

Le détecteur à limaille *toujours un mystère !*

Caractérisation des tubes avec limaille libre

Il s'agit encore de faire des relevés de courbes $I = f(U)$ mais avec des écartements de pistons différents. L'écartement des pistons était de 2,3 mm en limaille comprimée. En limaille libre, les valeurs suivantes ont été retenues pour les deux dimensions de tubes : 2,35 – 2,8 – 3 – 3,5 et 4 mm. La quantité de limaille reste constante, elle est la même que celle utilisée avec le tube à limaille comprimée.

Les résultats pour le tube \varnothing 3,2 sont sur la figure 39 et sur la figure 40 pour le tube \varnothing 14. La comparaison est faite avec la limaille comprimée. La sensibilité est mentionnée pour un même courant. Pour les deux tubes, on constate une décroissance de la sensibilité lorsque l'écartement croît. Pour bien comprendre ce qui se passe, il faudrait faire une simulation avec un maillage 3 D, ce n'est pas à ma portée ! Mais intuitivement, on peut admettre que le nombre de micro-contacts en série, croissant avec la distance, augmente la valeur de la tension d'avalanche.

Avec le tube \varnothing 3,2, la baisse de sensibilité est plus marquée qu'avec le tube \varnothing 14. Le paramètre intervenant est imputable à la section de limaille beaucoup plus faible donnant statistiquement moins de chemins filamentaires conduisant à l'avalanche.

La sensibilité optimale d'un tube à limaille est obtenue en comprimant la limaille. Toutefois ce mode de fonctionnement peut s'avérer instable avec une pression mal réglée. Si la limaille n'est pas comprimée, la meilleure sensibilité est obtenue avec un tube dont la

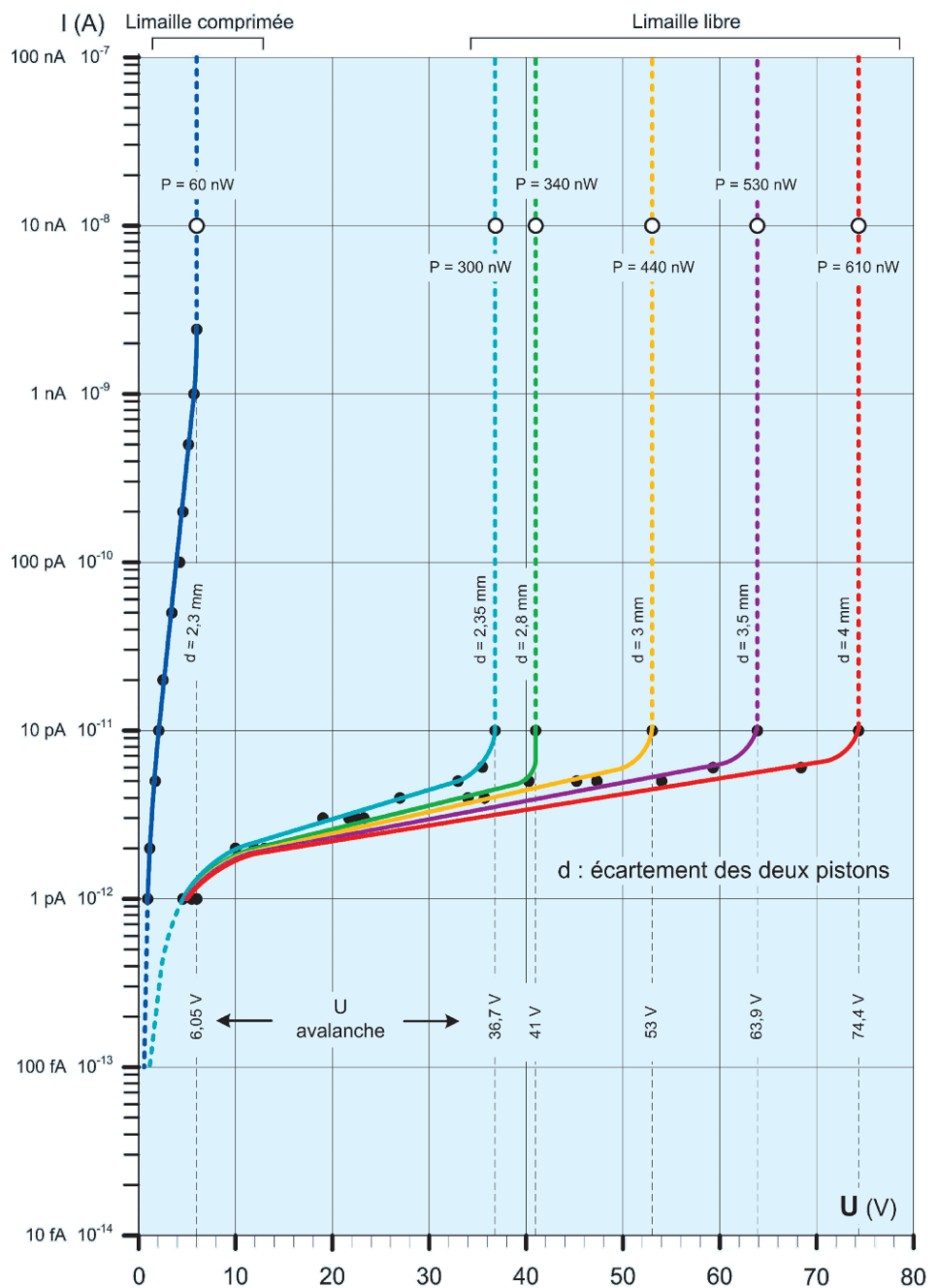


Figure 39. — Détecteur à limaille \varnothing 3,2 mm. Comparaison entre limaille comprimée et limaille libre.

de Branly :

Troisième partie

par Jean Gadreau

Cette troisième et dernière partie traite de la caractérisation des dispositifs à microcontact avec l'évaluation de leur sensibilité.

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

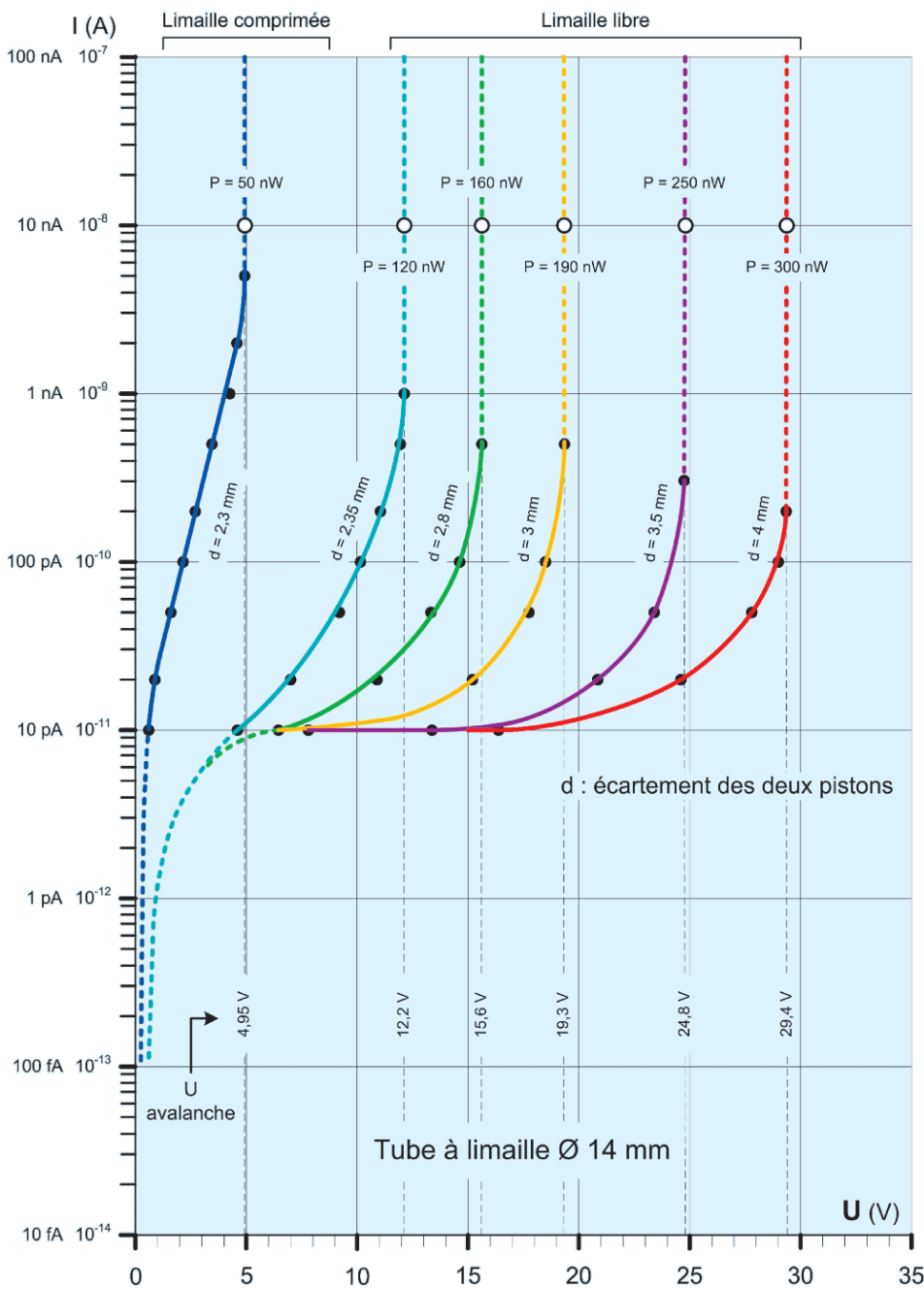


Figure 40. — Détecteur à limaille Ø 12 mm. Comparaison entre limaille comprimée et limaille libre.

limaille occupe toute la section. Un tube de forte section en limaille libre est plus sensible, du moins avec un test en courant continu car dans ces conditions sa capacité n'a pas d'impact.

Les essais avec le microcontact et les tubes à limaille nous ont permis de donner un ordre de grandeur de leur sensibilité. Toutefois, ils n'étaient pas en conditions réelles d'utilisation dans un système de réception. Les essais suivants seront plus en accord avec la réalité d'une détection.

Sensibilité des tubes à limaille dans des conditions de simulation

Le schéma du récepteur utilisant les tubes à limaille est représenté sur la figure 41. La partie (a) est le récepteur proprement dit, la partie (b) est le testeur connecté à la place du dipôle télescopique pour déterminer la sensibilité.

Le récepteur

Les différents éléments sont connectés en série. L'inductance L est une self de choc. Son impédance est élevée pour la fréquence du signal reçu par le dipôle, c'est un court-circuit pour la composante continue. Lorsque le signal HF développé aux bornes du dipôle a une amplitude suffisante, l'avalanche se produit. Après l'avalanche, la pile prend le relais pour fournir le complément d'énergie qui donnera au

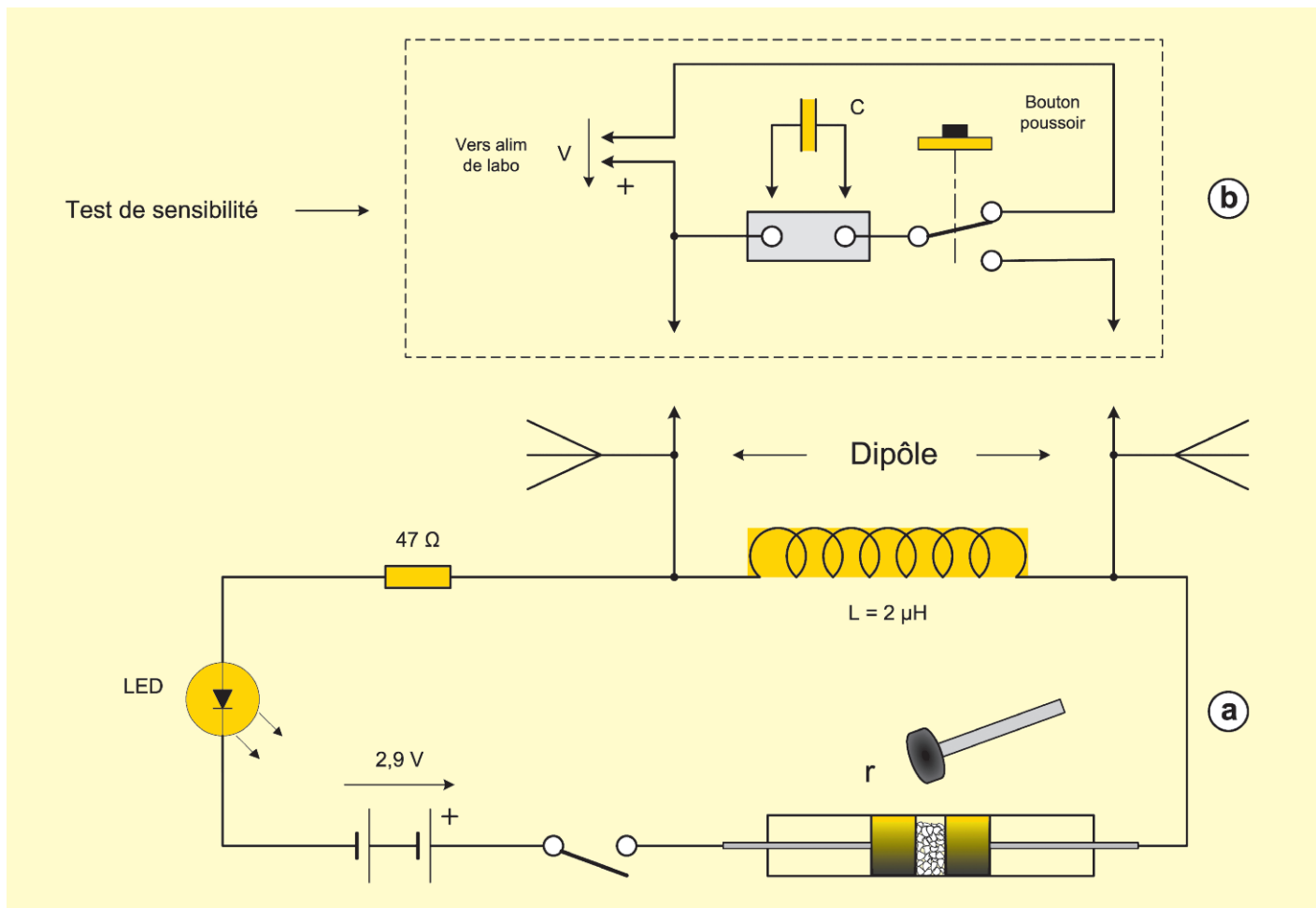


Figure 41. — Schéma du récepteur.

détecteur une résistance de quelques dizaines d'ohms. La tension de la pile doit être choisie inférieure à la tension d'avalanche.

Le testeur

Lorsque le bouton poussoir est au repos, le condensateur est chargé avec l'alimentation de laboratoire. En appuyant sur le bouton poussoir, L et C forment un circuit oscillant amorti qui transmet de l'énergie dans la boucle contenant le détecteur. Si l'énergie restituée par C est juste suffisante pour assurer la mise en conduction du détecteur, celle-ci correspond à sa sensibilité.

Nous pouvons écrire :

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 = P_m \cdot t$$

d'où :

$$P_m = \frac{E}{t} = \frac{C \cdot V^2}{2 \cdot t}$$

avec :

E : énergie emmagasinée dans le condensateur (J) ;

C : valeur de la capacité (F) ;

V : tension de charge du condensateur (V) ;

P_m : puissance moyenne fournie au condensateur (W ou J/s) ;

t : Temps pendant lequel la puissance est transmise (s).

Le test se réalise avec une impulsion aperiodique isolée dans le temps. La charge et la décharge du condensateur se faisant en un temps inférieur à 1 s, il est possible de considérer t égal à 1 s. Dans ce cas particulier :

$$P_m = \frac{E}{1}$$

Procédure de test

La sensibilité d'un détecteur est directement liée, nous l'avons vu, à sa tension d'avalanche. Il faut donc

déterminer la tension minimale qui provoquera la mise en conduction mais aussi la plus faible valeur de capacité satisfaisant cette condition. Dans la pratique, on commence le test avec une valeur de capacité relativement élevée (22 nF) pour déterminer la tension d'avalanche. Ensuite, on diminue progressivement la valeur de C en la chargeant toujours à la tension d'avalanche. Quand la valeur de C ne produit plus l'avalanche, c'est sa valeur précédente qu'il faut retenir pour calculer la sensibilité.

Des relevés ont été faits, pour les deux dimensions de tube, avec de la limaille comprimée (épaisseur 2,3 mm) et de la limaille libre (épaisseur 2,35 mm correspondant à un tube plein). Les différents éléments du montage sont visibles sur les figures 42 et 43. On reconnaît le module récepteur. La plaquette de test est fixée aux bornes de la self L.

Limaille comprimée : e = 2,3 mm			Limaille libre : e = 2,35 mm ⁽¹⁾		
C (nF)	V (V)	Pm (nW)	C (nF)	V (V)	Pm (nW)
22	6	396	22	38	15884
10	6	180	10	38	7220
4,7	6	85	4,7	38	3393
2,2	6	Pas d'avalanche	2,2	38	1588
			1	38	722
			0,47	38	Pas d'avalanche

Tableau 3. — Test du tube à limaille Ø 3,2 mm.

1. — Pour cette série de mesures, L = 22 µH. Avec L = 2 µH, l'amortissement était trop important.

Limaille comprimée : e = 2,3 mm			Limaille libre : e = 2,35 mm		
C (nF)	V (V)	Pm (nW)	C (nF)	V (V)	Pm (nW)
22	5,5	333	22	8	704
10	5,5	151	10	8	320
4,7	5,5	71	4,7	8	150
2,2	5,5	Pas d'avalanche	2,2	8	Pas d'avalanche

Tableau 4. — Test du tube à limaille Ø 14mm.

Le raccordement à l'alimentation se fait par un câble blindé réuni à la terre. Les deux brins télescopiques du dipôle sont rentrés.

Résultats

Voir les tableaux 3 et 4. Les valeurs en caractères gras correspondent à la sensibilité. Il est difficile de faire une comparaison avec les valeurs de puissance instantanée relevées lors des tracés $I = f(U)$ des figures 39 et 40 car les conditions de fonctionnement sont différentes. Dans le cas du récepteur, lorsque l'avalanche a été franchie, la pile de 3 volts prend le relais pour fournir l'énergie. Nous retrouvons, approximativement, la sensibilité connue du détecteur à limaille : ≈ 100 nW [6].

Avec la limaille comprimée la sensibilité des deux tubes est pratiquement la même. Par contre avec la limaille libre, la sensibilité du tube Ø 3,2 mm est cinq fois plus faible que celle du tube Ø 14 mm.

En mode limaille comprimée, la résistance r des détecteurs à l'état passant est de 28 Ω pour le tube Ø 3,2 mm et 23 Ω pour le tube Ø 14 mm.

Après ces mesures, il m'est apparu qu'il serait intéressant de revenir sur le microcontact étudié qui donnait une avalanche pour une puissance d'environ 10 pW (revoir la figure 24). Cette valeur est bien inférieure à celle des détecteurs classiques. Malgré sa difficulté d'utilisation, serait-il plus sensible dans les conditions réelles d'utilisation ? La conclusion des essais réalisés par Lodge n'est pas connue. Des essais supplémentaires nous donneront la réponse.

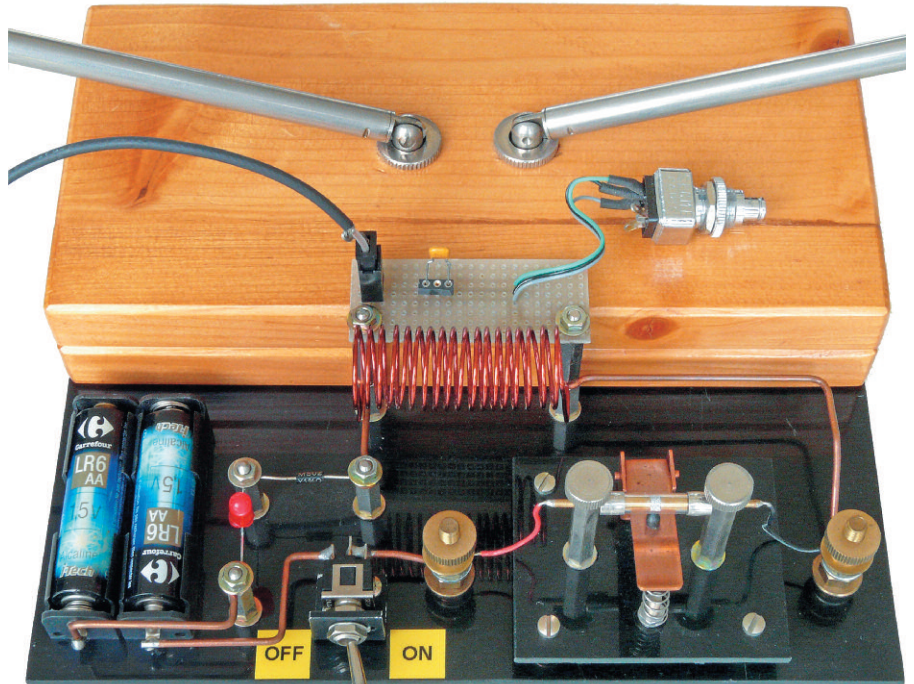


Figure 42. — Teste de sensibilité du détecteur Ø 3,2 mm.

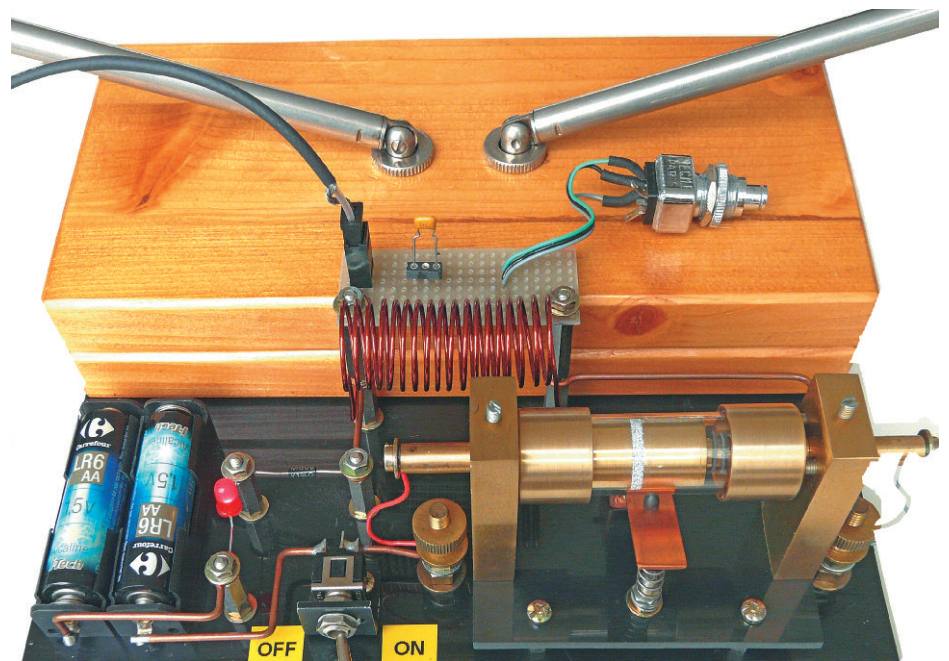


Figure 43. — Teste de sensibilité du détecteur Ø 14 mm.

Sensibilité du microcontact dans des conditions de simulation

Un essai comparatif de sensibilité sera fait entre un récepteur nécessitant un courant fort (≈ 10 mA) et un récepteur fonctionnant avec un courant faible (10 nA). La figure 44 représente le schéma du récepteur à courant fort, il est semblable dans le principe à celui utilisé précédemment avec les détecteurs à limaille. La source de tension est composée d'un seul élément de pile pour ne pas déclencher l'avalanche, la LED est remplacée

Microcontact avec courant fort		
C (nF)	V (V)	Pm (nW)
22	4	176
10	4	80
4,7	4	38
2,2	4	Pas d'avalanche

Tableau 5.

par un milliampèremètre. Sur la figure 45, on réalise un récepteur sensible en faisant la mesure de courant avec le nanoampèremètre décrit lors du relevé de la courbe $I = f(U)$. La procédure de test est identique à celle utilisée pour les détecteurs à limaille.

Résultats

Ils sont résumés dans les tableaux 5 et 6. Les valeurs en caractères gras correspondent à la sensibilité.

Avec un courant fort, la sensibilité est de 38 nW donc peu de gain par rapport aux détecteurs à limaille. Dans cette configuration, le courant à l'état passant est de 8,5 mA et la résistance du contact $r = 23 \Omega$.

Avec un courant faible, la sensibilité passe à 8 nW, soit une amé-

Microcontact avec courant faible		
C (nF)	V (V)	Pm (nW)
22	4	176
10	4	80
4,7	4	38
2,2	4	17,6
1	4	8
0,47	4	Pas d'avalanche

Tableau 6.

lioration d'un facteur 10 par rapport aux tubes à limaille. On relève alors un courant de 10 nA et une résistance $r = 45 \text{ M}\Omega$ à l'état passant.

À l'époque de Branly et Lodge, en dehors d'un laboratoire, il était impossible d'exploiter un courant aussi faible. Ce détecteur à microcontact, déjà handicapé par son utilisation délicate, resta donc un prototype.

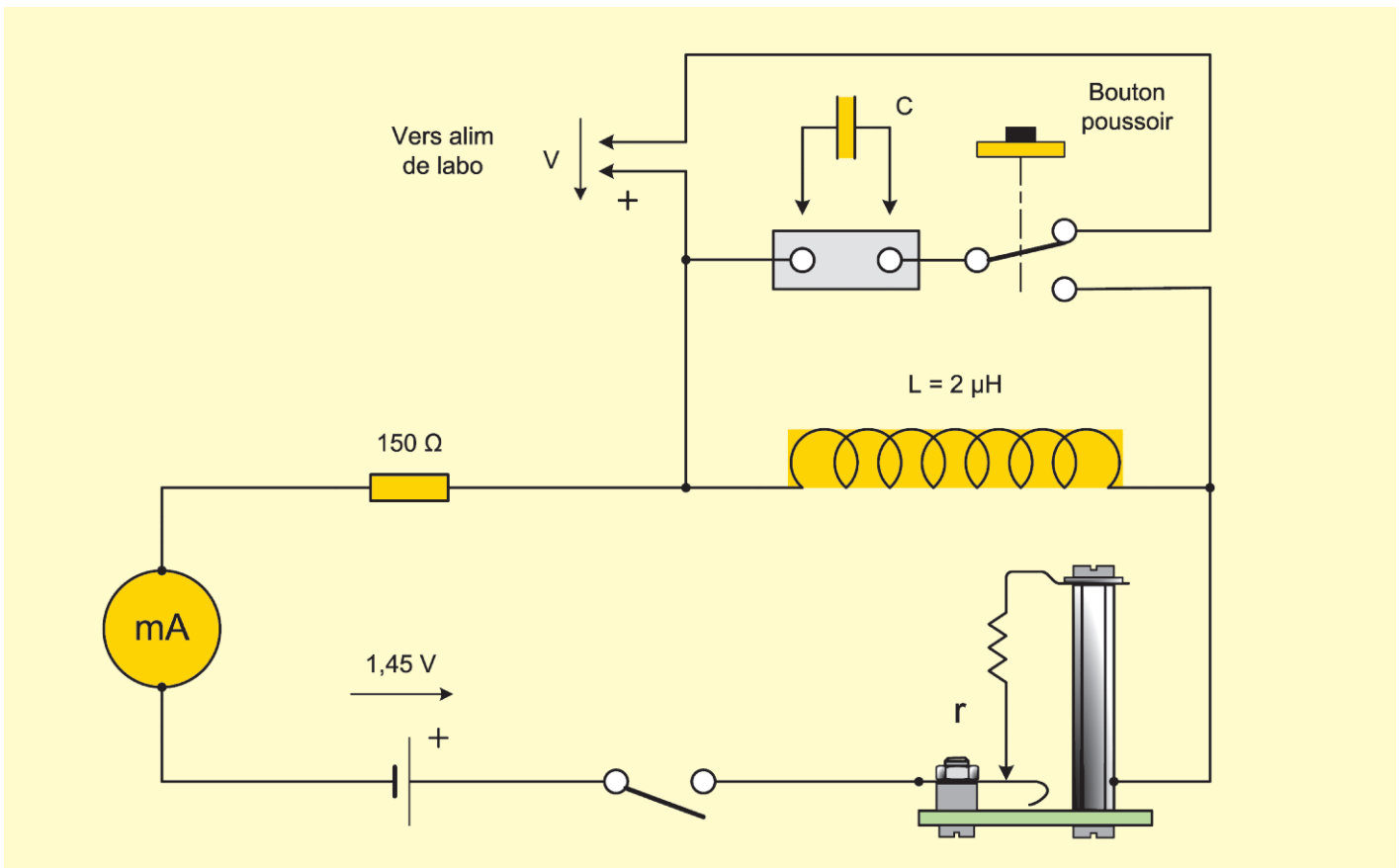


Figure 44. — Test de sensibilité du microcontact avec courant fort.

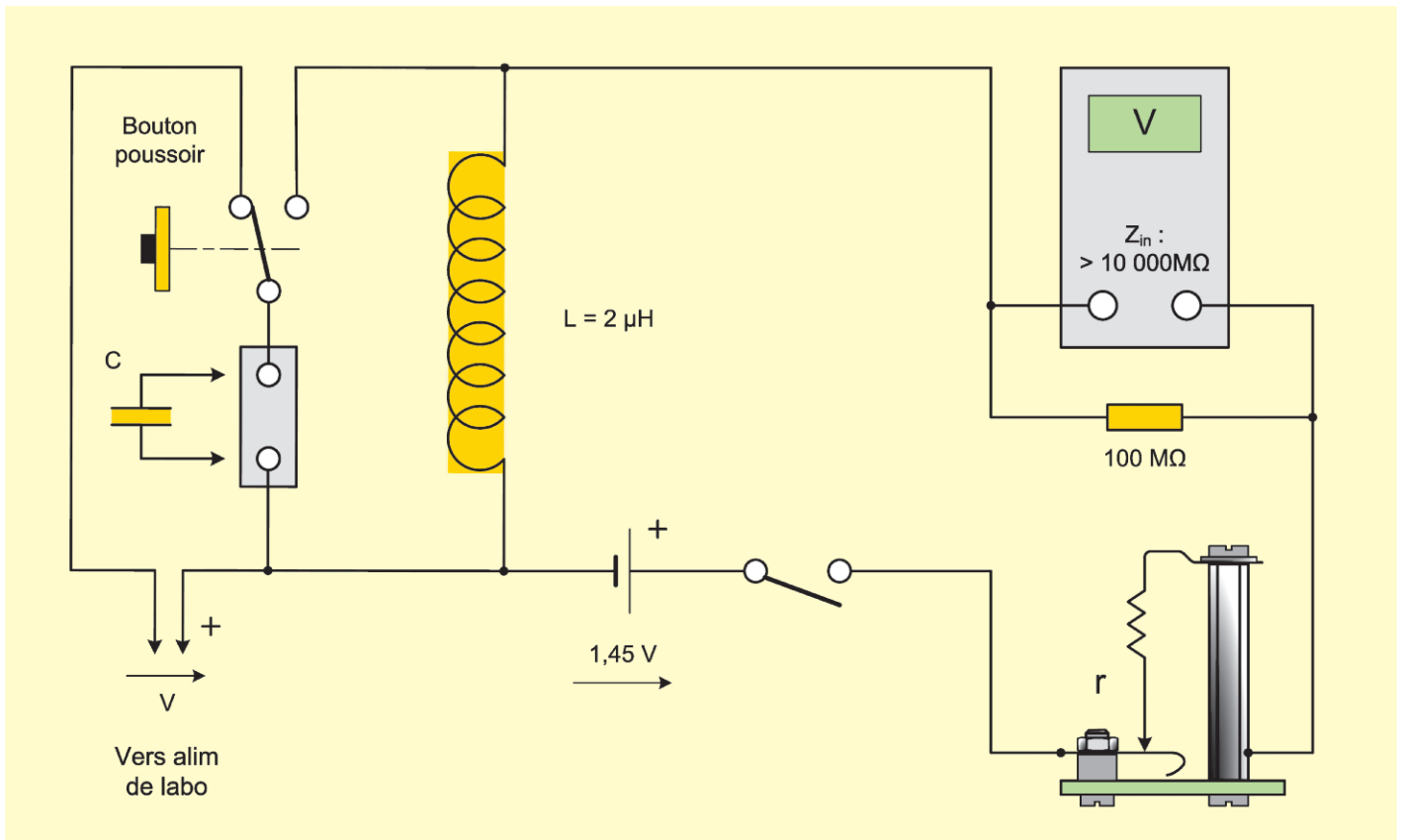


Figure 45. — Test de sensibilité du microcontact avec courant faible.

Distance de réception des deux détecteurs à limaille en fonction de leur sensibilité

Comment se comportent nos détecteurs dans des conditions réelles avec un émetteur ? L'étude de sensibilité sera complétée par une mesure comparative de la distance maximale de réception d'un microémetteur de référence.

Émetteur

Pour effectuer cette mesure, il faut disposer d'un émetteur. Il y en a un dans la plupart des foyers. J'ai utilisé l'allumeur d'une gazinière qui génère une impulsion toutes les 250 ms environ avec une longueur d'étincelle de 4 mm. La raie principale dans le spectre rayonné est proche de 70 MHz. Une antenne *ground plane* de fortune est facilement réalisable, se reporter à la figure 46. Le brin rayonnant raccordé à l'éclateur a une longueur de 1 mètre ($\approx \lambda / 4$), la partie supérieure de la gazinière joue le rôle de plan de masse.



Figure 46. — Émetteur de référence.

Figure 47. — Mesures de portée avec le récepteur.



Récepteur

Le récepteur déjà décrit est monté sur un pied d'appareil photo (figure 47). Le dipôle (longueur $\lambda / 2$) devrait en toute rigueur être vertical. Mais le récepteur conçu à l'origine pour une autre application ne peut fonctionner qu'avec le dipôle horizontal pour réaliser les tests en limaille non comprimée. Toutefois l'essai en limaille comprimée était possible avec le dipôle vertical. J'ai donc fait un essai comparatif entre les deux types de polarisations : même résultat qui s'explique par les nombreuses réflexions de l'armature métallique de l'appareil provoquant des rotations de phase. Toutes les mesures ont donc pu être réalisées avec le dipôle en position horizontale.

Résultats

Comme nous l'avons vu précédemment, la sensibilité varie en fonction du taux de remplissage du tube. La variable est donc la distance

séparant les deux pistons (la quantité de limaille reste constante), se référer à la figure 48. D représente la distance émetteur-récepteur et d la distance séparant les deux pistons.

Avec la limaille comprimée, les deux détecteurs ont un comportement identique ($D = 7,5$ m). En

limaille libre, la distance de réception décroît beaucoup plus vite pour le détecteur $\varnothing 3,2$ mm. Nous avons la confirmation des essais faits dans les conditions de simulation. Le détecteur de petit diamètre n'est pas approprié pour un fonctionnement en limaille libre.

Pour conserver les performances du détecteur $\varnothing 14$ mm, une limaille calibrée de plus petite dimension avec une forme ovoïde serait nécessaire. Comme exposé au paragraphe « Tube à limaille avec pistons de $\varnothing 3,2$ mm », cela entraîne un usinage des pistons plus précis donc des contraintes de fabrication plus grandes qui ne sont pas toujours accessibles à l'amateur.

Avec un émetteur plus puissant

J'ai réalisé une petite bobine de Ruhmkorff donnant une étincelle de 20 mm. Equipée d'un dipôle de 2 m en émission directe, la portée dépasse les limites de l'appartement. Il faudra passer à des essais en champ libre, à suivre...

Conclusion

L'ensemble des paramètres relevés avec le microcontact et les deux détecteurs à limaille sont bien en similitude avec ceux apparaissant dans les phénomènes de claquage observés en microélectronique. La puissance mise en jeu conduisant au claquage pour provoquer la détection est compatible avec l'utilisation en liaisons longues distances réalisées à l'époque de Branly.

Le fonctionnement du tube à limaille de Branly ne pouvait pas être élucidé avant l'apparition de moyens d'investigation propres à notre époque. Mesurer des courants inférieurs au picoampère n'était pas envisageable au XIX^e siècle, encore moins visualiser un claquage à l'échelle nanoscopique. Parmi les théories anciennes, lesquelles étaient dans le vrai ?

- La théorie du seul champ électrique élaborée par Tommasina, n'explique pas la destruction du diélectrique.

- Les théories de Lodge, Fromme, Tissot ont toutes comme point de départ une étincelle donnant un échauffement local aboutissant à une soudure. Nous savons que ce n'est pas le cas en réception lointaine. La fusion existe cependant mais n'a pas pour origine une étincelle.

• Branly s'est élevé contre toutes ces explications. Il pensait que le diélectrique de très faible épaisseur entourant les grains devenait conducteur sous l'influence des radiations hertziennes. Il n'a pas expliqué pourquoi en évoquant une propriété de la matière encore inconnue. Bien qu'il n'ait pas donné de théorie, il voyait dans quelle direction il fallait chercher l'explication. En effet, nous savons maintenant que le début du phénomène de claquage des diélectriques est la combinaison d'un champ électrique et d'un échauffement dû à la forte densité d'un courant filamentaire. L'étincelle, lorsqu'elle existe, est une conséquence du phénomène mais pas son origine. Elle est visible seulement lorsque la puissance mise en jeu est importante.

Branly s'est élevé contre l'appellation de « cohéreur » pour son détecteur. Il avait raison de le faire car c'était anticiper sur la connaissance, les théories n'étaient pas prouvées. Aujourd'hui, nous avons la certitude qu'avec le phénomène d'avalanche il se produit bien une fusion : la cohésion. Il n'est donc plus impropre d'utiliser le qualificatif cohéreur donné par Lodge au détecteur de Branly.

Il serait présomptueux de vouloir clore ici le dossier « Détecteur de Branly ». Des centaines de variantes ont été construites avec de nombreuses déclinaisons de formes, de matériaux... Il est impossible d'affirmer que tous fonctionnaient exactement avec le phénomène physique décrit dans cet article. La somme de travail pour tout savoir sur les détecteurs à limaille serait colossale, il restera donc toujours un peu de mystère. Mais la voie est ouverte pour les passionnés !

Il ne m'a pas toujours été facile de progresser dans ce travail de recherche, la mise au point du microcontact a été particulièrement délicate. Mais je n'ai jamais ressenti le moindre découragement. J'ai trouvé ma motivation en pensant que je poursuivais le travail de nos illustres aïeux. En m'imaginant être le modeste collaborateur de Monsieur Branly, c'était pour moi un grand honneur. Il me fallait aboutir, je ne pouvais pas décevoir le Maître !

À suivre...

Jean Gadreau (RFL 4332) et
Radiofiliste de l'Isère.
jmg.gadreau@gmail.com

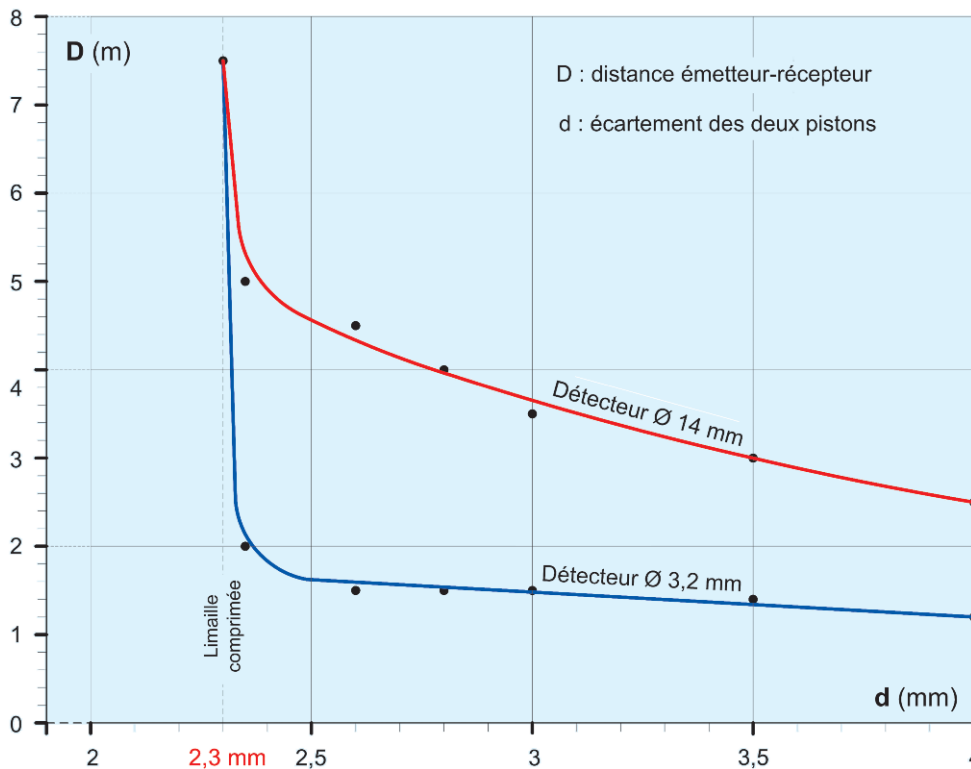


Figure 48. — Distance de réception des deux récepteurs à limaille.

Références - sources

- [1] D'après un article de Robert Gabilard 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/SFPO5/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.