



# Le détecteur à limaille de Branly : toujours un mystère !

par Jean Gadreau

Depuis plus de 120 ans, les tentatives d'explications ont été nombreuses pour élucider le fonctionnement du premier détecteur utilisable. Aucune à ce jour n'a pu répondre de façon satisfaisante. En effet, bien souvent, les moyens d'investigation utilisés ne permettaient pas de réaliser les essais dans les conditions réelles de fonctionnement. C'est ainsi que les théories avancées n'ont pas pu être vérifiées de façon certaine.

Des travaux récents en micro et nanoélectronique visant à augmenter le taux d'intégration des cellules élémentaires dans les mémoires et les microprocesseurs ont orienté ma recherche pour aller plus loin dans la connaissance. Après une série de mesures expérimentales, j'ai pu faire le lien entre le fonctionnement du détecteur à limaille de Branly et un phénomène similaire connu qui limite la densité d'intégration en nanoélectronique.

Dans cet article, outre la démarche aboutissant à une explication du phénomène, je décris l'influence des principaux paramètres de construction du détecteur à limaille sur ses performances.

Les détecteurs ayant servi à l'étude feront l'objet d'une description détaillée pour être réalisés simplement par l'amateur.

*For more than 120 years there have been numerous attempts to explain how the first functioning detectors worked. To this day no one has been able to do so satisfactorily. This is because often the investigation methods employed didn't enable testing under realistic operating conditions. As a result it hasn't been possible to absolutely verify the proposed theories.*

*Recent works in micro and nano electronics aimed at increasing the integration of basic cells into memory and microprocessor devices steered my research towards furthering my knowledge. After a series of experimental measurements I was able to establish the link between the operation of Branly's « iron filings » detector and a known similar phenomenon which limits the integration density in nanoelectronics.*

*In this article, in addition to the approach leading to an explanation of the phenomenon, I describe the influence of the main parameters of the « iron filings » detector's construction on its performance.*

*The detectors used for the study are described in detail to enable easy replication by the enthusiast.*

## Préambule

Avant d'aborder cette lecture, on peut se référer à deux articles parus dans les numéros 46 (page 51) et 49 (page 17) de *Radiofil magazine*. Ils décrivent des tubes à limaille réalisés à l'époque de Branly.

La figure 1 nous rappelle le principe de fonctionnement d'un détecteur à limaille. Sans l'action d'un champ électromagnétique, la résistance entre les deux pistons est très grande (plusieurs dizaines de MΩ). Lorsque l'antenne est soumise à un champ électromagnétique, la limaille devient brusquement conductrice (résistance < 1 kΩ). On obtient à nouveau un état non conducteur avec un léger choc sur le tube.

L'état isolant est dû à la fine couche d'oxyde qui se forme spontanément sur la limaille avec l'oxygène de l'air. Les impuretés présentes dans l'air peuvent contribuer à augmenter l'épaisseur de ce film isolant. Ce processus d'oxydation est maintenant bien connu, par contre le mécanisme de passage à l'état conducteur n'a jamais été formellement démontré. C'est ce point qui constituera la trame de cet article.

Afin de faciliter la compréhension des expériences qui seront décrites ultérieurement, le tableau 1 donne une correspondance des notations scientifiques avec les préfixes placés devant les unités.

Exemple :

$1 \times 10^{-12} \text{ A} = 1 \text{ pA}$  (un picoampère).



## Historique des recherches

### Théories proposées du temps de Branly [1]

La première théorie connue semble être celle du physicien anglais Lodge. Il supposait qu'il se produisait, sous l'influence de la tension induite par l'onde, des étincelles microscopiques entre les grains qui avaient pour effet de les souder (de les cohérer) les uns aux autres. Il se formerait ainsi des chaînes parallèles réunissant les deux pistons du tube à limaille, d'où le nom de « cohéreur » qu'il donna au tube à limaille.

L'Allemand Fromme supposait qu'il existait autour des grains un diélectrique solide formé d'oxydes et que les étincelles crevaient ce diélectrique.

Arons, Van Gulik, en 1898, Tommasina et Malagoli en 1899, ont observé des étincelles entre les grains. Ces observations sont possibles lorsque le tube à limaille est proche d'une bobine de Ruhmkorff mais jamais on n'a observé d'étin-

Facteurs multiplicateurs		Préfixes	
Notation décimale	Notation scientifique	Nom	Symbole
1 000 000 000 000 000	$10^{15}$	péta	P
1 000 000 000 000	$10^{12}$	téra	T
1 000 000 000	$10^9$	giga	G
1 000 000	$10^6$	méga	M
1 000	$10^3$	kilo	k
1	$10^0$	Unité	
0,001	$10^{-3}$	milli	m
0,000 001	$10^{-6}$	micro	$\mu$
0,000 000 001	$10^{-9}$	nano	n
0,000 000 000 001	$10^{-12}$	pico	p
0,000 000 000 000 001	$10^{-15}$	femto	f

Tableau 1. — Facteurs multiplicateurs et préfixes des unités du système international (S.I.).

celles entre les grains dans les conditions de réception à grande distance.

Une autre théorie était basée sur l'action du champ électrique qui règne dans le tube. Chaque grain s'électrifierait par influence pour devenir un petit dipôle. Ainsi, les grains s'attireraient entre eux en se déplaçant légèrement. Se collant les

uns aux autres, ils formeraient des chaînes conductrices réunissant les deux pistons. Cette théorie a été étayée par l'expérience reproduite en figure 2. De la limaille est disposée sur un plateau, une pointe métallique est en contact avec la limaille. Comme pour le tube à limaille, lorsqu'une étincelle jaillit à proximité, la résistance entre le

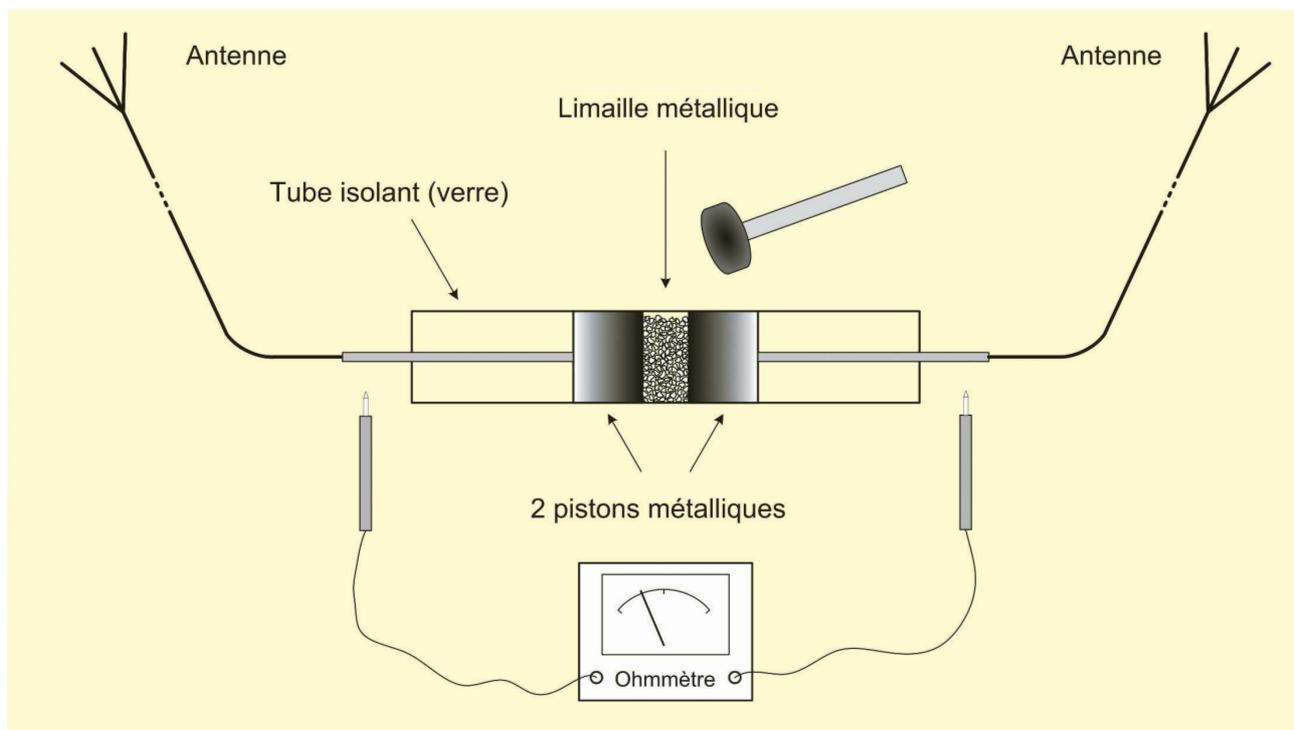


Figure 1. — Principe du tube à limaille.



## ■ ÉTUDE FONCTIONNELLE, RÉALISATION

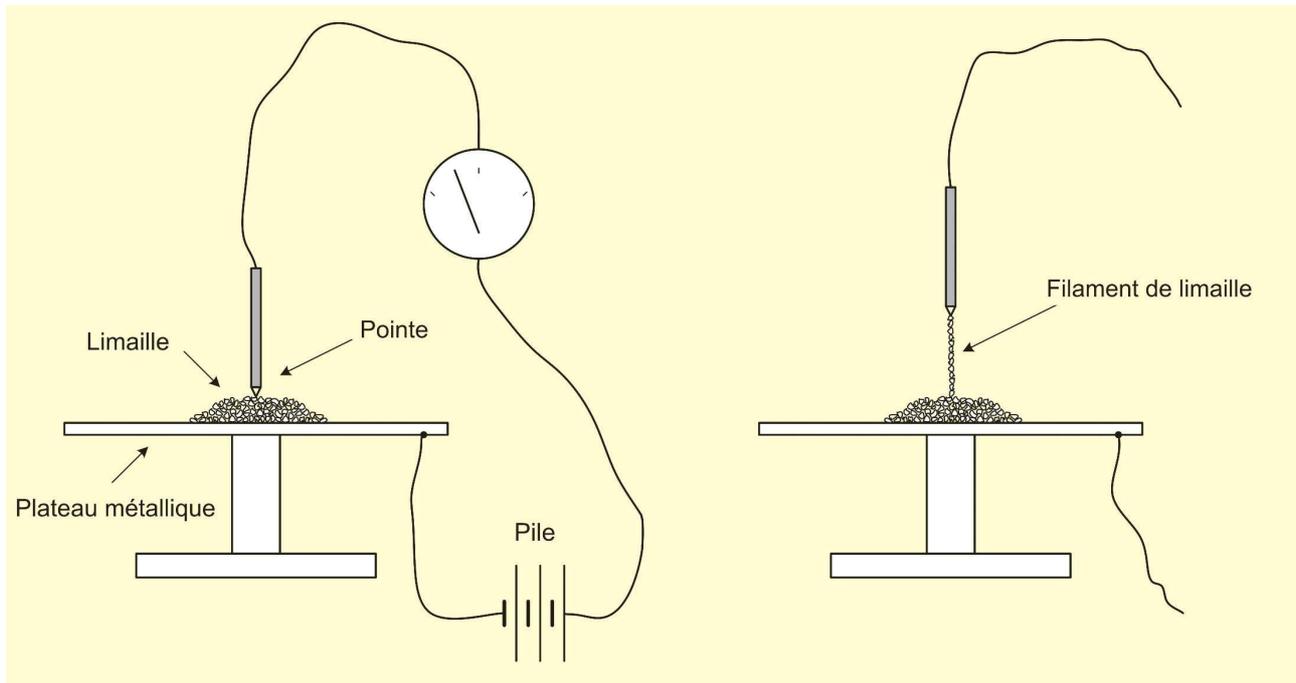


Figure 2. — Expérience de Tommasina.

plateau et la pointe diminue fortement. Si l'on soulève avec précaution la pointe, on entraîne un filament métallique formé de limaille. Cette expérience semble avoir été faite par Tommasina en 1898 puis signalée et utilisée par Arons et Righi pour étayer leurs théories. Tombée dans l'oubli, elle a été redécouverte par Vaszik en 1924.

Une autre hypothèse fait appel à la soudure des grains entre eux provoquée par une fusion due à l'élévation de température lors du passage du courant induit par l'étincelle. La surface de contact entre les grains étant très petite, la densité de courant y serait énorme et provoquerait un très fort échauffement local. Cette explication a été soutenue par Tissot et aussi Tommasina qui a observé des traces de fusion sur les grains. Poirson en 1922 a repris cette théorie. Ici, il semble encore que les expérimentateurs aient utilisé des émetteurs à étincelles très proches du détecteur.

### Les idées de Branly [1]

Dès le début de ses recherches, il s'est élevé contre les interpréta-

tions qui faisaient appel à des étincelles perçant le diélectrique situé entre les grains ou à un mouvement des grains s'associant en chapelets. C'est ainsi qu'il a refusé le nom de « cohéreur » donné par Lodge à son détecteur. Il appelle ses appareils des « radioconducteurs ». Branly ne nie pas que les observateurs aient pu voir des étincelles entre les grains ou observer au microscope des déplacements de ceux-ci. Il est convaincu qu'il s'agit de phénomènes observables seulement à proximité d'un générateur puissant. Pour lui, l'explication des réceptions lointaines est tout autre.

Branly pense qu'il faut rechercher la vérité dans les propriétés du diélectrique qui isole les grains. Lorsque l'épaisseur de cet isolant est très faible, ce dernier pourrait devenir conducteur sous l'influence des radiations hertziennes, il n'explique pas pourquoi. Il évoque une propriété fondamentale, encore inconnue de la matière, qui aurait été mise en évidence par ses travaux.

Notons que Branly, outre le détecteur à limaille, a aussi étudié ce phénomène de radioconduction

avec de nombreux dispositifs. Les principaux sont : une colonne de billes empilées dans un tube de verre et un trépied à pointes acérées reposant sur un disque, voir les figures 3 et 4.

### Les recherches récentes

En 1975, une équipe de chercheurs à Grenoble propose un mécanisme de claquage diélectrique de la couche d'oxyde à la surface des grains [3], on retrouve ici l'idée soutenue par Tissot.

Plus récemment (2003), des travaux ont été réalisés au laboratoire de physique de l'École normale supérieure de Lyon. Deux études concernant le comportement des contacts électriques ont été réalisées : l'une avec une chaîne de billes, l'autre avec de la poudre métallique comprimée.

### La chaîne de billes [4] [5]

Les auteurs ont réalisé un dispositif expérimental similaire à la colonne de billes de Branly, voir la figure 5. Un tube isolant en PVC peut contenir jusqu'à 50 billes d'acier inoxydable de 8 mm de diamètre avec une rugosité de 0,1  $\mu\text{m}$ .



## LE DÉTECTEUR À LIMAILLE DE BRANLY

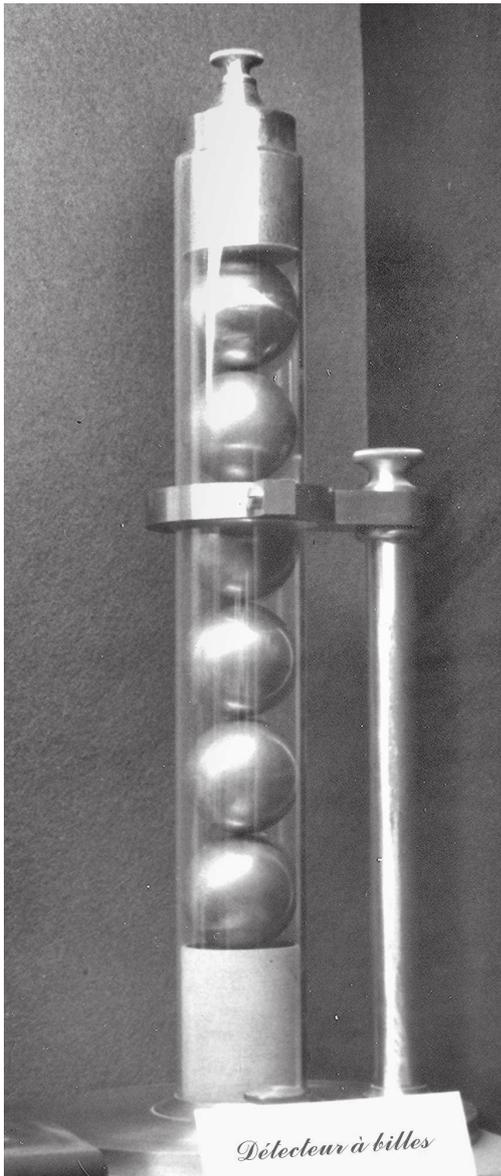


Figure 3. — DéTECTEUR À BILLES DE BRANLY.

Un moteur pas à pas permet d'obtenir différentes forces de pression mesurées par un capteur de force. Une alimentation stabilisée génère une tension appliquée à l'ensemble de la chaîne de billes, elle permet d'imposer soit une tension soit un courant.

Dans l'exemple de la figure 5, la mesure est effectuée avec une chaîne de 13 billes. Deux billes électrodes de part et d'autre des billes n° 1 et 13 servent à mesurer la tension. Toutes les informations sont traitées par un ordinateur.

La résistance de contact diminue lorsque la force augmente, ce que l'on pouvait prévoir intuitivement. Dans la zone 0 → 1 V (repère 1), pour une même force, la résistance reste sensiblement constante. Dans la zone 1 V → 5,8 V (repère 2), le courant croît d'abord lentement puis il se produit un phénomène d'avalanche au-delà de 5 V. Tant que l'on n'a pas atteint la zone d'avalanche ( $U_0 = 5,8$  V), le phénomène est réversible : en faisant décroître tension et courant, on peut retracer la même courbe.

Lorsque la zone d'avalanche est atteinte, la résistance décroît brusquement (repère 3) et conserve cette valeur, le phénomène est irréversible. Pour retrouver les conditions

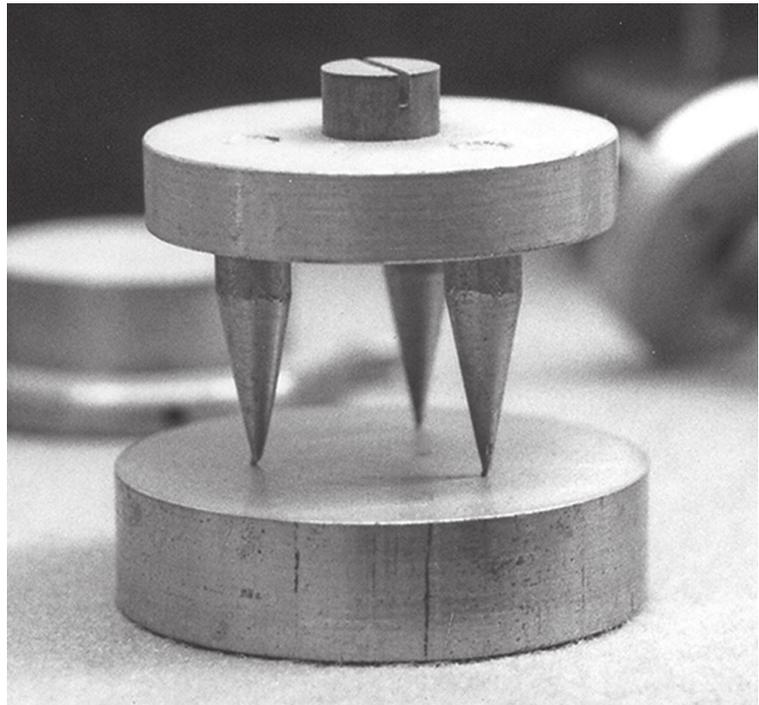


Figure 4. — DÉTECTEUR TRÉPIED DE BRANLY.

initiales, il faut écarter les billes. Sur la figure 7, les tensions figurent avec une échelle linéaire ce qui permet de mieux visualiser la zone d'avalanche.

La tension d'avalanche dépend peu de la force appliquée ; par contre des variations ont été observées en fonction du matériau utilisé. Dans l'essai réalisé avec de l'acier inoxydable la tension ramenée à un seul contact s'exprime ainsi :

On trouve 0,3 V avec du laiton et 0,2 V avec du bronze.

$$U_{0/c} = \frac{U_0}{N+1} = \frac{5,8}{13+1} \approx 0,4 \text{ V}$$

Selon les auteurs, le passage de l'état résistif à l'état conducteur trouve son explication dans l'interface entre sphères constituée d'une fine couche isolante. Du fait de la rugosité des billes, des microcontacts s'établissent. Leur rayon moyen est de l'ordre de grandeur de la rugosité soit 0,1 μm. Il y a un resserrement des lignes de courant au passage des microcontacts qui conduit à une forte densité de courant. L'échauffement par effet Joule augmente la dimension des microcontacts et la résistance diminue



# ÉTUDE FONCTIONNELLE, RÉALISATION

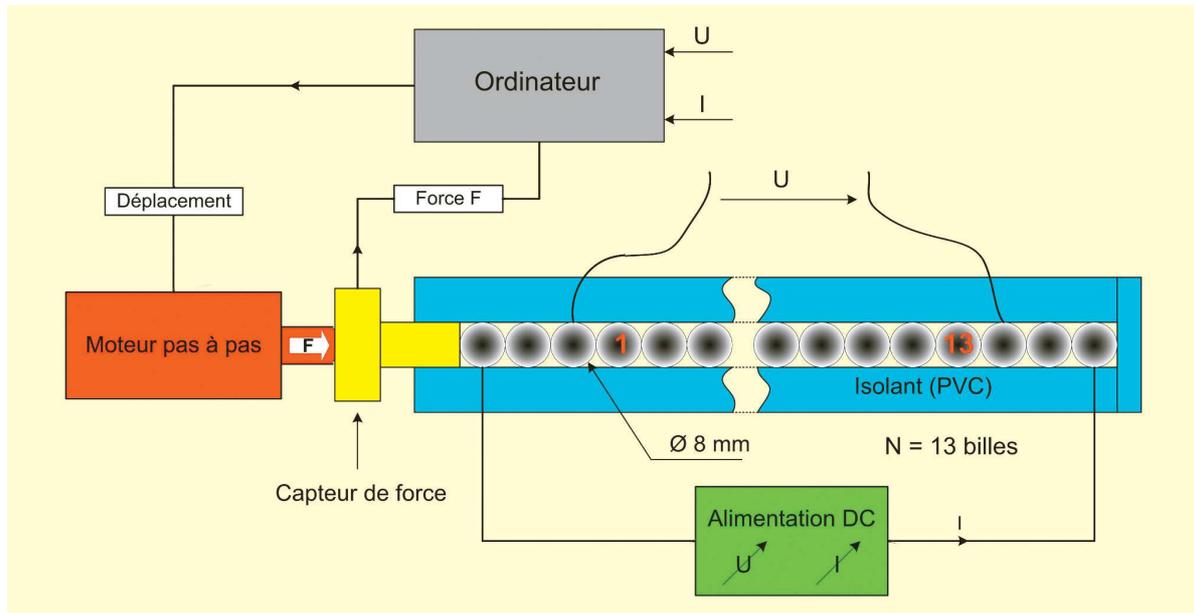


Figure 5. — Dispositif expérimental.

fortement. Lorsque le courant est suffisamment grand, il y a soudure locale des microcontacts et créations de ponts métalliques, c'est le phénomène d'avalanche. Cette interprétation a été justifiée par le calcul de la température atteinte au niveau des microcontacts, elle est directement liée à la tension mesurée quand se produit l'avalanche. Ainsi, avec une tension de 0,4 V aux bornes d'un contact, on atteint une température de l'ordre de 1000°C pour une température ambiante de 20°C, voir l'encadré page suivante. Cette température de contact excède le point de ramollissement qui conduit au phénomène d'avalanche. Le changement de l'état résistif à l'état conducteur serait donc lié à un phénomène thermique.

Des données concernant l'interface de contact sont rassemblées dans le tableau 2. Lorsque la force croît, la déformation des billes s'accroît et la surface de contact augmente. Cela explique l'augmentation de courant lorsque la force s'accroît (figure 7).

L'intérêt de ces travaux est certain, ils décrivent bien ce qui se passe lors de l'établissement d'un courant dans un contact. Cependant, les puissances mises en jeu ne peuvent pas expliquer le fonc-

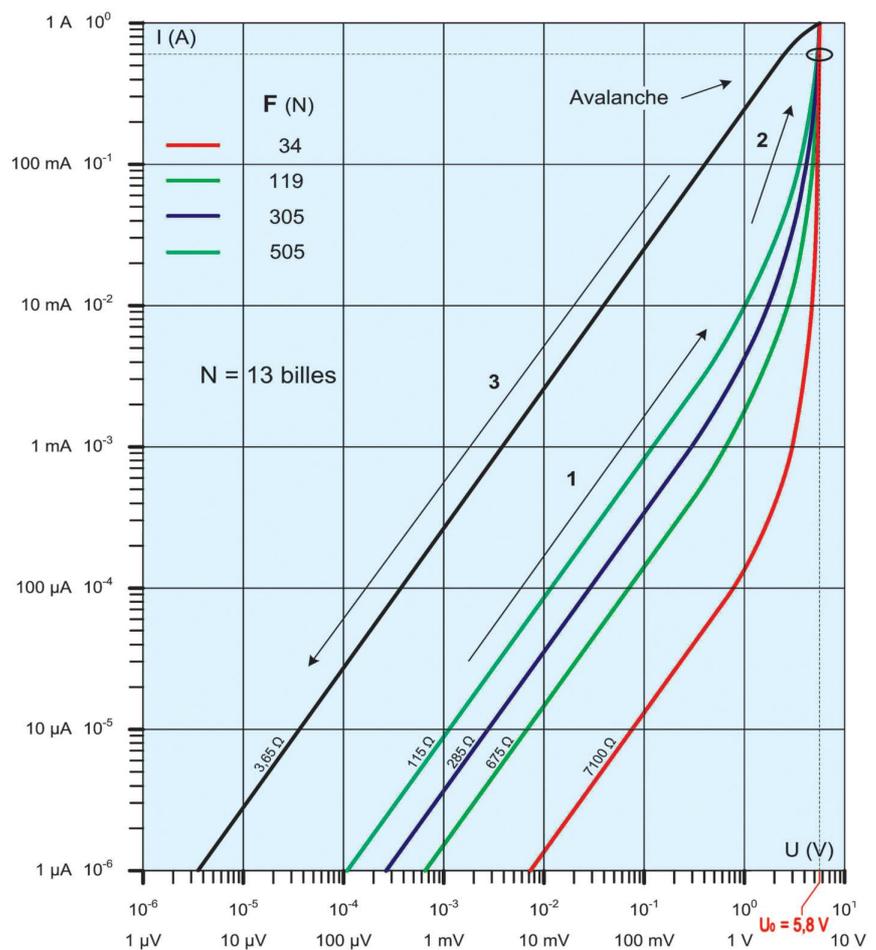


Figure 6. — Caractéristique  $I = f(U)$  d'une chaîne de billes (échelle de tensions logarithmique).



# LE DÉTECTEUR À LIMAILLE DE BRANLY

tionnement en tant que détecteur. Au moment de l'avalanche, la puissance est de l'ordre de 3,5 W (figure 7) soit 0,25 W par contact. Je ne connais pas la sensibilité de la colonne de billes utilisée par Branly mais rappelons que la sensibilité d'un tube à limaille est d'environ 100 nW [6].

## Poudre métallique comprimée [7]

Plus scientifiquement, on appelle cela un milieu granulaire. La figure 8 décrit le dispositif utilisé lors de l'étude. Dans un cylindre de plexiglas, on dispose entre deux électrodes de laiton de la poudre de cuivre sensiblement sphérique, d'un diamètre de 100 µm. L'électrode supérieure est soumise à une force F, elle coulisse dans le cylindre. On

### Calcul de la température d'un contact au moment de l'avalanche :

$$T_m = \sqrt{\frac{3 \cdot U^2 \cdot e^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot K_B^2} + T_0^2}$$

Avec :  $T_m$  : Température de contact en Kelvin (K),  
 $T_0$  : Température initiale = température ambiante = 293 K = 20°C,  
 $U$  : Tension aux bornes du contact = 0,4 V,  
 $K_B$  : Constante de Boltzmann =  $1,381 \cdot 10^{-23}$  J·K<sup>-1</sup>,  
 $e$  : Charge de l'électron =  $-1,6 \cdot 10^{-19}$  C

$$T_m = \sqrt{\frac{3 \cdot 0,4^2 \cdot (-1,6 \cdot 10^{-19})^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1,381 \cdot 10^{-23})^2} + 293^2} = 1311 \text{ K} \quad \text{ou : } T_m = 1311 - 273 = 1038^\circ \text{C}$$

N	F <sup>1</sup> kgf	Ø du contact µm	cm	surface de contact µm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	pression P = F / S (kgf/cm <sup>2</sup> )
10	1,02	80	0,008	5027	50,03·10 <sup>-6</sup>	20278
500	51	400	0,04	125664	1,257·10 <sup>-3</sup>	40573

1. — 1 N = 0,102 kgf ou 1 kgf = 9,81 N. Le kgf n'est pas une unité normalisée.

Tableau 2. — Caractéristiques de l'interface de contact.

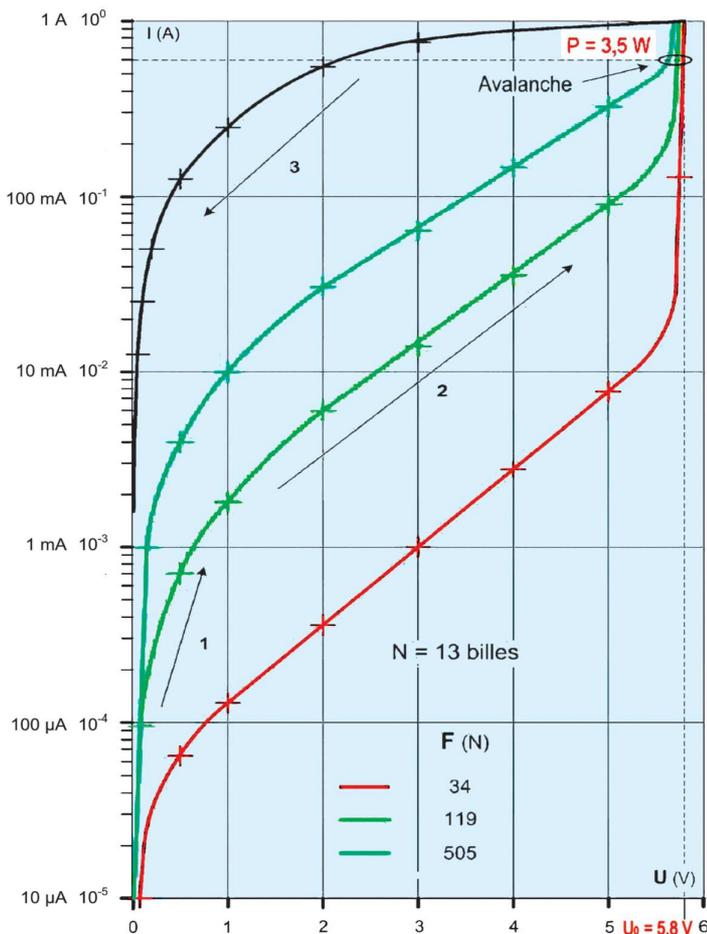


Figure 7. — Caractéristique  $I = f(U)$  d'une chaîne de billes (échelle de tensions linéaire).

peut constater une similitude avec certains détecteurs à limaille où les pistons sont soumis à une force de pression.

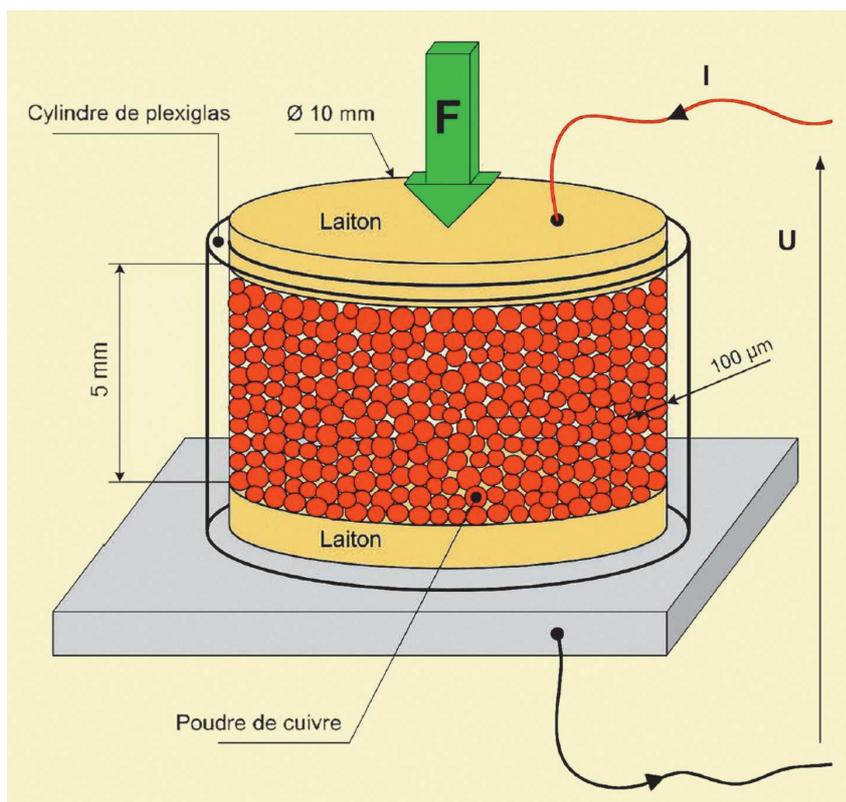
La figure 9<sup>1</sup> montre les courbes obtenues pour trois forces différentes. L'allure générale est proche de celle obtenue avec la chaîne de billes. Cependant la force F a une action importante sur le phénomène d'avalanche ce qui n'était pas le cas avec la chaîne de billes. Plus la force appliquée est grande, plus la tension d'avalanche diminue. Le dispositif est beaucoup plus sensible que la chaîne de billes, il y a un rapport d'environ 10 000 sur la puissance au moment de l'avalanche. Toutefois avec une puissance de l'ordre de 200 µW (figure 9), nous sommes encore loin de la sensibilité du détecteur à limaille. L'explication donnée pour la transition de l'état quasi-isolant vers l'état conducteur est similaire à celle donnée précédemment pour la chaîne de billes.

La particularité de ces dispositifs est la forte pression de contact utilisée dans les deux cas. La pression maximum atteinte est de 200 kgf/cm<sup>2</sup> pour la poudre de cuivre et 20 000 à 40 000 kgf/cm<sup>2</sup> pour les billes. Avec le système à poudre comprimée, une pression croissante entraîne une augmentation de la sensibilité ce qui ne semblait pas être le cas avec la chaîne de billes. Le facteur pression est déterminant pour la sensibilité dans les

1. — Dans le document d'origine, il s'agissait d'un réseau de courbes  $R = f(U)$ . J'ai déduit I par calcul pour tracer  $I = f(U)$  de façon à pouvoir faire la comparaison avec le relevé de la figure 7 et d'autres courbes figurant plus loin dans l'article.



## ÉTUDE FONCTIONNELLE, RÉALISATION



milieux granulaires, ce sera un point d'étude pour les tubes à limaille.

### Synthèse

Les dispositifs décrits ci-dessus expliquent bien ce qui se passe dans un assemblage de contacts. Ils ont le mérite d'avoir fourni des relevés de mesures permettant un raisonnement scientifique « collant » à la théorie des expérimentateurs. C'est une avancée car les théories plus anciennes ne nous sont pas parvenues avec des mesures scientifiques.

Par contre les courants mis en jeu dans ces expériences sont dans un ordre de grandeur bien plus élevé que le courant changeant l'état du détecteur de Branly en champ faible (émetteur lointain). Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour ne pas faire de conclusion hâtive. Dans quelle voie faut-il se diriger ?

◀ Figure 8. — Caractérisation d'un milieu granulaire.

## Propriétés diélectriques des microcontacts

### Recherches en microélectronique

Une étude de la tenue diélectrique des isolants en micro et nanoélectronique a retenu mon attention. Il s'agit d'une thèse de doctorat traitant des propriétés électriques des diélectriques à l'échelle nanométrique [8]. J'ai extrait de ces travaux des éléments qui permettront de faire un parallèle avec le fonctionnement du détecteur à limaille.

#### Structures MOS et MIM

Aujourd'hui à la base de notre électronique de pointe (microprocesseurs, mémoires...), il y a une cellule élémentaire que l'on cherche, depuis longtemps, à réaliser la plus petite possible pour augmenter leur nombre dans une surface donnée. Dans un microprocesseur, la cellule

élémentaire est une structure MOS (Metal-Oxyde-Semiconductor), l'élément de base dans la fabrication des MOSFET (Metal-Oxyde-Semiconductor-Field-Effect-Transistor). Aujourd'hui leur nombre a dépassé le milliard dans un même processeur. Dans les mémoires DRAM (Dynamic Random Access Memory), une capacité MIM (Metal-Insulator-Metal) peut être utilisée comme élément d'une cellule mémoire. La figure 10 donne une idée de ces cellules élémentaires.

L'isolant le plus utilisé aujourd'hui dans les structures MOS ou MIM est le dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ). La miniaturisation et l'augmentation des performances conduisent à des épaisseurs de  $\text{SiO}_2$  de l'ordre de quelques nanomètres pour obtenir des valeurs de capacité suffisamment élevées. En dessous d'une certaine épaisseur de  $\text{SiO}_2$ , les courants de fuite deviennent trop

importants pour permettre un bon fonctionnement.

Pour pallier ce problème, actuellement d'autres matériaux isolants sont testés. Ce sont des oxydes ayant une constante diélectrique ( $\epsilon$ ) supérieure à celle du dioxyde de silicium. De ce fait, il sera possible d'obtenir les valeurs de capacité souhaitées avec une épaisseur d'oxyde plus grande pour limiter les courants de fuite.

Caractériser ces isolants revient, comme on l'a vu avec la chaîne de billes, à relever la courbe  $I = f(U)$  d'une structure MIM. On réalise sur une puce de test des capacités ayant des surfaces différentes (la capacité sera proportionnelle à la surface car l'épaisseur d'isolant est constante). On peut également dire que ces capacités représentent des contacts ayant des surfaces différentes. La figure 11 montre un réseau  $I = f(U)$  pour des capacités ayant des sur-



# LE DÉTECTEUR À LIMAILLE DE BRANLY

faces de  $100 \mu\text{m}^2$  à  $80\,000 \mu\text{m}^2$ . La structure MIM est celle-ci :  $\text{TiN} / \text{HfO}_2 / \text{TiN}$ . L'isolant ( $\text{HfO}_2 =$  dioxyde d'hafnium) a  $6 \text{ nm}$  d'épaisseur<sup>2</sup>. Les électrodes conductrices sont en titane nitruré ( $\text{TiN}$ ).

2. — L'hafnium est utilisé principalement dans les systèmes de contrôle des réacteurs nucléaires pour sa grande capacité à absorber les neutrons. Aujourd'hui, le dioxyde d'hafnium est déjà présent dans certains processeurs pour remplacer le  $\text{SiO}_2$ .

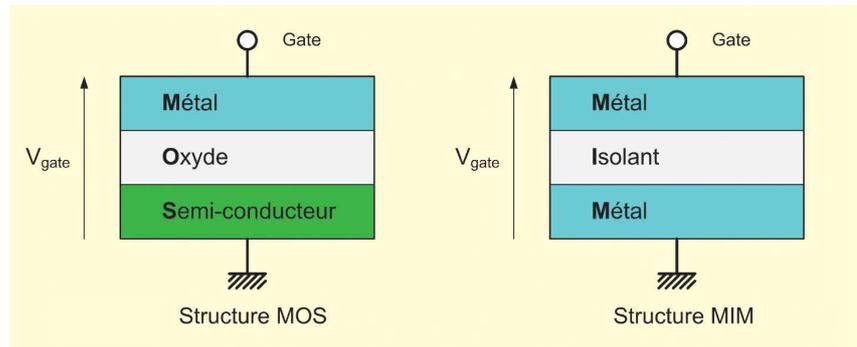


Figure 10. — Structures MOS et MIM

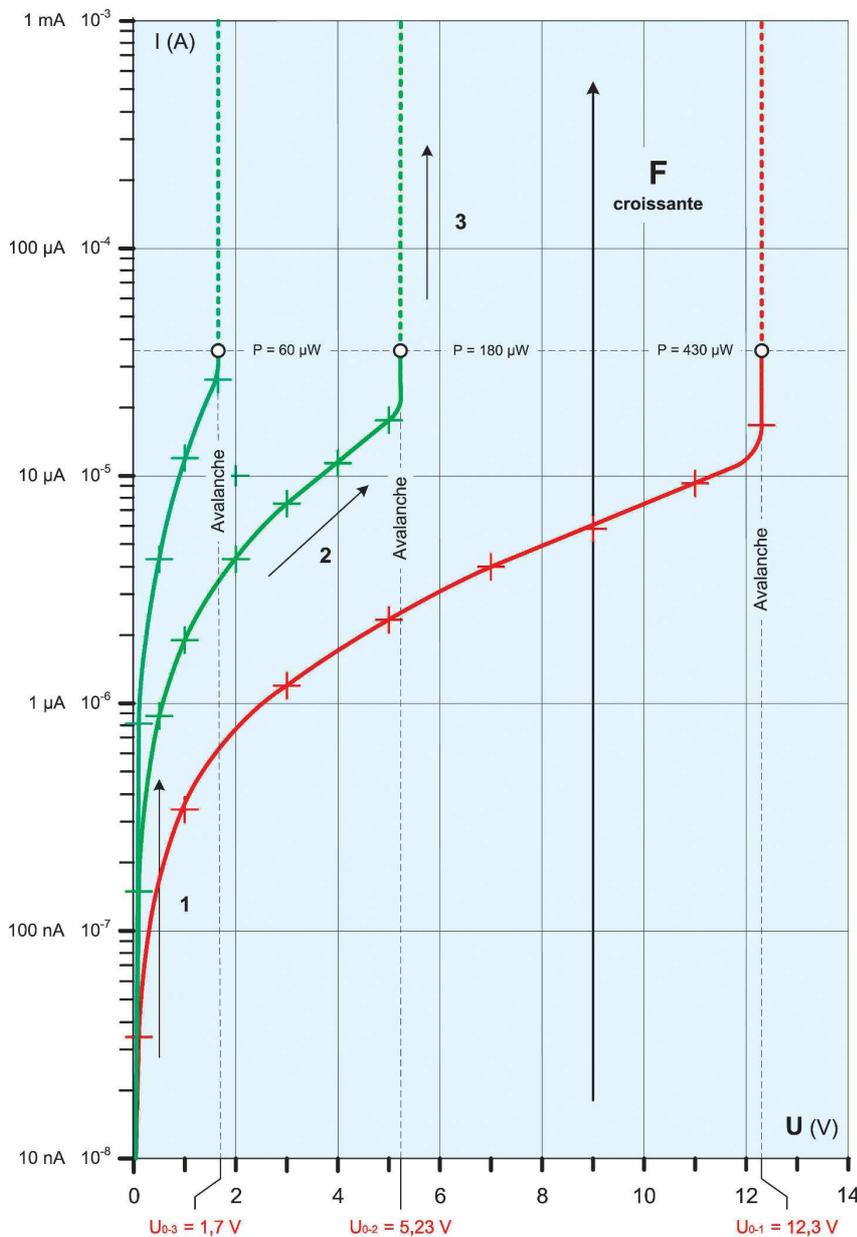


Figure 9. — Caractéristique  $I = f(U)$  d'un milieu granulaire.

Que nous dit ce relevé ? Pour une surface donnée, le courant de fuite croît avec la tension et brusquement il se produit un phénomène d'avalanche appelé *hard breakdown* (claquage « dur ») par les physiciens. Pour une tension donnée, le courant croît avec la surface. La tension d'avalanche est inversement proportionnelle à la surface. Les courbes sont identiques quelle que soit la polarité appliquée, il n'y a donc pas d'effet redresseur. L'allure générale est semblable à celles de la chaîne de billes et de la poudre de cuivre comprimée, la grosse différence est l'ordre de grandeur du courant mesuré qui est beaucoup plus faible. La conséquence est une puissance beaucoup plus réduite au moment de l'avalanche ( $100 \text{ nW}$  à quelques  $\mu\text{W}$ ).

### Evolution du courant dans le temps

Pour une tension fixée (avant avalanche), le courant correspondant n'est pas constant, il croît légèrement en fonction du temps. Pour obtenir un relevé cohérent comme celui de la figure 11, il faut procéder rapidement avec des écarts de temps constants entre deux mesures. Cette augmentation modérée du courant correspond au *soft breakdown* (claquage « mou »). Dans cette zone située avant l'avalanche, une décroissance de la tension entraîne toujours une décroissance du courant, celui-ci reste toutefois supérieur à la valeur obtenue dans le sens croissant de la tension. Ce phénomène n'a pas été mentionné lors de l'étude de la chaîne de billes.



# ÉTUDE FONCTIONNELLE, RÉALISATION

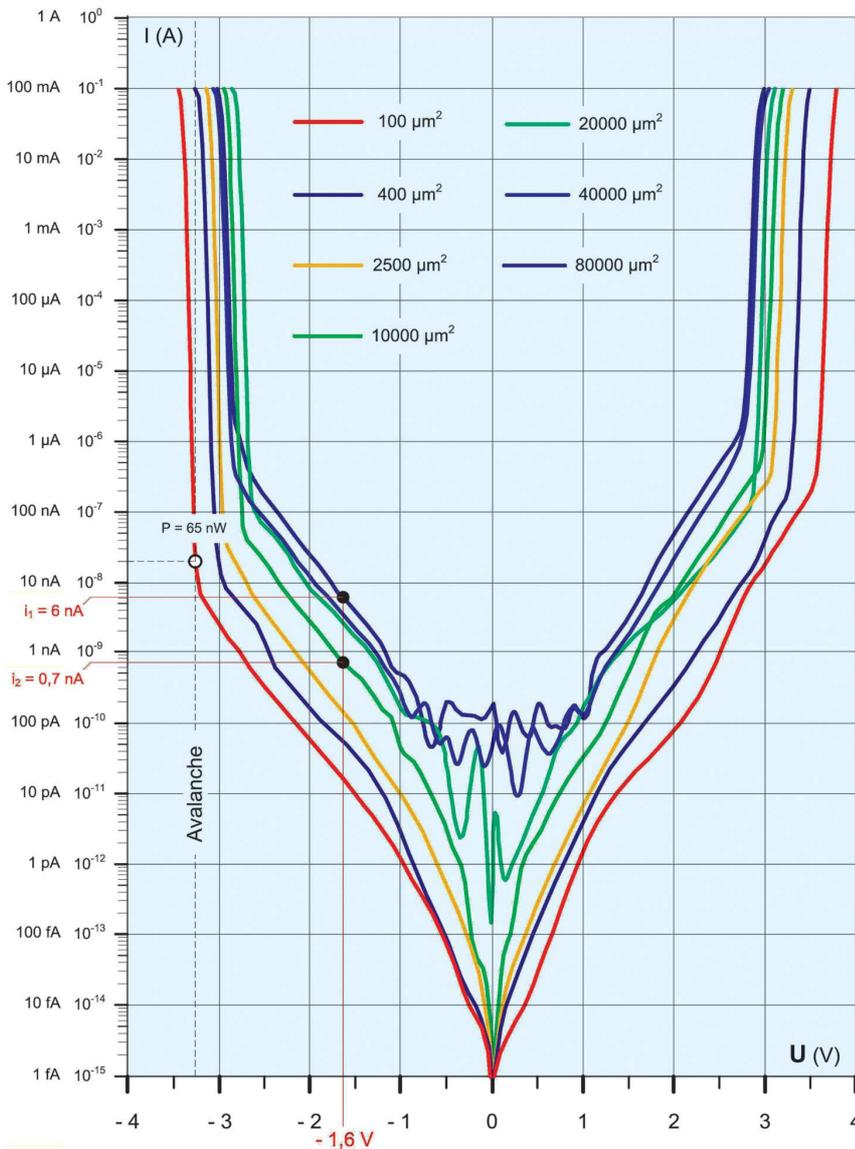


Figure 11. — Caractéristique  $I = f(U)$  pour différentes surfaces de capacités MIM.

## Courant filamentaire - claquage diélectrique

Communément parlant, on appelle claquage diélectrique la destruction d'un isolant (*hard breakdown*) pour une tension et un temps donnés. Ce phénomène se déclenche avec une certaine valeur de champ électrique. Est-ce le seul paramètre responsable du claquage ? Non. En effet lorsqu'on fait le calcul de la force engendrée par le champ, on se rend compte que celle-ci est insuffisante pour provoquer seule le déplacement des ions.

La compréhension actuelle de ces mécanismes de défaillance repose sur la génération de défauts liés au stress de l'isolant. Des simulations 2D et 3D ont été réalisées, le modèle 2D est schématisé sur la figure 12. Ces défauts finissent par former un chemin conducteur parcouru par un courant filamentaire. La densité de courant dans ce filament atteint des valeurs très importantes et provoque des échauffements à l'échelle nanoscopique. Ce stress thermique accroît la dégradation de l'oxyde ce qui conduit à une augmentation de la section du chemin conducteur ou à l'apparition de chemins conducteurs parallèles. La conséquence est une croissance

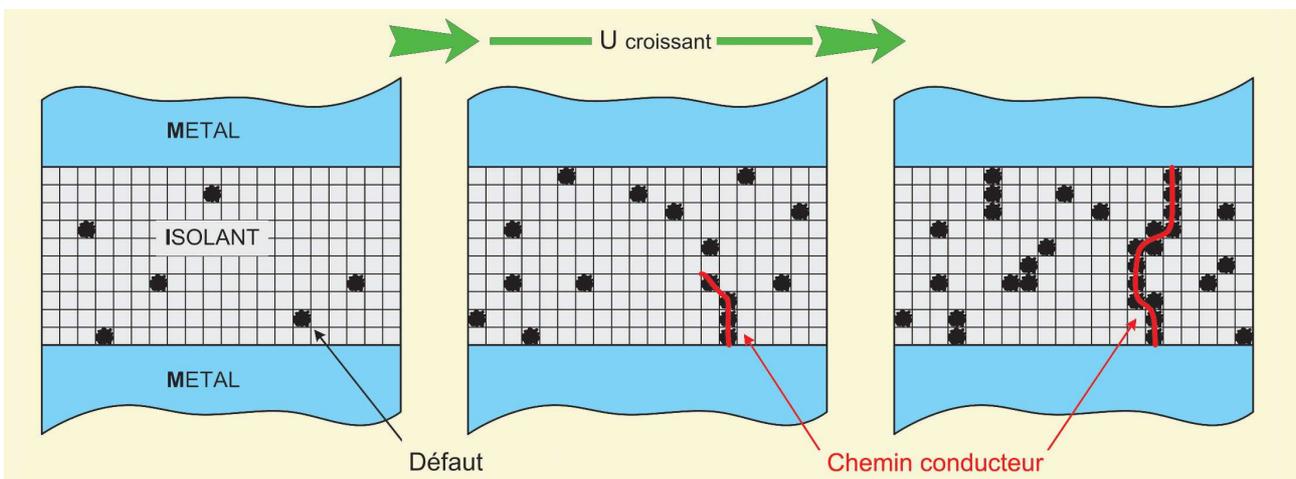


Figure 12. — Création d'un chemin conducteur à partir de défauts dans l'isolant.



## LE DÉTECTEUR À LIMAILLE DE BRANLY

du courant et la finalité le claquage de la couche d'oxyde présentant alors une faible valeur de résistance. La température du filament conducteur peut être calculée, nous verrons ce calcul au cours de notre première réalisation.

De tels claquages ont pu être visualisés grâce au microscope AFM (Atomic Force Microscopy ou microscope à force atomique). Ces microscopes ne sont, bien sûr, pas optiques mais basés sur la mesure des forces entre une nanopointe et la surface étudiée. Leur résolution verticale atteint 0,1 nm c'est-à-dire l'ordre de grandeur de la dimension d'un atome. Principe : la nanopointe, munie d'un miroir, est montée sur un microlevier flexible. Un rayon laser est envoyé sur le miroir qui le réfléchit vers un photo détecteur permettant de déduire la position  $x$ ,  $y$  et  $z$  de la pointe. On obtient ainsi la topographie d'une surface<sup>3</sup>. La figure 13 montre la topographie et le profil d'un assemblage TiN / HfO<sub>2</sub> avec deux claquages, l'épaisseur d'isolant (HfO<sub>2</sub>) est de 4 nm. La dimension des points de claquage est de 40 à 60 nm.

### Rapport entre la surface de contact et le courant de fuite

La distribution des défauts dans l'oxyde se fait d'une manière aléatoire selon une loi statistique liée à l'épaisseur et à la surface d'oxyde. Pour une épaisseur donnée, le nombre de défauts (donc le courant) est proportionnel à la surface.

Dans la partie la moins perturbée du graphe de la figure 11, il est possible de le vérifier. Comparons la capacité ayant une surface de 80 000  $\mu\text{m}^2$  et celle de 10 000  $\mu\text{m}^2$  soit un rapport de surface de 8. Avec une tension de -1,6 V :

— pour  $s_1 = 80\,000\ \mu\text{m}^2$ , on a  $i_1 = 6\ \text{nA}$  ;

— pour  $s_2 = 10\,000\ \mu\text{m}^2$ , on a  $i_2 = 0,7\ \text{nA}$ .

3. — Pour une explication détaillée du fonctionnement de l'AFM, se reporter aux pages 23 à 26 de la thèse référencée en [8], disponible sur internet.

D'où le rapport  $\frac{i_1}{i_2} = \frac{6}{0,7} = 8,57$  proche du rapport des surfaces.

### Synthèse

Le phénomène de claquage en microélectronique a fait l'objet de nombreuses études. Tout n'est pas encore expliqué au niveau ato-

mique. Mais les études convergent pour affirmer que le claquage est bien lié à un processus d'emballage thermique. Avant d'aborder les essais avec le tube à limaille constitué d'une multitude de micro-contacts, je vous propose d'étudier un microcontact seul.

Le comportement de ce microcontact pourra être comparé aux

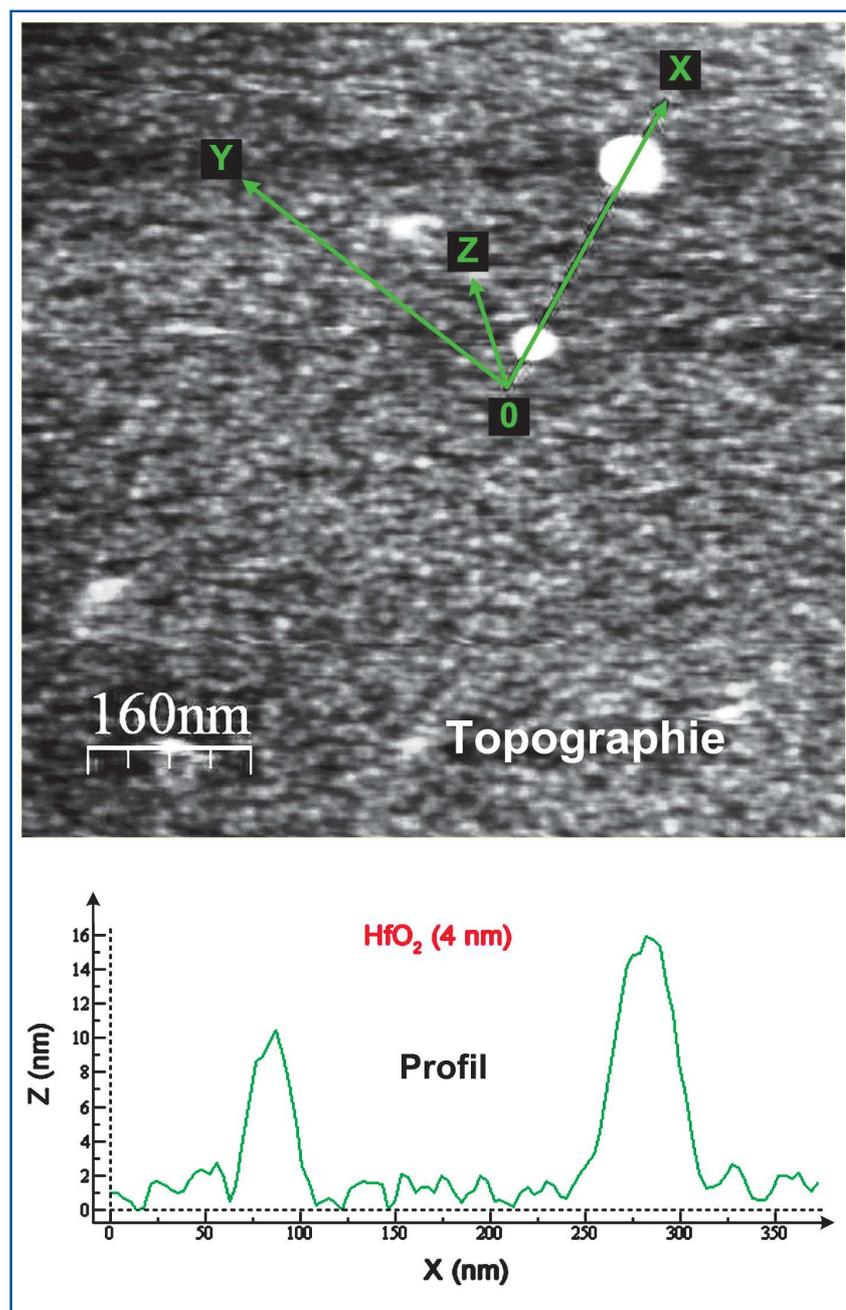


Figure 13. — Topographie et profil AFM de deux points de claquage.



## LE DÉTECTEUR À LIMAILLE DE BRANLY

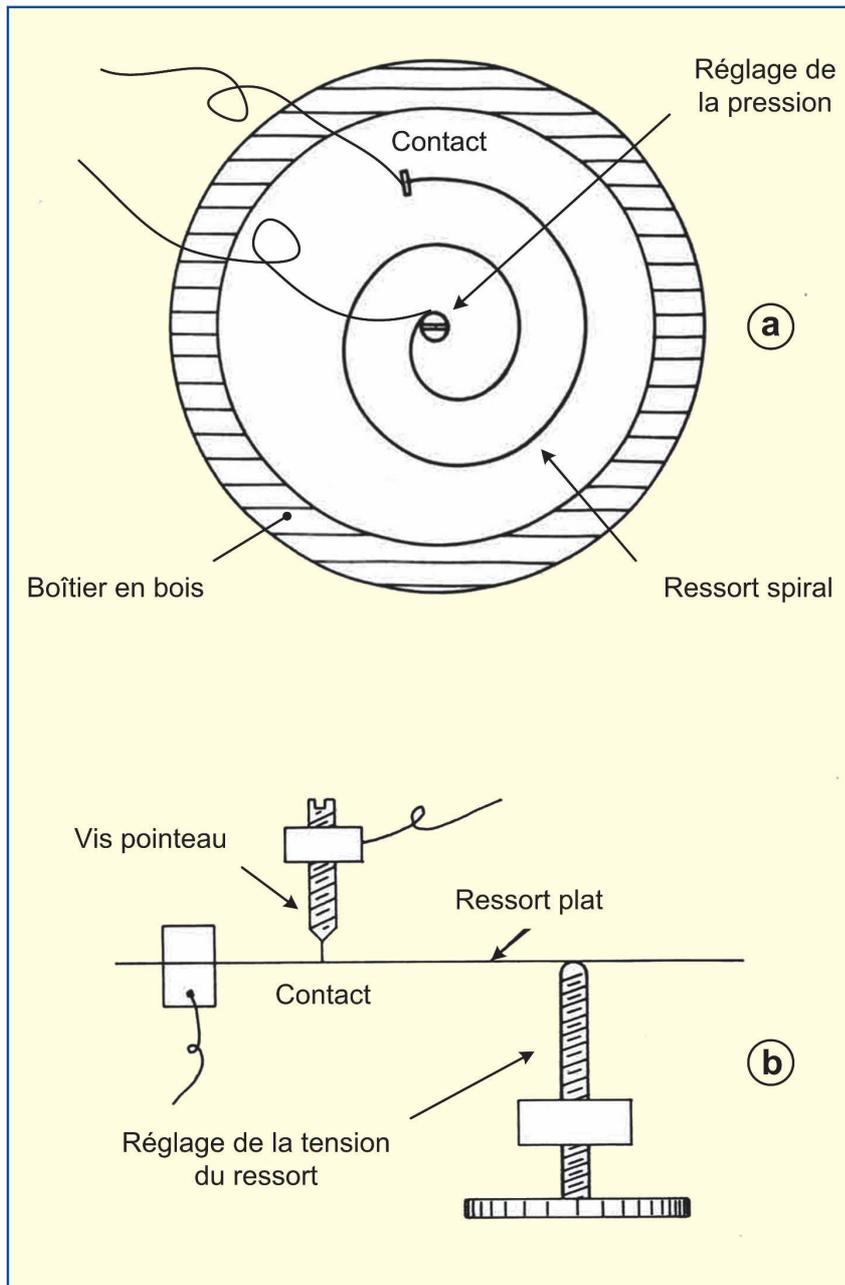


Figure 14. — Détecteur à monocontact de Lodge.

propriétés, maintenant bien connues, des capacités MIM. Il va falloir réaliser ce contact et surtout le caractériser en mesurant des courants aussi faibles que 100 fA ( $1 \cdot 10^{-13}$  A).

Lodge fut sans doute le premier à étudier des microcontacts, malheureusement les conclusions de ses travaux ne nous sont pas par-

venues. Le principe de deux de ses réalisations est reproduit sur la figure 14.

À suivre : Réalisation d'un microcontact d'étude et mesures.

Jean Gadreau (RFL 4332) et  
Radiofiliste de l'Isère.

[jmg.gadreau@gmail.com](mailto:jmg.gadreau@gmail.com)

## Références - sources

[1] D'après un article de Robert Gabillard paru dans la revue *L'Onde électrique*, (mai-juin 1991) - Vol. 71 - n° 3, p. 7 à 11.

[2] Source Wikipedia.

[3] G. Kamarinos, P. Viktorovitch et M. Bulye-Bodin, C. R. Acad. Sci. Paris 280, 479 (1975).

[4] Bulletin de la société française de physique n° 148. Propriétés électriques de la matière granulaire : « l'effet Branly continu ». Auteurs : Eric Falcon et Bernard Castaing. Disponible sur le site : <http://www.msc.univ-paris-diderot.fr/~falcon/SFP05/SFPBranly05.pdf>

[5] *The European Physical Journal B*. Nonlinear electrical conductivity in 1D granular medium. Auteurs : E. Falcon, B. Castaing et M. Creyssels. Disponible sur le site : <http://www.msc.univ-paris-diderot.fr/~falcon/EPJB03/EPJB04.pdf>

[6] *Histoire des Moyens de Télécommunication* de J.-C. Montagné, page 355.

[7] *Rencontre du non linéaire 2005. Bruit et intermittence du transport électrique dans les milieux granulaires*. Auteurs : M. Creyssels, E. Falcon et B. Castaing. Laboratoire de physique de l'Ecole Normale Supérieure de Lyon. Disponible sur le site : <http://www.msc.univ-paris-diderot.fr/~falcon/PNL05/PNL05Crey.pdf>

[8] *Propriétés électriques à l'échelle nanométrique des diélectriques dans les structures MIM et MOS*. Thèse de Cédric Sire pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Joseph-Fourier de Grenoble. Travaux réalisés au sein des laboratoires de STMicroelectronics (Crolles) et du Laboratoire des Technologies de la Microélectronique (CNRS-LTM de Grenoble). Thèse disponible sur le site : [http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/44/29/19/PDF/These\\_Cedric\\_SIRE\\_FINAL.pdf](http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/44/29/19/PDF/These_Cedric_SIRE_FINAL.pdf)

[9] *Early Radio Wave Detectors* de Vivian J. Philips. Disponible en téléchargement gratuit sur le site : <https://archive.org/details/EarlyRadioWaveDetectors>

[10] Olympiades de physique 1998. Caractérisation d'une surface de l'échelle macroscopique à l'échelle nanométrique. <http://olympiades.briand44.free.fr/olymp98/>

[11] *Les cahiers d'expériences du commandant Tissot*. Sur le site : <http://www.camille-tissot.fr/index3.php?rubrique=mapage803>

Dessins et photos de l'auteur, sauf mention particulière pour les figures ci-dessous.

Figure 2 : [1]

Figures 3, 4 et 25 [2]

Figure 5 : [4]

Figures 6 et 7 : [5]

Figures 8 et 9 : [7]

Figures 10 à 13 : [8]

Figure 14 : [9]

Les chiffres entre crochets renvoient aux références.

