

JOURNAL INTERNATIONAL DE TECHNOLOGIE, DE L'INNOVATION,  
DE LA PHYSIQUE, DE L'ENERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

# **Observation par caméra rapide des spots cathodiques dans l'air au niveau du CID des éléments batterie lithium-ion**

A. Augéard, T. Singo, P. Desprez, M. Abbaoui



**ISSN : 2428-8500**

**DOI : 10.18145/jitipee.v1i1.62.g49**

## Observation par caméra rapide des spots cathodiques dans l'air au niveau du CID des éléments batterie lithium-ion

Amaury Augeard<sup>(1,2)</sup>, Tchapo Singo<sup>(2)</sup>, Philippe Desprez<sup>(2)</sup>, M'hammed Abbaoui<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Clermont Université, Université Blaise Pascal, EA 4646, LAEPT, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>(2)</sup> SAFT Direction de la Recherche, 111,113, boulevard Alfred Daney, 33074 Bordeaux Cedex, France  
amaury.augeard@saftbatteries.com

**Résumé** – *Les spots cathodiques qui constituent les racines de l'arc électrique ont fait l'objet d'études poussées dans le vide et ont été décrits de manière détaillée par Jüttner, Siemroth, Ellrodt, Elmir et Bochkarev. Les auteurs s'accordent à dire que pour un courant inférieur à 100 A, les spots formant un « cluster » peuvent s'élever au maximum au nombre de six. Avec les récents développements dans le domaine de l'imagerie rapide et notamment du mode EDR (Extreme Dynamic Range), l'observation des spots cathodiques a été rendue plus aisée. En effet, il est désormais possible d'observer l'apparition des spots cathodiques dans l'air lorsqu'un arc se produit à l'ouverture du CID (Current Interrupt Device) des éléments batterie lithium-ion. Les résultats obtenus lors de ces essais d'arc dans les batteries montrent que pour une tension batterie de 48 V et des courants allant jusqu'à 50 A, le nombre de spots observé est compris entre un et dix selon l'intensité du courant, ce qui tend à infirmer les résultats des études qui ont été menées jusqu'à présent. Contrairement à la divergence relative au nombre de spots, l'intensité transportée par chaque spot, quant à elle, est en adéquation avec les précédentes études, elle est comprise entre 5 et 10 A. Cette nouvelle étude ne confirme donc que partiellement les résultats des travaux réalisés au cours des trente dernières années relatifs aux spots cathodiques pour des courants inférieurs à 50 A. En effet, les résultats sont bien en adéquation avec ceux des précédentes études en deçà de 30 A, cependant ils divergent à partir de 50 A où il est possible d'observer jusqu'à 10 spots cathodiques.*

**Mots clés :** caméra rapide, spots cathodiques, CID, arc

**DOI :** [10.18145/jitipee.v1.i1.62.g49](http://dx.doi.org/10.18145/jitipee.v1.i1.62.g49)

### Introduction

Au sein des éléments batterie lithium-ion, un dispositif de protection appelé CID est utilisé afin de gérer les phénomènes de surcharge pouvant survenir. En effet, il agit en ouvrant le circuit de l'élément batterie lorsqu'une augmentation de pression interne se produit. Cette ouverture entraîne la création d'un arc électrique au niveau du CID. L'étude des spots cathodiques va permettre de mieux appréhender le comportement de l'arc électrique et de proposer une modélisation plus pertinente de ce dernier. Un bilan de la littérature scientifique

existante sur le spot cathodique a été réalisé, il montre qu'il n'existe pas d'études à ce jour concernant le spot cathodique dans l'air et que l'ensemble de ces études traite du spot cathodique dans le vide [1-8]. Le détail des recherches menées par les différents auteurs est résumé Tableau 1.

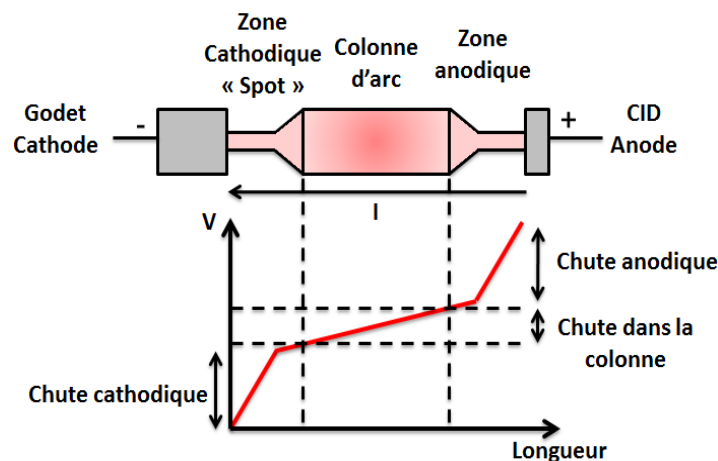
Année	Auteur	Tension V	Intensité A	Milieu	Nombre spots	Objectifs
1978	Jüttner	5-60 k	10-200	Vide ↓ Appareillages de coupe Refusion à l'arc Dépôt plasma Modèle	-	Données Modèle Spot
1995	Jüttner	5-13 k	90		2-5	Valider Modèle Ecton
1995	Siemroth	600	200-1400		10-70	Données Modèle Spot
1996	Ellrodt	-	30-300		2-6	Système Dépôt Plasma
1997	Jüttner	5-13 k	70		5-7	Données Modèle Spot
1998	Jüttner	5-13 k	70		1	Données Modèle Spot
2002	Elmir	26-34	1800-4300		10-24	Données Modèle Arc
2007	Bochkarev	15-20 k	10-100		1-2	Données Modèle Ecton

**Tableau 1.** Tableau synthétique des travaux de recherche menés sur le spot cathodique

La raison de limiter l'étude des spots au vide est liée à l'amélioration de la coupure du courant électrique au sein des appareillages de coupure (vide), d'une part et à la non interaction du milieu environnant avec l'arc, d'autre part. L'étude des phénomènes intervenant au voisinage du zéro de courant dans le plasma de l'arc dans le vide [9] tel que le spot cathodique était donc essentielle afin d'améliorer cette coupure, cela a permis de déterminer les paramètres favorisant l'extinction de l'arc. En reprenant ces idées clés, l'objectif final est ici de fournir des données pertinentes pour la modélisation de l'arc dans l'air et ce afin de proposer des solutions permettant de favoriser la coupure de l'arc électrique au sein des éléments batterie lithium-ion.

### 1. Le spot cathodique

L'arc électrique se crée par séparation de contacts, il se caractérise par une décharge à fort courant (> 1 A) sous quelque dizaines de volts. Une représentation de l'arc au niveau d'un élément batterie est donnée Figure 1.



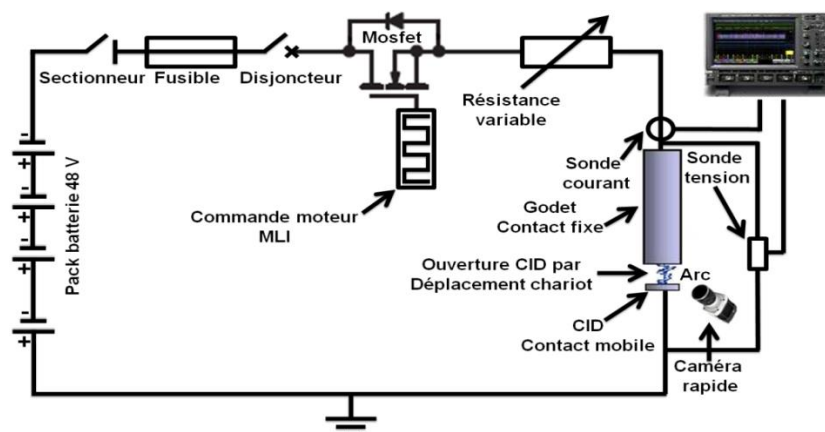
**Figure 1.** Représentation schématique de l'arc électrique au niveau d'un élément batterie.

Le spot cathodique relie la colonne d'arc à la cathode, il correspond à la racine de l'arc et est le lieu de forte densité de courant. Cela se traduit par l'apparition de cratères résultant de la fusion et l'évaporation du matériau constituant la cathode.

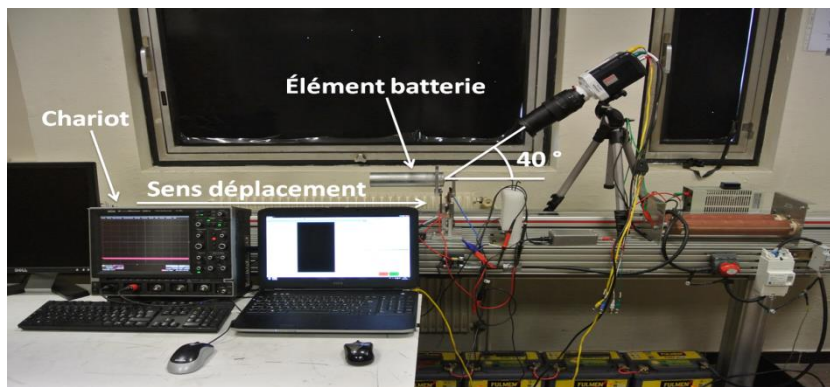
## 2. Expérimentation et résultats

### 2.1. Dispositif expérimental

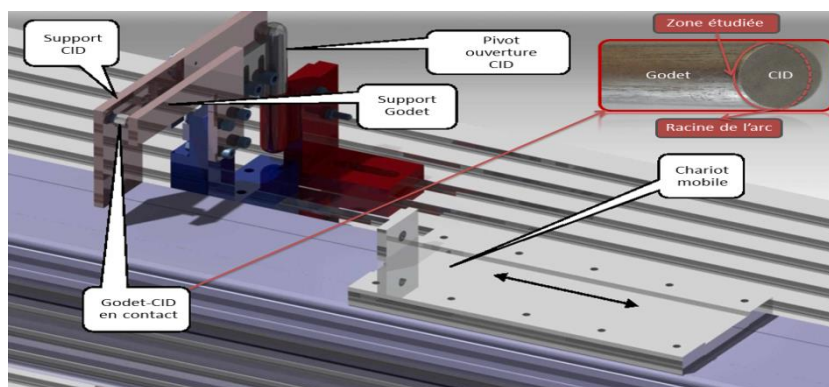
Afin d'observer le phénomène de spot cathodique qui a été brièvement présenté, un banc d'essai quasi-similaire à celui utilisé pour la détermination des chutes de tension anodique et cathodique en régime dynamique [10] a été utilisé. Des modifications mineures ont cependant été apportées au dispositif afin de pouvoir observer ces spots en question dans la gamme de courant souhaitée. Le banc d'essai ainsi utilisé est composé d'un pack batterie 48 V associé en série avec une résistance variable (dont l'inductance est négligeable) permettant d'obtenir une intensité de courant allant de 10 à 50 A. Cette résistance variable est composée de deux résistances variables associées en série (Psy Langlois, 0-3,3  $\Omega$ , 10 A et Coudoint, 0-35,2  $\Omega$ , 30 A). L'association de ces deux résistances est réglée successivement à 4,8  $\Omega$ ; 1,6  $\Omega$ ; et 0,96  $\Omega$  pour obtenir des intensités de courant respectives de 10, 30 et 50 A. Le circuit intègre également des organes de sécurité permettant de couper le circuit en cas de problème. L'ouverture des contacts est réalisée à l'aide du déplacement d'un chariot sur un axe linéaire à une vitesse de 1 m/s. Le Godet de l'élément batterie constituant la cathode est fixe. Le CID quant à lui est mobile, il constitue l'anode et est mis en mouvement par le chariot mobile, la distance inter-électrode n'est pas contrôlée de ce fait et cette distance augmente jusqu'à extinction de l'arc comme présenté (Figure 2c). Le courant et la tension d'arc sont mesurés durant l'ouverture du CID respectivement avec une sonde de courant (P01120043A, 100 kHz, 100 A) et une sonde de tension (PPE4kV, 400 MHz, 4 kV) couplées avec un oscilloscope numérique Lecroy WaveRunner 104Xi-A 1 GHz. La fréquence d'acquisition des signaux est ici fixée à 100 kHz (limitation sonde P01120043A), cette fréquence est suffisante pour réaliser les acquisitions et détecter d'éventuelles discontinuités sur les signaux. Une caméra rapide Phantom Miro M310 couplée à un objectif Nikon 28-300 mm permettant de zoomer sur la zone d'apparition des spots est utilisée, elle est dotée d'un temps d'exposition très court, d'un mode d'atténuation de lumière, ainsi que d'une résolution spatiale suffisante permettant d'observer les spots cathodiques en régime dynamique. La vitesse d'enregistrement est limitée à 650 000 images par seconde, ce qui ne permet donc pas de renseigner sur la durée de vie des fragments composant les spots qui se situe autour de la dizaine de nanosecondes. Elle permet cependant d'extraire plusieurs informations sur ces derniers qui seront présentées par la suite. Le dispositif expérimental est présenté Figure 2.



(a) Synoptique du dispositif expérimental.



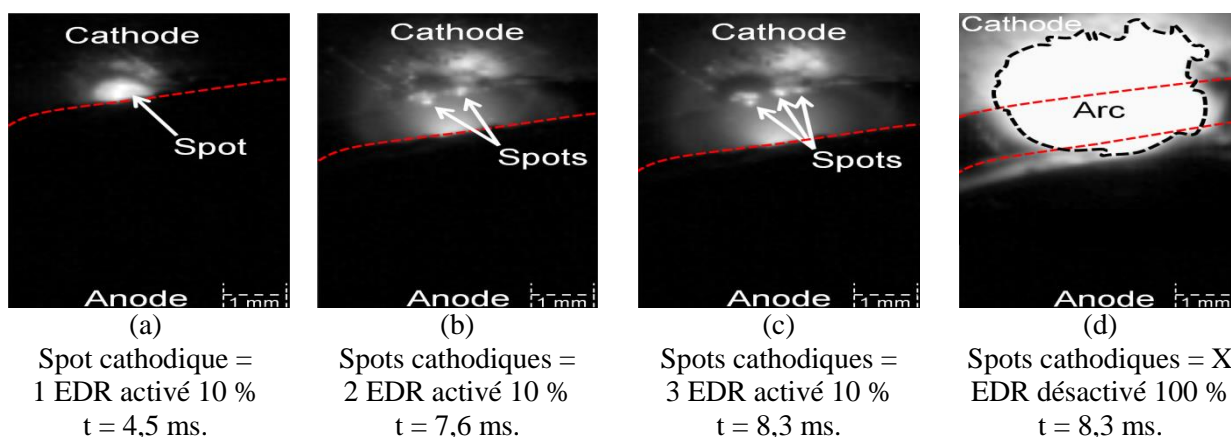
(b) Vue globale du dispositif expérimental.



(c) Agrandissement de la zone d'ouverture des contacts du dispositif expérimental.

**Figure 2.** Dispositif expérimental

L'étude des spots cathodiques sera limitée à une étude à pression atmosphérique dans l'air. Un exemple obtenu à partir du dispositif expérimental où trois spots sont observables est donné Figure 3. Il permet de se rendre compte au cours du temps de la division du spot initial (Figure 3a) en plusieurs spots (Figures 3b et 3c) mais également du fait qu'en l'absence d'EDR, la luminosité importante de l'arc rend impossible l'observation de ces derniers (Figure 3d).

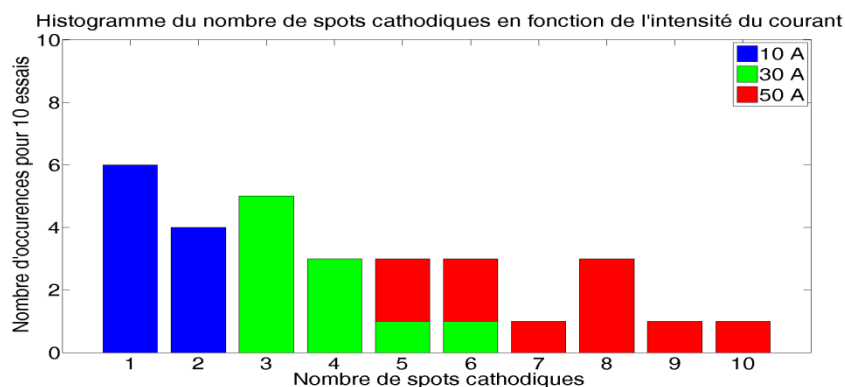


**Figure 3.** Évolution du nombre de spots cathodiques en fonction du temps observée à 160 000 images par seconde, temps d'exposition = 1  $\mu$ s, résolution = 64 x 128 dpi, I = 30 A.

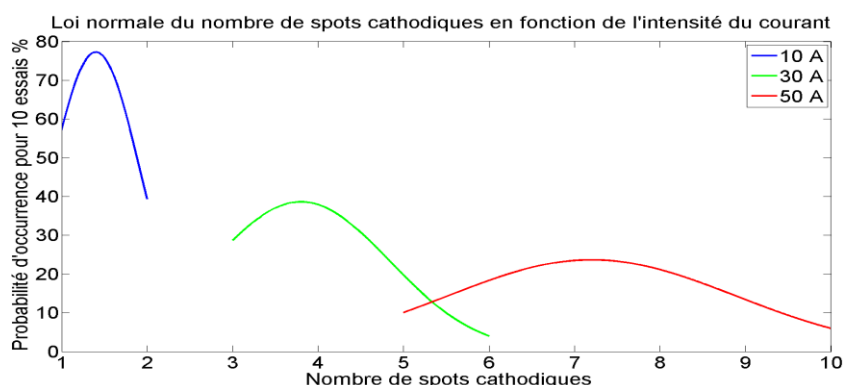
Dans la prochaine sous-partie, les résultats vont être présentés pour différentes intensités du courant, soit 10, 30 et 50 A. Ces essais vont permettre de se renseigner sur le nombre de spots cathodiques dans l'air ainsi que sur leurs différentes caractéristiques.

## 2.2. Résultats de l'expérimentation

Les résultats expérimentaux sont obtenus à partir des dix mesures réalisées sur des contacts à l'état neuf pour chaque mesure et pour chaque intensité du courant avec le pack batterie 48 V. Le choix de dix mesures n'est pas arbitraire, il résulte du coût élevé entraîné par la mise en place de ces tests destructifs pour l'ensemble Godet-CID. Ce qui rend difficile de conclure avec précision sur les résultats présentés Figure 4 du fait du faible nombre de mesures réalisées.



(a) Histogramme de la probabilité d'occurrence du nombre de spots cathodiques en fonction de l'intensité du courant

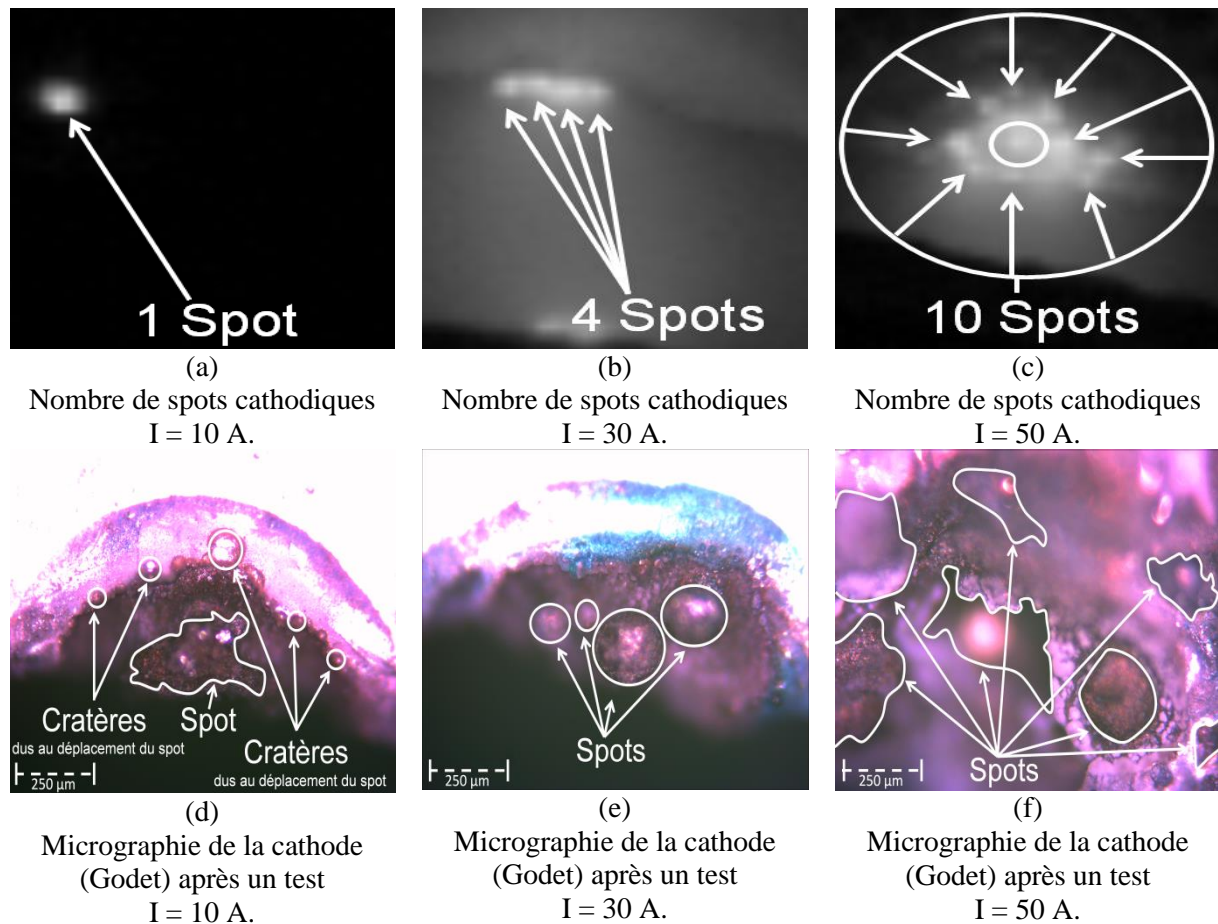


(b) Loi normale de la probabilité d'occurrence du nombre de spots cathodiques en fonction de l'intensité du courant

**Figure 4.** Probabilité d'occurrence du nombre de spots cathodiques en fonction de l'intensité du courant :  $I = 10$  A,  $I = 30$  A et  $I = 50$  A

L'historgramme présenté (Figure 4a) fait apparaître l'augmentation du nombre de spots avec l'intensité du courant, ce qui confirme les résultats de Siemroth et al. [3]. Pour une intensité de courant de 10 A, le pied d'arc est concentré, ce qui permet d'indiquer que le nombre de spots est plutôt proche de un. Au contraire, pour des intensités de 30 et 50 A, une dispersion des fragments apparaît, il est donc difficile d'estimer de manière précise le nombre réel de spots avec certitude. La densité de probabilité présentée (Figure 4b) permet d'estimer le nombre de manière plus précise, il semblerait que la moyenne du nombre de spots pour des intensités de 30 et 50 A est respectivement de quatre et sept. L'inconvénient de la loi normale

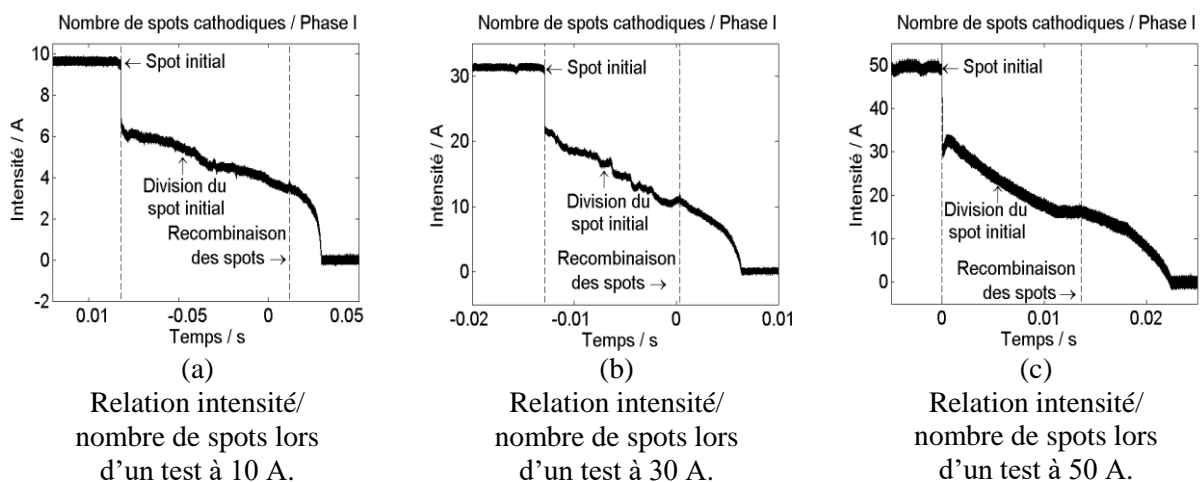
est qu'elle requiert un nombre de tests élevé pour être considérée comme vraie, ces résultats sont donc à considérer avec prudence étant donné que seulement dix essais ont été réalisés pour chaque intensité. Une autre caractéristique qui peut être tirée de ces essais est qu'un spot cathodique peut transporter une intensité comprise entre 5 et 10 A dans la gamme de courant [10-50 A]. La modification de la surface de la cathode a été observée à l'aide d'un microscope métallographique pour des intensités de courant de 10, 30 et 50 A et mis en corrélation avec les images des spots cathodiques observés par caméra rapide à 160 000 images par seconde. Pour cette étude rétrospective avec le microscope, le contact a été observé avant et après un seul arc sur des contacts neufs. Les résultats sont présentés Figure 5.



**Figure 5.** Corrélation entre le nombre de spots cathodiques observé par caméra rapide (160 000 im/s) et la modification de la surface de la cathode (grossissement x 10) lorsqu'un arc se produit.

Ces résultats mettent en lumière le fait qu'il est difficile de mettre en corrélation le nombre de spots observés à la caméra rapide avec les observations réalisées à l'aide du microscope métallographique. En effet, les spots se déplacent de manière désordonnée sur la surface de la cathode au cours de l'arc, ce qui laisse apparaître une multitude de cratères et rend difficile cette étude. A cela s'ajoute une fusion des différents spots en un seul et unique spot au cours de la fin de vie de l'arc. Cette phase s'accompagne d'une stabilisation du spot cathodique jusqu'à extinction de l'arc, ce qui entraîne l'apparition d'un cratère de taille importante. L'étude rétrospective de la cathode ne permet donc pas de déterminer avec certitudes le nombre de spots cathodiques pouvant exister simultanément, néanmoins, le couplage avec les observations réalisées par caméra rapide aide à en donner une évaluation. Dans le cas du test à 10 A, bien qu'il ait été observé à la caméra rapide et qu'il n'y eût qu'un seul spot (Figure 5a),

de nombreux cratères sont visibles (Figure 5d), cela indique que le spot s'est déplacé sur une surface importante. Un cratère de taille très importante comparée à la taille des autres cratères est visible (Figure 5d), ce qui confirme la présence d'un seul spot. La micrographie confirme donc les observations réalisées. En ce qui concerne le test à 30 A, l'étude rétrospective permet de visualiser deux spots de manière aisée du fait de la taille de leurs cratères respectifs très importants (Figure 5d). Deux autres spots sont également visibles, leur dimension est cependant très petite du fait de leur durée de vie très courte. Ces spots visibles à la caméra rapide ne subsistent pas durant toute la durée de l'arc. En effet, l'imagerie rapide montre une fusion des spots en deux étapes, le passage de quatre à deux spots puis de deux à un spot avant extinction de l'arc. Cette étude de la taille des spots permet donc de renseigner les différentes étapes du déroulement de l'arc. La micrographie à 50 A présentée Figure 5f ne permet pas d'afficher l'ensemble des cratères résultant des spots du fait de leur profondeur très variable ainsi que de la surface importante occupée par ces spots au cours de l'arc. Il apparaît que le nombre de spots est très important et les cratères de taille variable tout comme le cas à 30 A. Les cratères de dimension importante correspondent aux spots à la durée de vie longue et inversement. Étant donné le nombre important de spots, il est possible de faire un rapprochement entre l'arc dans le vide (mode diffus) et l'arc dans l'air au-delà d'un courant de 50 A. Il est difficile de corréler étude rétrospective et imagerie rapide. Une corrélation entre nombre de spots et intensité du courant au cours du temps a été réalisée, elle est donnée pour un essai correspondant à chaque intensité du courant Figure 6.



**Figure 6.** Corrélation entre le nombre de spots et l'intensité du courant au cours du temps.

Ces courbes présentent trois phases distinctes. Une première phase ultra rapide correspondant au courant de consigne où le spot initial apparaît et l'arc s'amorce. Lors de la décroissance du courant, une seconde phase (60 % de I de consigne) apparaît correspondant à une phase de division du spot initial en plusieurs spots, la raison de ces divisions n'est pas clairement établie à l'heure actuelle. Pour finir la dernière phase (30 % de I de consigne) correspond à une phase de recombinaison où les différents spots fusionnent afin de reformer un seul spot jusqu'à extinction de l'arc. Il est important de noter que le nombre de spots cathodiques est imposé par le courant de consigne et est indépendant du courant d'arc. Par ailleurs, il faut noter le décalage en temps entre l'ouverture des contacts et l'apparition du premier spot. Ce retard est de l'ordre de 250  $\mu$ s (moyenne de dix mesures), avec un écart type de 24  $\mu$ s pour I = 50 A. Un tel retard est d'autant plus grand que l'intensité du courant est faible. Cependant, il est difficile, à faible courant, de donner une estimation correcte car les résultats sont trop



dispersés (425  $\mu$ s en moyenne, avec un écart type de 388  $\mu$ s, I = 10 A). Ces résultats sont synthétisés dans le Tableau 2.

	Délai apparition spot 10 A (microsecondes)	Délai apparition spot 50 A (microsecondes)
Essai 1	955	231
Essai 2	190	250
Essai 3	142	240
Essai 4	858	271
Essai 5	3	247
Essai 6	22	208
Essai 7	907	255
Essai 8	202	219
Essai 9	731	287
Essai 10	242	258
Moyenne	425	246
Écart type	388	24

**Tableau 2.** Tableau présentant la moyenne et l'écart-type du décalage en temps entre l'ouverture des contacts et l'apparition du 1<sup>er</sup> spot pour chaque intensité.

### 3. Synthèse des résultats

Les résultats des différents auteurs en fonction de la gamme de tension et de courant d'alimentation ainsi que des conditions expérimentales sont résumés dans le Tableau 3.

Ces résultats montrent que le nombre de spots est fonction de l'intensité du courant, cela permet de déduire que l'intensité qui transite au travers d'un spot est comprise entre 5 et 10 A dans la gamme [10-50 A] d'après notre étude. Elle montre également que les résultats sont en désaccord avec les précédents travaux présentés dans la littérature dans le domaine des faibles courants dans le vide et qu'une déviation apparaît à partir de 50 A, comparé aux résultats de Bochkarev, Ellrodt et Jüttner. De ce fait, des mesures à forts courants seront nécessaires afin de vérifier si les résultats de la littérature à forts courants dans le vide sont applicables au cas de l'air ou si la dérive des résultats observée à 50 A au sein de cette étude persiste au-delà. Les observations réalisées par Siemroth et Elmir pourront servir de référence pour réaliser cette comparaison.

Auteur	Tension d'alimentation V	Intensité du courant A	Conditions expérimentales	Nombre de spots observé	Intensité transportée par spot A
<b>Bochkarev</b>	15-20 k (pulse)	10-50	Vide	1	10-50
<b>Ellrodt</b>	-	70-150	Vide	3	25-50
<b>Elmir</b>	26-34	1800-4300	Vide	10-24	75-185
<b>Jüttner</b>	5-13 k (pulse)	70	Vide	1	70
<b>Siemroth</b>	600	200-1400	Vide	10-70	20
<b>Augeard</b>	48	10	Air	1-2	5-10
<b>Augeard</b>	48	30	Air	3-6	5-10
<b>Augeard</b>	48	50	Air	5-10	5-10

**Tableau 3.** Tableau présentant la moyenne et l'écart-type du décalage en temps entre l'ouverture des contacts et l'apparition du premier spot pour chaque intensité.

## Conclusion

L'étude présentée a montré que l'intensité qui transite au travers d'un spot dans l'air pour des contacts en aluminium est comprise entre 5 et 10 A et ce jusqu'à des intensités de 50 A. Ces résultats montrent qu'il n'est pas possible d'appliquer les données de la littérature existante pour le vide. La donnée de l'intensité qui transite par spot servira pour réaliser un modèle d'interaction arc/cathode au niveau d'un élément batterie lithium-ion.

## Remerciements

Ce travail de thèse est supporté financièrement par l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT).

## Références

- [1] Jüttner, B. (1979), *Erosion Craters and Arc Cathode Spots in Vacuum*. Beitr. Plasmaphys., 19: 25–48. doi: 10.1002/ctpp.19790190104B.
- [2] B. Jüttner (1995), *The dynamics of arc cathode spots in vacuum*, J. Phys. D: Appl. Phys., 28: 516–522. doi:10.1088/0022-3727/28/3/011
- [3] P. Siemroth, T. Schulke, T. Witke (1995), *Microscopic high speed investigations of vacuum arc cathode spots*, IEEE Trans. Plasma Sci., 23: 919–925. doi: 10.1109/27.476476
- [4] Ellrodt, M. and Kühn, M. (1996), *Investigations of the Cathode Spot Dynamics in a Vacuum Arc Coating Process*. Contrib. Plasma Phys., 36: 687–696. doi: 10.1002/ctpp.2150360605
- [5] B. Jüttner (1997), *The dynamics of arc cathode spots in vacuum: new measurements*, J. Phys. D: Appl. Phys., 30: 221–229. doi:10.1088/0022-3727/30/2/009
- [6] B. Jüttner (1998), *The dynamics of arc cathode spots in vacuum. Part III: measurements with improved resolution and UV radiation*, J. Phys. D: Appl. Phys., 31: 1728–1736. doi:10.1088/0022-3727/31/14/017
- [7] H. Elmir, A. Jardy, J.P. Bellot, D. Lasalmonie, J. Senevat (2002), *Observation du comportement des spots cathodiques dans le procédé de refusion à l'arc sous vide*, Premier congrès interdisciplinaire sur les matériaux en France.
- [8] M.B. Bochkarev, V.B. Lebedev, G.G Feldman (2007), *Observation of vacuum arc cathode spot with high speed framing camera*, Proc. SPIE 6279, 27th International Congress on High-Speed Photography and Photonics, 62792E (January 11, 2007); doi:10.1117/12.725236
- [9] P. Picot (2000), *La coupure du courant électrique dans le vide*, Cahier Technique Schneider Electric, n° 198.
- [10] F. Perisse, M. Abbaoui, A. Lefort (2013), *Détermination des chutes de tension anodique et cathodique en régime dynamique*, XI<sup>ème</sup> Colloque sur les arcs électriques, Toulouse, France.