

bille revêtue d'un polymère, plus mou et plus lisse. On peut alors supposer qu'une couche plus profonde du film de polymère est impliquée.

Ce qui précède montre que les mécanismes de transfert d'électrons, d'ions et de matériau peuvent avoir lieu simultanément, pour certains matériaux et des conditions de contact particulières. Pour les contacts métal-isolant, le mécanisme de transfert d'électrons a été établi. Dans le cas d'un contact entre deux isolants, la question est de savoir si le transfert de matériau est le seul mécanisme ou le mécanisme prédominant dans tous les contacts.

Il existe d'autres idées pour expliquer les observations. L'une d'elles suppose l'existence d'un seuil de force ou d'énergie appliquées, au-dessous duquel trop peu de matériau est transféré pour entraîner un échange de charges. Selon une autre conception, on a un continuum de types de

contact : les transferts d'électrons, d'ions et de matériau ont tous lieu, mais ce dernier prend d'autant plus l'ascendant que la force ou la pression appliquée augmentent.

À cet égard, les données quantitatives établies par K.-Y. Law et ses collègues en 1995 pour le transfert d'ions sont intéressantes. Ces chercheurs ont mélangé avec précaution des particules de toner revêtues d'un sel de césium et des particules recouvertes de polymère. Ils ont montré que l'échange de charges est proportionnel à l'intensité de transfert du césium et que cette relation dépend également du temps de brassage.

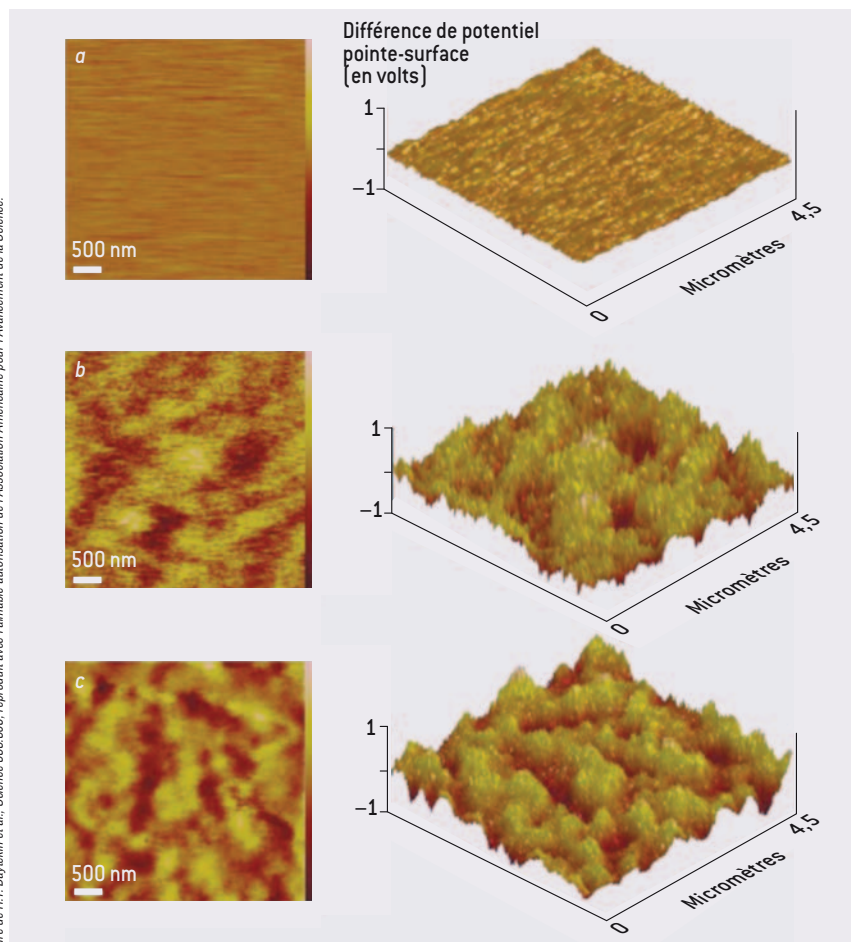
Cela suggère un mécanisme de transfert d'ions césium plutôt qu'un échange de matériau. Les ions mobiles, par leur nature même, se transfèrent plus facilement que les fragments de polymère, qui nécessitent une rupture de liaison. Cela signifierait-il que les forces mécaniques entre les particules de toner et les autres étaient trop faibles pour qu'il y ait simultanément transfert de fragments de polymère ? Y a-t-il une hiérarchie des mécanismes de charge, de telle sorte que plusieurs mécanismes puissent contribuer à la charge en fonction des conditions expérimentales ? En procédant avec des particules métalliques au lieu des particules revêtues de polymère, l'équipe de K.-Y. Law a observé les mêmes corrélations entre le transfert de charges et le transfert d'ions ; cela indique que le transfert d'ions mobiles, quand il est présent, est privilégié par rapport au transfert d'électrons.

Matériaux identiques, mais charges distinctes

Un phénomène continue d'intriguer les expérimentateurs : la possibilité de charge de contact entre matériaux de composition identique. Cette possibilité est en contradiction avec la vieille et trop simpliste idée de « série triboélectrique », qui classe les matériaux selon leur propension à se charger positivement ou négativement. Un matériau se charge positivement par rapport à tous les matériaux qui le précèdent dans la série, ce qui sous-entend qu'une différence de composition est nécessaire pour qu'il y ait charge de contact.

Pourtant, une telle charge se produit quand des polymères identiques sont soit pressés, soit frottés l'un contre l'autre, symétriquement ou asymétriquement (le frottement asymétrique de films de

Tiré de H.T. Baylékin et al., Science 333:308, reproduit avec l'aimable autorisation de l'Association Américaine pour l'Avancement de la Science.



6. LE TRANSFERT D'AGRÉGATS NANOMÉTRIQUES, mis en évidence par microscopie à sonde de Kelvin, entre des surfaces de polymères mis en contact, puis séparés. Avant le contact, le matériau est relativement lisse (a). Le contact avec un polymère identique (b) ou différent (c) produit divers motifs de transfert.

Recycler des déchets par séparation triboélectrique

Depuis une vingtaine d'années, le traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques devient une question importante. Le recyclage du plastique pose un problème particulier car, après extraction des métaux, il est difficile de séparer les différents types de plastiques, opération pourtant nécessaire pour leur réutilisation.

La séparation électrostatique est une solution envisagée. Ses développements récents donnent des résultats encourageants. Dans un séparateur triboélectrostatique classique, les mélanges de plastiques sous forme de granules, de taille inférieure à cinq millimètres, sont chargés par effet triboélectrique. Ils sont placés soit dans des dispositifs produisant des contacts répétés entre les granules

et les parois du dispositif – des goulottes oscillantes, des cylindres rotatifs –, soit dans des lits fluidisés, systèmes de soufflerie permettant un brassage des granules.

Une fois les granules chargés, un champ électrique est appliqué. Il est créé entre deux plaques métalliques écartées verticalement de 10 à 20 centimètres et reliées à un générateur de tension de plusieurs dizaines de kilovolts. Les forces exercées par le champ électrique dirigent les granules chargés vers des compartiments distincts du collecteur de produits.

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique récemment breveté par l'Université de Poitiers et la Société APR2 réalise le tri sélectif des mélanges de matériaux isolants granulaires dans un lit fluidisé en présence

d'un champ électrique orienté perpendiculairement à la direction de l'air de fluidisation.

L'originalité de ce dispositif est la simultanéité des deux opérations : d'une part, la charge triboélectrique des granules par collisions dans le lit fluidisé, d'autre part, la séparation électrostatique de ces granules dans le champ électrique intense créé par deux bandes transporteuses métalliques connectées à deux générateurs de haute tension continue, de polarités respectivement positive et négative.

Une fois qu'un granule est suffisamment chargé, il est attiré vers l'électrode de polarité opposée, bande transporteuse qui l'évacuera vers le collecteur de produits. Les granules non chargés ne peuvent pas quitter

la zone de charge, ce qui garantit la pureté des produits collectés.

Par ailleurs, chaque granule ne reste dans la zone de charge que le temps minimum nécessaire à l'acquisition d'une charge suffisante pour qu'il soit attiré par l'une des électrodes, ce qui assure aussi l'optimisation du débit des matériaux traités. En fonction des conditions environnantes et de l'état des matériaux granulaires, le temps de charge varie. Le débit peut être adapté en fonction du temps nécessaire à la charge. Le pilote industriel de cette installation est capable de traiter une quantité de 600 kilogrammes de déchets par heure.

Lucien Dascalescu

Institut PPRIME, UPR 3346, CNRS, Université de Poitiers, ENSMA

polymère correspond à la situation où une petite zone d'un polymère est en contact avec une zone plus étendue de l'autre). Le signe de la charge dépend des matériaux en jeu.

J'ai proposé un mécanisme d'échange de charges entre matériaux identiques en m'appuyant sur l'idée que plus la force appliquée est intense, plus la matière transférée peut être profonde. Avec un frottement asymétrique, les forces appliquées à chaque surface sont inégales, si bien que du matériau issu de différentes profondeurs serait transféré. Comme la composition des polymères varie souvent avec la profondeur, cette asymétrie entraînerait le transfert de matériau de différentes compositions, ce qui donnerait des charges nettes de différents signes dans les surfaces séparées.

Il est aussi possible que, selon les caractéristiques de la force mécanique appliquée, il y ait de petites différences dans les réactions chimiques. Il pourrait alors en résulter, sur les deux surfaces, des compositions en polymères ionisés suffisamment différentes.

Ce scénario se comprend aisément pour un frottement asymétrique. Dans le cas d'une action symétrique, de petites asymétries involontaires suffiraient à obtenir une composition asymétrique. Ce mécanisme s'appliquerait aussi à un contact entre matériaux différents et contribuerait à une

meilleure compréhension du mécanisme général de transfert de matériau. Des différences de dureté pourraient aussi conduire à un transfert asymétrique de matériau.

La charge triboélectrique de matériaux de composition identique se produit par exemple avec les particules en suspension, comme dans les tempêtes de sable, les fumées des éruptions volcaniques et la manipulation industrielle de poussières fines. Là encore, ces phénomènes pourraient résulter de contacts asymétriques dus à des différences de taille des particules, les grosses particules se chargeant positivement et les petites négativement. Le scénario exact reste à déterminer.

Une meilleure compréhension

Les expériences de ces dernières années ont permis de progresser dans la compréhension du phénomène triboélectrique. Par ailleurs, il y a un besoin croissant de créer des matériaux qui ne se chargent pas par contact, notamment à cause de la miniaturisation de l'électronique, qui rend les circuits de plus en plus sensibles aux dégâts d'une décharge, même faible. Les nombreuses questions que soulève encore la triboélectricité suggèrent qu'une approche pluridisciplinaire, mettant en œuvre à la fois physique et chimie, pourrait bientôt porter ses fruits. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

M. W. Williams, *Triboelectric charging of insulating polymers – some new perspectives*, *AIP Advances*, vol. 2, 010701, 2012.

T. A. L. Burgo *et al.*, *Triboelectricity : macroscopic charge patterns formed by self-arraying ions on polymer surfaces*, *Langmuir*, vol. 28(19), pp. 7407-7416, 2012.

H. T. Baytekin *et al.*, *The mosaic of surface charge in contact electrification*, *Science*, vol. 333, pp. 308-312, 2011.

L. Calin et L. Dascalescu, *Procédé de séparation électrostatique d'un mélange de granules de matériaux différents et dispositif de mise en œuvre*, Brevet FR2943561, 2010.

L. S. McCarty et G. M. Whitesides, *Electrostatic charging due to separation of ions at interfaces*, *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 47, pp. 2188-2207, 2008.