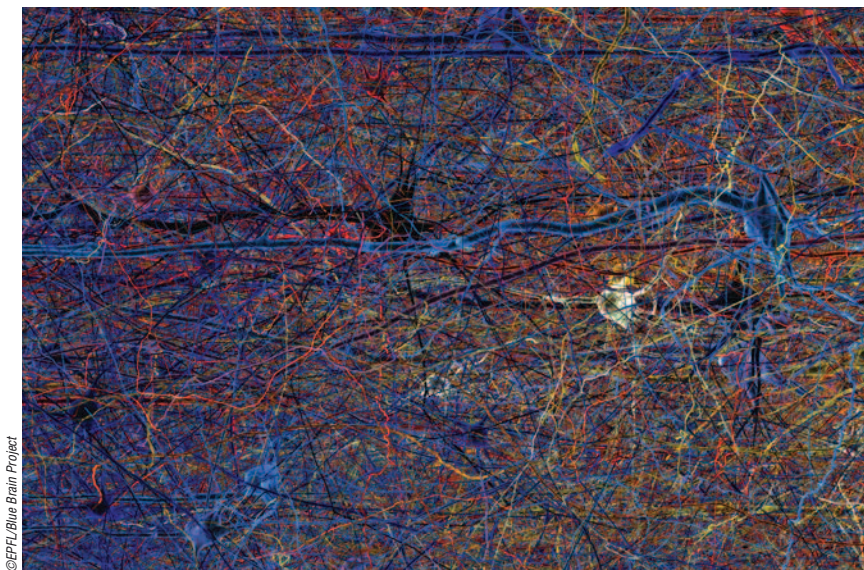




©EPFL Blue Brain Project

3. VUE PARTIELLE DE LA SIMULATION d'un réseau d'un millier de cellules pyramidales (un type de neurones) dans le cadre du projet *Blue Brain*. Les cellules apparaissant en bleu sont silencieuses, celles en rouge sont actives.

problèmes éthiques soulevés par l'expérimentation animale.

Avec le cerveau *in silico*, les chercheurs pourront neutraliser un gène virtuel et en constater rapidement les conséquences sur des cerveaux d'âges différents et aux fonctionnements distincts. L'expérience pourra être répétée dans des conditions aussi nombreuses et diverses qu'ils le souhaitent, en utilisant le même modèle, et avec un degré de précision que l'on ne peut obtenir *in vivo*.

Vers des ordinateurs neuromorphes ?

Ces simulations révéleront peut-être aussi comment l'évolution a produit un cerveau humain si adaptable, qui peut accomplir rapidement, simultanément et à grande échelle de multiples tâches, qui possède une capacité de mémoire gigantesque tout en ne consommant pas plus d'énergie qu'une ampoule électrique. Les enseignements que nous en tirerons pourront être à leur tour réinvestis dans la conception d'ordinateurs dits neuromorphes, imitant le fonctionnement des circuits cérébraux.

Aussi ambitieux le projet Cerveau humain soit-il, une caractéristique essentielle manquera aux premières simulations de cerveau complet que l'on réalisera : elles ne pourront se développer comme le fait un enfant. À partir de la naissance, le cortex se forme suite à la prolifération,

à la migration puis à l'élagage des neurones et d'un processus nommé plasticité cérébrale (remodelage des connexions entre neurones), qui dépend beaucoup des expériences vécues. Nos modèles de cerveau correspondront à un âge donné, mais il faudra concevoir un dispositif qui permette au modèle de se transformer en réaction aux stimulus extérieurs.

Une étape décisive : connecter un cerveau virtuel à un corps virtuel

Une étape décisive consistera à connecter le cerveau virtuel à la représentation informatique virtuelle du corps et à le placer dans un environnement virtuel réaliste. Le simulateur pourra recevoir de l'information en provenance de l'environnement, et agir sur lui. Alors seulement, nous serons en mesure de lui enseigner certaines techniques et de vérifier s'il est « intelligent », ou d'identifier les fonctions cérébrales associées aux comportements que l'on qualifie d'intelligents.

Enfin, il ne faut pas oublier que le projet Cerveau humain soulève d'importantes questions éthiques. Il est par exemple légitime de se demander s'il serait éthique de vouloir construire un cerveau virtuel qui comporterait davantage de colonnes corticales qu'un cerveau humain, ou qui combinerait une intelligence identique à celle d'un être humain à une capacité de calcul un million de fois supérieure à celle d'un superordinateur.

L'ambition du *Human Brain Project* est grande, mais pas démesurée. L'un de ses objectifs est de lutter contre le morcellement des recherches sur le cerveau. D'autres projets vont dans le même sens. Par exemple, en 2010, l'Institut Allen de Seattle, aux États-Unis, a lancé l'Atlas Allen du cerveau humain, dont l'objectif est de répertorier tous les gènes s'exprimant dans cet organe. Le principal obstacle à de telles entreprises reste cependant le financement. En ce qui concerne le projet Cerveau humain, il vient de recevoir le feu vert de l'Union européenne. Nous en sommes convaincus, il apportera un éclairage inédit sur notre identité d'êtres humains, capables de contempler aussi bien le clair-obscur d'une toile de Caravage que d'explorer les paradoxes de la physique quantique. ■

Un projet phare pour l'Europe

Le 28 janvier 2013, la Commission européenne a désigné deux projets phares parmi six propositions : Human Brain Project (HBP) et Graphene. Chacun de ces deux projets labellisés « FET-flagship » sera financé à hauteur d'environ un milliard d'euros sur dix ans. HBP, qui débutera fin 2013, rassemble quelque 300 chercheurs, majoritairement européens, issus de 87 institutions. Il sera coordonné par l'École polytechnique fédérale de Lausanne. La France est en charge de trois des axes du projet : théorie des réseaux neuronaux, neurosciences cognitives et aspects éthiques. Un Institut européen des neurosciences théoriques, localisé en région parisienne, sera d'ailleurs créé dans le cadre de HBP.

Numéro 56 en kiosque le 07 mars

Numéro anniversaire



Cerveau & Psycho

10 ANS de découvertes

→ Émotions

→ Conscience

→ Interfaces
cerveau-machines

→ Imagerie

→ Traitements

→ Développement
personnel

n°56 - Bimestriel mars-avril- 2013



www.cerveauetpsycho.fr

L'information de référence de la psychologie et des neurosciences

D'où vient l'électricité statique ?

Meurig Williams

**Les phénomènes
d'électricité statique
nous sont familiers,
mais comment les charges
s'accumulent-elles ?
Des études récentes montrent
que des transferts de matière
sont parfois à l'œuvre.**

L'ESSENTIEL

- La nature des charges électriques qui s'accumulent à la surface des matériaux est encore mal connue.
- Certaines expériences mettent en évidence un transfert d'électrons ou d'ions d'une surface à l'autre lors d'un contact.
- D'autres études suggèrent que dans certains cas, des fragments de matière sont échangés.
- Dans le cas de matériaux identiques, l'asymétrie des frottements pourrait expliquer la présence des charges.

Chacun a fait l'expérience désagréable des décharges électriques par temps sec en hiver en marchant sur de la moquette ou en enlevant un pull-over. Ces petits désagréments du quotidien peuvent prendre plus d'importance dans certains cas. On le constate lors des éruptions volcaniques, où se produisent des éclairs dus au frottement des grains de poussière les uns sur les autres (voir la figure 1). Les décharges électrostatiques préoccupent aussi les ingénieurs de la NASA, car la sécheresse qui règne sur la Lune et sur Mars favorise ces phénomènes : un astronaute qui tend le bras pour ouvrir un sas après avoir marché sur le sol sec peut provoquer une décharge, susceptible d'endommager un composant électronique critique. Il est par ailleurs possible qu'une décharge électrostatique ait été à l'origine de la catastrophe du *Hindenburg* en 1937 ; l'étincelle aurait enflammé l'hydrogène gazeux contenu dans ce dirigeable. Cependant, l'électricité statique n'est pas toujours un inconvénient : on la met à profit dans des appareils répandus tels que les photocopieuses et les imprimantes laser.

Lorsqu'on frotte deux objets l'un contre l'autre et qu'on les sépare, des charges électriques apparaissent à leur surface. On parle de charges triboélectriques, ou encore de charges de contact ou charges statiques. La triboélectricité était déjà connue des Grecs anciens : le philosophe Thalès de Milet découvrit ainsi qu'en frottant de l'ambre sur de la laine, on créait un tel phénomène. D'ailleurs, le terme « triboélectrique » signifie en grec « frotter de l'ambre ».

Le phénomène a cependant été très peu étudié. Quelle est la nature des particules chargées qui s'accumulent à la surface des matériaux ? Par quel mécanisme migrent-elles dans la zone de contact ? Depuis quelques années, des chercheurs de diverses disciplines s'intéressent à ces questions. Cet article présentera les différents phénomènes et scénarios possibles à l'origine de l'effet triboélectrique. Trois hypothèses sont envisagées quant à la nature des charges échangées ; il pourrait s'agir d'échanges d'électrons, d'ions ou

1. LE VOLCAN ISLANDAIS EYJAFJÖLL, lors de son éruption en 2010, a expulsé dans l'atmosphère de grandes quantités de poussière. Le frottement entre grains de poussière conduit à l'accumulation de charges et crée des décharges d'électricité statique, visibles sous forme d'éclairs.

© Arctic-Images/CORBIS

de petites quantités de matière entre les deux éléments frottés. Plusieurs expériences récentes, que nous allons décrire, tentent de répondre à ces questions et de donner une description du phénomène.

L'une des raisons pour lesquelles les progrès se sont fait attendre est le manque de motivation : la plupart des travaux sur la triboélectricité visent le développement de nouvelles techniques, contexte où la compréhension des mécanismes d'échange de charges n'est pas perçue comme indispensable.

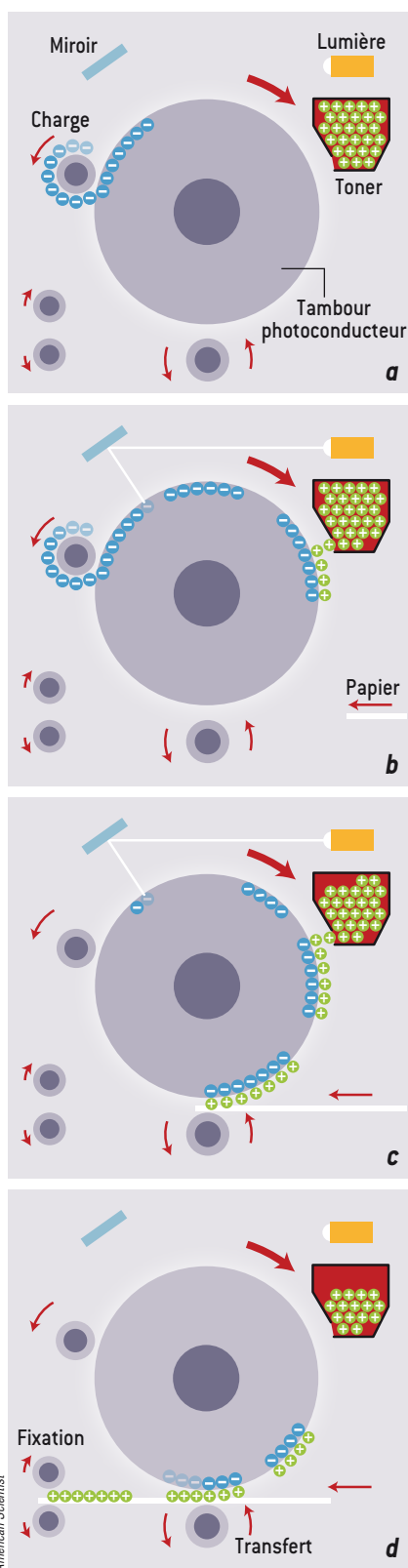
Les photocopieuses et les imprimantes laser figurent parmi les principales applications de la triboélectricité. Ces dispositifs ont été introduits par la Société *Xerox* et développés aussi par *Kodak* (voir l'encadré page ci-contre). Dans une photocopieuse, le toner (formé de microsphères en plastique contenant l'encre) et la surface d'un cylindre, le « tambour », acquièrent par triboélectricité des charges opposées (voir la figure 2). La lumière réfléchie par les parties blanches de la feuille à copier neutralise certaines zones du tambour photoconducteur. En effet, celui-ci devient un meilleur conducteur électrique quand il est exposé à la lumière et, par conséquent, les zones illuminées se déchargent. Le toner se fixe uniquement sur les parties chargées du tambour, qui dépose les billes d'encre sur le papier. Une unité chauffante fait fondre les billes et fixe l'encre sur la feuille.

Un domaine délaissé

On a d'abord pensé qu'une compréhension des mécanismes fondamentaux de la triboélectricité faciliterait la conception des machines. Mais on a fini par délaissé ces recherches quand on a obtenu des appareils performants, alors qu'on ignorait toujours tout des transferts d'électrons et d'ions à l'œuvre dans les mécanismes triboélectriques.

Les premières études du phénomène se sont inspirées des connaissances acquises sur les métaux. L'échange de charges par contact, dans ce cas, résulte du transfert d'électrons. Au sein d'un métal, une partie des électrons sont libres, ce qui facilite leur transfert. Mais ce modèle s'applique-t-il aux matériaux isolants, dépourvus d'électrons libres ?

On a trouvé des preuves de transfert d'électrons ainsi que d'ions dans des conditions expérimentales particulières, mais ces données sont peu nombreuses et souvent contradictoires. Récemment, de nouvelles



2. LE TAMBOUR D'UN PHOTOCOPIEUR est photoconducteur et chargé négativement (a). Les zones chargées du tambour qui sont éclairées deviennent neutres et ne sont pas imprimées (b). Du toner, de charge positive, est attiré vers les zones négatives du tambour (c), puis transféré sur le papier (d).

recherches ont montré que l'échange de charges peut aussi résulter du transfert physique de minuscules quantités de matériau de surface d'une substance à l'autre. On commence tout juste à comprendre comment cela se déroule au niveau moléculaire. Plusieurs mécanismes semblent à l'œuvre, en fonction de la composition des matériaux et des conditions expérimentales dont les rôles restent à éclaircir.

Un transfert d'électrons libres ou d'ions ?

Considérons le contact entre un métal et un polymère isolant. On avait observé que la densité de charges créée sur le polymère est proportionnelle à l'énergie nécessaire pour arracher des électrons au métal. Ce résultat était présenté comme la preuve d'un mécanisme de transfert d'électrons (voir la figure 3). Cependant, cette relation n'est pas toujours vérifiée, ce qu'on attribuait au grand nombre de variables impliquées et à la possibilité que plusieurs mécanismes simultanés soient en jeu.

Pour les transferts de charge entre deux isolants, les physiciens ont développé des théories inspirées du mécanisme de transfert d'électrons, sans préciser la nature des charges. Ces théories n'ont eu qu'un succès limité dans le calcul de l'énergie nécessaire pour arracher des charges aux isolants. Elles en ont eu davantage pour expliquer que, dans certains cas, l'échange de charges est limité par le champ électrique créé. En d'autres termes, comme l'accumulation de charges crée un champ électrique, elle est limitée par la rigidité diélectrique de l'air ambiant, qui correspond à la valeur maximale du champ électrique que l'air peut supporter avant que ses molécules soient ionisées. Au-delà de cette limite, l'air devient conducteur et une décharge électrique se produit.

L'approche des physiciens s'est révélée insuffisante et c'est dans d'autres domaines, en particulier en chimie, que de nouvelles idées ont émergé. Dans les années 1990, deux décennies après la découverte par la Société *Kodak* que des sels d'ammonium amélioraient la charge électrique de l'encre en poudre des photocopieuses, l'idée des ions mobiles s'est imposée comme une explication possible de l'effet triboélectrique (voir la figure 4). Selon cette conception, un ion mobile est libre de passer d'une surface à une autre parce qu'il a un « contre-ion », de charge opposée, qui est soit beaucoup

plus gros et moins mobile, soit attaché à un polymère. Mais le moteur de la séparation des charges ioniques reste à élucider.

Un échange de charges peut aussi se produire quand les polymères ne contiennent pas d'ions mobiles, auquel cas un mécanisme supplémentaire doit intervenir. En 2008, Logan McCarty et George Whitesides, de l'Université Harvard, ont proposé l'hypothèse que dans la mince couche d'eau qui sépare les deux polymères, les molécules d'eau se dissocient et les ions hydroxyde (OH^-) s'adsorbent sur l'une des surfaces.

Reste que des expériences réalisées en 2011 par Bartosz Grzybowski et ses collègues de l'Université Northwestern ont montré que l'échange de charges peut avoir lieu entre deux polymères non ioniques en l'absence totale d'eau. Cela indique donc l'existence d'un mécanisme distinct à la fois de celui proposé avec les ions hydroxyde et de celui par transfert d'ions. L'ensemble des diverses observations suggère que différents mécanismes sont en jeu et se manifestent selon les matériaux ou les conditions du contact.

Des échanges de matière

Dans l'expérience de B. Grzybowski, quel pouvait être le mécanisme en jeu s'il ne s'agissait ni d'électrons ni d'ions ? Un troisième scénario est apparu ces dernières années, grâce aux outils d'analyse électrique, chimique et électrochimique des surfaces. Il correspond à un transfert de matière et de charges entre les surfaces lors de l'application d'une force mécanique importante (contacts impliquant une pression, un frottement ou un cisaillement).

On sait depuis longtemps que le contact d'un polymère avec un autre matériau peut avoir pour effet de transférer une partie du polymère d'une surface à l'autre. En 2011, à l'aide de la microscopie à sonde de Kelvin (une technique d'analyse à haute résolution des propriétés électriques d'une surface), B. Grzybowski et son équipe ont prouvé que quand deux polymères sont pressés l'un contre l'autre, puis séparés, le transfert de matériau peut s'accompagner d'un échange de charges à l'échelle nanométrique. Depuis des siècles, on supposait que les charges acquises par contact sur chaque surface étaient homogènes, l'une des surfaces étant uniformément positive et l'autre uniformément négative. L'équipe de B. Grzybowski a montré que, bien que chaque surface développe une charge nette

L'AUTEUR



Meurig WILLIAMS a travaillé sur la triboélectricité au Centre de recherche Webster

de la Société Xerox à New York. Il détient 11 brevets américains.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

soit négative, soit positive, elle présente en fait une mosaïque aléatoire de régions de taille nanométrique et diversement chargées, la charge nette étant égale à la somme algébrique des charges de chacune de ces régions (voir la figure 6). Cette découverte signifie que davantage d'éléments chargés sont échangés qu'on ne le supposait auparavant : environ 100 fois plus.

Diverses techniques de spectroscopie et d'analyse chimique des surfaces ont révélé la présence d'espèces oxydées, dont on pense qu'elles sont responsables de la charge. Ce mécanisme de transfert de matériau a représenté une avancée décisive en cela qu'il était le premier à s'écarter des scénarios de transfert d'électrons ou d'ions. En outre, une description du mécanisme permet de comprendre le déroulement du transfert de charges. En pressant deux polymères

Xerox et Kodak, un duel de brevets

Les premiers photocopieurs Xerox ont été introduits dans les années 1960. Ils reposent sur le procédé nommé électrophotographie, breveté en 1942 par Chester Carlson. Celui-ci proposa son brevet à Kodak qui refusa, et le vendit finalement à Xerox.

Pour fonctionner, le photocopieur est composé d'un cylindre dont certaines zones ont été chargées électriquement. Le toner, encre sous forme de poudre, est aussi chargé, de signe opposé à celui du cylindre. Ainsi, seules les régions chargées du cylindre attirent l'encre, laquelle est ensuite déposée sur le papier.

Le toner est chargé par le contact avec des « porteurs », des billes de 100 micromètres de diamètre enduites en partie de polymères. Les compositions du toner et du porteur sont choisies pour obtenir le meilleur effet triboélectrique possible.

La conception des premiers photocopieurs Xerox était empirique, sans compréhension théorique de la triboélectricité, avec des résultats de qualité médiocre. Au début des années 1970, quand l'auteur s'est intéressé au phénomène, certaines innovations ont permis

d'améliorer le rendu des copies. Mais, à la même époque, la Société Kodak avait déposé plusieurs brevets dans ce domaine d'activité. Au sein de Xerox, une équipe fut constituée (dont faisait partie M. Williams) pour étudier la possibilité que Kodak se lance sur ce marché. M. Williams avait en charge l'étude du toner et avait conclu que Kodak était prêt à entrer sur le marché des photocopieurs, contre l'avis général de l'équipe.

En 1975, Kodak lançait son premier copieur, l'*Ektaprint*, avec une qualité d'impression supérieure. Pourquoi une telle différence ? La technologie adoptée par Kodak était très différente de celle utilisée par Xerox. Mais le point crucial

identifié par l'auteur était la nature des porteurs dans le toner. Le choix de Kodak a porté sur des charges positives dans le toner, par opposition à des charges négatives chez Xerox. En effet, les chimistes de Kodak ajoutaient des sels d'ammonium quaternaire (constitué d'un cation d'azote lié à quatre groupes hydrocarbonés) qui permettaient de mieux engendrer et contrôler les charges positives dans le toner. Le résultat était une qualité d'impression bien supérieure.

Rapidement, Xerox se rendit compte qu'il fallait utiliser la technologie développée par son concurrent. L'étude précise du système de Kodak conduisit Xerox à déposer plusieurs brevets directement inspirés de ceux de Kodak entre 1980 et 1987.

Cependant, Kodak n'a jamais contesté ces brevets, fondés sur ses propres inventions, qui ont permis à Xerox de fabriquer les photocopieurs de meilleure qualité et ainsi dominer le marché.

Dès lors que Xerox avait mis au point des appareils fournissant une bonne qualité de copies, la motivation pour étudier les mécanismes de la triboélectricité prit fin.



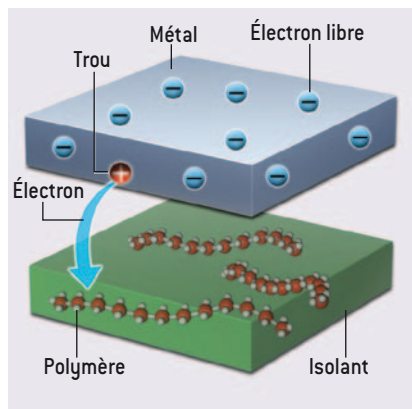
© Shutterstock/Maksym Bondarchuk

l'un contre l'autre, puis en les séparant, de petits agrégats de matière passent d'une surface à l'autre. Pour que ce processus ait lieu, des liaisons chimiques covalentes doivent se rompre, ce qui formerait des radicaux libres, constitués de fragments de polymères, aux deux sites de la rupture. Les radicaux libres sont des atomes ou des molécules ayant des électrons non appariés, ce qui les rend chimiquement très réactifs, et on pense qu'ils réagissent avec l'oxygène et l'eau ambiants pour former les espèces chargées, par un échange d'électrons lors de réactions d'oxydoréduction.

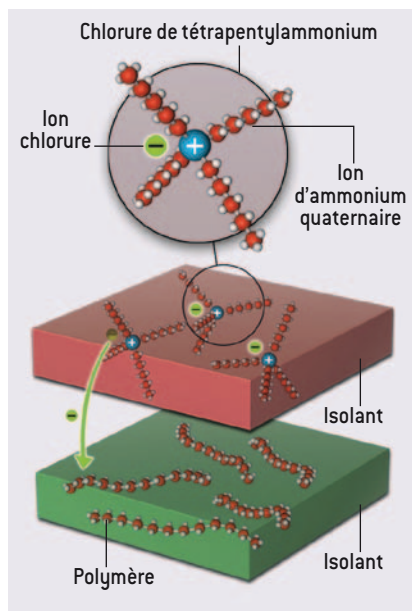
En 2012, Fernando Galembeck et ses collègues de l'Université de Campinas, au Brésil, ont fait franchir à ce mécanisme de transfert de matériau une étape supplémentaire. Du téflon (ou polytétrafluoroéthylène) et du polyéthylène ont été pressés et tordus l'un contre l'autre. Après séparation, l'équipe a trouvé des domaines ou motifs chargés positivement et négativement, analogues à ceux qu'avait signalés l'équipe de B. Grzybowski. Les fragments de matériau extraits des surfaces au moyen de solvants ont été identifiés comme étant des polymères ionisés. La plupart des résidus de téflon étaient de charge négative, et la plupart des résidus de polyéthylène de charge positive.

Une mosaïque de zones diversement chargées

L'équipe de F. Galembeck a proposé le mécanisme suivant : la température élevée aux points de contact, où il y a frottement, plastifie (diminue la rigidité) ou fait fondre la couche superficielle des deux polymères, qui se mélangent (voir la figure 5). Les forces de cisaillement brisent quelques polymères, lesquels deviennent des radicaux libres. Le transfert d'électrons des radicaux de polyéthylène aux radicaux de téflon (plus électronégatifs) transforme ces radicaux libres en polymères ionisés respectivement positifs et négatifs. Or ces polymères ionisés sont des molécules amphiphiles, c'est-à-dire qu'elles ont une partie hydrophile et une autre hydrophobe. Du fait de cette propriété amphiphile et parce que le téflon et le polyéthylène ne sont pas miscibles, les polymères ionisés se disposent en petits réseaux formant en surface une



3. L'ÉCHANGE DE CHARGES entre un métal et un matériau isolant correspond à l'extraction d'électrons libres du métal.



4. L'ÉCHANGE D'IONS intervient entre deux isolants. Ici, l'ion chlorure d'un sel – du chlorure de tétrapentylammonium – est transféré au second matériau. Les ions d'ammonium quaternaire sont trop volumineux pour être échangés.

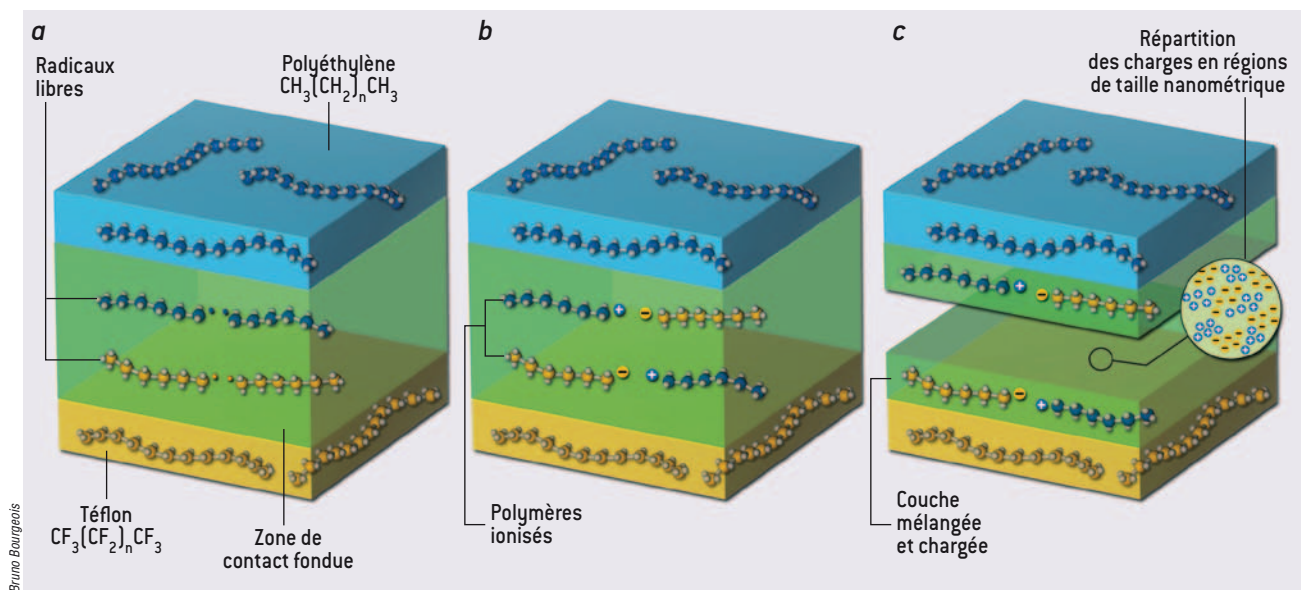
mosaïque de zones chargées positivement ou négativement.

Une comparaison des travaux des équipes de F. Galembeck et de B. Grzybowski illustre le rôle primordial de l'échange des charges, lequel dépend des propriétés du polymère et de la nature des contacts. La contribution de chacun des facteurs que F. Galembeck a identifiés dans le mécanisme de transfert de matériau dépend, entre autres, des propriétés viscoélastiques, topographiques et chimiques des polymères utilisés.

Des transferts qui dépendent du contact et des matériaux

Par exemple, on peut s'attendre à ce que l'effet de plastification soit moins important ou la quantité de matériau fondu soit plus faible dans les légers contacts que dans les contacts à cisaillement ou frottement intenses, en raison des températures inférieures atteintes. Des propriétés inhérentes aux polymères peuvent aussi intervenir sur la fusion, telle la température de transition vitreuse, stade où les propriétés d'écoulement du matériau sont modifiées sans qu'il y ait changement de la structure moléculaire. Le matériau fond plus s'il est souple et élastique que s'il est rigide.

La nature des molécules est cruciale. Ainsi, la facilité avec laquelle les liaisons se rompent différerait entre le polydiméthylsiloxane (PDMS), un polymère à squelette de silice et oxygène, employé par B. Grzybowski, et les polymères à ossature de carbone utilisés par F. Galembeck. La rupture de chaînes d'un polymère mou tel que le PDMS peut se produire à des températures basses, dans des contacts à faible pression et faible frottement, les chaînes polymériques s'enchevêtrant à l'interface et se brisant au moment de la séparation. Ces enchevêtrements sont accentués dans les polymères à squelette de silice et oxygène par la présence d'oligomères – des fragments de polymère. Ces substances sont en équilibre dynamique : elles sont en permanence modifiées par la rupture et la formation des liaisons silice-oxygène, sans altération du polymère. Dans le mécanisme de transfert de matériau, l'apport d'énergie mécanique au cours du contact des polymères entraîne facilement la rupture de ces chaînes et la création de charges électrostatiques.



Bruno Bourgeois

5. L'ÉCHANGE DE MATÉRIAU est un scénario récemment mis en évidence. Au point de contact de deux matériaux isolants, ceux-ci fondent, les polymères se mélangent et des liaisons covalentes se rompent (a). Des radicaux libres (molécules ayant des électrons non appariés) se forment, puis des réactions d'oxydoréduction conduisent à un échange

d'électrons non appariés. Dans le cas du téflon et du polyéthylène, le premier, plus électrophile, attire les électrons et se charge négativement (b). Les polymères ionisés se répartissent alors en régions de taille nanométrique. Après séparation, les surfaces des matériaux sont recouvertes d'une couche non uniforme et globalement chargée (c).

Il reste cependant difficile de définir un mécanisme unique pour la formation des charges dans les contacts entre deux polymères et toutes les pistes continuent d'être explorées. Ainsi, en 2008, Chongyang Liu et Allen Bard, de l'Université du Texas à Austin, et indépendamment Toribio Otero, de l'Université polytechnique de Carthagène en Espagne, ont avancé qu'un mécanisme de transfert d'électrons était en jeu. Ils observaient, après séparation des surfaces, des réactions électrochimiques qui ne peuvent être déclenchées que par des électrons.

Leur interprétation a été contestée en 2011 par Silvia Piperno et ses collègues, de l'Institut Weizmann en Israël, qui expliquaient ces observations en supposant un mécanisme de transfert de matériau contenant des espèces polaires – c'est-à-dire des molécules non chargées mais dont les nuages électroniques sont inégalement répartis. La même année, Nikolaus Knorr, du Laboratoire Sony de science des matériaux de Stuttgart en Allemagne, a observé dans certains contacts entre deux polymères des transferts liés à des molécules polaires.

Le phénomène triboélectrique semble donc reposer sur de multiples mécanismes et les charges en jeu sont de natures variées. Les différents scénarios posent encore de

nombreuses questions. Parmi celles-ci, je me suis interrogé sur le lien possible entre l'apparition des charge triboélectriques et la profondeur caractéristique jusqu'à laquelle les charges pénètrent dans le matériau. Je me suis demandé si cette profondeur varie en fonction de la nature des contacts. Malgré la diversité des contacts testés expérimentalement, ce facteur n'avait jamais été étudié en tant que variable principale du phénomène.

LES MÉCANISMES DE TRANSFERT d'électrons, d'ions et de matière peuvent avoir lieu simultanément, pour certains matériaux et des conditions de contact particulières.

Dans les nombreuses études de la charge triboélectrique des polymères, on n'a pas pris en compte le fait que la composition et la morphologie des polymères varient avec la profondeur.

J'ai étudié la profondeur de pénétration de la charge dans une série de polymères où la surface du matériau était de composition (déterminée par spectroscopie photoélectronique par rayons X) différente de celle de la masse du polymère. La charge triboélectrique était déterminée en faisant tomber en cascade de petites billes (de 100 et 250 micromètres de diamètre) de métal nu ou recouvertes de polymère sur des films

de polymère inclinés et moulés sur des plaques d'aluminium – une méthode dont la précision et la reproductibilité étaient bien établies. Les contacts par rebonds étaient légers et brefs, chacun d'une durée estimée à 10^{-5} seconde.

Les résultats ont montré que la charge de contact entre deux polymères ne fait intervenir que les premières couches moléculaires, alors qu'entre un métal et un polymère, des couches plus profondes sont en jeu. On peut supposer que dans le premier cas (contact polymère-polymère), l'échange de charges se fait en surface sous la forme d'ions. Dans le second cas (contact métal-polymère), des électrons pénétreraient par effet tunnel dans la masse du matériau. Il en résulterait une relation entre le mécanisme de charge et la profondeur de pénétration de la charge, ce qui est corroboré par le fait qu'on sait que les ions s'adsorbent sur les surfaces des polymères, tandis que les électrons s'y enfouissent.

À la lumière des nouveaux travaux suggérant qu'un transfert de matériau peut être à l'œuvre, j'ai rapporté que les résultats évoqués ci-dessus peuvent tout aussi bien être interprétés selon ce scénario. En effet, le contact entre un film de polymère et une bille de métal dur et rugueux met en jeu une force plus importante qu'avec une

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.

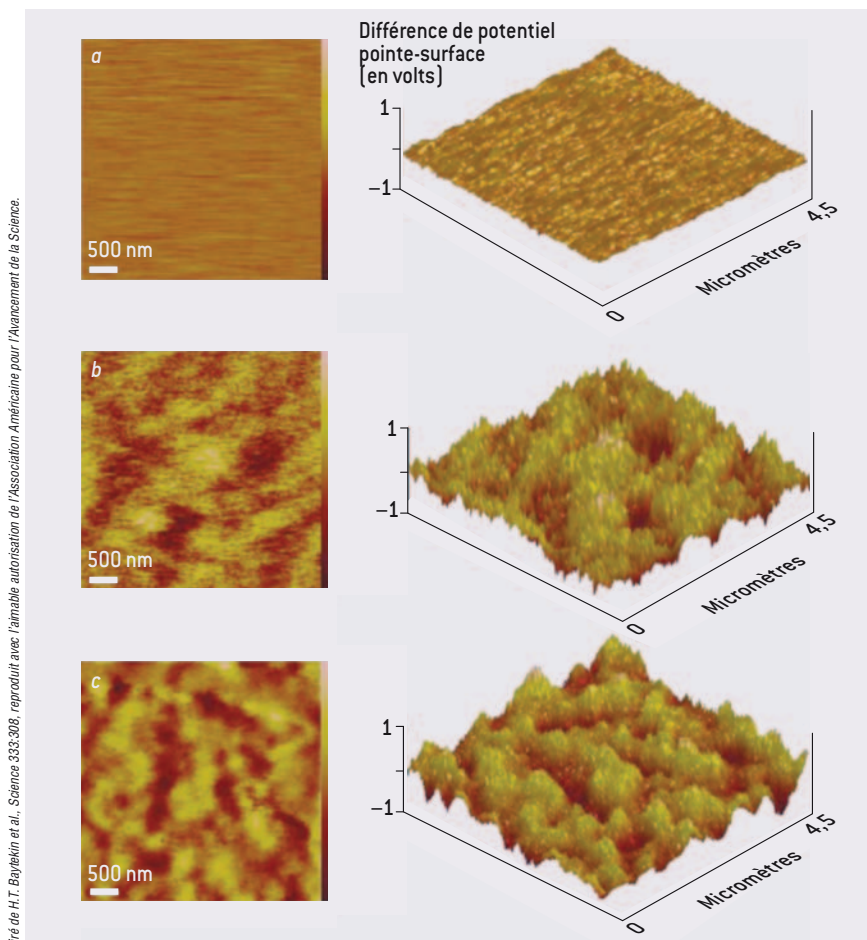
À cet égard, les données quantitatives établies par K.-Y. Law et ses collègues en 1995 pour le transfert d'ions sont intéressantes. Ces chercheurs ont mélangé avec précaution des particules de toner revêtues d'un sel de césium et des particules recouvertes de polymère. Ils ont montré que l'échange de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



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.

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.

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.

Sur El Hierro, une île des Canaries, des dispositifs innovants sont mis en place pour la gestion de la biodiversité, de l'eau et de l'énergie.

El Hierro,



Alain Gioda, Carlos Recio et Luis Santana

Les îles abritent quelque 600 millions de personnes dans le monde. Les doter d'un fonctionnement écologique est donc un enjeu majeur. En outre, elles constituent des systèmes plus fermés que les continents et peuvent servir de laboratoire pour tester diverses initiatives en matière de développement durable. Leur isolement est aussi un inconvénient, notamment parce que leur réseau électrique est parfois impossible à raccorder à celui du continent.

C'est le cas de l'île d'El Hierro, un petit bout de terre aride d'environ 270 kilomètres carrés (soit deux fois et demie la superficie de Paris), dans l'archipel des Canaries. Les habitants de l'île ont longtemps été d'une extrême pauvreté. De nombreux émigrants s'y embarquaient clandestinement pour l'Amérique ou s'installaient sur les îles voisines de Tenerife et Grande Canarie, surtout pendant les sécheresses. Aussi l'île n'abritait-elle que 7 200 habitants au début des années 1990. Toutefois, moins de 20 ans plus tard, la population est montée jusqu'à 11 000 habitants (avant de diminuer un peu avec la crise économique

espagnole). Cela correspond à la plus forte progression démographique des Canaries durant cette période. Pourtant, ni tourisme de masse ni boom économique n'en sont la cause. Comment expliquer qu'El Hierro ait soudain attiré de nombreux immigrants ?

Sous l'impulsion de Tomás Padrón, ingénieur électricien et figure politique locale, l'île s'est dotée d'un ensemble unique, à la fois pour la préservation de la biodiversité et pour la production d'énergie : dès cette année, l'électricité y sera essentiellement produite de façon renouvelable et sans émission de dioxyde de carbone, cela sans qu'un raccordement à un réseau continental permette de gérer l'intermittence des énergies renouvelables ; ce sera la seule île au monde dans ce cas. En outre, des dispositifs de captage de l'eau du brouillard y ont été installés. El Hierro est-elle un modèle reproductible à grande échelle sur les îles et sur les continents ?

Depuis 1796, date du premier recensement dans les Canaries, la population d'El Hierro a seulement doublé. Elle augmente au maximum de 20 pour cent en période

touristique, soit moins de 2 500 touristes par mois. Ces chiffres sont à comparer à la multiplication par 13 de la population des Canaries depuis 1796 et aux 10,3 millions de touristes accueillis en 2011 par l'archipel. À la Grande Canarie, les aménagements ont été si importants qu'il ne subsiste que un pour cent de la forêt originelle. En outre, le milieu est globalement aride dans l'archipel, de sorte que sa biodiversité est fragile. À El Hierro, l'absence d'explosion démographique a permis une bonne conservation du milieu et des activités traditionnelles.

Une réserve de la biosphère

En conséquence, l'île a été classée réserve de la biosphère par l'Unesco en 2000. Ce statut désigne une zone conciliant la préservation de la biodiversité et les activités humaines. Il est moins contraignant que celui de parc national, notamment pour les activités humaines : ainsi, toute l'île est incluse dans la réserve, mais elle se partage entre des zones dites centrales, où les