

Le détecteur à limaille de Branly : toujours un mystère !

Deuxième partie

par Jean Gadreau

Cette deuxième partie est consacrée à la réalisation d'un micro-contact et de détecteurs pour l'étude du phénomène d'avalanche.

In the second part of this article, we look at making a micro-switch and detectors for the study of the phenomenon of avalanche.

Réalisation d'un microcontact et mesures

L'objectif est de réaliser un contact le plus ponctuel possible simulant un contact entre grains de limaille. J'ai choisi de réaliser ce contact en aluminium car les propriétés de son oxyde, l'alumine, sont bien connues. À l'air libre, l'aluminium se recouvre spontanément d'une couche d'oxyde (l'alumine de formule chimique Al_2O_3 qui est un excellent isolant). L'épaisseur de cette couche d'alumine est d'environ 5 nm [10], elle est constante dans le temps. Cette propriété est précieuse pour la reproductibilité et l'exploitation des mesures. Le point de fusion de l'alumine se situe à 2054° C.

Le matériau de base est un feuilard d'aluminium d'environ 10 μm d'épaisseur. Il s'agit d'aluminium alimentaire de la plus basse qualité (épaisseur la plus faible). La face brillante, vue au microscope optique numérique, est visible sur la figure 15. Les sillons laissés par le laminage sont bien visibles (largeur 10 μm). Une analyse à l'échelle nanométrique [10] montre une rugosité moyenne de 2,7 nm pour une surface de 1 μm^2 , donc la possibilité d'avoir des contacts très ponctuels.

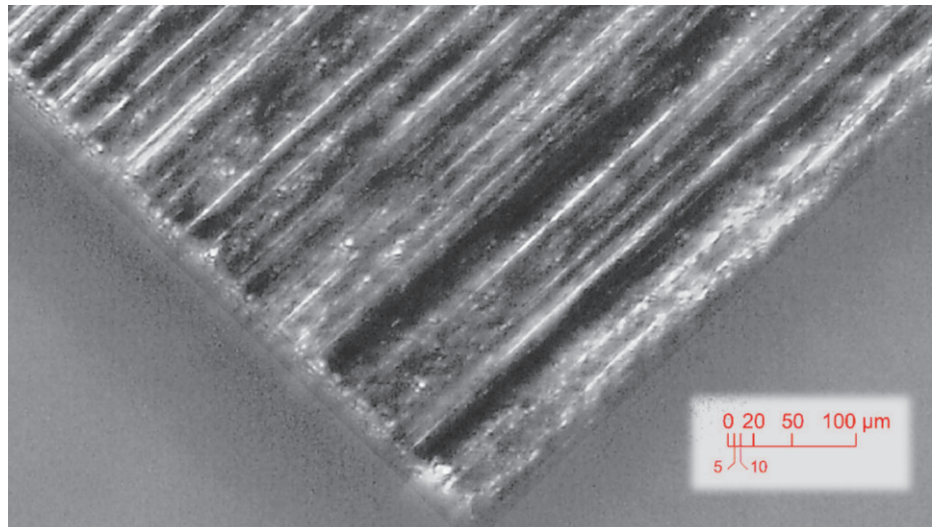


Figure 15. — Microcontact vu au microscope.

Constitution du contact

Les différentes parties sont représentées sur la figure 16. Les cotes principales sont données. L'embase est un circuit à pastilles de genre « Véroboard » qui servira à faire les différentes liaisons électriques.

Les pièces principales :

— (a) : entretoise taraudée-filetée M 3 de longueur 30 mm ;

— (b) : partie mobile du contact avec pression réglable, aluminium épaisseur 10 μm ;

— (c) : partie fixe du contact, aluminium épaisseur 10 μm . Partie brillante vers le haut ;

— (d) : feuilard cuivre d'épaisseur 100 μm , réglage de la pression avec l'écrou moleté.

La difficulté principale est la réalisation de la pièce (b) qui nécessite de faire des gabarits. Les figures 17

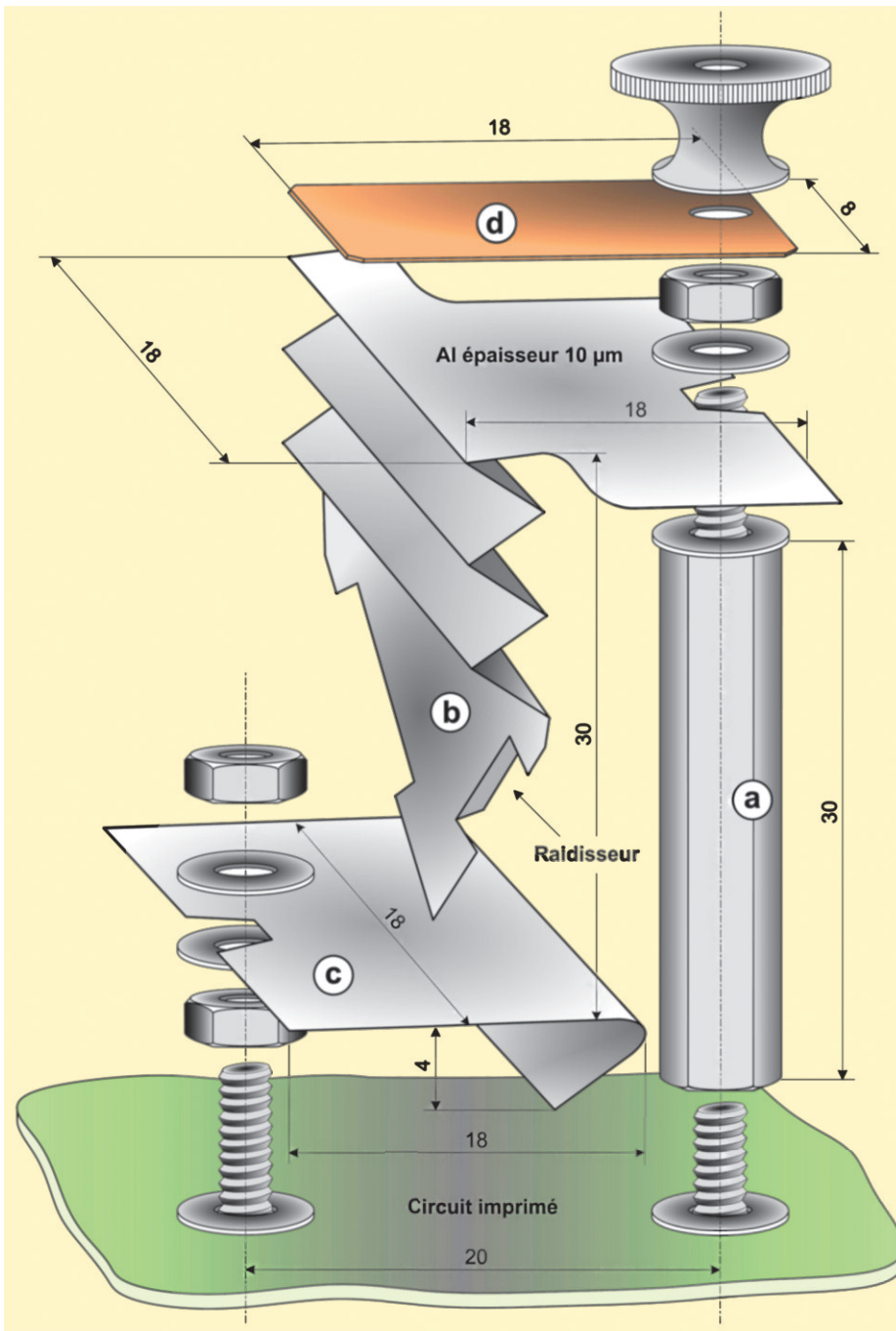


Figure 16. — Assemblage du microcontact.

à 20 décrivent un procédé pour sa mise en œuvre. Les gabarits sont réalisés soit en bois soit en carton. La figure 18 montre le gabarit qui donnera la forme principale de la partie mobile.

Sur la figure 17, on voit :

- le gabarit (a) pour la découpe de la feuille d'aluminium (b) dont la longueur est représentée par un trait rouge sur la figure 18 ;

- la feuille d'aluminium fixée sur son gabarit ;

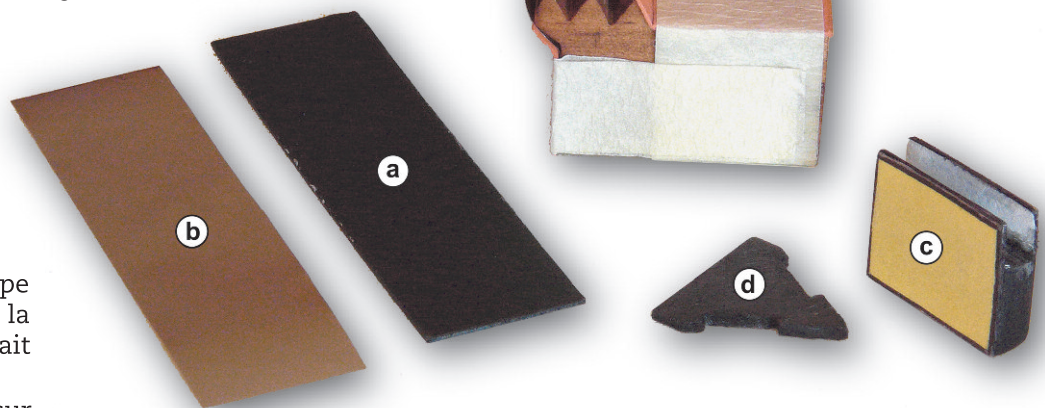


Figure 17. — Outillage de découpe et de formage.

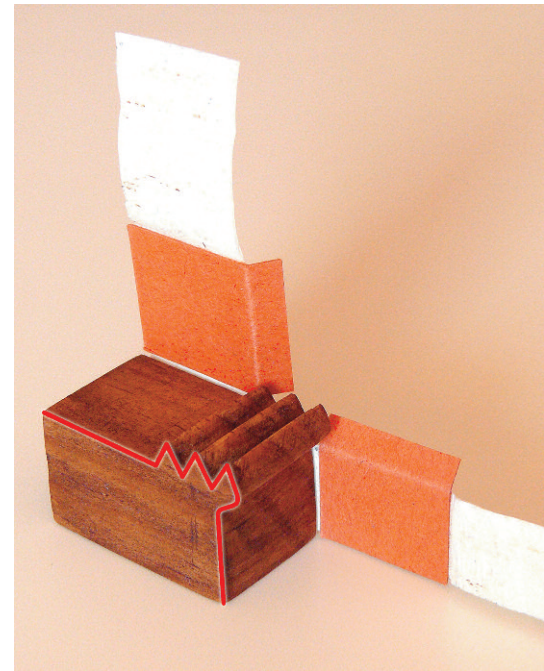


Figure 18. — Gabarit du microcontact.

- un outil (c) pour donner la forme aux ondulations ;

- un gabarit (d) pour découper la pointe avec ses raidisseurs.

Toutes les coupes sont faites avec une paire de ciseaux en très bon état.

La figure 19 montre l'utilisation de l'outil (c) pour donner la forme aux ondulations.

Le résultat final se trouve sur la figure 20, une intervention manuelle est nécessaire pour obtenir l'angle de 90° (effet ressort des ondulations).

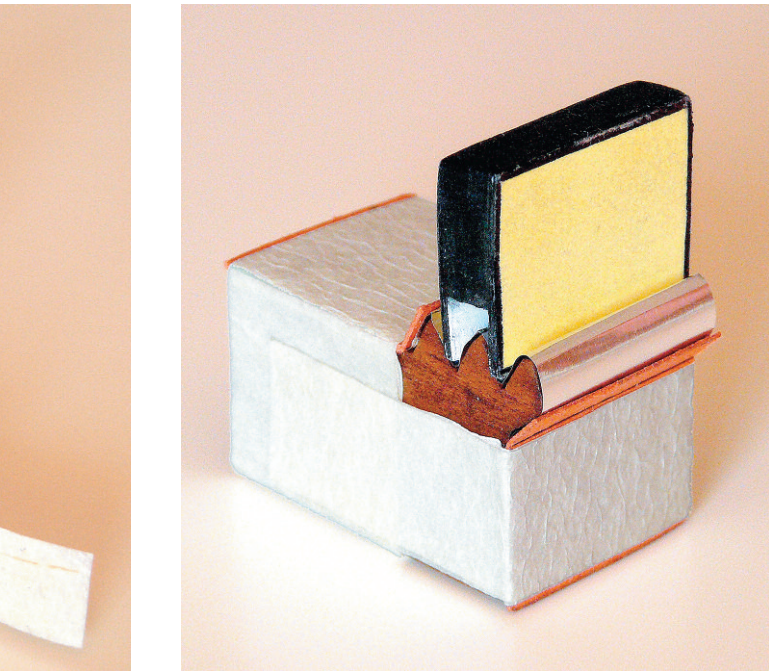


Figure 19. — Formage des ondulations.

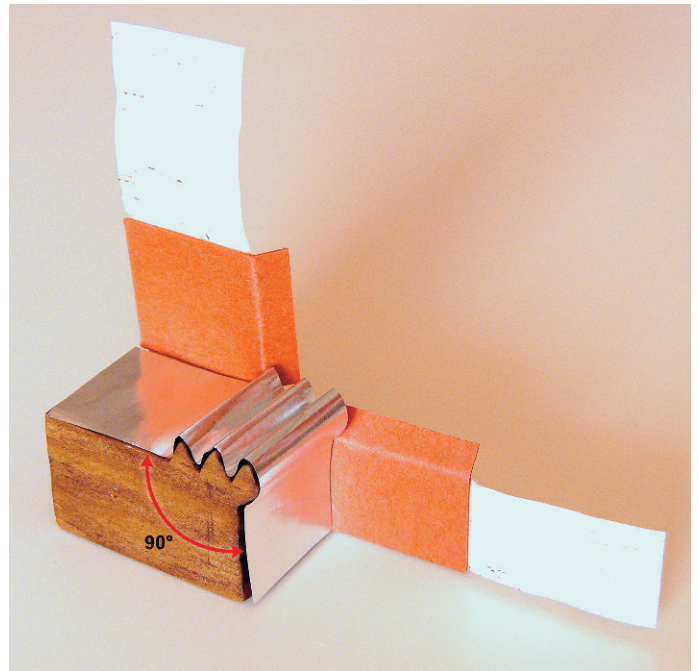


Figure 20. — Résultat du formage.

Le contact assemblé est visible sur la figure 21, le cylindre à l'arrière plan est une résistance de $100\text{ M}\Omega$ qui sera utilisée pour les mesures.

Mesures

Comment mesurer des courants de l'ordre du picoampère et moins si possible ? Finalement c'est assez simple. Il suffit d'utiliser un millivoltmètre numérique monté en ampèremètre. Le shunt sera la résistance d'entrée du millivoltmètre. Ainsi avec une résistance d'entrée de $10\text{ M}\Omega$ et le calibre 200 mV d'un $20\,000$ points on aura une résolution de :

$$\frac{10\ \mu\text{V}}{10\ \text{M}\Omega} = 1\ \text{pA}.$$

Je possède un ancien Fluke 8060A qui a la possibilité de commuter une résistance d'entrée supérieure à $10\,000\text{ M}\Omega$ sur le calibre 200 mV .

Dans cette configuration, j'ai mis une résistance de $100\text{ M}\Omega$ en parallèle sur l'entrée, j'ai donc pu obtenir une résolution de $0,1\text{ pA}$ (100 fA). Le multimètre doit être protégé contre les surcharges car lorsque l'avalanche se produit, on dépasse largement le calibre. À noter qu'aujourd'hui on trouve des multimètres

avec des résistances d'entrée de $100\text{ M}\Omega$.

La figure 22 décrit le montage de test du microcontact. Sur la figure 23, on voit le microcontact câblé, le circuit imprimé est enfiché directement sur le bornier du multimètre. On a ainsi un câblage très court pour minimiser les perturbations électromagnétiques.

Le relevé du début de la courbe nécessite de mesurer des tensions de quelques dizaines de microvolts. L'idéal pour faire cette mesure serait de se placer dans une cage de Faraday afin de ne pas être perturbé par l'environnement radioélectrique. N'ayant pas un tel équipement à ma disposition, je me suis installé dans une pièce de l'appar-

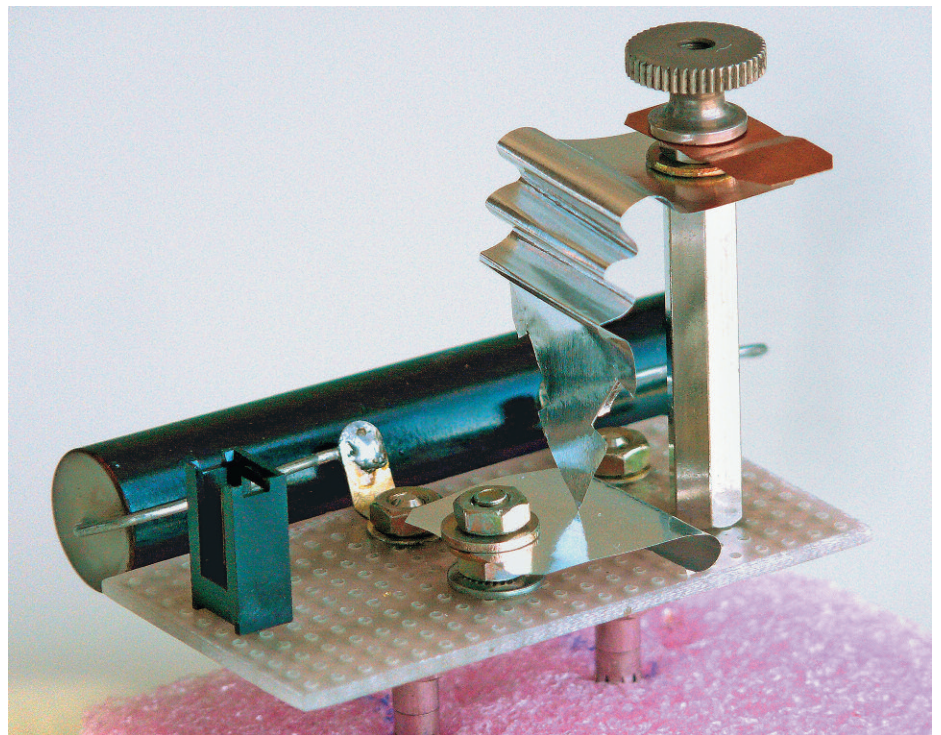


Figure 21. — Microcontact assemblé.

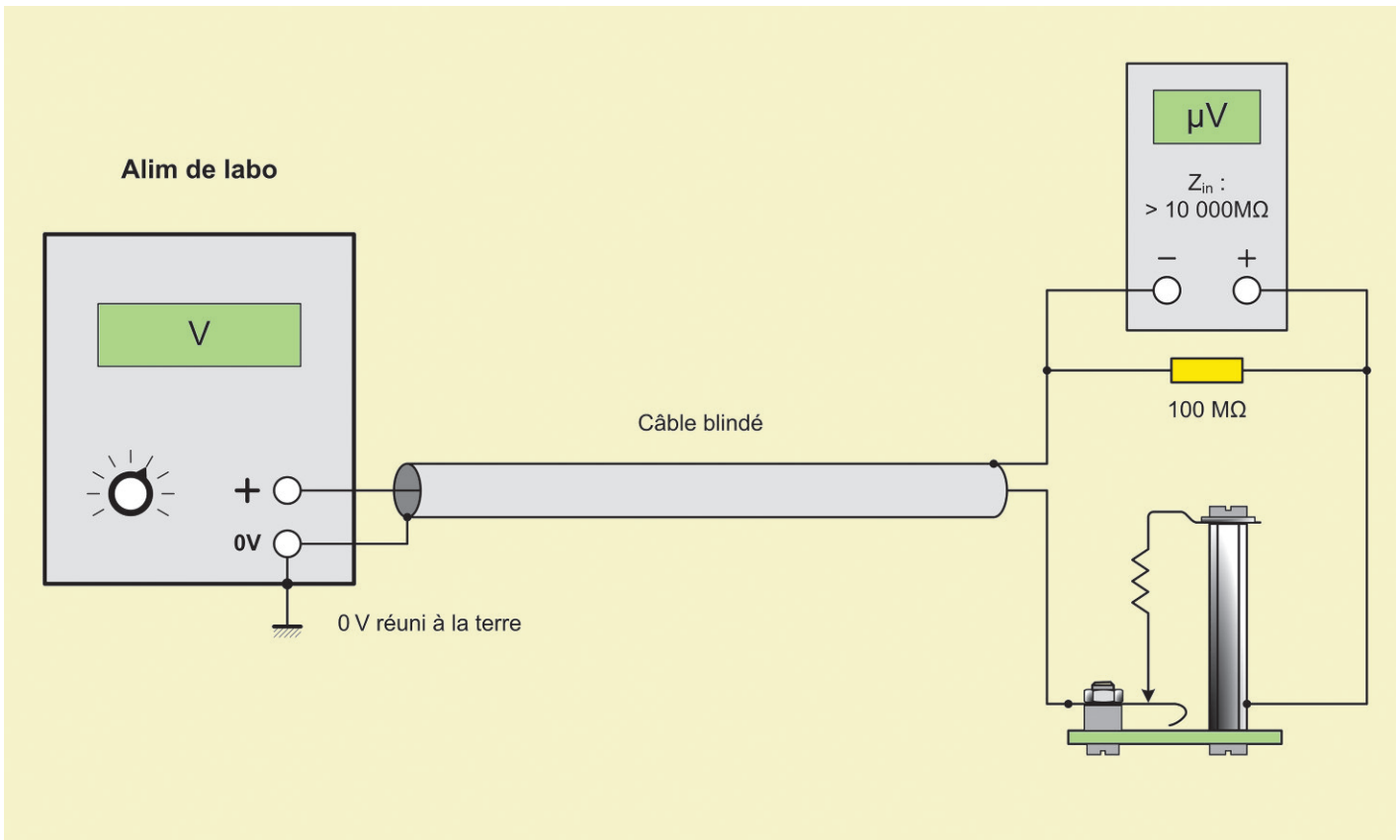


Figure 22. — Montage de test du microcontact.

tement où la réception des GO et PO est impossible.

Le zéro volt du montage doit être réuni à la terre ainsi que l'opérateur pour éviter l'influence des charges électrostatiques. La pression exercée sur le contact étant très faible, il ne faut aucun déplacement d'air dans la pièce.

Pour avoir des mesures cohérentes, il est nécessaire de maintenir un temps constant, de l'ordre de 5 secondes, entre chaque mesure (revoir le paragraphe « Evolution du courant dans le temps »). Ce relevé nécessite d'acquiescer une certaine dextérité pour régler la pression et la position du contact. Avec un peu de patience et après quelques tâtonnements, on y arrive.

Résultats

Sur la figure 24, nous avons deux relevés. En rouge, la force d'appui sur le contact correspond à un minimum pour obtenir un courant. En vert, la force d'appui correspond à

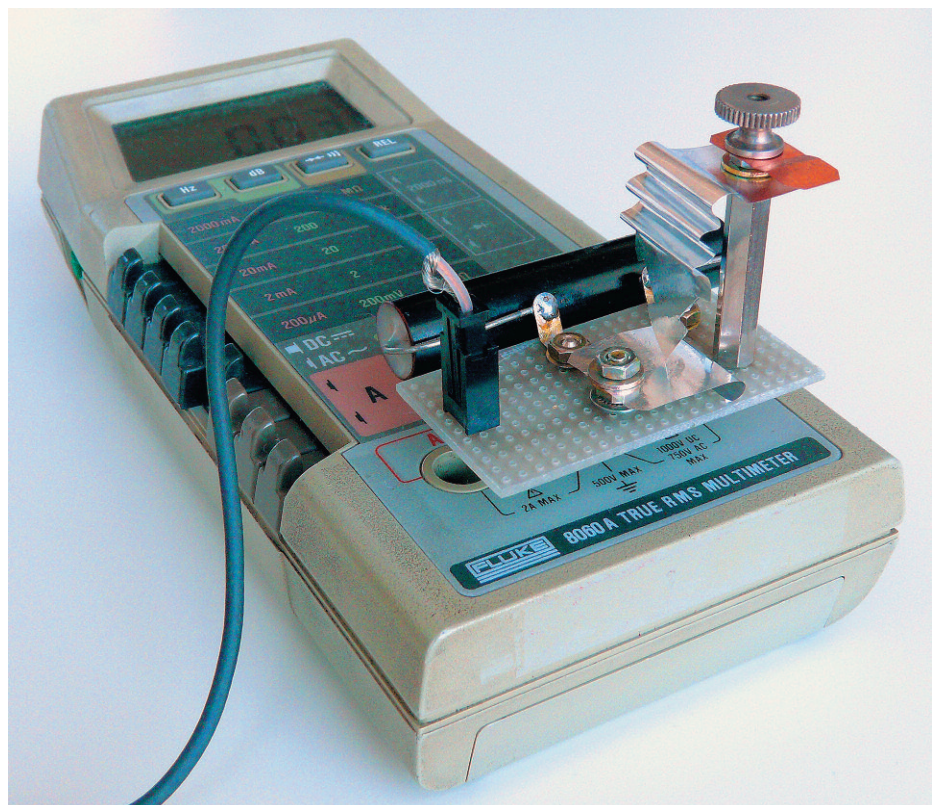


Figure 23. — Microcontact en test : relevé de la courbe $U = f(I)$.

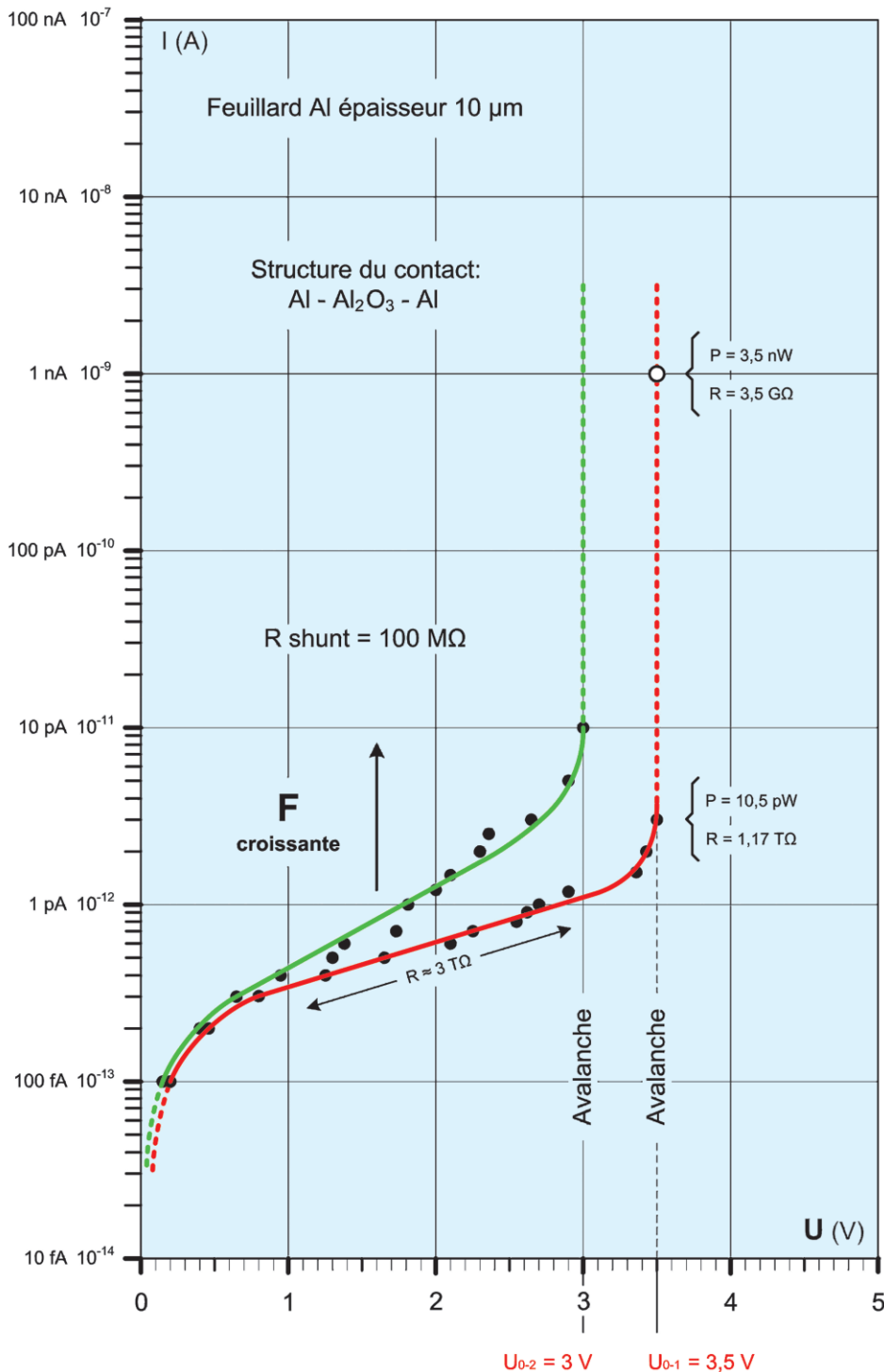


Figure 24. — Caractéristique $U = f(I)$ d'un microcontact.

un maximum, au-delà nous créons un court-circuit. Les parties en pointillés sont extrapolées. L'allure générale de ces deux courbes est similaire à celles obtenues avec la chaîne de billes, la poudre de cuivre comprimée et les capacités MIM.

La tension d'avalanche décroît avec l'augmentation de la pression

(augmentation de la surface de contact). La résistance chute brutalement après l'avalanche, voir les valeurs sur la figure 24. Le phénomène observé est donc similaire aux travaux précédemment cités. Par contre, la puissance mise en jeu au moment de la transition est très faible (10,5 pW). C'est la preuve que

nous sommes en présence d'un contact très ténu avec un courant filamentaire.

La valeur de la résistance de contact après cet essai est de l'ordre de quelques mégohms. Le courant maximum autorisé par le shunt de 100 M Ω (35 nA) n'est pas suffisant pour entraîner une fusion capable de créer un chemin conducteur de résistance inférieure à 100 Ω .

Le calcul de la température du filament conducteur au moment de l'avalanche donne 2058°C, nous atteignons donc la température de fusion de l'alumine (2054°C). Se reporter à l'encadré page suivante.

Synthèse

Les mesures effectuées avec ce microcontact en aluminium permettent de conclure que nous sommes en présence du même phénomène de claquage que celui observé dans les capacités MIM ou les cellules MOS utilisées en microélectronique. Dans un microcontact la transition brutale (avalanche) peut se produire à un très faible niveau de puissance de l'ordre d'une dizaine de picowatts.

Un détecteur à limaille contient une multitude de microcontacts disposés dans un volume. Nous verrons que l'arrangement de ces microcontacts donne comme résultante une capacité tant que l'avalanche ne s'est pas produite. Qualifier un détecteur à limaille reviendrait en quelque sorte à étudier une capacité.

Est-il possible d'établir une similitude entre le comportement des tubes à limaille et des capacités MIM ?

Lors de l'étude des capacités MIM, il a été montré que le courant de fuite est proportionnel à la capacité (revoir le paragraphe « Rapport entre la surface de contact et le courant de fuite »). Si la même propriété se retrouve avec des tubes à limaille, nous aurons une corrélation intéressante. C'est cette idée qui m'a conduit à construire deux tubes à limaille de dimensions très différentes : l'un a des pistons de diamètre 3,2 mm et l'autre de diamètre 14 mm.

Calcul de la température du microcontact au moment de l'avalanche

La formule utilisée pour le calcul est extraite de la thèse [8] page 112. Le calcul sera effectué avec les données figurant sur la courbe rouge de la figure 24.

$$T = \left(T_0^4 + \frac{J^2 \cdot \rho \cdot r}{2 \cdot \varepsilon \cdot \sigma} \right)^{0,25}$$

Avec :

T : température du filament en kelvins (K).

T_0 : température ambiante = 300 K = 27°C.

J : densité de courant dans le filament (A/m^2).

ρ : résistivité du filament au moment de l'avalanche ($\Omega \cdot m$).

r : rayon du filament (m).

ε : émissivité de l'alumine = 0,8.

σ : constante de Stephan-Boltzmann = $5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$.

Dans cette formule, le courant filamentaire est supposé contenu dans un cylindre de rayon r , ayant pour longueur celle de l'isolant. Nous avons deux épaisseurs d'oxyde de 5 nm en regard, la longueur du cylindre est donc $l = 10$ nm.

Au point d'avalanche, nous avons relevé : $U = 3,5$ V et $i = 3$ pA, ce qui donne une résistance du filament : $R = 1,17$ T Ω .

Pour calculer ρ et J , il faut connaître r . Mais le rayon r du filament est une inconnue impossible à déterminer car nous sommes en dessous de l'échelle nanométrique. En procédant par itération, on aboutit à un résultat cohérent. L'hypothèse $r = 0,125 \cdot 10^{-9}$ m convient. Pour fixer les idées, cette valeur est équivalente au rayon d'un atome d'aluminium. La section du cylindre filamentaire est donc :

$$s = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (0,125 \cdot 10^{-9})^2 = 0,0491 \cdot 10^{-18} m^2$$

Nous pouvons calculer ρ et J :

$$\rho = \frac{R \cdot s}{l} = \frac{1,17 \cdot 10^{12} \cdot 0,0491 \cdot 10^{-18}}{10 \cdot 10^{-9}} = 5,74 \Omega \cdot m$$

$$J = \frac{i}{s} = \frac{3 \cdot 10^{-12}}{0,0491 \cdot 10^{-18}} = 61,1 \cdot 10^6 A/m^2$$

ce qui donne :

$$T = \left[300^4 + \frac{(61,1 \cdot 10^6)^2 \cdot 5,74 \cdot 0,125 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}} \right]^{0,25} = 2331 \text{ K}$$

ou : $T = 2331 - 273 = 2058^\circ\text{C}$.

Étude des propriétés des tubes à limaille

Réalisation de tubes à limaille

Il a existé une multitude de constructions différentes [9]. Il m'était impossible de reproduire toutes les techniques mises en œuvre dans le passé. J'ai porté mon choix sur la technique la plus courante : tube de verre avec deux pistons. Les deux prototypes réalisés ont la possibilité de fonctionner, soit en laissant la limaille libre entre les deux pistons (seulement soumise à la gravité), soit en comprimant la limaille avec une pression réglable. Un tube à limaille à pression réglable mesurable, utilisé par Branly, est visible sur la figure 25.

Tube à limaille avec pistons de diamètre 3,2 mm

Une vue d'assemblage en éclaté est représentée sur la figure 26.

Les cotes principales figurent sur le dessin. L'élément de base est un fusible 5×20 mm avec corps de verre. On reconnaît le tube de verre (a) et les deux coupelles (b) qui ont été désolidarisées en

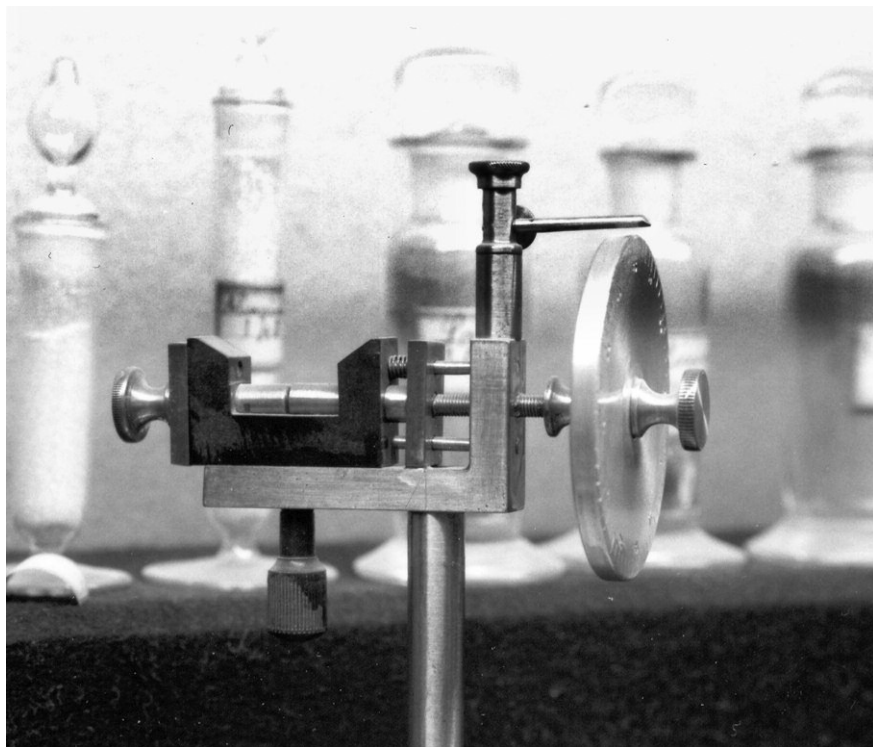


Figure 25. — Tube à limaille à pression réglable mesurable.

Usinage des pistons

Les pistons sont en laiton. Pour ceux qui possèdent un tour, aucun problème, c'est une pièce très simple à réaliser. Comme ce n'est pas mon cas, j'ai utilisé une perceuse. Attention ! Ce n'est pas l'utilisation normale d'une perceuse, il faut être prudent pour ne pas se blesser. Se reporter à la figure 27.

La perceuse est serrée entre les mâchoires d'un établi pliant. Il faut fixer un guide parallèlement à l'axe de la perceuse. Sa hauteur est telle que le côté arrière de la lime soit légèrement plus haut que la partie avant. Le profilé de départ est du rond de diamètre 4 mm. Personnellement j'ai utilisé une vis TF diamètre 3,5 mm en laiton, j'avais ainsi moins de métal à enlever ! L'usinage intermédiaire est visible au premier plan de la photo.

Pour des pièces de cette dimension, il faut une vitesse de rotation rapide supérieure à 5 000 tr/mm si possible. La lime est utilisée de deux manières différentes :

- mouvement d'arrière vers l'avant en exerçant une pression au dessus de la pièce, mouvement d'avant vers l'arrière sans exercer de pression. Ce geste enlève beaucoup de métal et creuse des sillons (à moduler avec la pression) ;

- maintenir un point fixe en A et faire osciller la lime autour de ce point en exerçant une pression au-dessus de la pièce. Les sillons disparaissent.

La finition est réalisée avec du papier abrasif pour ponçage à l'eau, utiliser progressivement des grains de 200 à 600. Contrôler régulièrement le diamètre et faire l'ajustage le plus précis possible avec le tube de verre.

La limaille

Elle est obtenue avec la lime de la figure 27 à partir d'une plaque d'aluminium. Si la limaille résultante est utilisée telle quelle, il y a une grosse dispersion dans la granulométrie.

Le fonctionnement en limaille comprimée devient impossible. Au bout de quelques essais, on n'obtient plus le retour à l'état de non

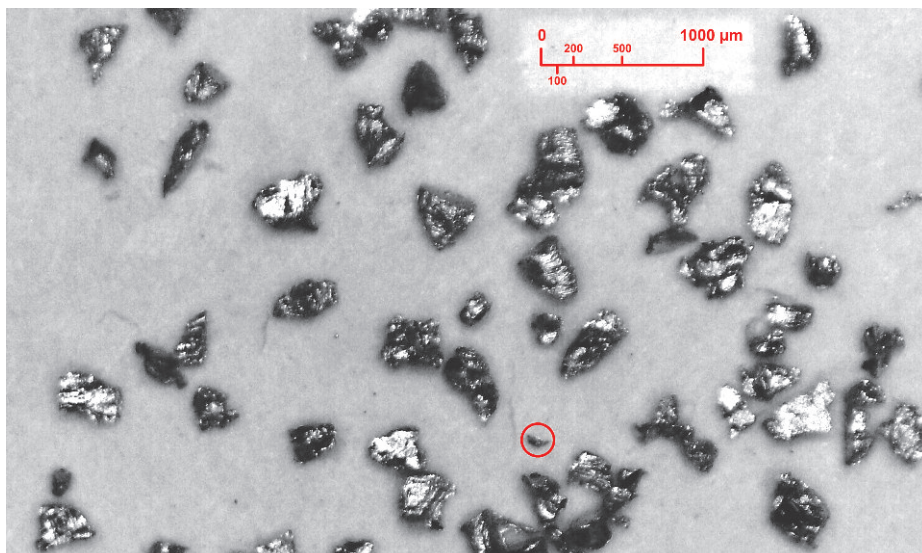


Figure 28. — Limaille tamisée vue au microscope.

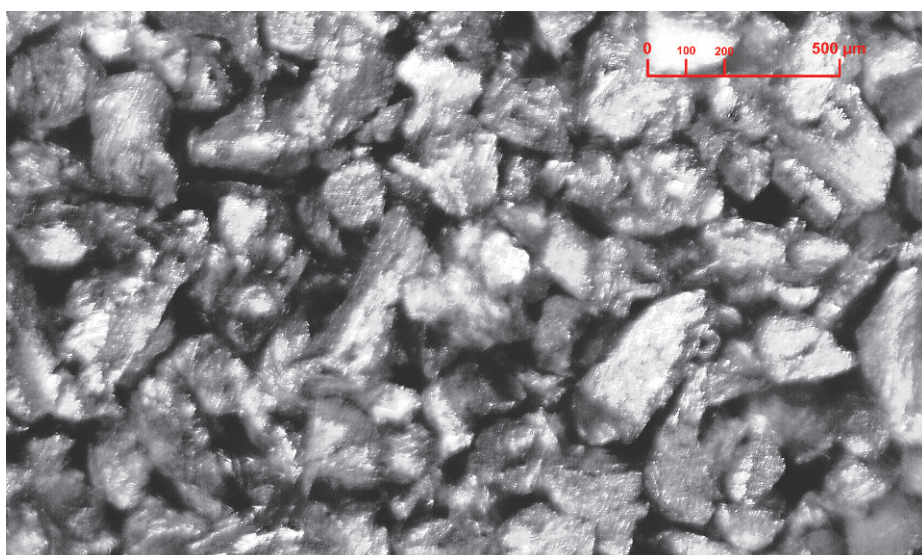


Figure 29. — Limaille dans un détecteur vue au microscope (coupe).

conduction. L'analyse montre que les plus petits grains remplissent les interstices, ils verrouillent l'ensemble pour former un agglomérat. Des petits grains peuvent aussi se coincer entre le piston et le tube si celui-ci n'est pas parfaitement ajusté. Le frappeur n'a plus d'action. Il faut donc tamiser cette limaille pour éliminer les grains les plus petits. Comme tamis, j'ai utilisé un morceau de collant non tendu. Le résultat obtenu vu au microscope est observable sur la figure 28.

Pratiquement tous les grains inférieurs à 200 μm ont été éliminés, il n'en reste qu'une très faible quantité (grain cerclé de rouge sur la photo). La plupart des grains ont

une dimension comprise entre 200 et 500 μm . La figure 29 montre l'arrangement des grains lorsqu'ils ont été comprimés. Il reste très peu d'espace libre ce qui explique qu'avec des grains très petits on puisse obtenir un ensemble compact. J'ai pu noter que Camille Tissot, lors de ses essais, a décrit le même problème [11].

L'épaisseur de limaille (distance entre les pistons) conditionne la valeur de résistance à l'état passant. Pour les deux dimensions de détecteurs réalisés, j'ai fixé un espace de 2,3 mm dans l'option de fonctionnement en limaille comprimée. Cette valeur est compatible avec un courant de 10 à 20 mA.

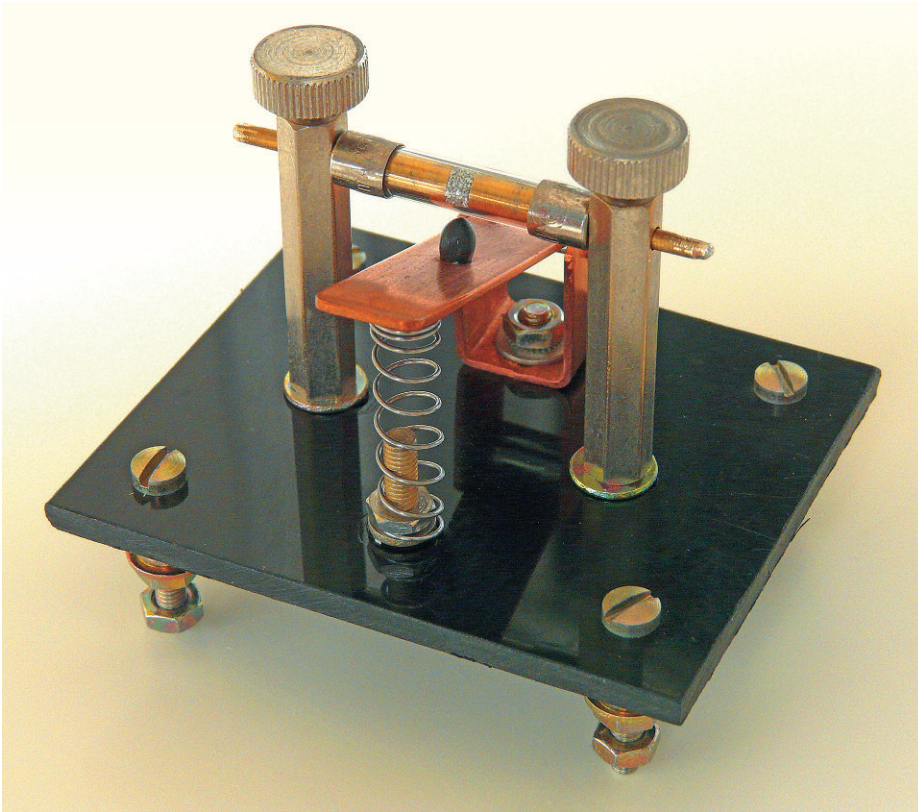


Figure 30. — Détecteur à limaille de diamètre 3,2 mm.

Résultat

L'ensemble monté sur un socle en plastique noir est visible sur la figure 30. Une fixation par quatre vis est prévue pour le montage sur une platine de test ou sur un récepteur de démonstration. Les ressorts ne sont pas visibles car dissimulés par les coupelles.

Tube à limaille avec pistons de Ø 14 mm

Pour l'assemblage de l'ensemble se reporter à la figure 31. Le tube de verre (a) a un diamètre extérieur de 16 mm. J'ai récupéré un tube contenant une gousse de vanille mais on trouve facilement des tubes à essais de même dimension. Les deux coupelles en laiton (b) sont des pièces standards utilisées en plomberie : bouchons femelles à souder sur tube de cuivre de diamètre 16 mm. Ils ont été percés au diamètre 6 mm pour permettre le passage des queues des pistons (c). Les ressorts (d) ont la même fonction que celle décrite dans la réalisation avec pistons de diamètre 3,2 mm. Les deux supports

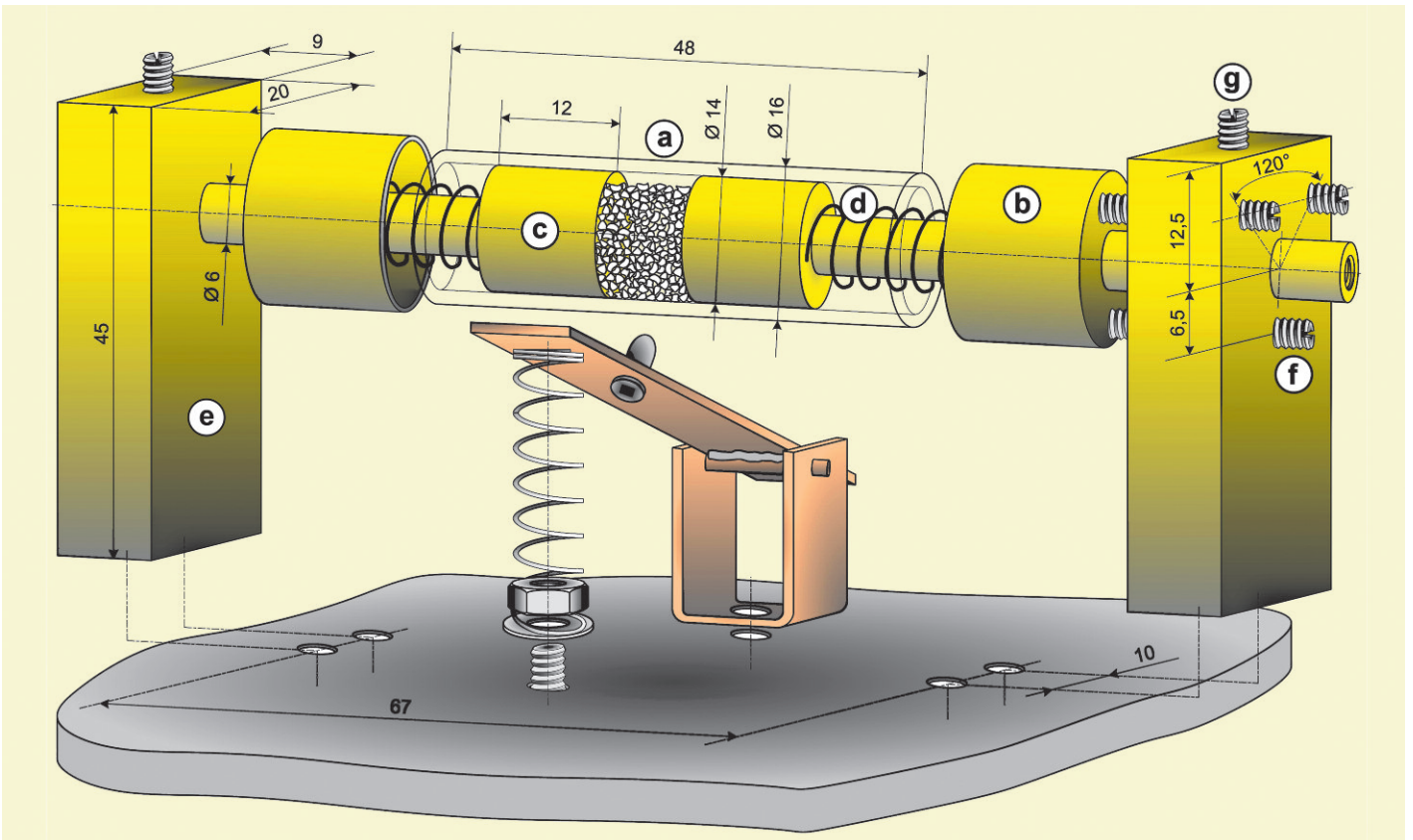


Figure 31. — Assemblage du détecteur à limaille de diamètre 14 mm.

(e) sont découpés dans un profilé en laiton de section 20 × 20 mm. Les trois vis (f) M3 disposées à 120° assurent le réglage de la pression exercée sur la limaille. Pour le fonctionnement en limaille libre, les pistons sont immobilisés et réglés à la position voulue avec les vis (g) M3. Le frappeur est identique à celui utilisé dans la réalisation précédente.

Le tube de verre

Une procédure pour le couper à la bonne dimension est décrite figure 32 en utilisant les outils d'une mini perceuse. D'autres méthodes existent, notamment l'emploi d'un fil chaud enroulé à l'endroit de la coupure. Après échauffement, pour produire la cassure, on fait subir au tube un choc thermique en le trempant dans l'eau froide.

Usinage des pistons

Le diamètre intérieur du tube de verre fait 13,95 mm, le diamètre de mon profilé laiton est de 14,00 mm. Il y a 5/100 de mm à enlever, donc l'usinage se fera uniquement avec de l'abrasif. Seul petit problème, c'est qu'un diamètre 14 mm ne rentre pas dans un mandrin standard de perceuse (diamètre 13 mm max). J'ai décidé de réaliser d'abord les queues en profilé laiton de diamètre 6 mm. Perçage non débouchant des pistons à diamètre 5,5 mm puis usinage à la perceuse d'une extrémité des queues. Cet usinage, légèrement conique, permettra un emmanchement à force dans le piston. L'autre extrémité de la queue est taraudée M3 pour le raccordement. Quand l'emmanchement est réalisé, la queue de diamètre 6 mm est serrée dans le mandrin pour l'usinage du piston. En faisant des contrôles réguliers du diamètre, on arrive à un résultat surprenant. Une fois le piston monté dans le tube si on obture une extrémité, on est en mesure de comprimer l'air. C'est un bon test de qualité pour la précision de l'usinage.

Résultat

L'ensemble terminé se voit sur la figure 33. Les points de fixation du socle sont compatibles avec la platine de test et le récepteur déjà mentionnés.

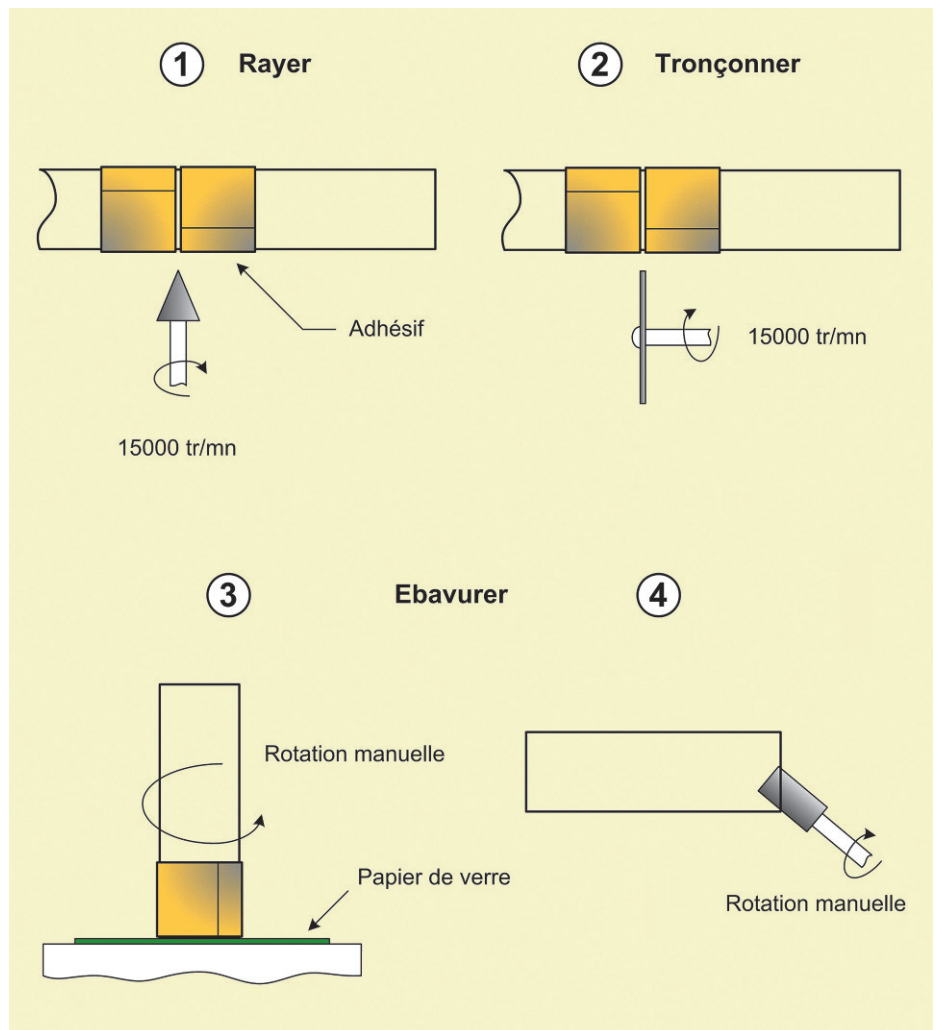


Figure 32. — Coupe d'un tube de verre.

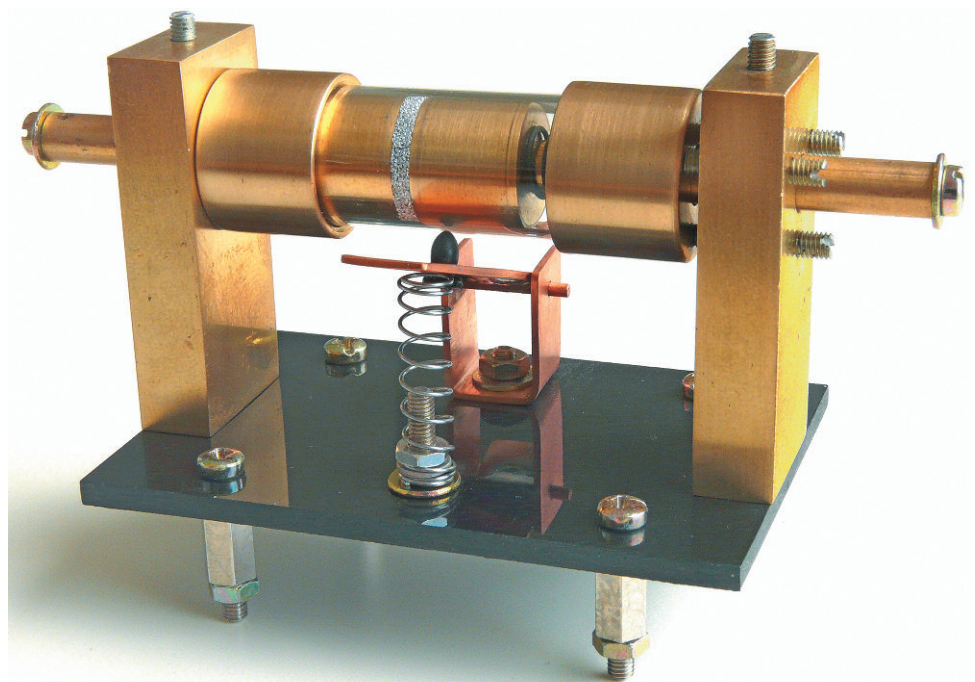


Figure 33. — Détecteur à limaille de diamètre 14 mm.

Caractérisation des tubes avec limaille comprimée

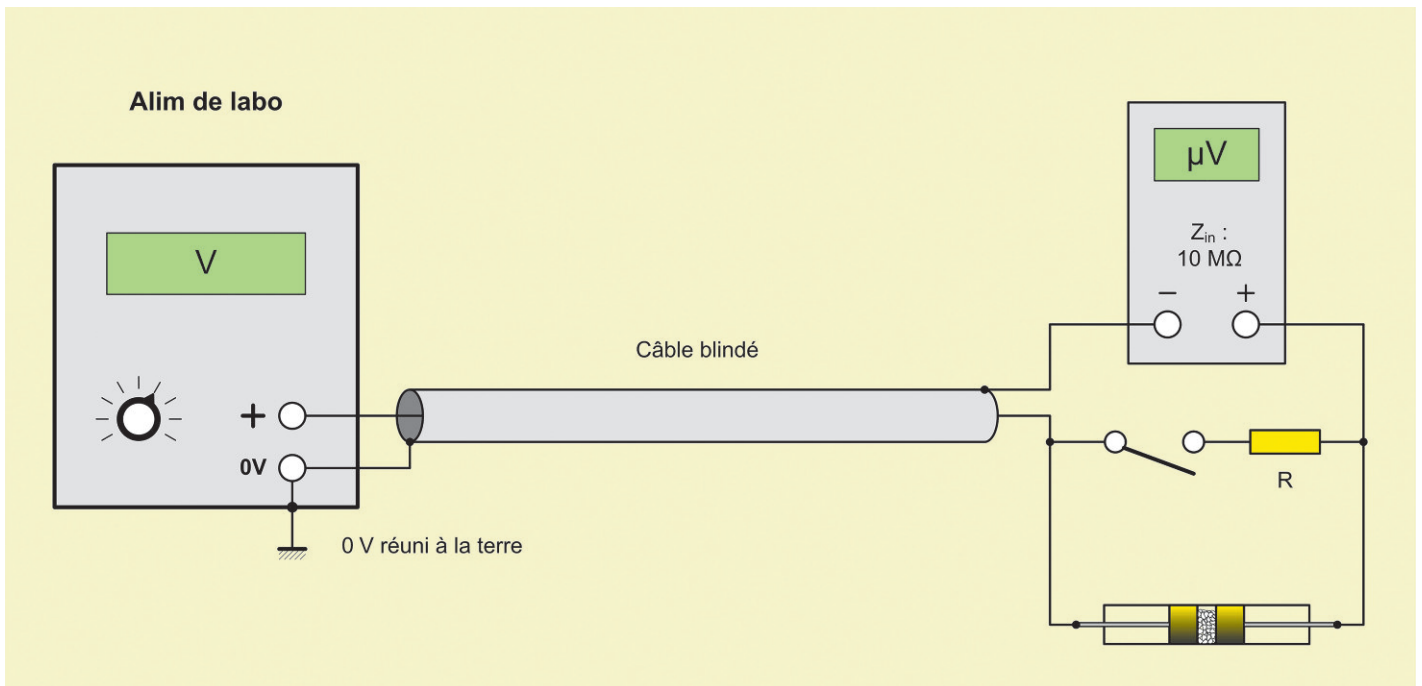


Figure 34. — Montage de test des détecteurs à limaille.

Relevé de la courbe $I = f(U)$

Le schéma du montage est similaire à celui utilisé pour caractériser le microcontact, voir la figure 34.

La résistance R commutable permet de changer la valeur du shunt. Les figures 35 et 36 montrent les détecteurs $\varnothing 3,2$ et 14 mm montés sur leur platine de test, elle-même enfichée directement sur le multimètre, on aperçoit le commutateur pour changer le calibre du shunt.

Lorsque le relevé des courbes $I = f(U)$ s'effectue avec comme shunt $Z_{in} = 10\text{ M}\Omega$, le claquage n'aboutit pas toujours au quasi court-circuit (valeur de résistance inférieure à $100\ \Omega$). Quelquefois, la résistance finale prend une valeur comprise entre $100\text{ k}\Omega$ et $1\text{ M}\Omega$. Cette incertitude a pour cause la valeur élevée de la résistance de mesure qui limite le courant.

Pour aboutir systématiquement au court-circuit, il faut avant d'atteindre la zone de claquage, utiliser un shunt de $1\text{ M}\Omega$ pour le détecteur $\varnothing 3,2$ (commuter $R = 1,1\text{ M}\Omega$) et

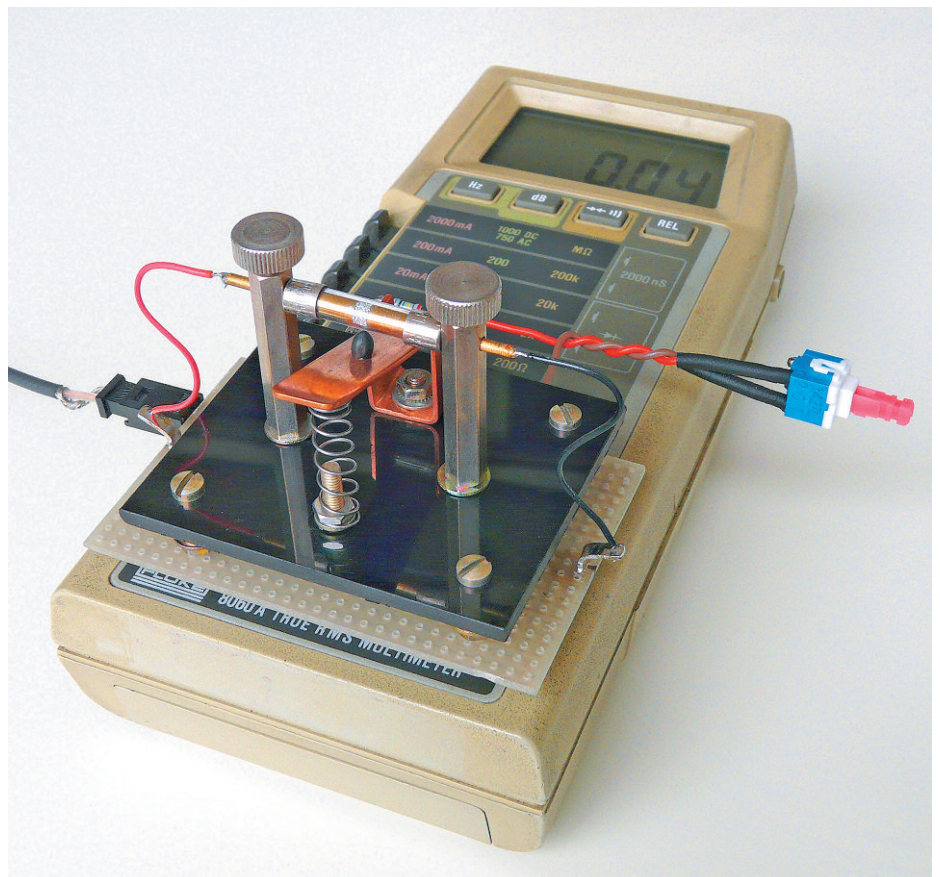


Figure 35. — Détecteur de diamètre 3,2 mm en test : relevé de la courbe $I = f(U)$.

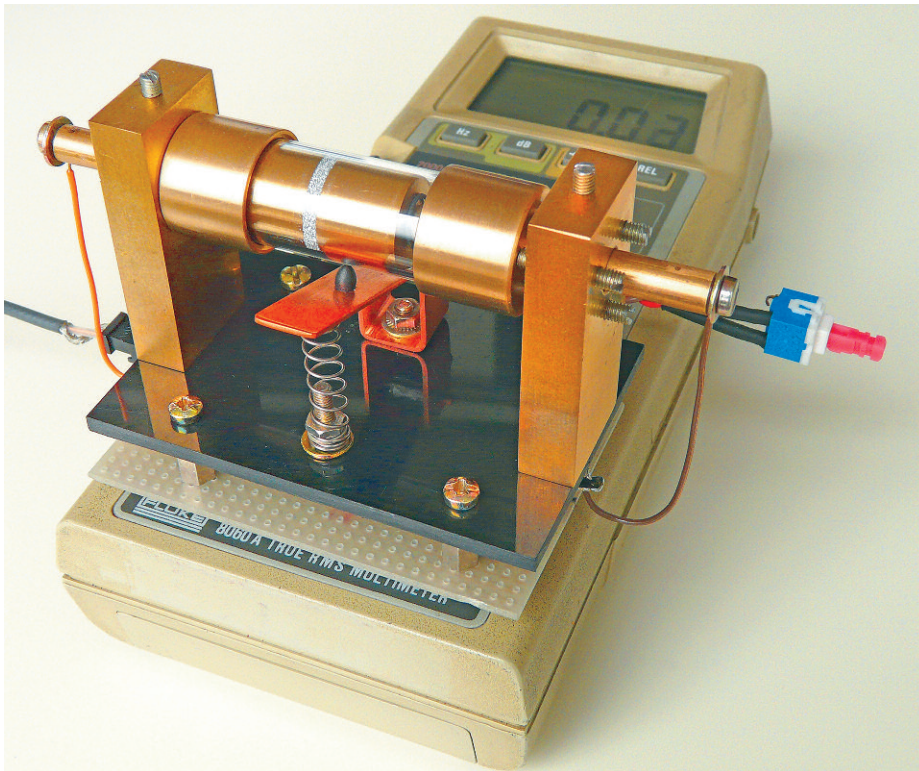


Figure 36. — Détecteur de diamètre 14 mm en test : relevé de la courbe $I = f(U)$.

passer à un shunt de 100 k Ω pour le détecteur \varnothing 14 (commuter $R = 100$ k Ω).

Les deux relevés sont visibles sur la figure 38. La mesure dans les deux cas est effectuée avec de la limaille d'aluminium comprimée. La force de pression est réglée au maximum autorisant la remise en état de non conduction (sensibilité maximale). Pour obtenir des courbes significatives en s'affranchissant des fluctuations entre deux relevés consécutifs, chaque courbe est obtenue en faisant la moyenne de six relevés. Comme dans le cas du microcontact, il faut maintenir un temps constant d'environ 5 secondes entre deux mesures.

L'allure générale de ces courbes, les valeurs de courant, la puissance au moment de l'avalanche présentent des similitudes avec les relevés concernant les capacités MIM de la figure 11 (page 38 du n° 77). La puissance instantanée mise en jeu au moment de l'avalanche est de l'ordre de 50 nW. Nous retrouvons bien l'ordre de grandeur (100 nW) généralement admis pour la sensibilité d'un tube à limaille.

Nous obtiendrons une similitude

supplémentaire en caractérisant la capacité de nos détecteurs.

Mesure de la capacité

Cette mesure présente quelques difficultés car elle concerne des valeurs faibles comprises entre 1 et 15 pF et il faut une tension de mesure inférieure à 2 V pour ne pas provoquer l'avalanche. J'ai utilisé une méthode par comparaison avec des valeurs de capacités connues. Le procédé est décrit sur la figure 37. Un générateur BF de signaux rectangulaires à fronts raides (20 à 50 ns) charge la capacité à mesurer. Un shunt R de 100 Ω permet de visualiser sur l'oscilloscope le courant de charge apparaissant durant les transitions. Vérifier que la constante de temps $R \cdot C$ est inférieure à la durée des fronts et que l'impédance capacitive de la sonde à 10 MHz est de l'ordre de $10 \cdot R$ minimum. Le câblage doit être très court et les liaisons écartées pour que leur capacité soit négligeable.

Détecteur à limaille \varnothing 3,2

La valeur de la capacité étalon est de 2 pF. Lorsqu'elle est connectée,

$U_R = 20$ mV crête. En remplaçant la capacité étalon par le détecteur, on mesure $U_R = 15$ mV. La capacité parasite du détecteur est donc :

$$C_{\varnothing 3,2} = \frac{2 \cdot 15}{20} = 1,5 \text{ pF}$$

Détecteur à limaille \varnothing 14

La valeur de la capacité étalon est de 10 pF. Lorsqu'elle est connectée, $U_R = 105$ mV crête. En remplaçant la capacité étalon par le détecteur, on mesure $U_R = 130$ mV. La capacité parasite du détecteur est donc :

$$C_{\varnothing 14} = \frac{10 \cdot 130}{105} = 12,4 \text{ pF}$$

Le calcul de la capacité parasite sans limaille donne des valeurs négligeables par rapport à celles mesurées. Donc les valeurs mesurées sont bien imputables à la limaille. Le rapport $C_{\varnothing 14}/C_{\varnothing 3,2}$ donne 8,27.

Nous retrouvons ici pratiquement le rapport qui existe entre les courants des deux détecteurs avant l'avalanche. Sur la figure 38, le rapport 266 pA/36,3 pA donne 7,33.

Synthèse globale des essais

Comme dans l'étude des capacités MIM (revoir le paragraphe « Rapport entre la surface de contact et le courant de fuite »), on peut conclure que le courant de soft breakdown des détecteurs à limaille est proportionnel à leur capacité.

Les détecteurs se comportent comme une association parallèle de chemins filamenteux issus de microcontacts. Le microcontact étudié est donc représentatif d'un contact élémentaire au sein d'un détecteur.

L'ordre de grandeur d'un courant filamenteux a été donné lors de l'étude du microcontact. La température du filament au moment de l'avalanche atteint la température de fusion de l'alumine. Dans un détecteur, on peut imaginer un phénomène similaire où la fusion des premiers filaments entraînerait un emballement thermique aboutissant à une fusion globale des autres

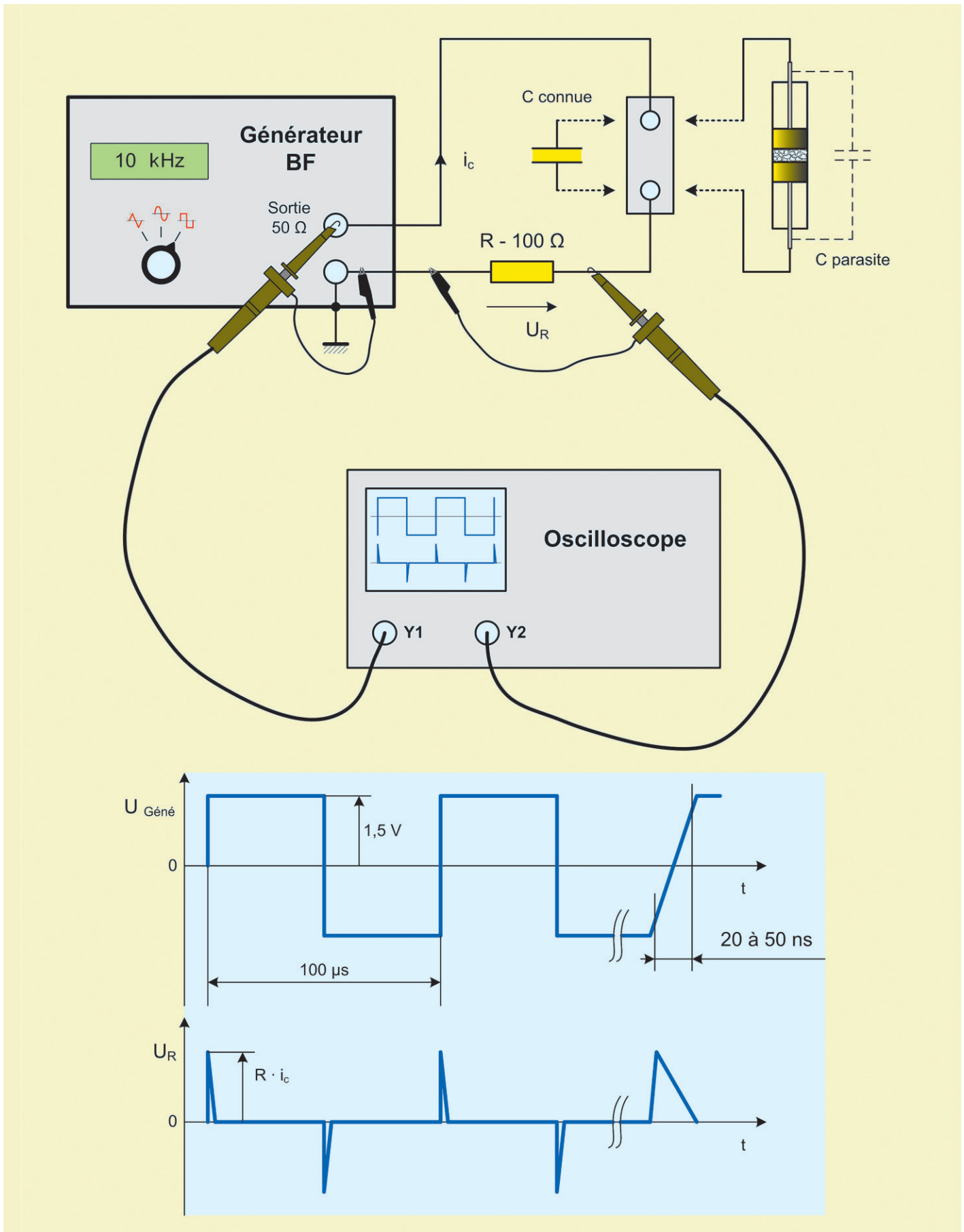


Figure 37. — Mesure de la capacité parasite d'un détecteur.

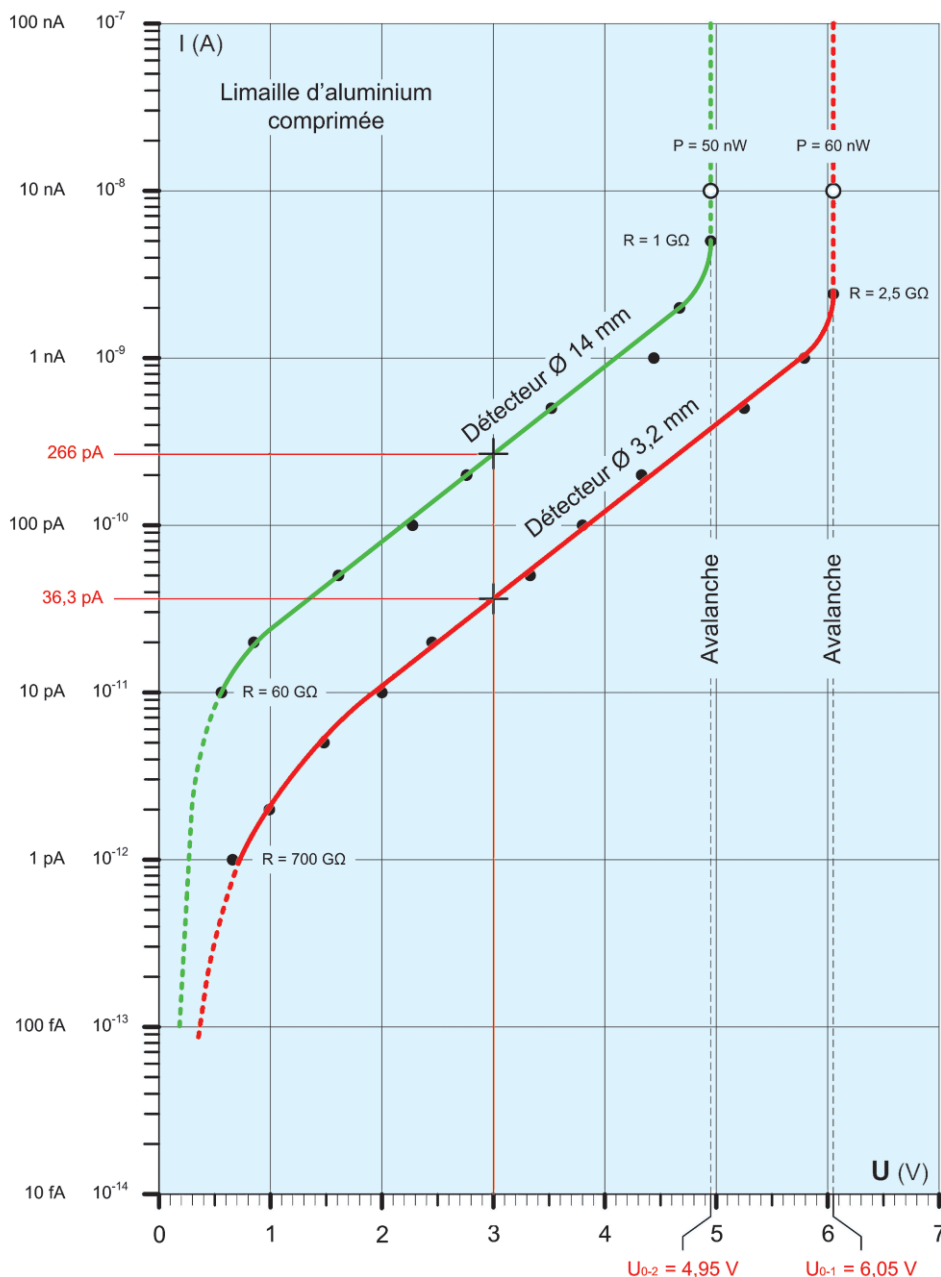


Figure 38. — Comparaison de deux détecteurs à limaille.

chemins filamenteux. C'est le raisonnement admis aujourd'hui pour expliquer ce qui se passe lors des claquages en microélectronique.

Les rapprochements faits entre les phénomènes observés avec les capacités MIM et les détecteurs à limaille montrent que nous sommes en présence d'un même processus : un claquage diélectrique. D'une manière similaire à la plupart des claquages diélectriques, celui-ci est associé à un phénomène thermique entraînant une fusion de l'isolant.

Mes travaux restent limités à un seul isolant, l'alumine. Il est probable que l'on puisse généraliser avec

d'autres matériaux, l'industrie électronique a constaté le même comportement avec un grand nombre d'oxydes.

Arrivé à ce stade, un pas important était franchi et le détecteur de Branly me paraissait moins mystérieux. Seule une étude en limaille comprimée était faite. J'ai donc poursuivi en étudiant le comportement des détecteurs lorsque la limaille est uniquement soumise à la gravité.

À suivre...

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

[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.