

SEPARATION ELECTROSTATIQUE DES PARTICULES : UNE TECHNOLOGIE EFFICACE DANS L'INDUSTRIE DE RECYCLAGE

Reçu le 30/07/2003 – Accepté le 06/09/2004

Résumé

La séparation électrostatique du cuivre, aluminium et des matériaux isolants électriques représente une technologie économiquement viable pour la préservation de l'environnement, car elle offre du plastique recyclé de qualité élevée et une meilleure efficacité pour le recouvrement des métaux que les méthodes conventionnelles de traitement des déchets. L'électro-séparation isolant-métal représente de nos jours une technologie moderne de recyclage des matériaux usagés issus des déchets industriels; elle est considérée comme la meilleure possibilité utilisée pour la séparation d'un mélange de granules isolant-métal. Le présent article est consacré à la description globale de réalisation d'un électro-séparateur conçu au laboratoire et baptisé SELMEG (Séparateur Electrostatique de Mélanges Granulaires), ainsi que son exploitation industrielle à travers une étude sur des échantillons réels mis à notre disposition par les entreprises nationales de récupération en l'occurrence l'Entreprise Nationale des Câbles ENICAB et l'Entreprise de Récupération de l'Ouest ERO.

Mots clés: Séparation électrostatique, recyclage, recherche minière, haute tension.

Abstract

The electrostatic separation of copper, aluminium and of electro-insulating materials represents a technology economically viable for the safeguarding of the environment, because it offers recycled plastic of high quality and a better effectiveness for the recovery of metals than the conventional methods of waste processing. Electro-separation of isolate-metal material represents nowadays, a modern technology for recycling materials resulting from the industrial wastes, it is considered as the best possibility used for separation of a granular isolate-metal mixture. This article is devoted to the description of an electro-separator realization designed at the laboratory and baptized SELMEG (Séparateur Electrostatique de Mélanges Granulaires), and its industrial exploitation through a study on real samples offered by the national companies of electrical cables manufacturing ENICAB and recycling ERO.

Keywords: Electrostatic separation, recovery, mineral beneficiation, high voltage.

A. TILMATINE¹

Z. AZZOUZ²

M. YOUNES¹

M. BRAHAMI¹

L. DASCALESCU³

¹Département Electrotechnique
Université de Sidi Bel Abbes
Sidi Bel Abbes, (Algérie)

²Département Electrotechnique
USTO Oran (Algérie)

³Laboratoire EIAA, IUT
Angoulême (France)

ملخص

إن العزل الكهربائي للنحاس، الألمنيوم و المواد العازلة كهربائيا من النفايات الصناعية يمثل تكنولوجيا اقتصادية دون التأثير على البيئة، إذ أنه ينتج بلاستيك ذا جودة عالية ويقدم كذلك مردود أكبر من الذي تقدمه الطرق التقليدية لمعالجة النفايات الصناعية.

يمثل العزل الكهربائي معدن / بلاستيك في أيامنا هذه تكنولوجيا عصرية لإعادة تصنيع النفايات الصناعية. هذه المقالة موجهة إلى الوصف الشامل لنموذج آلة عزل صممت في المختبر وسميت SELMEG وكذلك استغلالها صناعيا من خلال دراسة أجريت على نفايات كوابل كهربائية قدمت من طرف شركات وطنية مثل ENICAB (بسكرة) و ERO (وهران).

الكلمات المفتاحية: معالجة النفايات، العزل الكهربائي.

Les techniques électrostatiques ont été largement utilisées pour la séparation à sec de petites particules offrant une large différence de conductivité [1,2]. La séparation électrostatique est un terme générique donné à une importante classe de technologies de traitement de matériel, largement utilisée pour le triage des mélanges granulaires grâce à des forces électriques agissant sur des particules chargées ou polarisées [3].

L'électro-séparateur à tambour tournant, utilisant la décharge couronne pour charger les granules, permet de séparer un mélange granulaire isolant-métal (PVC-Cuivre, par exemple) avec une pureté qui peut atteindre des valeurs de 100%.

1- PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'ELECTRO-SEPARATEUR

La figure 1 montre les différents éléments composant le séparateur et le rôle de chacun d'eux.

Des charges électriques sont créées par ionisation de l'air grâce à la décharge couronne générée par l'électrode à pointes (1), appelée électrode couronne. Les granules déposés sur le cylindre tournant (3) par le vibro-transporteur (4) acquièrent tous une charge électrique de même signe que le potentiel de la haute tension continue, et se comportent différemment suivant qu'ils sont électriquement conducteurs ou isolants.

1/ Les granules isolants restent "collés" et adhèrent à la surface du tambour grâce à la force d'image électrique. Ils tombent dans la partie

du collecteur (7) qui leur est réservée lorsque la force de pesanteur l'emporte sur la force d'image. Pour assurer la chute de ces particules, certains électro-séparateurs sont équipés d'une autre électrode à pointes, appelée électrode de neutralisation (5), pour éliminer la charge q par neutralisation. Les particules qui ne tombent pas et qui restent "collées" sont éliminées de la surface du tambour par une brosse (6).

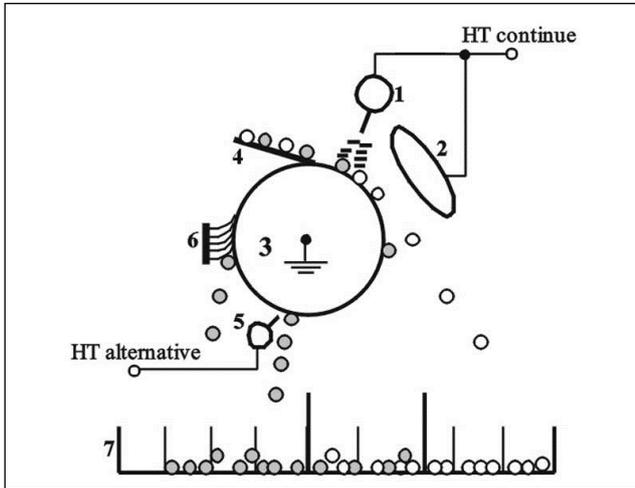


Figure 1: Schéma descriptif de l'électro-séparateur et ses éléments constitutants : (1) Electrode couronne reliée à une source de HT, (2) Electrode statique reliée à la même source de HT, (3) Electrode cylindrique reliée à la terre, (4) Vibro-transporteur, (5) Electrode de neutralisation reliée à une source HT alternative, (6) Brosse, (7) collecteur de particules.

2/ *Les granules conducteurs* perdent rapidement la charge à travers le cylindre relié à la terre, en arrivant dans la zone du champ électrostatique généré par l'électrode statique de forme elliptique (2). Ils acquièrent par induction électrostatique une charge de signe opposé au potentiel de la haute tension, et sont ensuite attirés par l'électrode elliptique et collectés dans la partie droite du collecteur.

Dans tous les cas, le produit granulaire à séparer est déposé sur la surface de l'électrode cylindrique reliée à la terre, qui l'introduit dans la zone du champ électrique. Deux mécanismes de charge sont simultanément employés: "bombardement ionique" et "induction électrostatique". Le premier est destiné aux particules isolantes seulement, passant à travers la décharge couronne; le deuxième concerne seulement les particules conductrices en contact avec le tambour en présence d'un champ électrique externe, à savoir le champ électrostatique généré par l'électrode elliptique [4].

2- FORCES AGISSANT SUR LES PARTICULES

Les particules sont soumises à deux types de force (Fig.2) [5] :

2.1- Forces électriques

- Force du champ électrostatique

$$F_e = q_{ind} E \quad (1)$$

qui n'agit pratiquement que sur les granules métalliques, avec : E : champ électrostatique généré par l'électrode statique

elliptique.

q_{ind} : charge du granule métallique acquise par induction électrique, sous l'action de E , de signe opposé au potentiel haute tension de l'électrode.

- Force d'image électrique

$$F_i = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0(2d)^2} \quad (2)$$

qui n'agit pratiquement que sur les particules isolantes, avec :

q : charge du granule acquise par bombardement ionique dans la zone à effet couronne,

d : distance séparant le centre du granule à la surface du tambour.

2.2- Forces mécaniques

- Force centrifuge

$$F_c = m\omega^2 R \quad (3)$$

- Force de pesanteur

$$F_g = mg \quad (4)$$

avec:

m : masse de la particule ;

ω : vitesse angulaire du cylindre ;

R : rayon du cylindre ;

g : gravitation universelle.

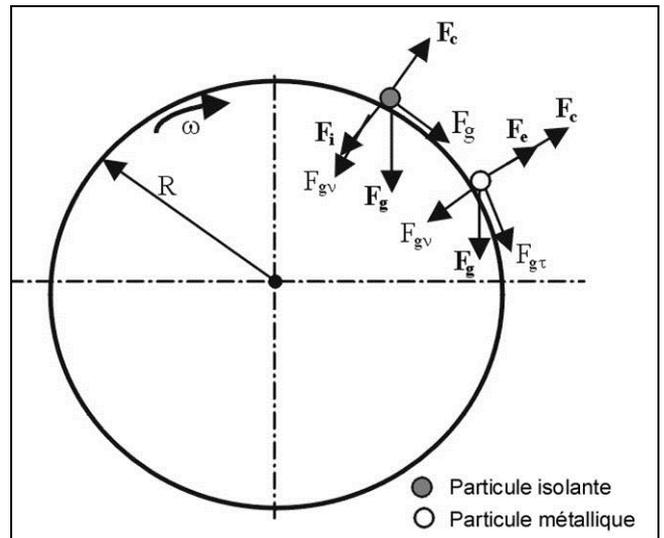


Figure 2: Forces agissant sur les particules.

3- PARAMETRES INFLUENTS DU SEPARATEUR

Les paramètres influençant du séparateur sont rassemblés dans le tableau 1 et la figure 3.

Quelques uns de ces paramètres sont fixés au départ, lors de la conception de l'appareil, comme par exemple: type et position du vibro-transporteur, position du collecteur, nombre d'électrodes, forme de la tension. Généralement, l'étude de la séparation est basée sur la variation de 4 paramètres importants à savoir, le niveau et la polarité de la haute tension appliquée, la vitesse de rotation du tambour, le débit du vibro-transporteur et la température du produit granulaire [6-8].

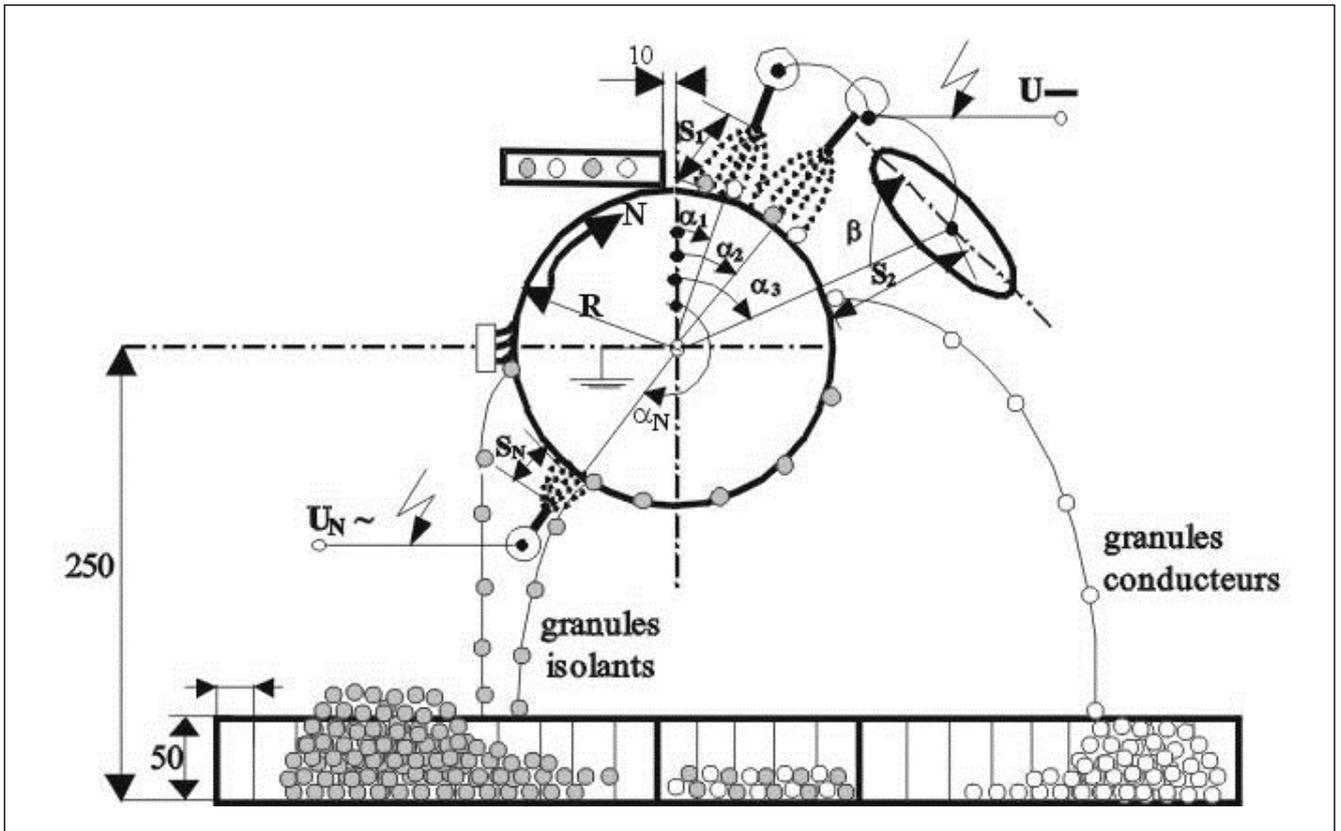


Figure 3: Paramètres et variables dans un processus de séparation électrostatique.

Tableau 1: Paramètres variables du processus.

mécaniques	produit	ambiance	électriques
-Vibro-transporteur *type *position *débit	Conductivité des particules	Température	Electrodes actives *type *position *nombre
-Cylindre *rayon *vitesse	Forme et dimensions des particules	Humidité	Electrode de neutralisation *type *position
-Collecteur *type *position	Densité volumique des particules	Poussière	Haute tension *forme de la tension *polarité *niveau

- Vitesse de rotation du tambour variable ;
- Position de l'entonnoir réglable ;
- Position du vibro-transporteur réglable ;
- Position de la brosse réglable ;
- Positions radiales et angulaires des électrodes haute tension réglables.

Le SELMEG comprend dans sa conception trois parties distinctes (Fig. 4) :

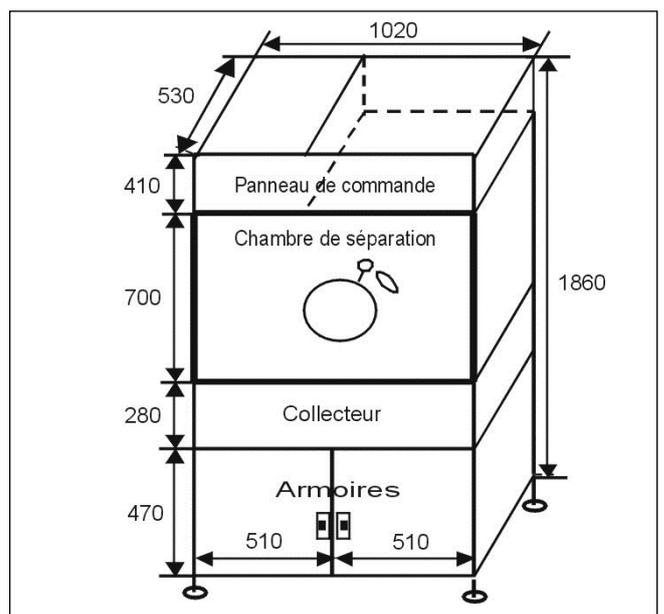


Figure 4: Schéma global du SELMEG.

4- DESCRIPTION

Le Séparateur Electrostatique de Mélanges Granulaires SELMEG, est un modèle de laboratoire, et contrairement à l'électro-séparateur industriel, il doit en plus offrir des possibilités de réglage de plusieurs paramètres afin d'étudier l'influence de chacun d'eux sur les rendements de la séparation pour différents types de mélanges granulaires. Le SELMEG tel que conçu possède les particularités suivantes :

- La possibilité d'utiliser deux tambours de diamètres différents ;

- Une chambre de séparation où sont traités les mélanges granulaires, c'est la partie la plus importante ;
- Un panneau de commande des différents éléments ;
- Un collecteur de récupération des particules.

La figure 5 montre la partie la plus importante de l'appareil, en l'occurrence la chambre de séparation où s'effectue le triage des mélanges granulaires.

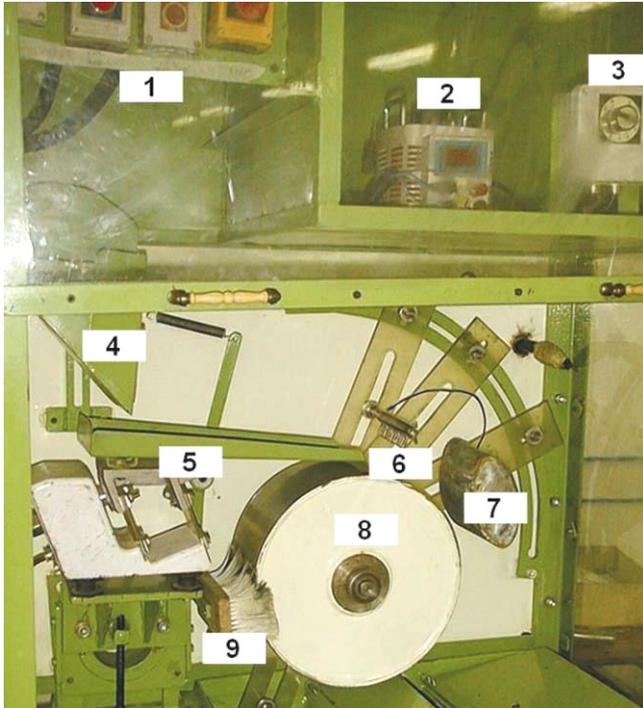


Figure 5: Photographie de la chambre de séparation du SELMEG : 1. Boutons Marche/Arrêt. 2. Variateur de vitesse. 3. Variateur de l'amplitude des vibrations du vibro-transporteur. 4. Entonnoir d'alimentation. 5. Vibro-transporteur. 6. Electrode d'alimentation. 7. Electrode statique. 8. Tambour. 9. brosse.

5- CHOIX DE LA VITESSE OPTIMALE DU TAMBOUR

Nous avons préparé un mélange granulaire de 245g constitué de 175g de cuivre massif et de 70g PVC (polychlorure de vinyle) dont la granulométrie moyenne ne dépasse pas 5 mm.

Le réglage des paramètres de l'électro-séparateur est établi en effectuant quelques essais préliminaires afin de déterminer le positionnement optimal de l'électrode couronne, de l'électrode statique et surtout des parois pivotantes qui jouent un rôle important dans la récupération suivant la trajectoire des particules granuleuses.

Les essais se sont déroulés en fixant une tension continue constante de 28 kV et en faisant varier la vitesse de rotation du cylindre tournant entre 40 et 180 tr/min. Après chaque opération de séparation, les quantités de cuivre, du PVC et du produit mixte récupérées dans chacun des trois compartiments du collecteur sont pesées avec une balance électronique de précision 0,1g. La performance du processus est estimée après pesage des quantités relatives de cuivre et PVC collectées dans chaque compartiment afin de calculer la pureté des deux matériaux récupérés.

La courbe de la figure 6 représente la pureté du matériau

récupéré (conducteur et isolant) en fonction de la vitesse de rotation du tambour. Elle montre que la pureté des particules métalliques est maximale pour une vitesse de 80 tr/min. La vitesse est maintenue à cette valeur pour les essais effectués sur des échantillons industriels.

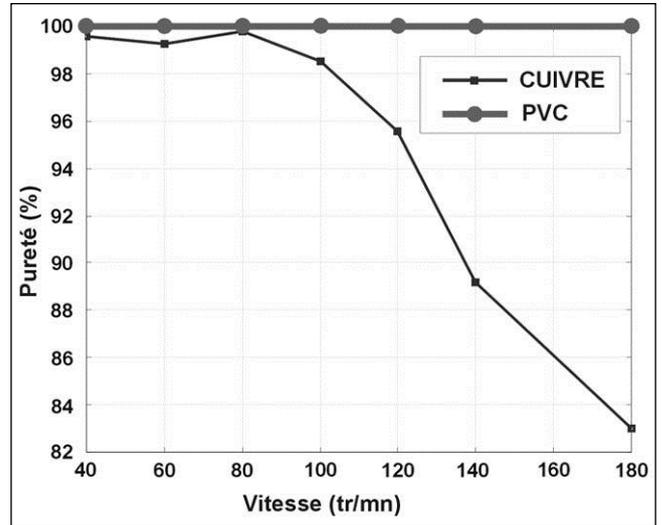


Figure 6: Variation de la pureté du cuivre et du PVC en fonction de la vitesse de rotation du cylindre.

6- EXPLOITATION INDUSTRIELLE

Les essais de séparation électrostatique sont effectués sur deux échantillons industriels différents E₁, E₂ prélevés du processus industriel de séparation mécanique par différence de densité (Fig. 7).

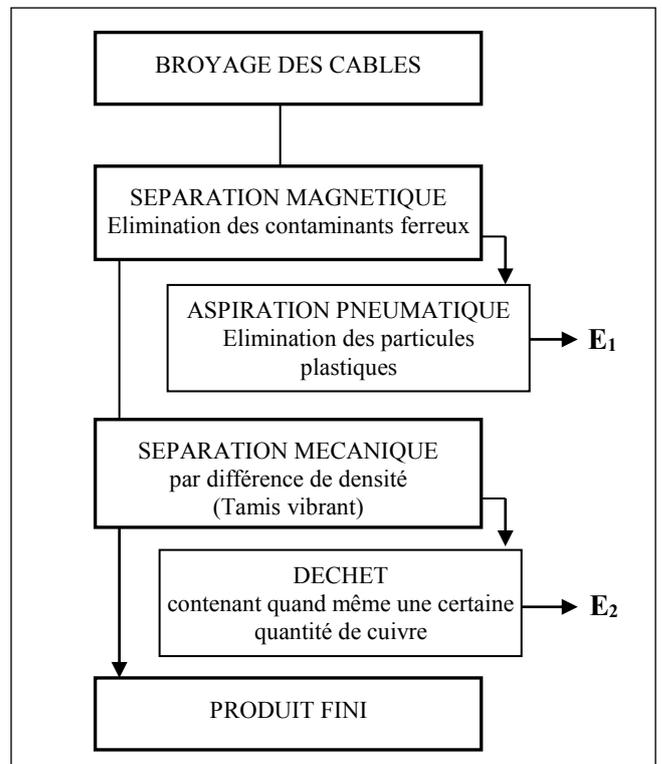


Figure 7: Endroits de prélèvement des échantillons dans le processus de séparation mécanique.

6.1- Echantillon industriel E1

Cet échantillon est prélevé de la quantité collectée par aspiration pneumatique, devant contenir en grande partie du plastique et qu'une quantité infime de cuivre. Néanmoins, une grande quantité de cuivre passe à travers l'aspirateur causant *a priori*, une perte sèche en cuivre s'élevant à plus de 50%. L'étude est réalisée sur un échantillon de masse totale 113g, comprenant 56,5g de plastique et 56,5g de cuivre. L'essai s'est déroulé sous une tension de 26 kV avec une vitesse de rotation du tambour fixée à 80tr/min.

Les résultats obtenus après pesage des masses collectées dans chaque compartiment (Tab. 2) traduisent l'efficacité de séparation à travers le calcul des critères « Pureté » et « Récupération ».

Tableau 2: Résultats de séparation de l'échantillon industriel E1 de masse totale 113g (56,5g de cuivre et 56,5g de PVC).

	Masse de cuivre [g]	Masse de plastique [g]
Compartiment « Cuivre »	42,3	0,4
Compartiment « plastique »	0,1	37,1
Compartiment « mixte »	14,1	19,0
Pureté [%]	99,06	99,73
Récupération [%]	74,86	65,66

Sachant que la pureté est définie comme étant le rapport entre la masse de cuivre récupérée dans le "compartiment cuivre" et la masse totale récupérée dans ce même compartiment :

$$\text{Pureté (\%)} = 42,3/42,7 = 99,06 \%$$

la récupération est définie comme étant le rapport entre la masse du cuivre récupérée dans le "compartiment cuivre" et la masse totale du cuivre :

$$\text{Récupération (\%)} = 42,3/56,5 = 74,86 \%$$

Les résultats obtenus sont très intéressants, puisque près de 75% de métal est récupéré avec une pureté égale à 99,06 %. Il est possible de récupérer plus de cuivre, en procédant à une deuxième opération de séparation du produit collecté dans le compartiment mixte. Cette seconde opération a permis de récupérer 15 % de cuivre supplémentaire. Il en résulte que la totalité du cuivre récupéré par électro-séparation s'élève à près de 90%.

6.2- Echantillon industriel E2

L'échantillon E2 de masse totale 51,3g composé de 16,8 g de cuivre et 34,5 g de PVC, prélevé à la fin du cycle industriel, est le déchet "normal" (produit mixte) de la séparation mécanique ne devant contenir que très peu de cuivre. Nous avons été surpris de trouver plus de 30% de cuivre perdu dans ce produit mixte (Tab. 3). L'opération de séparation est réalisée sous une tension de 20 kV avec la même vitesse.

Ces résultats prouvent que le déchet contient plus de 30% de cuivre (16,8g de cuivre sur une quantité globale de 51,3g), dont plus de 82% est récupéré par électro-séparation avec une pureté supérieure à 99%.

Tableau 3: Résultats de séparation de l'échantillon industriel E2 de masse totale 51,3g (16,8g de cuivre et 34,5g de PVC).

	Masse de cuivre [g]	Masse de plastique [g]
Compartiment « Cuivre »	13,8 g	0,1 g
Compartiment « plastique »	0,0 g	31,9 g
Compartiment « mixte »	3,0 g	2,5 g
Pureté [%]	99,28	100,00
Récupération [%]	82,14	92,46

CONCLUSION

La séparation électrostatique des matériaux granulaires fait partie des technologies non conventionnelles utilisées dans l'industrie de recyclage, dont le développement actuel est fortement stimulé par les réglementations dans le domaine de la protection de l'environnement.

L'étude présentée fait ressortir l'intérêt de cette technologie surtout pour l'industrie de récupération. Les résultats obtenus sur des échantillons industriels confirment l'intérêt de l'utilisation de la séparation électrostatique dans les entreprises de récupération, qui peut certainement améliorer les rendements en minimisant les pertes de métal rejeté sous forme de mélange avec le plastique. La quantité de cuivre qui serait récupérée, en associant ce processus de séparation électrostatique au processus mécanique, dépasse 80% par rapport à la masse de cuivre perdue.

Malgré les performances satisfaisantes de la séparation électrostatique, elle ne peut remplacer la séparation mécanique qui traite de grandes quantités de matériaux, comparativement à l'électro-séparation. Cette dernière traite en moyenne quelques centaines de kg par heure. Néanmoins, l'association d'un ou plusieurs électro-séparateurs, pour le traitement des déchets contenant encore beaucoup de cuivre, est une solution prometteuse du point de vue technique, économique et environnemental.

REFERENCES

- [1]- Dascalescu L., "Séparateurs électrostatiques pour matériaux granulaires", Exposé présenté au Laboratoire d'électrostatique et de matériaux diélectriques associé à l'université J. Fourier, Grenoble, (7.11.1991).
- [2]- Delon J.F., "Théorie de la séparation électrostatique à l'aide de l'effet corona", *Annales des Mines*, 3, (1966), pp.37-50.
- [3]- Morar R., Iuga Al., Dascalescu L. and Samuila A., "Factors which influence the insulation-metal electroseparation", *J. of electrostatics*, 30, (1993), pp. 403-412.
- [4]- Dascalescu L., "Numerical analysis of the electric field of roll type electrostatic separators", *J. of electrostatics*, 29, (1993), pp.255-267.
- [5]- Khaouani A., "Etude et réalisation d'un électro-séparateur de particules granuleuses isolant-métal", Mémoire de magister à l'université de Sidi Bel Abbes, Algérie (1997).
- [6]- Inculet I.I., Castle G.S.P., Brown J.D., "Electrostatic separation of plastics for recycling", *Particulate Science and Technology*, 16, (1998), pp.91-100.
- [7]- Morar R., Iuga A., Cuglesan I., Muntean O., Dascalescu L., "Iron ore beneficiation using roll-type high-intensity electric field separators", *IEEE Transactions on Ind. Appl.*, vol.35, N°1, Jan./Feb. (1999).
- [8]- Higashiyama Y., Asano K., "Recent progress in electrostatic separation technology", *Particulate Science and Technology*, 16, (1998), pp.77-90. □

