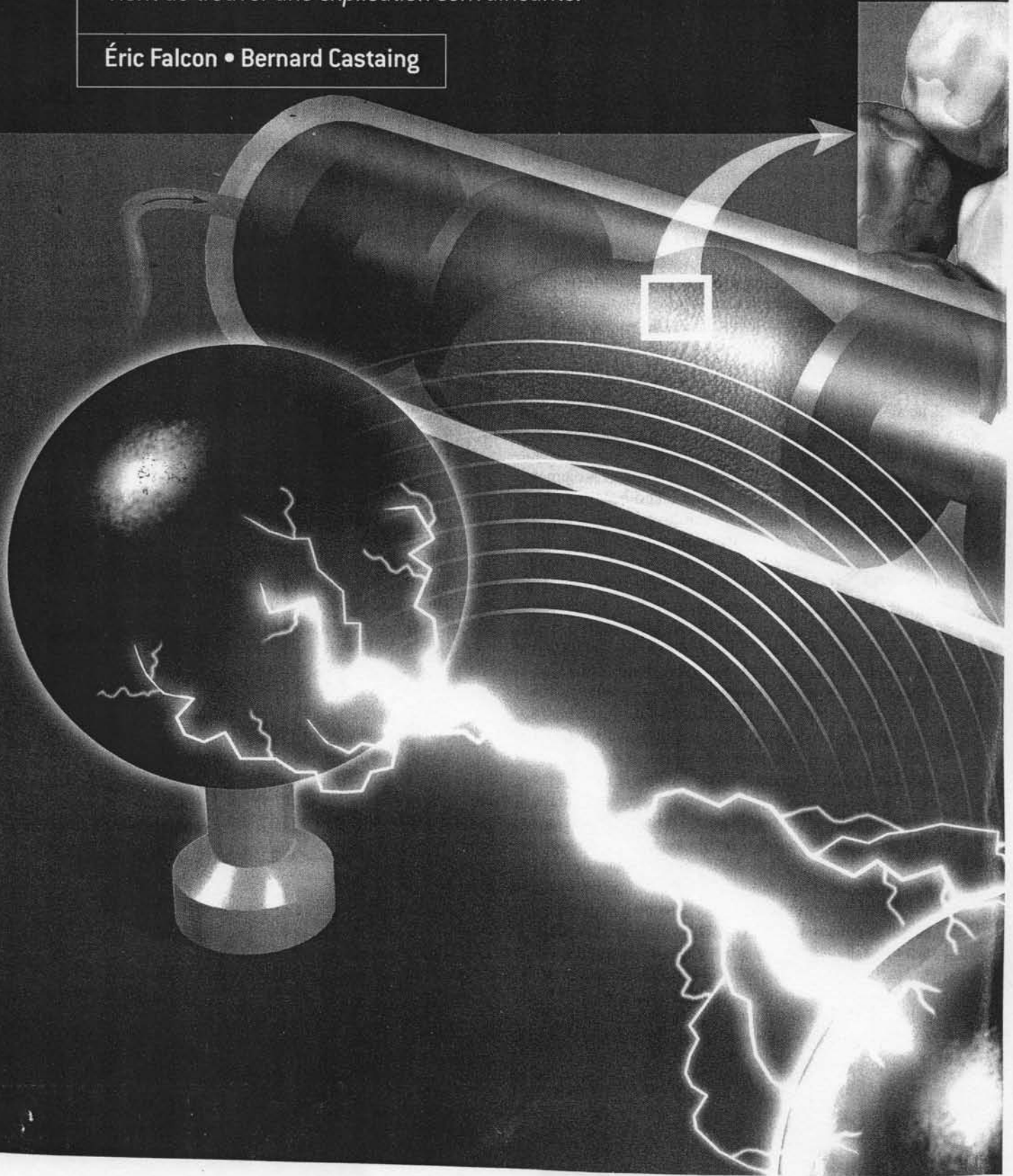
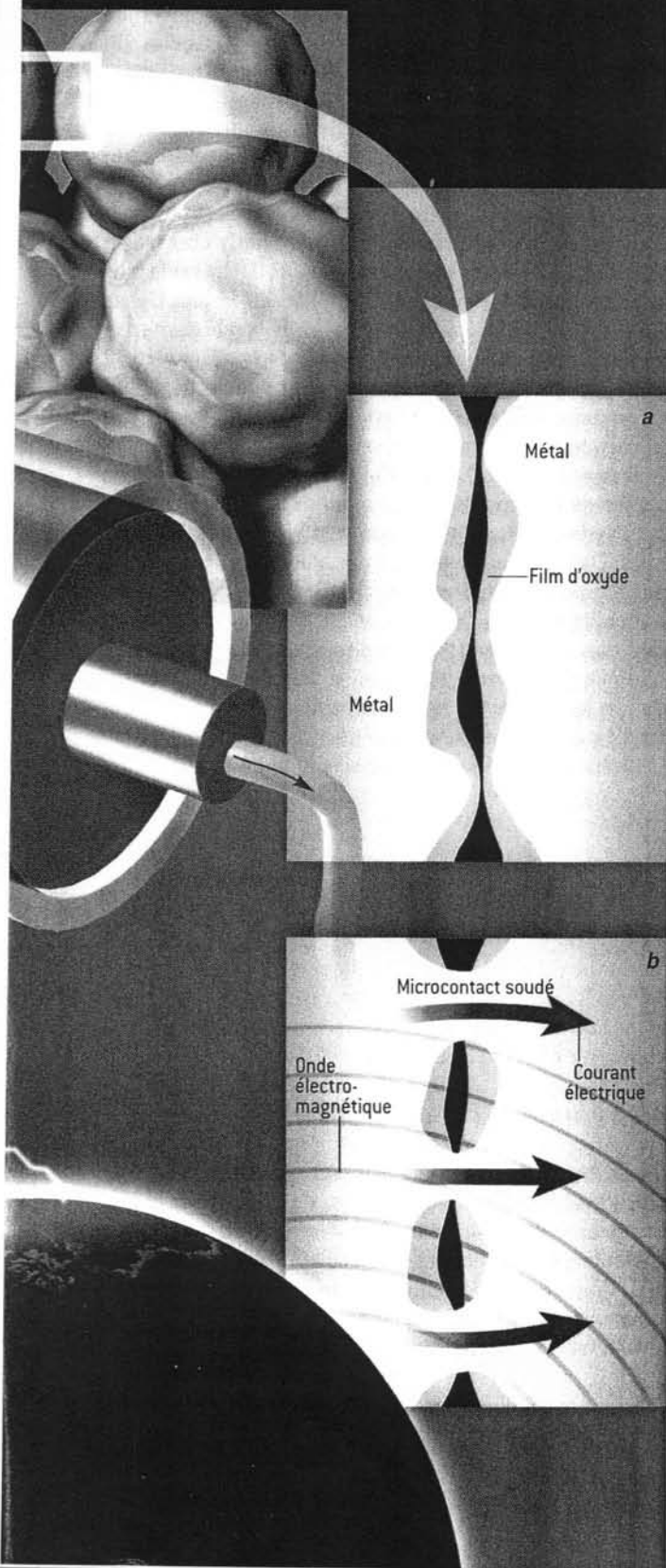


# L'effet Branly livre ses

*Il y a plus d'un siècle, Édouard Branly découvrit qu'une étincelle électrique agit à distance sur la conductivité d'un amas de grains métalliques. Ce phénomène, qui fut à la base des premières télécommunications radioélectriques, vient de trouver une explication convaincante.*

Éric Falcon • Bernard Castaing





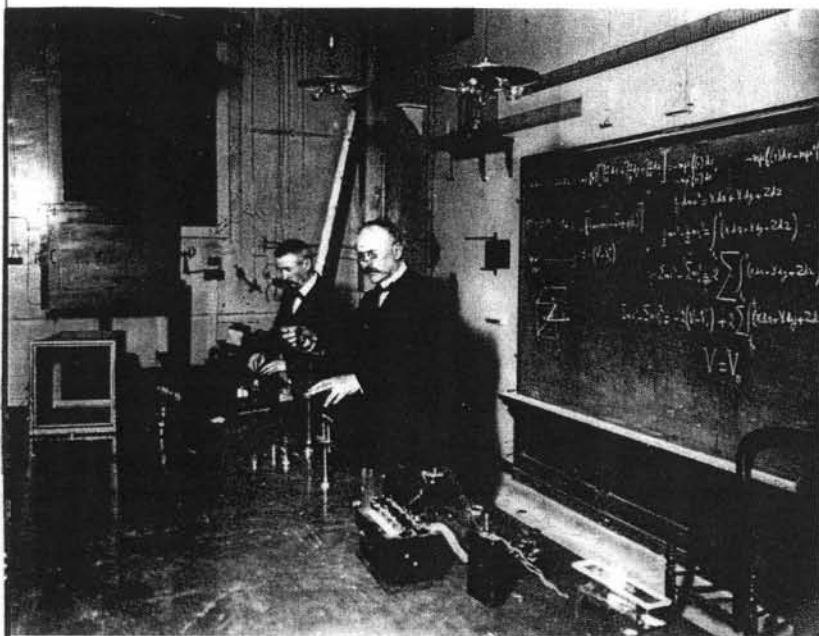
Institut catholique de Paris, 1890. Édouard Branly, qui occupe la chaire de sciences physiques de cet établissement, étudie la conductivité électrique de diverses substances. Un jour, il place à l'intérieur d'un tube en verre de la poudre métallique, de type limaille de fer, puis il en mesure la résistance électrique. Celle-ci est très élevée en raison de l'oxyde, un isolant, présent à la surface des grains (voir la figure 1). Toutefois, Branly observe qu'en produisant une étincelle électrique à plusieurs mètres du tube, la résistance de la poudre chute de plusieurs ordres de grandeur ! Cette diminution brutale de la résistance n'est pas définitive : un simple choc mécanique sur le tube suffit pour restaurer l'état isolant initial.

Le changement de la conductivité électrique de la poudre métallique était provoqué par les ondes électromagnétiques émises par l'étincelle et qui atteignaient le tube de limaille. Ce phénomène était à l'époque la seule façon de détecter de telles ondes et, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, le tube de Branly fut utilisé en tant que récepteur d'ondes par l'Italien Guglielmo Marconi lors des premières communications radio sans fil.

Près de 115 ans après la découverte du physicien français, l'origine de l'effet Branly, cette chute brutale de la résistance électrique, était toujours mal comprise. De nombreuses explications avaient été proposées au fil des ans, mais sans qu'une réelle démonstration ne soit apportée : déchirement de la couche d'oxyde recouvrant les grains, conduction du courant à travers le contact grain-oxyde-grain par un effet relevant de la physique quantique, attraction de nature électrostatique ou moléculaire entre les grains, soudure locale des microcontacts due à l'échauffement par effet Joule, etc.

L'effet Branly fait partie des propriétés électriques des milieux granulaires, milieux omniprésents et aux comportements néanmoins surprenants, pour lesquels les physiciens se passionnent depuis le début des années 1990. L'intérêt de ce phénomène n'est pas que fondamental. Par

**1. La production d'une étincelle électrique induit**, via les ondes électromagnétiques émises, une diminution brutale de la résistance électrique d'un échantillon de grains métalliques situé à plusieurs mètres de l'étincelle ; on retrouve la résistance initiale en donnant un léger coup sur le dispositif. Tel est l'effet qu'Édouard Branly découvrit en 1890. Les expériences des auteurs de l'article ont confirmé l'interprétation de ce phénomène en termes de microcontacts entre grains qui se soudent sous l'effet du passage du courant électrique. Avant l'étincelle, les microcontacts entre les grains, recouverts d'une fine couche d'isolant (a), ne comportent que de très étroites zones faiblement conductrices à travers l'isolant. L'étincelle induit à distance le passage d'un courant électrique, lequel chauffe localement les microcontacts et fait fondre le métal, ce qui crée des ponts purement métalliques et diminue ainsi la résistance électrique (b).



2. Édouard Branly et son préparateur Rodolphe Gendron dans la salle de cours de physique à l'Institut catholique de Paris.

exemple, l'effet Branly est peut-être lié au risque d'allumage à distance, sous l'influence de la foudre, de combustibles solides. Un grave incendie se produisit ainsi en 1985 lors de l'inflammation accidentelle, sous l'effet de la foudre tombée à proximité, du combustible d'un missile américain *Pershing 2* stationné dans un entrepôt en Allemagne de l'Ouest. Or certains combustibles solides de fusées ou de missiles sont en partie composés de grains d'aluminium, recouverts d'une couche isolante d'alumine, et l'accident a suscité un regain d'intérêt au sein de l'industrie pour l'étude de la conduction électrique dans les milieux granulaires, et notamment de l'effet Branly.

Dans notre laboratoire, à l'École normale supérieure de Lyon, nous avons récemment franchi un pas crucial vers la compréhension de ce phénomène. Mais avant de voir comment nos expériences ont permis d'élucider l'origine de l'effet Branly, retraçons l'historique de la découverte de ce phénomène et des recherches associées.

## De la découverte à l'oubli

Les anticipations de la découverte de Branly furent nombreuses. En 1835, le Suédois P. Munk De Rösenschold constate une très forte hausse de la conductivité électrique d'un mélange de poudres métalliques lorsqu'il augmente l'intensité du courant imposé à la poudre. En 1879, l'Anglo-Américain David Hughes observe un phénomène similaire pour un contact imparfait, constitué d'un barreau de carbone reposant sur deux blocs de carbone fermés par un circuit électrique, ou avec un tube rempli de granules métalliques (dénommé microphone car il a été conçu initialement pour détecter les ondes acoustiques).

Il semble aussi que Hughes découvre, fait important, qu'un tel tube est sensible à une étincelle électrique émise à proximité, comme l'indique son changement soudain de conductivité. Cependant, la *Royal Society* de Londres n'est

pas convaincue et les résultats de Hughes ne seront publiés que 20 ans plus tard, en 1899, bien après la découverte des ondes hertziennes et celle de Branly. En 1884, l'Italien Témistocle Calzecchi-Onesti entreprend une série d'expériences sur le comportement de poudres métalliques soumises à une tension électrique. Il observe une augmentation importante de la conductibilité électrique après des ouvertures-fermetures successives d'un circuit comportant une bobine d'induction et un tube rempli de limaille.

En 1887, peu après la publication de la théorie de l'électromagnétisme de James Clerk Maxwell, Heinrich Hertz réalise des expériences démontrant clairement l'existence et la propagation d'ondes électromagnétiques, qui portent aujourd'hui son nom. Il remarque qu'une étincelle (qui émet une onde électromagnétique de haute fréquence, de l'ordre de 100 mégahertz) peut induire, à quelques mètres de distance, une autre étincelle dans l'interstice d'un morceau de fil métallique courbé en anneau.

C'est l'action à distance d'une telle onde électromagnétique sur de la poudre métallique que Branly observa en 1890. Entré à l'Institut catholique fin 1875, il y travailla plus de 65 ans, jusqu'à sa mort en 1940, à l'âge de 96 ans. Dès sa thèse, en 1873, Branly s'est intéressé à la conduction électrique de diverses substances. L'année de sa découverte, il monte un circuit comprenant en série une pile électrique, un galvanomètre (permettant de détecter des courants de très faibles intensités) et un tube en verre rempli de limaille métallique (voir la figure 3). L'aiguille du galvanomètre ne dévie quasiment pas, en raison de la grande résistance électrique de l'oxyde isolant sans doute présent à la surface des particules. Dans une autre pièce, à au moins 20 mètres du circuit, il produit une étincelle électrique. Il constate alors que la limaille devient « instantanément » conductrice (le galvanomètre indique le passage d'un courant), bien que « ni la lumière ni le bruit des étincelles puissent être perçus ». Un très léger choc sur le tube supprime ce courant, tandis que l'émission d'une nouvelle étincelle le rétablit.

Branly désigne son tube sous le nom de radioconducteur pour rappeler « que la conductibilité de la poudre augmente sous l'influence du rayonnement électrique qui émane de l'étincelle » ; « radio » est, à l'époque, un préfixe qui signifie radiant ou radiation. Le physicien effectue d'autres expériences avec divers types de poudres, faiblement ou fortement comprimées, et trouve que le même phénomène se produit avec seulement deux billes en contact ou, comme l'avait constaté Hughes, avec deux barreaux conducteurs posés l'un sur l'autre : un tel contact imparfait est très sensible à une étincelle électrique émise dans son voisinage.

Cette découverte trouva un fort retentissement dans la communauté scientifique lorsque le Britannique Oliver Lodge reproduisit en 1894 les expériences de Hertz à l'aide d'un tube de Branly, un « récepteur » d'ondes beaucoup plus sensible que la boucle réceptrice utilisée par Hertz. Lodge améliora le tube de Branly et en fit un récepteur fiable et reproductible, et il conçut un procédé automatique pour donner au tube de limaille un petit choc mécanique après chaque hausse brutale de la conductivité, afin de revenir à l'état isolant initial : le premier récepteur de télégraphie sans fil (TSF) venait de naître. Lodge nomma cohéreur (du latin *cohaerere*, coller) le tube, indiquant que

la limaille a été « cohérée » sous l'effet des ondes et qu'il faut la « décoherer » mécaniquement.

Lodge et Branly se focalisèrent alors sur la compréhension du phénomène et poursuivirent leurs recherches fondamentales sur les mécanismes de conductivité dans les poudres. Ils ne s'intéressèrent que très vaguement aux applications pratiques que cette découverte laissait augurer, notamment la possibilité de transmettre des signaux radio sans fil. Néanmoins, le tube à limaille étant capable de révéler le passage d'une onde électromagnétique, la possibilité de transmettre des messages à distance, sans lien matériel entre l'émetteur et le récepteur, devint réalité: c'est ainsi que les premiers signaux de télégraphie sans fil furent transmis dès 1895 par Marconi et, indépendamment, par le Russe Alexandre Popov. Ce dernier transmit, à Saint-Petersbourg, les deux mots « Heinrich Hertz » sur une distance de 250 mètres, et il utilisa par la suite son récepteur à tube de Branly pour détecter à dix kilomètres de distance des décharges électriques atmosphériques telles que la foudre.

## Des interprétations variées

L'ère des télécommunications venait de commencer. Mais, depuis, qui songe à Branly, découvreur de la radioconduction et inventeur de l'ancêtre de la télécommande (la télémechanique), en choisissant sa chaîne de télévision ou en ouvrant sa porte de garage? Pourtant, comme aime à le rappeler sa petite-fille Marion Tournon-Branly, la tour Eiffel, la plus grande antenne de télécommunications de France, située... quai Édouard Branly à Paris, est là pour nous y faire penser.

Quelle est l'origine de l'effet Branly? À l'époque, les interprétations étaient aussi nombreuses que variées. Certains pensaient que les grains se soudent entre eux par fusion du métal là où passe le courant électrique induit par l'onde, ces contacts s'établissant sur de très petites surfaces. Selon d'autres physiciens, les grains deviendraient, sous

l'influence de l'onde, des dipôles électriques et s'attireraient mutuellement par des forces électrostatiques; les grains subiraient alors des mouvements microscopiques et se « colleraient », formant ainsi de fragiles chaînes conductrices qu'un petit choc mécanique suffirait à briser.

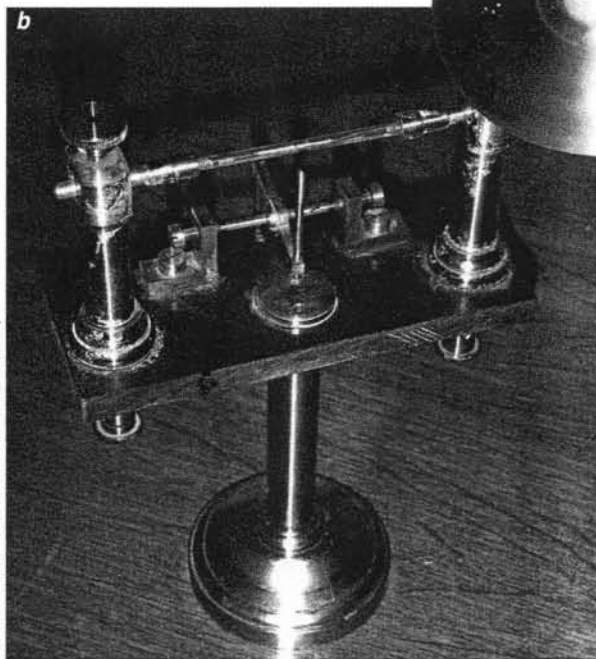
Branly ne crut jamais à cette hypothèse. Pour prouver que les mouvements des grains n'étaient pas nécessaires, il les emprisonna dans de la paraffine, de la cire ou de la résine, ou bien il les remplaça par une colonne de billes d'acier ou de disques métalliques soumis à un poids (voir la figure 3). Comme l'action de cohérence persistait, il fut convaincu que l'effet était lié aux propriétés du contact, et notamment à l'oxyde qui isole électriquement les grains. C'est dans cet esprit que Karl Guthe et Augustus Trowbridge, aux États-Unis, entamèrent en 1900 des expériences portant sur deux billes. Mais l'invention en 1904 des tubes à vide par John Fleming et Lee De Forest supplanta progressivement le cohéreur en tant que récepteur d'ondes, si bien que l'effet Branly tomba dans l'oubli sans être élucidé.

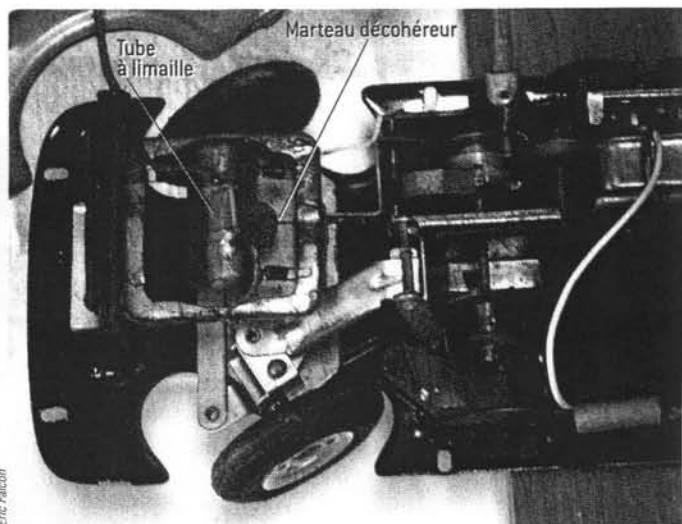
Branly acquit cependant une certaine renommée à la suite de l'exposition publique du Trocadéro, à Paris, le 30 juin 1905, sur la féerie de la télémechanique, où l'on présentait des expériences consistant à allumer à distance une série d'ampoules jusqu'à déclencher à distance le tir d'un pistolet ou la chute d'un boulet de canon. En 1911, il fut élu à l'Académie des sciences où il devança d'une voix... Marie Curie! La trace du cohéreur se perd alors jusqu'au milieu des années 1950, époque où un brevet japonais fut déposé pour le premier jouet télécommandé à distance: un autobus, utilisant un tube de Branly pour détecter les ondes envoyées par la télécommande (voir la figure 4).

Depuis le début des années 1960, plusieurs équipes de chercheurs se sont intéressées à la compréhension du vieux problème que



**3. L'un des premiers appareils construits** par Branly pour ses expériences de radioconduction était un tube radioconducteur monté sur un support en bois (a). Au milieu du tube est placée un peu de limaille métallique, cernée par deux tiges métalliques, elles-mêmes reliées par des fils métalliques au reste du circuit électrique. Certains appareils comportaient un frappeur, dispositif permettant de frapper légèrement le tube et ainsi de le ramener à son état initial de résistance électrique (b). Branly effectua des expériences de radioconduction avec des milieux granulaires divers, notamment des colonnes de grosses billes métalliques (c). (Clichés pris au musée Branly.)





4. Le **Radicon Bus**, un jouet japonais des années 1950, était télécommandé grâce à l'effet Branly. Le tube à limaille et le marteau décohéreur sont visibles sur la photographie du véhicule démonté.

représentait l'effet Branly, et c'est ainsi que plusieurs explications possibles, évoquées au début de cet article, ont vu le jour. Cependant, aucune des expériences effectuées dans le cadre de ces recherches ne permit de démontrer clairement quels sont les mécanismes régissant l'effet.

La transition de conduction électrique observée dans les milieux granulaires métalliques est un problème complexe. De nombreux paramètres sont en jeu et concernent l'assemblée de grains (distribution statistique de la taille et de la forme des grains, répartition spatiale des forces), mais aussi le contact entre deux grains (degré d'oxydation, état de surface, rugosité). Pour y voir plus clair, nous avons réalisé diverses expériences, portant sur des chaînes de billes métalliques en contact, sur des réseaux bidimensionnels de billes et sur de la poudre métallique.

## Des expériences avec des chaînes de billes

Dans un premier temps, il nous fallait démêler les effets locaux des contacts entre deux grains des effets collectifs de l'assemblée de grains pouvant être responsables de l'effet Branly. Il est facile de voir que certains des mécanismes proposés ne contribuent qu'à titre secondaire. Par exemple, Branly avait lui-même observé que son effet persiste dans le cas d'un contact entre deux grains seulement. Ainsi, un processus collectif de type percolation – c'est-à-dire une circulation plus ou moins aisée du courant électrique en fonction de la géométrie du réseau constitué par l'ensemble des contacts – ne peut pas être le mécanisme prédominant.

Par ailleurs, lorsqu'on applique directement une tension électrique continue à de la poudre métallique (ou à deux billes en contact), on observe un effet similaire à celui obtenu à distance de l'onde ou de l'étincelle, dès lors que la tension atteint un certain seuil : ce phénomène est nommé effet Branly continu. Aussi réduit-on délibérément le nombre de paramètres du problème, sans perdre en généralité, en

s'appuyant sur une expérience modèle : l'étude du comportement électrique d'une chaîne de billes métalliques directement soumise à une source de tension (ou de courant) continue (voir la figure 5). Notons que dans le cas de l'effet Branly historique, l'onde créée par l'étincelle fournit un champ alternatif, et non continu. Mais l'influence de la nature alternative de la tension, c'est-à-dire de la fréquence de l'onde électromagnétique, pourra être étudiée ultérieurement.

Nous avons ainsi imposé le passage d'un courant électrique continu à travers une chaîne d'une cinquantaine de billes en acier, de diamètre proche du centimètre, et nous avons mesuré la tension aux bornes de cette chaîne. Cela fournit la résistance, définie, selon la loi d'Ohm, comme le rapport entre la tension et l'intensité du courant. Aucun soin particulier n'ayant été apporté aux billes, les contacts ne sont pas métalliques : un film isolant d'oxyde ou de contaminant, de quelques nanomètres d'épaisseur, recouvre les surfaces. Or lorsqu'on augmente l'intensité du courant appliqué, on observe une transition d'un état isolant vers un état conducteur : la résistance décroît fortement, d'un facteur proche de un million (voir la figure 5). La tension, elle, atteint une valeur de saturation de l'ordre de 0,4 volt par bille, valeur qui dépend peu du matériau dont les billes sont constituées.

Ce qui est remarquable, c'est que ce comportement est irréversible : lorsqu'on diminue l'intensité du courant après l'avoir augmentée, la résistance de la chaîne reste faible et presque constante. Autrement dit, le point décrivant le comportement du système dans le plan résistance-intensité (ou dans le plan tension-intensité) décrit une courbe différente à l'aller et au retour. Après chaque cycle d'intensité (augmentation puis diminution), nous supprimons la force qui comprime les billes et nous faisons rouler celles-ci le long de l'axe de la chaîne pour renouveler les contacts. En procédant ainsi, nous observons à chaque fois la chute de résistance (l'effet Branly continu ou effet cohéreur) et la tension de saturation, et cela de façon bien reproductible.

Comment interpréter ces observations ? Pour expliquer les phénomènes électriques dans les matériaux granulaires,

Lodge et le Genevois Thomas Tommasina ont suggéré dès 1898 que les surfaces en contact entre grains sont si petites que la densité de courant qui les traverse est énorme et provoque un échauffement local pouvant conduire à la fusion du métal, améliorant ainsi la conduction. Damien Vandembroucq, Claude Boccara et Stéphane Roux, à l'École supérieure de physique et chimie industrielles de la Ville de Paris, ont repris en 1997 cette idée, tout comme Stéphane Dorbolo et ses collègues à l'Université de Liège, en 2000, mais sans jamais démontrer que ce mécanisme gouverne l'effet Branly. Nos expériences sur une chaîne de billes apportent en revanche une preuve suffisamment convaincante, tant sur le plan qualitatif que quantitatif. Nous avons en effet montré que les résultats des expériences coïncident avec ce que l'on prédit en considérant le contact entre deux surfaces rugueuses.

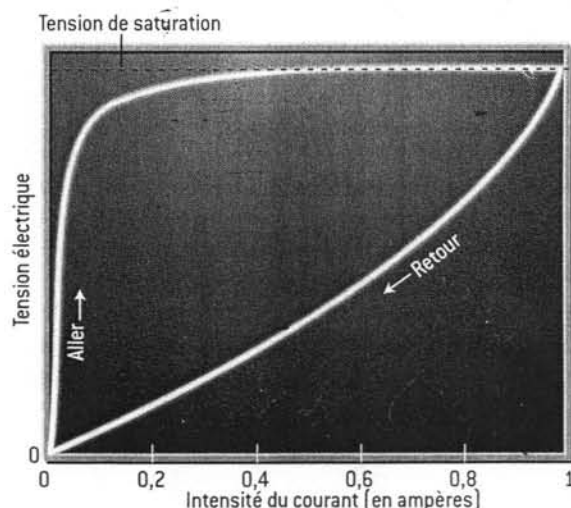
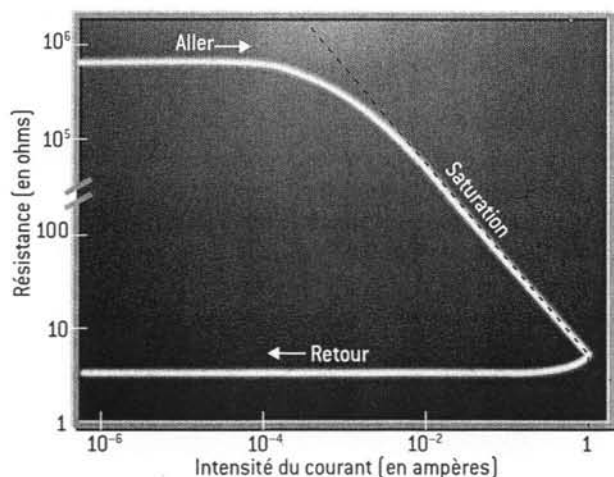
## Les microcontacts sont soudés par échauffement Joule

Quels sont les principales idées de cette modélisation théorique ? Bien que d'aspect lisse, chaque bille est rugueuse à l'échelle microscopique, la taille des rugosités étant de l'ordre du dixième de micromètre. La zone de contact apparent entre deux billes est large d'environ 100 micromètres, mais ce n'est qu'un contact apparent, constitué d'un ensemble de microcontacts de taille très inférieure et répartis de façon peu dense (voir la figure 1). Que se passe-t-il lorsqu'un courant électrique passe à travers un microcontact ? Il engendre de la chaleur proportionnellement à la résistance du conducteur et au carré de l'intensité du courant. Or la résistance étant inversement proportionnelle à la surface du microcontact,

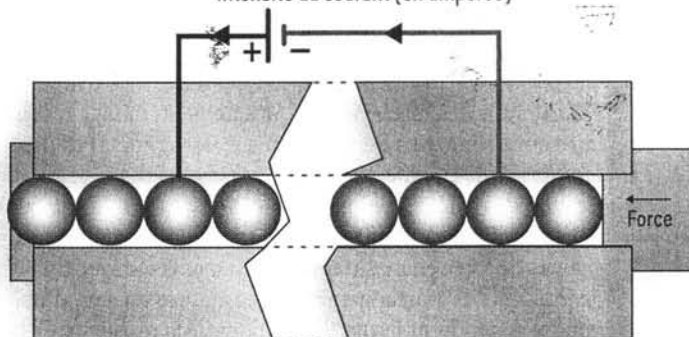
il s'ensuit que plus cette surface est petite, plus la chaleur dissipée dans le conducteur est élevée. Ainsi, au voisinage des microcontacts entre billes, un couplage électro-thermique intervient : le courant électrique y engendre un échauffement local, qui conduit à une augmentation des aires de contact, donc à une augmentation de leur conductance (c'est-à-dire une diminution de leur résistance), ce qui abaisse la température. En un temps de l'ordre de la microseconde, un équilibre thermique s'établit. Les calculs montrent que la température maximale atteinte est proportionnelle à la tension appliquée à la chaîne de billes, et qu'elle dépend peu du métal ou de la géométrie du contact.

Une tension aussi faible que 0,4 volt aux bornes d'un contact peut engendrer une augmentation de température de plus de 1000 degrés, suffisante pour faire fondre la plupart des métaux. Des petits ponts métalliques seraient ainsi créés par microsoudure, et un simple choc mécanique suffirait à les rompre. Ce scénario trouve sa correspondance dans les résultats expérimentaux portant sur une chaîne de billes. Ainsi, lorsqu'on s'approche de la tension de saturation, l'échauffement local est suffisant pour ramollir les microcontacts (voir les figures 1 et 5). Leurs aires de contact augmentent en conséquence, ce qui entraîne une diminution des résistances électriques. Quand la tension de saturation est atteinte, le métal fond et les microcontacts se soudent, ce qui stabilise les aires des microcontacts, la tension et leurs températures. Le phénomène est donc auto-régulé en tension et en température.

Outre l'accord avec la valeur expérimentale de la tension de saturation, cette interprétation de l'effet Branly continu en termes de microsoudures par effet Joule explique aussi pourquoi le paramètre pertinent dans les expériences est la



**5. Dans les expériences effectuées** par les auteurs sur les chaînes de billes, on fait passer un courant électrique à travers une chaîne comportant une cinquantaine de billes de diamètre proche du centimètre. L'intensité du courant est imposée, et l'on mesure la tension électrique aux extrémités de la chaîne, ou la résistance électrique de la chaîne. Une force constante est appliquée pour serrer les billes les unes contre les autres. La résistance initiale est de l'ordre de un million d'ohms. Quand l'intensité augmente au point que la tension atteigne une valeur de « saturation » égale à environ 0,4 volt par bille, la résistance chute brutalement pour atteindre quelques ohms seulement. Quand on diminue ensuite l'intensité, la résistance reste à peu près constante et faible – sauf si l'on fait bouger les billes de façon à renouveler les contacts, auquel cas la résistance regrime à son niveau initial.



tension de saturation et non l'intensité du courant imposé. Elle explique en outre que lorsqu'on diminue l'intensité du courant après l'avoir augmentée, on ne retrouve pas la résistance initiale, puisque les microsoudures sont irréversibles (sauf en cas de choc mécanique); elle permet d'ailleurs d'obtenir une expression théorique de la trajectoire de retour, dans la caractéristique tension-intensité du système, en très bon accord avec les résultats expérimentaux.

Nos expériences portent, rappelons-le, sur l'effet Branly continu. Si l'on extrapole le mécanisme régissant ce phénomène au cas de la modification de la conductance sous l'effet d'une onde radio ou d'une étincelle, situation de la découverte de Branly, on peut penser que c'est l'amplitude du champ électrique associé à l'onde qui est pertinente et non sa fréquence. Mais cela reste à étudier.

## L'électricité, une sonde pour les milieux granulaires ?

Outre l'aspect fondamental, quelle serait l'utilité de ces atypiques propriétés électriques de la matière granulaire ? Nous avons déjà signalé leur lien possible avec l'allumage à distance du combustible solide des fusées sous l'influence de la foudre. Un autre lien apparaît avec une application bien connue en métallurgie : la soudure par résistance électrique, ou « soudure à froid », entre deux matériaux, qui consiste à faire passer un courant électrique dans les pièces à assembler et dans une pointe en carbone appliquée sur la partie à souder. La surface de contact de la pointe étant très faible, la résistance électrique est élevée et le passage du courant crée un échauffement permettant d'atteindre rapidement la température nécessaire à la fusion des matériaux en contact. Une technique similaire, dite de frittage électrique, est employée pour agglomérer des poudres métalliques comprimées, la soudure étant réalisée grâce au passage d'un courant électrique.

Par ailleurs, il existe un composant électronique ayant le même genre de caractéristique tension-intensité que celle mise en évidence dans nos expériences. Il s'agit de la varistance, composant dont la résistance varie avec la tension appliquée à ses bornes et qui est beaucoup utilisé pour protéger les appareils électriques d'une surtension. Une telle caractéristique ne doit pas trop surprendre quand on sait que ce composant est une céramique constituée de grains conducteurs et d'oxydes métalliques.

On peut aussi envisager l'utilisation des propriétés électriques de la matière granulaire afin d'étudier les milieux granulaires eux-mêmes. Autrement dit, l'électricité permettrait de sonder des matériaux granulaires, perspective qui apparaît prometteuse car elle offrirait une technique d'exploration plus locale que les méthodes acoustiques existantes. Par exemple, les forces mécaniques dans un milieu granulaire sont réparties de façon très hétérogène et la plus grande partie d'entre elles sont supportées par une faible fraction des grains, lesquels forment un réseau de chaînes de forces. Est-il possible de déterminer l'évolution de ces chaînes de force en mesurant la résistance électrique du tas de grains ? Les réarrangements mécaniques au sein d'une poudre engendrent-ils des fluctuations de la résistance élec-

trique ? Si de telles corrélations existent, on pourrait alors, à l'aide de simples mesures de résistance électrique effectuées globalement sur l'amas granulaire, mieux comprendre, détecter et peut-être prévenir l'apparition de ces arches ou « voûtes » qui bloquent l'écoulement des grains (supposés légèrement conducteurs...) à la sortie d'un silo, par exemple.

## Étudier le bruit et le vieillissement

Les expériences réalisées sur une chaîne de billes ne permettent pas d'étudier les effets collectifs de la matière granulaire sur la conduction de l'électricité. Mais ces effets peuvent être observés au moyen d'expériences portant sur un réseau bidimensionnel de billes, ou sur un échantillon de poudre métallique. Nous avons effectué de telles expériences. Par exemple, si l'on applique une tension électrique constante aux bornes d'une poudre métallique, l'évolution temporelle du courant qui la traverse est, sous certaines conditions, très bruitée. Ce bruit électrique (fluctuations de la résistance au cours du temps) a pour mécanisme sous-jacent la dilatation thermique des grains, dilatation qui crée et détruit localement des contacts – là encore, la dissipation de la chaleur joue un rôle essentiel. Il présente d'étonnantes similarités avec le mouvement erratique d'une particule de fluide dans un écoulement turbulent ; son étude permet d'accéder à une meilleure connaissance du milieu, à la manière d'un garagiste qui écoute le bruit du moteur d'une voiture pour en améliorer ses performances.

Mentionnons pour finir que la résistance électrique d'un milieu granulaire se modifie lentement au cours du temps. L'analyse de cette évolution met en évidence des caractéristiques générales d'un « vieillissement », un lent retour vers un état d'équilibre. Les échelles de temps intervenant dans ce phénomène sont extrêmement variées, allant de moins d'une milliseconde jusqu'au jour et plus. Les fluctuations mesurées lors de cette relaxation présentent une grande richesse. Elles permettent de tester, dans une situation nouvelle, des idées développées dans d'autres domaines de la physique, tels que la turbulence hydrodynamique ou le vieillissement des systèmes hors équilibre. Il y a donc plus à comprendre que l'effet Branly...

**Éric FALCON** est chargé de recherches au CNRS. **Bernard CASTAING** est professeur et membre de l'Académie des sciences. Tous deux travaillent au Laboratoire de physique (UMR 5672) de l'École normale supérieure de Lyon.

É. FALCON et B. CASTAING, *Electrical conductivity in granular media and Branly's coherer: A simple experiment*, in *American Journal of Physics*, vol. 73, pp. 302-307, 2005.

É. FALCON, B. CASTAING et M. CREYSSELS, *Nonlinear electrical conductivity in a 1D granular medium*, in *European Physical Journal B*, vol. 38, pp. 475-483, 2004.

É. FALCON, B. CASTAING et C. LAROCHE, *Turbulent electrical transport in copper powders*, in *Europhysics Letters*, vol. 65, pp. 186-192, 2004.

*Musée Branly, Appareils et matériaux d'expériences*, Association des amis d'Édouard Branly, 1997.

<http://perso.ens-lyon.fr/eric.falcon/>

Site du musée Branly : <http://museebranly.isep.fr>