

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

Etudes expérimentale et numérique d'un arc électrique dans l'eau

Z. Laforest, J.-J. Gonzalez, P. Freton



ISSN : 2428-8500

DOI : 10.18145/jitipee.v3i2.139

Le sujet de cet article a été présenté oralement lors de la manifestation conjointe du colloque sur les arcs électriques et du workshop sur les arcs et contacts électriques (CAE-ACE) les 20 et 21 mars 2017 à Nancy (France).

L'article a fait l'objet d'une expertise indépendante par deux spécialistes du domaine.

Etudes expérimentale et numérique d'un arc électrique dans l'eau

Zoé Laforest ⁽¹⁾, Jean-Jacques Gonzalez ⁽¹⁾, Pierre Freton ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Université de Toulouse, UPS, CNRS, LAPLACE (Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie) 118 route de Narbonne F-31062 Toulouse, France
laforest@laplace.univ-tlse.fr

Résumé – *Les arcs électriques dans les liquides sont présents dans de nombreux procédés. Cependant, la problématique de la formation et de la dynamique de la phase gazeuse qui entoure l'arc n'est que très peu abordée dans la littérature. De plus, parmi les résultats existants, les analyses peuvent être différentes selon les énergies et les temps de décharge mis en jeu. Afin d'étudier le comportement et de mieux comprendre la dynamique de la bulle, un dispositif expérimental instrumenté et un modèle numérique sont proposés. Dans cette étude un courant AC de quelques kA est appliqué sur 10ms. Il existe un bon accord entre la taille de la bulle donnée par les résultats du modèle et les résultats expérimentaux. Pour une distance inter électrode de 3mm et une énergie appliquée de 1kJ la température dans la bulle à 2,5ms est estimée à 12kK.*

Mots clés : arc, bulle de gaz plasmagène, liquide, fil fusible, simulation sous Fluent, expérience
DOI : 10.18145/jitipee.v3i2.139

Introduction

L'histoire des arcs électriques dans les liquides commence avec les recherches du chimiste Humphry David sur l'eau [1], milieu dans lequel il a réussi à stabiliser un arc électrique. Ce dispositif n'a ensuite jamais cessé de se développer pour aboutir au XXe siècle à son utilisation dans différents systèmes et procédés. On peut citer notamment les disjoncteurs à bain [2] ou la fracturation électrique de roches souterraines par l'onde de pression générée par l'arc électrique pulsé [3]. Bien que ces applications utilisent des énergies et des temps de décharge différents, les observations de la littérature [1-5] s'accordent sur l'existence d'une bulle de gaz plasmagène. Les caractéristiques énergétiques et dynamiques de ces bulles ne sont que rarement étudiées dans la littérature. C'est dans l'intention de mieux comprendre la nature et le comportement de la bulle créée par la présence de l'arc électrique que sont proposés un dispositif expérimental et un modèle numérique.

Dans un premier temps, le matériel expérimental nécessaire à l'obtention des grandeurs électriques et à la caractérisation de la bulle sera décrit. Le modèle numérique ainsi que les hypothèses qui permettront d'établir les équations de conservation adaptées à notre

problématique seront ensuite présentées. Enfin, les résultats expérimentaux et numériques d'un cas seront analysés, de manière à dégager les principales tendances du comportement de la bulle de gaz et de les confronter avec celles de la littérature.

1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental comporte : l'alimentation électrique impulsionnelle, le réacteur contenant les électrodes immergées dans le liquide où se forme la décharge, et différents appareils de mesure.

L'alimentation est constituée d'un circuit RLC. Elle fonctionne en déchargeant les capacités au travers d'une inductance L sur une demi-onde de courant de 10ms dans l'arc. Elle est dimensionnée pour obtenir un courant de l'ordre de $\sim 100A$ à $12kA$ de valeur efficace. La résistance R correspond aux résistances parasites du circuit (bobines plus câbles). Plus de détails sur son fonctionnement sont donnés dans les travaux de Quémeneur [6].

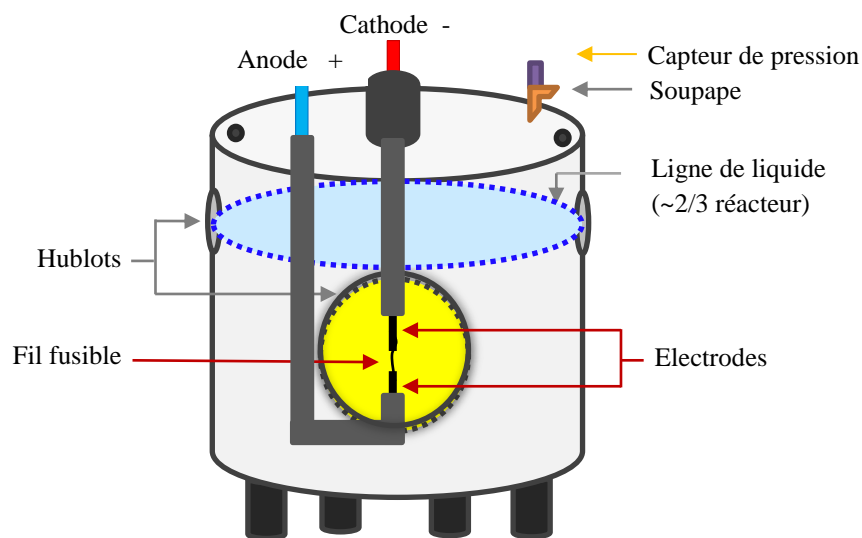


Figure 1. Le réacteur et ses principaux éléments.

La Figure 1 présente les principales composantes du réacteur utilisé. Il est de forme cylindre en aluminium et étanche. Ses parois ont une épaisseur moyenne de 3cm. La hauteur du liquide dans le réacteur est de 23cm et le diamètre intérieur de 23cm (9,5L). Une fois rempli, un espace d'air (représentant $\sim 1/3$ du volume du réacteur) est présent au-dessus du liquide. La pression de ce volume est suivie par un capteur piézo-résistif : Keller M5HB [7]. Pendant la décharge, le courant passe par deux électrodes planes en tungstène de diamètre 1,6 mm reliées initialement entre elles par un fil fusible de cuivre de diamètre $100\mu m$. La décharge peut être observée via deux hublots de 10cm de diamètre. Une caméra rapide est positionnée pour visualiser par ombroscopie la dynamique de la bulle créée. La caméra est une Photron SA5 avec 16Go de mémoire reliée à un PC et à une carte de commande pour la synchronisation. Une résolution de 512×456 pixels est choisie, pour une fréquence d'acquisition de 30000 images par seconde.

Les caractéristiques électriques obtenues sont : (a) la tension aux bornes du banc de puissance, (b) la tension aux bornes des électrodes et (c) le courant appliqué. La sonde de courant

employée est constituée d'une boucle de Rogowski adaptée pour des courants alternatifs ou pulsés. Les données électriques sont récupérées en fichier texte et traitées de manière automatique par un programme développé sous Matlab[®]. Enfin, il est possible de jouer sur certains paramètres comme : la distance inter électrode via un pas de vis millimétrique, la nature du milieu liquide, l'énergie injectée au système, ou la forme de l'onde de courant.

2. Présentation du modèle

Simultanément à l'étude expérimentale, l'outil numérique ANSYS Fluent v17.0 a été choisi pour simuler la création et l'évolution de cette bulle de gaz dans un environnement liquide. Certaines hypothèses sont nécessaires pour établir un modèle permettant de suivre simultanément les phases gazeuse et liquide. Le choix s'est porté sur le modèle multiphasique VOF (Volume of Fluids) associé au modèle de changement de phase liquide-gaz de Lee de par sa bonne conservation des quantités [8].

Nous donnons ici, les hypothèses et conditions principales utilisées pour la simulation :

- Géométrie : 2D axisymétrique.
- Initialement, le milieu est totalement liquide à 300K et à pression atmosphérique.
- Ecoulement laminaire en régime transitoire.
- Solveur basé sur la pression.
- Liquide compressible.
- Gaz compressible dont les propriétés sont issues des travaux de Křenek [9]
- Terme source : (Figure 2) quantité donnée par l'expérience, réparti sur un volume donné et rayonnement traité par la méthode du coefficient d'émission nette ε_N .

L'émission nette représente la différence entre la puissance rayonnée localement par unité de volume et par unité d'angle solide et celle absorbée durant la traversée du plasma. Le coefficient d'émission nette est obtenu par la superposition des coefficients d'émission des raies et du continuum. Les bases de calcul peuvent être trouvées dans la littérature [10].

La puissance est initialement répartie sur un cylindre de rayon 0,1mm dans l'espace inter-électrode, symbolisant l'existence du fil fusible. Cette puissance est ensuite appliquée sur le volume de la phase gazeuse V_{arc} où la température excède 7kK.

Le maillage est parallélépipédique dans l'espace inter électrodes et triangulaire à l'extérieur. Nous utilisons un maillage auto-adaptatif dans le temps fonction de la proportion de gaz et de liquide présente dans le volume concerné

Les équations mises en jeu sont décrites dans la partie du modèle VOF du guide de Fluent [8]. Les équations de conservation peuvent être écrites sous la forme généralisée [11] de l'équation (1) :

$$\frac{\delta \rho \phi}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \phi \vec{v}) = \nabla \cdot (\gamma_\phi \nabla \phi) + S_\phi \quad (1)$$

Grandeur conservée	ϕ	γ_ϕ	Terme source: S_ϕ	Eq.
Fraction volumique de la phase i (l=liquide et g = gaz)	α_i	0	$S_{Lee\ g} = r_g \alpha_g \rho_g \frac{T_{sat} - T_g}{T_{sat}}, \text{ si } T_g < T_{sat}$ $S_{Lee\ l} = r_l \alpha_l \rho_l \frac{T_l - T_{sat}}{T_{sat}}, \text{ si } T_l \geq T_{sat}$	(2)
Masse totale	1	0	0	(3)
Quantité de mouvement	\vec{u}	μ	$-\nabla P + \nabla[\mu(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F}_{css}$	(4)
Enthalpie	H	κ_{TH}	$\frac{P_{arc}}{V_{arc}} - 4\pi\epsilon_N(T) \frac{P}{P_{ref}}$	(5)

Tableau 1. Tableau représentant les différents termes pour les équations de conservation du modèle VOF associé à un modèle de changement de phase

Avec ϕ , la grandeur associée à l'équation de conservation concernée (exemples : masse, quantité de mouvement, énergie) ; γ_ϕ , le coefficient de diffusion, S_ϕ , le(s) terme(s) source(s) associé(s), ρ la masse volumique, \vec{v} le vecteur vitesse. Le Tableau 1 détaille ces différents paramètres suivant les équations. Avec α_i , ρ_i , T_i respectivement la fraction volumique, la masse volumique en kg.m^{-3} et la température en K du liquide ($i=l$) ou du gaz ($i=g$), \vec{u} le vecteur vitesse en m.s^{-1} , H l'enthalpie en J.kg^{-1} , μ la viscosité dynamique en $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$, κ_{TH} la conductivité thermique en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, P la pression en Pa, \vec{g} la constante de gravité en m.s^{-2} , \vec{F}_{css} la force de contrainte de surface continue en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-2}$ [8], P_{arc} la puissance de l'arc en W, V_{arc} le volume en m^3 de la phase gazeuse où la température excède 7kK, T_{sat} la température de saturation du fluide égale à 373,15K. $S_{Lee\ g}$ et $S_{Lee\ l}$ représentent les termes sources volumétriques en $\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$. Ces termes source contrôlent l'évaporation et la condensation, ils dépendent de r_l et r_g en s^{-1} qui sont respectivement pour le liquide et le gaz des coefficients de relaxation d'intensité du transfert de masse. La plage des valeurs prises par le coefficient d'intensité de transfert de masse r_i d'une phase i est très large dans la littérature, allant de 0,1 à 10^7 s^{-1} [12] [13]. Cependant, les températures mises en jeu dans les différents travaux restent proches de la température de saturation du liquide utilisé, contrairement aux températures attendues en présence d'un arc électrique ($T > 10\text{kK}$) [5]. Si les températures augmentent, ce coefficient doit favoriser un transfert de masse d'une phase liquide à gazeuse rapide. C'est pour cette raison que ce coefficient a été adapté par une fonction linéaire de la température, et d'autre part limité (10^6 s^{-1} pour 10kK) par rapport à la quantité maximale de phase que peut accueillir la cellule en un pas de temps donné ($\Delta t = 5.10^{-7} \text{ s}$). Le raisonnement est identique pour le cas d'une condensation, qui effectue un transfert de masse de la phase gazeuse à liquide. Le flux massique est estimé selon la proportion et la densité volumique de la phase liquide (ou gazeuse) à évaporer (ou à condenser) dans une cellule donnée. Les propriétés thermodynamiques et coefficients de transport sont issus de la littérature [8][9][10]. L'équation (2) est l'équation de la fraction volumique pour chaque phase. Le terme source associé apparaît si et seulement si la condition de température indiquée est respectée, sinon celui-ci est nul. L'équation (3) est l'équation de continuité basée sur le mélange des phases et n'a aucun terme source. La conservation de la quantité de mouvement est décrite par

l'équation (4). Elle fait intervenir la viscosité comme terme diffusif, ainsi que le gradient de pression, la gravité et enfin la force conservative de la tension de surface du modèle VOF [8]. Enfin l'équation de conservation de l'énergie (5) est décrite en fonction des pertes par rayonnement (proportionnelles à la pression) et du terme source de chauffage par effet Joule (fonction de la puissance expérimentale) dû à la présence de l'arc électrique.

3. Résultats

Un cas d'étude est présenté dans de l'eau pour une distance inter-électrode de 3mm et une énergie injectée de 1kJ sur 10ms environ. Les images obtenues expérimentalement, par la caméra montrent que la bulle de gaz suit une phase d'expansion et d'effondrement en passant par un rayon maximum. Ce phénomène a aussi été observé notamment par Slepian et al. [2] pour de l'huile, et plus récemment par Claverie et al. [4] sur des arcs pulsés dans l'eau. Dans le cas présenté le rayon maximum est de $3,7\text{cm} \pm 0,1\text{cm}$ à 10ms.

Les caractéristiques électriques de l'arc, tracées sur la Figure 2, permettent d'en déduire la puissance et l'énergie liées à la dynamique de la bulle représentée ici par la mesure de son rayon.

Aux premiers instants, la décharge se développe au niveau des électrodes principalement à cause des défauts de contact. Par effet Joule, les phases gazeuses se créent et se développent le long du fil fusible conducteur pour former le canal plasma et rentrer en coalescence. Le premier pic de la puissance représente l'amorçage de la décharge. Au-delà de 5ms environ, la puissance de l'arc décroît, mais la bulle continue de grossir, car elle est toujours alimentée en énergie. Lorsque l'énergie de l'arc n'est plus suffisante pour stabiliser la taille de la bulle son rayon, après avoir atteint son maximum, décroît. La bulle va donc se refroidir, et s'effondrer sur elle-même quelques millisecondes plus tard.

Afin d'obtenir des informations complémentaires sur cette bulle de gaz et son environnement liquide, la Figure 3 présente, à $t=2,5\text{ms}$, le type de résultats obtenus par la caméra rapide (a) et le modèle multiphasique numérique (b-c-d). L'image par caméra rapide montre le quart d'une bulle de gaz de forte intensité lumineuse de par la présence de l'arc électrique. Les bords du hublot du réacteur sont visibles autour de cette bulle. Le contraste de l'image permet de mesurer le rayon moyen de la bulle qui est de $1,5 \pm 0,8\text{cm}$. Le rayon trouvé en simulation peut aussi être estimé au même instant en examinant la répartition de la fraction volumique de gaz. En (c), la masse volumique du milieu est représentée : de couleur bleu pour l'eau liquide et en rouge pour le gaz. Pour cet instant $t=2,5\text{ms}$, le modèle numérique donne un rayon de bulle estimé à 1,8cm ce qui est proche de la valeur mesurée expérimentalement. Les résultats de simulation montrent que la bulle possède une température centrale de 12kK (b). Au niveau de l'interface le champ de température présente un fort gradient faisant chuter la température jusqu'à 300K en moins de deux millimètres. Cette température de 12kK correspond à l'ordre de grandeur obtenu pour les arcs pulsés [5]. A cet instant de 2,5ms la décharge présente une onde de pression statique inférieure à 0,46 bar (d) qui s'atténue rapidement à l'éloignement de la bulle.

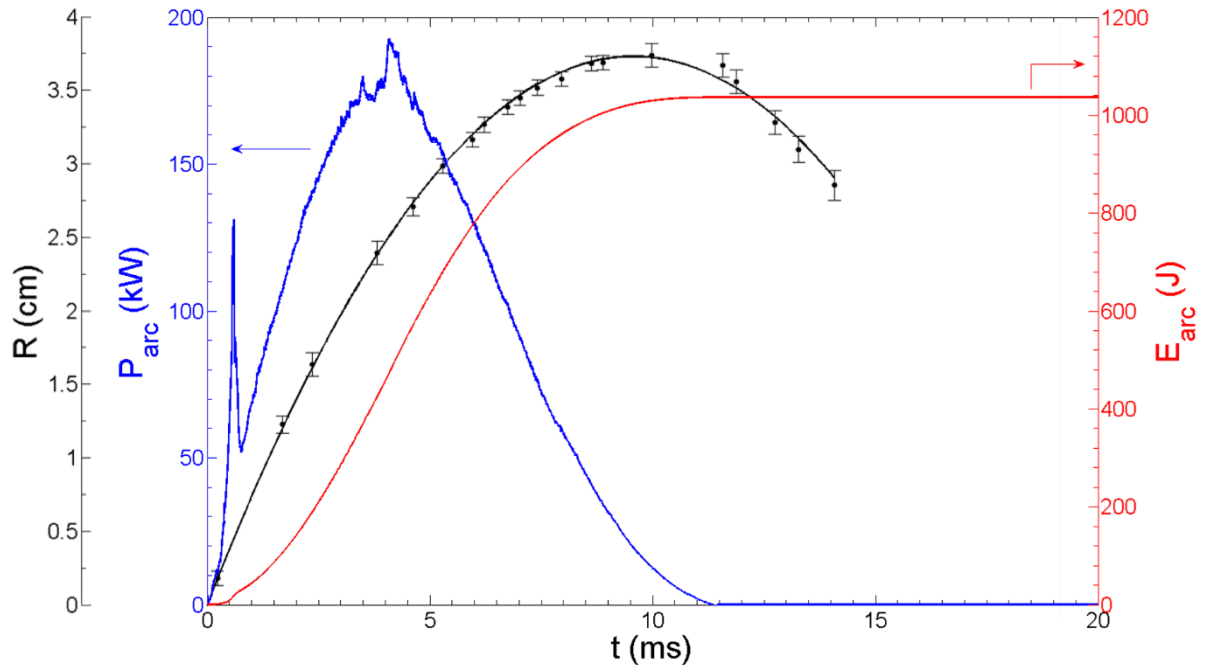


Figure 2. Rayon de la bulle et son approximation polynomiale du 2nd degré (en noir), puissance (en bleu) et énergie (en rouge) de l'arc électrique.

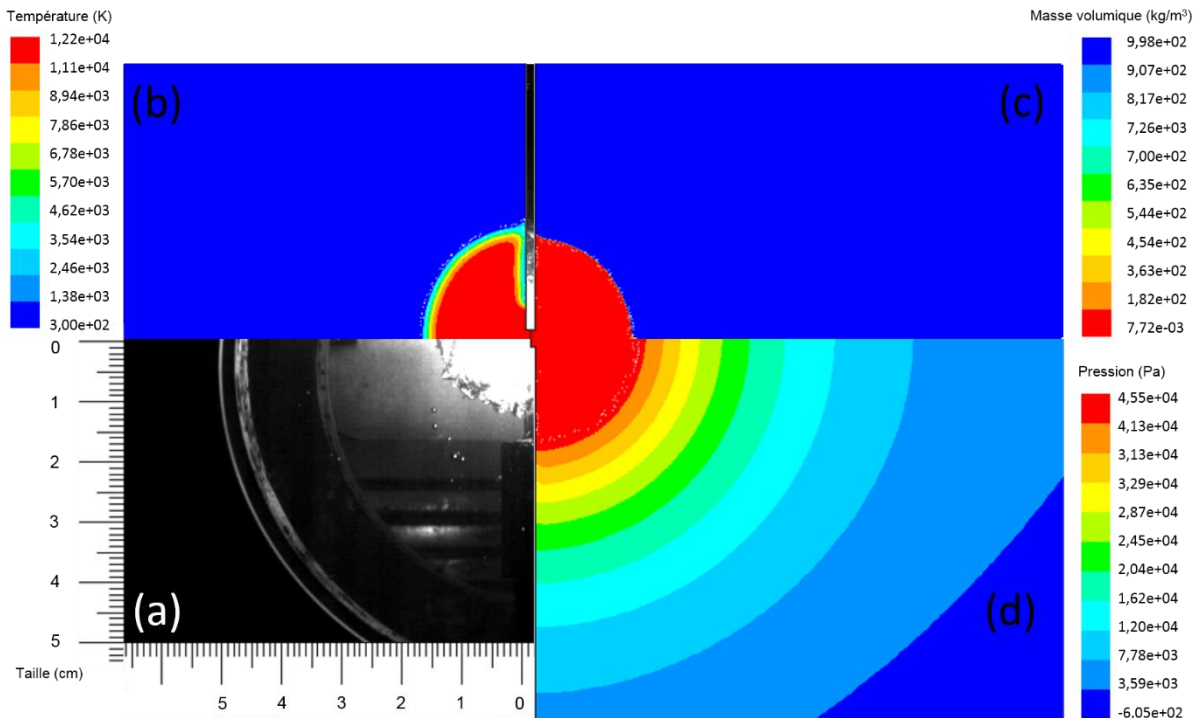


Figure 3. Exemple de confrontation expérimentale : taille de la bulle (a), et numérique : température (b), masse volumique (c), et pression statique (d) de la bulle de gaz contenant l'arc à 2,5ms.

Conclusion

Afin de mieux appréhender les mécanismes régissant le comportement d'une bulle de gaz plasmagène créée par le passage d'un courant dans un liquide, un réacteur et son instrumentation associée ont été mis en place. Dans le même temps un modèle numérique a été développé en se basant sur le modèle VOF de Fluent associé au modèle de changement de phase liquide-gaz de Lee. L'évolution de la bulle plasmagène décrite par le modèle est en bon accord avec les résultats expérimentaux. Cependant des améliorations doivent être amenées notamment sur l'optimisation du pas de temps de calcul et du raffinement du maillage avant de développer les modules de représentation de l'arc électrique : résolution du potentiel scalaire, détermination du champ magnétique auto induit ceci afin de s'affranchir d'une répartition homogène de la puissance sur un volume arbitraire.

Références

- [1] A.J. Hipperson, (1943), Under-water Arc Welding, American Welding Society-Welding Journal, 22.
- [2] J. Slepian and T.E. Browne, (1941) Photographic Study of A-C Arcs in Flowing Liquids, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 60 (8) : 823-828. Doi : 10.1109/EE.1941.6432336.
- [3] W. Chen, O. Maurel, C. LaBorderie, T. Reess, A. DeFerron, M. Matallah, G. Pijaudier-Cabot, A. Jacques, F. Rey-Bethbeder, (2014), Experimental and numerical study of shock wave propagation in water generated by pulsed arc electrohydraulic discharges, Heat Mass Transfer, 50 (5) : 673-684. Doi : 10.1007/s00231-013-1262-4.
- [4] A. Claverie, J. Deroy, M. Boustie, G. Avrillaud, A. Chuvatin, E. Mazanchenki, G. Demol, B. Dramane, (2014), Experimental characterization of plasma formation and shockwave propagation induced by high power pulsed underwater electrical discharge, Review Of Scientific Instruments, 85 : 063701. Doi : 10.1063/1.4879715 .
- [5] B.R. Locke, M. Sato, P. Sunka, M.R. Haffman, J.-S. Chang, (2006), Electrohydraulic Discharge and Nonthermal Plasma for Water Treatment, Industrial&Engineering Chemistry Research, 45 (3) : 882-905. Doi : 10.1021/ie050981u .
- [6] J. Quéméneur, (2016), Etude des forces à l'origine du déplacement d'un arc électrique dans un disjoncteur basse-tension, Université de Toulouse 3 Paul Sabatier, Toulouse.
- [7] Keller, Ultra-Fast and Precise Pressure Transmitters Series M5HB, <http://www.kelleramerica.com>.
- [8] Ansys Inc. PDF Documentation, Release 15.0, (2013), <http://148.204.81.206/Ansys/readme.html>.
- [9] P. Křenek, (2008), Thermophysical Properties of H₂O–Ar Plasmas at Temperatures 400-50,000K and Pressure 0.1 MPa, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 28 (1) : 107-122. Doi : 10.1007/s11090-007-9113-z.
- [10] Riad H., Gonzalez J.J., Gleizes A., (1995), Net Emission Coefficient for thermal plasmas in H₂, O₂, C, H₂O, CF₄ and CH₄, 12th International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC-12), Minneapolis USA, 21-25 August, 1995, 1731-1736, <http://www.ispc-conference.org/ispcdocs/ispc12/ispc12.htm>.

- [11] Freton P., (2002), Etude d'un arc de découpe par plasma d'oxygène, Modélisation – expérience, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- [12] De Schepper S.C.K., Heynderickx G.J., Marin G.B., (2009), Modeling the evaporation of a hydrocarbon feedstock in the convection section of a steam cracker, *Computers and Chemical Engineering*, 33 (1): 122-132. Doi : 10.1016/j.compchemeng.2008.07.013
- [13] Lee H., Won Y., Houshmand F., Gorle C., Asheghi M., Goodson K. E., (2015), Computational Modeling of Extreme Heat Flux Microcooler for GaN-Based HEMT, ASME. International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition, Volume 2: Advanced Electronics and Photonics, Packaging Materials and Processing; Advanced Electronics and Photonics: Packaging, Interconnect and Reliability; Fundamentals of Thermal and Fluid Transport in Nano, Micro, and Mini Scales. Doi : 10.1115/IPACK2015-48670.