



HAL
open science

Dispositif d'étude des décharges couronnes dans les gaz à pression élevée ou liquéfiés

C. Marteau, G. Laulier, N. Bonifaci, A. Denat

► **To cite this version:**

C. Marteau, G. Laulier, N. Bonifaci, A. Denat. Dispositif d'étude des décharges couronnes dans les gaz à pression élevée ou liquéfiés. *Journal de Physique III*, 1993, 3 (9), pp.1839-1848. 10.1051/jp3:1993244 . jpa-00249047

HAL Id: jpa-00249047

<https://hal.science/jpa-00249047v1>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification

Physics Abstracts

06.70 — 52.80 — 72.20

Dispositif d'étude des décharges couronnes dans les gaz à pression élevée ou liquéfiés

C. Marteau, G. Laulier, N. Bonifaci et A. Denat

Laboratoire d'Electrostatique et de Matériaux Diélectriques (*), CNRS, 25 av. des Martyrs, BP 166, 38042 Grenoble Cedex 9, France

(Reçu le 13 mai 1993, accepté le 24 juin 1993)

Résumé. — Nous présentons un dispositif électronique pour l'étude des régimes d'impulsions de courant dans les gaz liquéfiés (argon, krypton, azote). Il permet la mesure de la charge des impulsions de courant, d'une durée pouvant atteindre 30 μ s, et des temps séparant deux impulsions successives. Les valeurs mesurées (jusqu'à 60 séries de 1 000 valeurs chacune) sont transférées et traitées dans un micro-ordinateur. D'autre part la saisie simultanée des charges et des intervalles de temps permet une analyse des corrélations éventuelles entre ces grandeurs. L'utilisation de ce dispositif pour l'étude des composés liquides et gazeux nous a permis de montrer qu'un régime de décharges auto-entretenues et auto-stabilisées par la charge d'espace se produit aussi bien dans le gaz sous pression que dans la phase liquide.

Abstract. — An electronic device for the study of the pulse regime in liquified gases (argon, krypton, nitrogen) is described. The charge per pulse (duration up to 30 μ s) and the elapsed time between two successive pulses can be measured. These measured values (up to 60 series of 1 000 values each) are transferred to and processed on a microcomputer. Moreover, the simultaneous measurement of these charges and elapsed times makes it possible to check for correlations between these quantities. By using this device for the study of liquified and compressed gases we demonstrate that a self-sustaining and self-stabilizing discharge occurs both in high pressure gas and liquid phases.

Introduction.

Une étude antérieure de la conduction électrique [1, 2], en géométrie pointe-plan, dans les hydrocarbures liquides en fonction de plusieurs paramètres nous a permis de mettre en évidence des régimes d'impulsions de courant de caractéristiques similaires à celles observées dans l'air et dans des hydrocarbures gazeux à pression élevée. Une analyse de l'ensemble des résultats [3] montre que le même mécanisme régit la décharge dans ces gaz comprimés et ces

(*) Laboratoire associé à l'Université Joseph Fourier de Grenoble.

liquides ; et que dans les liquides les avalanches électroniques se produisent initialement dans la phase liquide. Cependant, l'analyse spectrale de la lumière émise par les décharges dans ces hydrocarbures gazeux et liquides [4], a uniquement montré l'existence de processus de dissociation et de fragmentation des molécules (détection des bandes de Swan du C_2 et des bandes du CH). De ce fait, il n'a pas été possible de déterminer les paramètres de la décharge comme la densité des électrons, leur énergie, etc.

A la suite de ces résultats et du fait que les seuls liquides où des avalanches électroniques ont été théoriquement décrites [5] et expérimentalement détectées [6] sont l'argon liquide et le xénon liquide, nous avons choisi d'étudier l'évolution des caractéristiques de la décharge couronne dans les gaz (argon, krypton et azote) en fonction de leur densité (= pression), en comparaison avec celle de ces mêmes composés à l'état liquide. Différentes techniques expérimentales ont été utilisées pour obtenir des mesures *simultanées* des paramètres électriques et optiques. Dans cet article nous allons décrire le dispositif mis au point pour analyser les impulsions de courant, d'amplitude et de durée importantes, détectées dans ces milieux. En effet, si la décharge couronne observée est une décharge auto-entretenu et auto-stabilisée par la charge d'espace [7], il existe des relations simples entre les grandeurs électriques (charge de chaque impulsion, temps écoulé entre deux impulsions successives, charge moyenne déduite du rapport entre le courant moyen et la fréquence des impulsions, etc.) et les grandeurs géométriques (rayon de courbure de la pointe, distance entre les électrodes, etc.). La détermination expérimentale de ces relations est indispensable à l'établissement du mécanisme de l'impulsion de courant. Le dispositif précédemment élaboré [8] pour l'étude des impulsions de courant dans les hydrocarbures liquides et gazeux (durée de l'impulsion inférieure à 20 ns et fréquence de l'ordre des dizaines de kHz) ne peut pas être utilisé dans le cas des impulsions de courant observées dans les gaz liquéfiés. Ces impulsions présentent en effet un temps de montée très rapide (< 2 ns) suivi d'un plateau et d'une traîne ; la durée totale de l'impulsion peut atteindre plusieurs microsecondes (Fig. 1). Leur fréquence d'apparition est de quelques Hz à quelques kHz.

Nous présentons d'abord le principe de fonctionnement du dispositif de mesure et les résultats des tests effectués sur ce nouveau dispositif. Ensuite nous décrivons quelques résultats expérimentaux, obtenus à l'aide de cet appareillage, dans l'étude des régimes d'impulsions dans l'argon et l'azote à l'état liquide et gazeux. Ces résultats sont ensuite discutés.

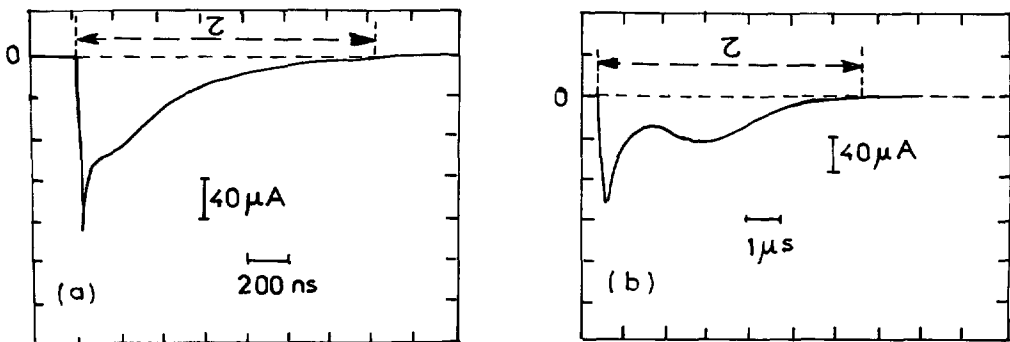


Fig. 1. — Structure d'une impulsion de courant en pointe négative. a) Argon liquide à 83 K, $N = 2,1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$, $V = -10 \text{ kV}$, $F = 400 \text{ Hz}$. b) Argon gazeux à 25 °C, $N = 2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, $V = -10 \text{ kV}$, $F = 400 \text{ Hz}$.

[Current pulse oscillograms for a negative needle in liquified argon (a) and in gaseous argon (b).]

Techniques expérimentales.

L'argon et l'azote (qualité N60, fourni par Alphagaz) sont purifiés par passage à travers deux Oxisorb pour éliminer l'oxygène et l'eau. Le gaz purifié est ensuite introduit dans une cellule de mesure coaxiale (impédance 50Ω) contenue dans un cryostat. Dans chaque cellule, l'électrode plane est en acier inoxydable et la pointe est soit en acier (fabriquée par Ogura-Jewel) soit en tungstène (préparée par électrolyse d'un fil). Les pointes ont un rayon de courbure compris entre $0,5$ et $10 \mu\text{m}$ et la distance pointe-plan est fixée entre $0,5$ et 10 mm . Une pression de 10 MPa qui est la pression limite que peut supporter la cellule d'étude, peut être appliquée.

L'ensemble de mesure est composé d'une source de tension continue variable (de 0 à $\pm 20 \text{ kV}$), d'une cellule de mesure coaxiale, d'un ensemble électronique de détection (mise en forme, mesure des charges et des intervalles de temps), d'un micro-ordinateur AT 286 et des programmes de traitement nécessaires à l'exploitation des résultats (Fig. 2).

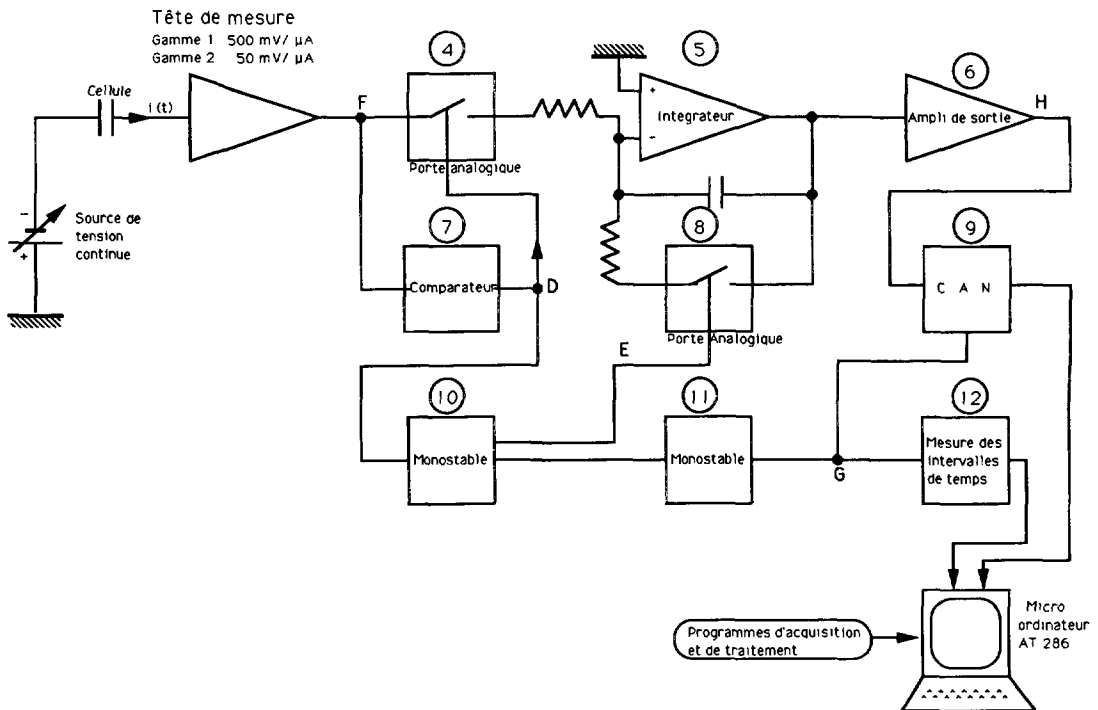


Fig. 2. — Schéma de l'ensemble de mesure.

[Schematic diagram of experimental apparatus.]

Dispositif d'étude des impulsions de courant.

L'ensemble électronique est composé des éléments suivants :

1) une tête de mesure (Fig. 3) qui permet, d'une part, de convertir l'impulsion de courant issue de la cellule en une impulsion de tension et, d'autre part, de disposer en sortie

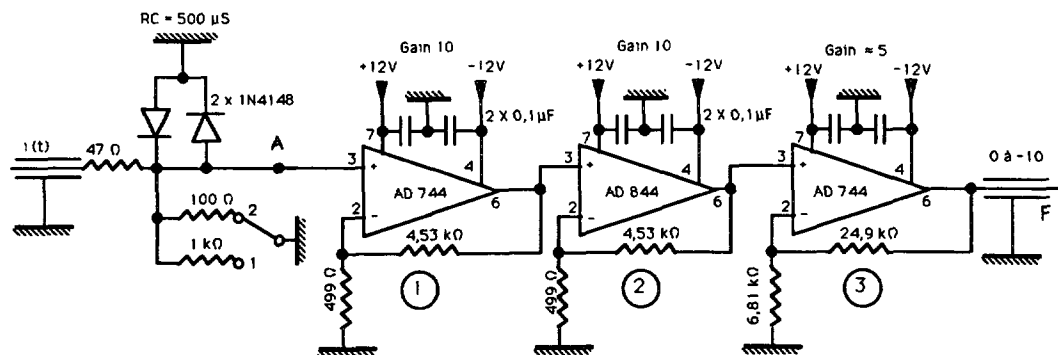


Fig. 3. — Tête de mesure 500 mV/μA (gamme 1) et 50 mV/μA (gamme 2).

[Measurement head 500 mV/μA (range 1) et 50 mV/μA (range 2).]

(amplification de 500) d'un niveau d'amplitude suffisant pour permettre le traitement des signaux. Deux gammes de mesure sont obtenues par le commutateur d'entrée : 50 et 500 mV/μA. La forme du courant d'entrée I et celle du signal de sortie de la tête de mesure F sont données sur la figure 5.

2) un circuit de détection et de mise en forme (Figs. 2 et 4).

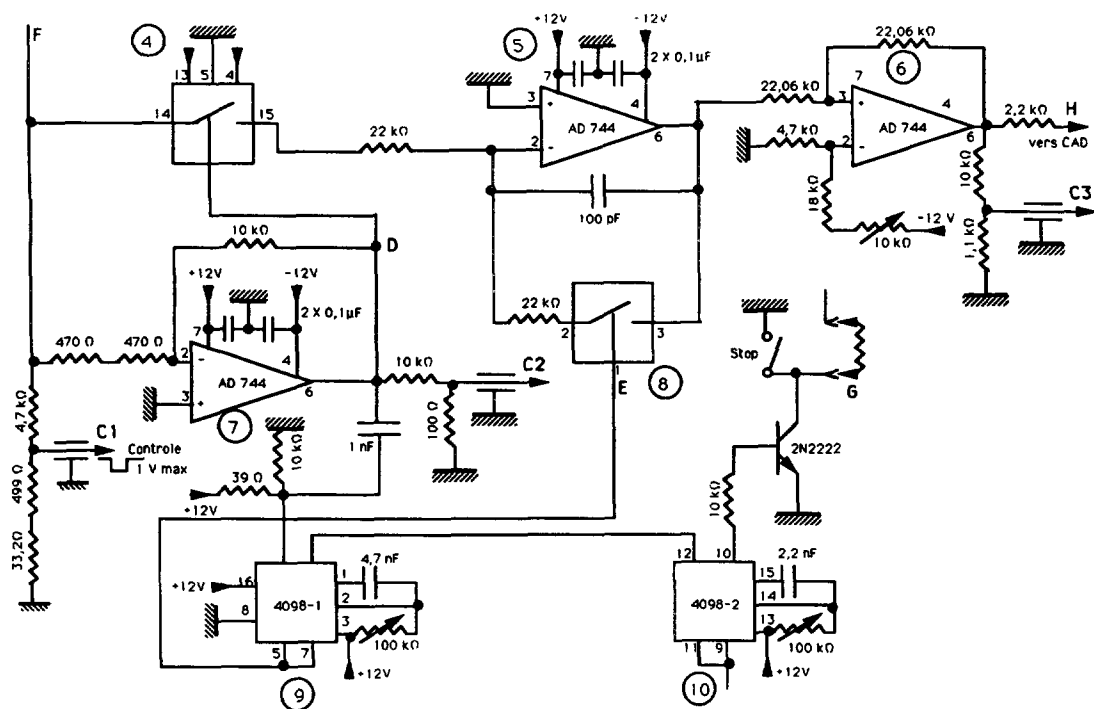


Fig. 4. — Circuit de détection des impulsions, d'intégration et de mise en forme.

[Impulse detection, integration and signal shaping circuits.]

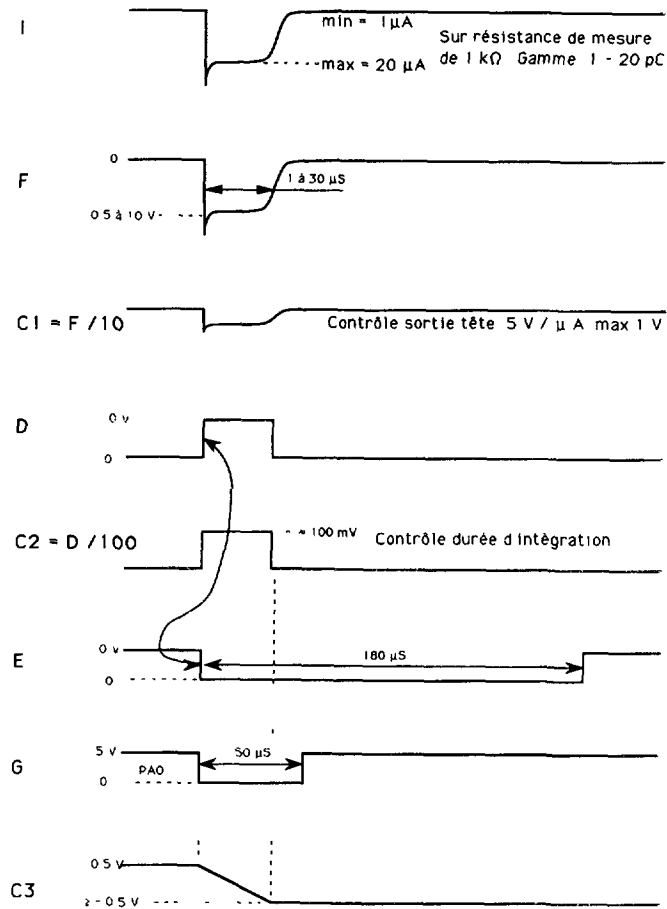


Fig. 5. — Allures de l'impulsion de courant d'entrée (I), du signal de sortie (F) de la tête de mesure et des différents signaux de contrôle (C, D, E et G).

[Shape of input current impulse (I), output signal (F) measurement head and different control signals (C, D, E et G).]

A l'entrée de ce circuit on retrouve le signal F de la figure 5. Il est appliqué d'une part à un comparateur (7) chargé de la détection des impulsions et, d'autre part, à un intégrateur (5) par l'intermédiaire d'une porte analogique (4). Cette porte permet d'isoler l'intégrateur du signal d'entrée et donc de maintenir sa sortie constante durant la mesure effectuée par le convertisseur analogique-numérique (9) (C.A.N.) à travers l'amplificateur de sortie (6). En l'absence d'impulsion, le condensateur d'intégration est court-circuité par la porte analogique (8). Quand une impulsion est détectée par le comparateur (7), celui-ci commande la fermeture de la porte analogique (4) et, par l'intermédiaire du monostable (10), l'ouverture de la porte analogique (8) autorisant l'intégration de l'impulsion de courant pendant toute sa durée et permettant ensuite le maintien de la valeur finale durant le temps nécessaire à sa mesure par le C.A.N. Le signal G initialise la conversion analogique-numérique et commande la lecture de l'ensemble des compteurs (12) destinés à la mesure des intervalles de temps entre les impulsions. Pour chaque impulsion de courant, la valeur de la charge (intégration du courant sur la durée de l'impulsion) ainsi que le temps qui s'est écoulé depuis la décharge précédente,

sont transférés en mémoire du micro-ordinateur par le programme d'acquisition. Le transfert des données est effectué par séries de 1 000 impulsions, le nombre total de séries est en général limité à 60.

La figure 6 représente la charge (valeur sortie par le C.A.N.) en fonction de l'amplitude d'une impulsion rectangulaire de courant pour des durées d'impulsion variant de 1 à 6 μs . La proportionnalité et la linéarité du dispositif avec l'amplitude et la durée de l'impulsion ont été vérifiées dans la gamme de charge de 1 à 500 pC et pour des durées d'impulsion pouvant atteindre 30 μs . Le courant d'entrée doit être compris entre 1 μA et 200 μA . Les intervalles de temps entre deux impulsions successives peuvent être mesurés dans l'intervalle de 200 μs à 15 s suivant la période d'horloge choisie (de 2 μs à 250 μs).

Les programmes de traitements des données qui sont écrits en Turbo Pascal, permettent d'analyser jusqu'à 60 séries de 1 000 impulsions pour déterminer les distributions des charges

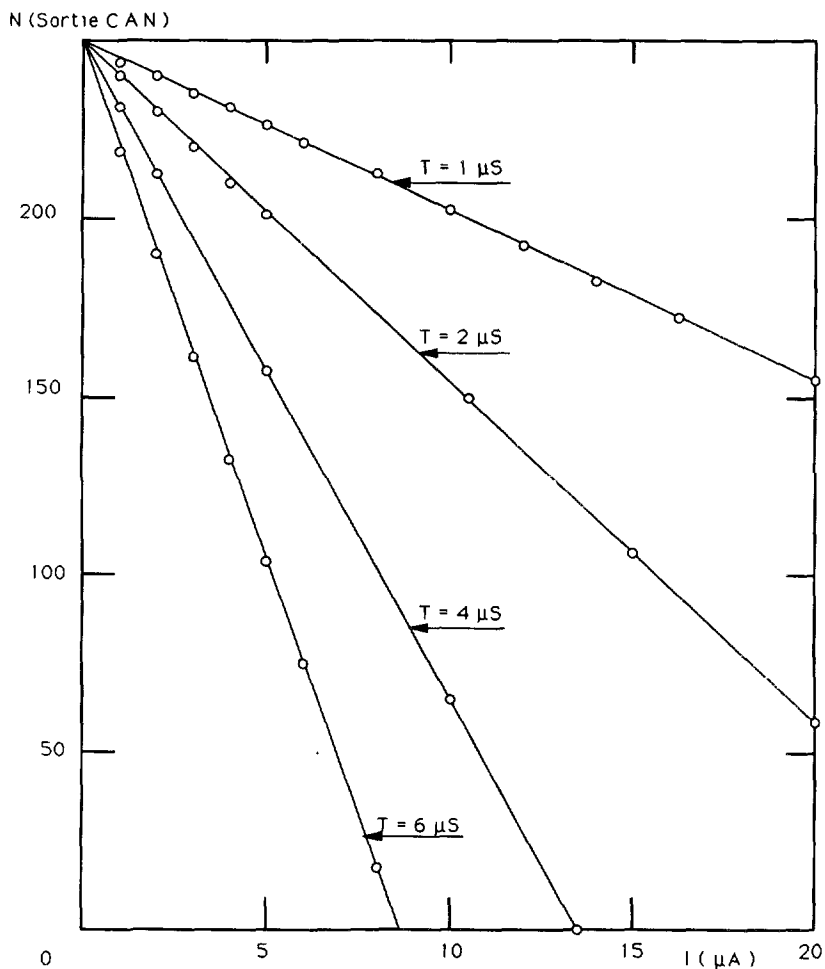


Fig. 6. — Valeur du signal de sortie du convertisseur analogique-numérique (CAN) en fonction de l'amplitude en courant d'une impulsion de test rectangulaire de durée T variable.

[Values of the output signal of the numerical-analogue converter (CAN) as a function of a rectangular current signal of variable duration and amplitude.]

et des intervalles de temps, les corrélations entre la charge d'une impulsion et le temps Δt qui la suit ou la précède, les relations éventuelles entre une charge donnée et celles qui suivent, etc., ceci en fonction de différents paramètres. L'analyse statistique (calcul des moments) est effectuée sur les deux populations (charges et intervalles de temps).

Résultats expérimentaux.

Les grandeurs caractéristiques d'un régime d'impulsions de courant comme le courant moyen I_m , la fréquence des impulsions F (ou leur période T), la charge moyenne des impulsions Q déduite de la relation $I_m = QF$, la charge par impulsion Q_1 , etc., sont fonction de la tension appliquée V , du rayon de courbure r_p de la pointe et de la densité N du milieu [7]. Une analyse formelle de ce régime [9] montre également que le rapport Q_1/Q qui est une fonction de la densité, doit être inférieur à 0,5 et que la charge $Q_1(n)$ est fonction du temps $\Delta t (n - 1)$ qui s'est écoulé depuis l'impulsion précédente. Ce dernier point a été vérifié expérimentalement pour le régime de Trichel dans l'air jusqu'à une densité de $1,5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$. La mesure de ces différentes grandeurs est donc indispensable à l'étude détaillée des phénomènes de conduction dans les composés argon, krypton et azote.

Les résultats obtenus avec tous ces composés (liquides ou gazeux), lorsque la densité varie ($N > 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$), montrent une remarquable similitude dans les phénomènes observés. Dans les deux polarités de la pointe, une instabilité sur le courant se produit à une tension seuil V_s et pour $V > V_s$, le courant, qui est limité par la charge d'espace, est constitué d'impulsions. Nous avons également observé que pour les faibles densités ($N \ll 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$), comme cela a été décrit par plusieurs auteurs [7], la tension seuil correspond à la tension de claquage.

Chaque impulsion de courant présente une amplitude et une durée τ (Fig. 1) uniquement fonction de la densité, de r_p et de la polarité de la pointe (Fig. 7). L'analyse statistique (moments, variance, moyenne, écart-type, etc.) des charges $Q_1 \left(= \int_0^\tau I dt \right)$ et des temps

Δt entre deux impulsions successives montre que leur distribution suit approximativement une loi normale (Fig. 8) avec une dispersion en général inférieure à 10 % pour les charges et

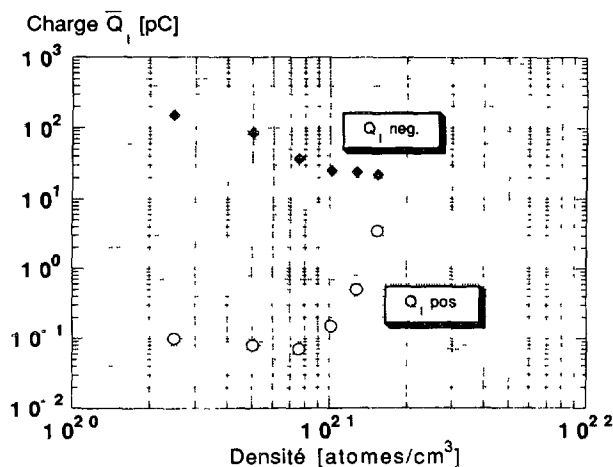


Fig. 7. — Variation de la charge \bar{Q}_1 (en pC) en fonction de la densité du gaz argon en pointe négative et en pointe positive pour un même rayon de courbure de la pointe.

[Charge variation \bar{Q}_1 (in pC) as a function of argon gas density for both polarities of the point.]

Pression = 49 Bars ; Liquide = ar ; $T(C^\circ) = -128^\circ$; Cellule = cr4 ; 4 : 3 : 93
 Expérience N° 332
 N Sk2 = 968.58
 D1 = 68

Nb de séries : 40

N Sk2 = 817.69
 D1 = 85

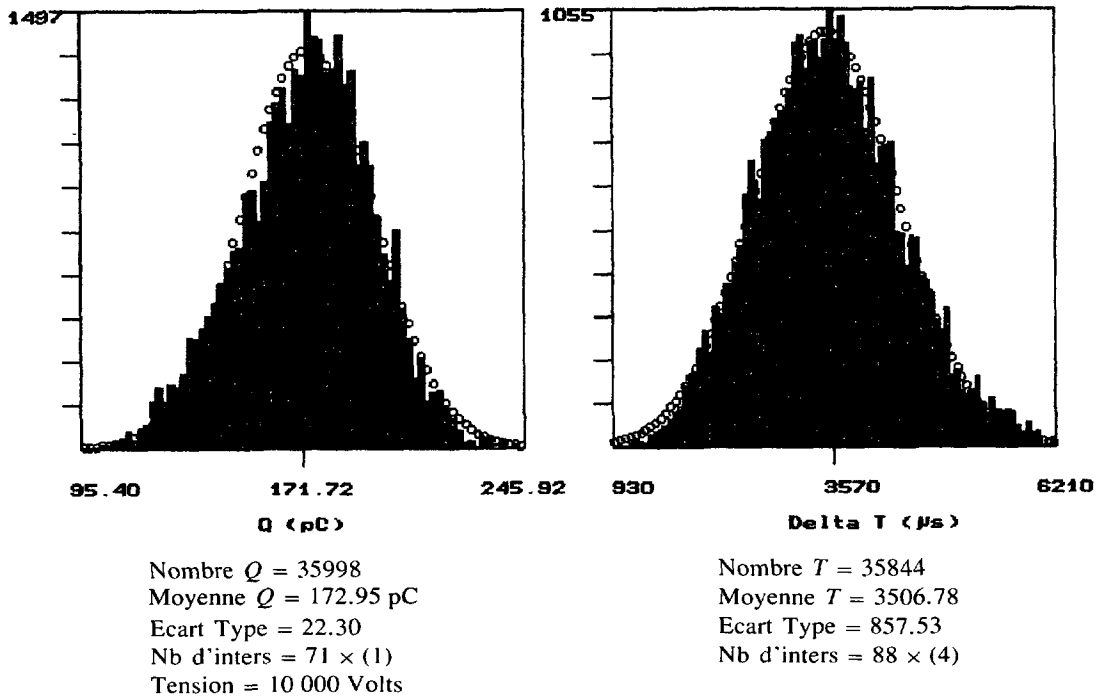


Fig. 8. — Histogrammes de la charge Q_i et de l'intervalle de temps Δt dans l'argon liquide à 83 K, $N = 2,1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$, $V = -10 \text{ kV}$, $F = 400 \text{ Hz}$.

[Histograms of the charge Q_i and time lags Δt between impulses in liquid argon at 83 K, $N = 2,1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$, $V = -10 \text{ kV}$, $F = 400 \text{ Hz}$.]

inférieure à 20 % pour les Δt . Les valeurs moyennes \bar{Q}_i et $\bar{\Delta t}$ sont donc les plus probables. \bar{Q}_i augmente avec r_p mais le rapport \bar{Q}_i/Q qui devient pratiquement indépendant de r_p pour une pression donnée, est toujours inférieure à 0,4 (Fig. 9). Comme la charge par impulsion Q_i correspond essentiellement au courant électronique et que la charge moyenne Q intègre aussi bien les charges positives que négatives, la valeur obtenue pour leur rapport ($< 0,5$) indique bien que le mécanisme mis en jeu conduit à la formation d'une quantité équivalente de charges des deux signes (cas d'un mécanisme d'avalanches). Ce résultat montre que la décharge est la conséquence d'un processus de multiplication électronique près de la pointe.

La charge d'une impulsion $Q_i(n)$ est une fonction croissante du temps $\Delta t(n-1)$ qui la sépare de l'impulsion $Q_i(n-1)$ (Fig. 10). Aucune autre corrélation simple n'a pu être établie entre, par exemple, $Q_i(n)$ et $\Delta t(n)$ ou $Q_i(n)$ et $Q_i(n-1, n-2)$ ou encore $\Delta t(n)$ et $\Delta t(n-1, n-2)$. Ce résultat (et le fait que la période T des impulsions est beaucoup plus petite que le temps de transit de la charge entre les électrodes) montre que la charge $Q_i(n)$ dépend essentiellement du processus de relaxation de la charge d'espace formée par l'impulsion précédente.

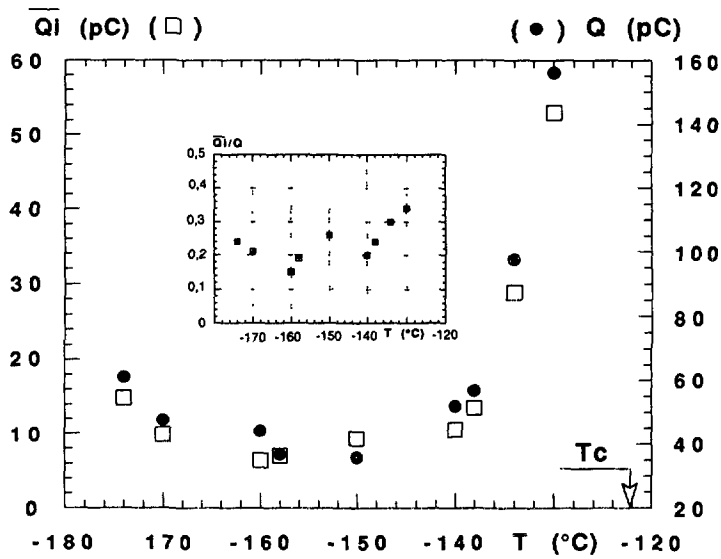


Fig. 9. — Variations, en pointe négative, de \bar{Q} , Q et du rapport \bar{Q}/Q dans l'argon liquide en fonction de la température ; T_c est la température critique de l'argon.

[\bar{Q} , Q and \bar{Q}/Q ratio in liquified argon as a function of temperature for a negative needle ; T_c is the critical temperature.]

Expérience n° 8

Q_i (pC)

6,1

3,6

326 Delta T (i - 1) (μs) 2770

Tension = 4320 Volts

Q_i

326 Delta T_i (μs) 2770

Fig. 10. — Distributions $Q_i(n)$ en fonction de $\Delta t(n - 1)$ dans l'argon liquide ; pointe négative.

[Distribution of $Q_i(n)$ values as a function of $\Delta t(n - 1)$ in liquid argon.]

Chaque impulsion de courant est corrélée à une impulsion de lumière émise. L'analyse spectrale spatio-temporelle de cette lumière est en cours d'investigation. Dans les gaz liquéfiés comme dans les hydrocarbures, chaque impulsion de courant induit la formation d'une bulle près de la pointe tant que la pression hydrostatique appliquée sur le liquide est inférieure à sa pression critique.

Dans l'état liquide, les différentes caractéristiques ($I_m(V)$, $F(I_m)$, $V_s(P)$, $Q_1(V)$, etc.) sont indépendantes de la pression hydrostatique ($P \leq 6$ MPa) alors que celles-ci évoluent notablement dans le gaz avec sa pression. Cependant, l'analyse des différentes grandeurs (Q , Q_1 , etc.) en fonction de la densité, de V et de r_p montrent que dans les liquides comme dans les gaz, les mêmes mécanismes sont mis en jeu mais que dans les liquides, du fait de l'absence d'influence de la pression hydrostatique, le processus d'avalanches électroniques doit se produire dans la phase liquide.

Conclusion.

L'étude des mécanismes de conduction dans les isolants gazeux et liquides est rendue très délicate par la complexité des phénomènes observés. La mesure simultanée des grandeurs électriques et optiques et, en particulier l'analyse temporelle des régimes d'impulsions de courant rendue possible par le dispositif décrit dans cet article, nous a permis de les clarifier. L'investigation de ces phénomènes se poursuit pour en déduire les valeurs des paramètres de la décharge.

Bibliographie

- [1] Denat A., Gosse J. P., Gosse B., *Rev. Phys. Appl.* **22** (1987) 1103.
- [2] Denat A., Gosse J. P., Gosse B., *IEEE Trans. Elect. Insul.* **EI-23** (1991) 545.
- [3] Haidara M., Denat A., *IEEE Trans. Elect. Insul.* **EI-26** (1991) 592.
- [4] Bonifaci N., Denat A., *IEEE Trans. Elect. Insul.* **EI-26** (1991) 610.
- [5] Atrazhev V. M., Iakubov I. T., Roldughin V. I., *J Phys D: Appl. Phys.* **9** (1976) 1735.
- [6] Derenzo S. E., Mast T. S., Zaklad H., Muller R. A., *Phys. Rev. A* **9** (1974) 2582.
- [7] Voir par exemple : a) Loeb L. B., *Electrical Coronas* (Univ. of California Press, Berkeley, California, 1965) ;
 b) Lama W. L., Gallo C. F., *J. Appl. Phys.* **45** (1974) 103 ;
 c) Sigmond R. S., *Electrical Breakdown of Gases*, chap. 4 « Corona Discharges », J. M. Meek and J. D. Craggs Eds. (Wiley, N. Y., 1978) p. 319.
- [8] Marteau C., Haidara M., Denat A., *Rev. Phys. Appl.* **24** (1989) 597.
- [9] Haidara M., Doctorat de l'Université Joseph Fourier-Grenoble I (21 décembre 1988).