Décharges électriques dans l'eau: bilans d'énergie

P. Clauzon[1], D. Fargue[1], M. Karatchentzeff[1], G. de Lachèze-Murel[1,2], A. Marizy[1]

[1]Institut Louis de Broglie, 23 rue Marsoulan, 75012 Paris
[2]CEA,DAM,DIF, F-91297 Arpajon

RÉSUMÉ. Sous une tension suffisante un arc électrique peut se produire entre deux électrodes rapprochées, plongées dans l'eau. L'énergie électrique ainsi fournie se retrouve dans le milieu et accroît son énergie interne en accord avec le premier principe de la thermodynamique. Nous avons constaté que, dans des conditions très particulières que nous allons détailler, cet accroissement d'énergie interne semble excéder notablement l'énergie électrique fournie.

1 Introduction

Dans le cadre d'un ensemble d'expériences menées sur les liens possibles entre des décharges électriques dans l'eau et la production de monopôles magnétiques [1, 2, 3, 4], nous avons effectué des bilans d'énergie. En effet de nombreux travaux ont signalé depuis longtemps qu'il apparaît un excès d'énergie produite par rapport à l'énergie injectée pour engendrer l'arc [5, 6].

Les décharges que nous avons étudiées ont eu lieu sous des tensions de quelques kV dans de l'eau pure. La méthode calorimétrique employée est la mesure du taux d'évaporation de l'eau quand elle est maintenue à sa température d'ébullition, comme cela a déjà été fait par l'un d'entre nous [7].

Il apparaît que des circonstances très particulières sont nécessaires pour entraîner l'apparition d'un excès d'énergie dans le plasma formé dans le liquide, la brièveté des décharges semble en particulier y jouer un rôle important.

2 Calorimétrie par mesure du flux d'évaporation

Dans cette méthode, on maintient le milieu à la température d'ébullition de l'eau (100° C à la pression atmosphérique) à l'aide d'un chauffage auxiliaire maintenu constant, et on compare par une mesure de masse le taux d'évaporation à l'état stationnaire avec celui observé lors de la décharge.

L'excès d'énergie W_n est donné par la différence entre la masse évaporée m_{01} avec décharge, et m_{02} sans décharge, par la formule (voir appendice)

$$W_n = (m_{01} - m_{02})L - W_e \tag{1}$$

où L est la chaleur latente (enthalpie) d'évaporation de l'eau, que nous prenons égale à 2260 J/g, et W_e l'énergie électrique apportée. Cette formule est d'abord testée dans des expériences de validation de la méthode, où l'énergie injectée dans le liquide est simplement due à l'effet Joule produit dans une résistance immergée, sans apparition de plasma. Le résultat de ces mesures permet d'apprécier leur précision, qui permet ensuite d'encadrer les résultats de nos expériences (voir paragraphe 4.2).

3 Bilan d'énergie de décharges dans l'eau

Cette étude consiste à provoquer des décharges amorties entre deux électrodes distantes de moins de 0,1 mm, plongées dans l'eau, et à en faire le bilan d'énergie. Le plasma est créé par la décharge d'un condensateur de quelques dizaines de nF (nous avons testé de 30 à 120 nF) chargé sous 4 kV (nous avons testé de 2 à 5 kV), le retour à la masse se faisant à travers une résistance d'environ 5 Ω plongée dans l'eau (nous avons testé de 3 à 10 Ω). Les décharges sont brèves, durant 2 μs environ comme sur la copie d'écran Fig. 2. Le schéma électrique est donné Fig.1.

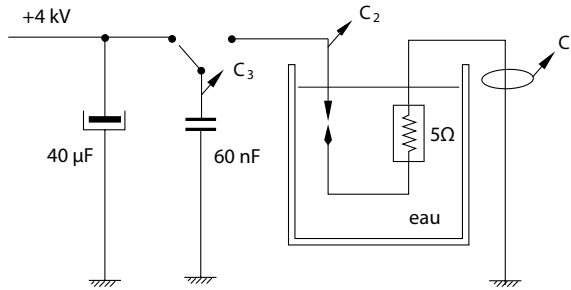

FIG. 1 – La sortie de l'alimentation stabilisée haute tension à 4 kV alimente une capacité tampon de 40 μF qui sert à charger à travers un commutateur périodique (15 Hz typiques) le condensateur de décharge de 60 nF ; le courant est relevé par l'intermédiaire d'une sonde de Rogowski et les tensions par des sondes HT de rapport 1/1000

On observe généralement, avant le pic de décharge de 1 à 2 μs, comme on le voit sur la figure 2 une mise sous tension de l'anode pendant quelques μs. Elle est le signe de la formation d'une prédécharge (streamer) entre les électrodes, qui précède la formation de l'arc électrique proprement dit.

Une expérience typique, parmi plusieurs dizaines qui donnent des résultats similaires, a été menée avec deux électrodes en inox (vis de diamètre 3mm) plongées dans l'eau en ébullition et soumises aux décharges d'une capacité de 60 nF chargée sous 4 kV ce qui représente 0,48 J par décharge. Compte tenu d'une fréquence des décharges de 14,3 Hz, elle nous a donné les résultats suivants où la masse est celle du vase Dewar qui contient l'eau en ébullition et les électrodes.

	avant décharges		décharges		après décharges	
temps (s)	0	600	0	600	0	600
masse (g)	1779,2	1752,7	1742,9	1712,5	1707,3	1680,5

On constate que l'évaporation due au seul chauffage auxiliaire, qui a été mesurée antérieurement à 2,67 ± 0,03 g/min, est bien retrouvée dans les mesures de 600 s effectuées avant et après les décharges.

Durant les 600 s qu'ont duré les décharges à 14,3 Hz, soit 8580 en tout, l'excès d'évaporation est de $(1742,9 - 1712,5) - 26,7 = 3,7 \pm 0,5$ g. La

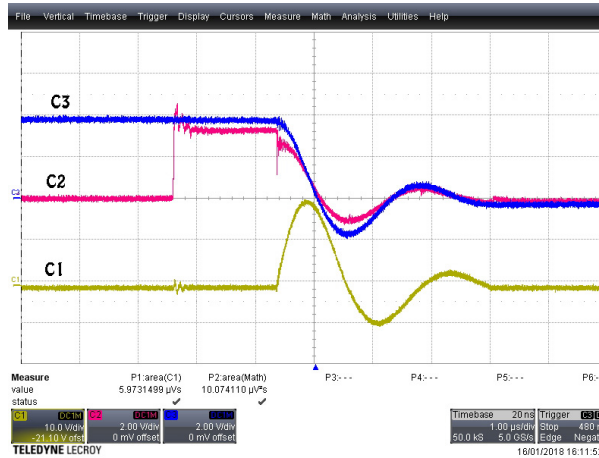

FIG. 2 – Copie d'écran de l'oscilloscope montrant le courant de décharge (C1, échelle 10 A/V), la tension aux bornes du dispositif de décharge (C2, échelle 1000 V/V) et la tension aux bornes du condensateur (C3, échelle 1000 V/V)

production d'énergie inexpliquée est alors de $(3,7 \times 2260)/8580 - 0,48 = 0,49 \pm 0,15$ J par décharge. Il faut noter que toutes les décharges ne sont pas associées à des arcs, certaines ne conduisent en effet qu'à l'apparition d'un courant passant à travers la mince couche d'eau entre les électrodes, d'une résistance de l'ordre de quelques kΩ. La valeur ci-dessus est donc un minimum.

Dans d'autres expériences nous avons complété ces mesures globales par les relevés temporels de la masse. Les pentes des courbes permettent alors de déterminer les puissances. Par exemple, une autre expérience effectuée avec un condensateur de 60 nF chargé sous 3 kV nous a permis de tracer la courbe donnant l'excès d'évaporation lors des décharges par rapport à celle uniquement due au chauffage auxiliaire, Fig. 3. Compte tenu d'une fréquence des décharges de 14 Hz, le gain d'énergie inexpliqué par tir est alors de 0,51 J.

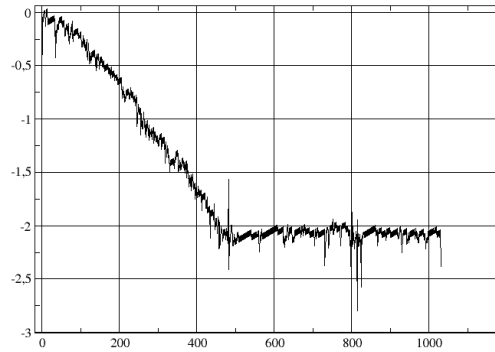

FIG. 3 – Différence entre la variation temporelle de masse lors des décharges (effectuées de 0 à 480 s) et celle uniquement due au chauffage auxiliaire ; abscisses en secondes, ordonnées en grammes ; on notera le retour au taux d'évaporation correspondant au chauffage auxiliaire, signalé par la partie horizontale au-delà de 480 s. La puissance électrique fournie était de 3,74 W, celle déduite de la pente de la courbe (0,0048 g/s par une méthode de moindre carrés) de 10,87 W.

4 Discussion

4.1 Dispositif expérimental

Ces expériences sont assez délicates à réaliser, certaines précautions devant être prises pour faciliter l'apparition des arcs. L'eau utilisée doit être pure, et sa conductivité assez basse, quelques micro Siemens par cm (μS/cm) seulement pour raccourcir au maximum la période de formation des streamers qui précèdent la décharge. Les électrodes, en acier inoxydable ou en tungstène, doivent être propres, une couche d'oxyde nuisant aussi à l'amorçage des arcs. Il semble bien aussi que les résultats soient d'autant meilleurs que l'arc a lieu à proximité de la surface du liquide.

Toutes ces conditions sont assez difficiles à réunir, et seule une expérience sur 4 ou 5 nous permet de constater un excès d'énergie, les autres restant en accord avec la conservation de l'énergie, l'accroissement du flux de vapeur résultant simplement de l'énergie électrique introduite

par les décharges du condensateur ($W_n = 0$ dans la formule (1)).

Pour être certain que l'énergie fournie ne dépasse pas l'énergie accumulée dans le condensateur de décharge, le commutateur utilisé met alternativement ce condensateur en contact avec le tampon puis avec l'éclateur sans jamais connecter les deux simultanément.

La résistance d'amortissement de la décharge influe sur la forme des impulsions de courant (plus ou moins amorties, voir Fig. 2), et joue un rôle important, trop grande (15 Ω dans le cas exposé plus haut) ou trop faible (3,3 Ω) elle fait disparaître l'excès d'énergie. Sa valeur doit être ajustée en fonction de l'ensemble des paramètres, tension, écartement des électrodes, capacité de décharge.

4.2 Précision des mesures

Les mesures électriques ne posent guère de problèmes, les valeurs sont connues à quelques % près, ce qui est négligeable compte tenu de la précision de 10 à 20 % dont nous nous contenterons dans cette étude qui a pour seul but de montrer l'existence du phénomène.

Il n'en est pas de même pour la mesure des variations de masse. Nous avons utilisé des balances (Kern ou Sartorius) d'une sensibilité de 0,1 g et comme l'excès d'évaporation est la différence de quatre mesures, le résultat est connu à 0,4 g près quand les calculs sont faits directement sur les valeurs des masses. La précision est nettement meilleure quand les calculs sont menés à partir des pentes des courbes qui sont évaluées à partir des droites de régression portant sur 5 à 10 minutes à raison d'une mesure par seconde, soit plusieurs centaines de mesures.

Mais une autre source d'erreur vient du principe même de l'expérience. En effet le signal que nous cherchons est la différence entre le flux d'évaporation hors décharges, nécessaire au maintien de l'ébullition et qui nous assure de la constance de la température, et le flux d'évaporation en présence de décharges. Il faut alors tenir compte des fluctuations du flux de référence dû au chauffage auxiliaire, hors décharges, liées à l'irrégularité de ce chauffage. Pour l'évaluer, nous avons relevé sur une longue durée ce flux d'évaporation dû au seul chauffage auxiliaire, Fig. 4.

On voit sur ce relevé que, si les écarts constatés d'une seconde à l'autre peuvent atteindre 0,2 g, les moyennes sur 600 s que nous utilisons dans nos calculs ne fluctuent que de 0,1 g, qu'il faut donc ajouter aux 0,4 g précédents et qui représentent la principale source d'erreur dans le calcul mené à partir des pentes des courbes.

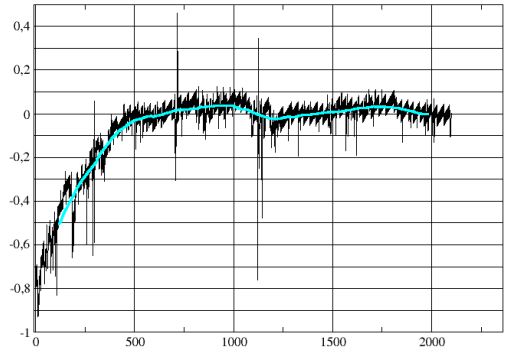

FIG. 4 – Ecart (en g) de la masse du récipient à la droite de régression prise sur la fin de la durée de mesure (au-delà de 700 s), en fonction du temps (en s) ; la courbe en noir représente la donnée brute des relevés toutes les secondes, et celle en bleu clair la moyenne glissante sur 240 s. La partie gauche correspond à la mise en température du récipient.

4.3 Nature de la vapeur qui s'échappe

Une dernière source d'erreur, systématique, et qui peut même remettre en cause l'interprétation des expériences, est à signaler.

Dans le calcul (voir Appendice) de l'excès d'énergie donné par la formule (1), la grandeur L désigne la différence d'enthalpie entre le fluide qui s'échappe du récipient et l'eau qui bout à l'intérieur. S'il n'y a que de l'eau à l'état gazeux qui sort, il s'agit bien de la chaleur latente d'évaporation (soit 2260 J/g), mais il peut arriver que la vapeur sortante soit "humide" c'est-à-dire un mélange de gaz et de gouttelettes d'eau. Dans ce cas la valeur de L est plus faible (l'enthalpie du mélange étant la somme pondérée par les proportions massiques des deux constituants si on néglige les problèmes de tension superficielle).

On peut contrôler expérimentalement cette situation en mesurant les flux d'évaporation pour différentes valeurs du chauffage ce qui permet de déterminer la valeur de L que l'on doit adopter dans les calculs. Si nous adoptons un chauffage auxiliaire suffisamment fort, alors on peut

s'assurer de l'absence de liquide dans le flux sortant en l'absence de décharges et la valeur de L est bien la chaleur latente d'évaporation de l'eau.

Mais on ne peut exclure que lors des décharges, les arcs électriques modifient la nature du flux d'évaporation en provoquant l'apparition de minuscules gouttelettes qui seraient ensuite entraînées dans le flux de vapeur. C'est ce qui a d'ailleurs été constaté dans certaines expériences [6], mais effectuées sur de l'eau à température ambiante, donc sans évaporation contrairement aux nôtres qui ont lieu à 100 °C.

Si nous adoptons néanmoins cette hypothèse, le flux sortant, contenant une certaine proportion d'eau à l'état liquide, a une enthalpie inférieure à celle du gaz, et la différence entre l'enthalpie du flux mesuré lors des décharges et celle de l'eau bouillante est inférieure à l'enthalpie de vaporisation (voir Appendice). Par exemple, dans la première expérience mentionnée, il suffit d'un taux de liquide dans le flux sortant de seulement 6% pour annuler l'excès d'énergie produit par la décharge. Ceci correspondrait à une production de liquide de 0,18 g/min. Or nous n'avons constaté lors de décharges près de la surface en eau froide (pour éviter l'évaporation) aucune variation de masse de l'eau sur plus de 5 minutes, à notre précision de 0,1 g près. Il semble donc que cette explication doive être abandonnée.

5 Perspectives

Nous n'avons actuellement aucune explication naturelle de la production d'énergie que nous avons constatée. En effet, dans ces expériences nous effectuons typiquement 7000 décharges d'une capacité de 60 nF chargée à 3000 V. Chaque tir apporte ainsi une énergie de 0,27 J et une charge de 0,18 mC et l'excès d'énergie mesuré est en général supérieur à 0,2 J/tir.

Il passe ainsi une charge de 1,26 C dans l'ensemble de l'expérience, soit 1,3 10^{-5} mole d'électrons. S'il s'agissait d'une réaction de type chimique, d'ordre de grandeur 100 kJ/mole le dégagement serait de 1,3 J soit mille fois inférieur à celui que nous mesurons, typiquement 1,4 kJ.

On sait par ailleurs [3, 8] que l'explosion d'un fil de titane dans un petit volume d'eau peut engendrer des transmutations, et nous avons également constaté [9] une augmentation significative du rapport deutérium/hydrogène de l'eau dans des conditions assez analogues. Il est donc tentant de chercher une explication du côté des réactions nucléaires,

bien que les tensions mises en jeu ici soient beaucoup trop faibles, et ne communiquent aux éléments en présence que des énergies de l'ordre de quelques keV.

Il faut aussi noter que nous avons essayé de détecter les rayonnements habituellement associés à ces réactions, neutrons ou photons gamma par exemple. Mais nous n'avons rien obtenu de significatif, compte tenu de la difficulté liée aux parasites électromagnétiques émis lors des décharges, qui perturbent le fonctionnement des détecteurs.

Il convient donc de considérer ces expériences comme de simples préliminaires qui devront être complétés par d'autres investigations.

Remerciements

Ce travail a pu être effectué grâce au soutien de M. J.-P. Oberti qui a accueilli gracieusement nos installations. Qu'il en soit chaleureusement remercié ici.

Références

[1] Lochak G., AFLB, **8** p. 345 (1983) ; AFLB **9** p. 5 (1984)
Lochak G., AFLB **39** p. 155 (2014)
[2] Lochak G., Stumpf H., *The leptonic magnetic monopole, theory and experiments*, Advances in imaging and electron physics, vol. 189, Academic Press, 2015
[3] Urutskoev L.I., Liksonov V.I., Tsinoev V.G., AFLB **27** p. 701 (2002)
[4] Daviau C., Fargue D., Priem D., Racineux G., AFLB **38** p. 139 (2013)
[5] Mizuno T., Ohmori T., Akimoto T., Takahashi A., Jpn. J. Appl. Phys. **39** p. 6055 (2000)
[6] Graneau P., Graneau N., Hathaway G., Hull R.L., J. plasma Phys. **63** p. 115 (2000)
[7] Fauvarque J.F., Clauzon P., Lallevé G. J-M., conférence ICCMS12, Yokohama 2005
[8] Kuznetsov V.D., Mishinsky G.V., Penkov F.M., Arbuzov V.I., Zhemenik V.I., AFLB **28** p. 173 (2003)
[9] de Lachèze-Murel G., Bon E., Daviau C., Fargue D., Karatchentdzeff M., Lochak G., Marizy A., Priem D., Racineux G., AFLB **41** p. 67 (2016)
[10] Fer F., *Thermodynamique macroscopique*, Gordon and Breach, Paris, 1970
[11] Fargue D., *Abrégé de thermodynamique*, Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 2004

Appendice : calcul de l'énergie excédentaire

Le premier principe pour un système ouvert s'écrit, en régime transitoire (voir par exemple [10, 11])

$$dU/dt = \sum \dot{m}_i h_i + \dot{W}_e + \dot{Q} + \dot{W}_n \tag{2}$$

U énergie interne du système, h_i enthalpie massique aux entrées/sorties, $\dot{W}_e$ puissances autres que celles dues à la pression (travail utile), $\dot{Q}$ chaleur échangée à travers la frontière par unité de temps (puissance de transfert calorifique), $\dot{W}_n$ puissance excédentaire (nouvelle, que nous cherchons).

Le système à considérer est le récipient contenant le liquide et la vapeur qui le surmonte, les débits massiques $\dot{m}_i$ se réduisent au flux de vaporisation $-\dot{m}_v$ (avec $\dot{m}_v > 0$) d'enthalpie massique h_v. $\dot{W}_e$ est la puissance électrique fournie par les alimentations, $\dot{Q}$ la puissance des fuites thermiques ($\dot{Q} < 0$).

Si on intègre entre le début (indice 0) et la fin de l'expérience (indice 1), on a, pratiquement,

$$U(\text{fin}) - U(\text{début}) = -m_{01} h_v + W_f + W_e + Q_{01} + W_n \tag{3}$$

Où W_f est l'énergie de chauffage permanente pour rester à 100°C, W_e celle fournie pour assurer la décharge, Q_{01} la quantité de chaleur correspondant aux fuites thermiques. M_0, M_1 désignent respectivement les masses de liquide initiale et finale et m_{01} la quantité totale d'évaporation mesurée, $M_0 = M_1 + m_{01}$. Dans ce cas, si u_0 et u_1 sont les énergies internes massiques au début et à la fin, on a

$$U(\text{fin}) - U(\text{début}) = M_1 u_1 - (M_1 + m_{01}) u_0 \tag{4}$$

et on obtient

$$W_n = M_1(u_1 - u_0) + m_{01} L - W_f - W_e - Q_{01} \tag{5}$$

où $L = h_v - u_0$ est la chaleur latente de vaporisation de la solution (en confondant l'énergie interne et l'enthalpie du liquide) lorsque le flux sortant est constitué uniquement de gaz.

On fait deux mesures, avec (état final 1) et sans décharge (état final 2) *en attendant le retour de l'eau à sa température (pratiquement seule variable d'état) initiale.* Dans ce cas la formule précédente se simplifie

$$W_n = m_{01} L - W_f - W_e - Q_{01} \tag{6}$$

La mesure sans décharge *et pendant la même durée*, donne (W_f est le même)

$$0 = m_{02}L - W_f - Q_{02} \tag{7}$$

Si on fait de plus l'hypothèse que les fuites thermiques sont pratiquement les mêmes $Q_{01} = Q_{02}$, on trouve en soustrayant

$$W_n = (m_{01} - m_{02})L - W_e \tag{8}$$

qui est l'excès d'énergie produite.

Dans le cas où la vapeur est humide c'est-à-dire quand une fraction massique X du flux sortant est sous forme liquide, la formule (5) devient

$$W_n = M_1(u_1 - u_0) + m_{01}L' - W_f - W_e - Q_{01} \tag{9}$$

avec $L' = (1 - X)(h_v - h_l)$, toujours en confondant enthalpie et énergie interne du liquide. L'excès d'énergie produite équation (8) devient alors

$$W_n = m_{01}L' - m_{02}L - W_e \tag{10}$$

En fait, les fuites thermiques augmentent lors des décharges avec l'agitation importante du milieu et on a $-Q_{01} > -Q_{02}$. L'excès W_n est en réalité

$$W_n = (m_{01} - m_{02})L - W_e + Q_{02} - Q_{01} > (m_{01} - m_{02})L - W_e \tag{11}$$

supérieur à la valeur précédente (8), que nous adopterons néanmoins par prudence.

Notons aussi qu'il faudrait en principe tenir compte des énergies cinétiques et de gravitation, mais il est facile de montrer par un calcul d'ordres de grandeur que leur influence est ici complètement négligeable.

(Manuscrit reçu le 17 mars 2018)