HAL
open science

La génération de plasma froid par transformateur piézoélectrique : un nouvel outil de désinfection pour le biomédical

Jordan Stekke, François Pigache

▶ **To cite this version:**

Jordan Stekke, François Pigache. La génération de plasma froid par transformateur piézoélectrique : un nouvel outil de désinfection pour le biomédical. Symposium de Génie Electrique, Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02981878

HAL Id: hal-02981878

https://hal.science/hal-02981878v1

Submitted on 28 Oct 2020

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.

La génération de plasma froid par transformateur piézoélectrique : un nouvel outil de désinfection pour le biomédical

Jordan STEKKE, François PIGACHE
LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, Toulouse, France

RESUME – Ce papier a pour objectif de présenter les investigations et les résultats d'une étude portant sur le développement d'un nouveau dispositif de désinfection pour le biomédical basé sur l'ionisation de mélange Air-Argon directement à la surface de Transformateurs Piézoélectriques (PT) inspirés de structure Rosen. Cette étude souhaite couvrir les étapes allant de la modélisation et l'optimisation du transformateur lui-même dans le cadre d'une utilisation en générateur de plasma froid jusqu'à son test en désinfection sur des souches bactériennes. Les performances de tels types de générateurs plasma sont évaluées pour des structures de types Rosen, mais l'objectif reste d'évaluer les performances anti-bactériennes de nouvelles topologies de PT, misant sur l'accroissement des effets de pointe et de l'ionisation plasma.

Mots-clés – Transformateur Piézoélectrique (PT) - Plasma froid - Désinfection - Modélisation.

1. INTRODUCTION

Les propriétés piézoélectriques d'un matériau se traduisent par sa capacité à se déformer sous l'effet d'un champ électrique et inversement à générer un champ électrique sous l'action d'une contrainte mécanique. L'association de deux cellules piézoélectriques aux polarisations orthogonales l'une de l'autre, proposée par C.A. Rosen en 1954, avec le développement des céramiques piézoélectriques synthétiques, a permis l'émergence d'une nouvelle gamme de transformateur à très fort gain électrique massique.

Depuis une vingtaine d'années, un certains nombres de recherches ont étudié la possibilité d'utiliser ces transformateur piézoélectriques comme source de plasma froid.[1] [2] [3]. Leur fort gain électrique et leur propriétés diélectriques naturelles en font un support parfait à la génération de plasma froid directement à leur surface (Piezoelectric Direct Discharge Plasma (PDDP)) et un dispositif parfaitement sécurisé grâce à leurs faibles niveaux d'alimentation (quelques volts) en comparaison des systèmes traditionnels exigeant plusieurs kVolts.

De nombreuses études [4][5] ayant montré l'efficacité des plasmas froids pour la décontamination voire la stérilisation médicale notamment dans le traitement de matériels thermosensibles, l'objectif de ce papier se porte sur le développement et les prémices du perfectionnent d'un dispositif de désinfection basé sur la PDDP, appelé Piezo-plasma jet. Il se placerait en concurrence avec les procédés actuels de désinfection par immersion dans des produits biocides tels que le peroxyde d'hydrogène, acide peracétique ou l'acide acétique.

Afin de voire les possibilités d'un tel dispositif, un prototype a été réalisé à partir d'un PT commercial de la société Steminc. Différents tests en laboratoire biomédical pour différentes conditions d'essai sont présentés en première partie.

Au vue de ces résultats favorables, nous nous sommes tournés vers l'optimisation des PT pour la maximisation de la puissance électrique débitée dans la décharge plasma. Pour ce faire, deux modèles, présenter en deuxième partie, ont été développés pour modéliser le comportement du transformateur. Le premier est un modèle paramétrique linéaire 1D du PT Rosen et le second un modèle 3D par éléments finis. Des essais électriques sur des PT connus permettent de valider ces modèles.

2. ESSAIS BACTÉRICIDES

Les plasmas froids disposent de certaines propriétés physico-chimiques favorables à l'élimination des bactéries :

- synthèse d'espèces oxydantes instables dans des plasmas composés de dioxygène et d'eau (utilisation d'argon comme vecteur d'ionisation).
- émission d'ultra-violet
- bombardement électronique provoquant une entaille mécanique de la paroi cellulaire

Dans un premier temps, afin de conforter les capacités de désinfection de plasmas générés par PT, des essais bactéricides sont menés en laboratoire biomédical, à partir de PT commerciaux monocouche 4W de la société Steminc. Ils sont montés dans des stylets comme décrit dans le schéma (1) générant des plumes plasma de plusieurs centimètres (fig(2)) auxquelles sont exposées les souches bactériennes suivant une adaptation du protocole EN 13697 .

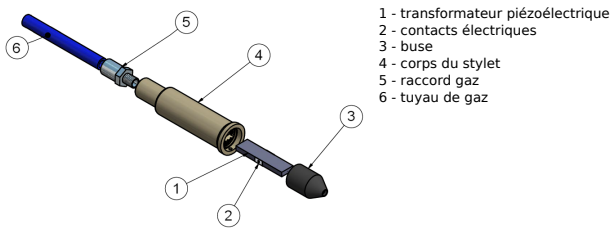

Fig. 1. Décharge de plasma d'Argon avec un Piezo-plasma Jet

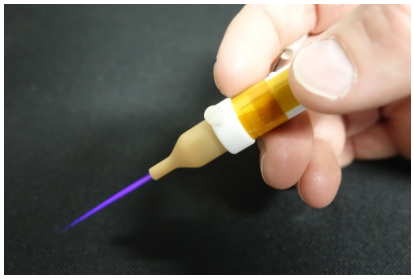

Fig. 2. Décharge de plasma d'Argon avec un Piezo-plasma Jet

Les résultats de cette première série d'essais sont brièvement récapitulés dans les graphiques (3). Les performances bactéricides sont évaluées en réduction de log représentative de la chute de population bactérienne sur l'échantillon exposée au plasma fonction d'un échantillon témoin. Un dispositif est considéré

désinfectant pour une réduction de log supérieur 4. Dans le cas de cette version primaire du Piezo-Plasma jet, les performances se sont montrées plus que prometteuses avec notamment une élimination complète des souches de bacille même à seulement 15min d'exposition.

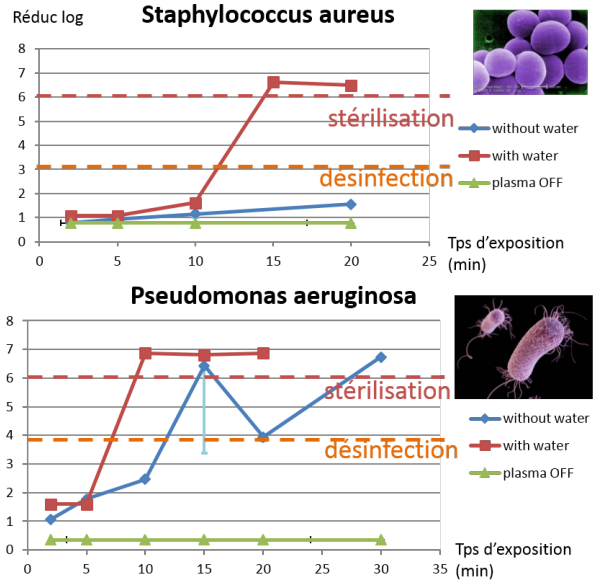

Fig. 3. Résultats des premiers essais biocides

3. MODÉLISATION DU TRANSFORMATEUR ROSEN EN DÉCHARGE

Dans l'objectif d'une future optimisation du PT pour une utilisation en générateur de plasma froid, il nécessaire de modéliser le comportement de ce PT. Ainsi, principalement deux modèles sont développés :

— modèle analytique linéaire unidimensionnelle
— modèle tridimensionnelle par éléments finis, qui ne sera pas développée plus avant dans ce papier

L'objectif est de coupler ces deux méthodes pour proposer d'une part une étude globale sur les dimensions d'une transformateurs type Rosen favorisants la puissance de décharge par l'étude analytique unidimensionnelle, puis d'autre part étudier l'impact de microstructures à l'extrémité du PT sur la décharge plasma, notamment de microstructure pouvant favoriser des effets de pointes, zones de forte concentration de champ électrique nécessaire à l'allumage et l'entretien du plasma.

3.1. Fonctionnement d'un PT de type Rosen

L'architecture d'un transformateur piézoélectrique de type Rosen est basée sur l'association de deux cellules piézoélectriques aux polarisations orthogonales l'une de l'autre comme illustré schéma (4). Le primaire, partie polarisée et excitée transversalement, produit une onde qui par le rapport des formes se voit amplifiée longitudinale. En se propageant, elle vient excitée la seconde cellule, le secondaire, suivant son axe de polarisation lui-même longitudinal. Ainsi, cette amplification de l'onde mécanique se traduit par une forte déformation à l'extrémité du secondaire et la génération d'un fort potentiel électrique.

3.2. Expression du modèle analytique linéaire unidimensionnelle

Le PT (représenté fig(5)) est composé de deux sections : le primaire polarisé transversalement pouvant se décomposer en plusieurs couches et le secondaire polarisé longitudinalement.

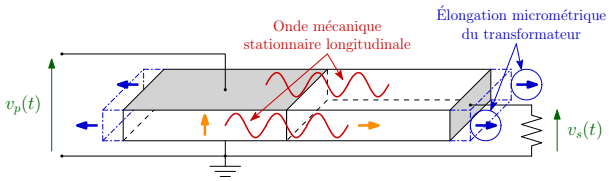

Fig. 4. Schéma de principe du fonctionnement d'un PT de type Rosen

La décharge, ayant une influence sur le comportement ondulatoire du PT, est ramené une charge résistive Z_load sur le secondaire du PT variant de l'infini pour un PT hors-décharge à plusieur kV pour un PT en décharge.

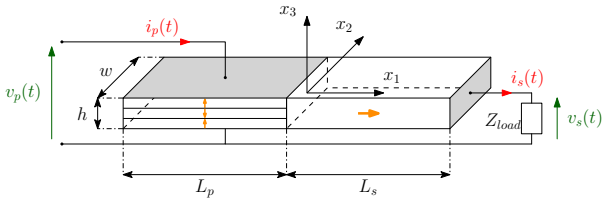

Fig. 5. Géometrie d'un PT Rosen multicouche

Hypothèses de modélisation Le primaire du TP est alimenté par une source de tension sinusoïdal v_p à la pulsation ω.

$$v_p(t) = V_p e^{j\omega t}$$

Le modèle impose une longueur totale L du PT supérieure à sa largeur w et son épaisseur h. Ce rapport de taille est imposé pour satisfaire la faible déformation suivant (x_2) et (x_3) et ne considérer qu'une déformation longitudinale le long de (x_1). Pour la suite, le terme x sera utilisé pour décrire la position sur l'axe (x_1).

Équations piézoélectriques Les équations suivantes prennent la même syntaxe que C. Nadal [6].
Afin de différencier les expressions des cotés primaire et secondaire, chaque paramètre prend respectivement la forme X_p ou X_s. Les paramètres électriques et mécaniques sont définis pour une céramique piézoélectrique polarisée le long de l'axe (x_3) comme selon les normes IEEE. (pour le secondaire, il est nécessaire d'appliquer les rotations en conséquence).
Une céramique piézoélectrique peut être définie avec 4 paramètres liés :

— 2 variables mécaniques : la contrainte S et la contrainte mécanique T.
— 2 variables électriques : le déplacement électrique D et le champ électrique E.

Tableau 1. Paramètres de céramique piézoélectrique

ρ	densité massique
$[c^E]$	matrice de rigidité à champ électrique constant
$[c^D]$	matrice de rigidité à déplacement électrique constant
$[s^E]$	matrice de souplesse à champ électrique constant
$[d][e][h]$	matrice des coefficients piézoélectriques
$[\varepsilon^S]$	matrice de permittivité diélectrique à contrainte constante
$[\beta^S]$	matrice d'impermittivité diélectrique à contrainte constante

Au primaire (mode émetteur), le couple de variables indépendantes (S,E) est pris en compte.

$$\begin{cases} T_{p1} = \bar{c}_{11}^E S_{p1} - \bar{e}_{31} E_{p3} \\ D_{p3} = \bar{e}_{31} S_{p1} + \bar{\varepsilon}_{33}^S E_{p3} \end{cases} \tag{1}$$

en tenant compte des relations de Poisson réduites à la déformation selon (x_1), les coefficients prennent les formes suivantes :

$$\bar{c}_{11}^E = \frac{1}{s_{11}^E} \quad \bar{e}_{31} = \frac{d_{31}}{s_{11}^E} \quad \bar{\varepsilon}_{33}^S = \varepsilon_{33}^T (1 - k_{31}^2)$$

Au secondaire (mode récepteur), l'utilisation du couple variable (S,D) est préférable. Du fait que le secondaire est polarisé le long de l'axe (x_1), une rotation sur les indices des paramètres électromécaniques est appliquée.

$$\begin{cases} T_{s1} = \bar{c}_{33}^D S_{s1} - \bar{h}_{33} D_{s1} \\ E_{s1} = \bar{h}_{33} S_{s1} + \bar{\beta}_{33}^S D_{s1} \end{cases} \tag{2}$$

Réduits à (x_1), les coefficients prennent les expressions suivantes :

$$\bar{c}_{33}^D = \frac{1}{s_{33}^E (1 - k_{33}^2)} \quad \bar{h}_{33} = \frac{1}{d_{33}} \frac{k_{33}^2}{1 - k_{33}^2} \quad \bar{\beta}_{33}^S = \frac{1}{\varepsilon_{33}^T (1 - k_{33}^2)}$$

Excitation électrique du transformateur La partie primaire est composée d'un nombre impair de couches n, séparées par n+1 électrodes, ce qui permet d'augmenter proportionnellement le champ électrique interne. La tension primaire est utilisée comme référence de phase.

$$E_{p3} = -n \frac{V_p}{h} e^{j\omega t}$$

Équations d'équilibre de la céramique Selon l'équation de Maxwell-Ampere, en l'absence de charge libre, le déplacement électrique suit, respectivement aux primaire et secondaire, les relations ci-dessous :

$$\begin{cases} D_{p3,3} = 0 \\ D_{s1,1} = 0 \end{cases} \tag{3}$$

Le déplacement électrique peut donc être considéré comme homogène au primaire et au secondaire.

$$\begin{cases} D_{p3} = \underline{D}_p e^{j\omega t} \\ D_{s1} = \underline{D}_s e^{j\omega t} \end{cases} \tag{4}$$

Pour modéliser les pertes par friction dans la céramique, un terme d'amortissement, caractérisé par un coefficient de friction C_f, est ajouté à l'équation classique d'équilibre mécanique, dérivée de la deuxième loi de Newton, vérifiée à la fois au primaire et au secondaire :

$$T_{1,1} = \rho \frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} + \rho C_f \frac{\partial U_1}{\partial t} \tag{5}$$

avec

$$S_1 = U_{1,1}$$

en injectant les expressions de l'effort mécanique des équations (1) et (2) dans (5), on obtient les équations différentielles sur le primaire et le secondaire du transformateur.

$$\begin{cases} \bar{c}_{11}^E U_{p1,11} = \rho \dfrac{\partial^2 U_{p1}}{\partial t^2} + \rho C_f \dfrac{\partial U_{p1}}{\partial t} \\ \bar{c}_{33}^E U_{s1,11} = \rho \dfrac{\partial^2 U_{s1}}{\partial t^2} + \rho C_f \dfrac{\partial U_{s1}}{\partial t} \end{cases} \tag{6}$$

Les solutions harmoniques de ce type d'équations différentielles sont connues.

$$\begin{cases} U_{p1}(x,t) = (\underline{A}_p e^{jk_p x} + \underline{B}_p e^{-jk_p x}) e^{j\omega t} \\ U_{s1}(x,t) = (\underline{A}_s e^{jk_s x} + \underline{B}_s e^{-jk_s x}) e^{j\omega t} \end{cases} \tag{7}$$

avec k_p et k_s les vecteurs d'ondes complexes

$$k_p^2 = \frac{\rho}{\bar{c}_{11}^E} (\omega^2 - j\omega C f) \quad k_s^2 = \frac{\rho}{\bar{c}_{33}^D} (\omega^2 - j\omega C f)$$

Expression du potentiel électrique Le potentiel électrique primaire est constant le long de (x_1) et négligeable par rapport au potentiel secondaire, il est considéré comme nul pour ce modèle 1D.
Sachant que

$$E_{s1} = -\phi_{s,1}$$

à partir de l'équation piézoélectrique (2) et de la condition d'équilibre électrique (4), on obtient l'équation différentielle vérifiée par le potentiel électrique secondaire.

$$-\phi_{s,1} = \bar{h}_{33} U_{1s,1} + \bar{\beta}_{33}^S \underline{D}_s e^{j\omega t}$$

A partir de cette nouvelle expression, on peut déduire les expressions du potentiel électrique le long du transformateur.

$$\begin{cases} \phi_p(x,t) \approx 0 \\ \phi_s(x,t) = \left(\underline{C}_s - \bar{\beta}_{33}^S \underline{D}_s x - \bar{h}_{33} (\underline{A}_s e^{jk_s x} + \underline{B}_s e^{-jk_s x})\right) e^{j\omega t} \end{cases} \tag{8}$$

Tension de sortie et impédance de charge La quantité de charges accumulées à l'électrode secondaire peut être exprimée de la manière suivante

$$q_s = -\int_\Sigma D_{s1} d\Sigma$$

Étant donné l'expression de l'induction électrique (4), elle peut être simplifiée par l'expression

$$q_s = -le\underline{D}_s e^{j\omega t}$$

Il permet de déduire l'expression du flux de courant selon la charge.

$$i_s = q_s' = -j\omega l \underline{D}_s e^{j\omega t} \tag{9}$$

et la tension secondaire aux bornes de la charge correspondant au potentiel à l'extrémité du secondaire.

$$V_s = \underline{Z}_{load} i_s = -j\omega l \underline{D}_s \underline{Z}_{load} e^{j\omega t} \tag{10}$$

3.3. *Matrice caractéristique du système*

Six amplitudes complexes ($\underline{A}_p$, $\underline{B}_p$, $\underline{A}_s$, $\underline{B}_s$, $\underline{C}_s$ et $\underline{D}_s$) doit être définie à partir des six équations de contraintes énumérées ci-dessous.

Conditions de continuité Nous imposons des conditions de continuité au potentiel électrique, aux contraintes mécaniques et à la déformation au niveau de l'interface entre le primaire et le secondaire.

$$\begin{cases} \underline{U}_{p1}(x=0) = \underline{U}_{s1}(x=0) \\ \underline{T}_{p1}(x=0) = \underline{T}_{s1}(x=0) \\ \underline{\phi}_p(x=0) = \underline{\phi}_s(x=0) \end{cases} \tag{11}$$

Conditions aux limites Le transformateur est mécaniquement libre à ses bords, c'est pourquoi des contraintes mécaniques libres sont imposées aux extrémités.

$$\begin{cases} \underline{T}_{p1}(x=-Lp)=0 \\ \underline{T}_{p1}(x=Ls)=0 \end{cases} \tag{12}$$

La charge électrique connectée au secondaire impose une contrainte électrique à ce dernier.

$$\underline{\phi}_s(x=Ls)=\underline{V}s \tag{13}$$

Système d'équations . L'ensemble des contraintes (11), (13) et (12) est formulé en fonction des 6 grandeurs complexes pour les identifier.

$$\begin{cases} -\underline{A}_p-\underline{B}_p+\underline{A}_s+\underline{B}_s=0 \\ -j\bar{c}_{11}^E k_p(\underline{A}_p-\underline{B}_p)+j\bar{c}_{33}^D k_s(\underline{A}_s-\underline{B}_s)-h_{33}\underline{D}_s=\dfrac{V_p\bar{e}_{31}n}{h} \\ \bar{h}_{33}(A_s-B_s)-\underline{C}_s=0 \\ -j\bar{c}_{11}^E k_p(\underline{A}_p e^{-jk_pL_p}-\underline{B}_p e^{jk_pL_p})=\dfrac{V_p\bar{e}_{31}n}{h} \\ -j\bar{c}_{33}^D k_s(\underline{A}_s e^{jk_sL_s}-\underline{B}_s e^{-jk_sL_s})+\bar{h}_{33}\underline{D}_s=0 \\ \bar{h}_{33}(\underline{A}_s e^{jk_sL_s}+\underline{B}_s e^{-jk_sL_s})+(L_s\bar{\beta}_{33}^S-j\underline{Z}_{load}hw\omega)\underline{D}_s=\underline{C}_s \end{cases} \tag{14}$$

L'équation caractéristique du système est identifiée :

$$M(\omega)X=V_{excit} \tag{15}$$

avec le vecteur d'amplitudes complexes

$$X=\begin{bmatrix} \underline{A}_u \\ \underline{B}_u \\ \underline{C}_u \\ \underline{D}_u \\ \underline{C}_s \\ \underline{D}_s \end{bmatrix}$$

le vecteur d'excitation

$$V_{excit}=\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}\frac{V_p\bar{e}_{31}n}{h}$$

et la matrice caractéristique (16)

avec les fréquences adimensionnelles $X_1=k_pL_p$ et $X_2=k_sL_s$

La fréquence de résonance ω_r correspond au minimum du module du déterminant de la matrice caractéristique M.

L'ajout du coefficient de frottement empêche l'annulation du déterminant et rend la matrice M inversible pour toute valeur de pulsation ω. Ainsi, en inversant l'équation caractéristique (15) à la fréquence de résonance ω_r, les 6 amplitudes complexes peuvent être calculées.

Courant d'entrée La structure du primaire est basée sur la parallélisation de n couches. Ainsi, les quantités de charges sont proportionnelles à ce nombre de couches.

$$q_p=-n\int_\Sigma D_{p3}d\Sigma$$

Selon (1), le courant d'entrée $i_p=q_p'$ peut donc être exprimé comme suit

$$i_p=nj\omega\left[\frac{L_pl}{e/n}\bar{\varepsilon}_{33}^S V_p-\bar{e}_{31}l\left[A_p\left(1-e^{-jX_1}\right)+B_p\left(1-e^{jX_1}\right)\right]\right] \tag{17}$$

Ce modèle a été conforté par des mesures de potentiel de surface, présentées en figure (6).

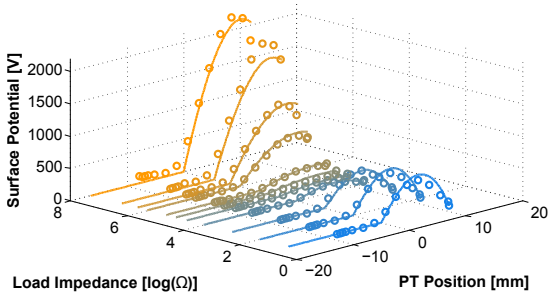

Fig. 6. Potentiel électrique surfacique d'un PT multicouche à 1Vrms d'alimentation

Ainsi , afin de favoriser la tenue en tension du transformateur et la puissance secondaire à quelque $k\Omega$ de charge (correspondant à un fonctionnement en charge), il s'est montré la nécessité d'augmenter la longueur et la largeur du transformateur et à l'inverse minimiser son épaisseur pour augmenter son rapport de transformation.

4. MODÈLE PAR ÉLÉMENTS FINIS

Un modèle par éléments finis a été développé sous ANSYS pour une représentation plus complète du comportement du PT. Notamment, il permet de tester des topologies plus complexes dans la visée d'une optimisation topologique.

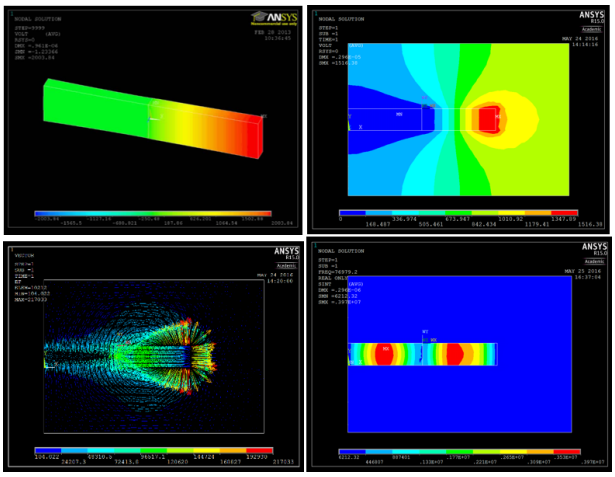

Fig. 7. Etapes de simulation d'un PT monocouche sous ANSYS

L'étude par élément finis se décompose en 5 étapes :

- modélisation du transformateur : réalisation de la géométrie du transformateur et définition de ses paramètres électromécaniques.
- analyse modale : recherche des différents modes propres du PT et notamment des modes de résonance longitudinaux.
- analyse harmonique : étude en oscillation forcée à la fréquence de résonance identifiée précédemment et au niveau de tension souhaité.
- analyse statique : exploitation du profil du potentiel électrique identifié précédemment à la surface du PT pour l'appliquer à son environnement
- post-traitement : identification des zones de pics de champ électrique

Ce type de modèle a été intégré dans des boucles d'optimisation avec le logiciel Matlab avec pour objectif la maximisation

$$M(\omega) = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ -j\bar{c}_{11}^{E}k_p & j\bar{c}_{11}^{E}k_p & j\bar{c}_{33}^{D}k_s & -j\bar{c}_{33}^{D}k_s & 0 & -\bar{h}_{33} \\ 0 & 0 & \bar{h}_{33} & -\bar{h}_{33} & -1 & 0 \\ -j\bar{c}_{11}^{E}k_p e^{-jX_1} & j\bar{c}_{11}^{E}k_p e^{jX_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -j\bar{c}_{33}^{D}k_s e^{jX_2} & j\bar{c}_{33}^{D}k_s e^{-jX_2} & 0 & \bar{h}_{33} \\ 0 & 0 & \bar{h}_{33}e^{jX_2} & \bar{h}_{33}e^{jX_2} & -1 & (L_s\bar{\beta}_{33}^{S} - j\underline{Z}_{load}hw\omega) \end{bmatrix} \quad (16)$$

du maximum de champ électrique fournissant des résultats tels que ceux de la figure (8).

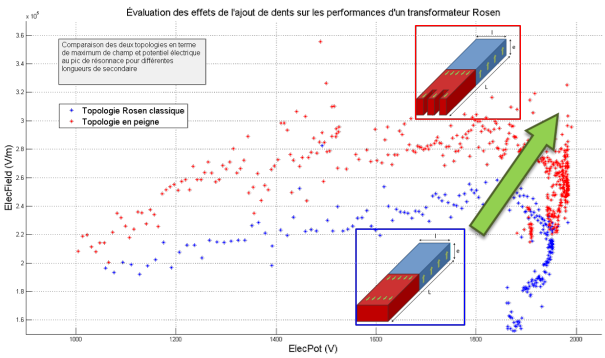

Fig. 8. Résultats de simulation suite à l'ajout de microstructures à l'extrémité du secondaire

5. CONCLUSIONS

Ce travail a pu montrer les capacités de désinfection des Piezo-plasma jet par des essais bactéricides. Deux modèles de PT ont été développés destinées à des optimisations paramétriques et topologiques de ces PT dans le cadre de leur utilisation pour de la génération de plasma froid. Dans les prochains mois, de nouvelles topologies issues de ces optimisation (ex : fig (9) favorisant les effets de pointe seront testées en décharge pour évaluer un possible gain de puissance plasma vis à vis du transformateur Rosen.

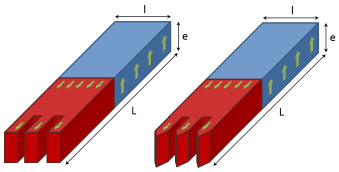

Fig. 9. Proposition de topologie de TP facilitant les effets de pointe

6. REMERCIEMENTS

Tous nos remerciement à l'Agence National de la Recherche qui finance ce projet et à nos partenaires industriels et universitaires : LMCPA, Sinaptec, Anios, Cirimat et DPHE.

7. RÉFÉRENCES

[1] H. Itoh, K. Teranishi, and S. Suzuki, "Discharge plasmas generated by piezoelectric transformers and their applications," vol. 15, no. 2, p. S51.

[2] M. Teschke and J. Engemann, "Piezoelectric low voltage atmospheric pressure plasma sources," vol. 49, no. 9, pp. 614–623.

[3] M. J. Johnson and D. B. Go, "Piezoelectric transformers for low-voltage generation of gas discharges and ionic winds in atmospheric air," vol. 118, no. 24, p. 243304.

[4] M. Laroussi, "Low-temperature plasmas for medicine ?," vol. 37, no. 6, pp. 714–725.

[5] K.-D. Weltmann, R. Brandenburg, T. von Woedtke, J. Ehlbeck, R. Foest, M. Stieber, and E. Kindel, "Antimicrobial treatment of heat sensitive products by miniaturized atmospheric pressure plasma jets (APPJs)," vol. 41, no. 19, p. 194008.

[6] C. Nadal, "Contribution à la conception et la modélisation transformateurs piézoélectriques dédiés à la génération de plasma."