Étude de disjoncteurs à explosion de feuille adaptés aux transferts rapides d'énergie

B. Antoni, J. Delvaux, F. Rioux-Damidau

► To cite this version:

B. Antoni, J. Delvaux, F. Rioux-Damidau. Étude de disjoncteurs à explosion de feuille adaptés aux transferts rapides d'énergie. *Revue de Physique Appliquée*, 1978, 13 (9), pp.463-470. 10.1051/rphysap:01978001309046300 . jpa-00244476

HAL Id: jpa-00244476

<https://hal.science/jpa-00244476>

Submitted on 1 Jan 1978

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
 14.20

ÉTUDE DE DISJONCTEURS A EXPLOSION DE FEUILLE ADAPTÉS AUX TRANSFERTS RAPIDES D'ÉNERGIE

B. ANTONI (*), J. DELVAUX (**) et F. RIOUX-DAMIDAU

Laboratoire de Physique des Plasmas (***)
 Université Paris-Sud, 91405 Orsay, France

(Reçu le 6 septembre 1977, révisé le 25 mai 1978, accepté le 8 juin 1978)

Résumé. — Les explosions de feuilles de cuivre sont étudiées en vue du transfert rapide (en quelques μ s) d'énergie magnétique. On trouve que le meilleur environnement est l'eau, à la fois pour la simplicité d'utilisation et ses excellentes performances électriques. On détermine la tension de réisolement et la résistance de la feuille en fonction du temps après l'explosion. On propose une nouvelle loi de conductivité au-delà de 4 000 K qui permet de mieux décrire les explosions.

Abstract. — Copper exploding foils are studied with a view to transfer magnetic energy in a few μ s. One finds that the best environment is water as well for its simplicity of use as for its excellent electrical performances. The re-insulation voltage and the resistance of the foil after the explosion are determined as a function of time. A new law is propounded for the conductivity of copper beyond 4 000 K ; it better describes the exploding foils.

1. Introduction. — L'utilisation du phénomène d'explosion de feuille métallique, en tant que disjoncteur dans la technique du stockage et du transfert d'énergie magnétique pour fournir des impulsions brèves (quelques μ s), a déjà été étudiée en vue de remplacer les bancs de condensateurs à des niveaux de plusieurs mégajoules [1], [2]. Cependant, l'utilisation d'une seule explosion permet de réduire la durée de l'impulsion initiale seulement d'un facteur de l'ordre de 5 et très exceptionnellement de 10 [3]. Pour obtenir un facteur de réduction supérieur, on peut envisager de mettre en parallèle plusieurs feuilles, adaptées de telle sorte qu'elles explosent successivement, chacune raccourcissant l'impulsion délivrée par la précédente et augmentant dans la même proportion la tension générée. Il est bien évident que le fonctionnement de ce système *en cascade* nécessite la tenue de tensions élevées par des feuilles venant d'exploser. Cette tenue conditionne aussi les possibilités du transfert inductif à haut rendement [4] et de tous les montages dans lesquels l'essentiel de l'énergie magnétique se trouve transféré seulement après l'explosion de la feuille [5]. Or les surtensions

admissibles dans de telles conditions ne sont actuellement pas connues. C'est pourquoi nous avons étudié le phénomène d'explosion de feuille dans le but de déterminer la surtension que peut supporter ce type d'interrupteur : cela nous a aussi amené à comparer l'influence de divers environnements et en particulier de l'eau et à préciser le modèle théorique de l'explosion établi précédemment par l'un d'entre nous [3]. Ce travail est décrit plus en détail dans [6].

2. Le montage. — Le montage utilisé est représenté figure 1. Il se compose de deux parties principales :

— l'une délivre une impulsion de courant de l'ordre de 100 kA, permettant l'explosion de feuilles de cuivre au bout de 5 à 10 μ s. Le circuit correspondant est représenté en traits gras. Il est alimenté par le banc C_1 , son inductance totale est L_1 :

— l'autre permet de fournir une tension d'essai V_2 avec un retard prédéterminé compris entre 1 et 20 μ s. Pour appliquer facilement cette tension, on est amené à monter deux feuilles en série : l'une est la feuille testée, l'autre, après son explosion, isole le banc primaire. Les courants dans le circuit auxiliaire sont de l'ordre du kA.

Deux dispositifs de montage des feuilles à exploser ont été successivement utilisés. Le premier, dit montage *accordéon*, est semblable à celui de la figure 6

(*) Actuellement : CEA Centre d'Etudes de Bruyères-le-Châtel.

(**) Actuellement : CEA Centre d'Etudes de Valduc.

(***) Ce travail a été effectué en partie au CEA Centre d'Etudes de Limeil.

FIG. 1. — Schéma du circuit électrique. Le circuit principal est en traits gras S_1 et S_2 sont des conjoncteurs synchronisables.

[The electrical circuit scheme. The principal circuit is represented with thick lines. S_1 and S_2 are synchronisable switches.]

de la référence [3]. Il a été utilisé pour l'étude de l'explosion d'une feuille sous pression mécanique et avec différents environnements (tissus de verre, téflon). Le second, représenté figure 2, a permis l'étude dans un fluide.

FIG. 2. — Montage pour l'étude de l'explosion de feuille dans un fluide.

[Device for studying the explosion of copper foils in water.]

3. Etude de l'environnement. — Nous avons étudié l'explosion d'une seule feuille dans trois types d'environnement avec le circuit principal de la figure 1 seul.

Au cours de la décharge du banc C_1 , les évolutions du courant et de la tension aux bornes de la feuille ont les allures représentées figures 3 et 4. Le courant s'annule rapidement tandis qu'une surtension importante apparaît. Nous la caractérisons par le *coefficient de surtension*, C_s , qui est le rapport de la valeur maximale de cette surtension à celle de la tension initiale, V_1 , de C . Après annulation du courant, il subsiste une tension résiduelle V_R très peu inférieure à V_1 . Elle provoque un reclaquage à travers la feuille qui décharge alors complètement C_1 . Nous avons rassemblé dans le tableau I tous les éléments relatifs à cette série d'expériences :

- L_1 est l'inductance totale du circuit ;
- V_1 est la tension initiale du banc C_1 ;

FIG. 3. — Evolution du courant au cours d'une explosion de feuille de cuivre dans l'eau définie par : $L_1 = 158$ nH, $V_1 = 3$ kV, longueur : 75 mm, largeur : 5 mm, épaisseur : 100 μm (tir 89). La courbe *résistivité modifiée* représente l'évolution selon notre loi de résistivité (cf. Fig. 8).

[Resistance and temperature of a copper foil during its explosion in water (thickness : 100 μm, width 5 mm, length 75 mm, V_1 : 3 kV, inductance of the circuit : 158 nH) (experiment n° 89). The curve *modified resistivity* gives the evolution with our resistivity law (cf. Fig. 8).]

FIG. 4. — Evolution de la tension au cours du tir 89.

[Voltage variation during the explosion of a foil (experiment n° 89).]

TABLEAU I

Comparaison des résultats dans différents environnements (les paramètres sont définis dans le texte)

[Comparison of results in the different environments (definitions of the parameters are in the text).]

Environnement	L_1 (nH)	V_1 (kV)	feuille			C_s	Reclaquage dû à V_R
			e_0 (μ m)	h (mm)	l (mm)		
Tissu de verre + polyéthylène sous presse	133	5	20	100	50	6,25	100 μ s à 0,5 s après explosion
Téflon + tissu de verre + polyéthylène sous presse	133	5	20	100	50	6	jamais observé
Air ambiant	114	3	20	60	50	6	immédiat
Air ambiant + téflon	114	3	20	60	50	6,8	immédiat
Eau	128	4	20	84	50	9,3	jamais observé

— e_0 , h , l sont l'épaisseur initiale, la longueur dans le sens du courant et la largeur de la feuille ;

— C_s est le coefficient de surtension.

Dans cette série d'expériences, la section de la feuille, $e_0 \times l$, et le rapport V_1/h étaient toujours (ou presque) les mêmes.

3.1 TISSU DE VERRE ET DE TÉFLON. — Nous avons repris le montage du type *accordéon* que les premiers expérimentateurs [1], [7] avaient employé avec un enrobage en tissu de verre et feuilles de mylar ou de polyéthylène [3] (un essai où nous avons remplacé le polyéthylène par du lucoflex nous a montré que cet isolant n'est pas adapté à ces expériences : un claquage à travers le lucoflex se produit lors de l'explosion). La tension résiduelle, V_R , provoque un reclaquage par arc *longtemps* après l'explosion, c'est-à-dire 100 μ s à 0,5 s ou même, parfois, ne se produit pas du tout.

Nous avons trouvé une légère amélioration au point de vue reclaquage par l'emploi de téflon adhésif collé directement sur la feuille de cuivre. Cette matière a la propriété d'absorber les vapeurs de cuivre sans se détériorer et une bande adhésive équivaut à trois couches de tissu de verre. Si l'on place simplement une bande de téflon sur chaque face de la feuille et quatre couches de polyéthylène (qui assurent l'isolement), on constate un reclaquage à travers le polyéthylène quelques 10 μ s après explosion. Si nous intercalons alors deux couches de tissu de verre entre le téflon et le polyéthylène, il ne se produit plus de reclaquage. Il semble bien que le tissu de verre amortit l'onde de choc qui, elle, favorise le reclaquage.

3.2 AIR ET TÉFLON. — La feuille à exploser est recouverte de part et d'autre d'une bande de téflon adhésif et repose à quelques millimètres de la plaque d'amenée de courant sur deux feuilles de polyéthylène et quatre de fibres de verre. Ces feuilles sont destinées à isoler la feuille de cuivre de la plaque d'amenée

de courant et la différence avec le montage précédent est qu'elles ne se situent que d'un côté de la feuille à exploser et qu'elles ne sont pas pressées. On obtient un coefficient de surtension un peu plus élevé qu'avec le montage précédent, mais un reclaquage suit immédiatement l'explosion.

En l'absence de téflon, le reclaquage se produit avant la fin de la vaporisation. Ce cas, longuement étudié pour les fils explosés [8], ne présente aucun intérêt pour les applications envisagées § 1.

3.3 EAU. — L'enrobage de téflon, opération délicate à cause des bulles d'air emprisonnées entre téflon et cuivre, n'est plus nécessaire. Il n'est pas nécessaire non plus d'utiliser une eau spéciale : des tirs effectués avec de l'eau déminéralisée et avec de l'eau *courante* ont donné les mêmes résultats. Toutefois l'eau a été changée après chaque tir afin d'avoir toujours les mêmes conditions initiales.

Le coefficient de surtension est nettement amélioré et on n'observe pas de reclaquage dû à V_R .

3.4 INFLUENCE DES BORNES. — Les bornes de contact utilisées étaient en laiton. Nous avons observé que la surtension diminuait beaucoup lorsque leur état de surface se dégradait. Même en les nettoyant soigneusement au fin papier de verre avant chaque tir, la surtension était en général moins bonne qu'avec des bornes réusinées.

3.5 CONCLUSION. — Nous avons rassemblé dans le tableau I quelques résultats parmi les plus caractéristiques de cette série d'essais. Il ressort nettement du tableau I que le dernier environnement (eau) est nettement avantageux pour ses performances électriques. De plus, ce montage est très commode d'emploi. Aussi, nous sommes nous limités à ce dernier dans les essais de réisolement (§ 5) qui utilisent le montage complet de la figure 1.

4. Anomalie de résistance. — Cet effet, décrit précédemment [3], est attribué généralement à l'inertie

du conducteur qui explose (ou même du matériau environnant) ce dont notre modèle (§ 6) rend compte. Cependant au cours des diverses explosions de feuille, nous avons observé avec des feuilles de cuivre d'épaisseur 100 μm un phénomène d'anomalie de résistance qui nous a semblé plus marqué et plus caractéristique qu'il ne l'est habituellement décrit dans la littérature. La résistance de la feuille, après le palier de fusion, *diminue* légèrement et se remet à croître *normalement* comme le montre la figure 5 au lieu de croître régulièrement mais moins vite pour des feuilles épaisses que pour des feuilles fines.

FIG. 5. — Evolution de la résistance et de la température au cours du tir 89.

[Resistance and temperature variation during the explosion of a foil (experiment n° 89).]

Cette diminution momentanée de résistance se traduit par un retard important de l'explosion. Ce phénomène ne peut être imputé à l'environnement car nous l'avons observé de façon identique dans l'eau et dans l'air. Compte tenu de la détente de la feuille, cette chute de résistance correspond en fait à une résistivité qui reste à peu près constante dans cette partie de l'évolution, ce qui évoque une évolution de la résistivité du genre de celle proposée par Knoepfel et Luppi [9] plutôt que celle de A. V. Grosse [10].

5. Résistance et tenue diélectrique de la feuille après explosion. — La reconduction ou reclaquage dépend de nombreux paramètres dont les plus importants sont :

- le champ résiduel dû à C_1 ;
- l'état de la feuille après son explosion qui dépend lui-même du milieu extérieur et des conditions initiales ;
- la forme de l'impulsion de tension d'essai V_2 , son intensité, sa durée et l'instant où elle est appliquée ;

— le milieu extérieur, par le fait que, dans certains cas, le reclaquage se fait dans ce milieu.

Le principe de notre étude de la tenue diélectrique a été d'appliquer, après explosion, une tension ayant la forme d'un crêneau — du moins tant qu'il n'y a pas reconduction — et de garder toujours les mêmes conditions initiales (dimensions de feuilles, tension de banc C_1 , etc.). Nous ne faisons varier systématiquement dans cette étude que l'instant de fermeture du conjoncteur S_2 (Fig. 1), et la tension de charge V_2 de C_2 . Du reclaquage ou non, nous déduisons une borne supérieure ou inférieure, à un instant donné de la tension de réisolement et nous calculons la résistance de la feuille à partir des valeurs du courant auxiliaire et de la tension mesurée aux bornes de la feuille test (Fig. 1).

tir 73

tir 75

FIG. 6. — Sur ces deux oscillogrammes, la trace supérieure représente le courant auxiliaire (1 kA/carreau) et la trace inférieure la tension aux bornes de la feuille test (5 kV/carreau), le balayage est 5 μs /carreau. On voit successivement le pic de surtension dû à l'explosion vers 7 μs puis l'application de la tension d'essai vers 15 μs . Le tir 73 n'a pas donné lieu à reconduction contrairement au tir 75.

[Oscillograms showing, for the reference foil, the auxiliary current (upper trace, 1 kA/division) and the voltage (lower trace, 5 kV/division). The horizontal scale is 5 μs /division. One sees the explosion of the foil ($\sim 7 \mu\text{s}$) and next the applied voltage ($\sim 15 \mu\text{s}$). There is no reconduction in experiment n° 73 contrary to experiment n° 75.]

Les oscillogrammes de la figure 6 montrent les deux cas possibles.

— pour le tir 73, la tension d'essai est trop faible pour amorcer une reconduction, la capacité C_2 ne se décharge presque pas et la tension d'essai V_2 reste presque constante :

— pour le tir 75, la tension d'essai est au contraire assez forte, le courant du circuit auxiliaire se met à croître régulièrement, puis amorce un régime oscillant. La tension résiduelle du banc C_1 se retrouve entièrement aux bornes de la feuille d'isolement (Fig. 1).

Les résultats sont représentés sur la figure 7, où nous constatons que la tension de réisolement reste d'abord, pendant 5 à 10 μs , du même ordre de grandeur que la surtension d'explosion (autour de 7 kV). Ensuite elle se met à croître rapidement.

FIG. 7. — Courbes de résistance et tension de réisolement pour la feuille test et la feuille d'isolement. Elles ont les mêmes dimensions : 36,5 mm de long, 25 mm de large et 20 μm d'épaisseur, $L_1 = 130 \text{ nH}$, $V_1 = 3 \text{ kV}$. Les courbes en traits discontinus représentent l'évolution de la résistance lors de la reconduction. Les numéros sont ceux des tirs.

[Curves of resistance and re-insulating voltage for the test and insulating copper foils having just exploded in water. The two foils have the same dimensions : thickness 20 μm , width 25 mm, length 36,5 mm. The dashed curves correspond to cases with reconduction. The numbers are those of the experiments.]

L'évolution de la résistance (Fig. 7) dépend de la valeur de la tension d'essai V_2 appliquée. Si V_2 est faible, elle est donnée par la courbe en trait plein.

Si V_2 est assez élevée, il apparaît plus ou moins tôt une reconduction (traits discontinus) qui ne présente pas les caractères habituels d'un reclaquage par arc.

6. Modèle théorique décrivant une explosion de feuille dans l'eau. — Nous rappellerons d'abord le modèle d'évolution [3] utilisé précédemment, pour des expériences voisines. Nous examinerons l'influence de la présence de l'eau. Pour expliquer le comportement très particulier avec chute de résistivité des feuilles de 100 μm , nous serons ensuite amenés à modifier la loi de conductivité hyperbolique de A. V. Grosse [10].

6.1 BREF RAPPEL DU MODÈLE THÉORIQUE PRÉCÉDENT. — A l'instant où le milieu liquide atteint la température de vaporisation (2 850 K à la pression normale d'après [11]), il apparaît une onde de vaporisation allant de l'extérieur vers l'intérieur de la feuille et séparant un milieu liquide-vapeur saturante (brouillard) non conducteur, du milieu liquide conducteur. La vitesse de cette onde est égale à la limite de celle du son dans le milieu liquide-vapeur saturante, lorsque la proportion de vapeur tend vers zéro. L'énergie Joule dépensée se transforme essentiellement en énergie interne de la masse liquide homogène et en travail contre la pression extérieure qui est ici la pression de vapeur saturante à l'interface. Cette pression est reliée, par l'équation d'état, à la température (supposée homogène) du milieu conducteur. Nous avons utilisé l'équation d'état de Morris [11].

6.2 INFLUENCE DU MILIEU CONNEXE (EAU). RETARD A L'ONDE DE VAPORISATION. — Remarquons que l'évolution de l'explosion est *a priori* modifiée par la présence de l'eau qui empêche la détente libre de la feuille. L'onde de vaporisation ne peut pas prendre naissance à 2 850 K. Le milieu conducteur continue à s'échauffer, il se dilate, ce qui génère une onde de compression dans l'eau mais il ne se vaporise pas tant que la pression de vapeur saturante du cuivre est inférieure à la pression du milieu connexe. L'onde de vaporisation se développe donc avec un certain retard, ce qui entraîne *a fortiori* un retard à la coupure du courant. Nous avons évalué ce retard par des calculs d'ordre de grandeur [6]. Nous avons montré que ce retard a une incidence négligeable et qu'il ne peut jamais rendre compte, à lui seul, des évolutions observées du courant et de la tension.

6.3 UNE INTERPRÉTATION DE L'ANOMALIE DE RÉSISTANCE. — Les résultats des calculs numériques montrent que l'augmentation de résistance de la feuille, sauf tout à fait à la fin de l'explosion, provient presque uniquement de la variation de conductivité du cuivre avec la température et ce, d'autant plus que la feuille est épaisse. Cela résulte du fait que la vitesse de l'onde de vaporisation ne prend de valeurs impor-

tantes qu'aux alentours de la température critique (8 500 K) [3]. Aussi pour interpréter les résultats du § 5, nous avons finalement été amenés à modifier la loi de conductivité. Nous avons procédé par tâtonnement sur cette loi, en essayant d'obtenir la meilleure description possible de l'évolution du courant, voir figure 3. La loi de conductivité ainsi obtenue est représentée figure 8. Il se trouve, à ce moment, que les évolutions de la tension, figure 4, et de la résistance, figure 5, sont également mieux décrites. On remarque cependant que les valeurs expérimentales de la tension et de la résistance continuent de croître fortement au-delà de la valeur calculée à la température critique qui est la dernière valeur calculable par le modèle.

FIG. 8. — Courbe de conductivité du cuivre en fonction de la température, que nous proposons, comparée avec celle de A. V. Grosse [10].

[The propounded copper conductivity as a function of temperature compared to that given by A. V. Grosse [10].]

Nous avons également vérifié que cette loi de conductivité déterminée de façon *ad hoc* pour expliquer le cas très particulier, observé, de la décroissance de la résistance des feuilles de 100 μm , explique aussi bien les cas habituels où ce phénomène ne s'observe pas. L'accord entre les courbes théoriques et expérimentales est même meilleur qu'avec la loi de conductivité de Grosse pour des explosions de feuille dans du tissu de verre par exemple, mais surtout pour les explosions de feuilles fines (20 μm) dans l'eau (Fig. 9):

FIG. 9. — Evolution de la résistance et de la température d'une feuille de cuivre au cours de son explosion dans l'eau : épaisseur 20 μm , largeur 25 mm, longueur 75 mm, tension initiale du banc C_1 3 kV, inductance du circuit 135 nH (tir 82).

[Variation of resistance and temperature of a copper foil during its explosion in water (thickness 20 μm , width 25 mm, length 75 mm, initial voltage of C_1 : 3 kV, circuit inductance 135 nH). Experiment n° 82.]

Ainsi, il semblerait, bien que nous ne puissions donner d'explication physique, que la résistivité du cuivre suive cette loi curieuse. Knoepfel et Luppi ont donné une loi de résistivité qui présente aussi une décroissance au-delà de 4 000 K, mais de valeurs numériques très inférieures aux nôtres [9].

Si cet effet de la chute de résistivité qui donne une allure tout à fait spéciale à la courbe de tension n'a pas été remarqué auparavant, c'est qu'il faut se placer dans des conditions très particulières. En effet, à forte température, l'onde de vaporisation est tellement rapide, qu'elle *cache* dans la plupart des cas la variation de conductivité et ce, d'autant plus que la feuille est mince (dès 4 000 K pour des feuilles de 20 μm et dès 6 000 K pour des feuilles de 100 μm). C'est pourquoi la loi que nous avons ainsi obtenue (Fig. 8) est *très* approximative au-delà de 6 000 K.

7. Etude de la phase post-explosive. — Pour essayer de comprendre les phénomènes électriques observés dans cette phase, nous nous sommes d'abord intéressés à son état thermodynamique.

7.1 ORDRE DE GRANDEUR THERMODYNAMIQUE. —

Le modèle précédent avec les modifications ci-dessus ne permet en aucun cas de décrire correctement l'état de la feuille à partir du moment où le cœur liquide disparaît. Il est certain, qu'à ce moment, le milieu est uniquement sous forme d'un *brouillard* de gouttelettes plus ou moins denses en train de se détendre de façon turbulente. Cependant si nous négligeons l'échauffement de l'eau adjacente, le travail contre la pression extérieure ainsi que l'énergie cinétique, l'énergie interne totale est alors l'énergie Joule déposée et nous pouvons évaluer une température, une densité et une pression moyennes du cuivre comme si la feuille était homogène. Typiquement, pour les conditions du tir 82 définies sur la figure 9, nous avons obtenu [6] juste à la fin de l'explosion :

- la densité d'énergie $\varepsilon \sim 3,5$ kJ/g,
- la pression $P \sim 1$ kbar,
- la détente volumique ~ 7 ,
- la température $\sim 6\,000$ K,
- la fraction vaporisée (masse vapeur/masse totale) $\alpha \sim 0,08$.

Nous avons calculé de même, en supposant une détente adiabatique, l'état $3\ \mu\text{s}$ après l'explosion : détente ~ 22 , $T \sim 5\,500$ K, $\alpha \sim 0,17$. Il se trouve que dans ce modèle, l'évaluation de la température dépend surtout de ε qui est bien connu grâce aux mesures électriques et dépend peu de la détente.

Remarquons que le refroidissement par détente adiabatique est très lent (précisons-le, seulement dans l'eau).

7.2 ETUDE DE LA CONDUCTION POST-EXPLOSIVE EN

ABSENCE DE RECLAQUAGE. — A partir de la courbe de tension de réisolement et de celle de l'évolution de la résistance, figure 5, nous allons tenter de comprendre les phénomènes physiques qui sont à la base de la conduction après explosion lorsqu'aucune tension aux bornes de la feuille n'est appliquée ou lorsque cette tension est trop faible pour modifier la conduction.

Parmi ceux-ci, nous pouvons éliminer la conduction par avalanche (ou décharge de Townsend, du moins dans les cas d'explosion de feuille dans l'eau car les densités sont toujours beaucoup trop fortes) ainsi que la conduction par effet de champ (car les champs électriques en jeu sont beaucoup trop faibles). Par ailleurs, le taux d'ionisation moyen du plasma, évalué à partir de la loi de Saha [15] avec les températures et densités précédentes (cf. § 7.1), est insuffisant pour expliquer la conduction observée dans nos expériences. Il reste à envisager la conduction par effet thermoélectronique [13].

Cette conduction est donnée, en l'absence de phénomènes de charges d'espace, par la loi de Dushman-Richardson [14] qui s'écrit :

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{W}{kT}\right)$$

dans laquelle J est la densité de courant, A est une constante [15]

$$A = \frac{4\pi me k^2}{h^3} = 1,2 \times 10^6 \text{ A} \cdot \text{K}^{-2} \text{ m}^{-2}$$

$W = e\phi$ est le travail d'extraction d'un électron du métal ; pour le cuivre $\phi = 4,5$ volts d'après [15].

Cette loi s'applique habituellement pour des surfaces émissives cristallines placées dans le vide et à des températures inférieures à $3\,000$ K. Nous n'avons pas de renseignements sur la conduction thermoélectronique dans le cas qui nous intéresse, c'est-à-dire pour des gouttelettes liquides au milieu de la vapeur métallique et dans une gamme de températures s'étendant jusque $7\,000$ K environ. Nous appliquerons toutefois cette loi, simplement pour avoir une estimation du courant permis par ce type de conduction. En calculant la section équivalente à la partie liquide dans les conditions du tir typique 82, avec les valeurs de la détente déterminées précédemment, nous trouvons alors un courant, aux deux instants suivants :

- en fin d'explosion : 8 kA,
- $3\ \mu\text{s}$ après : 3 kA.

Ces valeurs sont bien de l'ordre de grandeur du courant réel. Ce type de conduction est donc vraisemblablement responsable de la conduction en absence de tension d'essai ou avec une tension d'essai assez faible.

Remarque. — La conduction par effet thermoélectronique ne permet pas d'expliquer l'intensité et surtout l'évolution des forts courants observés lors d'une reconduction (par ex. tir 75, Fig. 6). Nous pensons que la conduction est alors assurée par des filaments très chauds et fortement ionisés qui se développent par un phénomène d'instabilité résistive : le courant et l'effet Joule se concentrent dans les circuits de plus faible résistance qui chauffent davantage et dont la résistance diminue encore par ionisation. Pour augmenter la tension de réisolement, il conviendrait donc de limiter le taux d'ionisation et pour cela de limiter la température et la détente après explosion. L'utilisation d'eau et de feuilles fines semble favorable à cette dernière condition.

8. Conclusion. — Nous avons étudié le phénomène d'explosion de feuilles de cuivre afin de réaliser un interrupteur adapté au transfert d'énergie magnétique. La commutation rapide de l'énergie implique à la fois :

- 1) l'obtention d'une surtension élevée aux bornes de la feuille au cours de l'explosion ;
- 2) une tension d'isolement, après l'explosion, aussi élevée que possible.

Nous avons effectué tout d'abord une étude comparative dans trois environnements très différents : le tissu de verre, l'air ambiant et l'eau. Ce dernier

s'est révélé très avantageux pour la commodité et la simplicité du montage et pour son usage économique. Mais c'est surtout pour l'amélioration des performances recherchées que cet environnement est remarquable. En particulier le coefficient de surtension, critère de la rapidité de la coupure, passe de 6, pour le tissu de verre, à plus de 9.

Nous avons déterminé l'évolution de la tension de réisolement en fonction du temps pour une feuille

venant d'exploser dans l'eau ainsi que la résistance de cette feuille. Cette tension reste de l'ordre de grandeur du pic de surtension pendant 5 à 10 μ s et augmente ensuite.

Enfin, nous avons été amenés à proposer une nouvelle loi de conductivité du cuivre, à des températures supérieures à 4 000 K, pour obtenir entre notre description théorique et nos expériences un meilleur accord qu'avec la loi de Grosse.

Bibliographie

- [1] EARLY, H. C., MARTIN, F. J., *Rev. Sci. Instrum.* **36** (1965) 1000.
- [2] MAISONNIER, Ch., LINHART, J. G., GOURLAN, C., *Rev. Sci. Instrum.* **37** (1966) 1380.
- [3] ANTONI, B., *Revue Phys. Appl.* **9** (1974) 331.
- [4] RIOUX, C. et RIOUX-DAMIDAU, F., *Revue Phys. Appl.* **9** (1974) 539.
- [5] ANTONI, B., Thèse de Doctorat d'Etat (Université Paris-Sud) 1974, p. 122.
- [6] DELVAUX, J., Thèse de 3^e Cycle (Université Paris-Sud) 1975.
- [7] DI MARCO, J. N., BURKHARDT, L. C., *J. Appl. Phys.* **41** (1970) 3894.
- [8] CHACE, W. G. and MOORE, H. K., *Exploding Wires* (Plenum, New York, 1959, 1962, 1966, 1969) vol. 1-4.
- [9] KNOEPFEL, H., LUPPI, R., *Exploding Wires*, vol. 4, p. 244.
- [10] GROSSE, A. V., *Rev. Hautes Temp. Refract.* **3** 115 (1966).
- [11] MORRIS, E., A. W. R. E. report n° 0-36/64 (1964).
- [12] DELCROIX, J. L., *Physique des Plasmas* (Dunod Editeur).
- [13] CHACE, W. G., MORGAN, R. L., SAARI, K. R., *Exploding Wires*, vol. 1, p. 59.
- [14] ROCARD, Y., *Electricité* (Masson) 3^e éd., p. 467.
- [15] « *Direct Energy Conversion* » (Edité par G. W. Sutton) vol. 3 (1966) p. 243.