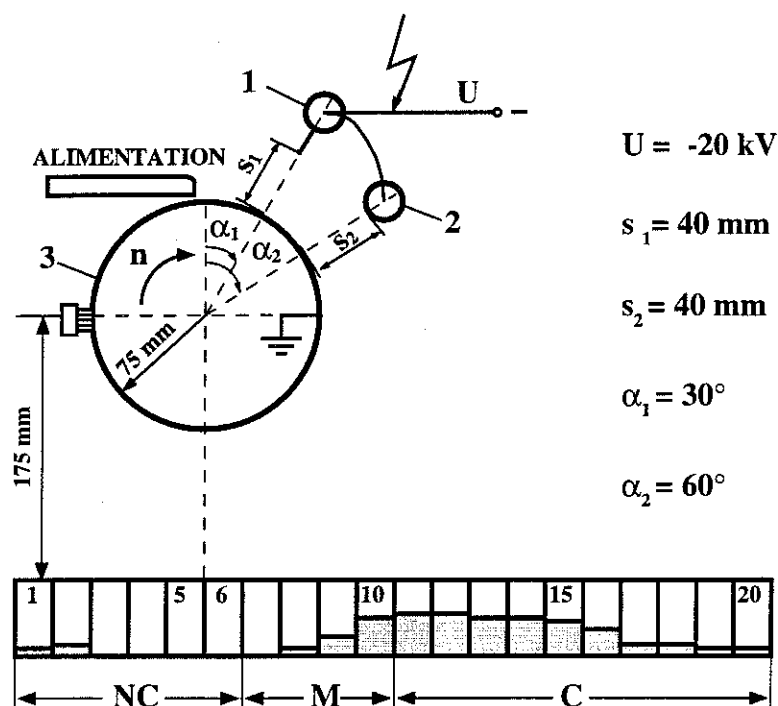


Fig. 4.3. Configuration des électrodes du séparateur de laboratoire ELSEP. 1. - électrode ionisante; 2. - électrode électrostatique tubulaire; 3. - électrode cylindrique tournante reliée à la terre.

Le matériau obtenu après la granulation des déchets industriels contenant des scories de laiton est caractérisé par la présence des particules non-dissociées : soit des scories avec inclusions métalliques, soit des particules de laiton avec des inclusions de scories (Fig. 4.4). Le comportement de ce type de particules dans le séparateur n'est pas influencé seulement par le caractère conducteur ou isolant du composant principal mais aussi par la forme, la position et le contact entre la particule et l'électrode cylindrique reliée à la terre. La séparation électrostatique de tels matériaux granulaires nécessite une configuration non-standard des électrodes (Fig. 4.5). Afin d'obtenir une amélioration du processus de charge des particules non-conductrices (Fig. 4.4), une zone étendue de champ ionisé a été créée en utilisant une électrode de type matrice de pointes ionisante [37]. Cette électrode contient 150 aiguilles de diamètre 1 mm, de rayon de la pointe 10 μm , disposées en 15 lignes, chacune avec 10 aiguilles, le pas des éléments émissifs étant $p = 10 \text{ mm}$. L'électrode assure une extension angulaire du champ ionisé $\Delta\alpha = 40^\circ$. L'amplitude de la haute tension, polarité positive, a été élevée à 30 kV afin d'obtenir une densité du courant plus grande et d'augmenter la densité de la charge d'espace, ce qui permet d'améliorer le processus de charge des particules non-conductrices (scories, quartz). Pour obtenir plus d'avantages avec le nouveau modèle d'électrode ionisante, on a augmenté le débit de matériau en utilisant le cylindre de diamètre maximum, $\phi = 250 \text{ mm}$ et une distance $s = 40 \text{ mm}$ entre les pointes émissives et l'électrode cylindrique.

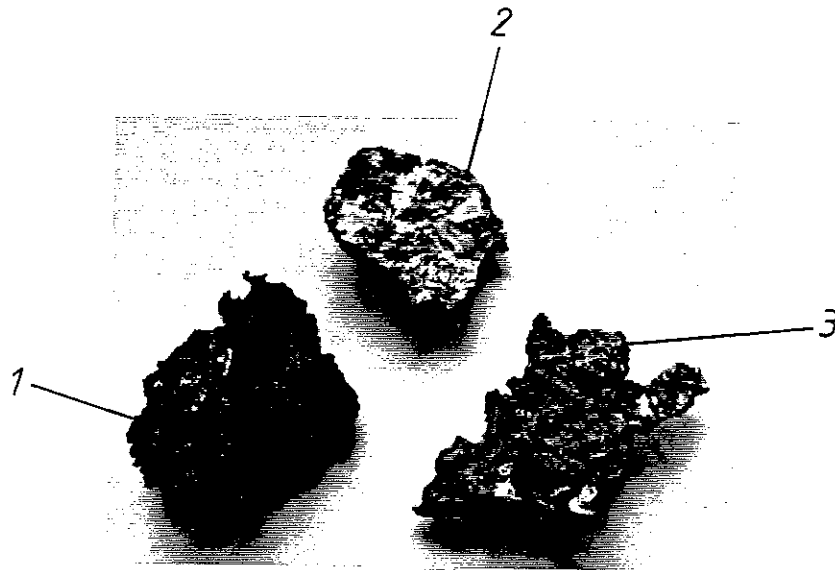


Fig. 4.4. Particules métalliques et isolantes provenant de déchets industriels de laiton, incomplètement dissociées. 1. - scorie avec des inclusions de laiton; 2. - particule de laiton avec des inclusions d'oxyde de zinc ; 3. - laiton avec des inclusions de scorie.

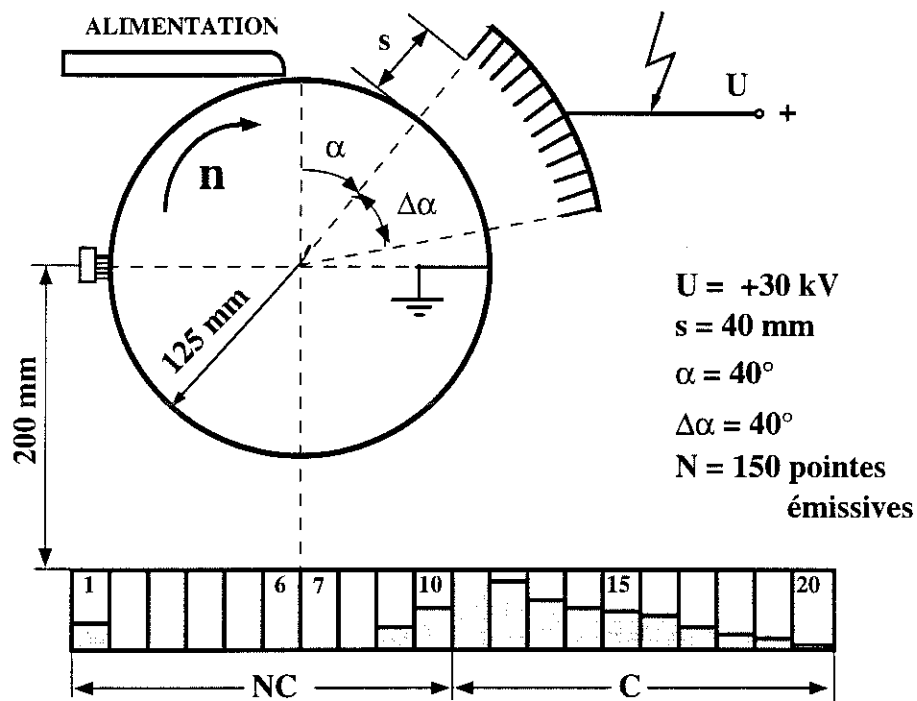


Fig. 4.5. Configuration des électrodes du séparateur électrostatique de laboratoire ELSEP, à zone étendue de champ ionisé.

Chaque échantillon, en utilisant soit la configuration des électrodes donnée sur la Fig. 4.3 (échantillon # 1), soit celle sur la Fig. 4.5 (échantillons # 2 et # 3), a été soumis au processus de séparation électrostatique qui a été effectué selon le schéma suivant:

- analyse au microscope optique des composants du mélange granulaire;
- expériences préliminaires de séparation sur une quantité de 200 g environ, pour établir les paramètres du régime de fonctionnement du séparateur;
- étude des trajectoires des particules et de la distribution volumétrique du matériau dans les 20 boîtes du collecteur;
- analyse au microscope du matériau contenu dans chaque boîte;
- modification des paramètres du régime de séparation, selon les résultats des expériences préliminaires;
- expérience de séparation sur une quantité de 1000 g;
- mesure du volume et de la masse du matériau dans chaque boîte du collecteur;
- analyse au microscope du matériau dans chaque boîte afin de partager le matériau séparé en trois produits: non-conducteur (NC), mixte (M) et conducteur (C);
- séparation du produit "C" afin d'augmenter la pureté du laiton récupéré.

4.1.3. Résultats de la séparation

L'échantillon # 1 représente la classe granulométrique (0,08...1) mm obtenue après séparation magnétique (Fig. 4.1). Le tri électrostatique des composants de cet échantillon a été effectué sur le séparateur de laboratoire ELSEP en utilisant la configuration champ ionisé + champ harmonique (Fig. 4.3).

Le schéma technologique de cette expérience (Fig. 4.6a) comprend une première opération de séparation électrostatique, la vitesse de rotation du cylindre étant $n = 200$ tr/mn. L'analyse au microscope du matériau dans les 20 boîtes du collecteur a permis de partager les trois produits : "non-conducteur" (boîtes 1...6), "mixte" (boîtes 7...10) et "conducteur" (boîtes 11...20). La présence des particules de quartz dans les boîtes 11...20 a imposé la réalisation d'une deuxième opération de séparation pour le produit "C" qui représente 78,4 % du produit de départ. La vitesse de rotation du cylindre tournant a été réduite jusqu'à $n = 100$ tr/mn pour diminuer la force centrifuge aussi bien que pour augmenter la charge acquise par les particules non-conductrices. La masse du matériau dans chaque boîte du collecteur a été mesurée (Fig. 4.6b).

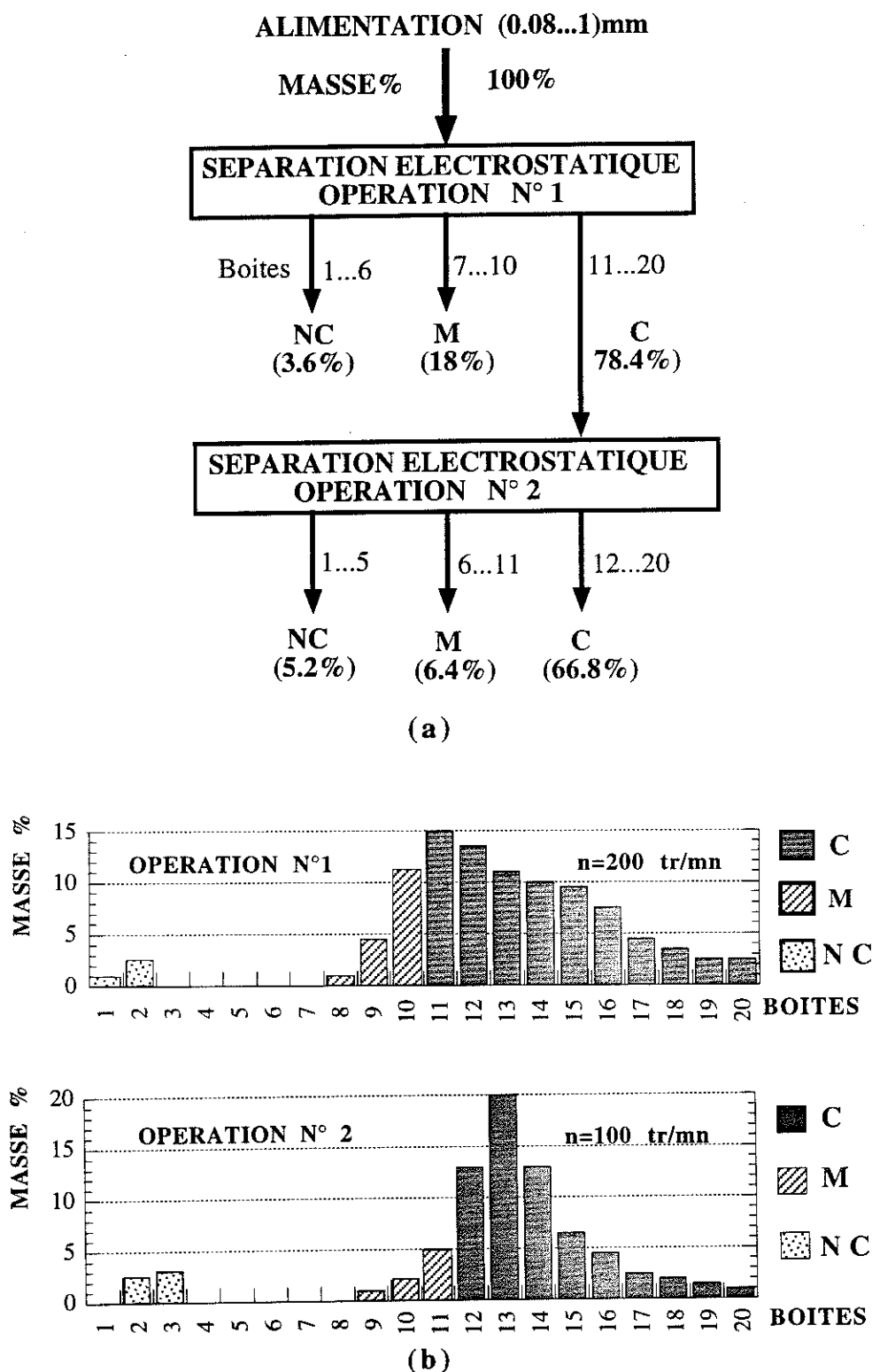


Fig. 4.6. a). Schéma de l'expérience de séparation électrostatique de déchets industriels de laiton (échantillon # 1), en utilisant la configuration champ ionisé + champ harmonique du séparateur ELSEP. **b).** Distribution massique du matériau granulaire dans les 20 boîtes du collecteur pour les deux opérations de séparation électrostatique.

La pureté du laiton récupéré après la première opération de séparation est de 88 %. Après la deuxième séparation, elle vaut 91 %, tandis que le produit de départ contenait 80 % laiton (Tableau 4.3). On a réalisé une concentration en laiton mais des opérations supplémentaires de séparation électrostatique seraient nécessaires pour le produit "C" afin d'augmenter la pureté du laiton récupéré.

Tableau 4.3. Analyse chimique des résultats de la séparation électrostatique de la classe granulométrique (0,08...1)mm.

PRODUIT	MASSE [%]	COMPOSITION CHIMIQUE [%]				
		Cu+Zn+Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO+MgO	K ₂ O+Na ₂ O
Alimentation	100	80,0	14,3	4,4	1,1	0,1
Non-conducteur Opération N° 1	3,6	10,0	79,3	6,7	1,3	0,3
Mixte Opération N° 1	18	57,4	38,1	3,4	1,0	0,04
Conducteur Opération N° 1	78,4	88,0	6,7	4,2	1,0	0,06
Non-conducteur Opération N° 2	5,2	53,0	38,9	6,5	1,4	0,2
Mixte Opération N° 2	6,4	86,0	8,5	4,1	1,2	0,05
Conducteur Opération N° 2	66,8	91,0	4,4	4,1	0,4	0,05

Note: Le pourcentage de la masse de matériau dans chaque boîte a été calculé par rapport à la masse totale en alimentation.

Le produit non-conducteur obtenu après la première opération de séparation, aussi bien que celui collecté après la deuxième, contiennent des particules fines de laiton. Le contenu de SiO₂ dans le produit "NC" est de 79,3 % après la première opération et seulement 38,8 % après la deuxième. Les particules fines de laiton adhèrent à la surface du cylindre à cause de la poussière isolante (scories et oxyde de zinc) qui les couvre et qui, en diminuant la conductivité superficielle, modifie leur comportement comme particules conductrices.

L'échantillon # 2 (0,08...0,2 mm), qui contient une quantité importante de particules non-conductrices a été soumis au processus de séparation sur l'électroséparateur de laboratoire ELSEP à zone étendue de champ ionisé (Fig. 4.5).

Le schéma de l'expérience prévoit une deuxième opération de séparation pour le produit "conducteur" afin d'augmenter la pureté du laiton récupéré (Fig. 4.7). Le "mixte" qui résulte de la première opération représente 21,6 % de la quantité du matériau de départ et devra aussi être introduit à nouveau dans le processus de séparation pour augmenter le taux de récupération du laiton.

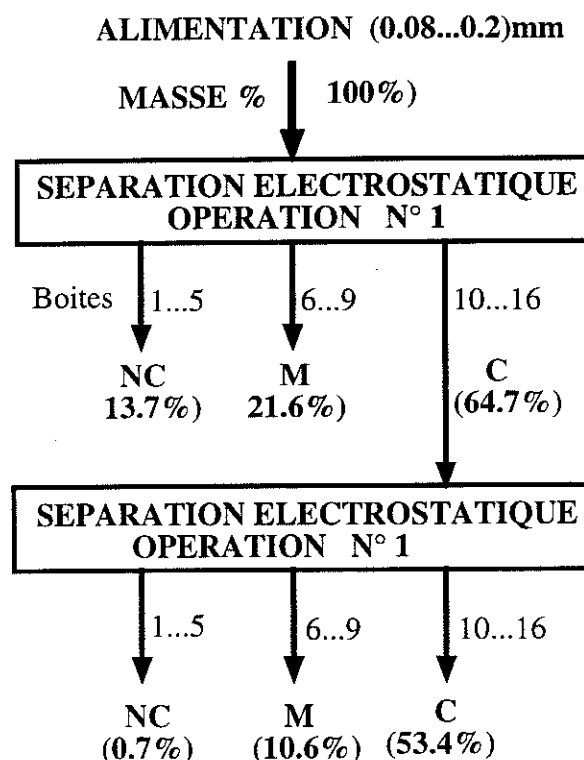


Fig. 4.7. Schéma de l'expérience de séparation électrostatique de l'échantillon # 2 (0,08...0,2 mm), en utilisant le séparateur ELSEP à zone étendue de champ ionisé.

La vitesse de rotation du cylindre, $n = 100$ tr/mn dans la première opération, a été élevée jusqu'à $n = 150$ tr/mn dans la deuxième, dans le but d'augmenter la force centrifuge et de détacher les particules de laiton de petite taille qui, couvertes de poussière non-conductrice, sont collectées dans le produit "mixte". La plupart du quartz de départ (26,1 %) est collectée dans la boîte 1, après la première opération de séparation (Fig. 4.8). Par conséquent, la pureté du laiton récupéré est 82,1 % tandis que le matériau de départ contenait seulement 67,2 % laiton (Tableau 4.4). Après la deuxième opération de séparation du produit conducteur on a obtenu du laiton en concentration élevée (95 %).

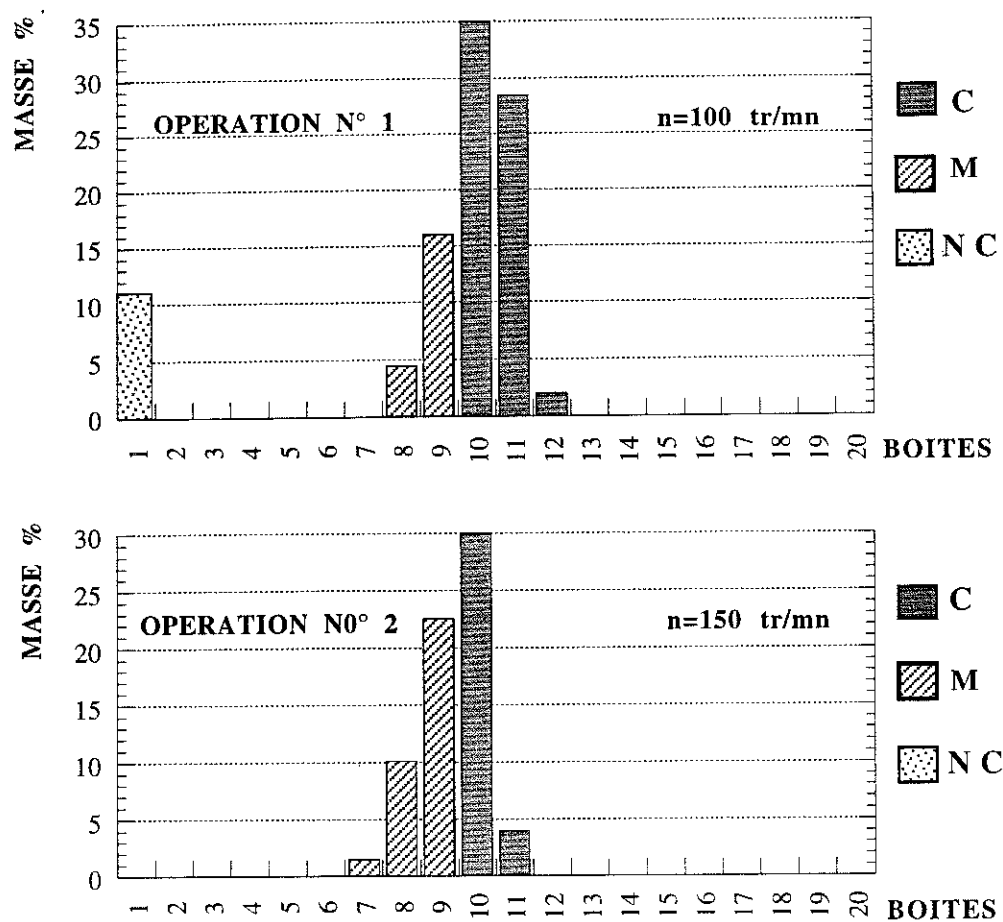


Fig. 4.8. Distribution massique du matériau granulaire dans les 20 boîtes du collecteur, pour les deux opérations de séparation électrostatique de l'échantillon # 2 (0,08...0,2 mm).

Tableau 4.4. Analyse chimique des résultats de la séparation électrostatique de l'échantillon # 2 (0,08...0,2 mm).

PRODUIT	MASSE [%]	COMPOSITION CHIMIQUE [%]				
		Cu+Zn+Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO+MgO	K ₂ O+Na ₂ O
Alimentation	100	67,2	26,1	4,3	1,3	0,1
Non-conducteur Opération N° 1	13,7	9,3	83,3	5,7	1,4	0,3
Mixte Opération N° 1	21,6	60,6	34,2	3,7	1,3	0,1
Conducteur Opération N° 1	64,7	82,1	11,2	4,9	1,3	0,1
Conducteur Opération N° 2	53,4	95,0	1,3	3,2	0,4	0,1

Le contenu en SiO_2 dans le produit non-conducteur obtenu dans la première opération est de 83,3%, ce qui met en évidence l'efficacité du processus de charge des particules de quartz dans la zone étendue de champ ionisé. Le pourcentage de 60,6 % laiton dans le "mixte" après la première opération justifie l'augmentation de la vitesse du cylindre dans la deuxième opération de séparation et confirme la nécessité de plusieurs séparations successives pour ce produit, afin d'augmenter le taux de récupération du laiton.

L'échantillon # 3, (0,2...1 mm), représente 2/3 environ de l'échantillon # 1. La séparation électrostatique a été effectuée avec l'électroséparateur de laboratoire ELSEP équipé d'une électrode de type matrice de pointes ionisante (Fig. 4.5). Le schéma de l'expérience prévoit une seule opération de séparation (Fig. 4.9). Le matériau granulaire dans les 20 boîtes du collecteur a été partagé en deux produits: "non-conducteur" (boîtes 1...10) et "conducteur" (boîtes 11...20).

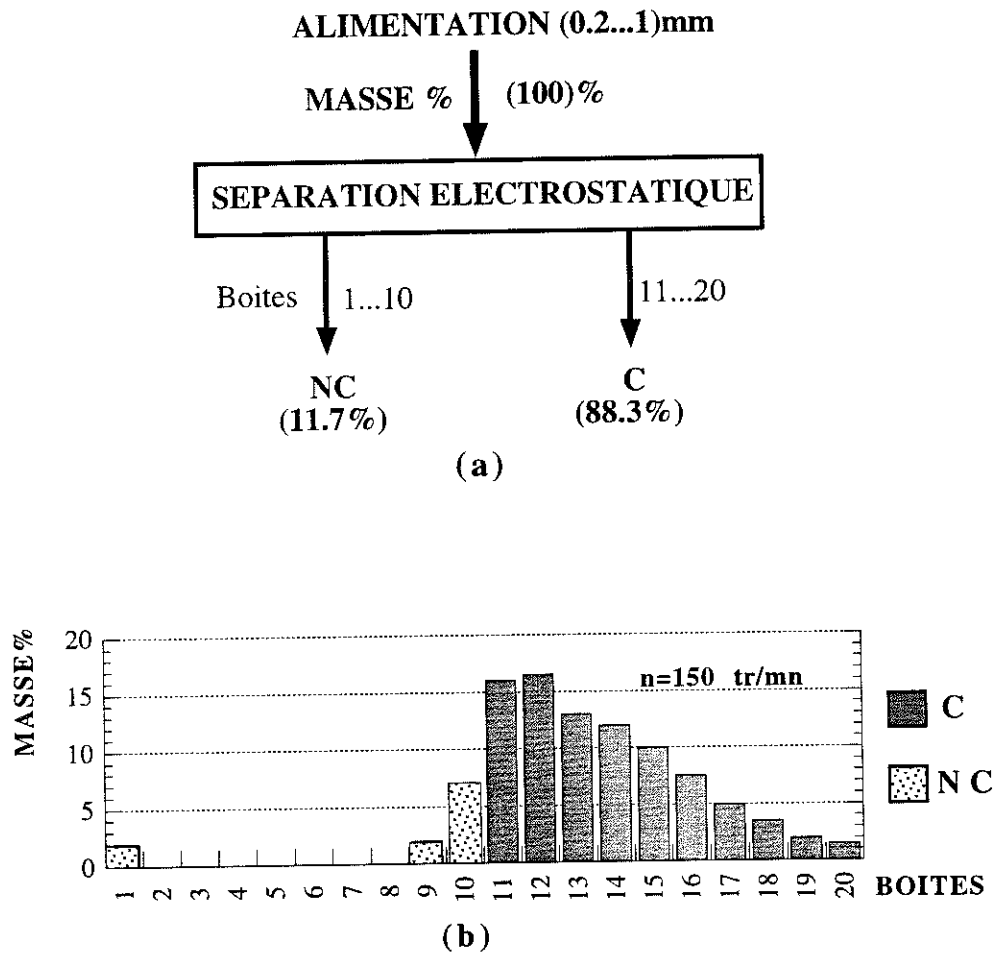


Fig. 4.9. a). Schéma de l'expérience de séparation électrostatique de l'échantillon # 3 (0,2...1 mm), en utilisant l'électroséparateur de laboratoire ELSEP à zone étendue de champ ionisé. b). Distribution massique du matériau granulaire dans les 20 boîtes du collecteur.

L'expérience est effectuée à une vitesse de rotation de l'électrode cylindrique $n = 150$ tr/mn qui produit la force centrifuge nécessaire pour le détachement des particules de laiton. En fonction de leur taille, ces particules sont collectées dans les boîtes 11...20 et représentent 88,3% du matériau de départ. L'analyse chimique met en évidence une pureté du produit "conducteur" de 94,5 %, approprié pour le recyclage et aussi, le niveau bas des impuretés de laiton dans le produit non-conducteur (7,5 %) (Tableau 4.5).

Tableau 4.5. Analyse chimique des résultats de la séparation électrostatique de l'échantillon # 3 (0,2...1 mm).

PRODUIT	MASSE [%]	COMPOSITION CHIMIQUE [%]
		Cu + Zn + Fe
Alimentation	100	86,9
Non-conducteur	11,7	7,5
Conducteur	88,3	94,5

La séparation électrostatique peut être utilisée comme opération finale dans un schéma technologique de récupération du laiton provenant de déchets industriels. Les expériences de laboratoire montrent la nécessité de plusieurs opérations de séparation afin d'obtenir des produits de haute pureté (Fig. 4.10).

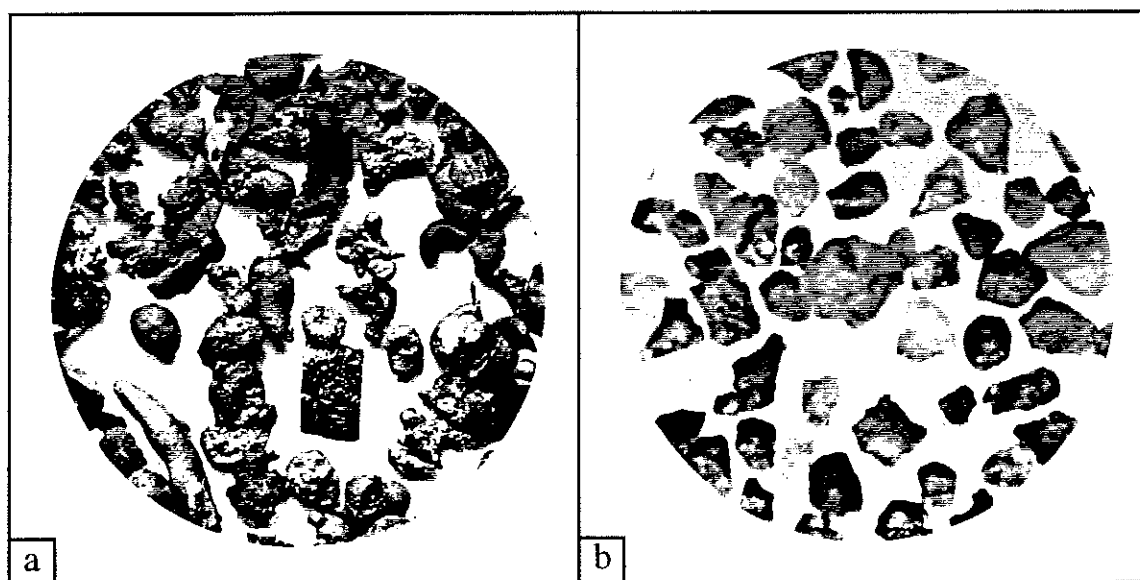


Fig. 4.10. Aspect des particules dans le produit "conducteur" (a) et dans le produit "non-conducteur" (b), obtenus par séparation électrostatique des déchets industriels de laiton.

4.2.Trajectoires de séparation des particules métalliques et isolantes.

Recyclage des déchets de câbles électriques

La séparation métal - isolant [6] est un exemple classique de séparation électrostatique. La principale application est la récupération des matériaux des déchets industriels [8, 12, 13, 90, 99].

La complexité du processus de séparation électrostatique métal-isolant pose de nombreux problèmes car plusieurs paramètres et variables doivent être maîtrisés et plusieurs facteurs peuvent influencer les résultats [65, 74]. En utilisant un séparateur électrostatique de laboratoire, on a réalisé une étude des facteurs qui influencent l'efficacité du procédé (§ 4.2.1). L'importance de l'humidité superficielle du matériau, particulièrement, des particules isolantes, a été prouvée en pratique. Une étude expérimentale systématique a établi la limite acceptable de l'humidité qui maintient les performances du processus de séparation au niveau demandé par l'application (§ 4.2.2).

Les paramètres de réglage d'un séparateur électrostatique doivent être corrélés avec les caractéristiques physiques des composants du mélange granulaire, aussi bien qu'avec la configuration des électrodes, afin d'améliorer les résultats de la séparation (§ 4.2.3).

4.2.1. Facteurs qui influencent les trajectoires de séparation

L'application de la séparation électrostatique pour le tri des constituants d'un mélange granulaire métal - isolant tire profit d'une différence nette de conductivité entre les deux types de particules. Cette condition, toute seule, n'est jamais suffisante pour obtenir de bons résultats (pureté des produits, taux de récupération, rendement), car le processus de séparation est complexe et les trajectoires des particules sont influencées par plusieurs facteurs (Fig. 4.11).

Une partie de ces paramètres sont des caractéristiques constructives de l'installation : rayon du cylindre tournant, configuration géométrique, nombre et position des électrodes ionisantes, forme de l'onde et polarité de la haute tension. Ils sont établis à la suite d'une profonde analyse des caractéristiques physiques des particules, aussi bien que d'un certain nombre d'expériences préliminaires de séparation.

Pour une configuration d'électrodes établie, le séparateur de laboratoire permet le réglage continu, pendant le fonctionnement, de la vitesse de rotation de l'électrode cylindrique tournante, l'amplitude de la haute tension et du débit du matériau à trier. Si nécessaire, la température du matériau peut être aussi modifiée.

Dans la plupart des applications, le séparateur à électrode cylindrique tournante a deux zones de champ électrique: la zone de champ ionisé, pour charger par flux d'ions les particules isolantes et la zone de champ harmonique, pour contrôler les trajectoires des particules métalliques. Souvent, pour détacher les particules isolantes collées sur la surface du cylindre tournant, on utilise un champ de neutralisation produit par une électrode ionisante reliée à un générateur haute tension alternative (Fig. 1.1).

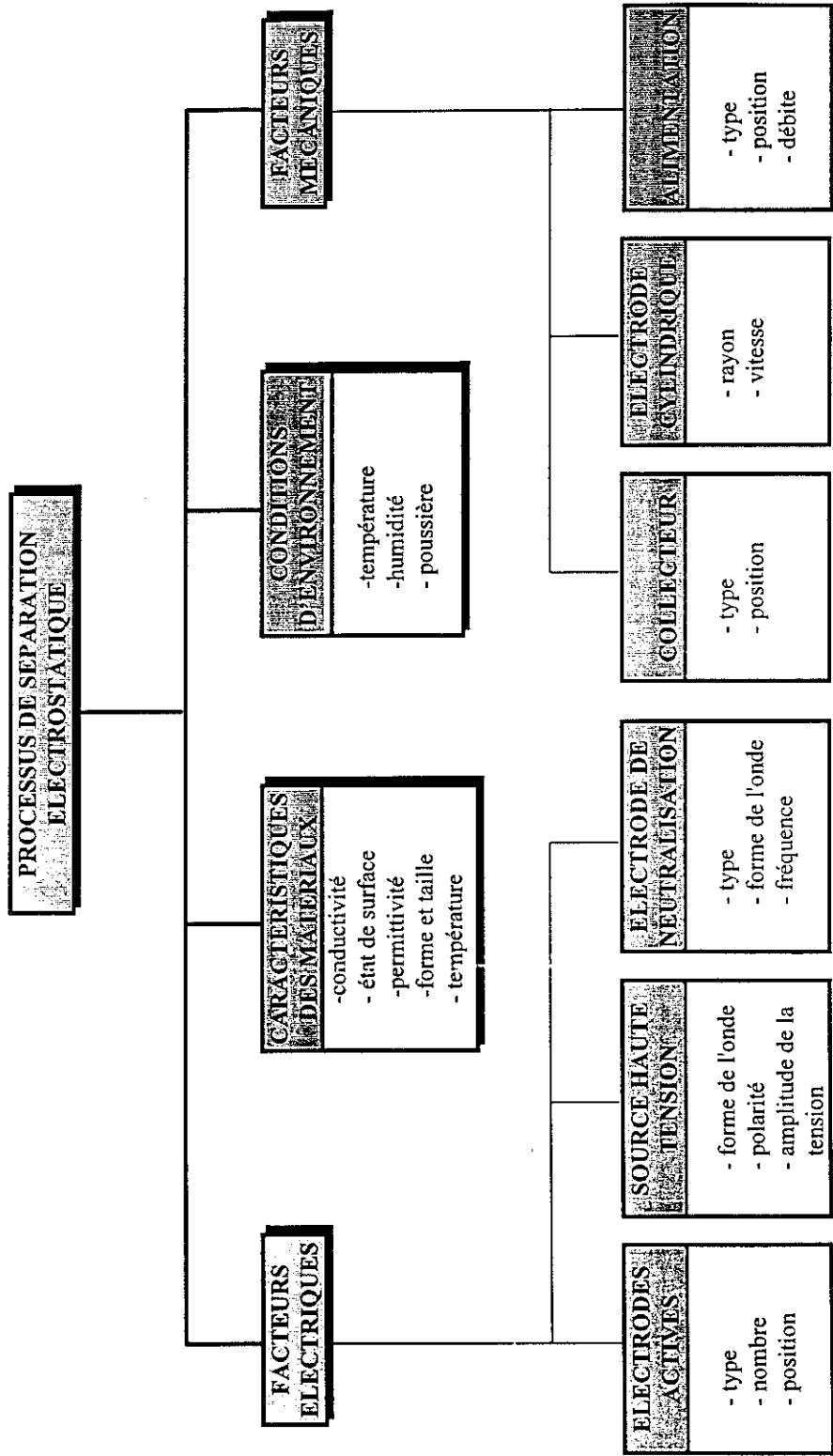


Fig. 4.11. Paramètres et variables dans un processus de séparation électrostatique, qui influencent les trajectoires des particules.

Des expériences de laboratoire ont été effectuées afin de préciser, pour chaque matériau à séparer, les valeurs des quelques paramètres du régime de fonctionnement (angle de position des électrodes, distances entre les électrodes, distance entre les pointes ionisantes) qui assurent des meilleurs résultats [65].

Les résultats du sous-chapitre 2.1 montrent que plus la distance entre les pointes éionisantes augmente, plus le champ à la surface de l'électrode reliée à la terre devient non-uniforme. La présence du matériau, particulièrement des particules conductrices, dans la zone de champ ionisé, modifie la distribution du champ et détermine l'apparition des décharges couronne inverses qui peuvent dégénérer en claquage (Fig. 4.12). Par conséquent, le niveau de la haute tension sera établi en fonction des caractéristiques physiques, de chaque type de matériau à séparer.

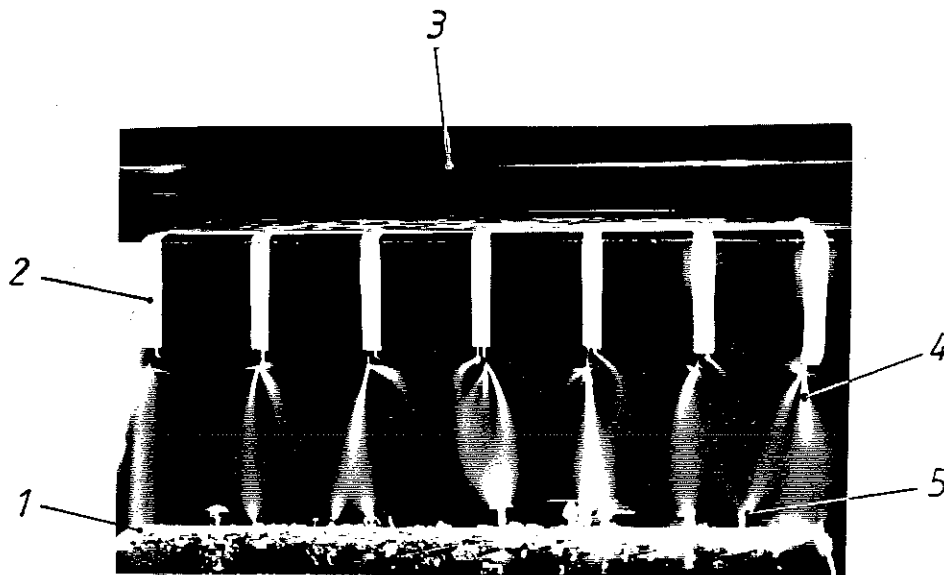


Fig. 4.12. Décharge couronne en polarité positive produite par une électrode à pointes ionisantes ($p = 20$ mm-distance entre les pointes), en présence des particules métalliques et isolantes sur la surface de l'électrode cylindrique. 1. - électrode cylindrique reliée à la terre; 2. - support métallique de la pointe ionisante en fil de tungstène $\phi = 0,15$ mm, fixée par tube flexible; 3. - support électrostatique $\phi = 20$ mm; 4. - décharge couronne positive 5. - décharge couronne inverse (négative).

Le temps où les particules isolantes traversent la zone de champ ionisé est le temps de charge, et sa valeur influence de manière sensible la charge acquise par les particules. En fonction de la forme et de la taille des granules isolants, le champ ionisé doit occuper une zone étendue, en utilisant soit plusieurs électrodes ionisantes, soit une électrode de construction spéciale, de type matrice de pointes ionisantes (Fig. 3.15.a). Dans les deux cas, l'utilisation d'une électrode cylindrique de diamètre supérieur est avantageuse.

Le débit "D" du matériau à trier étant proportionnel à la vitesse périphérique de l'électrode cylindrique ($v = 2\pi n R_c / 60$) donc, plus le rayon du cylindre $R_c^* > R_c$ croît, plus la quantité de matériau/unité de temps croît.

Pour maintenir la même valeur de la force centrifuge $F_c = m \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 R_c$, il faut diminuer la vitesse de rotation jusqu'à :

$$n^* = n \sqrt{\frac{R_c}{R_c^*}} \quad (4.1)$$

Par conséquent, le débit de matériau à séparer croît :

$$\frac{D^*}{D} = \frac{v^*}{v} = \frac{n^* R_c^*}{n R_c} = \sqrt{\frac{R_c^*}{R_c}} \quad (4.2)$$

En conclusion, il est préférable d'augmenter le débit de matériau à trier en utilisant une électrode cylindrique de diamètre plus grand et en réduisant la vitesse de rotation conformément à relation (4.1), que d'augmenter la vitesse du cylindre. La deuxième solution diminue le temps de charge et donc, la charge acquise par la particule (voir § 2.3.2) et augmente la force centrifuge, ce qui conduit à de mauvais résultats.

Une expérience de séparation a porté sur un mélange granulaire qui contient 74 % de métal (cuivre) et 26 % d'isolant (PVC et PE). On a utilisé un séparateur électrostatique de laboratoire équipé d'une électrode cylindrique tournante de diamètre $\phi = 250$ mm (vitesse de rotation de 80 tr/mn) et d'un système de deux électrodes ionisantes principales, électrode électrostatique elliptique et électrode ionisante auxiliaire. Toutes ces électrodes sont portées à une tension positive de 25 kV.

La distribution des produits "conducteur" et "isolant" dans les 25 boîtes du collecteur (Fig. 4.13) met en évidence de bons résultats en ce concerne la pureté et le taux de récupération du métal et de l'isolant.

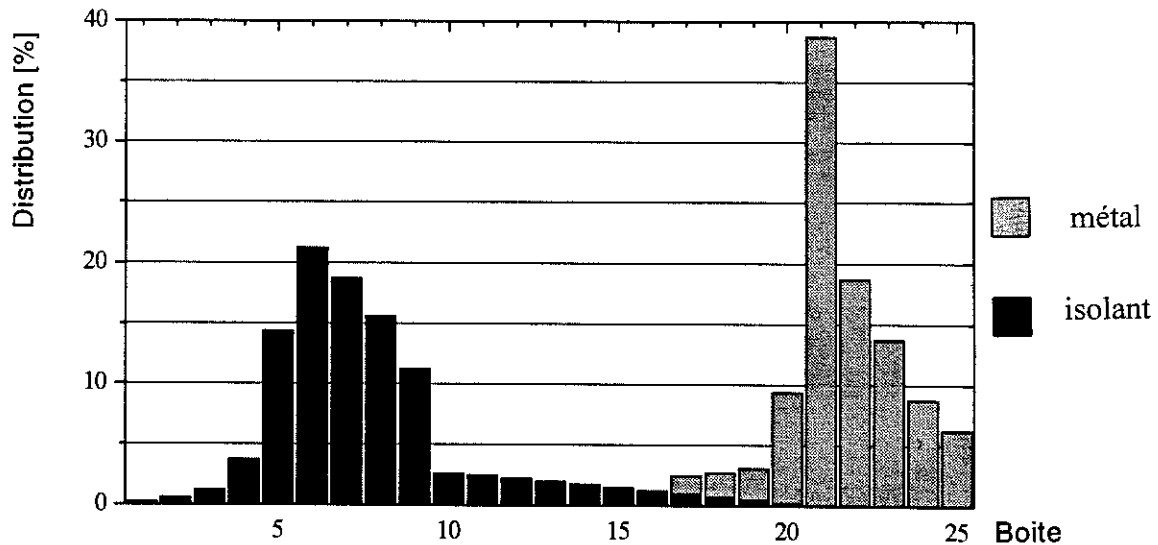


Fig. 4.13. Distribution des particules métalliques et d'isolant dans les boîtes du collecteur dans une expérience de séparation électrostatique

L'efficacité du processus de séparation peut être évaluée d'après les résultats quantitatifs, en mesurant la masse de métal et d'isolant dans chaque produit "conducteur", "mixte" et "isolant" (Tableau 4.6).

Tableau 4.6. Evaluation de l'efficacité d'un processus de séparation.

PRODUIT	MASSE	CONTENU [%]		DISTRIBUTION [%]		EFFICACITE [%]	
	[%]	ISOLANT	METAL	ISOLANT	METAL	ISOLANT	METAL
alimentation	100	26 (a1)	74 (a2)	100	100	82 (η_1)	81,5 (η_2)
non-conducteur	22,6 (v1)	95,8	4,2	83,3 (m1)	1,3		
mixte	15,6	25,5	74,5	15,3	15,7		
conducteur	61,8 (v2)	0,6	99,4	1,4	83 (m2)		

$$\eta = [(m-v)/(100-a)] 100 \text{ [%]}$$

Les résultats obtenus mettent en évidence une corrélation correcte entre les paramètres du régime de fonctionnement du séparateur de laboratoire et les caractéristiques physiques des particules composant le mélange granulaire.

4.2.2. Influence de l'humidité superficielle des particules sur le processus de séparation

L'une des plus importantes applications de la séparation métal-isolant est le tri des déchets industriels de câbles électriques, afin de récupérer le cuivre, l'aluminium le polyéthylène (PE) et le ptychlorure de vinyle (PVC). L'utilisation industrielle de ce procédé à la ROMCAB S.A. Targu-Mures (Roumanie) depuis 1990 a mis en évidence que l'humidité superficielle du matériau diminue l'efficacité de la séparation.

Comme la plupart des processus électrostatiques, l'électroséparation ne peut pas s'effectuer en présence d'humidité [103], car l'absorption d'eau par les granules d'isolant modifie leur comportement. L'augmentation de la conductivité superficielle diminue la charge acquise par la particule isolante par rapport à la charge Q_i acquise par une particule sèche:

$$Q(W) = k(W) Q_i \quad (4.3)$$

$k(W)$ étant un coefficient inférieur à l'unité, fonction non-linéaire de l'humidité W .

Dès que la particule quitte la zone de champ ionisé, sa charge diminue à cause du contact avec électrode reliée à la terre :

$$Q(W,t) = Q(W) \exp(-t/\tau) \quad (4.4)$$

où la constante de temps du processus de décharge, τ , dépend de l'humidité W par la conductivité totale $\sigma(W)$ (dont la principal composante est la conductivité superficielle) et par la permittivité $\varepsilon(W)$:

$$\tau(W) = \varepsilon(W)/\sigma(W) \quad (4.5)$$

En supposant que la particule isolante est une sphère de rayon R , la force d'image électrique qui la maintient sur la surface de l'électrode cylindrique décroît:

$$F_i(W, t) = \frac{[Q(W, t)]^2}{4\pi\varepsilon_0(2R)^2} = [k(W)]^2 F_i e^{-2\frac{t}{\tau(W)}} \quad (4.6)$$

ou F_i est la force image électrique agissant sur la particule sèche. C'est pourquoi, pour la plupart des particules isolantes humides l'angle de détachement a des valeurs dans l'intervalle $(90^\circ \dots 180^\circ)$.

Une étude expérimentale approfondie a été réalisée afin de déterminer la limite de l'humidité superficielle " W " du matériau granulaire, acceptable du point de vue de l'efficacité du processus de séparation électrostatique. Les expériences ont portées sur des mélanges granulaires aluminium-PVC et cuivre-PVC, préparées à la ROMCAB S.A. Targu-Mures, provenant de déchets de câbles électriques (Fig. 4.14).

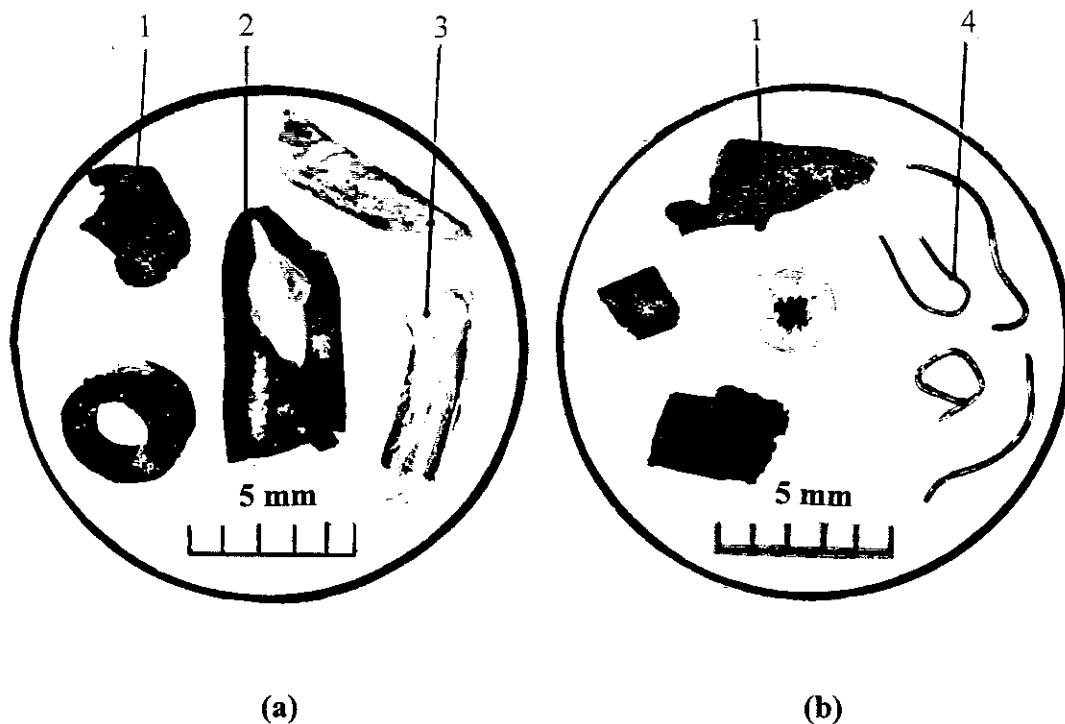


Fig. 4.14. Forme et dimensions des particules métalliques et isolantes composant les mélanges granulaires aluminium - PVC (a) et cuivre - PVC (b). 1. - granule de PVC; 2. - granule Al-PVC non-dissocié; 3. - aluminium; 4. - cuivre.

Après des opérations répétées de séparation électrostatique, on a obtenu des produits purs de cuivre, aluminium et PVC et on a préparé 10 échantillons de 500 g contenant 50 % d'aluminium et 50 % de PVC, et 10 échantillons de 500 g. contenant 50 % de cuivre et 50 % de PVC. Tous les échantillons ont été desséchés dans une étuve a 105° C pendant 3 heures, afin d'obtenir $W \cong 0$. En ajoutant une quantité m_w d'eau pour chaque échantillon, l'humidité superficielle devient :

$$W = (m_w/m) 100 [\%] \quad (4.7)$$

ou $W = (0,1-0,2-...0,8-0,9) \%$. Les expériences ont été effectuées selon la diagramme présentée sur la Fig. 4.15.

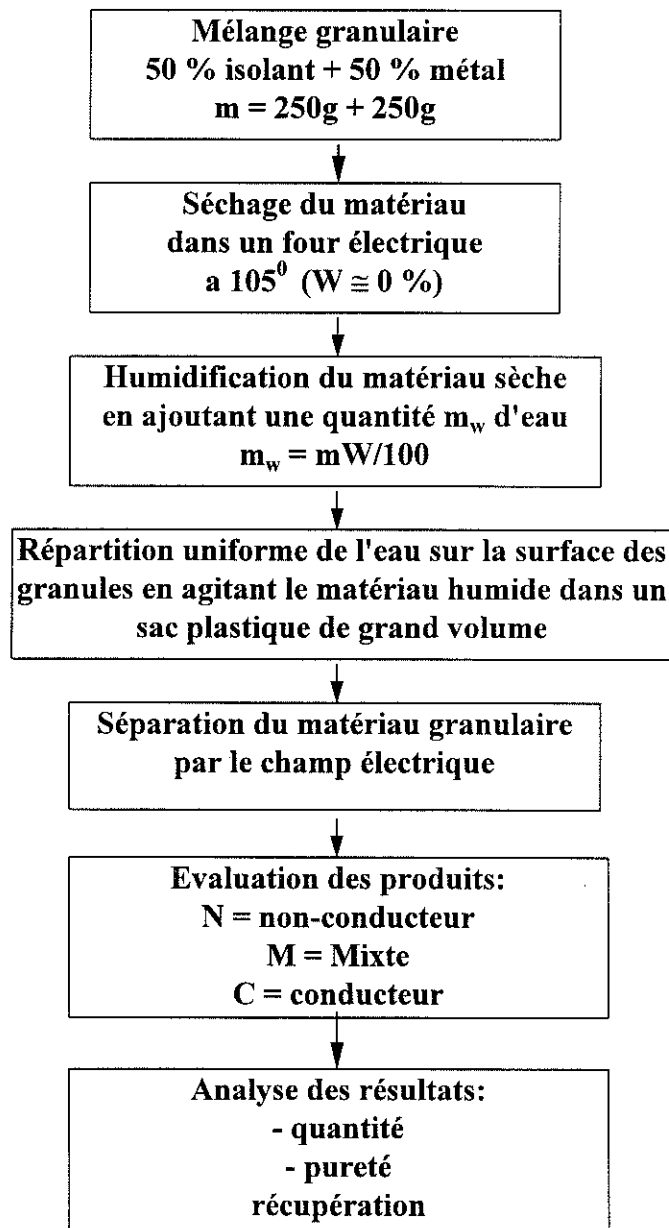


Fig. 4.15. Diagramme d'une expérience pour l'étude de l'influence de l'humidité superficielle du matériau granulaire sur le processus de séparation.

Le matériau humide a été introduit dans un sac plastique de grand volume (5 fois le volume de l'échantillon) et agité afin d'obtenir une répartition uniforme de l'eau sur la surface des granules. La séparation électrostatique des échantillons humides a été effectuée en utilisant un séparateur électrostatique de laboratoire [12], à électrode cylindrique tournante reliée à la terre. Les paramètres du régime de fonctionnement établis pour obtenir une séparation efficace du matériau séché ont été maintenus pendant les autres expériences, avec du matériau humide (Fig. 4.16a).

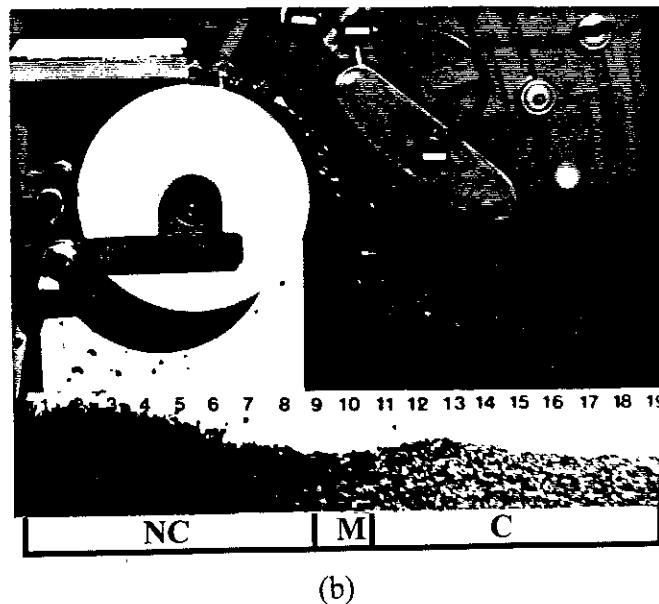
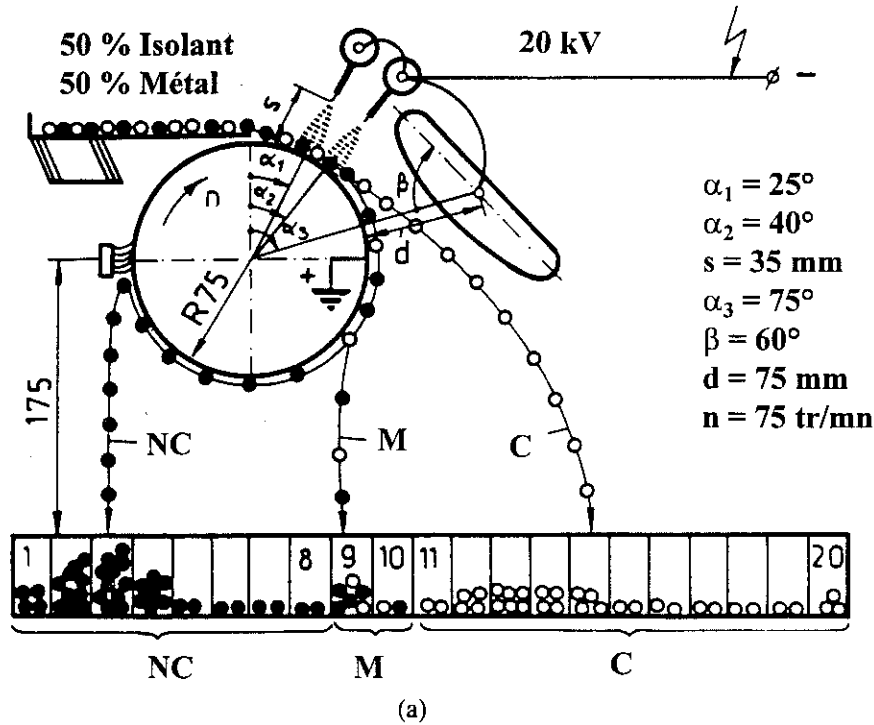


Fig. 4.16. a). Régime de fonctionnement d'un séparateur électrostatique de laboratoire pour l'étude de l'influence de l'humidité superficielle du matériau granulaire sur l'efficacité de la séparation métal-isolant; b). Résultats d'un processus de séparation aluminium-PVC.

Le collecteur de 20 boîtes a facilité l'étude de la distribution des particules métalliques et isolantes, le contenu de chaque boîte étant analysé par séparations répétées et, à la fin par tri manuel des particules. Trois produits ont été délimités "non-conducteur", "mixte" et "conducteur". D'après les résultats des expériences (Tableau 4.7) la pureté et le taux de récupération ont été calculés pour chaque humidité W [104], pour l'aluminium (Fig. 4.17), aussi bien que pour le PVC (Fig. 4.18).

Tableau 4.7 Résultats d'une expérience de séparation électrostatique d'un échantillon humide Aluminium-PVC.

ECHANTILLON		ALIMENTATION	NC	M	C
Al-PVC (W = 0.5 %)			boîtes 1...8	boîtes 9...10	boîtes 11...20
Quantités [g]		500	N = 170	M = 50	C = 280
Analyse	Isolant [g]	A1 = 250	N1 = 169	M1 = 30	C1 = 51
	Métal [g]	A2 = 250	N2 = 1	M2 = 20	C2 = 229
Résultats	PVC	Pureté = (N1/N) 100 = 99,4 % Récupération = (N1/A1) 100 = 67,6 %			
	Aluminium	Pureté = (C1/C) 100 = 81,8 % Récupération = (C2/A2) 100 = 91,6%			

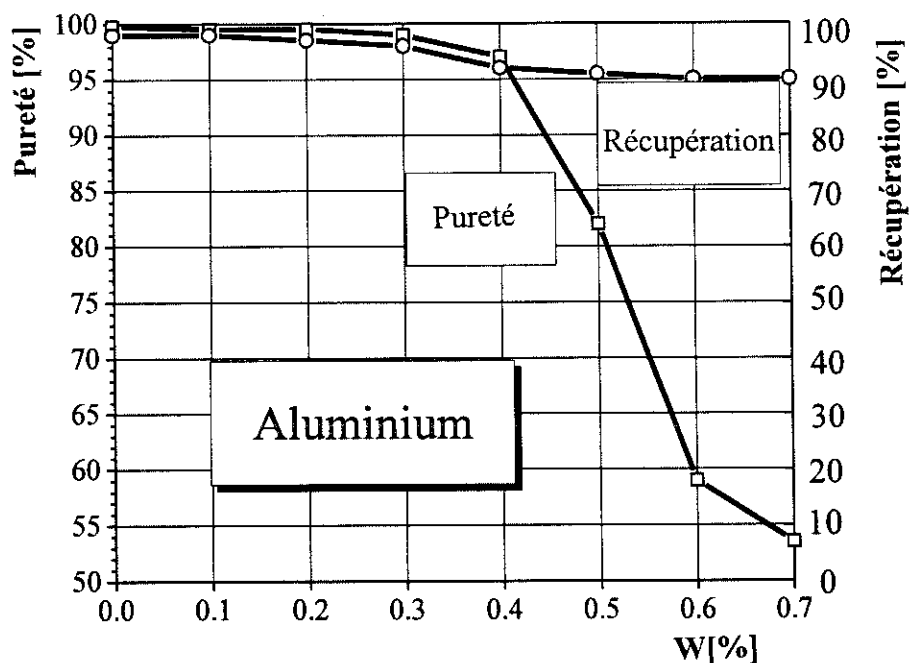


Fig. 4.17. Pureté et taux de récupération du métal obtenu par séparation électrostatique des échantillons contenant 50 % Aluminium-50 % PVC, en fonction de l'humidité superficielle W du matériau granulaire.

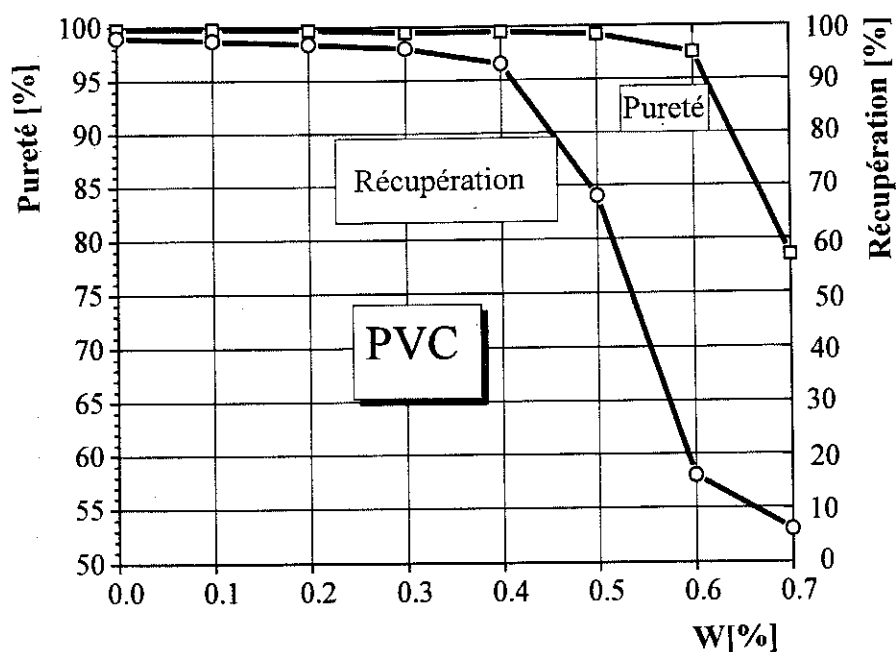


Fig. 4.18. Pureté et taux de récupération de l'isolant obtenu par séparation électrostatique des échantillons contenant 50 % Aluminium-50 % PVC, en fonction de l'humidité superficielle W du matériau granulaire.

Le produit isolant récupéré est de bonne pureté jusqu'à $W = 0,5$ % et le taux de récupération commence à diminuer à partir de $W = 0,4$ %. Le taux de récupération de l'aluminium ne change pas beaucoup avec l'humidité W mais la pureté décroît rapidement pour $W > 0,4$ % à cause de la présence des particules isolantes humides dans le produit "conducteur" (Fig. 4.19).

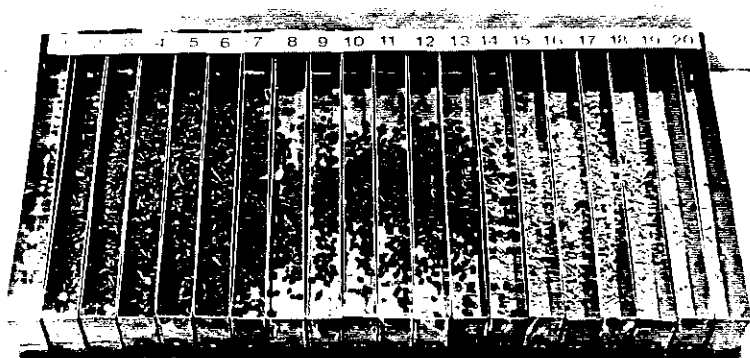


Fig. 4.19. Distribution du matériau humide dans les 20 boîtes du collecteur dans une expérience de séparation électrostatique PVC-Aluminium.

Dans le cas du matériau granulaire cuivre-PVC, les résultats présentés sur la Fig. 4.20 mettent en évidence que pour $W < 0,3 \%$, le taux de récupération du PVC et du cuivre dépasse 85 % et le "mixte" est moins de 15 %. La valeur de l'humidité superficielle $W = 0,3 \%$ peut être considérée comme valeur limite pour la séparation électrostatique métal-isolant provenant de déchets de câbles électriques.

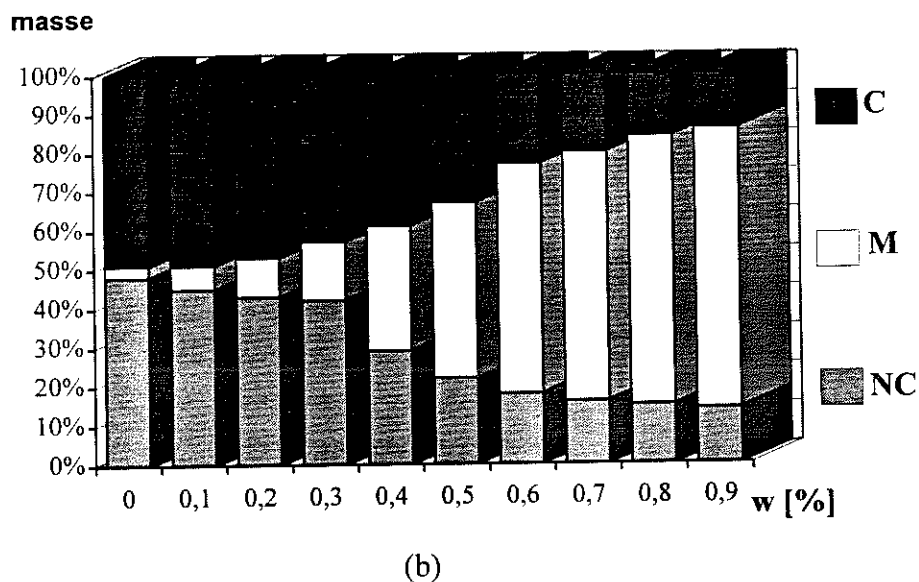
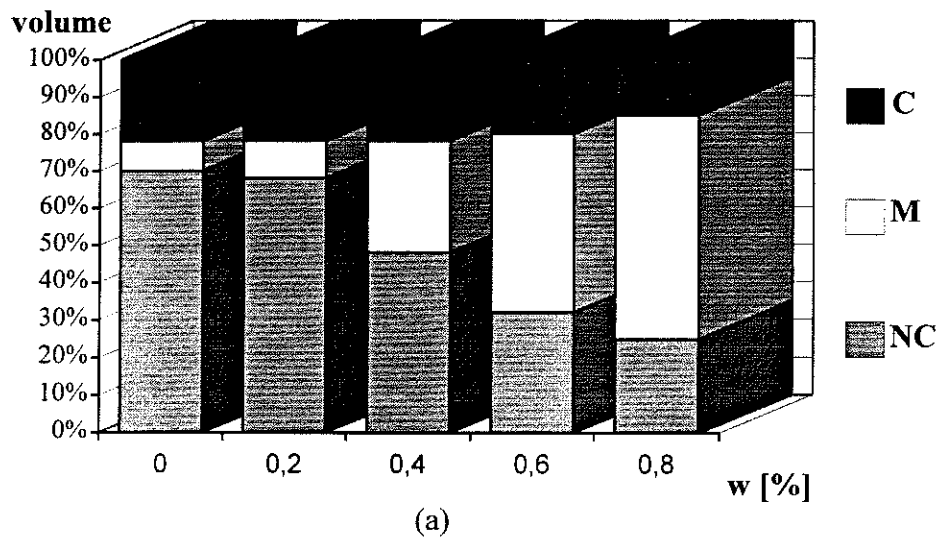


Fig. 4.20. Distribution volumétrique (a) et massique (b) des produits de la séparation électrostatique métal-isolant, pour des échantillons contenant 50 % cuivre et 50 % PVC, en fonction de l'humidité superficielle W du matériau granulaire.

4.2.3. Amélioration du régime de fonctionnement d'une installation industrielle de séparation métal-isolant

Le procédé électrostatique de récupération du métal et de l'isolant de déchets de câbles électriques est utilisé au niveau industriel à l'ICME S.A. Bucarest, le plus grand producteur de câbles et matériaux électrotechniques de Roumanie. L'électroséparateur isolant - métal ELSIM 2 (Fig. 4.21) est équipé d'une ou deux électrodes à pointes ionisantes et une électrode électrostatique.

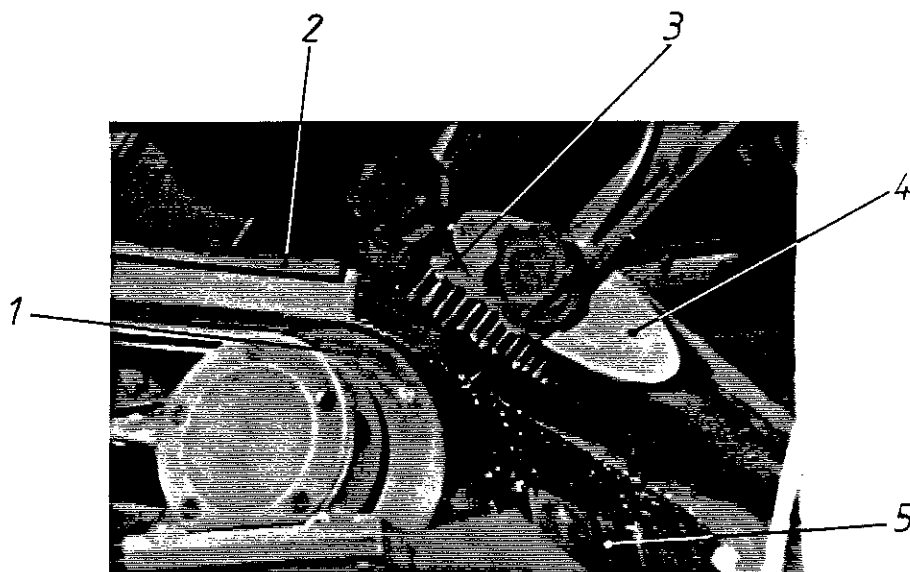


Fig. 4.21. Séparateur électrostatique industriel ELSIM 2, en fonction à l'ICME S.A. Bucarest, Roumanie. 1. - électrode cylindrique tournante reliée à la terre; 2. - vibrotransporteur; 3. - électrode ionisante; 4. - électrode électrostatique; 5. - palette. L'électrode cylindrique tournante de rayon $R_c = 75$ mm a une vitesse de rotation variable dans le domaine (0...400) tr/mn. La source haute tension est réglable, (0...40) kV, 5 mA, et réversible.

L'usure des pointes ionisantes a entraîné une diminution du courant injecté et de la densité de charge d'espace. Pour augmenter l'injection d'ions et améliorer le processus de charge, l'opérateur a réduit la distance entre les pointes ionisantes et l'électrode cylindrique tournante. Par conséquent, les claquages produits lors du passage des particules conductrices de grande taille sont devenus plus fréquents. C'est pourquoi, l'opérateur a diminué la tension d'alimentation des électrodes (Fig. 4.22).

La distance réduite entre les électrodes a limité la valeur de la tension à 10 kV. Par conséquent, l'intensité du champ harmonique produit par l'électrode électrostatique a baissé et l'action du champ électrique sur les particules conductrices a diminué. A cause de la valeur réduite de la densité de charge d'espace, la vitesse de rotation du cylindre et le débit du matériau à trier ont été diminués afin d'obtenir des produits acceptables du point de vue de la pureté.

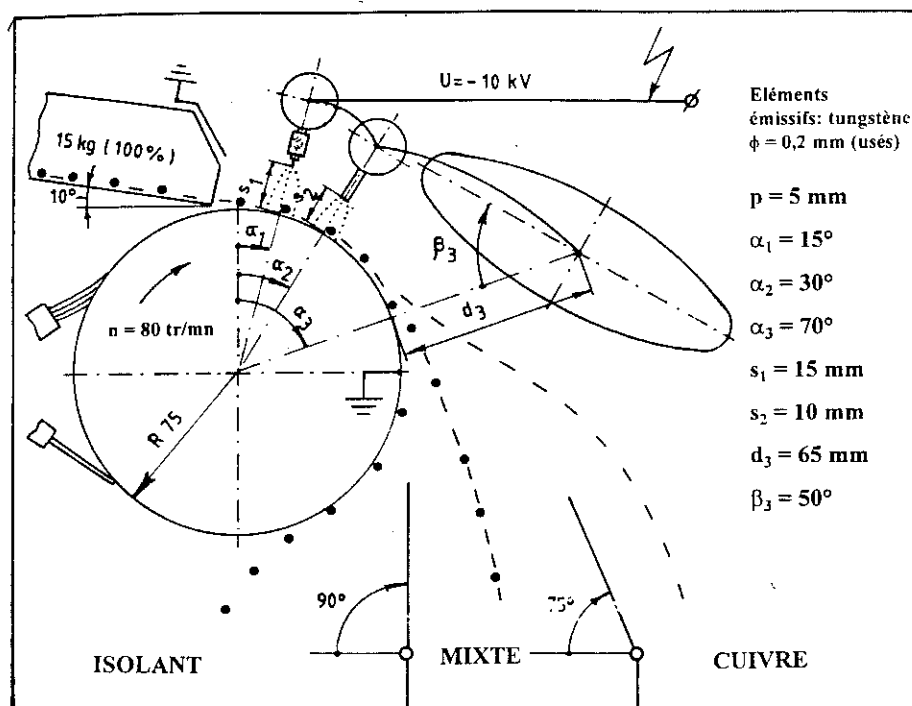


Fig. 4.22. Régime initial de fonctionnement du séparateur électrostatique ELSIM 2.

Les résultats d'une expérience de séparation électrostatique en utilisant le régime de fonctionnement présenté sur la Fig. 4.22 montre la diminution de l'efficacité du processus (Fig. 4.23) : peu de matériau dans le produit "non-conducteur" (3,3 %) et trop de "mixte" (30 %). Bien que la pureté du produit "conducteur" ait été satisfaisante, la quantité de matériau collecté dans ce produit a été seulement de 66,7 %.

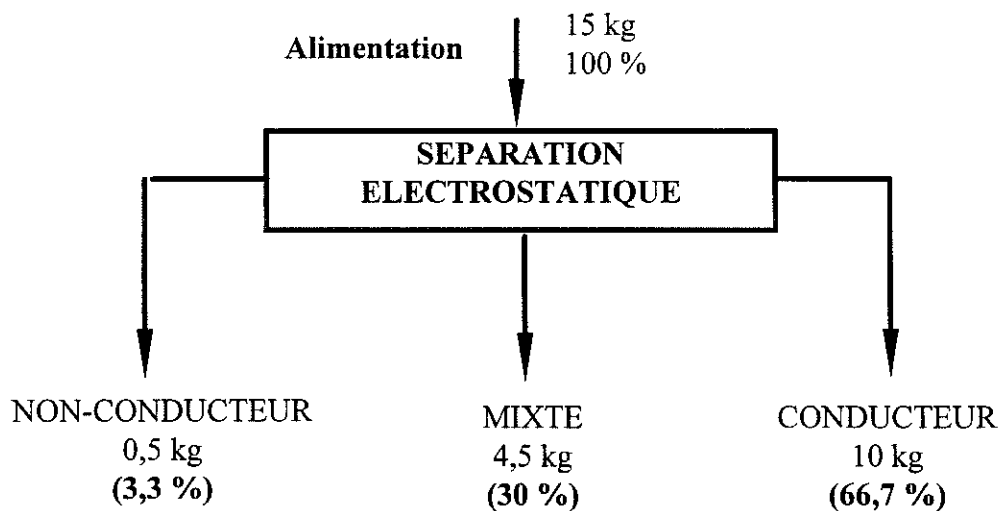


Fig. 4.23. Résultats d'une expérience de séparation électrostatique en utilisant le séparateur ELSIM 2 avec le régime de fonctionnement présenté sur la Fig. 4.22.

A la demande de la Société ICME S.A. de Bucarest, le Laboratoire de Champs Electriques Intenses de l'Université Technique de Cluj-Napoca a étudié les possibilités d'améliorer ces performances, notamment :

- augmenter la pureté des produits "conducteur" et "non-conducteur";
- diminuer la quantité de "mixte" et augmenter la quantité de "conducteur" et "non-conducteur";
- augmenter la productivité de l'électroséparateur en utilisant une vitesse de rotation supérieure pour l'électrode cylindrique tournante.

Dans le but de réaliser les objectifs formulés ci-dessus, l'installation de laboratoire pour électroséparation ILES 1 [12] a été utilisée pour établir les paramètres d'un régime optimal de séparation (Fig. 4.24). Les expériences ont porté sur des échantillons de matériaux granulaires préparés à l'ICME S.A. Bucarest.

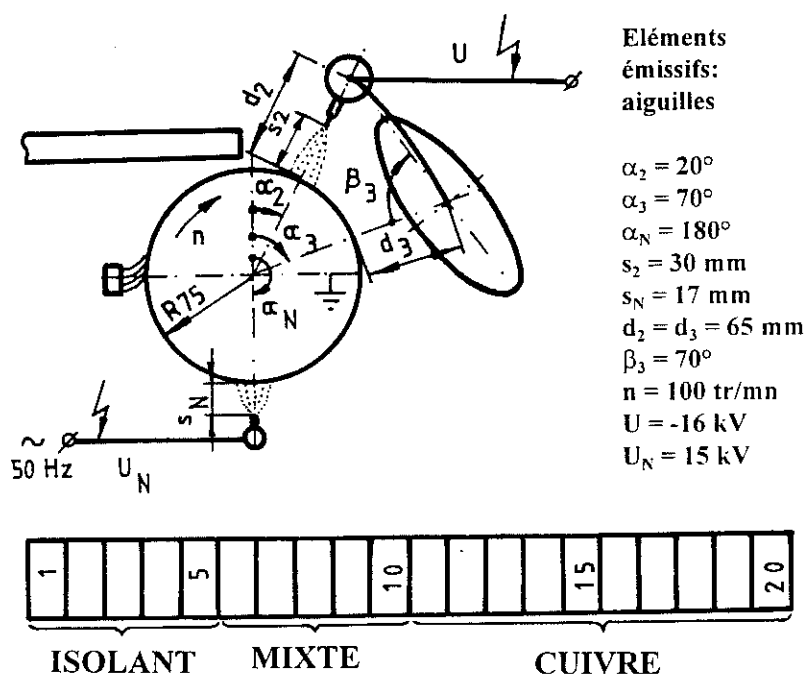


Fig. 4.24. Configuration du séparateur électrostatique de laboratoire ILES 1 et paramètres du régime de fonctionnement pour le tri de mélanges granulaires métal-isolant provenant de déchets de câbles électriques de l'ICME S.A. Bucarest

Les particularités du régime de séparation étudié sur l'installation de laboratoire ILES 1 par rapport à l'installation industrielle sont les suivantes:

- utilisation d'une seule électrode à pointes ionisantes. Trois type de pointes ionisantes ont été testés afin de trouver une solution simple et efficace pour les électrodes ionisantes industrielles:
 - fil en tungstène de diamètre $\phi = 0,4 \text{ mm}$
 - aiguilles en acier
 - tubes métalliques de diamètre extérieur $\phi = 0,8 \text{ mm}$ et diamètre intérieur $\phi = 0,5 \text{ mm}$

- distance plus grande ($s = 35$ mm) entre les pointes ionisantes et l'électrode cylindrique reliée à la terre;
- amplitude de la haute tension augmenté jusqu'à 16 kV, polarité négative;
- électrode de neutralisation pour améliorer le processus de détachement des particules isolantes avant la brosse ($\alpha_N = 180^\circ$);
- vitesse du cylindre augmentée jusqu'à 100 tr/mn.

Un mélange granulaire contenant environ 40 % de cuivre et 60 % de caoutchouc, obtenu par la granulation des déchets de câbles électriques, a été soumis au processus de séparation électrostatique, en utilisant le régime de fonctionnement indiqué sur la Fig. 4.24. La distribution du matériau granulaire dans les 20 boîtes du collecteur met en évidence des bonnes performances pour le processus de charge des particules isolantes. Les particules de grande taille se détachent du cylindre dans la zone de neutralisation et sont collectées dans les boîtes 7...9. Les autres, de petite taille, restent sur la surface du cylindre jusqu'à la brosse, étant collectées dans les boîtes 1...3 (Fig. 4.25).

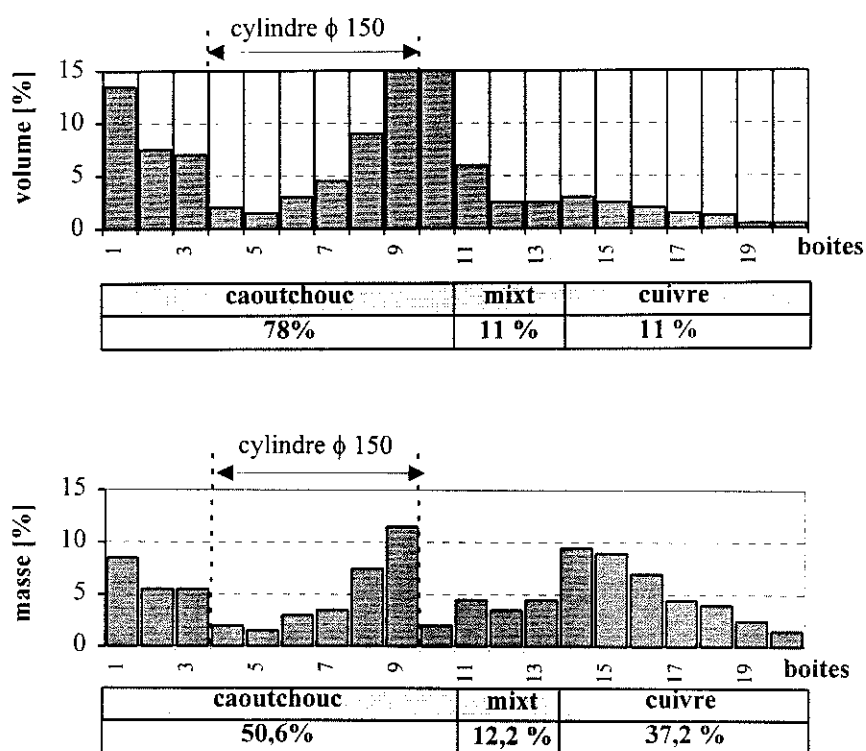


Fig. 4.25. Résultats du processus de séparation électrostatique du mélange granulaire caoutchouc-cuivre, sur l'installation de laboratoire ILES 1 (le régime de fonctionnement est présenté sur la Fig. 4.24).

A partir des résultats de ces expériences de laboratoire, on a proposé pour le séparateur électrostatique industriel ELSIM 2 le régime de fonctionnement présenté sur la Fig. 4.26.

Le régime amélioré de fonctionnement est caractérisé par rapport au régime initial, par les paramètres suivants:

- champ ionisé généré par une seule électrode, équipée avec de nouveaux pointes ionisantes;
- distance accrue entre les pointes ionisantes et l'électrode reliée à la terre ($s = 35$ mm), afin de diminuer la fréquence des claquages et d'empêcher les court-circuits;
- amplitude plus élevée de la haute tension ($U = 20$ kV), polarité négative, afin de renforcer le champ harmonique et d'écarter d'avantage les trajectoires des particules métalliques;
- vitesse de rotation du cylindre augmentée jusqu'à $n = 100$ tr/mn, ce qui a permis de fonctionner à un débit de matériau supérieur.

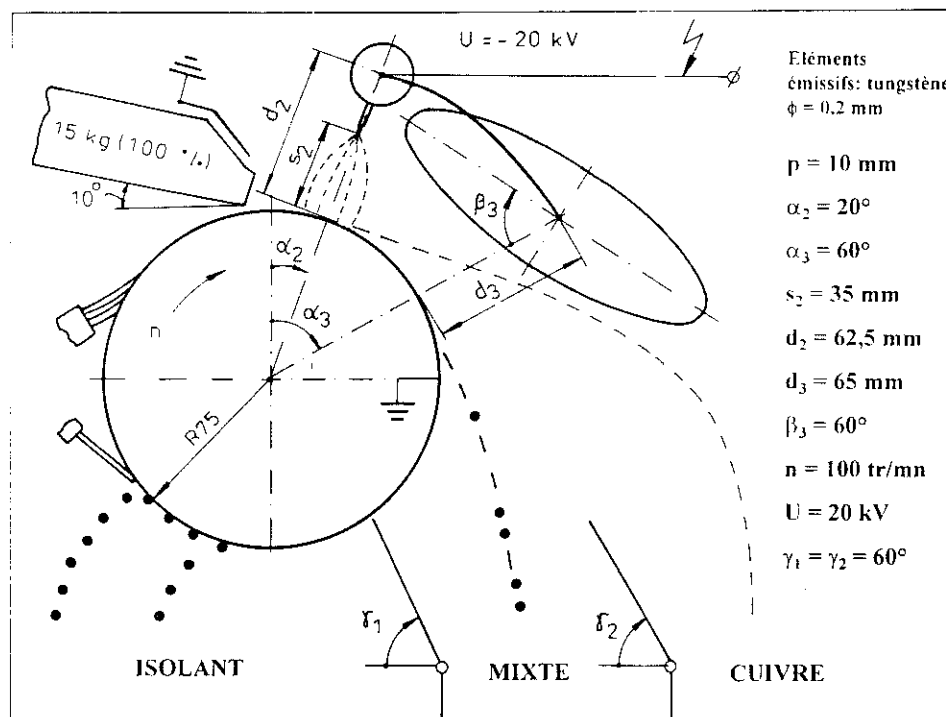


Fig. 4.26. Régime amélioré de fonctionnement du séparateur industriel ELSIM 2.

L'efficacité du régime de fonctionnement présenté ci-dessus a été vérifiée par le tri électrostatique d'un autre mélange granulaire cuivre-PVC (Fig. 4.27). On a obtenu des quantités plus grandes et de pureté élevée pour les produits "conducteur" et "non-conducteur".

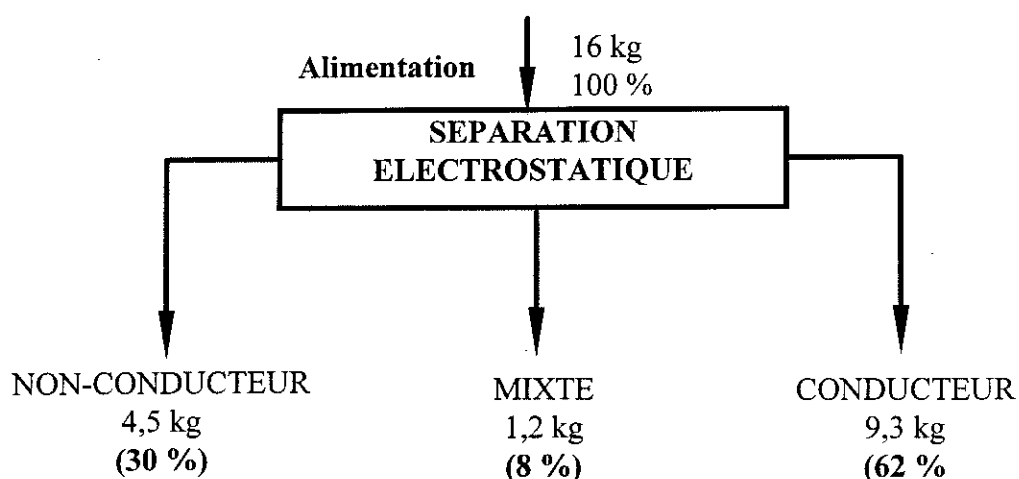


Fig. 4.27. Résultats d'une expérience de séparation électrostatique en utilisant pour le séparateur ELSIM 2 le régime amélioré de fonctionnement, présenté sur la Fig. 4.26.

Plusieurs expériences de séparation ont porté sur des mélanges granulaires cuivre-PVC afin de vérifier l'efficacité des électrodes ionisantes équipées avec différents types de pointes ionisantes (fig. 4.28).

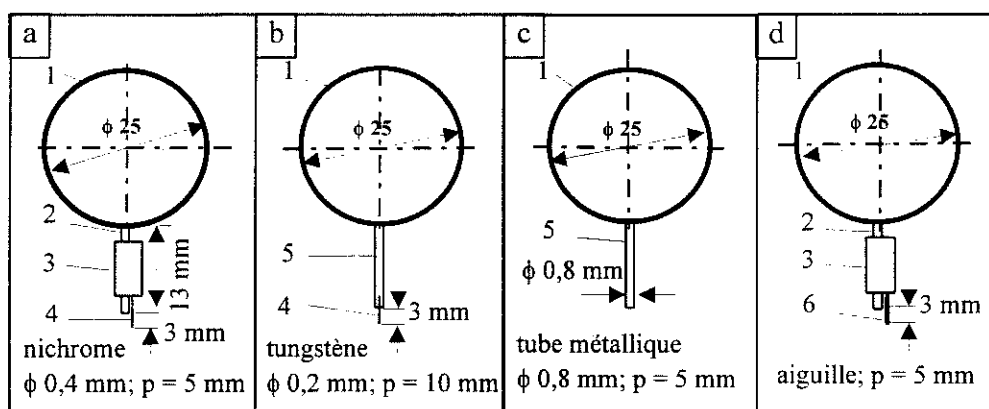


Fig. 4.28. Electrodes équipées de différents types de pointes ionisantes. 1. support électrostatique; 2. - support métallique de la pointe ionisante; 3. - tube flexible (caoutchouc); 4. - pointe ionisante en fil métallique; 5. - tube métallique; 6. - pointe ionisante en acier (aiguille); (p = distance entre les pointes ionisantes).

Les résultats (Tableau 4.8) montrent une bonne séparation : des quantités de produits "conducteur" et "non-conducteur" qui s'approchent du contenu de métal et d'isolant dans le matériau de départ. Le produit "mixte" a été réduit et la pureté du cuivre récupéré au-dessus de 99 %.

Tableau 4.8. Résultats des expériences de séparation cuivre-PVC en utilisant pour le séparateur électrostatique ELSIM 2 des électrodes équipées de différents types de pointes ionisantes. Le régime de fonctionnement est présenté sur la Fig. 4.25.

EXPERIENCE	POINTE IONISANTE	QUANTITES [%]				Impuretés de PVC dans le produit C
		Alimentation	Non- conducteur	Mixte	Conducteur	
1	Nichrome φ 0,4	100	66,3	5,7	28	0,63
2	Tungstène φ 0,2	100	65,8	5,2	29	-
3	Tube métallique φ 0,8	100	61,6	8,7	29,7	0,84
4	aiguille φ 0,9	100	65,7	5,5	28,8	-

Note: Les résultats dépendent de la position des palettes

Des expériences de laboratoire sont nécessaires pour chaque type de matériau granulaire afin de préciser les paramètres du régime de fonctionnement qui permettent d'améliorer la pureté des produits et le taux de récupération.

Des expériences similaires ont porté sur d'autres matériaux granulaires, en permettant d'obtenir la récupération du cuivre des mélanges de faible teneur en métal (moins de 10 %). La purification du produit isolant jusqu'à pratiquement 100 % a démontré la possibilité de l'utiliser dans l'industrie électrotechnique.

4.3. Trajectoires de séparation mica-feldspath-quartz, selon le coefficient de forme des particules

Le mica est un produit secondaire de la technologie de préparation du feldspath pour l'industrie céramique. L'Institut de Recherche et Développement Minière de Cluj-Napoca a proposé un schéma technologique pour augmenter le contenu de mica dans le produit obtenu des pegmatites de "Muntele Rece" - Cluj (Roumanie). Le but était d'obtenir des produits à forte concentration de mica, appropriés pour l'utilisation dans l'industrie électrotechnique. Par opérations de granulation, tri volumétrique et séparation magnétique on a obtenu un produit de mica de pureté (50...70)% environ, préparé pour la séparation électrostatique [25].

A la suite de l'analyse des caractéristiques physiques des composants du matériau granulaire mica-feldspath-quartz, on a établi que la séparation électrostatique selon le coefficient de forme des particules est la plus appropriée (§ 4.3.1). Une configuration des électrodes ionisantes à zone étendue de champ ionisé a été retenue pour la séparation du mica des impuretés de quartz et feldspath (§ 4.3.2). D'après l'analyse théorique du procédé de séparation électrostatique selon le coefficient de forme, une nouvelle méthode a été proposée, utilisant une électrode cylindrique tournante revêtue d'un isolant (§ 4.3.3).

4.3.1. Procédé de séparation électrostatique selon le coefficient de forme des particules

Dans la plupart des situations pratiques, la séparation électrostatique d'un mélange granulaire donne de bons résultats quand les composants ont des conductivités différentes. Ce n'est pas le cas du mélange mica-feldspath-quartz où toutes les particules peuvent être considérées comme isolantes [103]. Le tri électrostatique du mica des impuretés de feldspath et quartz peut être réalisé en fonction de la différence de forme entre les deux classes de particules : les granules de quartz et feldspath sont de type isométrique tandis que les paillettes de mica sont aplaties (Fig. 4.29).

La différence de forme entre les particules influence de manière essentielle le rapport entre les forces qui tendent à coller les particules ou à les détacher de la surface du cylindre. Une évaluation grossière de ces forces peut être effectuée en supposant que:

1. les granules, soit de mica, soit de feldspath ou de quartz sont assimilés à des parallélépipèdes ou à des cylindres de section "A" et hauteur "h": A_1, h_1 pour les particules aplaties de mica et A_2, h_2 pour les particules isométriques de feldspath et quartz, ayant $\frac{h_1}{h_2} < 1$;
2. la charge acquise par bombardement ionique s'accumule seulement sur la surface A opposée au contact de la particule avec l'électrode cylindrique;
3. la charge Q acquise par la particule est uniformément distribuée sur la surface A avec la densité $q_s = \frac{Q}{A}$;
4. les particules, soit de mica, soit de feldspath-quartz sont parfaitement isolantes;

5. la masse volumique des particules (ρ) est la même (les valeurs réelles de la masse volumique du mica, feldspath et quartz sont: 2950 kg/m³, 2600 kg/m³ et 2650 kg/m³);
6. l'électrode cylindrique est revêtue d'une couche parfaitement isolante (Méthode II);
7. On néglige la force de pesanteur.

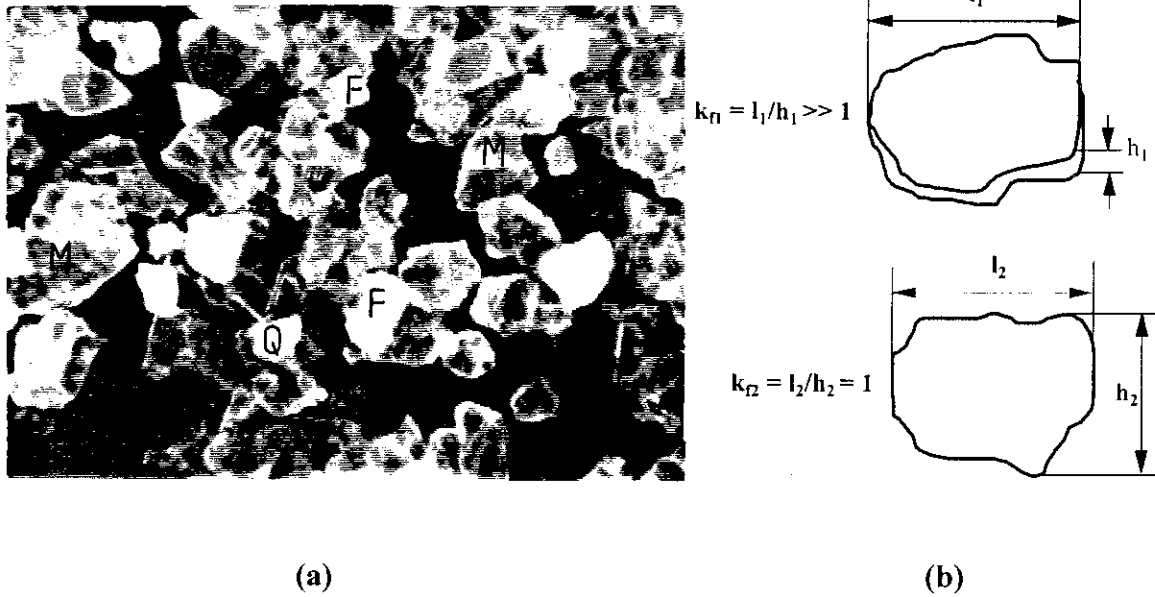


Fig. 4.29. a). Particules de mica (M) de forme aplatie (paillettes), particules de quartz (Q) et feldspath (F) de forme isométrique. b). Définition du coefficient de forme des particules.

Méthode I.

La force image électrique qui agit sur la particule chargée par flux d'ions tend à fixer la particule sur la surface de l'électrode reliée à la terre (Fig. 4.30). Par contre, la force centrifuge tend à détacher la particule de la surface du cylindre. Les deux forces sont données par les relations:

$$F_i = \frac{(q_s A)^2}{4\pi\epsilon_0 (2h)^2} \quad (4.8)$$

$$F_c = Ah\rho R_c \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 \quad (4.9)$$

ou "n" est la vitesse de rotation du cylindre [tr/mn] et R_c est le rayon du cylindre tournant. Le facteur de fixation "f" est défini comme rapport entre la force image électrique F_i et la force centrifuge F_c .

$$f = \frac{F_i}{F_c} = \frac{q_s^2}{16\pi\epsilon_0 R_c \rho \left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2} \frac{A}{h^3} \quad (4.10)$$

Le mélange granulaire est approprié à la séparation électrostatique selon le coefficient de forme des particules si le rapport des facteurs de fixation pour les deux composants est plus grand que 2 [6].

$$\frac{f_1}{f_2} = \left(\frac{q_{s1}}{q_{s2}}\right)^2 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^3 \quad (4.11)$$

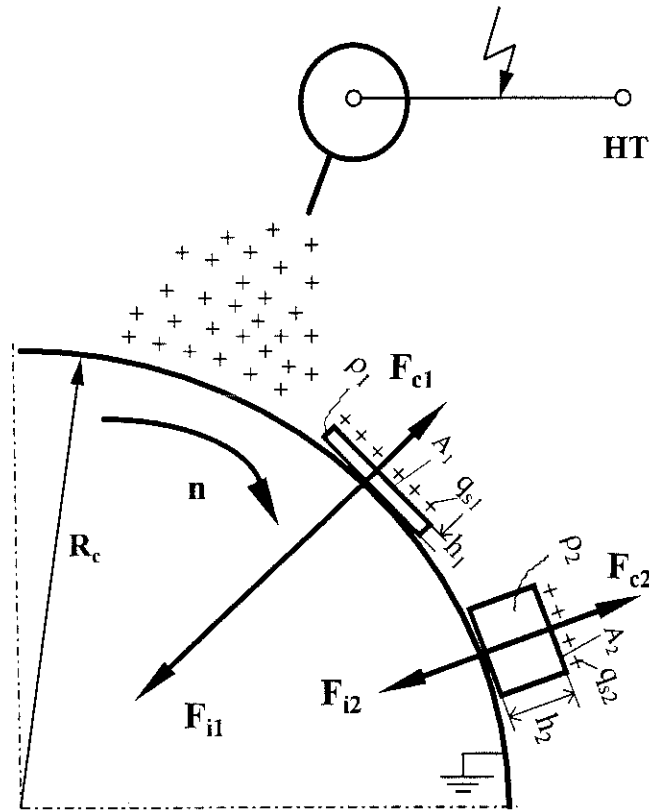


Fig. 4.30. Forces image électrique F_i et centrifuge F_c qui agissent sur les particules aplaties (paillettes de mica) et isométriques (feldspath et quartz).

En accord avec les hypothèses (3) et (5), $\rho_1 = \rho_2 = \rho$, $q_{s1} = q_{s2} = q$ et le rapport $\frac{f_1}{f_2}$ ne dépend que des caractéristiques géométriques des particules. Si on suppose que la surface exposée au flux d'ions est la même pour toutes les particules ($A_1 = A_2$), il en résulte:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{1}{\left(\frac{h_1}{h_2}\right)^3} \quad (4.12)$$

Par exemple, si $\frac{h_1}{h_2} = \frac{1}{3}$ on obtient $\frac{f_1}{f_2} = 27$, c'est-à-dire, le facteur de fixation de la paillette de mica est $f_1 = 27$ quand la particule isométrique de feldspath ou quartz se détache du cylindre ($F_{i2} = F_{c2}$, $f_2 = 1$).

La forte fixation des particules aplaties par rapport aux particules isométriques fait maintenir les particules de mica sur la surface du cylindre jusqu'à la brosse tandis que les particules de quartz et feldspath se détachent rapidement, après la zone de champ ionisé. L'étude au microscope de la forme des particules de mica et feldspath-quartz montre que l'hypothèse que les deux types des particules ont le même volume est plus exacte, donc $A_1 h_1 = A_2 h_2$. Dans ce cas, le rapport des facteurs de fixation est:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{\frac{A_1 h_1}{h_1^4}}{\frac{A_2 h_2}{h_2^4}} = \frac{1}{\left(\frac{h_1}{h_2}\right)^4} \quad (4.13)$$

Si on suppose, comme ci-dessus que $\frac{h_1}{h_2} = \frac{1}{3}$ il en résulte que $\frac{f_1}{f_2} = 81$, c'est-à-dire, le facteur de fixation de mica est 81 fois plus grand que celui de feldspath ou quartz. Les particules aplaties de mica adhèrent mieux à la surface du cylindre que les autres.

Méthode II

Dans but d'empêcher le processus de décharge des particules en raison du contact avec l'électrode reliée à la terre, cette méthode propose d'utiliser une électrode cylindrique reliée à la terre et revêtue d'un isolant (Fig. 4.31).

Dans ce cas, la force image électrique devient:

$$F_i = \frac{(q_s A)^2}{4\pi\epsilon_0 [2(h + \delta)]^2} \quad (4.14)$$

ou δ est l'épaisseur de l'isolant. Le facteur de fixation dépend aussi de δ :

$$f = \frac{F_i}{F_c} = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 R_c \rho \left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2} \frac{A}{h(h + \delta)^2} \quad (4.15)$$

Si on fait les mêmes suppositions que dans la Méthode I ($\rho_1 = \rho_2 = \rho$, $q_{s1} = q_{s2} = q_s$), le rapport des facteurs de fixation devient:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \left(\frac{h_2 + \delta}{h_1 + \delta} \right)^2 \quad (4.16)$$

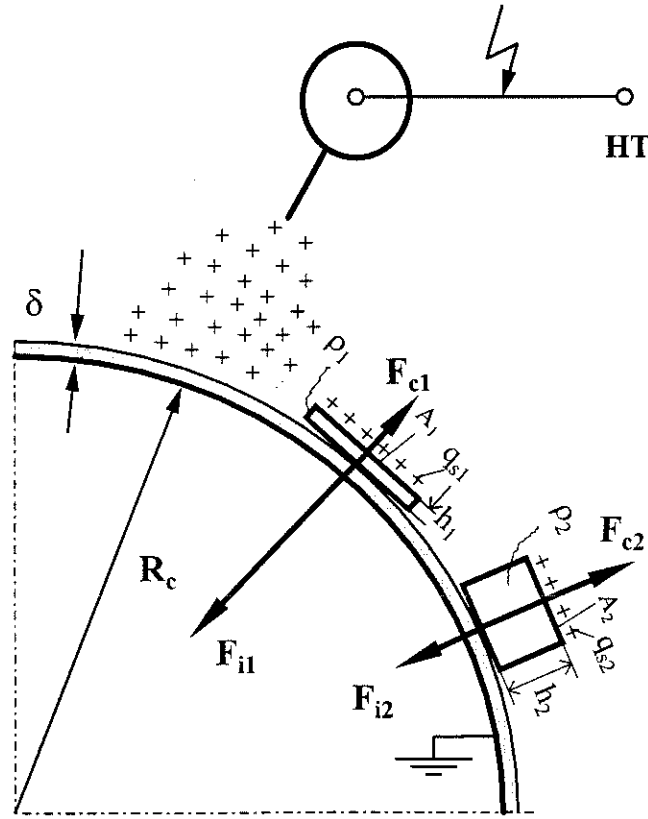


Fig. 4.31. Forces image électrique F_i et centrifuge F_c agissant sur les particules aplaties de mica et isométriques de feldspath et quartz dans le cas de l'électrode cylindrique reliée à la terre et revêtue d'un isolant.

Comme dans la Méthode I, on peut étudier les deux cas: $A_1 = A_2$ et $A_1 h_1 = A_2 h_2$. Dans la première hypothèse ($A_1 = A_2$) on obtient:

$$\frac{f_1}{f_2} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \left(\frac{h_2 + \delta}{h_1 + \delta} \right)^2 \quad (4.17)$$

Si $\frac{h_1}{h_2} = \frac{1}{3}$ et $\delta = h_2$ le facteur de fixation des particules aplaties est 27/4 fois plus grand que celui des particules isométriques.

Dans l'autre hypothèse ($A_1 h_1 = A_2 h_2$) on obtient:

$$\frac{f_1}{f_2} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^2 \left(\frac{h_2 + \delta}{h_1 + \delta}\right)^2 \quad (4.18)$$

Avec les mêmes valeurs du rapport $\frac{h_1}{h_2}$ et de δ ($\frac{h_1}{h_2} = \frac{1}{3}$ et $\delta = h_2$) on obtient $\frac{f_1}{f_2} = \frac{81}{4}$.

A cause du revêtement isolant, le facteur de fixation est diminué par rapport au cas de la Méthode I. L'efficacité de l'une ou l'autre des méthodes dépend des caractéristiques réelles des particules. La Méthode II a l'avantage que les particules ne sont pas en contact direct avec l'électrode reliée à la terre et la charge acquise en champ ionisé ne diminue pas, même si la particule n'est pas parfaitement isolante, comme nous l'avons supposé.

4.3.2. Trajectoires de séparation mica-feldspath-quartz en champ ionisé

Les expériences de séparation électrostatique ont porté sur un mélange granulaire mica-feldspath-quartz, préparé par l'Institut de Recherche et Développement des Mines de Cluj-Napoca. Le produit de mica adéquat pour la séparation électrostatique a été obtenu par opérations de granulation, tri volumétrique humide et séparation magnétique du matériau granulaire provenant de processus de préparation du feldspath.

L'échantillon soumis au processus de séparation est un produit de mica, classe granulométrique (0,1...0,2) mm (Tableau 4.9) qui contient 71,7 % mica, 5,4 % quartz, 14,4 % feldspath de sodium et 8,5 % feldspath de potassium.

Tableau 4.9. Composition chimique du produit de mica, classe granulométrique (0,1...0,2) mm. Le mica pur, $H_2KAl_3(SiO_4)_3$, contient 45,26 % SiO_2 , 38,41 % Al_2O_3 , 11,83 % K_2O et 4,5 % H_2O .

CLASSE	COMPOSITION CHIMIQUE [%]					
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	PC
(0,1...0,2) mm	50,31	30,97	2,20	9,75	1,30	4,45

Les expériences de séparation électrostatique selon le coefficient de forme ont été effectuées sur l'électroséparateur de laboratoire ELSEP [12] équipé d'une électrode de type matrice de pointes ionisantes (117 aiguilles) qui assure une extension angulaire du champ ionisé $\Delta\alpha = 50^\circ$ [37]. On a utilisé une électrode cylindrique tournante de rayon $R_c = 100$ mm et la vitesse de rotation $n = 300$ tr/mn. L'électrode ionisante est portée à une tension positive de 15 kV (Fig. 4.32).

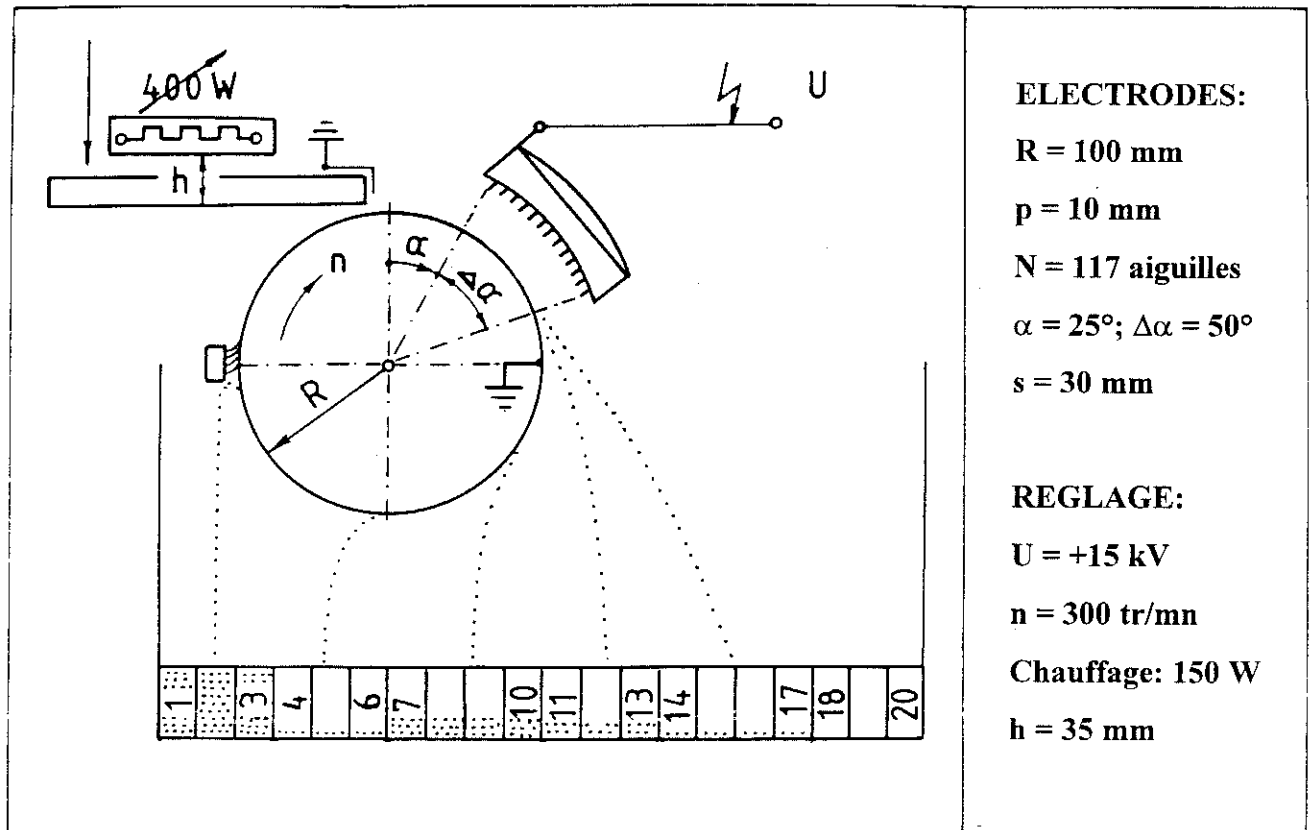


Fig. 4.32. Configuration des électrodes du séparateur de laboratoire ELSEP et régime de fonctionnement pour la séparation électrostatique selon le coefficient de forme du matériau granulaire mica-feldspath-quartz, classe granulométrique (0,1...0,2) mm.

Le matériau obtenu dans les 20 boîtes du collecteur a été partagé en 4 produits, en fonction du contenu. L'analyse chimique (Tableau 4.10a) montre la diminution du contenu de SiO_2 de 50,31 % à 49,51 % et l'augmentation du contenu de Al_2O_3 de 30,97 % à 31,95 %, dans le produit I (mica). Ce produit représente 64,8 % du matériau de départ. Dans le produit I la teneur en mica a augmenté de 71,7 % à 77,9 %, tandis que le pourcentage de feldspath a diminué de 22,9 % à 15,5 % (Tableau 4.10b).

Bien que la classe granulométrique (0,1...0,2) mm soit difficile à séparer en utilisant le séparateur électrostatique à cylindre tournant, les résultats obtenus après la première opération de séparation sont satisfaisants. Comme dans la plupart des cas pratiques, plusieurs opérations successives de séparation sont nécessaires afin d'obtenir des produits de haute pureté.

Tableau 4.10. Analyse chimique (a) et minéralogique (b) des produits obtenus par séparation électrostatique du matériau granulaire mica-feldspath-quartz classe granulométrique (0,1...0,2) mm). Le séparateur ELSEP a été équipé d'une électrode qui génère une zone étendue de champ ionisé.

a).

PRODUIT	BOITES	QUANTITE [%]	COMPOSITION CHIMIQUE [%]				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O
I	1...3	64,8	49,51	31,95	2,55	8,40	1,00
II	4...6	5,7	53,04	28,59	3,05	8,50	0,90
III	7...10	25,8	56,60	25,45	2,60	6,80	2,00
IV	11...15	3,7	66,77	19,26	1,75	4,80	2,20

b).

PRODUIT	BOITES	MICA [%]	FELDSPATH [%]		QUARTZ
			POTASSIUM	SODIUM	
I	1...3	77,9	3,6	11,9	6,6
II	4...6	65,9	11,3	11,7	11,1
III	7...10	54,2	8,2	21,7	15,9
IV	11...15	38,1	5,9	22,3	33,7

4.3.3. Influence du revêtement isolant de l'électrode cylindrique

La Méthode II de séparation électrostatique selon le coefficient de forme des particules a été utilisée dans un premier groupe d'expériences pour obtenir des produits de haute pureté de mica à partir d'un matériau granulaire mica-feldspath-quartz, classes granulométriques (0,315...1) mm et (1...3) mm. Le séparateur de laboratoire ELSEP, a été équipé d'un cylindre en verre (épaisseur $\delta = 1$ mm), plaqué à l'intérieur d'une feuille d'aluminium reliée à la terre (Fig. 4.33). Le séchage du matériau avant le tri électrostatique n'est plus nécessaire.

Le revêtement isolant d'épaisseur δ diminue la force image électrique sur les particules (relation 4.15). Par conséquent, une partie des paillettes de mica se détache du cylindre avant la brosse mais la plupart des granules isométriques de feldspath et quartz se détachent du cylindre dès que ceux-ci quittent la zone de champ ionisé.

La Méthode I, avec le séparateur équipé d'une électrode cylindrique métallique, a été aussi utilisée pour la séparation électrostatique du mélange granulaire mica-feldspath-quartz classes granulométriques (0,315...1) mm et (1...3) mm et les résultats sont comparés dans le Tableau 4.11. Les quantités de matériau dans le produit de mica obtenu par séparation électrostatique en configuration du séparateur ELSEP équipé d'un cylindre isolant (Fig. 4.33) sont plus grandes que celles obtenues en configuration "classique"- avec l'électrode cylindrique métallique reliée à la terre.

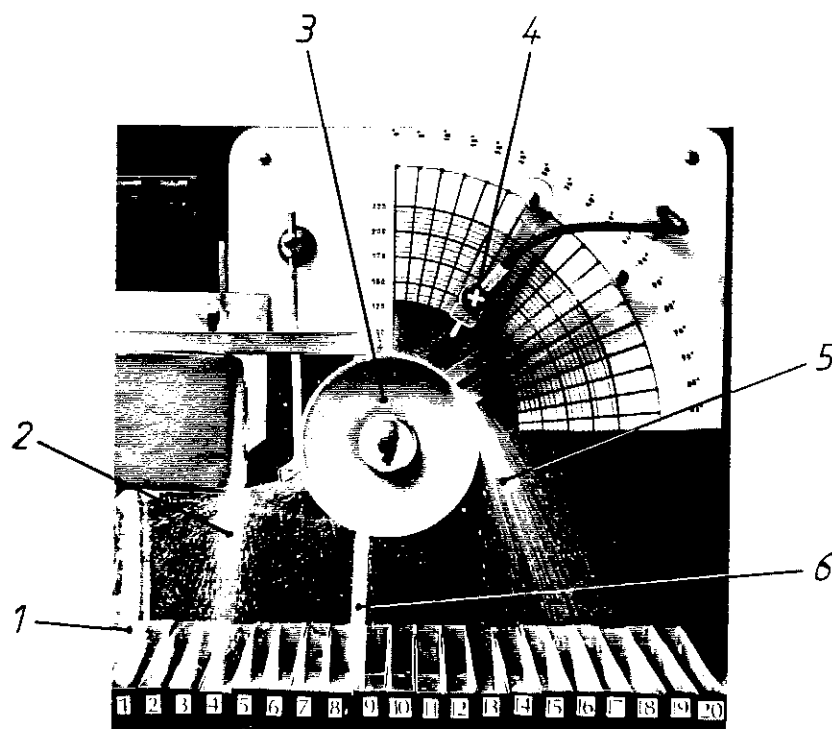


Fig. 4.33. Trajectoires des paillettes de mica et des granules isométriques de feldspath-quartz classe granulométrique (1...3) mm, dans un processus de séparation électrostatique selon le coefficient de forme des particules. 1. - paroi latérale pour limiter les trajectoires du mica; 2. - trajectoires des paillettes de mica; 3. - électrode cylindrique en verre; 4. - électrode ionisante; 5. - trajectoires des granules isométriques de quartz et feldspath; 6. - palette. L'électrode à pointes ionisantes (fils de tungstène $\phi = 0,2$ mm) est portée à une tension positive de 20 kV. La distance entre les pointes ionisantes et l'électrode cylindrique a été fixée à $s = 30$ mm.

Tableau 4.11. Quantités de mica récupéré par la séparation électrostatique du matériau granulaire mica-feldspath-quartz, classes granulométriques (0,315...1) mm et (1...3) mm, en utilisant la Méthode I (électrode cylindrique métallique) et la Méthode II (électrode cylindrique en verre).

ECHANTILLON	METHODE	QUANTITE [g]		
		Mica	Feldspath-Quartz	Mixte
+1 mm	I	300	240	32
	II	322	220	31
(0,315...1) mm	I	217	341	14
	II	256	263	42

Des produits de bonne pureté ont été obtenus pour les paillettes de mica (Fig. 4.34a) aussi bien que pour le feldspath-quartz (Fig. 4.34b).

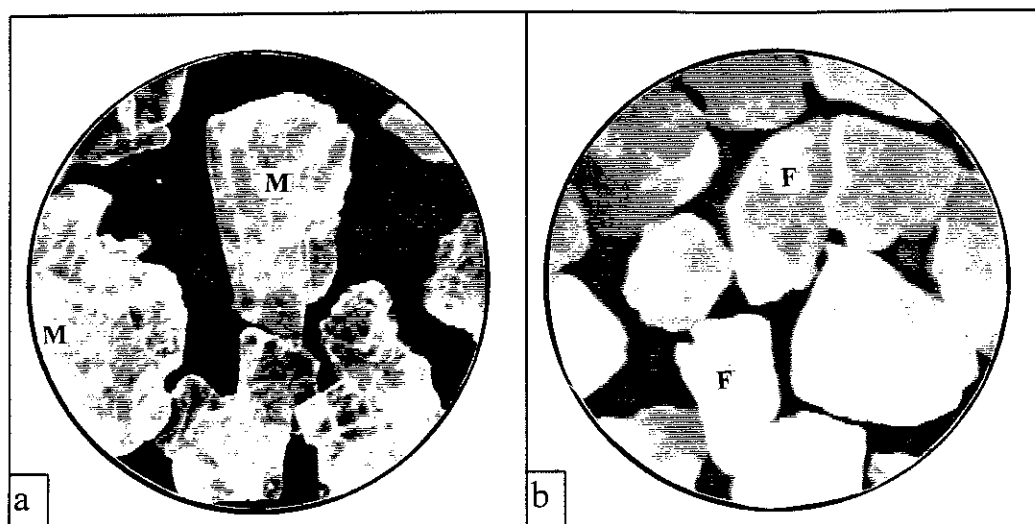


Fig. 4.34. Produits de grande pureté de mica (a) et de feldspath-quartz (b), obtenus par séparation électrostatique selon le coefficient de forme des particules.

Le matériau granulaire mica-feldspath-quartz classe granulométrique (0,1...0,2) mm a été soumis au processus de séparation électrostatique selon le coefficient de forme, en utilisant le séparateur ELSEP équipé d'une électrode cylindrique métallique revêtue d'un isolant (fibres de verre) (Fig. 4.35).

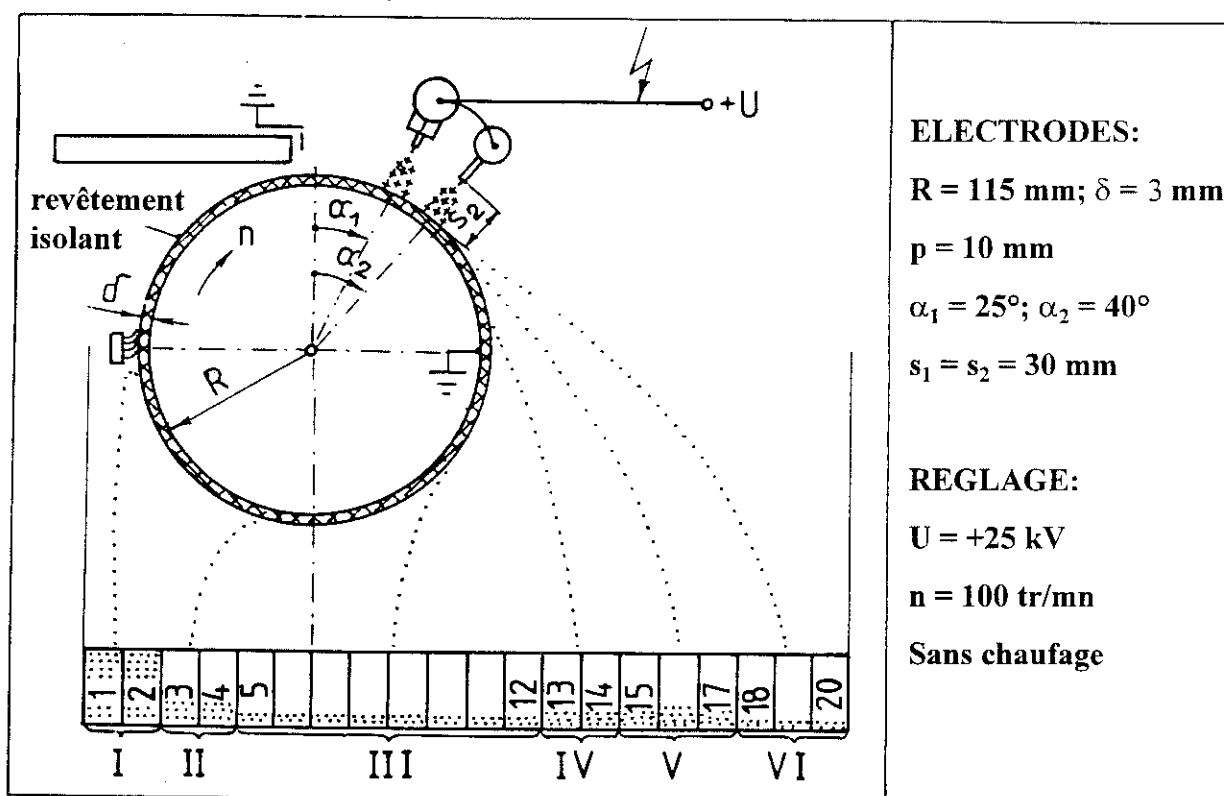


Fig. 4.35. Configuration des électrodes et régime de fonctionnement du séparateur ELSEP pour la séparation électrostatique selon le coefficient de forme des particules du matériau granulaire mica-feldspath-quartz, classe granulométrique (0,1...0,2) mm. L'électrode cylindrique métallique ($\phi = 230 \text{ mm}$) reliée à la terre est revêtue d'un isolant (fibres de verre, $\delta = 3 \text{ mm}$).

Les deux électrodes à pointes ionisantes sont portées à une tension positive de 25 kV pour générer la zone de champ ionisé, l'intervalle entre les pointes ionisantes et la surface isolante de l'électrode cylindrique étant $s = 30$ mm. La vitesse de rotation du cylindre a été maintenue constante : $n = 100$ tr/mn.

Le matériau obtenu dans les 20 boîtes du collecteur a été partagé en 6 produits dont l'analyse chimique et minéralogique est présentée dans le Tableau 4.12.

Tableau 4.12. Analyse chimique (a) et minéralogique (b) des produits de l'expérience de séparation électrostatique du matériau granulaire mica-feldspath-quartz classe granulométrique (0,1...0,2) mm). Le séparateur ELSEP a été équipé d'une électrode cylindrique tournante métallique, revêtue d'un isolant (fibres de verre).

a).

PRODUIT	BOÎTES	QUANTITE [%]	COMPOSITION CHIMIQUE [%]				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O
I	1...2	38,8	47,93	32,29	2,80	9,80	0,80
II	3...4	12,3	48,74	32,00	2,80	9,70	1,20
III	5...12	18,1	51,55	30,12	2,80	8,80	0,80
IV	13...14	4,6	53,00	29,16	2,70	8,60	2,60
V	15...17	17,2	54,43	28,39	2,65	8,40	2,00
VI	18...20	9,0	60,70	24,18	2,20	6,80	1,20

b).

PRODUIT	BOÎTES	MICA [%]	FELDSPATH [%]		QUARTZ
			POTASSIUM	SODIUM	
I	1...2	75,0	13,6	10,5	0,9
II	3...4	72,1	14,7	13,1	0,1
III	5...12	70,9	10,1	10,3	8,7
IV	13...14	57,0	17,1	24,0	1,9
V	15...17	58,7	15,0	19,0	7,3
VI	18...20	54,5	8,0	13,1	24,4

Les produits des boîtes (1...4) représentent 51,1 % du matériau de départ, avec un contenu de mica de (72...75)%. L'augmentation du contenu de mica est mise en évidence par la diminution du SiO₂ de 50,31 % à (47,93...48,74) % et l'accroissement du Al₂O₃ de 30,97 % à plus de 32 %. Le quartz est concentré dans les boîtes 18...20 qui représente 9 % du matériau à trier. Ce produit contient plus de 60 % SiO₂ et plus de 24 % Al₂O₃.

La quantité de mica récupéré après la première opération de séparation dépasse 50 % du matériau de départ et le contenu de SiO₂ et Al₂O₃ montre une pureté élevée. Sans doute, des opérations successives de séparation sont nécessaires pour augmenter la pureté des produits et le taux de récupération.

Conclusions du chapitre 4

1. Le nouveau type d'électrode à pointes ionisantes développé à l'Université Technique de Cluj-Napoca assure une zone étendue de champ ionisé et les meilleures conditions pour charger les matériaux granulaires à séparer. Les résultats obtenus pour un matériau granulaire provenant des déchets industriels de laiton sont encourageants.
2. Le recyclage du laiton des déchets industriels peut être réalisé en utilisant un schéma technologique ayant la séparation électrostatique comme opération finale. La classe granulométrique (0,08...1) mm est la plus appropriée pour le tri électrostatique en utilisant des installations à électrode cylindrique tournante.
3. L'étude des trajectoires des particules dans une installation industrielle de séparation électrostatique a mis en évidence la multitude des facteurs électriques, mécaniques, de matériau et d'environnement qui influencent l'efficacité d'un procédé de récupération des matériaux métalliques et isolants de déchets industriels. Une partie de ces facteurs sont imposés par les caractéristiques constructives de l'installation et sont fixés avant d'effectuer la séparation. D'autres facteurs peuvent être modifiés pendant le fonctionnement du séparateur. Pour chaque type de matériau granulaire, des expériences de laboratoire sont nécessaires afin de fixer les paramètres du régime de fonctionnement qui assurent les meilleurs résultats.
4. L'humidité superficielle du matériau, qui modifie les conditions de charge des granules isolants, fait diminuer les performances du processus de séparation. Expérimentalement, la limite acceptable de l'humidité superficielle des mélanges granulaires métal-isolant a été établie à $W = 0,3 \%$. Une humidité au-dessous de cette limite maintient la pureté des produits et le taux de récupération à des valeurs élevées.
5. Le schéma de récupération du métal et de l'isolant de déchets granulaires de câbles électriques doit contenir plusieurs séparations successives pour le produit "conducteur" et "non-conducteur", afin d'augmenter la pureté du métal au-dessus de 99 % et d'obtenir un produit isolant de pureté pratiquement 100 %. Un tel produit pourrait être réutilisé dans l'industrie électrotechnique, dans l'isolation des câbles électriques.
6. La charge et la trajectoire d'une particule isolante sont fonctions de la forme de celle-ci. Par conséquent, la séparation électrostatique peut être utilisée pour le tri des mélanges granulaires dont les composants ne diffèrent pas par leur conductivité mais par leur forme: aplatie (les paillettes de mica) ou isométrique (les granules de feldspath et quartz). La diminution de la dispersion granulométrique des mélanges granulaires permet d'obtenir des meilleurs résultats.
7. Le procédé de séparation électrostatique selon le coefficient de forme qui utilise le cylindre revêtu d'un isolant a l'avantage de ne pas nécessiter le séchage du matériau granulaire. Les quantités de mica récupérées par cette méthode sont plus grandes qu'en utilisant l'électrode cylindrique métallique.

Conclusion générale - Perspectives



Le processus de charge des particules en champ ionisé est un problème important de physique appliquée dans le domaine des technologies électrostatiques. La charge acquise par les particules détermine, de manière essentielle, leurs trajectoires dans le champ électrique. Dans le cas des séparateurs électrostatiques, une meilleure maîtrise des multiples facteurs qui influencent la charge et les trajectoires des particules permet d'augmenter la pureté des produits et le taux de récupération.

Contributions :

Un apport théorique important de ce travail est la méthode originale de calcul numérique de la charge à saturation des particules isolantes, sphériques et cylindriques, à proximité d'une électrode affectée d'un champ ionisé. La charge croît lorsque l'intervalle entre la particule et l'électrode diminue. L'effet est plus fort pour les particules de permittivité élevée.

Le calcul de la dynamique de charge d'une particule sphérique isolante en champ ionisé a été effectué numériquement, en utilisant un programme écrit en Turbo Pascal. L'étude a mis en évidence l'influence de la forme de l'onde haute tension et de la densité de charge d'espace sur la valeur de la charge acquise par une particule, traversant une zone de champ ionisé. L'analyse numérique du champ électrique effectuée avec le logiciel "Charge Simulation Program" a permis de clarifier l'influence de la configuration géométrique des électrodes ionisantes sur leurs caractéristiques $I(U)$. Le même logiciel a été utilisé pour l'évaluation du champ de décollement et des forces agissant sur des particules conductrices de formes variées, en champ harmonique.

Un premier apport expérimental de ce travail est la caractérisation des différentes électrodes ionisantes selon la distribution de la densité de courant sur la surface de l'électrode collectrice. Cette étude a conduit à la proposition d'un nouveau modèle d'électrode à pointes ionisantes, qui a été testé sur les séparateurs électrostatiques de laboratoire.

La mesure de la charge acquise par les particules isolantes en champ ionisé a été effectuée avec un dispositif expérimental original, qui modélise les conditions de fonctionnement des séparateurs électrostatiques industriels. Ces expériences ont validé les prédictions théoriques et ont facilité l'évaluation des facteurs qui influencent l'efficacité de diverses technologies de séparation électrostatique des matériaux granulaires.

D'autres études expérimentales ont été centrées sur le comportement des particules conductrices, notamment de forme allongée (cylindrique), en champ harmonique et en champ ionisé. Les résultats obtenus apportent des éléments d'interprétation vis à vis des observations faites sur les trajectoires des particules dans les séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante.

Les applications technologiques présentées ont montré l'intérêt de la méthode basée sur des expériences de laboratoire, pour établir la configuration des électrodes et les paramètres du régime de fonctionnement d'un séparateur électrostatique. Un nouveau type d'électrode à pointes ionisantes, qui assure une zone étendue de champ ionisé et des meilleures conditions de charge des particules, a été proposée pour certaines sortes de matériaux granulaires plus difficiles à séparer : laiton de déchets industriels, mica de pegmatites feldspathiques.

L'influence de l'humidité superficielle du matériau granulaire sur les résultats du processus de séparation électrostatique a été mise en évidence par une étude expérimentale systématique. La limite de l'humidité superficielle, qui permet de maintenir la pureté des produits et le taux de récupération dans des limites acceptables, a été déterminée pour les mélanges granulaires provenant de déchets de câbles électriques.

Perspectives :

Les études présentées dans ce mémoire indiquent au moins trois directions de recherche qui méritent d'être continuées :

Modélisation numérique :

- utilisation de logiciels 3D pour l'analyse numérique du champ électrique;
- développement d'un logiciel pour le calcul du champ électrique en présence de la charge d'espace;
- élaboration d'un modèle numérique global de calcul des processus de charge et des trajectoires des particules dans les installations de séparation électrostatique.

Etudes expérimentales :

- mesure de la charge acquise par des ensembles de particules isolantes ou conductrices, dans les conditions spécifiques aux installations industrielles de séparation électrostatique;
- mise au point des techniques de visualisation et d'analyse des trajectoires des particules dans les séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante.

Applications :

- développement de procédés électrostatiques nouveaux ou améliorés pour la séparation des certains mélanges de matériaux granulaires.

Ces investigations pourraient contribuer, dans un premier temps, à une meilleure compréhension des phénomènes physiques dans les séparateurs électrostatiques et, dans un deuxième temps, à l'élargissement du domaine d'applications industrielles des champs électriques intenses.

Annexes

Annexes

- Annexe 1 : Distribution de la densité de courant sur la surface de l'électrode collectrice face à une électrode à trois lignes de pointes ionisantes décalées d'un demi-pas.....153
- Annexe 2 : Calcul numérique de la force électrique résultante qui s'exerce sur une particule conductrice cylindrique posée verticalement sur l'électrode.....156
- Annexe 3 : Evaluation expérimentale de la constante de temps du processus de décharge d'une particule isolante en contact avec l'électrode cylindrique tournante reliée à la terre.....158

Annexe 1

Distribution de la densité de courant sur la surface de l'électrode collectrice face à une électrode à trois lignes de pointes ionisantes décalées d'un demi-pas

Le schéma de mesure de la distribution de la densité de courant pour une électrode à trois lignes de pointes ionisantes est présenté par la figure A 1.1. Les pointes ionisantes sont des tubes métalliques, fixés dans des pièces isolantes de polyéthylène. La distance entre les pointes est $p = 15$ mm. La distance entre l'électrode ionisante et l'électrode plane, aussi bien que la polarité et l'amplitude de la haute tension ont été maintenues aux mêmes valeurs ($s = 30$ mm, $U = 21$ kV, polarité négative) que pour les autres expériences de mesure de la densité de courant (sous-chapitre 2.1). Dans ces conditions, le courant total vaut $I = 190$ μ A.

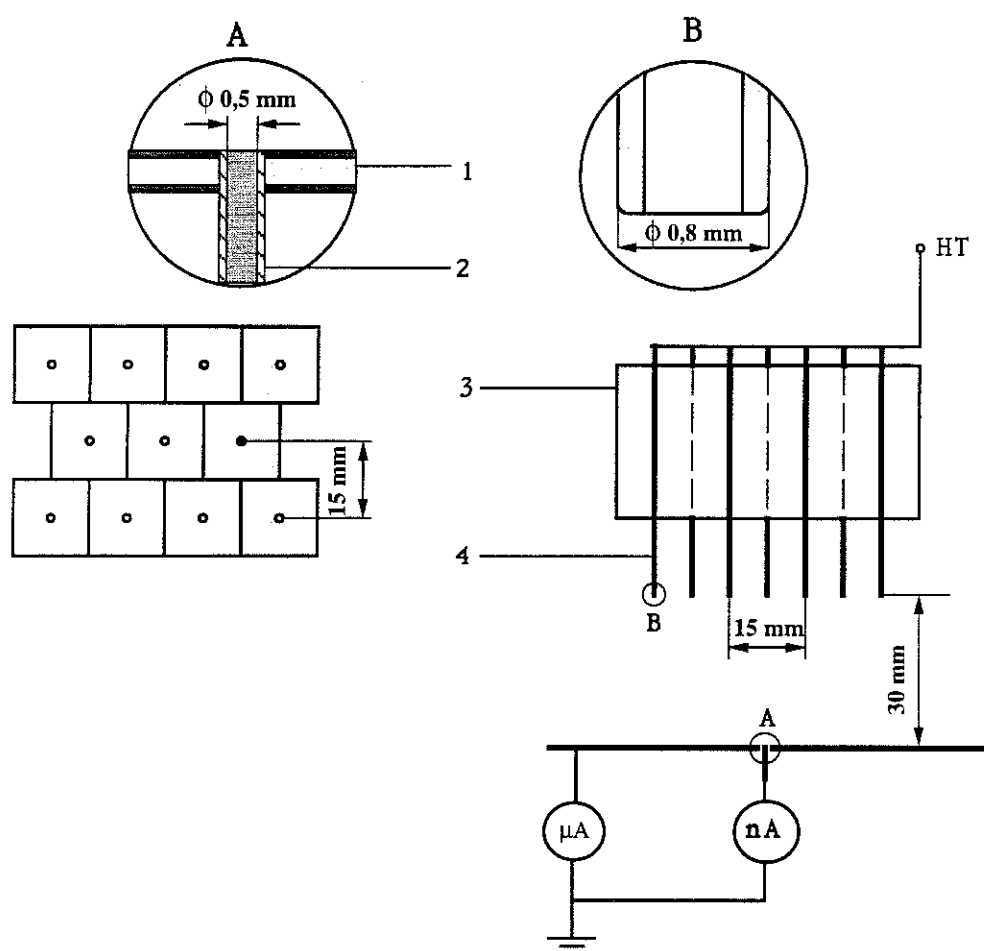


Fig. A 1.1 Schéma de mesure de la distribution de la densité de courant pour l'électrode à trois ligne de pointes ionisantes. 1) - électrode plane reliée à la terre (plaque de circuit imprimé à double couche); 2) - sonde de mesure du courant (fil de cuivre émaillé, de diamètre 0,5 mm); 3) - support isolant en polyéthylène; 4) - pointe ionisante tubulaire (diamètre extérieur 0,8 mm et diamètre intérieur 0,5 mm)

Les résultats des mesures montrent des zones de courant nul, placées à demi-distance entre les lignes des pointes ionisantes (Fig. A 1.2). La distribution de la densité de courant montre l'influence de la position des pointes ionisantes sur la forme et la grandeur de ces zones (Fig. A 1.3)

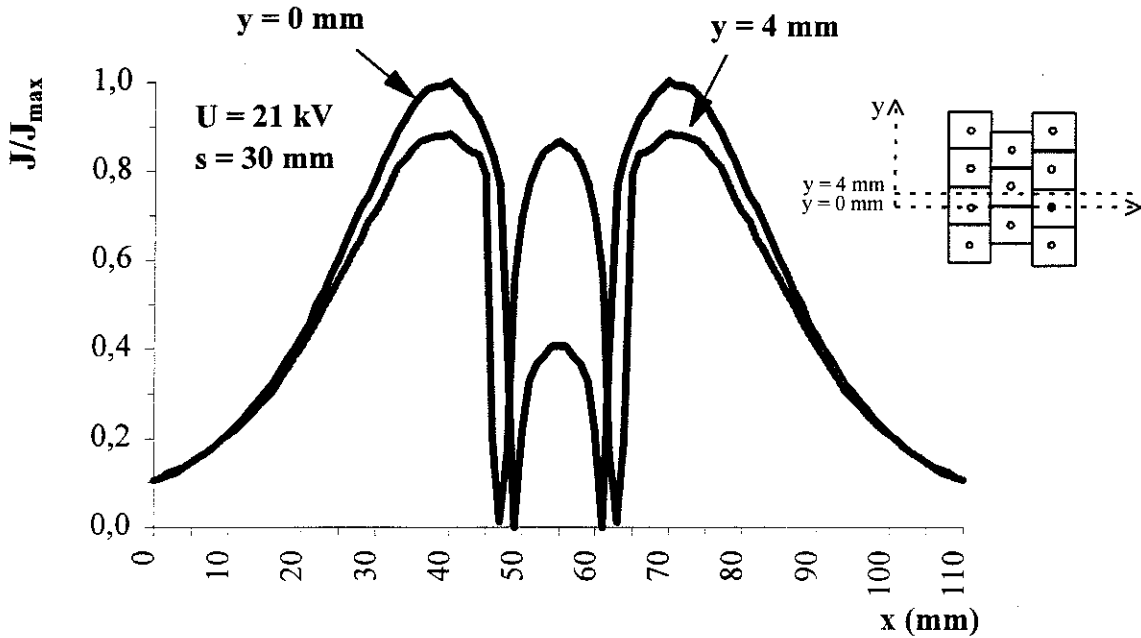


Fig. A 1.2. Distribution de la densité de courant généré par l'électrode à trois lignes de pointes ionisante décalées d'un demi-pas, sur l'axe "x" et sur une parallèle à celle-ci, dans le plan d'une électrode collectrice.

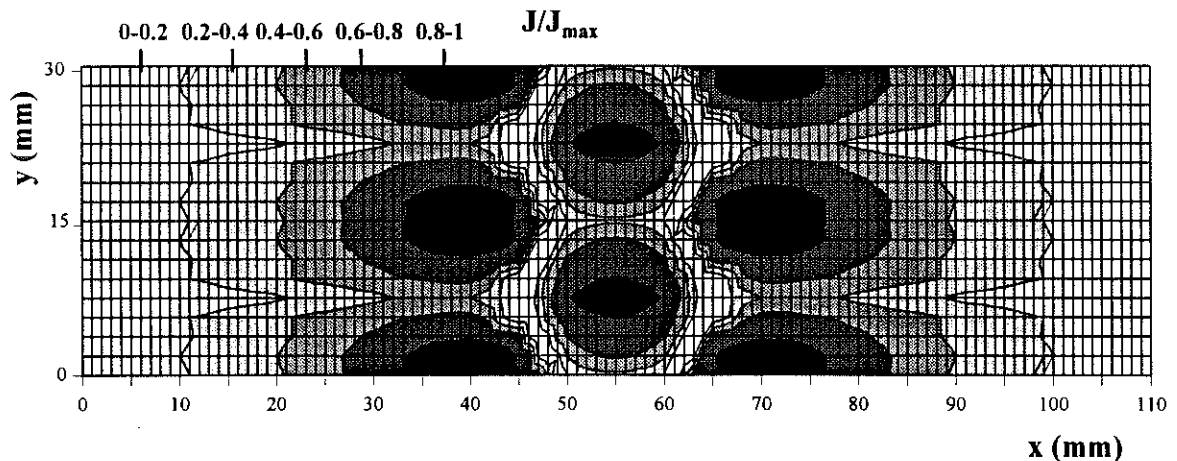


Fig. A 1.3. Distribution de la densité de courant dans le plan de l'électrode collectrice, face à une électrode à trois lignes de pointes ionisantes décalées d'un demi-pas.

Pour le processus de séparation électrostatique, les valeurs moyennes et maximales de la densité de courant selon la direction du mouvement des particules (Fig. A 1.4) sont ceux qui influencent la valeur de la charge acquise par les particules.

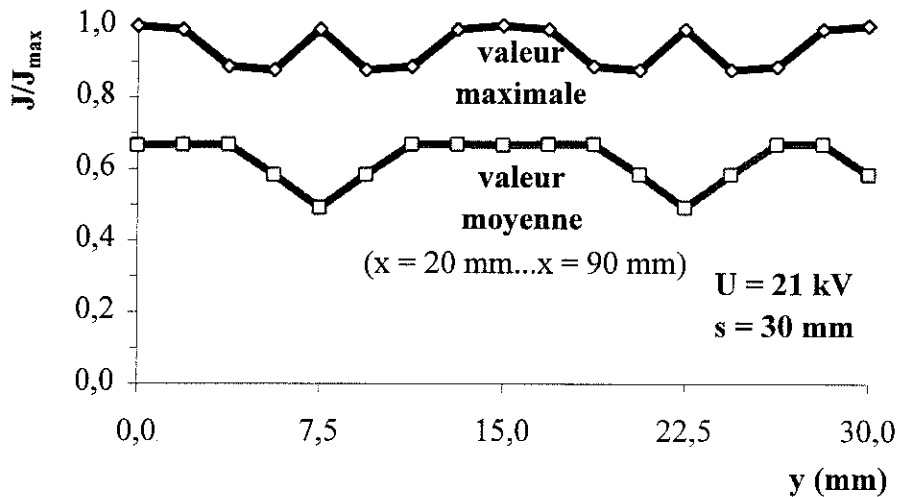


Fig. A 1.4. Distribution des valeurs maximales et moyennes de la densité de courant, calculées selon la direction du mouvement des particules (axe "x"), pour une électrode ionisante à trois lignes de pointes ionisantes.

Dans le cas de cette électrode le coefficient de non-uniformité de la distribution de courant est $K_{\text{nu}} = J_{\text{m.max}}/J_{\text{m.min}} = 1,35$.

Annexe 2

Calcul numérique de la force électrique résultante qui s'exerce sur une particule conductrice cylindrique posée verticalement sur l'électrode, en champ uniforme

La formule (3.12) permet le calcul analytique de la force F_{el} qui s'exerce sur une particule conductrice de forme cylindrique posée verticalement sur l'électrode, en champ harmonique. Le résultat est approximatif parce que le cylindre est assimilé à un demi-ellipsoïde de révolution. Le calcul numérique, en utilisant le logiciel CSP, correspond mieux à l'expérience (Fig. A 2.1).

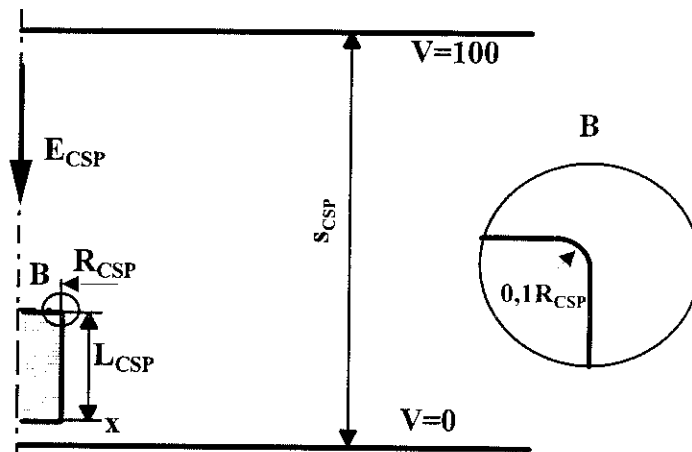


Fig. A 2.1. Configuration géométrique avec symétrie de révolution pour le calcul numérique de la force qui agit sur une particule conductrice cylindrique posée verticalement sur l'électrode, en champ harmonique.

La force F_{CSP} calculée par le logiciel a été utilisée dans la relation:

$$F_{el} = \left(K_{CSP}\right)^2 \left(\frac{E}{E_{CSP}}\right)^2 F_{CSP} \quad (A 2.1)$$

(K_{CSP} est le facteur d'échelle: $K_{CSP} = \frac{s}{s_{CSP}} = \frac{R}{R_{CSP}} = \frac{L}{L_{CSP}}$), pour le calcul de la force F_{el}

qui s'exerce sur une particule conductrice cylindrique de rayon $R = 0,25$ mm, de longueur L , en champ harmonique d'intensité $E = 10^6$ V/m (Tableau A 2.1).

Le rapport entre la valeur numérique et analytique de la force F_{el} diminue quand le rapport L/R croît donc, la relation analytique (3.12) convient mieux pour les particules allongées.

Après le détachement de la particule de l'électrode, l'évolution de la force électrique résultante dépend du rapport L/R (Tableau A 2.2).

Tableau A.2.1. Force qui s'exerce sur une particule conductrice cylindrique ($R = 0,25$ mm, longueur L) en contact avec l'électrode, dans un champ électrique uniforme d'intensité $E = 10^6$ V/m.

L/R	10	20	30	40
F^{an} ($\times 10^{-6}$ N)	78,7	240	473	774,4
F^{num} ($\times 10^{-6}$ N)	106,0	306,1	600,7	978,1
F^{num}/F^{an}	1,34	1,28	1,27	1,26

Tableau A 2.2. Force qui s'exerce sur la particule conductrice cylindrique (rayon $R = 0,25$ mm, longueur L) posée verticalement sur l'électrode et chargée par contact, après le décollement, en fonction de la distance "x" entre la particule et l'électrode (F^* est la force qui agit sur la particule en contact avec l'électrode).

x/R		0,01	0,1	1	2	5
F_{el}/F^*	L/R = 10	1,000	1,005	1,028	1,044	1,069
	L/R = 30	1,000	1,001	1,013	1,023	1,038

Annexe 3

Evaluation expérimentale de la constante de temps du processus de décharge d'une particule isolante, en contact avec l'électrode cylindrique tournante reliée à la terre

La charge Q acquise par une particule isolante dans la zone de champ ionisé d'un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante décroît dès que la particule quitte la zone de champ ionisé, en raison du contact entre la particule et l'électrode reliée à la terre. Le processus de décharge peut être étudié expérimentalement grâce au dispositif présenté sur la Fig. 2.17 qui est équipé d'un fil d'acier pour le détachement mécanique de la particule en deux positions fixes (Fig. A 3.1). Des particules en PVC, en forme de disque ($R = 1,5 \text{ mm}$, $L = 1 \text{ mm}$) ont été utilisées. L'électrode ionisante est portée au potentiel positif $U = 16,5 \text{ kV}$.

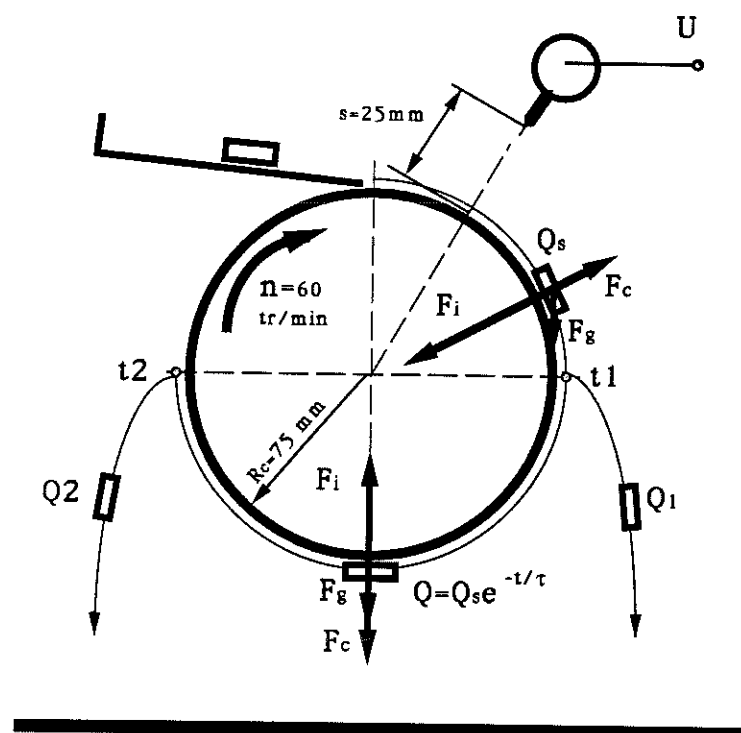


Fig. A 3.1. Schéma de principe pour l'évaluation expérimentale de la constante de temps du processus de décharge d'une particule isolante en contact avec l'électrode cylindrique tournante reliée à la terre.

La première série d'expériences a porté sur la mesure de la charge des particules sortant de la zone de champ ionisé, en détachant la particule au moment " t_1 ". La valeur moyenne de dix mesures a été $Q(t_1) = 268$ pC. Dans la deuxième série d'expériences la particule se détache au moment t_2 et la valeur moyenne mesurée pour la charge a été $Q(t_2) = 252$ pC. En supposant que la loi de diminution de la charge est:

$$Q(t) = Q \exp(-t/\tau_d)$$

on obtient:
$$\tau_d = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{Q(t_1)}{Q(t_2)}} = 8,12s.$$

Les mesures ont été reprises pour une autre tension: $U = 18$ kV, polarité positive. Les valeurs moyennes des mesures de la charge aux instants t_1 et t_2 ont été respectivement $Q(t_1) = 273$ pC et $Q(t_2) = 257$ pC. La deuxième valeur calculée pour la constante de temps est $\tau_d = 8,27$ s.

Liste des symboles

- A** : Surface d'une particule soumise au flux d'ions
- A_{sonde}** : Surface de la sonde de mesure
- a; b** : Axes de la méridienne d'une particule ellipsoïdale (2a - longueur du grand axe; b - rayon de révolution)
- C** : produit conducteur (particules conductrices)
- CSP** : "Charge Simulation Program" - logiciel pour l'analyse numérique du champ électrique
- D** : débit de matériau
- d** : largeur d'une électrode plane
- E** : intensité du champ électrique
- E_c** : intensité du champ électrique dans le plan des pointes émissives
- E_{cl}** : champ de claquage
- E_d** : champ de décollement
- E_d^c** : champ de décollement d'une particule en champ ionisé
- E_{ext}** : intensité du champ électrique en présence d'une particule non-chargée
- E_m** : valeur maximale de l'intensité du champ électrique variable en fonction de temps
- E_p** : intensité du champ électrique à la surface de l'électrode collectrice
- E_r** : composante radiale de l'intensité du champ électrique
- E_s** : intensité du champ électrique produit par la charge acquise par la particule
- E₀** : champ moyenne entre les électrodes
- f** : facteur de fixation d'une particule sur la surface de l'électrode cylindrique tournante
- F^{*}** : force du champ électrique agissant sur une particule conductrice en contact avec l'électrode
- F** : force du champ électrique agissant sur une particule conductrice après le décollement de la surface de l'électrode
- F_c** : force centrifuge
- F_{el}** : force résultante du champ électrique

-
- F_g : force de pesanteur
- F_i : force image électrique
- F_q : force Coulomb
- g : accélération gravitationnelle
- h : distance entre les pointes émissives de l'électrode ionisante et l'élément électrostatique
- HT : liaison à une source haute tension
- I : intensité du courant
- I_{sonde} : courant mesuré avec une sonde à la surface d'une électrode collectrice
- J : densité de courant
- J_m : valeur moyenne de la densité de courant généré par une électrode ionisante, mesurée vers la direction de mouvement des particules (perpendiculaire sur la ligne des pointes émissives)
- $J_{m \text{ max}}$: Valeur maximale de J_m
- $J_{m \text{ min}}$: valeur minimale de J_m
- k : mobilité des ions
- k_{CSP} : facteur d'échelle utilisée pour le calcul numérique de la force F_{el} avec le logiciel CSP
- k_f : coefficient de forme d'une particule (rapport entre la longueur et la hauteur de la particule)
- k_Q^S : facteur d'échelle utilisée pour le calcul numérique de la charge à saturation d'une particule sphérique
- k_Q^C : facteur d'échelle utilisée pour le calcul numérique de la charge à saturation d'une particule cylindrique
- $k(W)$: coefficient qui exprime la dépendance non-linéaire de la charge d'une particule en champ ionisé en fonction de l'humidité superficielle W
- K_{nu} : coefficient de non-uniformité de la distribution de la densité de courant
- L : longueur d'une particule cylindrique
- L_{cr} : longueur critique d'une particule cylindrique (particule qui produit le claquage lors de décollement)
- m : masse d'une particule
- M : produit mixte (mélange des particules conductrices et isolantes)

-
- n** : vitesse de rotation de l'électrode cylindrique
N : facteur de dépolarisation
NC : produit non-conducteur (particules isolantes)
p : pas d'une électrode multi-pointe (distance entre les pointes ionisantes)
PE : polyéthylène
PVC : polychlorure de vinyle
q : densité de la charge d'espace
q_s : densité de charge superficielle
Q : charge électrique
Q_i : charge acquise par une particule sèche en champ ionisé
Q_m : charge maximale d'une particule conductrice en contact avec une électrode
Q_s : charge à saturation d'une particule en champ ionisé
Q_s^m : valeur de la charge à saturation qui correspond à un champ d'intensité E_m
Q_s^{*} : charge à saturation d'une particule posée sur l'électrode en champ ionisé
Q_s^x : charge à saturation d'une particule située à une distance "x" de l'électrode en champ ionisé
Q_s' : charge de saturation numériquement calculée dans le cas d'une particule située à grande distance des électrodes
r : rayon
R : rayon d'une particule sphérique ou cylindrique
R_c : rayon de l'électrode cylindrique tournante
s : distance entre les électrodes
t : temps
t_{charge} : temps de charge (intervalle de temps que la particule est soumise au flux d'ions)
t_d : temps de décharge (intervalle de temps que la particule reste en contact avec l'électrode reliée à la terre)
u(t) : tension variable en fonction de temps
U : tension d'alimentation d'un système d'électrodes
U_d : tension de décollement
U_{cl} : tension de claquage
U_m : valeur maximale d'une tension variable en fonction de temps

v : vitesse périphérique de l'électrode cylindrique tournante

V : potentiel d'une électrode

w : humidité atmosphérique

W : humidité superficielle des particules

x : coordonnée, distance, intervalle

y : coordonnée

Caractères grecs

α : angle de position des électrodes

$\Delta\alpha$: extension angulaire de l'électrode ionisante

β : angle de décollement

β_3 : angle de position de l'électrode électrostatique

χ : susceptibilité électrique

δ : épaisseur du revêtement isolant de l'électrode cylindrique

ϵ_0 : permittivité du vide

ϵ_r : permittivité relative

ϕ : diamètre

λ : coefficient qui exprime le renforcement du champ électrique à la surface de l'électrode collectrice par rapport au champ moyenne E_0

ρ : masse volumique

σ : conductivité électrique

τ : constante de temps du processus de charge

τ_d : constante de temps du processus de décharge

ω : pulsation de la tension

Indices et exposants

X_{CSP} : grandeur physique utilisée ou calculée avec le logiciel CSP

X^{an} : grandeur physique calculée avec une relation analytique

X^{num} : grandeur physique calculée numériquement

X^{v} : grandeur physique mesurée pour le cas d'une particule cylindrique en position verticale sur l'électrode

X^{h} : grandeur physique mesurée pour le cas d'une particule cylindrique en position horizontale sur l'électrode

$X^{(+)}$: grandeur physique mesurée en champ ionisé, à charge d'espace positive

$X^{(-)}$: grandeur physique mesurée en champ ionisé, à charge d'espace négative

**Références
Bibliographiques**



-
- [1] **O. C. Ralston**, Electrostatic separation of mixed granular materials, Elsevier, Amsterdam, 1961.
- [2] **N. F. Olofinskij**, Electricieskie Metodij Obogascenija, Nedra, Moscva, 1970.
- [3] **J. E. Lowve, W. P. Dyrenforth**, Electrostatic separation, in *Electrostatics and its Applications*, A. D. Moore, Wiley, New-ations, A. D. Moore, Wiley, New-York, 1973, p. 221-249.
- [4] **A. I. Mesenjasin**, Electriciescaja separacija v silnyh poljah, Nedra, Moscva, 1978.
- [5] **I. I. Inculet**, Electrostatic Mineral Separation, Wiley, New-York, 1986.
- [6] **F. S. Knoll, J. B. Taylor**, Advances in Electrostatic separation, in *Minerals and Metallurgical Processing*, 1985, p. 106-114.
- [7] **C. B. Gill**, Materials Beneficiation, Springer, Berlin, 1991.
- [8] *** *Electrostatic Separation*, Bulletin No. 929, Carpco Inc., 1992.
- [9] *** *High Tension and Electrostatic Separators*, Leaflet 880-3M. SP, Eriez Magnetics, Canada, 1980;
- [10] *** *Electrostatic Separation System*, Cat. No. ESS 10923, Mineral Deposits, Australia, 1989.
- [11] *** Elektrosortierung System, Heft 1518/12.84, Lurgi, Germany, 1984.
- [12] **Al. Iuga, L. Dascalescu, R. Morar, I. Csorvasy, V. Neamtu**, Corona electrostatic separators for recovery of waste non-ferrous metals, *J. Electrostatics*, vol. 23, 1989, p. 235-243.
- [13] **L. Dascalescu, Al. Iuga, R. Morar**, Corona electrostatic separation: an efficient technology for recovery of metals and plastics from industrial wastes, *Magnetic and Electrical Separation*, vol. 4, 1993, p. 241-255.
- [14] **J. F. Delon**, Théorie de la séparation électrostatique à l'aide de l'effet corona, *Annales des Mines*, 3 (1966), p. 37-50.
- [15] **T. Meinander**, Zur theorie des Starkfeld-Electroscheidung, *Aufbereitungs Technik*, 3, 1977, p. 127-133.
- [16] **Al. Iuga**, Contributions à l'étude du champ electrique des électroséparateurs, *Thèse de doctorat*, Institute Polytechnique de Iassy, 1984.

-
- [17] **L. D. Dascalescu**, Comportement de granules conducteurs en champ électrique mono-ionisé dans l'air atmosphérique; *Thèse de doctorat*, Université Joseph Fourier, Grenoble, 1994.
- [18] **L. Dascalescu**, An Introduction to Ionised Gases. Theory and Applications, Toyohashi University of Technology Press, Toyohashi (Japan), 1993.
- [19] **L. D. Dascalescu, Al. Iuga, R. Morar**, Modelling of Corona Electrostatic Separation Process, *Materials Science*, 16(1990), p. 273-283.
- [20] **L. Dascalescu, Al. Iuga, R. Morar, V. Neamtu, I. Suarasan, A. Samuila, D. Rafiroiu**, Corona and electrostatic electrodes for high-tension separators, *J. Electrostatics*, vol. 29, 1993, p. 211-255.
- [21] **Al. Iuga, R. Morar, L. Dascalescu, A. Samuila, D. Rafiroiu**, A new type of corona electrode for high-tension separators, *Magnetic and Electrical Separation*, vol. 4, 1993, p. 75-90.
- [22] **Al. Iuga, V. Neamtu, I. Suarasan, R. Morar, L. Dascalescu**, High Voltage Supplies for Corona-Electrostatic Separators, *Conf. Rec. 1995 IEEE/IAS Annual Meeting*, Orlando, p. 1503-1507.
- [23] **L. Dascalescu, R. Morar, Al. Iuga, V. Neamtu, I. Suarasan**, Charge neutralization electrodes for high-tension separators, *Magnetic and Electrical Separation*, vol. 4, 1993, p. 91-108.
- [24] *** *The solution to Separation*, Bulletin 904, Carpco Inc., U.S.A., 1990.
- [25] **Al. Iuga, L. Dascalescu, R. Morar, A. Samuila, I. Cuglesan** Mica flakes beneficiation from pegmatites by electrostatic separation. *Proc. 1993 Int. Workshop on Electrical Insulation*, Nagoya, 1993, p. 437-440,.
- [26] **Al. Iuga, L. Dascalescu, R. Morar, A. Samuila, I. Cuglesan**, Electrostatic shape separation of flake mica from pegmatites, , *Magnetic and Electrical Separation*, vol. 6, 1995, p. 135-149.
- [27] **A. Samuila, L. Dascalescu, A. Mizuno, R. Tobazéon**, Effect of conductive particles on the dielectric strength of atmospheric air-gaps in the presence of corona, *The Eleventh Intl. Conf. on Gas Discharges and Their Applications*, Tokyo, 1995, p. I-140 - I-143.
- [28] **L. Dascalescu, A. Samuila, R. Tobazéon**, Dielectric behaviour of particle-contaminated air-gaps in the presence of corona, *J. Electrostatics*, 36 (1996), p. 253-275.

-
- [29]] **L. Dascalescu, A. Samuila, R. Tobazéon**, Cylindrical conductive particles in the proximity of an electrode affected by a high-intensity electric field, *J. Electrostatics*, 37 (1996), p. 173-196.
- [30] **L. Dascalescu, A. Samuila, R. Tobazéon**, Cylindrical particles in the proximity of an electrode affected by a uniform electric field, *9th Intl. Conf. on Electrostatics*, Inst. of Phys. Conf. Ser. 143, York, 1995, p. 133-136.
- [31] **S. Masuda, M. Washizu**, Ionic charging of a very high resistivity spherical particle, *J. Electrostatics*, vol. 6, 1979, p. 57-67.
- [32] **B. D. Meyle, J. F. Hughes**, Corona charging of insulating particles, in *Electrostatics 1983, Inst. of Phys. Conf. Ser. 66*, Oxford, 1983, p. 155-160.
- [33] **W. B. Smith, J. R. McDonald**, Development of a theory for the charging of particles by unipolar ions, *J. Aerosol. Sci.*, 7(1976), p. 151-166.
- [34] **A. Mizuno**, Review of particle charging research, in *Proc. Intl. Conf. on Electrostatic Precipitation*, Monterey, 1981, p. 304-325.
- [35] **I. I. Inculet, N. H. Malik, J. A. Young**, Corona charging of immobilised spherical particles, in *Electrostatics 1983, Inst. of Phys. Conf. Ser. 66*, Oxford, 1983, p. 99-104.
- [36] **L. Dascalescu, D. Rafiroiu, A. Samuila, R. Tobazéon**, Charging of insulating spheres in contact with an electrode affected by a mono-ionized field, in *Conf. Rec. 1995 IEEE/IAS Annual Meeting*, Orlando, p. 1229-1234.
- [37] **L. Dascalescu, R. Morar, Al. Iuga, A. Samuila, V. Neamtu, I. Suarasan**, Charging of particulates in the corona field of roll-type electroseparators, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 27(1994), p. 1242-1251.
- [38] **J. S. Chang**, Electrostatic charging of particles, in *Handbook of Electrostatic Processes*, J. S. Chang, A. Kelly and J. M. Crowley, Eds., Dekker, New-York, 1995, p. 39-49.
- [39] **M. Pauthenier, M. Moreau-Hanot**, La charge des particules sphériques dans un champ ionisé, *J. Phys. Radium*, vol. 3, 1932, p. 590-613.
- [40] **N. J. Félici**, Forces et charges de petits objets en contact avec une électrode affectée d'un champ électrique, *Rev. Gen. Electr.*, vol. 75, 1966, p. 1145-1160.
- [41] **J. R. McDonald, M. H. Anderson, R. B. Mosley**, Charge measurement on individual particles existing in laboratory precipitators with positive and negative corona at various temperature, *J. Appl. Phys.*, vol. 51, 1980, p. 3632-3643.

-
- [42] **L. Salasoo, J. K. Nelson, R. J. Schwabe, W. L. Snaddon**, Estimation of particulate charging and migration for pulsed precipitator applications, *J. Electrostatics*, vol. 19, 1987, p. 1-19.
- [43] **A. F. Howe, J. A. Houlgreave**, An experimental investigation of the charging of different sized particles in a precipitator, in *Proc. Intl. Conf. on Electrostatic Precipitation*, Padova, 1987, p. 329-336.
- [44] **A Lacchia**, Contribution à l'étude de la charge d'un jet de particules microniques dans le champ ionisé d'un système point-plan, *Thèse de Doctorat*, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1974.
- [45] **J. F. Hughes**, *Electrostatic Powder Coating*, Research Studies Press, New-York, 1985.
- [46] **I. I. Inculet, C. S. P. Castle**, Q/M Distribution in Pulsed Corona Powder coating spray cone, *Conf. Rec. 1995 IEEE/IAS Annual Meeting*, Orlando, p. 1289-1294.
- [47] **G. Kazkaz**, Electric field and space charge of spherical electrode of high voltage concentric with a spherical grounded conductive target, *Conf. Rec. 1996 IEEE/IAS Annual Meeting*, San Diego, vol. 4, p. 1904-1911.
- [48] **F. S. Knoll, J. E. Lower, J. B. Taylor**, Electrostatic Separation, in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (5-th Ed.), WCH, Weinheim, vol. B2, 1988, p. 20-1 - 20-11.
- [49] **S. Mugeraya, B. R. Prabhakar**, Charging Characteristics of particles in electrostatic separators, in *Conf. Rec. 1985 IEEE/IAS Annual Meeting*, p. 1315-1324.
- [50] **A. Samuila, L. Dascalescu**, Charging of cylindrical insulating particles in mono-ionized fields, in *Conf. Rec. 1996 IEEE/IAS Annual Meeting*, San Diego, p. 1891-1894.
- [51] **A. Samuila, Al. Iuga, R. Morar, R. Tobazéon, L. Dascalescu**, Factors wich affect the corona charging of insulating spheres on plate and roll electrodes, 8th Intl. Conf. on Electrostatics, Poitiers, 1997 (sous presse).
- [52] **P. L. Levin, A. J. Hansen, D. Beatovic, H. Gan, J. H. Petrangelo**, A unified boundary-element finite-element package, *IEEE Trans. El. Ins.* vol. 28, 1993, p. 161-167.
- [53] **L. Dascalescu**, Numerical analysis of the electric field of roll-type electrostatic separators, *J. Electrostatics*, vol. 29, 1993, p. 255-267.

-
- [54] **L. Dascalescu, Michaela Mihailescu**, Mathematical Modelling of conductive particle movement in d.c. corona fields, *J. Electrostatics*, vol. 30, 1993, p. 297-306.
- [55] **A. Jaworek, A. Krupa**, Airborne particle charging by unipolar ions in AC electric field, *J. Electrostatics*, 23(1989), p. 361-370.
- [56] **K. Adamiak, A. Krupa, A. Jaworek**, Unipolar particle charging in an alternating electric field. *9th Intl. Conf. on Electrostatics*, Inst. of Phys. Conf. Ser. 143, York, 1995, p. 275-278.
- [57] **P. J. McKinney, J. H. Davidson, D. M. Leone**, Current distribution for barbed plate-to-plane coronas, in *Conf. Rec. 1991 IEEE/IAS Annual Meeting*, p. 713-719.
- [58] **M. Th. Mohandes, S. Ushiroda, S. Kajita, Y. Kondo, K. Horii**, Current density distribution on the plane electrode in multineedle to plane configuration, in *Conf. Rec. 1992 IEEE/IAS Annual Meeting*, p. 1527-1532.
- [59] **A. Jaworek, A. Krupa**, Corona discharge in multipoint-to-plane geometry, *Inst. of Phys. Conf. Ser. 143, Intl. Conf. Electrostatics '95*, York, 1995, pag. 289-292.
- [60] **P. Atten**, On the use of an ionic pump in a convector heater, , in *Conf. Rec. 1993 IEEE/IAS Annual Meeting*, p. 1927-1934, 1993.
- [61] **A. Jaworek, A. Krupa**, Corona discharge from a multipoint electrode in flowing air, *J. Electrostatics*, vol. 38, No. 3, 1996, p. 187-198.
- [62] **D. Rafiroiu, R. Morar, Al. Iuga, A. Samuila, L. Dascalescu**, Evaluation of the active electrodes of corona-electrostatic separators. *Proc. 9-th Int. Symp. High-voltage Engineering*, Graz, vol. 7, 1995, p. 7897.1 - 7897-4.
- [63] **L. Dascalescu**, Progresses in corona-electrostatic separation technologies and equipments, in *Proc. 1-th Meeting of the Institute of Electrostatics Japan*, Tokyo, 1993, p. 31-54.
- [64] **L. Dascalescu, Al. Iuga, R. Morar V. Neamtu A. Samuila, I. Suarasan**, Corona charging of granular materials in roll-type high tension separators. *Proc. 8-th Intl. Symp. High-voltage Engineering*, Yokohama, 1993, vol. 3, p. 481-484.
- [65] **R. Morar, Al. Iuga, L. Dascalescu, A. Samuila**, Factors which influence the insulation-metal electroseparation, *J. Electrostatics*, vol. 30, 1993, p. 403-412.
- [66] **K. Asano, Y. Miyatake, K. Yatzuzuka, Y. Higashiyama** The Effect of Particle Velocity on Electrostatic Particle Sorting, *1996 IEJ-ESA Joint Symposium on Electrostatics*, Tokyo, p. 127-133.

-
- [67] **A. Robledo-Martinez**, Characteristics of DC corona discharge in humid, reduced density air, *J. Electrostatics*, vol. 29, 1992, p. 101-111.
- [68] **L. Fouad, L. Elhazek**, Effect of humidity on positive corona discharge in a three electrode system, *J. Electrostatics*, vol. 35, 1995, p. 21-30.
- [69] **J. M. Crowley**, Fundamentals of Applied Electrostatics, Wiley, New-York, 1986.
- [70] **J. A. Cross**, Electrostatics. Principles, Problems and Applications, Adam Hilger, Bristol, 1987.
- [71] **K. Adamiak, J. Mao**, Simulation of Particle Trajectories in Tribo-Powder Coating, *Conf. Rec. 1995 IEEE/IAS Annual Meeting*, Orlando, p. 1273-1279.
- [72] **Fl. T. Tanasescu, R. Cramariuc, I. Toma, I. Ionescu**, Charged particle trajectories in electrostatic fields, *J. Electrostatics*, 23(1989), p. 453-462.
- [73] **D. R. Inculet, R. M. Quisley, I. I. Inculet**, Electrostatic separation of sulphydes from quartz: A potential method for mineral beneficiation, *J. Electrostatics*, vol. 34, 1995, p. 17-25.
- [74] **A. D. Dance, T. Kojovic, R. D. Morrison**, Developement of electrostatic separation models of the mineral sands industry, in *Proc. Extractive Metal. Conf.*, Perth, 1991, p. 13-18.
- [75] **J. C. Maxwell**, Electricity and Magnetism, Vol. 2, Dover Publications, Inc., New-York, 1954
- [76] **T. W. Dakin, J. Hughes**, The behaviour of individual conducting particles in electric fields; in *1968 Annual Report of the Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, National Academi of Science, Washington DC, 1969, p. 68-72.
- [77] **H. Anis, K. D. Srivastava**, Free conducting particles in compressed gas insulation, *IEEE Trans. El. Insul.*, vol. 16, 1981, p. 327-338.
- [78] **G. A. Farral, F. G. Hudda**, The movmment of elongated metal particles under high-stress in vacuum, *J. Appl. Phys.*, vol. 51, 1980, p. 4607-4617.
- [79] **M. M. Morcos, K. D. Srivastava**, On the particle-initiated breakdown of SF₆ insulated cables, *Europhys. Lett.*, vol. 17, 1992, p. 529-534.
- [80] **L. Dascalescu, A. Samuila, R. Tobazéon**, Size of solid contaminants and formating of particles chains: two factors affecting the dielectric strength of insulating gases, 8th Intl. Conf. on Electrostatics, Poitiers, 1997 (sous presse).

-
- [81] **F. A. M. Rizk, C. Masetti, R. P. Comsa**, Particle-initiated breakdown in SF₆ insulated system under direct voltages, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, 1979, p. 825-836.
- [82] **C. M. Cooke**, Electrostatics of particle control in gas insulated apparatus, in *Gaseous Dielectrics II* (Ed. G. Cristophorou), Pergamon press, New-York, 1980, p. 275-283.
- [83] **J. R. Laghari, A. H. Qureshi**, A review of particle-contaminated gas breakdown, *IEEE Trans. El. Insul.*, vol. EI-16, 1981, p. 388-398.
- [84] **M. Krins, H. Borsi, E. Gockenbach**, Influence of Carbon Particles on the Breakdown Voltage on Transformer Oil, *Proc. 12-th Intl. Conf. on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids*, Roma, 1996, p. 296-299.
- [85] **R. Tobazéon**, Electrohydrodynamic behaviour of single spherical or cylindrical conducting particles in an insulating liquid subjected to a uniform DC field, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 29(1996), p. 2595-2608.
- [86] **R. Tobazéon**, Role des particules conductrices dans le claquage des fluides, in *Actes Journées d'Etudes Electrostatique*, Poitiers, 1992, p. 173-181.
- [87] **L. Dascalescu, R. Tobazéon**, Behaviour of conductive particles in d.c. corona fields, in *X-th Intl. Conf. on Gas Discharges and Their Applications*, Swansea, 1992, p. 326-329.
- [88] **R. Tobazéon**, Charges and discharges of conducting particles in a plane oil gap subjected to a DC voltage, *Proc. 12-th Intl. Conf. on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids*, Roma, 1996, p. 309-312.
- [89] **L. Dascalescu, A. Mizuno, R. Tobazéon, Al. Iuga, R. Morar, M. Mihailescu, A. Samuila**, Charges and forces on conductive particles in roll-type corona-electrostatic separators. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 31 (1995) p. 947-956.
- [90] **Al. Iuga, R. Morar, A. Samuila, I. Cuglesan, Michaela Mihailescu, L. Dascalescu**, Electrostatic separation of brass from industrial wastes, *Conf. Rec. 1996 IEEE/IAS Annual Meeting*, San Diego, p. 2031-2035.
- [91] **K. Haga**, Applications of the electrostatic separation technique, in *Handbook of Electrostatic Processes*, J. S. Chang, A. J. Kelly and J. M. Crowley Eds., New-York, Marcel Dekker, 1995, p. 365-386.
- [92] **L. Dascalescu, R. Tobazéon, P. Atten**, Behaviour of conductive particles in corona dominated electric fields, *Conf. Rec. 1992 IEEE/IAS Annual Meeting*, Houston, p. 1479-1486.

-
- [93] **A. Samuila, L. Dascalescu, R. Tobazéon**, Breakdown of ionised air-gaps in the presence of spherical conductive particles, *Ninth Intl. Symp. on High Voltage Engineering*, Graz, 1995, p. 2143-1 - 2143-4.
- [94] **L. Dascalescu R. Tobazéon, A. Mizuno, Al. Iuga, R. Morar, A. Samuila, M. Mihailescu**, Influence of conductive particles on the breakdown conditions of air gaps in the presence of corona. *International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials ICPADM' 94*, Brisbane, 1994, p. 63-66.
- [95] **M. Hara, M. Akazaki**, A method for prediction of gaseous discharge treshold voltage in the presence of conducting particles, *J. Electrostatics* vol 2 1976/1977, p. 223-239.
- [96] **H. Parek, K. D. Srivastava**, Breakdown voltage in particle contaminated compressed gases, *IEEE Trans. Electr. Ins.*, vol. EI-14, 1979, p. 101-106.
- [97] **J. J. Thomson**, Conduction of electricity through gases, Cambridge University Press, 3rd Ed. 1929.
- [98] **D. K. Yanar, B. A. Kwetkus**, Electrostatic Separation of Polymer Powders, *J. Electrostatics*, vol. 35, 1995, p. 257-266.
- [99] **K. Mah, J. M. Toguri, H. W. Smith**, Electrostatic separation of aluminium from dross, *Conservation and Recycling*, vol. 9, 1986, p. 325-334.
- [100] **T. Takahashi, I Watabe, K. Tabei, K. Haga**, New equipments for resource recovery: electrostatic separator and eddy current separator, in *Conf. Rec. 1988 IEEE/IAS Annual Meeting*, Cincinnati, p. 1026-1031.
- [101] **S. Gotoh**, Wastes management and recycling trends in Japan, in *Resources and Conservation*, vol. 14, 1987, p. 15-28.
- [102] **R. S. Kaplan, H. Ness**, Encyclopedia of Materials Science and Engineering, Ed. M. B. Beaver, Oxford, *Pergamon Press* 1986, p. 4114-4123.
- [103] **A. D. Moore**, Electrostatics and its Applications, Wiley, New-York, 1973.
- [104] **L. Dascalescu, A. Samuila, Al. Iuga, R. Morar, I. Csorvasy**, Influence of material superficial moisture on insulation-metal electroseparation. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 30 (1994), p. 844 - 852.

**Liste des illustrations
et des tableaux**



Chapitre 1

Fig. 1.1. Zones de champ électrique autour de l'électrode cylindrique tournante reliée à la terre. 1. - première zone de champ ionisé (champ ionisé principal); 2. - zone de champ harmonique; 3. - deuxième zone de champ ionisé (champ ionisé auxiliaire); 4. - troisième zone de champ ionisé (champ ionisé de neutralisation); 5. - électrode cylindrique reliée à la terre; 6. - vibrotransporteur.

Fig. 1.2. Electrode à pointes ionisantes, utilisée dans les séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante pour générer, par décharge couronne, une zone de charge d'espace. 1. - support métallique à grand rayon de courbure ($\phi = 20$ mm); 2. - support métallique tubulaire de l'élément ionisant; 3. - élément ionisant de type fil de tungstène.

Fig. 1.3. a). Forme et taille des particules d'un mélange granulaire métal-isolant, provenant de déchets de câbles électriques. b). Particules fines adhérant sur la surface des granules de grande taille. 1. - particule de polychlorure de vinyle (PVC); 2. - particule de polyéthylène (PE); 3. - granule de cuivre; 4. - fils de cuivre; 5. - particules fines de cuivre; 6. - particules fines de PVC; 7. - particule fine de cuivre sur un granule de PVC; 8. - particule fine de PE sur un granule de cuivre.

Fig. 1.4. Paramètres du processus de charge en champ ionisé, d'un demi-ellipsoïde de révolution en contact avec l'électrode cylindrique mise à la terre.

Fig. 1.5. Particules sur la surface de l'électrode cylindrique, dans un séparateur électrostatique 1.- électrode ionisante; 2.- particules de PVC; 3.- électrode cylindrique reliée à la terre.

Fig. 1.6. Principe du processus de charge des particules isolantes en champ ionisé, dans un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante.

Fig. 1.7. Hypothèses pour le calcul de la charge à saturation Q_s^* d'une particule sphérique isolante, en contact avec une électrode dans un champ ionisé (E_0 - intensité du champ, q - densité de la charge d'espace). a) - la particule tourne autour de son axe et la charge acquise est uniformément distribuée sur la surface, avec la densité q_s ; b) - la charge de la particule est concentrée en une charge ponctuelle, placée dans le centre de la sphère.

Fig. 1.8. Calcul de la composante radiale du champ total E_r , à la surface de la particule sphérique chargée en champ ionisé avec la charge Q , pour un certain point P (a) et pour le pôle B de la sphère (b).

Fig. 1.9. Configuration géométrique avec symétrie de révolution, utilisée pour le calcul de la charge de saturation Q_s^x d'une particule isolante sphérique, située à une distance "x" de l'électrode affectée d'un champ électrique uniforme (ϵ_r - permittivité relative de la particule; ϵ_0 - permittivité du milieu).

Fig. 1.10. Charge à saturation Q_s^x d'une particule isolante sphérique ($R = 1,5$ mm, permittivité ϵ_r), située à une distance "x" d'une électrode plane, dans un champ ionisé d'intensité $E_0 = 5$ kV/cm.

Tableau 1.1. Comparaison entre les valeurs calculées avec CSP pour la charge à saturation acquise en champ ionisé d'intensité $E_0 = 5$ kV/cm, par une particule isolante sphérique ($R = 1,5$ mm) posée sur une électrode (Q_s^*) et placée à demi distance entre les électrodes (Q_s^l). Les valeurs Q_s sont calculées avec la formule de Pauthenier.

Fig. 1.11. Configuration géométrique avec symétrie plane, utilisée pour le calcul numérique de la charge à saturation Q_s^x d'une particule isolante cylindrique, placée à une distance "x" d'une électrode, dans un champ ionisé d'intensité E_0 . (ϵ_r - permittivité relative de la particule; ϵ_0 - permittivité du milieu).

Fig. 1.12. Charge à saturation Q_s^x de la particule isolante cylindrique ($R = 1,5$ mm, $L = 5$ mm, permittivité relative ϵ_r), située à une distance "x" d'une électrode plane, dans un champ ionisé d'intensité $E_0 = 5$ kV/cm.

Fig. 1.13. La particule se charge ($dQ/dt > 0$) quand le champ résultant E_r sur le pôle B est positif (a); le processus de charge cesse ($dQ/dt = 0$) quand $E_r \leq 0$ (b).

Fig. 1.14. Evolution de la charge d'une particule sphérique, en champ ionisé produit par une électrode reliée à une source haute tension redressée double-alternance. Le paramètre des courbes est la constante de temps de demi-charge τ .

Fig. 1.15. Evolution du courant de charge de la particule sphérique en champ ionisé, pour trois valeurs de la constante de temps τ . Le champ ionisé est produit par une électrode portée à une tension redressée double-alternance.

Fig. 1.16. Influence de la constante de temps τ du processus de charge, sur la charge d'une particule sphérique dans un champ ionisé produit par une électrode reliée à une source haute tension redressée double-alternance.

Fig. 1.17. Zone libre de charge d'espace autour d'une particule chargée, due à la diminution du champ extérieur au-dessous du champ produit par la charge déjà acquise par la particule.

Chapitre 2

Fig. 2.1. Dispositif expérimental pour la mesure de la densité de courant dans un plan collecteur face à une électrode ionisante. 1) - électrode ionisante; 2) - électrode plane reliée à la terre; 3) - sonde de mesure du courant; 4) - dispositif micrométrique de translation, en coordonnées x-y; 5) - nano-ampèremètre pour la mesure du courant dans la sonde; 6) - micro-ampèremètre pour la mesure du courant total.

Fig. 2.2. Schéma de mesure de la distribution de la densité de courant produit par une électrode à quatre pointes ionisantes en ligne. 1) - support isolant en polyéthylène; 2) - pointe ionisante tubulaire (pas de l'électrode $p = 15$ mm); 3) - électrode plane reliée à la terre; 4) - sonde de mesure.

Fig. 2.3. Distribution de la densité de courant sur la surface de l'électrode collectrice face à une électrode ionisante à quatre pointes ionisantes tubulaires, placées à $x = (40-55-70-85)$ mm.

Fig. 2.4. Distribution de la densité de courant dans le plan d'une électrode collectrice face à une électrode à deux lignes de pointes ionisants décalées d'un demi-pas.

Fig. 2.5. Distribution de la densité de courant sur l'axe "x" et sur une parallèle à celui, dans le plan d'une électrode collectrice face à une électrode à deux lignes de pointes ionisantes.

Fig. 2.6. Comparaison entre les valeurs moyennes de la densité de courant calculées sur des directions perpendiculaires à celle des pointes ionisantes, pour les électrodes ionisantes à tubes métalliques et à fils de tungstène.

Fig. 2.7. Valeur moyenne de la densité de courant sur la direction perpendiculaire sur la ligne des pointes ionisantes, pour des électrodes à une ligne et à deux lignes de pointes ionisantes tubulaires, décalées d'un demi-pas.

Fig. 2.8. Schéma de mesure de la distribution de la densité de courant pour une électrode à quatre pointes ionisantes et élément électrostatique. 1. - support isolant; 2. - pointe ionisante tubulaire; 3. - élément électrostatique; 4. - électrode plane reliée à la terre; 5. - sonde de mesure du courant

Fig. 2.9. Caractéristiques $I(U)$ de l'électrode à quatre pointes ionisantes tubulaires, en présence d'un élément électrostatique placée à une distance "h" de pointes ionisantes.

Fig. 2.10. Distribution de la densité de courant dans l'axe y du système d'électrodes, pour diverses distance "h" entre l'élément électrostatique et les pointes ionisantes.

Fig. 2.11. Calcul numérique du champ électrique pour la configuration pointe ionisante tubulaire face à une électrode plane, en présence d'un élément électrostatique.

Fig. 2.12. Renforcement du champ électrique E/E_0 dans l'axe de la pointe ionisante, pour trois position différentes de l'élément électrostatique (E_0 est la valeur du champ entre les électrodes, à grande distance de la pointe ionisante, dans le cas $h = 20$ mm).

Fig. 2.13. Distribution du champ électrique autour de la pointe ionisante tubulaire, en l'absence de l'élément électrostatique.

Fig. 2.14. Configuration géométrique avec symétrie plane, utilisée par CSP pour le calcul du champ électrique en système électrode à lames ionisantes - plan.

Tableau 2.1. Renforcement du champ électrique en configuration électrode à lames ionisantes - plan (Fig. 2.14) à l'extrémité des pointes ionisantes et au niveau de l'électrode plane.

Fig. 2.15. a). Allure des lignes du champ électrique et des lignes équipotentielles pour une configuration d'électrode à lames ionisantes - plan, en présence d'un élément électrostatique; b). décharge couronne entre l'électrode ionisante à pointes ionisantes et une électrode plane reliée à la terre.

Tableau 2.2. Renforcement du champ électrique en configuration électrode à lames ionisantes - plan (Fig. 2.14) pour une distance $p = 45$ mm entre les lames et en l'absence de l'élément électrostatique.

Fig. 2.16. Allure des lignes du champ électrique et des lignes équipotentielles pour une configuration électrode à lames ionisantes- électrode plane, à une distance augmentée ($p = 45$ mm) entre les lames et en l'absence de l'élément électrostatique.

Fig. 2.17. Dispositif expérimental pour l'étude de la charge acquise par les particules isolantes dans les séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante reliée à la terre. 1. - moteur électrique; 2. - réducteur; 3. - liaison à la terre de l'électrode cylindrique tournante; 4. - électrode ionisante; 5. - support isolant; 6. - vibrotransporteur; 7. - électrode cylindrique tournante; 8. - cage de Faraday; 9. - électromètre.

Fig. 2.18. Dispositif expérimental pour la mesure de la charge des particules isolantes en champ ionisé, à la surface d'une électrode cylindrique tournante reliée à la terre. 1. - électrode ionisante; 2. - électrode cylindrique tournante reliée à la terre; 3. - micro-ampèremètre pour la mesure du courant; 4. - électromètre; 5. - cage de Faraday; 6. - source haute tension; 7. - kilovoltmètre électrostatique.

Fig. 2.19. Electrode à deux lignes de pointes ionisantes décalées d'un demi-pas. 1. - support isolant en polyéthylène; 2. - pointe ionisante tubulaire (diamètre extérieur 0,8 mm; diamètre intérieur 0,5 mm); 3. - élément électrostatique.

Fig. 2.20. Charge acquise par une particule sphérique en polyamide ($R = 1,5$ mm) en fonction de la valeur de la haute tension, pour diverses distances "h" entre les pointes ionisantes et l'élément électrostatique (le dispositif expérimental de la Fig. 2.17 est équipé d'une électrode à deux lignes de pointes ionisantes tubulaires, décalées d'un demi-pas).

Fig. 2.21. Charge acquise par une particule sphérique en polyamide ($R = 1,5$ mm) en fonction de la valeur de la haute tension, pour les deux polarités. Le dispositif expérimental est équipé d'une électrode à deux lignes de pointes ionisantes tubulaires et l'élément électrostatique est placé à $h = 20$ mm de pointes ionisantes.

Fig. 2.22. Caractéristiques $I(U)$ de l'électrode à deux lignes de pointes ionisantes tubulaires, en polarité positive et négative.

Fig. 2.23. Electrode à pointes ionisantes en fils de tungstène. 1. - support isolant en polyéthylène; 2. - élément électrostatique; 3. - support métallique tubulaire; 4. - fil de tungstène $\phi = 0,2$ mm.

Fig. 2.24. Caractéristiques $I(U)$ des électrodes à pointes ionisantes tubulaires et en fils de tungstène, en présence d'un élément électrostatique placé à $h = 20$ mm des pointes ionisantes.

Fig. 2.25. Charge acquise par une particule sphérique en polyamide ($R = 1,5$ mm) dans le champ ionisé généré par des électrodes ionisantes à tubes métalliques et à fils de tungstène.

Fig. 2.26. Caractéristiques $I(U)$ pour des électrodes à une et à deux lignes de pointes ionisantes tubulaires ($\phi = 0,8$ mm).

Fig. 2.27. Charge acquise par une particule sphérique en polyamide ($R = 1,5$ mm) dans le champ ionisé généré par des électrodes à une et à deux lignes de pointes ionisantes tubulaires ($\phi = 0,8$ mm).

Fig. 2.28. Principe de mesure de la charge des particules dans des conditions spécifiques aux séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante.

Fig. 2.29. Electrode à pointes ionisantes en fil de tungstène. 1. - support métallique tubulaire, à grand rayon de courbure; 2. - support tubulaire de la pointe ionisante; 3. - pointe ionisante en fil de tungstène.

Fig. 2.30. a). Charge acquise en champ ionisé par une particule sphériques en polyamide ($R = 1,5$ mm) en fonction de la valeur de la haute tension et caractéristique $I(U)$ de l'électrode ionisante; b). mesures dans la zone du seuil couronne.

Fig. 2.31. Charge acquise en champ ionisé par une particule sphérique en polyamide ($R = 1,5$ mm) en fonction de la valeur de la haute tension, pour différentes valeurs de l'intervalle "s" entre les électrodes.

Fig. 2.32. Charge acquise en champ ionisé par une particule cylindrique aplatie ($R = 1,5$ mm, $L = 1$ mm) en PVC, en fonction de la tension de l'électrode ionisante, pour trois valeurs de l'intervalle "s" entre les électrodes.

Fig. 2.33. Charge acquise en champ ionisé par une particule sphérique ($R = 1,5$ mm) en polyamide, en fonction de la tension de l'électrode ionisante, pour deux valeurs de la vitesse de rotation du cylindre.

Fig. 2.34. Charge acquise en champ ionisé par une particule cylindrique ($R = 1,5$ mm, $L = 5$ mm) en PVC, en fonction de la tension de l'électrode ionisante, pour deux valeurs de la vitesse de rotation du cylindre.

Fig. 2.35. Charge acquise en champ ionisé par une particule sphérique en polyamide ($R = 1,5$ mm) en fonction de l'angle " α " du transporteur incliné qui la dépose à une vitesse variable sur la surface de l'électrode cylindrique tournante.

Fig. 2.36. Charge acquise en champ ionisé par des particules cylindriques en PE et PVC ($R = 1,5$ mm, $L = 5$ mm) en contact avec l'électrode reliée à la terre, en fonction de l'amplitude de la haute tension appliquée aux électrodes.

Fig. 2.37. Charge acquise en champ ionisé par une particule sphérique en polyamide ($R = 1,5$ mm) en fonction de l'amplitude de la haute tension, pour trois valeurs de l'humidité atmosphérique "w". Le dispositif expérimental est équipé d'une électrode à deux lignes de pointes ionisantes tubulaires.

Fig. 2.38. Schéma du dispositif expérimental pour l'étude de la charge des particules posées sur une électrode plane revêtue d'un isolant. La décharge couronne est produite par une électrode de type matrice de pointes ionisantes" (5x5 pointes ionisantes en acier, de diamètre de 1 mm et de rayon 10 μ m).

Fig. 2.39. Charge acquise en champ ionisé par une particule sphérique en polyamide ($R = 1,5$ mm), posée sur la surface d'une électrode plane, sans et avec un revêtement isolant (U - tension de l'électrode ionisante).

Chapitre 3

Fig. 3.1. Trajectoires des particules dans un séparateur électrostatique de laboratoire, à électrode cylindrique tournante. 1. - vibrotransporteur; 2. - électrode ionisante; 3. - électrode électrostatique; 4. - particules conductrices; 5. - particules isolantes; 6. - électrode de neutralisation; 7. - brosse; 8. - électrode cylindrique tournante reliée à la terre

Fig. 3.2. Forces électriques et mécaniques qui agissent sur une particule conductrice chargée par contact avec l'électrode cylindrique tournante reliée à la terre.

Fig. 3.3. Forces électriques et mécaniques agissant sur une particule isolante posée sur l'électrode cylindrique tournante reliée à la terre et chargée par flux d'ions dans la zone de champ ionisé.

Fig. 3.4. Force résultante électrique F_{el} qui s'exerce sur une particule conductrice sphérique chargée par contact avec l'électrode, après le décollement (F^* est la force agissant sur la particule en contact avec l'électrode).

Fig. 3.5. Trajectoires des particules dans un séparateur électrostatique. 1. - particules conductrices détachées de la surface du cylindre; 2. - particules isolantes collées sur la surface du cylindre.

Tableau 3.1. Diminution relative de la charge d'une particule isolante par contact avec le cylindre tournant reliée à la terre, entre la zone de champ ionisé et le point "D", selon la constante de temps du processus de décharge τ_d ($n = 100$ tr/mn; $t_d = 0,3$ s).

Fig. 3.6. Régime électrostatique d'un séparateur à électrode cylindrique tournante. 1. - vibrotransporteur; 2. - électrode électrostatique à profil elliptique; 3. - particule conductrice; 4. - particule isolante; 5. - électrode cylindrique tournante reliée à la terre.

Fig. 3.7. Modèle plan-parallèle du champ harmonique d'un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante.

Tableau 3.2. Charge de contact Q_m , force du champ électrique F^* et champ de décollement E_d pour les particules sphériques et cylindriques en contact avec l'électrode.

Fig. 3.8. La particule cylindrique en position horizontale sur l'électrode décolle et bascule en position verticale, selon la direction des lignes du champ électrique.

Tableau 3.3. Augmentation de la charge (Q), de la force (F) et renforcement du champ électrique (E/E_0) à l'extrémité de la particule conductrice cylindrique en position horizontale (^{h}) sur l'électrode, en champ harmonique, lorsqu'elle décolle et bascule en position verticale (^{v}).

Tableau 3.4. Calcul analytique et numérique du champ de décollement d'une particule conductrice cylindrique (rayon $R = 0,25$ mm, masse volumique $\rho = 1800$ kg/m³, longueur L) posée verticalement une électrode plane, en champ harmonique.

Fig. 3.9. Dispositif expérimental utilisé pour l'étude du mouvement des particules conductrices en champ harmonique. 1. - alimentation à haute tension; 2. - électrode plane supérieure; 3. - support isolant; 4. - électrode plane inférieure, reliée à la terre.

Fig. 3.10. Comparaison entre le champ de décollement déterminé expérimentalement, et les résultats du calcul numérique (ligne pointillée) pour des particules conductrices sphériques en contact avec l'électrode plane, en champ harmonique.

Fig. 3.11. Champ de décollement déterminé expérimentalement et calculé numériquement (ligne pointillée), pour des particules conductrices cylindriques posées horizontalement sur l'électrode plane, en champ harmonique.

Fig. 3.12. Valeurs expérimentales et valeurs calculées numériquement (ligne pointillée) pour le champ de décollement des particules conductrices de rayon $R = 1,2$ mm, en position verticale E_d^v et horizontale E_d^h sur une électrode plane.

Fig. 3.13. Caractéristiques de décollement (E_d) et de claquage (E_{cl}) pour des particules cylindriques en graphite (1) et en aluminium (2), de rayon $R = 0,25$ mm.

Fig. 3.14. Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à champ ionisé et électrode cylindrique tournante reliée à la terre. 1. - vibrotransporteur; 2. - électrode ionisante (fil métallique), reliée à la source haute tension; 3. - particule conductrice; 4. - particule isolante; 5. - électrode cylindrique reliée à la terre.

Fig. 3.15. a). Aspect de la décharge couronne produite par les électrodes ionisantes d'un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante; b). représentation schématique du mouvement des particules conductrices dans la zone de champ ionisé.

Fig. 3.16. Modélisation du comportement d'une particule conductrice sphérique en champ ionisé. a. - charge par contact et décollement vers l'électrode oppose; b. - diminution de la charge sous l'action du flux d'ions; c. - changement du signe de la charge et de la force; d. - micro-décharge produite entre la particule chargée et l'électrode de signe opposé.

Fig. 3.17. Distribution du champ électrique dans l'intervalle entre l'électrode ionisante et l'électrode plane. a: $1 < \lambda < 1,5$ ($E_c \neq 0$); b: $\lambda = 1,5$ ($E_c = 0$).

Fig. 3.18. Dispositif expérimental utilisé pour l'étude du mouvement des particules conductrices dans un champ ionisé. 1. - pointe ionisante en acier; 2,3 - supports isolants; 4. - électrode plane reliée à la terre.

Fig. 3.19. a). Caractéristiques $I(U)$ de l'électrode de type matrice de pointes ionisantes, pour les deux polarités; b). détail dans le domaine du seuil couronne.

Fig. 3.20. Tension de décollement de la particule conductrice sphérique en champ ionisé, par une polarité positive (U_d^+) ou négative (U_d^-) de la charge d'espace.

Fig. 3.21. Tension de claquage d'un système électrode de type matrice de pointes ionisantes face à une électrode plane, sous tension continue et en présence d'une particule conductrice sphérique ($R = 1,5$ mm, $\rho = 1400$ kg/m³). 1. - polarité négative, sans particule; 2. - polarité négative, en présence d'une particule fixée sur l'électrode plane reliée à la terre; 3. - polarité négative, en présence d'une particule libre, mobile; 4. - polarité positive, en présence d'une particule libre, mobile.

Fig. 3.22. Mouvement d'une particule conductrice cylindrique en champ ionisé. a. - charge par contact avec l'électrode; b. - décollement et augmentation de la charge et de la force électrique; c. - changement du signe de la charge par l'action du flux d'ions; d. - micro - décharge entre la particule et l'électrode et claquage.

Fig. 3.23. Tensions de décollement U_d en champ ionisé, en fonction de la longueur L des particules cylindriques ($R = 1,2 \text{ mm}$, $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$) posées horizontalement sur l'électrode plane reliée à la terre. ($U_d^{h(+)}$ et $U_d^{h(-)}$ sont les tension de décollement en polarité positive et négative de la charge d'espace, U_d^h est la tension de décollement en champ harmonique).

Fig. 3.24. Tensions de décollement U_d en champ ionisé, en fonction de la longueur L des particules cylindriques ($R = 1,2 \text{ mm}$, $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$) posées verticalement sur l'électrode plane reliée à la terre. ($U_d^{v(+)}$ et $U_d^{v(-)}$ sont les tension de décollement en polarité positive et négative de la charge d'espace, U_d^v est la tension de décollement en champ harmonique).

Fig. 3.25. Tensions de décollement (U_d) et de claquage (U_{cl}) en fonction de la longueur L d'une particule cylindrique ($R = 1,2 \text{ mm}$, $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$), en champ ionisé, polarité négative. ($U_d^{h(-)}$: tension de décollement en position horizontale; $U_d^{v(-)}$: tension de décollement en position verticale).

Fig. 3.26. Tension de décollement (U_d) des particules conductrices cylindriques ($R = 0,25 \text{ mm}$, $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$, longueur L), en polarité positive et négative de l'électrode ionisante et tension de claquage entre les électrodes (U_{cl}), en présence des particules conductrices .

Chapitre 4

Tableau 4.1. Principaux composants des scories de laiton, classe granulométrique (0...10)mm.

Fig. 4.1. Schéma technologique de récupération du laiton des déchets industriels et points de provenance des échantillons.

Fig. 4.2. Particules composant l'échantillon # 1. 1. - scories; 2. - quartz; 3. - matériau réfractaire; 4. - copeau de laiton; 5. - sphérule de laiton; 6. - laiton avec des inclusions non - métalliques.

Tableau 4.2. Composition chimique des échantillons granulaires de déchets industriels de laiton, en fonction de la taille des particules.

Fig. 4.3. Configuration des électrodes du séparateur de laboratoire ELSEP. 1. - électrode ionisante; 2. - électrode électrostatique tubulaire; 3. - électrode cylindrique tournante reliée à la terre.

Fig. 4.4. Particules métalliques et isolantes provenant de déchets industriels de laiton, incomplètement dissociées. 1. - scorie avec des inclusions de laiton; 2. - particule de laiton avec des inclusions d'oxyde de zinc ; 3. - laiton avec des inclusions de scorie.

Fig. 4.5. Configuration des électrodes du séparateur électrostatique de laboratoire ELSEP, à zone étendue de champ ionisé.

Fig. 4.6. a). Schéma de l'expérience de séparation électrostatique de déchets industriels de laiton (échantillon # 1), en utilisant la configuration champ ionisé + champ harmonique du séparateur ELSEP. b). Distribution massique du matériau granulaire dans les 20 boîtes du collecteur pour les deux opérations de séparation électrostatique.

Tableau 4.3. Analyse chimique des résultats de la séparation électrostatique de la classe granulométrique (0,08...1)mm.

Fig. 4.7. Schéma de l'expérience de séparation électrostatique de l'échantillon # 2 (0,08...0,2 mm), en utilisant le séparateur ELSEP à zone étendue de champ ionisé.

Fig. 4.8. Distribution massique du matériau granulaire dans les 20 boîtes du collecteur, pour les deux opérations de séparation électrostatique de l'échantillon # 2 (0,08...0,2 mm).

Tableau 4.4. Analyse chimique des résultats de la séparation électrostatique de l'échantillon # 2 (0,08...0,2 mm).

Fig. 4.9. a). Schéma de l'expérience de séparation électrostatique de l'échantillon # 3 (0,2...1 mm), en utilisant l'électroséparateur de laboratoire ELSEP à zone étendue de champ ionisé. b). Distribution massique du matériau granulaire dans les 20 boîtes du collecteur.

Tableau 4.5. Analyse chimique des résultats de la séparation électrostatique de l'échantillon # 3 (0,2...1 mm).

Fig. 4.10. Aspect des particules dans le produit "conducteur" (a) et dans le produit "non-conducteur" (b), obtenus par séparation électrostatique des déchets industriels de laiton.

Fig. 4.11. Paramètres et variables dans un processus de séparation électrostatique, qui influencent les trajectoires des particules.

Fig. 4.12. Décharge couronne en polarité positive produite par une électrode à pointes ionisantes ($p = 20$ mm-distance entre les pointes), en présence des particules métalliques et isolantes sur la surface de l'électrode cylindrique. 1. - électrode cylindrique reliée à la terre; 2. - support métallique du pointe ionisante en fil de tungstène $\phi = 0,15$ mm, fixé par tube flexible; 3. - support électrostatique $\phi = 20$ mm; 4. - décharge couronne positive 5. -, décharge couronne inverse (négative).

Fig. 4.13. Distribution des particules métalliques et d'isolant dans les boîtes du collecteur dans une expérience de séparation électrostatique

Tableau 4.6. Evaluation de l'efficacité d'un processus de séparation.

Fig. 4.14. Forme et dimensions des particules métalliques et isolantes composant les mélanges granulaires aluminium - PVC (a) et cuivre - PVC (b). 1. - granule de PVC; 2. - granule Al-PVC non-dissocié; 3. - aluminium; 4. - cuivre.

Fig. 4.15. Diagramme d'une expérience pour l'étude de l'influence de l'humidité superficielle du matériau granulaire sur le processus de séparation.

Fig. 4.16. a). Régime de fonctionnement d'un séparateur électrostatique de laboratoire pour l'étude de l'influence de l'humidité superficielle du matériau granulaire sur l'efficacité de la séparation métal-isolant; b). Résultats d'un processus de séparation aluminium-PVC.

Tableau 4.7 Résultats d'une expérience de séparation électrostatique d'un échantillon humide Aluminium-PVC.

Fig. 4.17. Pureté et taux de récupération du métal obtenu par séparation électrostatique des échantillons contenant 50 % Aluminium-50 % PVC, en fonction de l'humidité superficielle W du matériau granulaire.

Fig. 4.18. Pureté et taux de récupération de l'isolant obtenu par séparation électrostatique des échantillons contenant 50 % Aluminium-50 % PVC, en fonction de l'humidité superficielle W du matériau granulaire.

Fig. 4.19. Distribution du matériau humide dans les 20 boîtes du collecteur dans une expérience de séparation électrostatique PVC-Aluminium.

Fig. 4.20. Distribution volumétrique (a) et massique (b) des produits de la séparation électrostatique métal-isolant, pour des échantillons contenant 50 % cuivre et 50 % PVC, en fonction de l'humidité superficielle W du matériau granulaire.

Fig. 4.21. Séparateur électrostatique industriel ELSIM 2, en fonction à l'ICME S.A. Bucarest, Roumanie. 1. - électrode cylindrique tournante reliée à la terre; 2. - vibrotransporteur; 3. - électrode ionisante; 4. - électrode électrostatique; 5. - palette. L'électrode cylindrique tournante de rayon $R_c = 75$ mm a une vitesse de rotation variable dans le domaine (0...400) tr/mn. La source haute tension est réglable, (0...40) kV, 5 mA, et réversible.

Fig. 4.22. Régime initial de fonctionnement du séparateur électrostatique ELSIM 2.

Fig. 4.23. Résultats d'une expérience de séparation électrostatique en utilisant le séparateur ELSIM 2 avec le régime de fonctionnement présenté sur la Fig. 4.22.

Fig. 4.24. Configuration du séparateur électrostatique de laboratoire ILES 1 et paramètres du régime de fonctionnement pour le tri de mélanges granulaires métal-isolant provenant de déchets de câbles électriques de l'ICME S.A. Bucarest

Fig. 4.25. Résultats du processus de séparation électrostatique du mélange granulaire caoutchouc-cuivre, sur l'installation de laboratoire ILES 1 (le régime de fonctionnement est présenté sur la Fig. 4.24).

Fig. 4.26. Régime amélioré de fonctionnement du séparateur industriel ELSIM 2.

Fig. 4.27. Résultats d'une expérience de séparation électrostatique en utilisant pour le séparateur ELSIM 2 le régime amélioré de fonctionnement, présenté sur la Fig. 4.26.

Fig. 4.28. Electrodes équipées de différents types de pointes ionisantes. 1. support électrostatique; 2. - support métallique de la pointe ionisante; 3. - tube flexible (caoutchouc); 4. - pointe ionisante en fil métallique; 5. - tube métallique; 6. - pointe ionisante en acier (aiguille); (p = distance entre les pointes ionisantes).

Tableau 4.8. Résultats des expériences de séparation cuivre-PVC en utilisant pour le séparateur électrostatique ELSIM 2 des électrodes équipées de différents types de pointes ionisantes. Le régime de fonctionnement est présenté sur la Fig. 4.25.

Fig. 4.29. a). Particules de mica (M) de forme aplatie (paillettes), particules de quartz (Q) et feldspath (F) de forme isométrique. b). Définition du coefficient de forme des particules.

Fig. 4.30. Forces image électrique F_i et centrifuge F_c qui agissent sur les particules aplaties (paillettes de mica) et isométriques (feldspath et quartz).

Fig. 4.31. Forces image électrique F_i et centrifuge F_c agissant sur les particules aplaties de mica et isométriques de feldspath et quartz dans le cas de l'électrode cylindrique reliée à la terre et revêtue d'un isolant.

Tableau 4.9. Composition chimique du produit de mica, classe granulométrique (0,1...0,2) mm. Le mica pur, $\text{H}_2\text{KAl}_3(\text{SiO}_4)_3$, contient 45,26 % SiO_2 , 38,41 % Al_2O_3 , 11,83 % K_2O et 4,5 % H_2O .

Fig. 4.32. Configuration des électrodes du séparateur de laboratoire ELSEP et régime de fonctionnement pour la séparation électrostatique selon le coefficient de forme du matériau granulaire mica-feldspath-quartz, classe granulométrique (0,1...0,2) mm.

Tableau 4.10. Analyse chimique (a) et minéralogique (b) des produits obtenus par séparation électrostatique du matériau granulaire mica-feldspath-quartz classe granulométrique (0,1...0,2) mm). Le séparateur ELSEP a été équipé d'une électrode qui génère une zone étendue de champ ionisé.

Fig. 4.33. Trajectoires des paillettes de mica et des granules isométriques de feldspath-quartz classe granulométrique (1...3) mm, dans un processus de séparation électrostatique selon le coefficient de forme des particules. 1. - paroi latérale pour limiter les trajectoires du mica; 2. - trajectoires des paillettes de mica; 3. - électrode cylindrique en verre; 4. - électrode ionisante; 5. - trajectoires des granules isométriques de quartz et feldspath; 6. - palette. L'électrode à pointes ionisantes (fils de tungstène $\phi = 0,2$ mm) est portée à une tension positive de 20 kV. La distance entre les pointes ionisantes et l'électrode cylindrique a été fixée à $s = 30$ mm.

Tableau 4.11. Quantités de mica récupéré par la séparation électrostatique du matériau granulaire mica-feldspath-quartz, classes granulométriques (0,315...1) mm et (1...3) mm, en utilisant la Méthode I (électrode cylindrique métallique) et la Méthode II (électrode cylindrique en verre).

Fig. 4.34. Produits de grande pureté de mica (a) et de feldspath-quartz (b), obtenus par séparation électrostatique selon le coefficient de forme des particules.

Fig. 4.35. Configuration des électrodes et régime de fonctionnement du séparateur ELSEP pour la séparation électrostatique selon le coefficient de forme des particules du matériau granulaire mica-feldspath-quartz, classe granulométrique (0,1...0,2) mm. L'électrode cylindrique métallique ($\phi = 230$ mm) reliée à la terre est revêtue d'un isolant (fibres de verre, $\delta = 3$ mm).

Tableau 4.12. Analyse chimique (a) et minéralogique (b) des produits de l'expérience de séparation électrostatique du matériau granulaire mica-feldspath-quartz classe granulométrique (0,1...0,2) mm). Le séparateur ELSEP a été équipé d'une électrode cylindrique tournante métallique, revêtue d'un isolant (fibres de verre).

Table des matières



Introduction.....	5
Chapitre 1. Analyse des processus de charge des particules.....	7
1.1 Analyse des processus de charge des particules dans les séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante.....	9
1.1.1 Champ électrique dans les séparateurs électrostatiques.....	9
1.1.2. Caractérisation des mélanges de matériaux granulaires soumis à la séparation en champ électrique.....	11
1.1.3. Modélisation des processus de charge des particules.....	12
1.2. Calcul numérique de la charge à saturation des particules isolantes en champ ionisé.....	16
1.2.1. Méthode de calcul de la charge à saturation pour des particules isolantes à proximité d'une électrode.....	17
1.2.2. Calcul de la charge à saturation des particules sphériques.....	19
1.2.3. Calcul de la charge à saturation des particules cylindriques.....	22
1.3. Influence de la forme de l'onde haute tension sur la charge acquise par des particules isolantes lorsqu'elles traversent une zone de champ ionisé.....	24
1.3.1. Méthode de calcul numérique.....	24
1.3.2. Charge des particules sous tension redressée double-alternance.....	25
1.3.3. Influence du phénomène de répulsion des ions.....	28
Chapitre 2. Etude expérimentale de la charge des particules isolantes en champ ionisé.....	31
2.1 Caractérisation des électrodes ionisantes.....	33
2.1.1. Distribution de la densité de courant sur la surface de l'électrode collectrice.....	33
2.1.2. Evaluation de l'efficacité des électrodes ionisantes selon la distribution de courant.....	36
2.1.3. Influence de la configuration géométrique des électrodes ionisantes sur la distribution du champ électrique.....	40
2.2. Mesure de la charge des particules isolantes pour différentes configurations d'électrodes ionisantes.....	46
2.2.1. Dispositif expérimental pour l'étude de la charge des particules dans un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante reliée à la terre....	46
2.2.2. Charge des particules isolantes dans le champ ionisé produit par des électrodes à pointes ionisantes.....	48
2.2.3. Evaluation de l'efficacité des électrodes ionisantes en fonction de la charge acquise par les particules.....	52

2.3. Mesure de la charge des particules isolantes en champ ionisé pour différentes valeurs des paramètres expérimentaux.....	56
2.3.1. Influence de l'amplitude de la haute tension et de la distance entre les électrodes.....	57
2.3.2. Influence de la vitesse de rotation de l'électrode cylindrique et de la vitesse de la particule.....	60
2.3.3. Influence des propriétés des matériaux, des conditions environnementales et du revêtement isolant de l'électrode cylindrique.....	62
 Chapitre 3. Trajectoires des particules en champ électrique.....	67
3.1. Analyse des trajectoires des particules dans le séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante.....	70
3.1.1. Equations du mouvement.....	70
3.1.2. Analyse des trajectoires des particules conductrices.....	72
3.1.3. Analyse des trajectoires des particules isolantes.....	74
 3.2. Mouvement des particules conductrices en champ harmonique.....	77
3.2.1. Modèle physique et mathématique.....	78
3.2.2. Calcul numérique du champ de décollement.....	81
3.2.3. Etude expérimentale du comportement des particules conductrices en champ harmonique.....	82
 3.3 Mouvement des particules conductrices en champ ionisé.....	86
3.3.1. Modèle physique et mathématique.....	87
3.3.2. Etude expérimentale du comportement des particules sphériques	91
3.3.3. Etude expérimentale du comportement des particules cylindriques.....	95
 Chapitre 4. Applications technologiques.....	101
4.1. Charge des matériaux granulaires dans une zone étendue de champ ionisé. Récupération du laiton de déchets industriels.....	103
4.1.1. Schéma technologique de récupération du laiton.....	103
4.1.2. Procédé de séparation utilisant une zone étendue de champ ionisé.....	106
4.1.3. Résultats de la séparation.....	109
 4.2. Trajectoires de séparation des particules métalliques et isolantes. Recyclage des déchets de câbles électriques.....	116
4.2.1. Facteurs qui influencent les trajectoires de séparation.....	116
4.2.2. Influence de l'humidité superficielle des particules sur le processus de séparation.....	120
4.2.3. Amélioration du régime de fonctionnement d'une installation industrielle de séparation métal-isolant.....	127

4.3. Trajectoires de séparation mica-feldspath-quartz selon le coefficient de forme des particules.....	134
4.3.1. Procédé de séparation électrostatique selon le coefficient de forme des particules.....	134
4.3.2. Trajectoires de séparation mica-feldspath-quartz en champ ionisé.....	139
4.3.3. Influence du revêtement isolant de l'électrode cylindrique.....	141
 Conclusion générale - Perspectives.....	 147
Annexes.....	151
Annexe 1 : Distribution de la densité de courant sur la surface de l'électrode collectrice face à une électrode à trois lignes de pointes ionisantes décalées d'un demi-pas.....	153
Annexe 2 : Calcul numérique de la force électrique résultante qui s'exerce sur une particule conductrice cylindrique posée verticalement sur l'électrode.....	156
Annexe 3 : Evaluation expérimentale de la constante de temps du processus de décharge d'une particule isolante en contact avec l'électrode cylindrique tournante reliée à la terre.....	158
 Liste des symboles.....	 160
Références bibliographiques.....	165
Liste des illustrations et des tableaux.....	175
Table des matières.....	191

Rezumat

Principalul obiectiv al tezei consta intr-o mai buna intelegere a fenomenelor fizice implicate in procesul de separare electrostatica. Studiul s-a concentrat asupra mecanismelor de incarcare cu sarcina a particulelor in camp corona si asupra factorilor ce influenteaza sarcina acumulata si traiectoriile acestora in separatoarele electrostatice cu electrod cilindric purtator.

O metoda originala de calcul a sarcinii de saturatie este utilizata pentru cazul particulelor sferice si cilindrice situate in camp corona, in contact sau in apropierea unui electrod. Algoritmul se bazeaza pe calculul numeric al campului electric si utilizeaza programul "Charge Simulation Program" bazat pe Metoda Elementelor de Frontiera. Tot un model numeric este propus si pentru analiza dinamicii procesului de incarcare cu sarcina a particulelor in zona de camp corona a electroseparatoarelor, luand in considerare forma de unda pulsatorie a sursei de inalta tensiune.

Utilizand un dispozitiv care modeleaza conditiile de incarcare a particulelor in separatoarele electrostatice cu electrod cilindric purtator legat la pamant s-a realizat un studiu experimental sistematic asupra factorilor ce influenteaza cantitatea de sarcina acumulata de particule in zona de camp corona a acestor instalatii si asupra eficacitatii diferitelor tipuri de electrozi. Uniformitatea distributiei de sarcina spatiala, un alt criteriu de comparatie intre electrozii corona cu puncte fixe de descarcare a fost evaluata experimental, prin masurarea densitatii de curent la suprafata unui electrod colector plan plasat in fata electrodului corona.

Ecuatiile de miscare a particulelor intr-un separator electrostatic cu cilindru purtator sunt stabilite atat pentru particule conductoare cat si pentru cele izolante, teza aducand contributii la imbunatatirea modelului matematic al traiectoriilor. Studiul experimental al comportarii particulelor conductoare in camp electrostatic si in camp corona a scos in evidenta influenta unor parametri fizici ai particulelor asupra campului de desprindere si asupra tensiunii la care prezenta particulelor in intervalul dintre electrozi produce clacajul.

Rezultatele acestui studiu contribuie la dezvoltarea catorva aplicatii industriale ale procesului de electroseparare. Teza pune in evidenta posibilitatea de a recupera alama din deseuri metalurgice utilizand un electrod corona care genereaza o zona extinsa de sarcina spatiala si asigura ameliorarea conditiilor de incarcare a particulelor. Diverse solutii sunt analizate in scopul perfectionarii procesului de recuperare a metalului si izolatiei din deseuri granulate de cabluri electrice. Un studiu sistematic a fost efectuat in vederea stabilirii limitei umiditatii superficiale a materialului granular care pastreaza la valori acceptabile pentru reciclare, puritatea si gradul de recuperare a metalului si izolatiei. O noua tehnologie, bazata pe diferenta de forma intre particulele componente ale amestecului granular este propusa pentru ridicarea puritatii concentratelor de mica din minereurile pegmatitice de la Muntele Rece - Cluj.

Prezenta lucrare a fost elaborata in cadrul unui program de cooperare stiintifica intre Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca - Laboratorul de Campuri Electrice Intense al Facultatii de Electrotehnica si Universitatea Joseph Fourier din Grenoble - Laboratorul de Electrostatica si Materiale Dielectrice.

Cuvinte cheie: electrostatica; camp corona; sarcina electrica; traiectoriile particulelor; separare electrostatica; materiale granulare; descarcare corona; inalta tensiune

Résumé

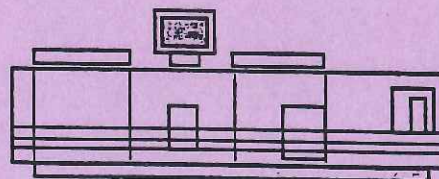
L'objectif de ce travail a été d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu dans les séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante. Les études ont porté essentiellement sur les mécanismes de charge des particules et sur les facteurs qui influencent les trajectoires de celles-ci dans le champ électrique de ces installations. Une méthode originale, basée sur l'analyse numérique du champ électrique, est proposée pour le calcul de la charge acquise en champ ionisé par des particules isolantes de forme et de dimensions variées posées sur une électrode ou à proximité de celle-ci. Les prédictions théoriques sont confirmées par des mesures effectuées sur une installation expérimentale qui modélise les conditions de charge spécifiques aux séparateurs électrostatiques et qui permet une évaluation de l'efficacité de divers types d'électrodes ionisantes. Des expériences réalisées avec un autre dispositif montrent que cette efficacité est liée à l'intensité du courant généré par l'électrode et à l'uniformité de sa distribution à la surface de l'électrode collectrice. Un modèle numérique amélioré est proposé pour l'étude du comportement des particules conductrices en champ harmonique ou ionisé et pour le calcul de leurs trajectoires dans les séparateurs électrostatiques à électrode cylindrique tournante. Le modèle a été validé par des expériences réalisées dans diverses configurations d'électrodes. Les résultats de ces études contribuent au développement de quelques applications industrielles. Elles montrent, par exemple, la possibilité d'utiliser un séparateur électrostatique à zone étendue de champ ionisé pour la récupération du laiton des déchets industriels. Diverses solutions sont analysées pour recycler les matériaux isolants et les métaux provenant des déchets de câbles électriques. Enfin, une technologie nouvelle est proposée pour augmenter la concentration de mica obtenu de pegmatites.

Mots clés :

électrostatique; champ ionisé; charge électrique; trajectoires des particules;
séparation électrostatique; matériaux granulaires; décharge couronne; haute tension



Grenoble, mai 1997



Imprimé sur "Xerox 5090",
au Service Reprographie du CNRS de Grenoble.