

Explosion électrique d'un fil de titane dans de l'eau en milieu confiné

D. PRIEM¹, G. RACINEUX¹, G. LOCHAK², C. DAVIAU²,
D. FARGUE², M. KARATCHENTCHEFF², H. LEHN²

¹Institut de recherche en génie civil et mécanique (GeM) UMR CNRS 6183,
Université de Nantes, Centrale Nantes

²Fondation Louis de Broglie, 23 rue Marsoulan 75012 Paris, France

RÉSUMÉ. Le principe de la décharge électrohydraulique est utilisé depuis longtemps pour la mise en forme à grande vitesse des métaux. A notre connaissance, aucune étude détaillée des poudres résiduelles n'avait été réalisée expérimentalement jusqu'aux travaux d'Urutskoev à l'institut de Kurchatov à Moscou. Quelques résultats étonnants [4] montrent des transmutations possibles à bas niveau d'énergie. Les auteurs attribuent ces transmutations à une production de monopôles légers magnétiques théoriquement prévus par Lochak [8-12].

Dans cet article nous présentons une installation expérimentale qui est actuellement développée conjointement par l'institut Louis de Broglie et le laboratoire GeM de l'école Centrale de Nantes afin de vérifier les expériences d'Urutskoev. Nous présentons, dans cette article, les premiers résultats de l'explosion de fils en titane dans de l'eau en milieu confiné. Les résultats que nous avons obtenus sont en bon accord avec ceux présentés par Urutskoev et al. Toutefois un certain nombre d'améliorations restent à faire.

1 Introduction

Le formage électrohydraulique est un procédé ancien, il consiste à décharger une batterie de capacité dans un fil conducteur immergé dans de l'eau. L'onde de choc induite par l'explosion du fil permet de mettre en forme des matériaux à très grande vitesse. Ce procédé est apparu pour la première fois dans les années quarante [1], il est utilisé depuis industriellement [2]. L'École Centrale de Nantes (anciennement ENSM) travaille sur ce procédé depuis une trentaine d'années, un dispositif

démonstrateur a été conçu et réalisé afin de d'étudier, de développer et de mettre au point ce procédés à haute énergie.

Il y a quelques années, une équipe conduite par L. Urutskoiev à l'institut Kurtchatov de Moscou, a débuté l'étude des processus physiques liés à ces décharges [4]. Ils ont découvert qu'elles sont associées à des phénomènes de rayonnement semblables à ceux observés par Juettner et al [5], et que de légers changements de la composition isotopique du fil (principalement en titane) agissant en tant que fusible dans le liquide où l'explosion a eu lieu [6]. Pour valider les résultats récemment obtenus par cette équipe, à la demande de l'institut Louis de Broglie, des expériences semblables ont été récemment été effectuées à l'institut de Recherche en Génie-Civil et Mécanique de Nantes (GeM). Cet article présente quelques résultats expérimentaux préliminaires qui semblent confirmer les résultats des expérimentateurs Russes.

2 Expériences

L'expérience qui a été développée dans le cadre de cette étude comprend un générateur et son système de commutation de puissance, un pot de tir et une chaîne de mesure du courant de décharge et de tension de charge des condensateurs.

2.1. Le générateur

Le générateur utilisé lors de ce ces expériences est de conception américaine (Magneform© - Fig. 1), il s'agit d'un générateur de type Maxwell généralement utilisé pour alimenter des systèmes de magnétoformage ou d'électroformage. Sa capacité de 360 μ F lui permet de délivrer une énergie de 12 kJ à 8,4kV :

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (1)$$



Figure 1 : Générateur Magneform©

2.2 Le système de commutation de puissance

Deux technologies sont classiquement utilisées pour effectuer la commutation d'énergie entre les capacités et le système de décharge :

1. Le premier système, appelé éclateur, consiste à approcher, une fois les capacités chargées, les deux électrodes l'une de l'autre pour provoquer entre elles un arc électrique le plus souvent dans un vide primaire. Cette technologie a un temps de décharge de l'ordre de la milliseconde et ne permet pas d'obtenir une bonne reproductibilité des décharges du fait de l'usure progressive des électrodes lors des tirs successifs (fusion locale lors du passage d'un courant intense).
2. Pour notre application nous avons préféré utiliser la technologie de type ignitron. Il s'agit d'un composant électronique de puissance qui permet le passage d'un courant de 100kA en quelques microsecondes (Fig. 2).

Un ignitron (Fig. 3) est composé d'une anode (1), d'une cathode (2) et d'une gâchette (3) plongée dans du mercure qui est contenu dans une enveloppe constituée d'un verre et d'une couche métallique externe. Lors de la décharge, on envoie sur la gâchette une tension proportionnelle à la tension de décharge de capacité affichée. Au passage du courant, un point chaud se crée, plus ou moins rapidement au niveau de la gâchette, il vaporise le mercure qui permet alors le passage du courant entre la cathode et l'anode.



Figure 2 : Photo de l'ignitron

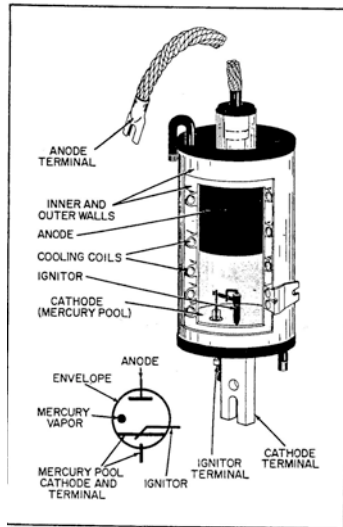


Figure 3 : Schéma de l'ignitron

Le temps de décharge est fonction du temps de commutation des ignitrons qui eux-mêmes sont fonction de la tension de décharge. Par exemple, pour un tir à 3kJ, qui correspond au niveau 50 du potentiomètre de réglage du générateur, c'est à dire 50% de la tension maximum de 8,4kV, la tension de décharge des capacités est de 4,2kV. La tension de commutation des ignitrons se situe à environ 30% de la tension de décharge c'est-à-dire, 1,2kV. Le temps de commutation mesuré est alors de 3 μ s. Le tableau 1 présente les temps de commutation des ignitrons en fonction de la tension affichée. On constate qu'à partir de 1500V ce temps est constant et égal à 1 μ s, dans ces conditions, le temps de commutation est négligeable vis-à-vis du temps total de décharge dans le circuit qui dépend du générateur, des connexions et de la cuve.

Capacité (μ F)	12	5	1	0.25	0.1
Tension (V)	450	600	1000	1500	4000
Temps de commutation (μ s)	100	20	5	1	1

Tableau 1 : Tableau des données expérimentales

Les ignitrons utilisés n'admettent pas une tension de commutation, de gâchette, supérieure à 4kV sous peine d'un claquage externe entre l'anode et la cathode.

2.2. Le pot de tir

Le pot de tir (Fig. 4 et 5) est constitué d'une enceinte de confinement en aluminium (0), d'une enceinte isolante en polyuréthane (1), d'une chambre de tir amovible en polyuréthane (2), d'un couvercle en aluminium (6), d'un système d'étanchéité (7) et d'électrodes isolées en acier inoxydable (5). La chambre de tir a une contenance de 22 ml, elle est remplie d'eau déminéralisée (3). Les électrodes sont reliées par un fil fusible (4).

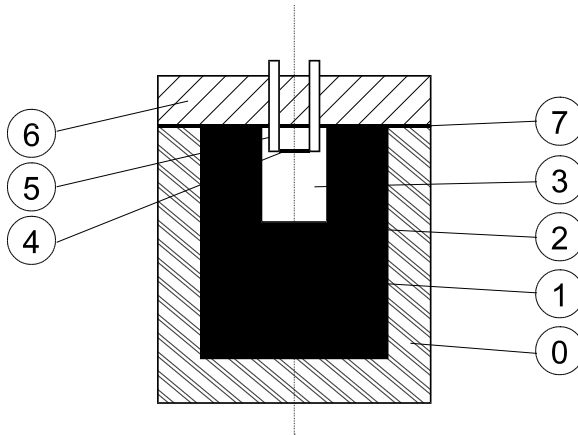


Figure 4 : Schéma de principe du pot de tir



Figure 5 : Photographie du pot de tir

Les électrodes sont reliées au générateur au moyen d'un câble coaxial qui peut supporter des tensions de 15kV.

L'enceinte de confinement a été dimensionnée afin d'éviter son éclatement lors de tir à forte énergie. L'enceinte isolante (1) sert d'absorbeur d'onde de choc. Le système d'étanchéité (7) permet d'éviter une fuite du fluide lors du tir. Pour éviter la pollution de la chambre de tir entre deux expériences, celle-ci est amovible et peut être changée (2).

2.3. La mesure du courant de décharge

Pour mesurer le courant de décharge nous avons utilisé une bobine de Rogowsky d'une sensibilité de 2mV/A connectée à un oscilloscope Tectronix©. La tension de charge est effectuée au moyen d'un diviseur de tension directement pendant la charge des capacités (Fig. 6).

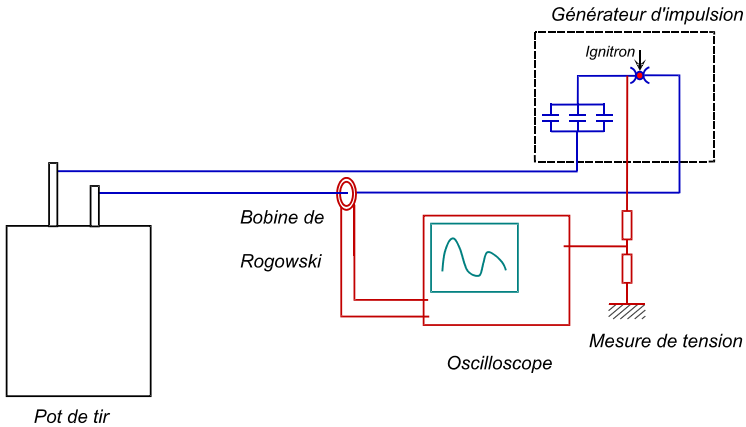


Figure 6 : Schéma de principe du système de mesure de courant et de tension

2.4 Conditions Expérimentales

Dans le cadre de cette étude nous avons choisi les conditions expérimentales suivantes :

- la chambre de tir a un volume fixé à 22ml,
- elle est remplie d'eau déminéralisée,
- l'énergie de décharge a été fixée à 3kJ ce qui correspond à une tension de 4,2 kV,
- le fil fusible est en titane T40, sa masse est de 0,3g sur une épaisseur de 0,3mm et une largeur 2mm. L'analyse du pourcentage en masse des constituants présents dans échantillon de T40 donne le résultat présenté dans le tableau 2.

Élément	(keV)	Masse (%)	Erreur (%)	Atome (%)
C	Exclu			
Ti	4.508	99.61	0.07	99.81
Fe	6.398	0.15	0.13	0.13
Hf	1.644	0.02	0.19	0.01
W	1.774	0.21	0.18	0.06
Total		100		100

Tableau 2 : Composition initiale du fil fusible en Ti40

3 Résultats et Discussion

De façon à étudier l'influence du temps et de la forme de la décharge sur les poudres résiduelles, nous avons effectué deux séries d'essais en faisant varier l'inductance du circuit. Pour une même énergie de décharge nous avons utilisé ou non un solénoïde monté en série dans le circuit entre le générateur et le pot de tir. Ce solénoïde a un diamètre de 300mm, il comprend 10 spires.

3.1. Courant de décharge

Les figures 7 et 8 présentent respectivement les courbes de courant mesuré sans et avec le solénoïde. Sans solénoïde, le temps de décharge est approximativement de $80\mu\text{s}$ et le pic de courant de 36kA . Avec le solénoïde, le temps de décharge est approximativement de $360\mu\text{s}$ et le pic de courant de 8kA . Quel que soit le temps de décharge nous constatons la présence de deux pics sur les courbes de courant. Ces deux pics peuvent s'expliquer de la façon suivante : (i) dans un premier temps le courant circule dans le fusible qui s'échauffe jusqu'à sa destruction et la génération d'un canal de plasma, (ii) dans un second temps le courant circule au travers du plasma entre les électrodes. Il est à noter que ces courbes ont une allure similaire à celles obtenues par Ouroutskoïev dans un article publié dans le journal de Radioélectronique, principalement la courbe de la figure 8.

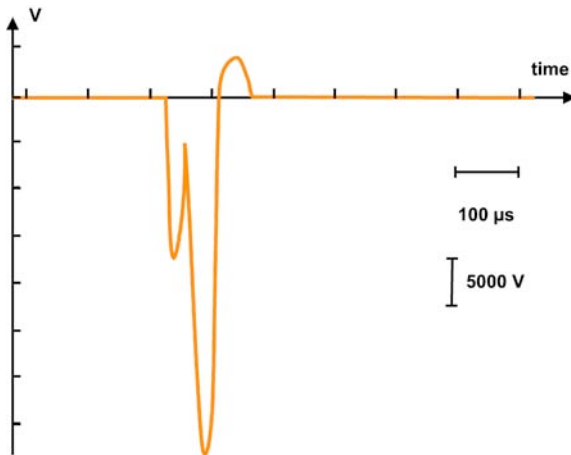


Figure 7 : Sans solénoïde

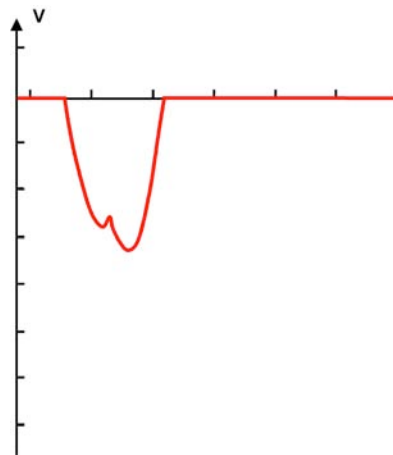


Figure 8 : Avec solénoïde

3.2. Morphologie des poudres

Après le tir, on a constaté en ouvrant le pot tir la présence d'un gaz sous pression qui s'échappe. Ne disposant pas de moyen de récupération du gaz nous n'avons pas pu l'analyser. Les poudres résiduelles sont ensuite ponctionnées au moyen d'une seringue puis séchées et finalement placées dans une coupelle pour l'observation au microscope électronique à balayage.

Les figures 9 et 10 présentent respectivement deux images de la poudre résultant de l'explosion électrique du fil de titane. Celles-ci ont été réalisées au moyen d'un microscope électronique à balayage JEOL JSM 6060. Nous constatons une nette différence de morphologie des particules. Lorsque le temps de décharge est très court (Fi. 9 – sans solénoïde) nous obtenons des particules très polydisperses sans forme particulière alors que lorsque le temps de décharge est plus long (Fig. 10 – avec le solénoïde) nous obtenons, en très grand nombre, des particules sphériques. Ces observations montrent clairement que la décharge, c'est-à-dire la quantité de courant écoulé par unité de temps, a une influence sur la forme des résidus. L'exposition du métal se fait probablement à des températures plus ou moins élevées pendant un temps plus ou moins long.

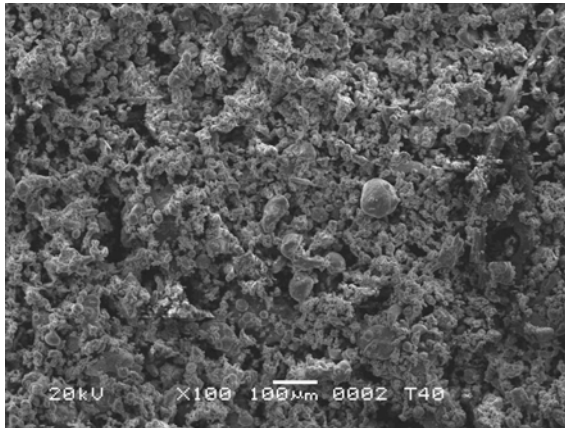


Figure 9 : Photo de la structure sans solénoïde

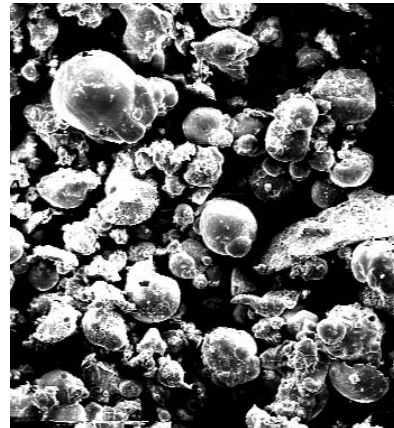


Figure 10 : Photo de la structure avec solénoïde

3.3. Analyse EDX des poudres résiduelles

Le tableau 3 présente les résultats de l'analyse par EDX effectuée à l'aide du microscope électronique à balayage. La colonne (0) correspond au résultat de l'analyse du métal de base Ti40 et la colonne (1) au métal constituant les électrodes (acier inoxydable 18 8). Les colonnes de (2) à (5) correspondent aux tirs sans bobine et les colonnes (5-7) aux tirs avec bobine. Dans chacun des cas nous observons une baisse significative de la quantité

de titane et une augmentation de la quantité de fer. Ces résultats sont en bon accord avec ceux publiés [4, 6, 7].

Essai	0	1	2	3	4	5	6	7
Masse (g)			0,3	0,26	0,24	0,26	0,26	0,27
Ti %	99,81		91,71	91,43	93,57	61,47	100 / 92,97	96,81 / 93,65
Fe %	0,13	72	5,16	6,6	5,72	2,99	0 / 7,03	3,19 / 6,35
Cu %			0,41					
Zn %			0,55					
Cr %		20	1,1	1,3	0,71			
Ni %		8	0,52	0,67				
Va%						1,07		
O%						34,48		
Bobine			non	non	non	non	oui	oui
Liquide			eau	eau	eau	Eau + 10% Glycérine	eau	eau

Tableau 3 : Résultats des analyses de composition réalisées par EDX

Toutefois, étant donné que les électrodes utilisées pour effectuer les tirs présentés étaient en acier inoxydable, il est indispensable de reprendre les essais en utilisant un autre matériau (titane, aluminium...) afin de préciser l'origine du fer présent dans les poudres résiduelles.

4 Conclusions et perspectives

L'expérience que nous avons mise au point nous permet aujourd'hui de faire des tirs de façon reproductible. Les premiers résultats sont encourageants mais il faut désormais multiplier les essais de façon à vérifier statistiquement la cohérence des résultats. Il faudra également faire varier les paramètres de l'expérience, c'est-à-dire l'intensité de la décharge, sa durée, le matériau constituant le fusible, la section du fusible etc. Afin de vérifier la présence de monopôles magnétiques nous envisageons l'utilisation de films sensibles X et la canalisation des monopôles au moyen de bobines d'Helmutz.

Un certain nombre d'améliorations restent à apporter. La première concerne le choix du matériau constituant les électrodes. On pourrait également envisager la réalisation d'un système de récupération des gaz afin de les analyser. Il serait également intéressant d'utiliser une double cuve, afin de réaliser un vide primaire avant le tir.

Bibliographie

- [1] <http://www.engineershandbook.com/MfgMethods/ehforming.htm>
- [2] K. Kojima, B. Of the Japan Institute of Metals, **4** (1965) 205.
- [3] J.Y. Renaud, Formabilité à grande vitesse de déformation, application aux techniques de formage électromagnétique et électrohydraulique, Thèse, Université de Nantes, 1980.
- [4] L.I. Urutskoev, V.I. Liksonov, V.G. Tsinoev, Applied physics (Russia) **4** (2000) 83, Ann. Fond. L. de Broglie, **27** (2002) 701.
- [5] B. Juettner, S. Noack, A. Versteegh, G. Fussmann, Long living plasmoids from water discharges at atmospheric pressure, accepted paper, ICPIG 2007 (topic C12).
- [6] V.D. Kuznetsov, G.V. Mishinsky, F.M. Penkov, V.I. Arbuзов, V.I. Zhemnik, Ann. Fond. L. de Broglie, **28** (2003) 173.
- [7] V.M. Doronskoi, L.A. Elesin, P.V. Filippov, A.V. Steblevskii, V.L. Stolyarov, L.I. Urutskoev, IEEE Trans. Plasma sc., to be published.
- [8] N.G. Ivoilov, Ann. Fond. L. de Broglie, **31** (2006) 115.
- [9] G. Lochak, Ann. Fond. L. de Broglie, **8** (1983) 345 ; **9** (1984) 5.
- [10] G. Lochak, I.J.T.P. **24** (1985) 1019.
- [11] G. Lochak, L. Urutskoev, Conference on Low Energy Transmutations, Marseille, 2004.
- [12] G. Lochak, Zeitschrift für Naturforschung, accepted for publication (2007).
- [13] J.C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, Dover (1954).

*(Magnetic Monopoles, Physical symmetries, Nodal electric fields.
Fondation Louis de Broglie, Peyresq 9-16 août 2007.)*