



**HAL**  
open science

# Évaluation de la surpression générée par l'explosion électrique des protections foudre

Audrey Bigand, Jean-Marc Bauchire, Christine Espinosa, Hervé Rabat

► **To cite this version:**

Audrey Bigand, Jean-Marc Bauchire, Christine Espinosa, Hervé Rabat. Évaluation de la surpression générée par l'explosion électrique des protections foudre. XIV Colloque sur les Arcs Electriques (CAE XIV), Mar 2019, Bourges, France. , pp.1-1, 2019. hal-02159392

**HAL Id: hal-02159392**

**<https://hal.science/hal-02159392>**

Submitted on 18 Jun 2019

**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.



## Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of some Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author's version published in: <https://oatao.univ-toulouse.fr/23470>

**Official URL:** <https://cae2019.sciencesconf.org/249667/document>

### To cite this version :

Bigand, Audrey and Bauchire, Jean-Marc and Espinosa, Christine and Rabat, Hervé Évaluation de la surpression générée par l'explosion électrique des protections foudre. (2018) In: 22th International Conference on Gas Discharges and Their Applications, 2 September 2018 - 7 September 2018 (Novi Sad, Serbia)

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator:

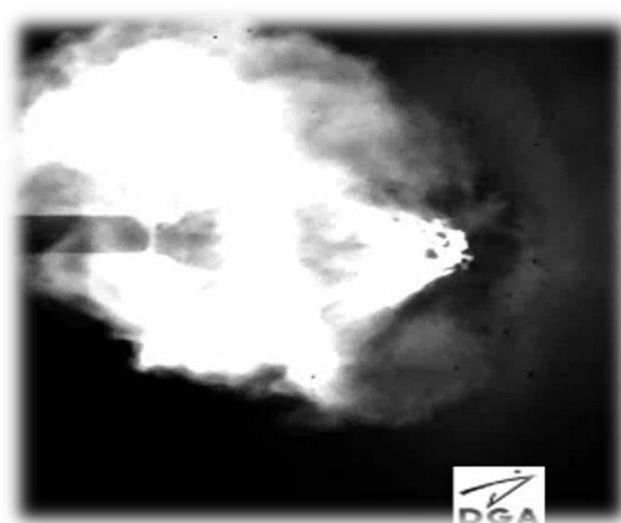
[tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr](mailto:tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr)

# ÉVALUATION DE LA SURPRESSION GÉNÉRÉE PAR L'EXPLOSION ÉLECTRIQUE DES PROTECTIONS Foudre

A.BIGAND<sup>1,2</sup>, J.M. BAUCHIRE<sup>2</sup>, C. ESPINOSA<sup>1</sup>, H. RABAT<sup>2</sup>

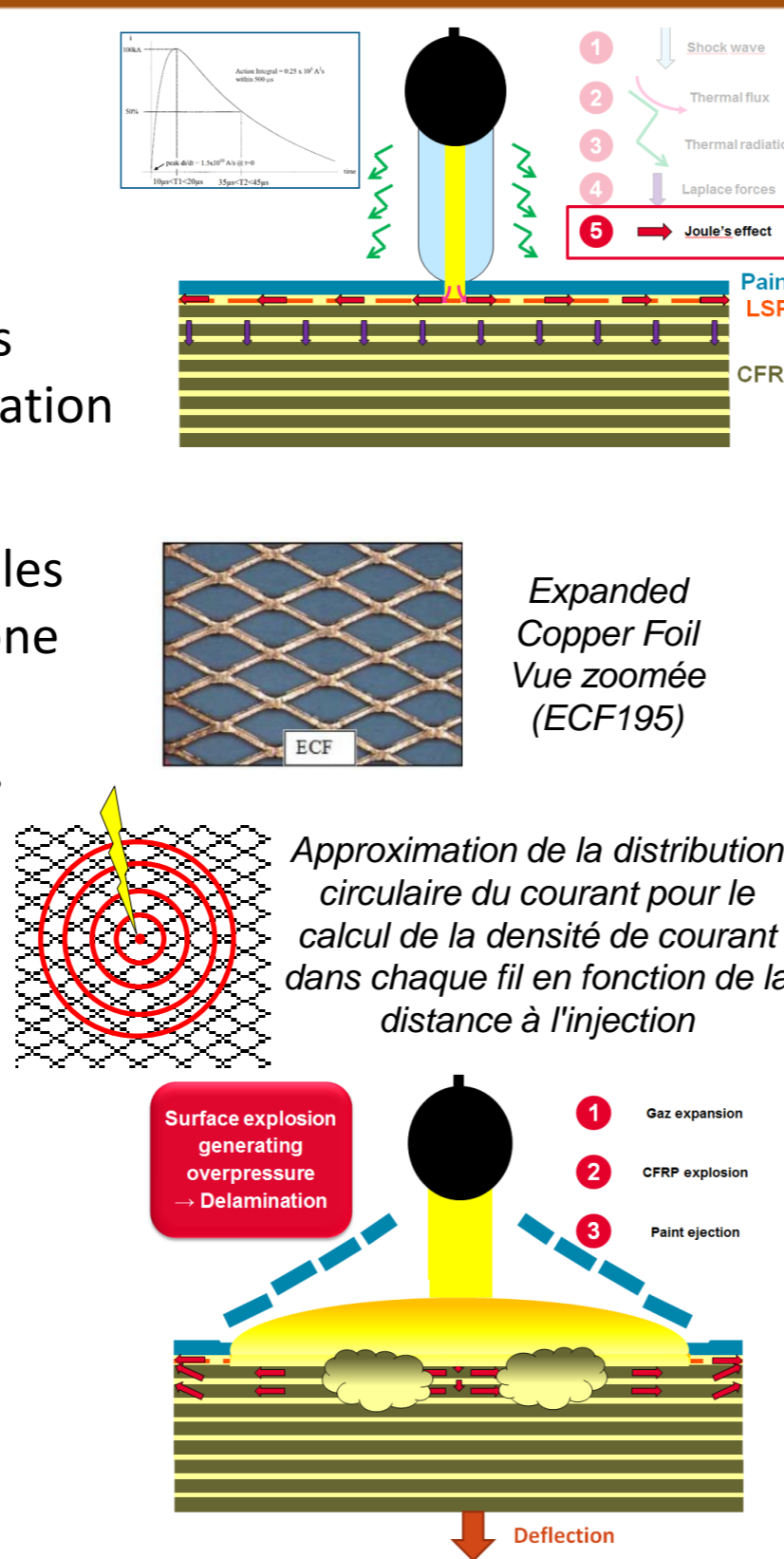
<sup>1</sup> Institut Clément Ader, UMR 5312, CNRS-University of Toulouse, 3, rue Caroline Aigle, F-31400 Toulouse CEDEX 04

<sup>2</sup> GREMI, UMR 7344, CNRS-University of Orleans, 14 rue d'Issoudun, BP 6744, 45067 Orleans Cedex 2



## INTRODUCTION

- Les avions, pouvant être frappés par la foudre durant leur vol, subissent un endommagement des structures en carbone dont le mécanisme est un phénomène multi-physique complexe. L'un des principaux contributeurs est la surpression générée par la vaporisation rapide de la protection métallique lors d'un coup foudre.
- Cette protection, qui est souvent un maillage de cuivre, recouvre les surfaces composites de l'avion afin de dériver le courant du carbone et limiter le dommage. Malgré tout, elle explose en quelques  $\mu s$  sous l'action du courant de foudre dû au chauffage par effet Joule.
- Assimilée à un réseau de fil, la protection pourra être considérée comme un réseau de sources de surpression dépendantes de la densité de courant évaluée comme suit :  $J_n = I_n/S$  avec  $I_n = I/4+8n$  S : section du fil et n : Itération d'une injection circulaire.
- Le but de l'étude est de valider un modèle de surpression liée à l'explosion de la protection foudre à partir de mesure d'onde de choc en laboratoire et de modèles d'explosion électrique.
- A partir de cette distribution spatio-temporelle de pressions, on pourra comparer avec les déformations de panneaux composites obtenues lors d'essais foudre en laboratoire

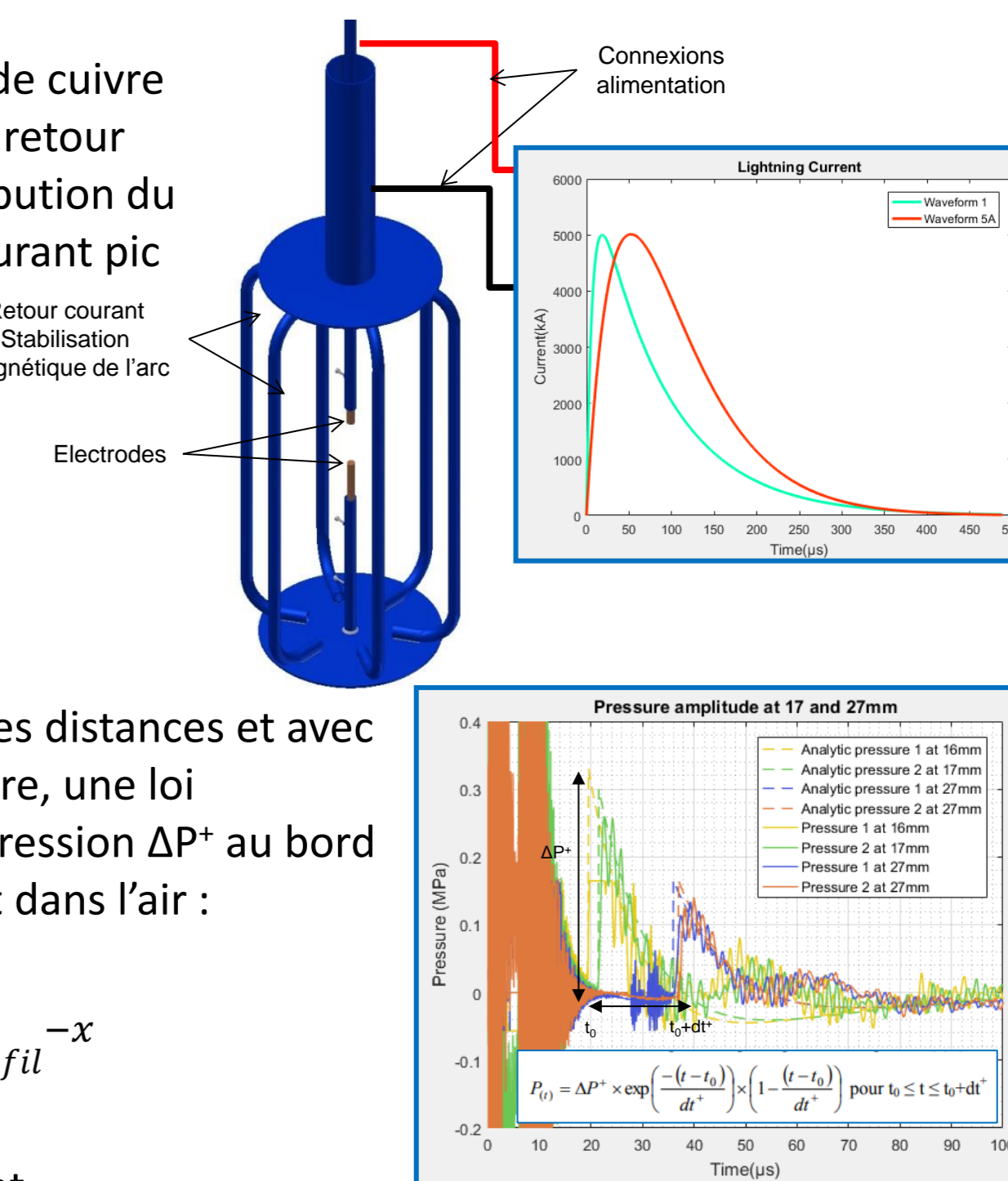


## ESSAI

- Pour étudier le profil de vaporisation, un fil de cuivre de 40  $\mu m$  est connecté entre 2 électrodes à retour coaxial pour assurer l'homogénéité de distribution du courant d'une forme d'onde type foudre (courant pic atteint en quelques  $\mu s$ ).
- Plusieurs mesures ont été mises en place :
  - Courant & Tension.
  - Photos de la vaporisation.
  - Pression à différentes distances du fil (10, 17, 27, 39 & 86mm).
- A partir des mesures de pression à différentes distances et avec différentes amplitudes et forme d'onde foudre, une loi expérimentale a été créée afin d'obtenir la pression  $\Delta P^+$  au bord du fil en prenant en compte l'amortissement dans l'air :

$$P_{fil} = P(r_{fil}) = A(\Delta P^+) \times r_{fil}^{-x}$$

A et x ont été déterminés expérimentalement.



## MODELE ANALYTIQUE

### PRINCIPE :

- Afin de prédire l'onde de choc générée par l'explosion électrique du cuivre, une équation d'état modifiée (QEOS) est couplée au calcul de l'augmentation de température dans le fil par chauffage Joule.
- Pour rappel, le chauffage joule est évalué par une relation de conservation de l'énergie simplifiée :

$$mC_p dT = P dt$$

m: masse  
P: Puissance ( $Ri^2$ )  
T: Température  
t: Temps

- La QEOS développée par Chung [1] permet de relier la pression et l'énergie à la masse volumique et la température :

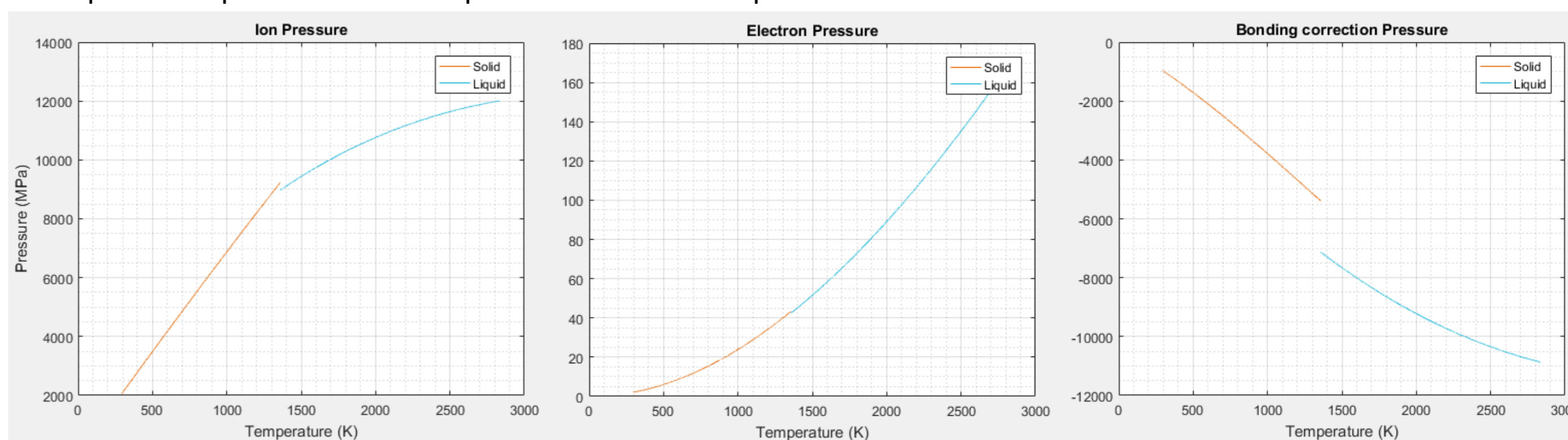
$$\begin{aligned} \varepsilon(\rho, T) &= \varepsilon_s(\rho, T) + \varepsilon_e(\rho, T) + \varepsilon_c(\rho, T) \\ p(\rho, T) &= p_s(\rho, T) + p_e(\rho, T) + p_c(\rho, T) \end{aligned}$$

- La pression et l'énergie sont donc décomposées par 3 contributeurs :

$$\begin{aligned} \text{Les ions : } p_i(\rho, T) &= \begin{cases} 3\gamma_s \frac{\rho k_B T}{m_i} & T < T_m(\rho) \\ \frac{\rho k_B T}{m_i} \left[ 1 + \gamma_f \left( \frac{T_m(\rho)}{T} \right)^{1/3} \right] & T \geq T_m(\rho) \end{cases} \\ \text{Les électrons : } p_e(\rho, T) &= \frac{\rho r^2}{g_e \beta(\rho)} \ln \cosh \left( \frac{g_e \beta(\rho) T}{r} \right) \\ \text{La correction de liaison à 0 K : } p_c(\rho) &= \rho_0 E_{coh} \frac{mn}{m-n} \left[ (\rho/\rho_0)^{m+1} - (\rho/\rho_0)^{n+1} \right] \end{aligned}$$

### RESULTATS :

- Les sondes de tension utilisées n'ayant pas tenu face aux tensions générées par le passage à l'arc, la puissance a été calculée en considérant  $Ri^2$  et non UI.
- La résistance évoluant avec la température, ainsi que la chaleur spécifique et la masse volumique, des modèles de ces différentes grandeurs dépendantes de la température ont été définis sur les différents états du cuivre avant le passage au plasma : solide, solide/liquide, liquide et liquide/vapeur.
- Les pressions provenant de chaque contribution sont présentées ci-dessous :



- Ces contributions de ne sont pas satisfaisantes car elles ne prennent pas en compte la dépendance de la masse volumique avec la pression et la température. Pour cela, il va falloir introduire des équations de MHD (Magnéto-Hydro-Dynamique). Cela permettra d'obtenir une pression totale au moment de la transition liquide-vapeur.

[1] Chung et al. « Numerical Model for Electrical Explosion of Copper Wires in Water ». *Journal of Applied Physics* 120, n° 20 (28 novembre 2016)

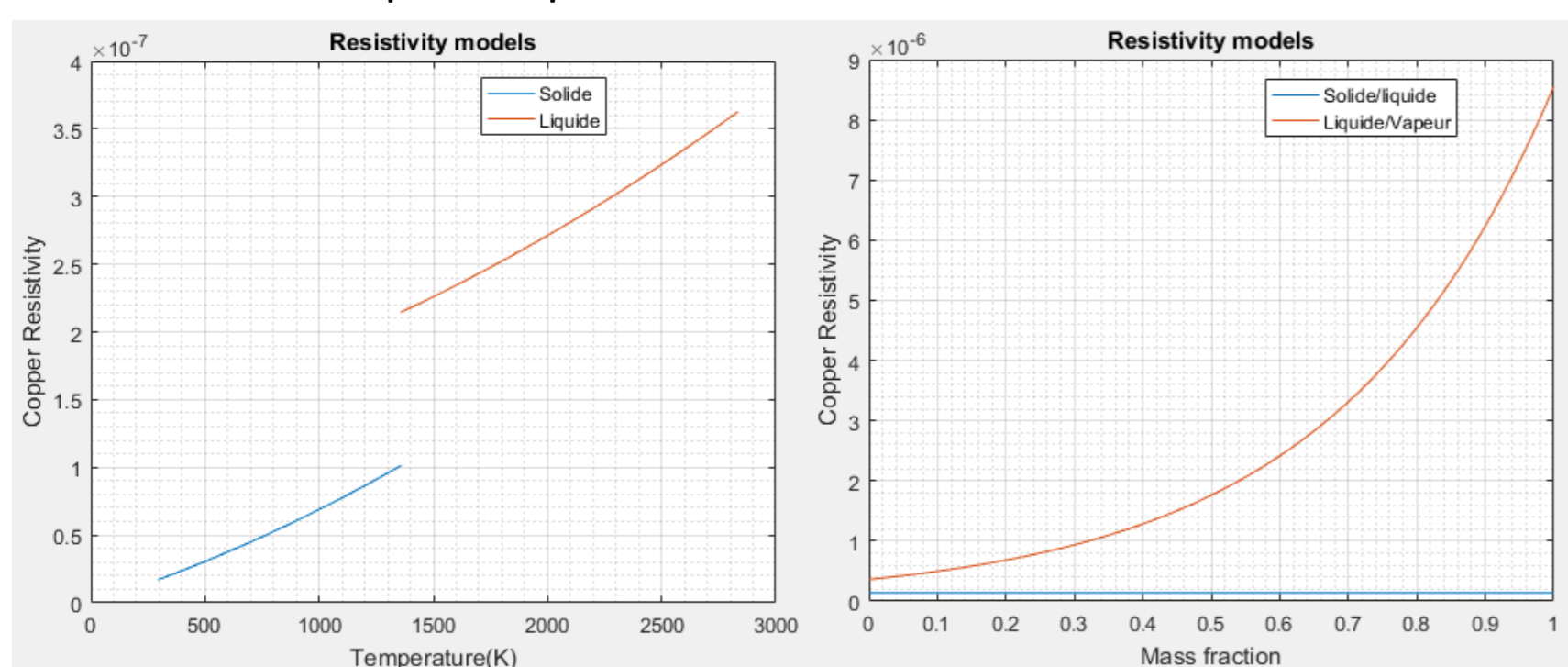
## MODELE PHENOMENOLOGIQUE

### PRINCIPE :

- Afin de prédire l'onde de choc générée par l'explosion électrique du cuivre, un modèle phénoménologique développé par Krasik [2] a aussi été considéré.
- Ce modèle permet de relier de manière linéaire le pic de pression  $p_{max}$  au paramètre  $\Pi$  :

$$\Pi = \sqrt{\rho_0 / l_w} (dP/dt)_{max}$$

- Avec  $\rho_0$  : la masse volumique initiale du fil,  $l_w$  : la longueur du fil et P : la puissance électrique déposée dans le fil.
- Encore une fois, la puissance est calculée par la produit  $Ri^2$  et non UI.
- Les modèles de résistance électrique du cuivre sur ces différents états ont donc un impact important sur l'évaluation de  $\Pi$ .

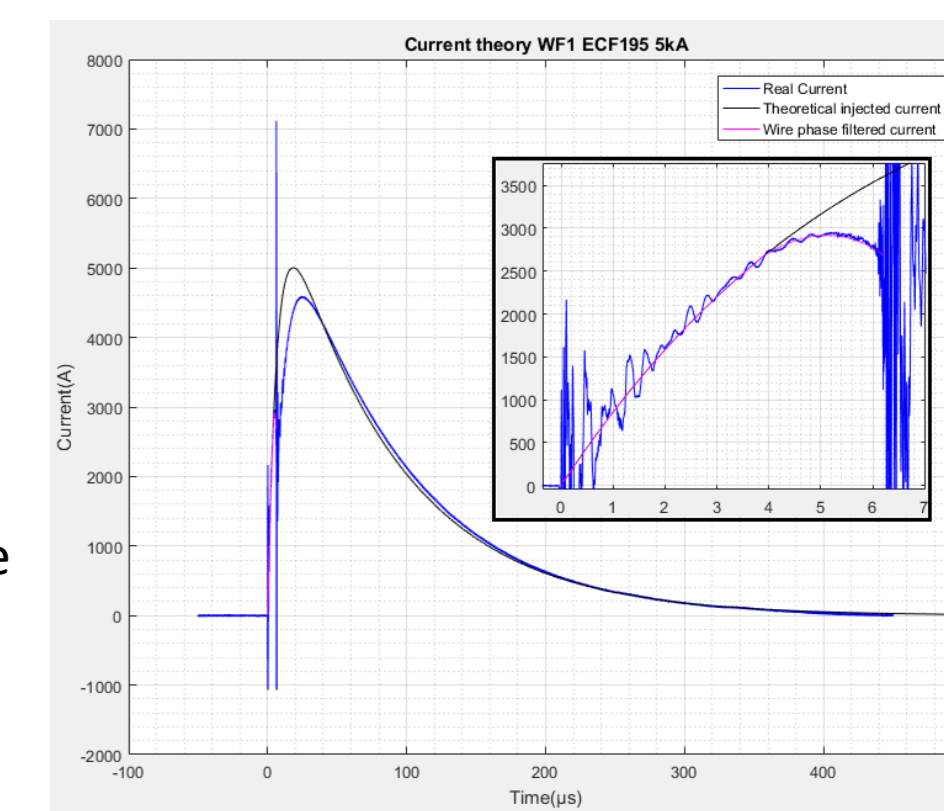


### RESULTATS :

- A partir du modèle d'amortissement de l'onde de choc dans l'air, on peut remonter à la pression du fil
- Cette pression est comparée au  $p_{max} = \alpha \Pi$  obtenu par simulation Matlab®.
- Le coefficient  $\alpha$  a été fixé à partir des mesures sur ECF195 avec WF1 à 5kA qui est notre référence.
- On peut voir que cette méthode présente des différences importantes avec les mesures.

Waveform	Amplitude (kA)	$\Delta t$ vaporisation ( $\mu s$ ) Test Detachment	$\Delta t$ vaporisation ( $\mu s$ ) Test Disruption	Pressure (Mpa) 5mm	Pressure (Mpa) 10mm	Pressure (Mpa) 17mm	Pressure (Mpa) 27mm	Pressure (Mpa) 39mm	Pressure (Mpa) 86mm	Matlab Pressure	$\Delta t$ Pressure	Matlab $T_{liq}$	Matlab $T_{vap}$	$\Delta t$ $T_{liq}$	$\Delta t$ $T_{vap}$	
ECF195	WF1	10	3.70	3.93			369	443	401	623	54%	2.99	3.30	-19%	-16%	
	WF1	5	4.00	6.20			244,52 = Référence			245	0%	5.00	5.70	25%	-8%	
	WF5A	10	5.50	7.65			304	308	332	310	322	3%	5.00	5.70	25%	-8%
	WF5A	5	7.00	12.20			222	222	194	263	131	-42%	10.76	12.02	54%	-19%
ECF73	WF1	10	1.69	1.75			306	182	136	150	907	369%	1.38	1.51	-18%	-14%
	WF1	5	1.90	2.82					120	179	389	161%	2.29	2.56	20%	-9%
	WF1	5	2.70	2.80	112	102	118	148		536	347%	2.26	2.49	-16%	-11%	
WF5A	5	3.50	6.27					53	94	145	97%	5.18	5.75	48%	-8%	

- Un point important à explorer est lié au passage à l'état vapeur qui est obtenu plus rapidement lors des calculs que lors de l'essai. Même si cette différence ne semble pas importante, elle fait pourtant manquer le phénomène d'abatement du courant avant le passage à l'arc qui est le témoin d'une très importante augmentation de la résistance du fil.
- En effet, juste avant le passage à l'arc, on peut observer un détachement du courant réel injecté par rapport au courant théorique attendu. Ce passage est interprété comme le point de changement de phase à l'état liquide.



[2] Krasik et al. « Underwater Electrical Wire Explosion ». *Plasma Sources Science and Technology* 19, n° 3 (1 juin 2010)

## CONCLUSION

- L'essai développé nous permet de remonter à la pression du fil lors de la création de l'onde de choc. C'est-à-dire, lors du passage à l'arc.
- Les 2 modèles étudiés sont prometteurs car ils peuvent permettre de valider un modèle de pression encadré par 2 approches indépendantes.
- Malgré tout, la dépendance de ces modèles aux propriétés physiques du métal comme sa conductivité électrique et sa masse volumique nécessite de plus amples investigations.
- Enfin, l'introduction d'équations de MHD dans le modèle actuel semble nécessaire pour prédire l'augmentation de pression dans le fil lors de ces différents changements d'état.
- Cette activité s'inscrit dans le cadre d'une thèse visant à prédire les dommages dans la structure composite à cause de la foudre, supervisés par l'ICA & le GREMI et soutenus par un projet français de recherche: EDIFISS avec Airbus.