

Étude numérique de l'endommagement induit par un arc électrique de défaut

M.C. Henao Peñaranda^{1,2}, C. Rond¹, P. Longère¹, M. Malatesta²

¹ Université de Toulouse, IMT Mines Albi, INSA Toulouse, ISAE-SUPAERO, CNRS Toulouse, Institut Clément Ader, Toulouse, France
rond@insa-toulouse.fr, patrice.longere@isae-superaero.fr

² AIRBUS Operations Toulouse, maria-clara.henao@airbus.com, marc.malatesta@airbus.com

Résumé — L'intégration de réseaux électriques haute tension dans un avion peut engendrer une augmentation de la dangerosité des défauts tels que les arcs électriques. L'énergie dissipée par un arc peut être à l'origine de fortes variations de pression représentant une menace pour la structure à proximité de l'arc. Afin de garantir l'intégrité de cette structure ce travail propose une approche numérique basée sur une méthode par éléments finis visant à caractériser l'endommagement généré par ce phénomène.

Mots clés — arc électrique, onde de pression, impact sur la structure, modèle numérique par éléments finis.

1 Introduction

Dans le cadre de ses développements avion, Airbus introduit de nouveaux réseaux électriques incluant l'utilisation de courants continus ainsi que l'augmentation de la puissance mise en jeu avec des tensions atteignant potentiellement des valeurs autour de 1 kV. Ceci augmente la dangerosité des arcs électriques générés lors de défauts accidentels. Un arc électrique de défaut est une décharge à fort courant générant un plasma thermique de caractère erratique et transitoire. Il peut durer de quelques dizaines à quelques centaines de millisecondes avant de s'éteindre grâce aux dispositifs de protection du réseau électrique de l'avion. L'énergie dissipée par l'arc pendant sa durée de vie peut être à l'origine de multiples dommages physiques sur la structure et certains sous ensembles de l'avion. Lors de la formation de l'arc une partie de son énergie est transformée en ondes de surpression voire en une onde de choc. Cette variation de pression est provoquée par l'augmentation rapide de la température de l'air. Une deuxième partie de l'énergie est transformée sous forme de chaleur transférée aux câbles (par conduction) et à l'environnement proche (par rayonnement et par convection). Le réchauffement de câbles peut provoquer leur ablation et la projection de gouttes de métal fondu pouvant générer l'allumage de matériaux (Figure 1) [1], [2].

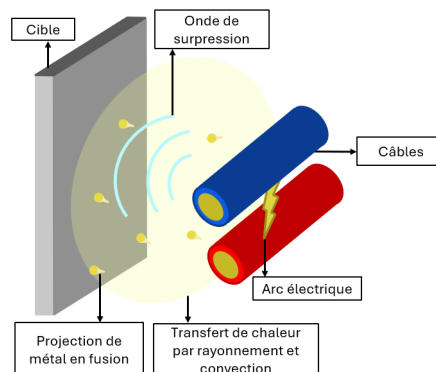


FIGURE 1 – Phénomènes générés par un arc électrique de défaut impactant une structure

La présente étude se concentre sur l'effet de l'onde de surpression sur les matériaux environnant la formation d'un arc de défaut. Quelques auteurs ont dédié leurs travaux à la caractérisation expérimentale

des ondes de choc générées par un arc électrique sans considérer leur impact sur une structure [3], [4], [5]. D'autres auteurs ont étudié cet impact pour des ondes de choc générées par la foudre à travers des modèles numériques utilisant des méthodes par éléments finis [6], [7]. En particulier, l'analyse de l'endommagement généré dans des matériaux composites a été faite dans [6] et [7]. De plus, une partie des travaux de J. Lee *et al.* [7] a été dédiée à l'étude de la propagation de l'onde de choc dans l'air et de son interaction avec la structure en utilisant des éléments eulériens. Enfin, peu de modèles numériques ont été réalisés pour déterminer les effets d'une onde de choc générée par un arc électrique de défaut sur une structure métallique.

Ce travail montre la méthodologie suivie ainsi que les premiers résultats obtenus pour le modèle numérique déterminant les effets mécaniques d'une onde de choc initiée par un arc de défaut sur la structure. Le code de calcul par éléments finis Abaqus est utilisé pour réaliser le modèle numérique de l'interaction onde/structure. La structure étudiée est une plaque en aluminium d'épaisseur de l'ordre de quelques centaines de μm située à 0.1 et 0.2 m de l'arc. Pour ce travail, la définition d'un chargement équivalent de pression est nécessaire. La section 2 présente la caractérisation de l'onde de surpression générée par un arc électrique dans l'air. Cette information est utilisée comme donnée d'entrée du modèle numérique développé. En section 3 les premiers résultats de simulation sont présentés et les effets de l'onde de surpression sur la structure sont analysés. Dans la dernière section les points d'amélioration et les perspectives du travail sont énoncés.

2 Caractérisation d'une onde de surpression dans l'air

Lors de la formation d'un arc électrique, des phénomènes liés à la pressurisation de l'espace apparaissent. Ces phénomènes sont des conséquences liées au chauffage rapide par effet Joule du canal ionisé. Cet effet augmente la température du plasma et met quasi instantanément sous pression le volume d'air chauffé. Une onde de surpression se propage dans l'air environnant avec une célérité pouvant atteindre des centaines de m/s [8]. L'évolution temporelle de l'onde de surpression mesurée dans l'air peut être décrite par l'équation de Friedlander (Eq. 1) [9]. Cette équation traduit l'évolution temporelle de la pression de l'air situé à une distance r de l'arc/source. Elle décrit l'apparition rapide d'un pic de pression P_{max} lors de l'arrivée de l'onde de pression à l'instant t_a (temps d'arrivée de l'onde). S'ensuit une diminution exponentielle de la pression caractérisée par le coefficient de décroissance dénoté b . Enfin, t_0 représente la durée de la phase positive de l'onde de choc (Figure 2). L'onde de surpression peut ainsi s'exprimer par :

$$P(r,t) = P_{max} \left(1 - \frac{t - t_a(r)}{t_0} \right) \exp \left(-b \frac{t - t_a(r)}{t_0} \right); \quad t_a(r) = \frac{r}{C_k} \quad (1)$$

Une méthodologie empirique basée sur le travail expérimental de Morsel *et al.* [3] a été développée pour déterminer les caractéristiques de l'onde de surpression incidente dans l'air générée par l'amorçage d'un arc électrique. Dans leurs travaux, des ondes de choc ont été produites par l'explosion de câbles électriques en aluminium (fusion de câble générant un arc électrique entre les 2 électrodes). A partir de leurs résultats expérimentaux il a été possible d'élaborer un modèle pour déterminer les valeurs de P_{max} , t_0 et b en fonction d'une part de la distance r entre l'arc supposé ponctuel et un point donné dans l'espace et d'autre part de l'énergie E_{arc} dissipée par l'arc.

La Figure 2 montre l'évolution de la surpression incidente dans l'air calculée par le modèle empirique en fonction du temps pour une énergie $E_{arc} = 7.5$ kJ à différentes distances r par rapport à l'arc. Les points en rouge sur cette figure correspondent aux données expérimentales de Morsel *et al.* [3] pour la même quantité d'énergie E_{arc} et à une distance $r = 0.2$ m. Comme observé sur la Figure 2 la méthodologie empirique développée reproduit correctement les données expérimentales de Morsel *et al.* [3]. Ces données sont utilisées pour déterminer le chargement équivalent de pression appliqué dans le modèle numérique développé pour la structure.

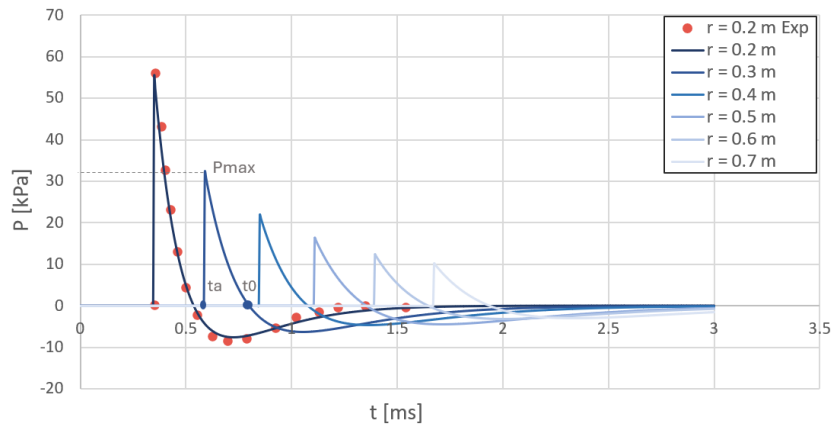


FIGURE 2 – Évolution de l’onde de surpression dans l’air. $E_{arc} = 7.5$ kJ. Superposition des données expérimentales de Morsel *et al.* [3] (points en rouge) et des valeurs obtenues à partir de la calibration de l’Eq. 1 (courbes bleues avec différentes valeurs de r).

3 Application d’une onde de surpression sur une structure

3.1 Procédure numérique

Un modèle numérique sur Abaqus est développé afin de connaître l’effet de la surpression produite par un arc sur une structure. Un schéma d’intégration explicite est utilisé pour la résolution des équations. La valeur de la surpression déterminée dans l’air sert comme donnée d’entrée pour calculer la valeur d’une pression équivalente appliquée directement sur la plaque. En première approximation [9] la pression transmise à la structure P_T correspond au double de la pression incidente dans l’air $P_T(r,t) = 2P_i(r,t)$, où $P_i(r,t)$ est donné par l’Eq. 1. Cette pression est appliquée via une routine utilisateur (VDLOAD). Cette routine permet de varier le chargement de pression appliquée en fonction du temps et de l’espace. Dans ce modèle, l’arc est supposé ponctuel et une propagation sphérique de l’onde de choc est considérée [3]. Ceci aura une influence sur le temps d’arrivée de l’onde sur la structure. Le temps d’arrivée dépendra du rayon de séparation r entre le centre de l’arc électrique et les points d’intégration des éléments sur la surface de la plaque ainsi que de la vitesse C_k de propagation de l’onde de pression dans l’air ($C_k = 570$ m/s d’après [3]) (Figure 3a). La Figure 3b montre deux profils de pression transmise P_T qui sont appliqués sur la structure. Ces profils de pression correspondent à une énergie dissipée de l’arc $E_{arc} = 7.5$ kJ et à une distance de séparation de la structure r de 0.1 m et 0.2 m.

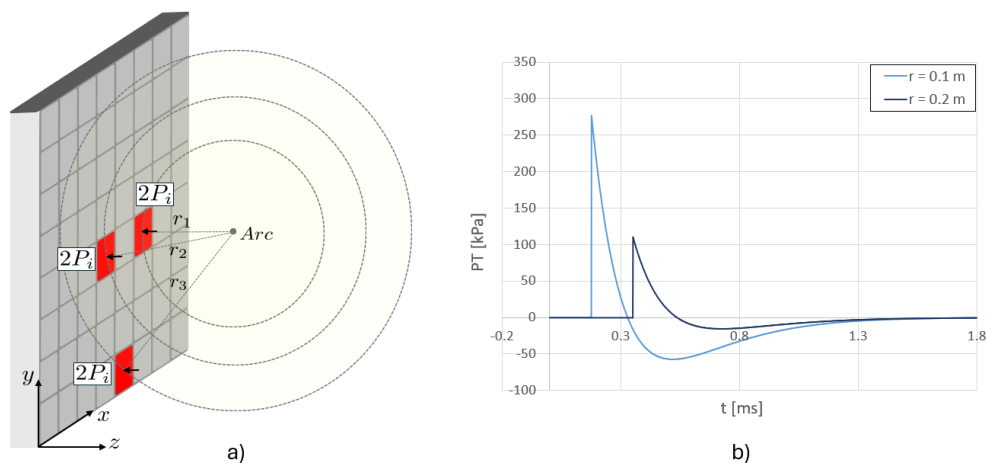


FIGURE 3 – a) Principe considéré pour la propagation sphérique de l’onde de surpression depuis un arc supposé ponctuel et application sur la surface de la plaque. b) Profils de pression transmise $P_T(r,t)$ appliquée sur la structure pour deux valeurs de r .

Dans cette étude l'onde de pression transmise P_T est appliquée sur une plaque en aluminium (AA6061-T6) de 0.1m x 0.1m. Deux épaisseurs de plaque e sont considérées (400 μm et 800 μm). Les propriétés du matériau sont indiquées dans le Tableau 1 et la Figure 4 (contrainte équivalente σ_{eq} en fonction de la déformation plastique équivalente ϵ_p). Les bords supérieur et inférieur ont été encastres. Des éléments finis hexaédraux à 8 nœuds et à intégration réduite (C3D8R) ont été utilisés. Une analyse de convergence a été réalisée afin de déterminer la quantité d'éléments nécessaire à partir de laquelle la solution est indépendante de la taille de la maille. Une quantité de 41440 éléments a été utilisée.

TABLE 1 – Propriétés de l'aluminium AA6061-T6 [10]

Masse volumique [kg/m^3]	Module de Young [GPa]	Coefficient de poisson
2700	70	0.33

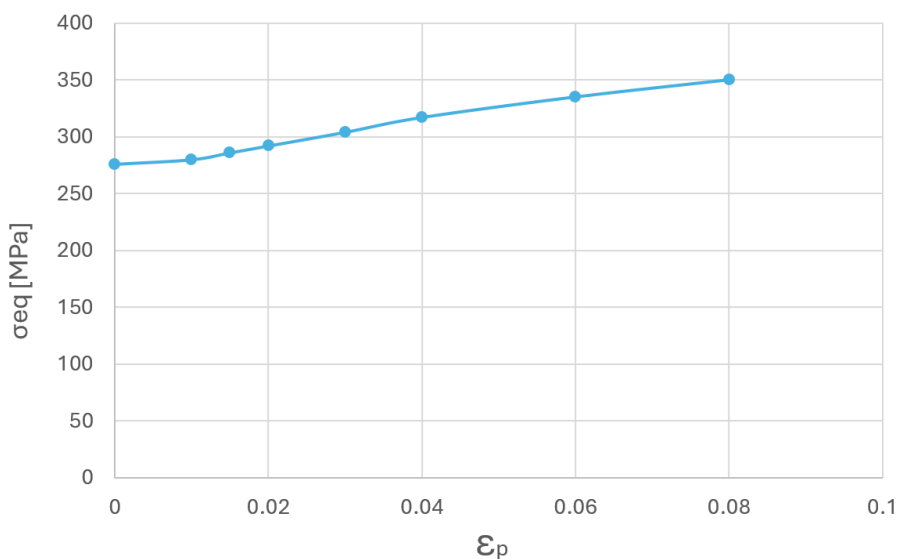


FIGURE 4 – Contrainte équivalente en fonction de la déformation plastique équivalente pour l'aluminium AA6061-T6 [10]

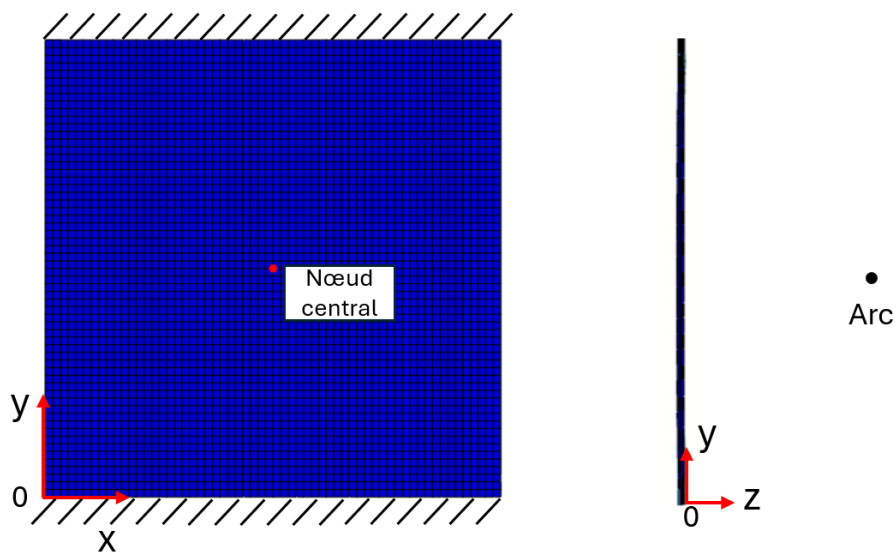


FIGURE 5 – Conditions aux limites utilisées : encastrement des bords supérieur et inférieur de la structure.

3.2 Résultats et discussion pour chaque configuration

Dans cette section une analyse succincte de 4 simulations est réalisée. Les 4 simulations correspondent à une configuration avec deux bords encastres, pour lesquelles deux chargements équivalents de pression sont appliqués (arc à $r = 0.1$ m et à $r = 0.2$ m) sur deux épaisseurs de plaque différentes ($e = 400$ μm et $e = 800$ μm).

La Figure 6 montre la carte de la contrainte équivalente de Von-Mises sur la face avant de la plaque de 400 μm à différents instants. Pour cette simulation, l'amorçage de l'arc électrique est fait à une distance de 0.1 m. Cette figure rend compte de la propagation sphérique de l'onde dans l'espace. La Figure 6a montre l'arrivée de l'onde de choc au centre de plaque 0.176 ms après l'apparition de l'arc. De la Figure 6b à la Figure 6d, il est possible d'observer l'arrivée progressive de l'onde de choc sur la plaque. Dans ces images, les circonférences des éléments en couleur rouge sont sollicités par le pic de pression maximale à 275 kPa. La Figure 6e montre l'instant où la sollicitation générée arrive aux bords encastres de la plaque, à partir de ce moment une onde réfléchiée est renvoyée au centre de la plaque. Enfin, à partir de 0.284 ms (Figure 6f) la réflexion de l'onde aux bords génère une contrainte homogène dans des bandes horizontales. Cet effet est observé jusqu'à la fin de la simulation à 1.8 ms. Ce comportement est observé pour toutes les 4 simulations réalisées.

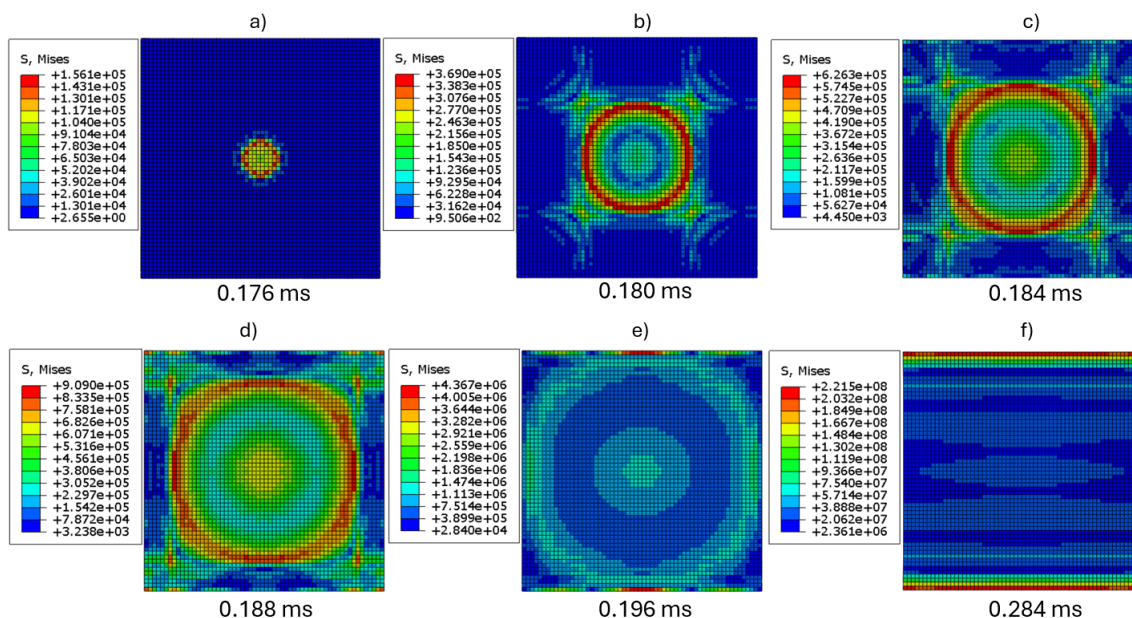


FIGURE 6 – Carte de σ_{eq} lors de l'impact d'une onde de choc produite par un arc électrique. $E_{arc} = 7.5$ kJ, $r = 0.1$ m et $e = 400$ μm .

La Figure 7a montre la pression transmise appliquée à la structure P_T ainsi que la variation du déplacement transversal U_z en fonction du temps pour le nœud situé au centre de la face avant de la plaque de normale z (Figure 5 gauche). Ces courbes correspondent à la simulation utilisant une énergie d'arc de $E_{arc} = 7.5$ kJ, $r = 0.2$ m et $e = 800$ μm . La Figure 7b montre le profil déformé de la plaque à un instant donné ($t = 1.620$ ms) pour les paramètres précédentes. La déformation en direction de l'axe z a été multipliée par un facteur de 20, afin de faciliter la visualisation du profil. La Figure 7a permet d'observer deux phases successives. La première correspond à l'effet de la pression positive sur la structure. À ce moment-là, le nœud présente un déplacement dans le sens négatif, comme attendu. Ensuite, lorsque la pression de l'onde de choc est négative, un effet d'aspiration est subi par la structure. Le nœud commence à se déplacer dans le sens positif jusqu'à atteindre une valeur maximale. D'autre part, la Figure 7b rend compte de l'apparition d'un profil en vaguelettes entraînée par l'effet de poussée et d'aspiration généré par l'onde de choc de même que par la réflexion de l'onde aux bords vers le centre de la structure. Ce type profil en vaguelettes a été observé pour les 4 simulations réalisées dans cette étude.

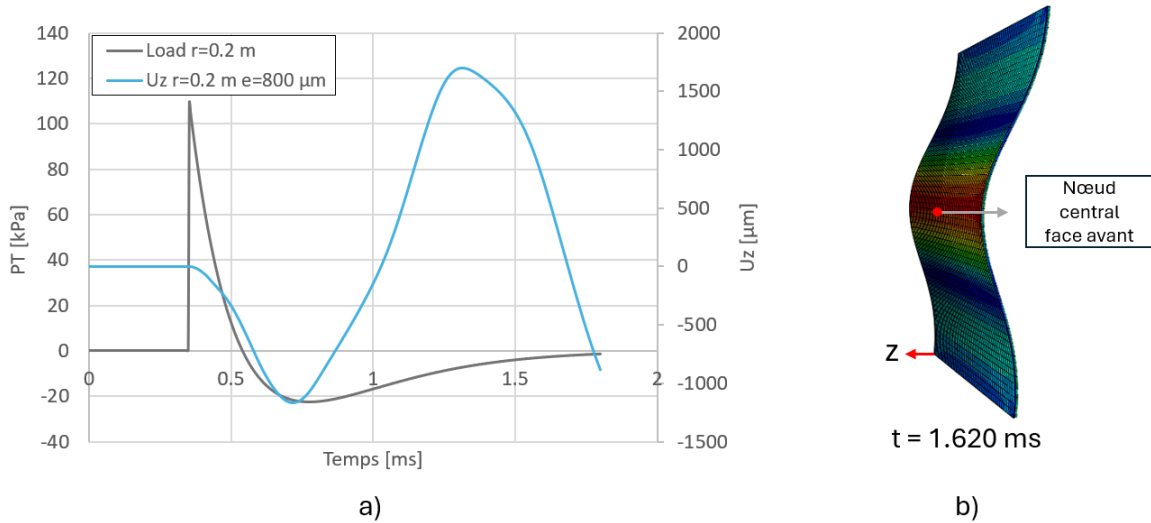


FIGURE 7 – a) Evolution de la pression transmise P_T appliqué sur la structure et évolution du déplacement transversal U_z b) Profil de la plaque déformée à un instant donné ($t = 0.928$ ms). Déformation selon l'axe z multipliée par un facteur de 20. Paramètres utilisées pour la simulation : $E_{arc} = 7.5$ kJ, $r = 0.2$ m et $e = 800$ μm

L'évolution du déplacement transversal U_z du nœud central de la face avant de la plaque est tracée en Figure 8a. Cette figure, rend compte du mouvement oscillatoire suivi par le nœud central dans chacune des 4 simulations. Ce mouvement est généré grâce à l'effet de poussée et d'aspiration de l'onde de choc sur la structure et il est également renforcé par la réflexion de l'onde depuis les bords encastres vers le centre de la structure. Comme attendu, pour les deux simulations faites avec $r = 0.2$ m le déplacement du nœud central de la plaque commence deux fois plus tard (0.4 ms) par rapport aux simulations avec $r = 0.1$ m. Des déplacements de l'ordre de plusieurs mm sont atteints dans chaque simulation. Le déplacement plus important correspond à 3.81 mm pour $r = 0.1$ m et $e = 400$ μm . La contrainte équivalente σ_{eq} de l'élément central de la face avant de la plaque est tracée en Figure 8b. Le pic de la contrainte de Von-Mises coïncide avec le déplacement maximale du nœud pour chaque simulation. La valeur de la limite élastique (276 MPa) est atteinte dans la simulation effectuée avec la structure de 400 μm d'épaisseur et un chargement à 0.1 m de distance de la structure.

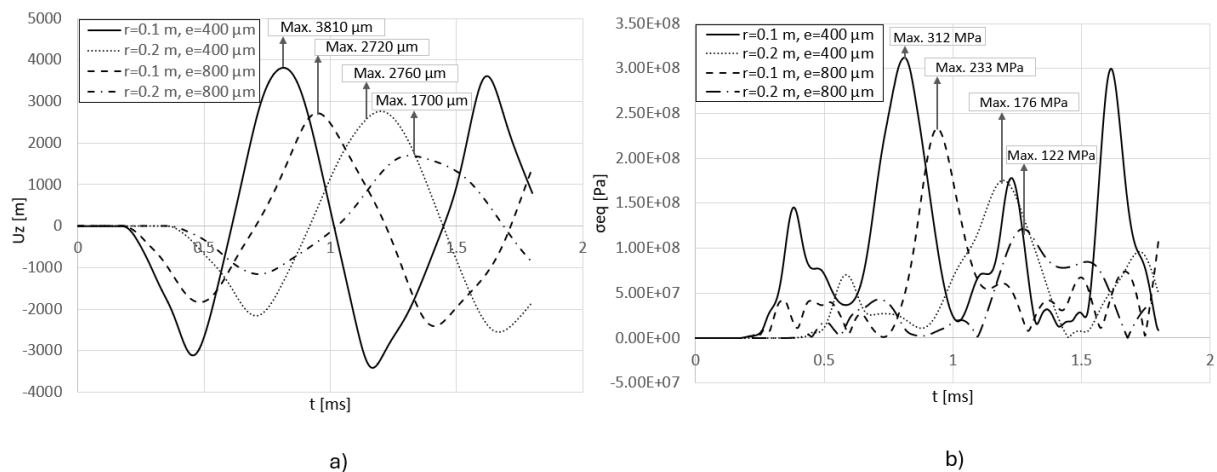


FIGURE 8 – a) Évolution de U_z au nœud central de la face avant de la plaque pour différents valeurs de r et e b) Évolution de la contrainte équivalente de Mises à l'élément central de la face avant de la plaque pour différents valeurs de r et e .

4 Conclusion

Une méthodologie numérique est développée pour reproduire les effets d'une onde de surpression générée par un arc électrique sur une plaque en aluminium. Une présentation succincte sur la caractérisation d'une onde de surpression dans l'air a été faite. Ces valeurs de surpression sont utilisées comme données d'entrées du modèle numérique. Une routine utilisateur (VDLOAD) a été développée dans Abaqus afin d'appliquer un chargement de pression équivalent sur la structure. Cette routine permet de simuler l'arrivée d'une onde de surpression se propageant de manière sphérique dans l'espace. Une analyse des effets mécaniques de deux profils de surpression a été faite sur deux épaisseurs de plaque différentes. Les effets de la réflexion d'énergie sur les bords encastrés ont été constatés. Ce modèle numérique méritera d'être validé par les résultats des expériences d'arc électrique faites dans le cadre d'un projet connexe sur la compréhension et la modélisation de l'arc.

Références

- [1] T. Vazquez. *Caractérisation de l'impact sur son environnement d'un arc électrique amorcé entre des câbles en conditions aéronautiques*, Université de Toulouse, 2021.
- [2] T. Andre. *Etude des mécanismes d'entretien et de propagation d'un arc électrique de court-circuit entre câbles endommagés dans les réseaux électriques d'aéronefs*, Université de Toulouse, 2017.
- [3] A. Morsel, F. Masi, P. Kotronis. *Measurement, self-similarity, and TNT equivalence of blasts from exploding wires*, Shock Waves, 2025.
- [4] Q. Liu, Y. Zhang. *Shock wave generated by high-energy electric spark discharge*, Journal of Applied Physics, 2014.
- [5] Z. Xu, X. Yang, Y. Feng, J. Xu, H. Zhang, F. Liu, H. Dong. *Shock Wave Characteristics and Overpressure Peak Simulation of Short-circuit Arc Explosion in Highvoltage Cable Joints*, Panda Forum on Power and Energy (PandaFPE), 2023.
- [6] J. Lee, T. Lacy, C. Pittman, J.N Reddy. *Numerical estimations of lightning-induced mechanical damage in carbon/epoxy composites using shock wave overpressure and equivalent air blast overpressure*, Composite Structures, vol. 224, 2019.
- [7] J. Lee, T. Lacy, C. Pittman. *Lightning mechanical damage prediction in carbon/epoxy laminates using equivalent air blast overpressure*, Composites Part B : Engineering, vol. 212, 2021.
- [8] Babrauskas V. *Electric arc explosions—A review*, Fire Safety Journal, vol. 89, p. 7-15, 2017.
- [9] V. Karlos, M. Larcher, G. Solomos. *Analysis of the blast wave decay coefficient in the Friedlander equation using the Kingery-Bulmash data*, European commission, 2015.
- [10] M. Ahmad, K.A Ismail, M.H.M Hanid, F. Mat, A.M Roslan *Modification of the design of circular thin-walled tubes to enhance dynamic energy absorption characteristics :Experimental and finite element analysis* , IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, vol. 917, 2020.