

# Chapitre 2

## Conception et étude de la conversion électromécanique de la surface active et du canal actif

### 2.1. Introduction

Ce chapitre présente la conception et l'étude de la conversion électromécanique de la surface active et du canal actif pour laquelle a été adoptée une démarche d'optimisation paramétrique. La surface active est une surface simple composée d'une association de DBDS alors que le canal actif est un assemblage miroir de deux surfaces actives. L'étude paramétrique repose sur des mesures électriques (tension  $U(F)$ , courant  $I(F)$ ) d'une part et sur des mesures mécaniques (vitesse du vent électrique VVE) d'autre part, et consiste à faire varier les paramètres suivants :

Au niveau de la surface active :

- L'épaisseur et la nature du diélectrique,
- La distance inter-DBDS,
- Le nombre de DBDS.

Au niveau du canal actif :

- La hauteur du canal (hauteur séparant les deux surfaces actives).

Dans ce chapitre, nous présentons une description du banc expérimental et du protocole expérimental. Puis nous abordons la conception et l'optimisation paramétrique de la surface active à l'aide d'une approche théorique et d'une approche expérimentale. Au niveau théorique, nous cherchons à optimiser le transfert de la puissance de la source vers le plasma par modélisation électrique consistant à simuler le comportement du système à l'aide d'un circuit électrique équivalent, d'en déterminer l'impédance complexe et la fréquence de résonance en fonction des différents paramètres. Au niveau expérimental,

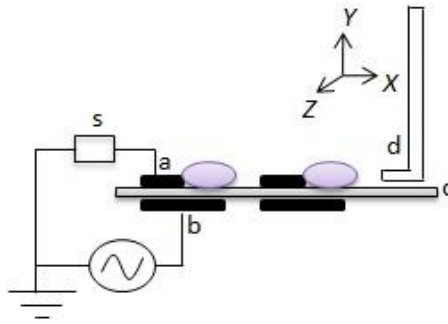
nous mesurons la puissance électrique injectée que nous comparons à la puissance théorique calculée, nous mesurons la vitesse du vent électrique à l'aide d'une sonde de Pitot pour calculer la puissance mécanique récupérée en fonction des différents paramètres. Après optimisation de la surface active, nous la dupliquons pour en faire un canal actif par assemblage et nous effectuons l'étude de sa conversion électromécanique en fonction du paramètre géométrique : hauteur du canal.

## **2.2. Description du banc expérimental et du protocole expérimental**

Les appareils constituant le banc expérimental de la DBDS sont les suivants (Figure 19):

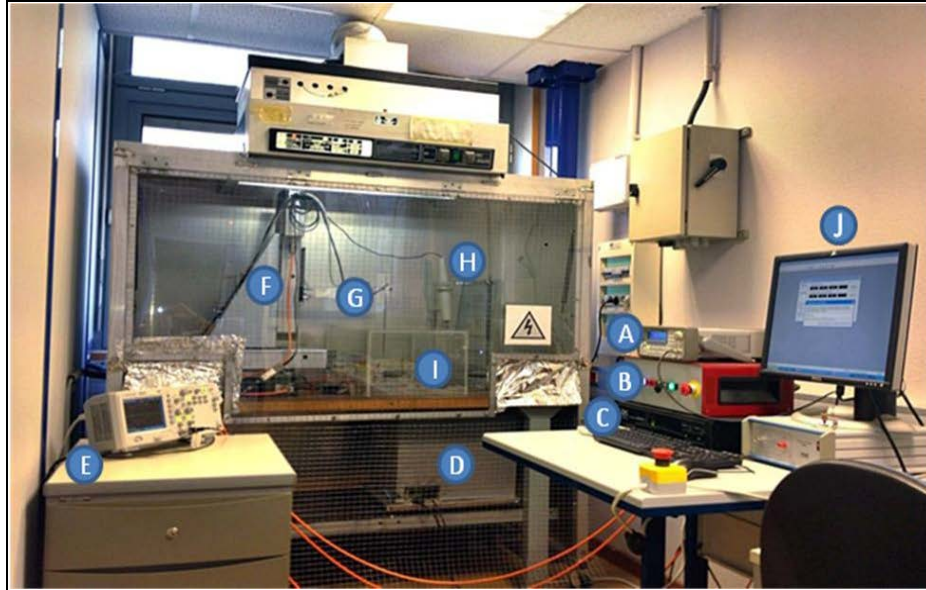
- a. Générateur Basse Fréquence (GBF) Agilent 33210A
- b. Boîtier de commande du robot cartésien
- c. Amplificateur RMX2450
- d. Transformateur
- e. Oscilloscope Agilent Technologies DSO1002A
- f. Robot cartésien (support de la Sonde de Pitot)
- g. Sonde de Pitot métallique
- h. Sonde de tension
- i. Surface active
- j. Ordinateur

La surface active est constituée de plusieurs DBDS placées successivement, leur nombre variant de 1 à 14 dans notre étude. La configuration de DBDS choisie est de type asymétrique pour créer un plasma de surface uniquement sur une seule face de la barrière celle en contact avec l'air à traiter. La polarité des électrodes est telle que : i) la petite électrode (celle exposée) est l'électrode de masse, ii) la grande électrode (celle non-exposée) est l'électrode de haute-tension. La mesure du vent électrique se fait par une sonde vélocimétrique de type Pitot placée en aval de la dernière DBDS de la surface active. La figure ci-dessous (Figure 18) schématise une surface active à 2 DBDS et son dispositif de mesure vélocimétrique.



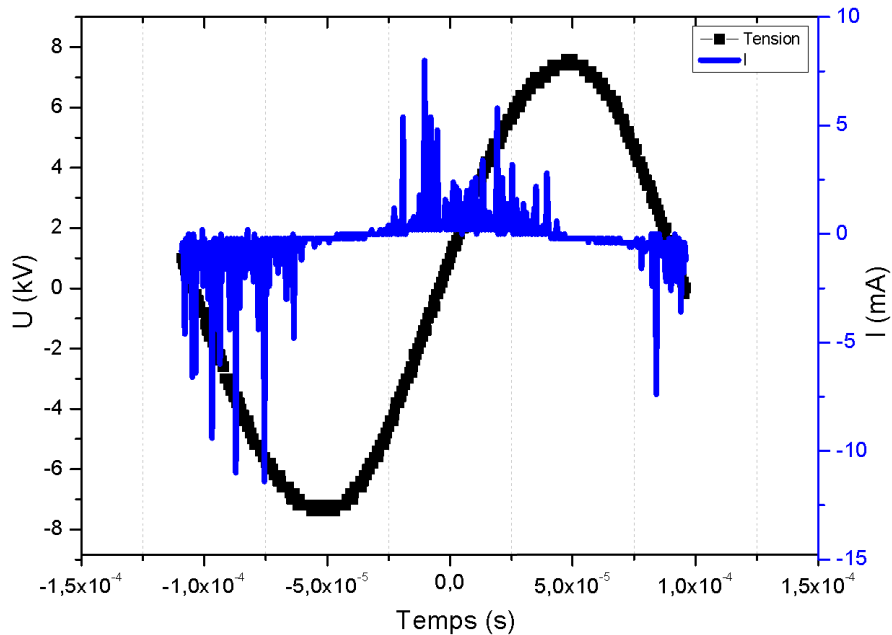
**Figure 18.** Position de la sonde de Pitot par rapport à la dernière bande de la surface active suivant les axes  $x, y$  et  $z$  : (exemple de deux bandes d'électrodes à la surface du diélectrique) a: électrode passive; b: électrode HT; c: barrière diélectrique; d: Sonde de Pitot; s: shunt.

La surface active est alimentée par un générateur haute-tension sinusoïdale. Dans cette thèse, on se limite à ce type de générateur en raison des contraintes industrielles. Cette alimentation a été réalisée et testée à MINES ParisTech. Le principe de cette alimentation repose sur l'amplification-transformation d'un signal sinusoïdal délivré par un Générateur Basses Fréquences (GBF). L'amplification se fait avec un coefficient d'amplification variant de 0 à 32 dB. La transformation se fait, elle, avec un facteur dépendant de la fréquence (facteur max = 100). La surface active est connectée en sortie de cette alimentation, à ses bornes la tension peut aller jusqu'à 10 kV, elle est mesurée à l'aide d'une sonde de haute-tension de rapport 1/1000. Un shunt d'une résistance de  $100 \Omega$  est placé à la masse de la surface active afin de mesurer le courant traversant la surface. La tension et le courant sont visualisés et enregistrés sur un oscilloscope à haute fréquence d'échantillonnage de l'ordre du ns.



**Figure 19.** Dispositif expérimental de la surface active à MINES ParisTech – Sophia Antipolis : a) GBF, b) boîtier de commande du robot cartésien, c) amplificateur, d) transformateur, e) oscilloscope, f) robot cartésien, g) sonde de Pitot, h) sonde de tension, i) surface active, j) ordinateur.

Un exemple d'oscillogramme (U, I) obtenu en décharge allumée est donné sur la Figure 20. Le signal du courant possède deux composantes : la première correspond à une porteuse sinusoïdale de même période que la tension. Notons toutefois que le courant est en déphasage avec la tension dû à la charge capacitive du système. La seconde s'additionne à la porteuse et est constituée de très courtes impulsions de courant caractéristiques qui correspondent chacune à une microdécharge des DBDS.



**Figure 20.** Oscillogrammes tension (kV) - courant (mA) en fonction du temps ( $\mu$ s) à  $F = 5$  kHz.

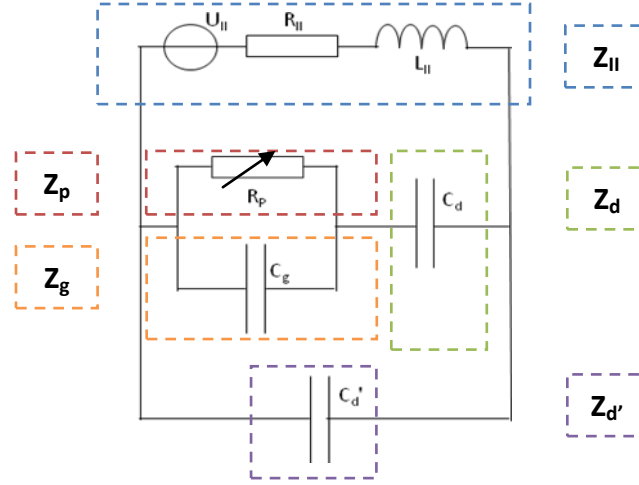
On peut diviser la chaîne électrique en deux parties : i) le circuit primaire, comportant le GBF, l'amplificateur et le primaire du transformateur, ii) le circuit secondaire, comportant le secondaire du transformateur et notre dipôle c'est-à-dire la surface active. Cette division nous amène à la modélisation électrique RLC du circuit secondaire.

Il est important de noter que le primaire du transformateur ne pouvant supporter qu'une tension maximum de 330 V (correspondant à un réglage donné tension/GBF en amont), toutes les expériences de cette thèse ont été effectuées au réglage tension/GBF et gain d'amplification maximum supportés par le transformateur. Le but étant de fournir le plus de puissance possible, à toute fréquence, au système.

### 2.3. Modélisation électrique du circuit secondaire

Le circuit secondaire est constitué des composants du secondaire du transformateur à savoir la résistance ( $R_{II}$ ) égale à 3,73 k $\Omega$  et l'inductance ( $L_{II}$ ) égale à 16 H de la bobine secondaire, et un générateur équivalent à un tore magnétique ainsi que des composants de notre dipôle. Ce dernier peut se modéliser par le circuit inférieur de la Figure 21 composé de : i) la capacité ( $C_d'$ ) du diélectrique de la zone de recouvrement des électrodes

(partie symétrique), ii) la capacité ( $C_d$ ) du diélectrique dans la zone de non recouvrement des électrodes (partie asymétrique), iii) la capacité ( $C_g$ ) du gaz dans la zone de non recouvrement et iv) la résistance ( $R_p$ ) du plasma qui est la résistance équivalente de tous les microfilaments de la DBDS.



**Figure 21.** Représentation schématique du circuit électrique équivalent du système.

Les impédances du diélectrique de la partie asymétrique ( $Z_d$ ), de la partie symétrique ( $Z_d'$ ), du gaz ( $Z_g$ ) et du plasma ( $Z_p$ ), sont données ci-dessous :

$$Z_d = \frac{1}{j\omega C_d} ; Z_d' = \frac{1}{j\omega C_d'} ; Z_g = \frac{1}{j\omega C_g} ; Z_p = R_p$$

$C_g$ ,  $C_d$  et  $C_d'$  sont calculés d'après les expressions suivantes (2.1), (2.2) et (2.3):

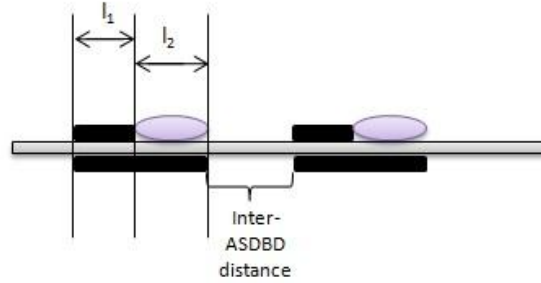
$$C_g = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r^g S_2}{e_g} \quad (2.1)$$

$$C_d = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r^d S_2}{e_d} \quad (2.2)$$

$$C_d' = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r^d S_1}{e_d} \quad (2.3)$$

Ces capacités dépendent de la géométrie des électrodes, l'épaisseur du gaz (pour  $C_g$ ) et l'épaisseur du diélectrique (pour  $C_d$  et  $C_d'$ ).  $C_d'$  dépend de la largeur d'électrode ( $l_1$ ). Quant à

$C_d$  et  $C_g$ , ils dépendent de l'épaisseur du gaz qui est la largeur du plasma ( $l_2$ ) comme illustré dans la Figure 22. Dans les relations (2.1 ; 2.2 et 2.3),  $\varepsilon_0$  est la permittivité du vide ( $= 8.85 \times 10^{-12}$  F.m<sup>-1</sup>),  $\varepsilon_r^g$  ( $= 1$ ) et  $\varepsilon_r^d$  sont les permittivités relatives de l'air et du diélectrique respectivement.  $S_1$  est la surface d'électrode égale au produit de la longueur ( $L_e$ ) et la largeur ( $l_1$ ) d'électrode en m<sup>2</sup>,  $S_2$  est la surface correspondante au produit de la longueur ( $L_e$ ) et la largeur du plasma ( $l_2$ ) en m<sup>2</sup>,  $e_d$  est l'épaisseur du diélectrique en mètre et  $e_g$  est l'épaisseur du plasma suivant la direction  $Oy$ . L'épaisseur du plasma est déterminée en fonction de la longueur des filaments voire la différence entre les deux largeurs d'électrodes par analyse de l'intensité lumineuse du plasma.



**Figure 22.** Différence entre la largeur entre les électrodes ( $l_1$ ) et la partie de création du plasma ( $l_2$ ).

Dans toute notre étude nous avons choisi les valeurs géométriques suivantes pour les électrodes :  $L_e = 120$  mm,  $l_1 = 2$  mm et  $l_2 = 5$  mm. Ces valeurs se basent sur les résultats d'une étude paramétrique complète de l'influence des paramètres géométriques d'électrodes sur la conversion électromécanique, obtenus par les travaux de Takeuchi *et al.* (N. Takeuchi, 2009).

Comme illustrée sur la Figure 21, la capacité du gaz ( $C_g$ ) et la résistance du plasma ( $R_p$ ) sont placées en parallèle dans le circuit électrique équivalent. La résistance du plasma est

$$\text{déterminée d'après la relation suivante : } R_p(t) = \frac{U_p(t)}{I_p(t)} \quad (2.4)$$

$$\text{Tels que : } U_p(t) = \left(1 + \frac{C'_d}{C_d}\right)U_m(t) - \frac{1}{C_d} \int I_m(t) dt \quad (2.5)$$

$$\text{Et } I_p(t) = \left(\frac{C_d + C_g}{C_d}\right)I_m(t) + \left[\frac{(C_d + C_g)C'_d + C_d C_g}{C_d}\right] \frac{dU_m(t)}{dt} \quad (2.6)$$

Où  $U_m(t)$  et  $I_m(t)$  sont les tensions et courant mesurés aux bornes de la surface active.

L'impédance résultante des deux paramètres est ajoutée à l'impédance de la première partie du diélectrique (qui est la capacité  $C_d$ ) et correspond à la relation suivante :

$$\underline{Z}_{p,g,d}(f) = \frac{1 + j2\pi.f.R_p(C_d + C_g)}{-4\pi^2 f^2 R_p C_d C_g + j2\pi.f.C_d} \quad (2.7)$$

$\underline{Z}_{p,g,d}(f)$  est parallèle à  $\underline{Z}_{d'}$  ( $f$ ), l'impédance du diélectrique dans la partie symétrique. Chaque terme du circuit électrique équivalent du système est calculé séparément, permettant ainsi la détermination de l'impédance totale de la DBDS comme détaillée dans la relation suivante :

$$\underline{Z}_{DBDS}(f) = \frac{1 + j2\pi.f.R_p(C_d + C_g)}{-4(C_{d'}.R_p(C_d + C_g) + R_p C_d C_g)f^2\pi^2 + j2\pi.f.(C_d + C_{d'})} \quad (2.8)$$

A partir du calcul de l'impédance de l'actionneur, on a pu établir le calcul de l'impédance totale  $\underline{Z}_T(f)$  du circuit secondaire :

$$\underline{Z}_T(f) = \frac{(1 - 4(R_{II}(C_{d'}.R_p(C_d + C_g) + R_p C_d C_g) + L_{II}(C_d + C_{d'}))f^2\pi^2 + 2\pi f j(R_p(C_g + C_d) + R_{II}(C_d + C_{d'}) - 4\pi^2 f^2 L_{II}(C_{d'}.R_p(C_d + C_g) + R_p C_d C_g))}{4(-C_{d'}.R_p(C_d + C_g) - R_p C_d C_g)\pi^2 f^2 + 2\pi f j(C_d + C_{d'})} \quad (2.9)$$

Les impédances  $\underline{Z}_{DBDS}(f)$  et  $\underline{Z}_T(f)$  nous permettent de calculer la fonction de transfert du système :

$$H(jf) = \frac{\underline{Z}_{DBDS}}{\underline{Z}_T} = \frac{1 + 2\pi f j R_p(C_d + C_g)}{1 - 4(R_{II}(C_{d'}.R_p(C_d + C_g) + R_p C_d C_g) + L_{II}(C_d + C_{d'}))f^2\pi^2 + 2\pi f j(R_p(C_d + C_g) + R_{II}(C_d + C_{d'}) - 4\pi^2 f^2 L_{II}(C_{d'}.R_p(C_d + C_g) + R_p C_d C_g))} \quad (2.10)$$

Cette fonction dépend de la permittivité du diélectrique et de la géométrie de la DBDS.

L'impédance de la DBDS  $\underline{Z}_{DBDS}(f)$  (voir relation 2.5) nous permet de calculer la densité linéique de puissance par unité de longueur d'électrodes  $p_e$  ( $W/cm$ ) :



$$p_e(\text{W/cm}) = \frac{U_{rms}^2 \text{Re}[Z_{DBDS}(f)]}{L_e \cdot (\text{Re}[Z_{DBDS}(f)]^2 + \text{Im}[Z_{DBDS}(f)]^2)} \quad (2.11)$$

Où  $U_{rms}^2$  est le carré de la tension efficace mesurée en kV,  $L_e$  est la longueur des électrodes en cm,  $\text{Re}[Z_{DBDS}(f)]$  et  $\text{Im}[Z_{DBDS}(f)]$  sont les parties réelle et imaginaire de l'impédance de la DBDS données en ohms.

L'impédance d'une surface active à plusieurs DBDS s'exprime :

$$Z_{N-DBDS} = \frac{Z_{DBDS}}{N} \quad (2.12)$$

Où  $N$  est le nombre de DBDS disposées successivement, branchées parallèlement.

Le générateur dans le circuit de la Figure 21 n'est pas un générateur idéal de tension mais un générateur de puissance à cause des caractéristiques de l'amplificateur. Les trois paramètres de réglage qui font varier la puissance électrique reçue au dipôle sont :  $U_{GBF}$ ,  $G$  (gain du GBF) et fréquence. Pour un même dipôle, lorsque le couple de valeurs ( $U_{GBF}$ ,  $G$ ) est fixe, seule la fréquence d'excitation fait varier la puissance électrique reçue.

De plus,  $U$  et  $I$  aux bornes du dipôle peuvent s'ajuster en fonction de la valeur de l'impédance de celui-ci de manière à conserver la puissance reçue à la résonance. Ainsi, deux dipôles différents (dans la même gamme de valeur d'impédance), recevront la même puissance électrique à leur fréquence de résonance respective, pour un même réglage primaire du couple ( $U_{GBF}$  ;  $G$ ).

Compte tenu de l'expression de  $Z_{N-DBDS}$ , ceci implique que la valeur de la tension mesurée devrait en principe suivre la loi suivante en fonction du nombre de DBDS de la surface :

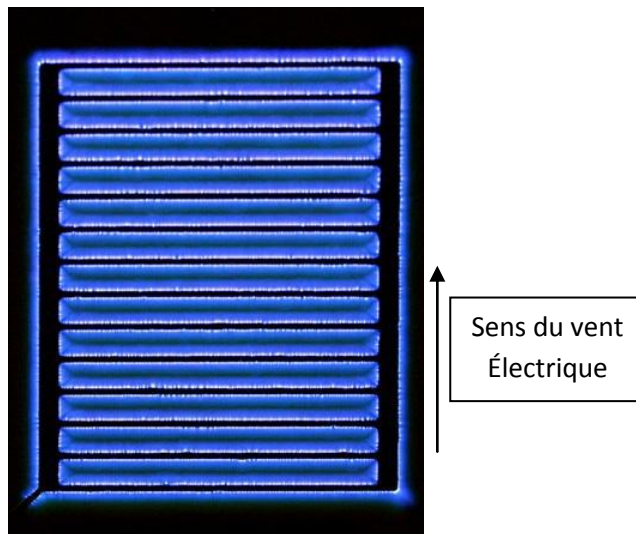
$$\frac{U_{rms,DBDS}}{U_{rms,N-DBDS}} = \sqrt{N} \quad (2.13)$$

Cette loi a pu être vérifiée avec un écart de  $\pm 10\%$  lors de nos expériences.

## 2.4. Analyse de l'intensité lumineuse du plasma

Outre l'étude électrique de la surface active, il est intéressant de faire une analyse optique du plasma pour localiser précisément les zones de décharge à la surface de la barrière et de déterminer l'épaisseur du plasma.

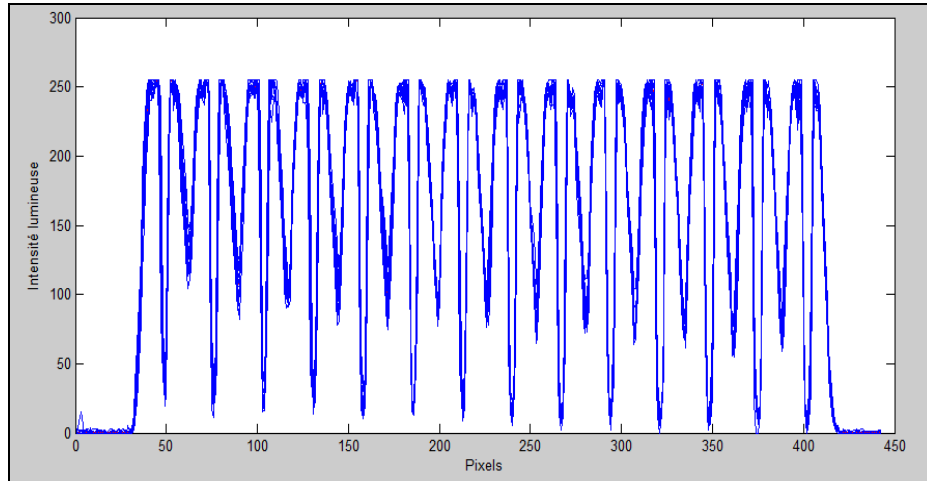
A l'aide d'une caméra Canon d'objectif EF-S 18-55mm f/3.5-5.6 IS II, des photographies de la surface de la barrière ont été prises avec plasma (plasma ON) et sans plasma (plasma OFF) afin d'effectuer une soustraction d'images [Plasma ON – Plasma OFF]. La Figure 23 montre le résultat de cette soustraction pour une surface active de 14 DBDS. Elle met en évidence la génération de décharges lumineuses tout autour des électrodes malgré la configuration asymétrique des DBDS et la mesure d'une résultante de vent électrique dirigée dans le sens représenté sur la Figure 23. L'épaisseur du plasma étant égale à 3 mm, correspondante à la surface  $S_2$ .



**Figure 23.** Image obtenue par soustraction de photographies de la surface active [Plasma ON - Plasma OFF].  
Caractéristiques de la DBDS : nature de la barrière résine époxy,  $N = 14$ , distance inter-DBDS ( $d$ ) = 10 mm,  
largeur de l'électrode non-exposée ( $L_{\text{électrode}}$ ) = 5 mm.

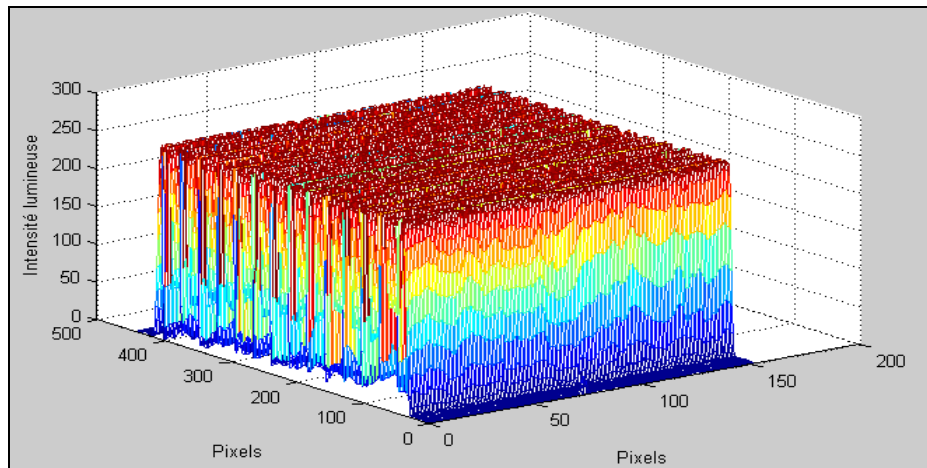
Cette image a ensuite subi un traitement sous Matlab consistant à quantifier l'intensité lumineuse de chaque pixel de l'image et à établir un mapping 2D de la valeur d'intensité. La Figure 24 présente un profil d'intensité lumineuse obtenu selon l'axe ( $Ox$ ) (le vent électrique est orienté de gauche à droite sur ce profil) passant par le milieu de chaque électrode. La présence d'une zone de forte intensité lumineuse de part et d'autre de chaque électrode est confirmée par ce profil prouvant ainsi la création de décharges en amont et en aval de chaque électrode. Cette double création entraîne ainsi, sur le plan mécanique,

deux actions de poussée successives en opposition dans la direction de l'écoulement. On remarque toutefois que les décharges amont sont moins larges que les décharges aval, ce qui explique l'orientation de la poussée dans un sens préférentiel qui est bien celui attendu.



**Figure 24.** Profil de l'intensité lumineuse suivant l'axe  $Ox$  passant par le milieu des bandes.

La Figure 25 donne le mapping 2D complet de l'intensité lumineuse de la décharge de surface.



**Figure 25.** Mapping de l'intensité lumineuse de la décharge de surface.

## 2.5. Etude électromécanique de la surface active en fonction des différents paramètres

Nous rappelons que dans toute notre étude, aussi bien sur les surfaces actives seules que sur le canal actif, les paramètres géométriques des électrodes sont les suivants :

- Largeur de l'électrode non-exposée (HT) = 5 mm
- Largeur de la contre-électrode exposée (masse) = 2 mm
- Longueur des électrodes = 120 mm

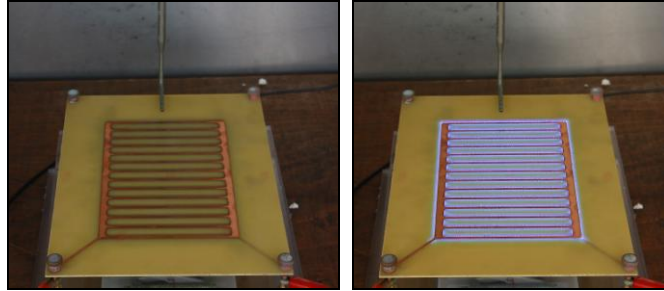
La modification continue du banc expérimental de la surface active en vue de son amélioration nous a permis de tester plusieurs matériaux diélectriques : résine époxy de circuit imprimé ( $\epsilon_r = 3,5$  ; épaisseur = 2 mm), plaques en Borosilicate ( $\epsilon_r = 4,6$  ; épaisseur = 1 mm) et en Quartz ( $\epsilon_r = 3,5$  ; épaisseur = 1 mm). Une étude de la réponse électromécanique de surfaces actives fabriquées avec des barrières diélectriques de permittivités et d'épaisseurs différentes a été menée pour confirmer les résultats de la littérature.

Les réglages d'alimentation au primaire sont les suivants :

- Pour la surface active en résine époxy :  $U_{GBF} = 1,5$  V et  $G = +23$  dB.
- Pour les surfaces actives en borosilicate :  $U_{GBF} = 1,5$  V et  $G = +26$  dB. Le choix des couples de valeurs de réglage ( $U_{GBF}$  ;  $G$ ) repose sur le fait qu'au-delà de ce gain, les expériences montrent que la surface à une DBDS est détruite par rupture de la barrière (tension électrique limite).

### 2.5.1. Résine époxy

Le premier matériau diélectrique testé est la résine époxy, ayant une permittivité diélectrique relative de 3,5. Pour le test, une surface active ayant une barrière époxy d'épaisseur 2 mm et possédant 14 DBDS distantes de 10 mm deux à deux et composées d'électrodes en cuivre de conductivité électrique  $\sigma = 59,6 \times 10^6$  S.m<sup>-1</sup> déposées et gravées par voie chimique du circuit imprimé sur la barrière, a été fabriquée.

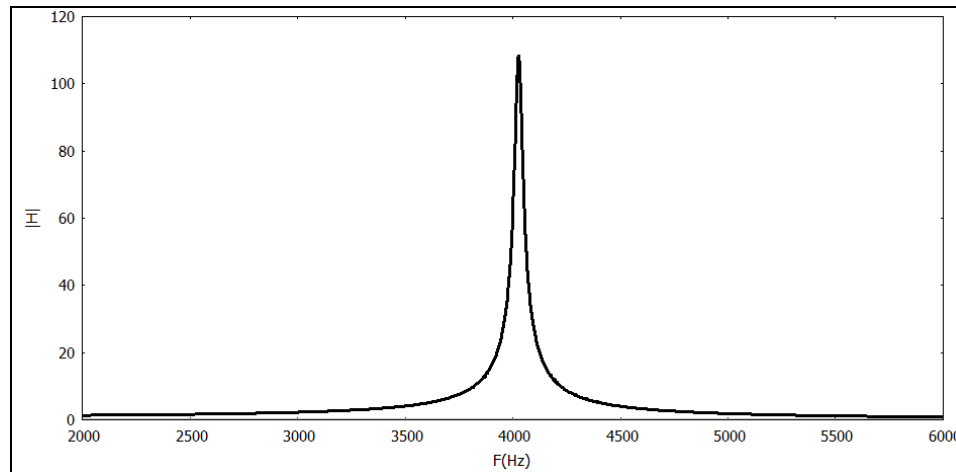


**Figure 26.** Photos du circuit imprimé en absence (gauche) et en présence du plasma (droite) (Barrière en résine époxy,  $N = 14$ , épaisseur = 2 mm, distance inter-DBDS ( $d$ ) = 10 mm, largeur de l'électrode non-exposée = 5 mm, largeur de la contre-électrode exposée = 2 mm).

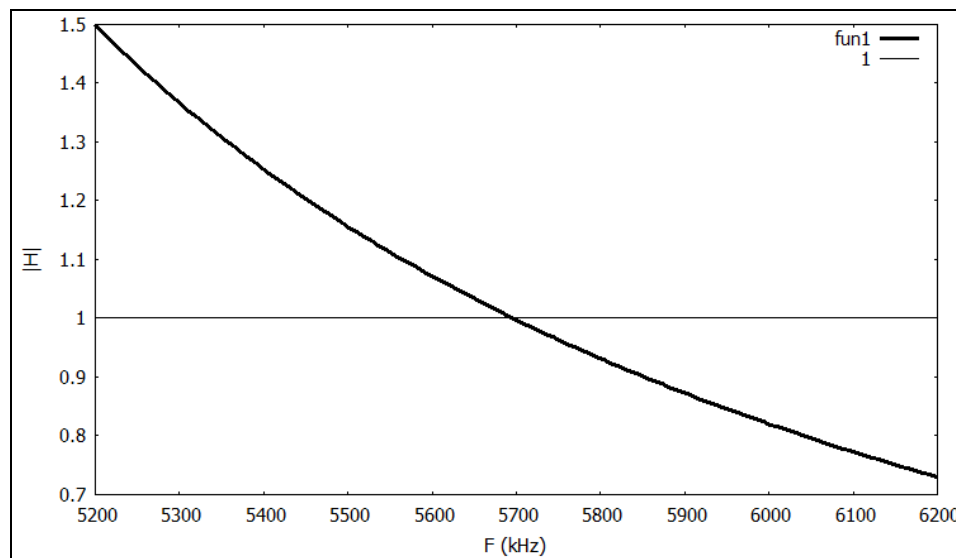
Pour l'étude des comportements électrique et mécanique de cette surface active, on procède de la façon suivante : (i) calcul de la fonction de transfert du système et détermination théorique de la fréquence de résonance, ii) vérification expérimentale de la fréquence de résonance par le tracé de la courbe de réponse fréquentielle  $P_{\text{él.}}(F)$ , et iii) mesure de la vitesse du vent électrique induit puis calcul de la puissance mécanique.

#### ***2.5.1.1. Détermination théorique de la fonction de transfert : S.A. en résine époxy***

En se basant sur le modèle électrique du circuit secondaire, on détermine le module de la fonction de transfert  $H$  en fonction de la fréquence. La courbe de  $H$  est tracée sur la Figure 27. Elle fait apparaître une fréquence de résonance à 4 kHz, fréquence à laquelle la surtension est maximum. De cette courbe, il est également possible d'identifier une plage fréquentielle de surtension, plage allant de 0,5 kHz à 5,69 kHz (Figure 28).



**Figure 27.** Evolution du module de la fonction de transfert du système électrique équivalent en fonction de la fréquence appliquée pour la surface active en résine époxy ( $L_{\text{contre-électrode}} = 2 \text{ mm}$ ,  $L_{\text{électrode}} = 5 \text{ mm}$ ,  $d = 1 \text{ cm}$ ,  $N = 14$ ).



**Figure 28.** Intersection entre la droite de gain 1 et la courbe théorique de la surface active en résine époxy.

### 2.5.1.2. Courbe expérimentale de réponse fréquentielle : S.A. en résine époxy

Pour le traçage de la courbe expérimentale de réponse fréquentielle, la puissance électrique injectée dans le dipôle est calculée à l'aide des mesures expérimentales de la tension  $U$  et du courant  $I$  aux bornes du dipôle.

La puissance électrique  $P_{el.}$  est obtenue par le calcul intégral suivant :

$$P_{el.}(W) = F \int_0^T U(t)I(t)dt \quad (2.11)$$

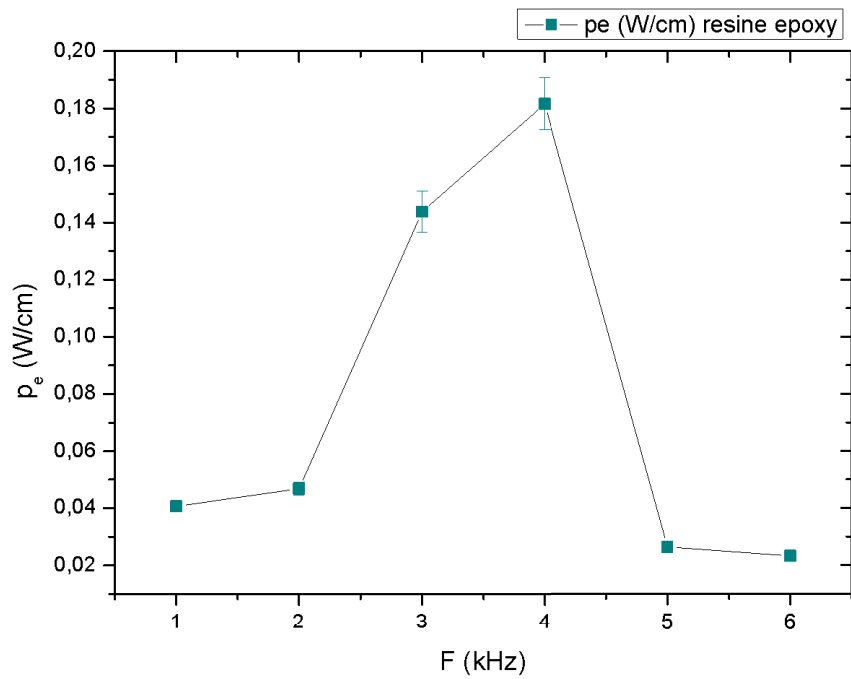
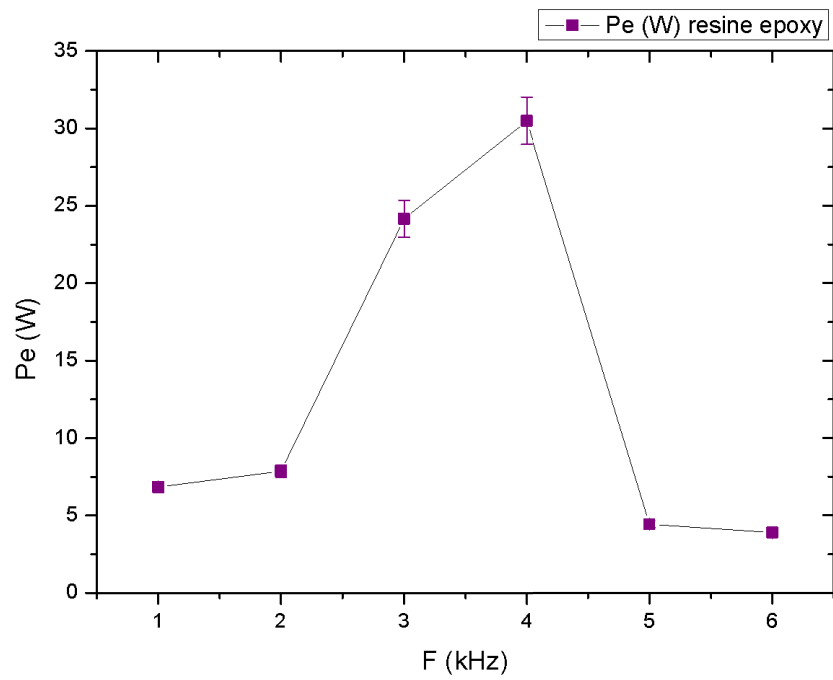
Où F est la fréquence appliquée en KHz et T la période de la tension en s.

Pour calculer cette intégrale, il est indispensable que la résolution de la courbe de courant soit suffisamment grande. En effet, les pics de courant présents sur l'oscillogramme de courant ont une durée moyenne de l'ordre de la dizaine de nanosecondes (durée de vie approximative d'une microdécharge). Afin de remédier à cela, nous avons sélectionné une valeur de la fréquence d'échantillonnage de l'oscilloscope supérieure à 100 MHz.

Un calcul supplémentaire de la densité linéique de puissance injectée  $p_e (W/cm)$  (par unité de longueur de DBDS) est effectué, tel que :

$$p_e(W/cm) = \frac{P_{el.}(W)}{NL_e} \quad (2.12)$$

La Figure 29 représente la puissance électrique injectée en fonction de la fréquence, entre 1 et 6 kHz. Sur cette courbe, la puissance électrique maximum de 30 W est obtenue pour une fréquence aux alentours de 4 kHz, c'est la fréquence de résonance de notre surface active.



**Figure 29.** Variation de la puissance électrique injectée en fonction de la fréquence appliquée pour la surface active en résine époxy ( $L_{\text{contre-électrode}} = 2 \text{ mm}$ ,  $L_{\text{électrode}} = 5 \text{ mm}$ ,  $d = 1 \text{ cm}$ ).



### **2.5.1.3. Caractérisation mécanique : S.A. en résine époxy**

Après la détermination de la puissance électrique injectée en fonction de la fréquence, nous étudions à présent la réponse mécanique de la surface active par : i) la mesure de la vitesse de l'écoulement du vent électrique, ii) le tracé du profil de vitesse ainsi obtenu, iii) le calcul de la puissance mécanique produite.

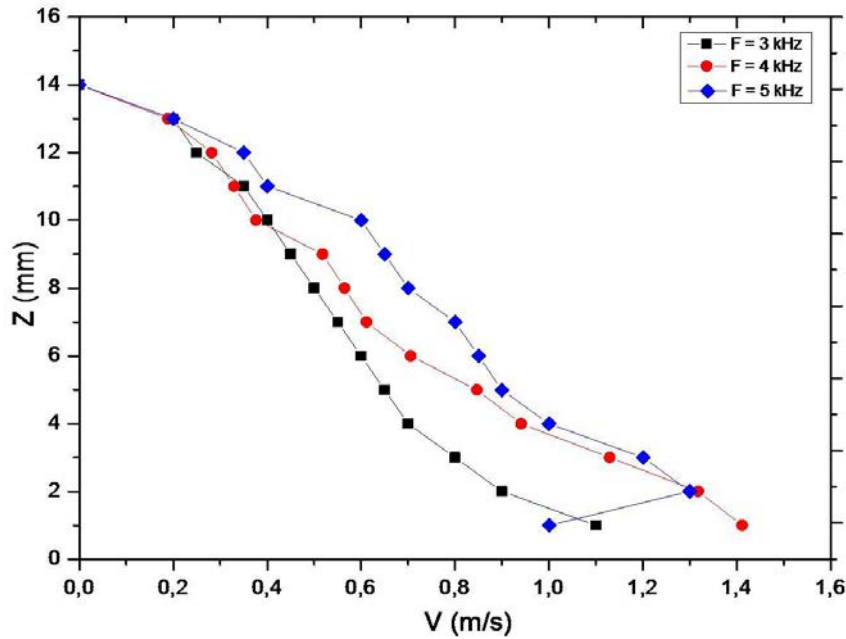
La vitesse du vent électrique est mesurée à l'aide d'une sonde de Pitot, reliée à un boîtier d'acquisition numérique de résultats. Un système de déplacement automatisé permet de positionner la sonde de Pitot suivant les axes d'orientation  $x, y$  et  $z$  avec un pas de 0,01 mm sur une course de 400 mm. La pression dynamique du flux d'air induit par le plasma est mesurée par la sonde de Pitot et convertie en valeurs numériques enregistrés sur un PC, mesurant ainsi la valeur de vitesse du vent électrique. Toutes les valeurs de vitesse mesurées ont une erreur égale à  $\pm 0,2$  m/s et tous les appareils de mesure sont placés dans une cage de Faraday pour éviter les interférences électromagnétiques.

La sonde de Pitot est placée ici à une distance fixe de 8 mm de la dernière DBDS de la surface suivant l'axe  $Ox$ , au milieu de la surface suivant l'axe  $Oy$ , et à une hauteur  $z$  allant de 1 à 14 mm au-dessus de la surface active.

Les profils de vitesse suivant l'axe  $Oz$  tracés sur la Figure 30 ont été obtenus aux fréquences respectives : 3 kHz, 4 kHz et 5 kHz. On remarque que le profil ayant la vitesse maximum la plus importante des trois est le profil obtenu à la fréquence de résonance du système, c'est-à-dire 4 kHz. C'est à cette fréquence que la conversion semble la plus performante.

Ces profils montrent que la vitesse est maximum au plus près de la surface de la barrière. L'impossibilité de faire des mesures de vitesse à l'aide de la sonde dans nos conditions en dessous de 1 mm (la sonde de Pitot arrivant en butée contre la barrière), ne nous a pas permis de visualiser la zone d'augmentation rapide de la vitesse d'écoulement depuis la surface jusqu'au point de vitesse maximum. (E. Moreau, 2007) a montré avec des mesures plus précises que la vitesse suivait un profil parabolique dans cette zone.

Pour les fréquences de 4 et 5 kHz, les profils font apparaître une forme escarpée entre  $z = 5$  mm et  $z = 14$  mm. Cela peut résulter en aval de la dernière DBDS, d'une superposition des jets et contre-jets produits par les DBDS successives de la surface active.



**Figure 30.** Profils de vitesse du vent électrique mesurée ( $L_{\text{contre-électrode}} = 2 \text{ mm}$ ,  $L_{\text{électrode}} = 5 \text{ mm}$ ,  $d = 1 \text{ cm}$  à  $3 \text{ kHz} < F < 5 \text{ kHz}$  pour la résine époxy).

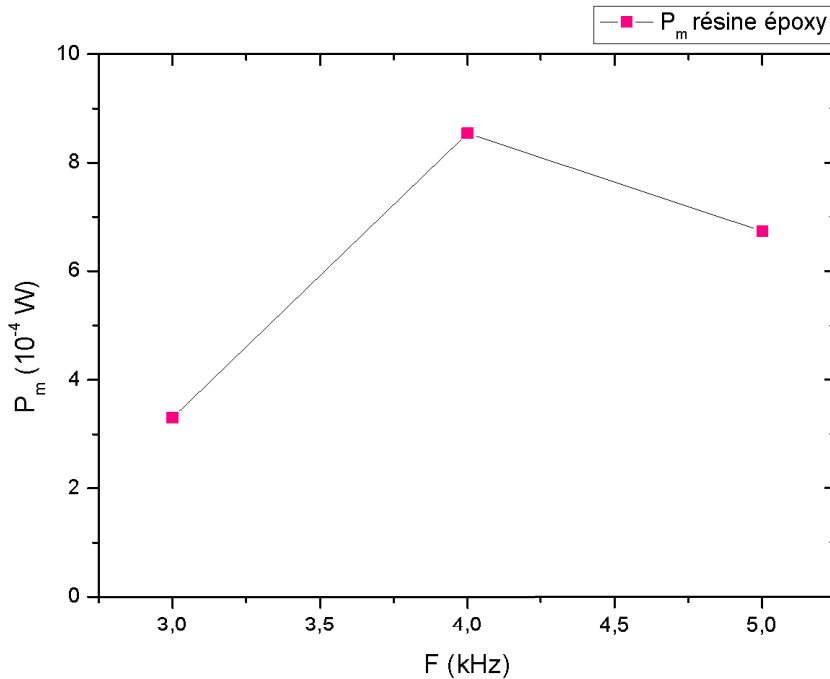
### 2.5.1.3. A. Calcul de la puissance mécanique

A partir des trois profils précédents, nous calculons la puissance mécanique  $P_m$  produite par la surface active à ces valeurs de fréquence. Pour effectuer ce calcul, on considère que la vitesse augmente depuis la surface jusqu'au point de vitesse maximum en suivant une loi parabolique de couche limite.

Sous l'hypothèse du flux stationnaire en fonction du temps, la puissance mécanique est exprimée de la manière suivante (M. Forte, 2007) :

$$P_m (W) = \frac{1}{2} \rho l \int_{z=0}^{z=\delta'} V^3(z) dz \quad (2.13)$$

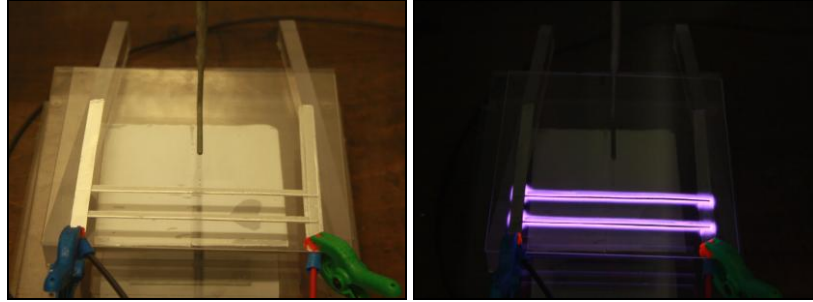
Où  $\rho$  est la densité de l'air ( $1.184 \text{ kg.m}^{-3}$ , à  $25^\circ\text{C}$ ,  $P = 1 \text{ bar}$ ),  $V(z)$  est la vitesse mesurée en fonction de  $z$ ,  $\delta'$  est l'épaisseur de la couche limite et  $l$  la longueur de l'électrode. La Figure 31 présente l'évolution de la puissance mécanique en fonction de la fréquence d'excitation des DBDS.



**Figure 31.**  $P_m = f(F)$  pour la résine époxy ( $L_{\text{contre-électrode}} = 2$  mm,  $L_{\text{électrode}} = 5$  mm,  $d = 1$  cm).

### 2.5.2. Verre Borosilicate (Pyrex ©)

Nous testons à présent un autre matériau diélectrique : le verre borosilicate de qualité Pyrex©. Le verre borosilicate possède des meilleures propriétés électriques, thermiques et mécaniques que la résine époxy (L. Oukacine, 2009). De plus, il a une permittivité diélectrique relative ( $\epsilon_r = 4,6$ ) supérieure à la résine époxy. Pour des raisons techniques, nous avons changé le matériau des électrodes qui est maintenant en aluminium et non plus en cuivre. Malgré la plus faible conductivité électrique de l'aluminium ( $\sigma_{\text{Al}} = 37,7 \times 10^6$  S.m<sup>-1</sup>) et son potentiel redox plus faible que le cuivre ( $\sigma_{\text{Cu}} = 59,6 \times 10^6$  S.m<sup>-1</sup>), l'aluminium est facile à travailler et a une bonne tenue à la corrosion oxydative grâce à sa passivation. Pour faciliter leur réalisation, les surfaces actives Pyrex © testées ici ont été volontairement choisies plus simples, elles possèdent au plus deux DBDS dans le but d'étudier la modification du comportement électro-mécanique de la DBDS en fonction du nombre de DBDS.



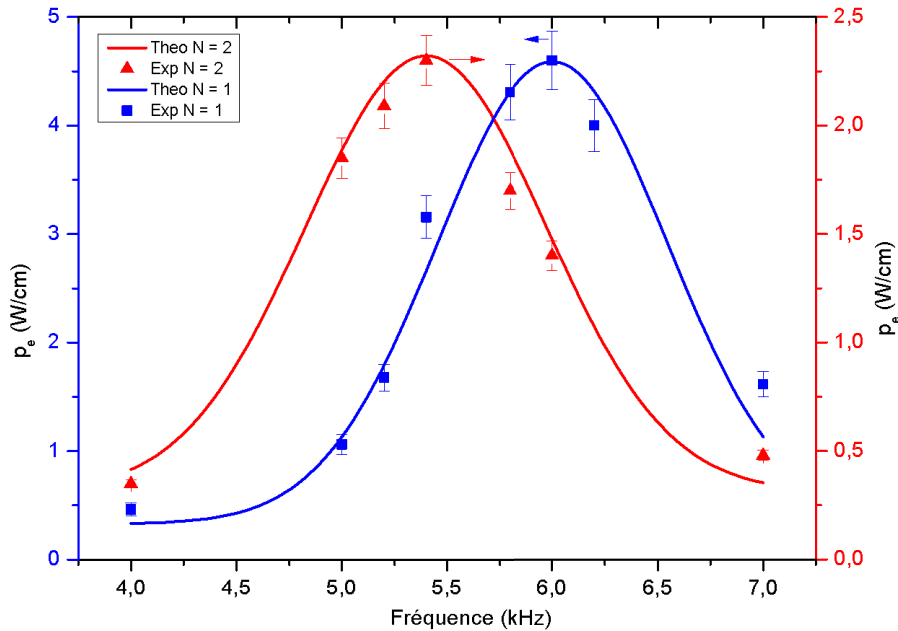
**Figure 32.** Exemple de verre borosilicate (à deux DBDS) en absence du plasma (à gauche) et en présence du plasma (à droite).

### ***2.5.2.1. Réponse fréquentielle : S.A. en Pyrex ©***

L'étude de la réponse fréquentielle se base sur la même démarche que précédemment, appliquée à une surface active en Pyrex © comportant une DBDS ( $N = 1$ ) et une surface identique à deux DBDS ( $N = 2$ ).

Pour la surface à une DBDS, le circuit électrique équivalent est le même que celui indiqué sur la Figure 21. Pour la surface à deux DBDS, une duplication parallèle convient. L'impédance de cette dernière est dans ce cas égale à la moitié de  $Z_{DBDS}(f)$ , conformément à la relation (2.9).

La Figure 33 présente les réponses fréquentielles théorique et expérimentale de la densité linéique de puissance injectée dans les deux surfaces actives pour les mêmes conditions d'alimentation.



**Figure 33.** Densité linéique de puissance obtenue par le calcul théorique et la mesure expérimentale en fonction de la fréquence à N = 1 et N = 2.

Sur cette figure, la correspondance entre les courbes théoriques et les points expérimentaux est bonne. Elles montrent que la densité linéique de puissance est maximum à 6 kHz pour N = 1 et à 5,4 kHz pour N = 2, qui sont les fréquences de résonance du système {surface active, générateur} des deux surfaces respectives.

En effet, l'ajout d'une deuxième DBDS modifie l'impédance de la surface active en la diminuant, ce qui décale la fréquence de résonance vers les basses fréquences.

Les valeurs de la densité linéique de puissance des DBDS sont les mêmes pour les deux méthodes utilisées : 4,6 W/cm pour la surface à une DBDS et 2,3 W/cm, soit deux fois moins, pour la surface à deux DBDS.

Cela veut dire que la puissance électrique totale injectée pour N = 1 est la même que pour N = 2, s'expliquant par le fait que le générateur utilisé ici n'est pas un générateur idéal de tension mais un générateur de puissance qui s'adapte à l'impédance du dipôle qu'il alimente. Les mesures montrent que le rapport entre les valeurs de tension efficace pour N = 1 et N = 2 est en effet égal à  $\sqrt{2}$  ( $\pm 10\%$ ).

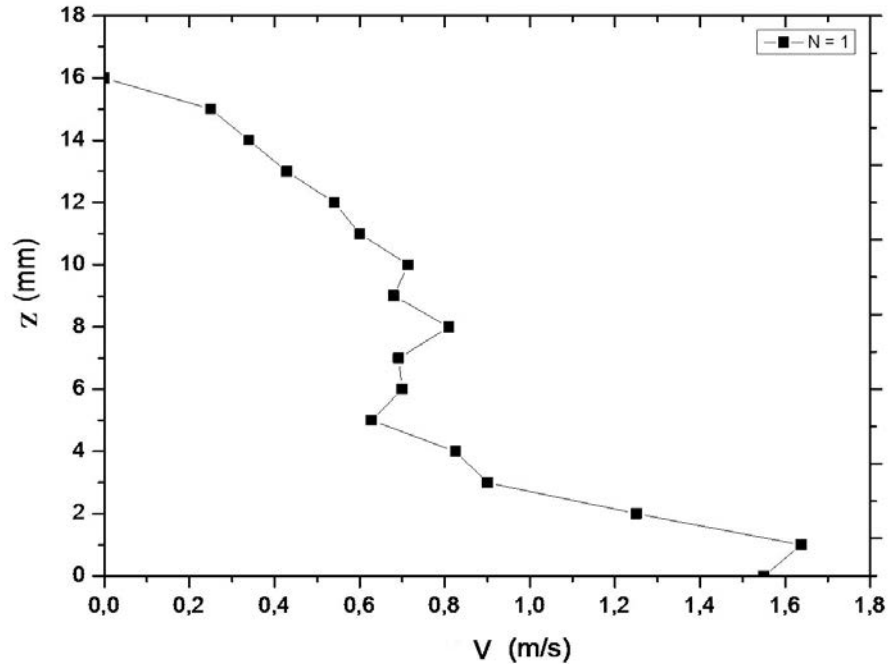
### **2.5.2.2. Caractérisation mécanique : S.A. en Pyrex ©**

Après avoir déterminé la fréquence de résonance de chaque surface, une caractérisation de la structure de la couche limite de celles-ci est effectuée, suivie par l'analyse de la réponse mécanique de la surface à deux DBDS en fonction de la distance inter-DBDS à la fréquence de résonance.

Tous les profils de vitesse sont réalisés à : *i*)  $x$  fixé à 16 mm derrière la dernière DBDS, distance minimale pour éviter les interactions entre le plasma et la Sonde de Pitot métallique (cette distance de sécurité est plus grande qu'avec la résine époxy car les interactions observées sont plus importantes), *ii*)  $y$  fixé au milieu de la longueur de bande et, *iii*)  $z$  allant de 1 mm à 16 mm au-dessus de la barrière.

#### **2.5.2.2. A. Surface active à une DBDS**

Les mesures de la vitesse du vent électrique ont été effectuées dans le plan vertical de la surface active en aval de l'électrode exposée. Les conditions électriques pour lesquelles les expérimentations ont été effectuées sont les suivants :  $f_0 = 6$  kHz (fréquence de résonance), et  $p_e = 4,6$  W/cm. Comme le montre la Figure 34, le profil du vent électrique obtenu est divisé en trois couches :  $0 < z < 1$  mm,  $1 < z < 4$  mm and  $4 < z < 16$  mm. La première, d'épaisseur 1 mm, dans laquelle la vitesse croit rapidement de 0 à 1,65 m/s (vitesse maximum mesurée) selon un profil parabolique comme mesuré par (E. Moreau, 2007). La deuxième d'épaisseur 3 mm, dans laquelle la décroissance de la vitesse (1,65 m/s - 0,6 m/s) peut être donnée par une loi de puissance d'exposant  $\frac{1}{4}$  et correspondant à une zone laminaire où le  $Re \approx 180$ . Une troisième d'épaisseur 12 mm, dans laquelle la vitesse décroît plus lentement jusqu'à atteindre une valeur de 0 m/s à  $z = 16$  mm, le régime est également laminaire et le nombre de Reynolds  $y$  est environ égal à 640.

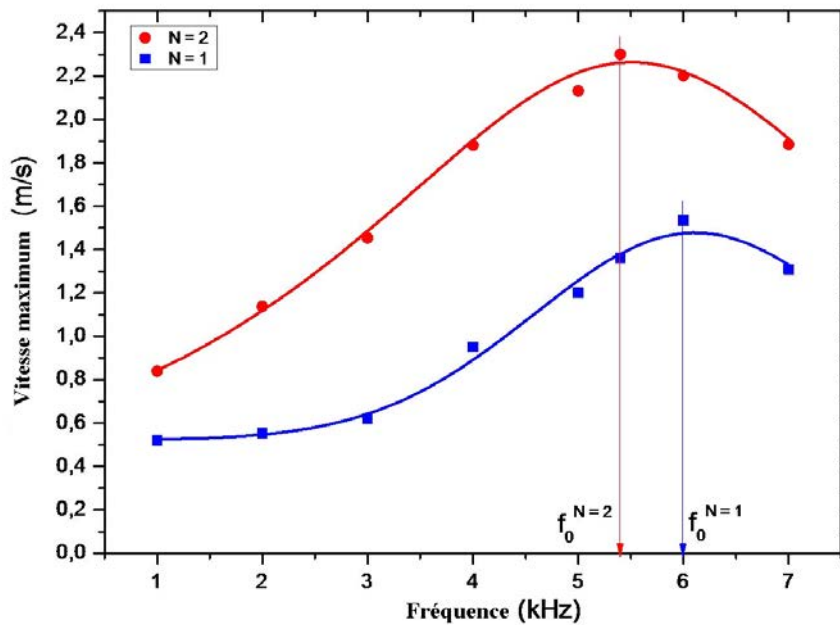


**Figure 34.**  $Z$  (mm) =  $f$  ( $V$  (m/s)) à une DBDS pour une position de la Sonde de Pitot à 16mm en aval de l'électrode ( $L_{\text{contre-électrode}} = 2$  mm,  $L_{\text{électrode}} = 5$  mm,  $P_e = 60$  W à  $f_0 = 6$  kHz pour le verre borosilicate).

### 2.5.2.2. B. Surface active à deux DBDS

Les conditions électriques pour lesquelles les expérimentations ont été effectuées sont les suivantes :  $f_0 = 5,4$  kHz et  $p_e = 2,3$  W/cm.

Sur la Figure 35 qui compare la vitesse maximum mesurée en fonction de la fréquence entre la surface à une et celle à deux DBDS, on remarque que la vitesse maximum induite à  $N = 2$  est toujours supérieure à la vitesse induite à  $N = 1$ , quelle que soit la fréquence. A la fréquence de résonance, la vitesse maximum est de 2,3 m/s à  $N = 2$  alors qu'elle est de 1,5 m/s à  $N = 1$ . Ces résultats sont en accord avec les recherches de (M. Forte, 2007). Cela prouve qu'à même puissance électrique injectée, l'effet de l'addition de DBDS est favorable à l'intensification du vent électrique produit, malgré la réduction de la densité linéique de puissance dans chaque DBDS.

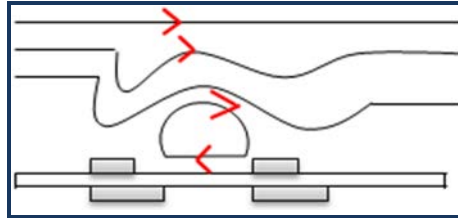


**Figure 35.** Amplitude de la vitesse maximum mesurée en fonction de la fréquence à une et deux DBDS ( $L_{\text{contre-électrode}} = 2 \text{ mm}$ ,  $L_{\text{électrode}} = 5 \text{ mm}$ ,  $P_e = 60 \text{ W}$ ,  $d = 2 \text{ cm}$  pour le verre borosilicate).

Une étude des profils de vitesse obtenus avec la surface active à deux DBDS en fonction de la distance inter-DBDS est réalisée à la fréquence de résonance (tous réglages d'alimentation fixes). Dans la Figure 37, cinq profils de vitesse sont établis en fonction de la distance inter-DBDS (de 1 cm à 5 cm) dans le but de trouver la distance inter-DBDS optimale. La structure du profil de vitesse est similaire à celle de la surface à une DBDS, constituée d'une superposition de trois couches. Selon la valeur de la distance inter-DBDS, la vitesse maximum peut aller de 1,95 m/s à 2,55 m/s : i) une première couche, fine, dans laquelle la vitesse passe très rapidement de 0 à la vitesse maximum, ii) une deuxième couche, moins fine, dans laquelle l'écoulement est laminaire et où la vitesse diminue progressivement de manière similaire pour toutes les distances inter-DBDS testées. Cette similitude confirme que cette couche correspond à une zone de gaz neutre dans laquelle le mouvement est établi par transmission visqueuse, iii) une troisième couche, plus épaisse, dans laquelle la vitesse diminue plus lentement. Le profil dans cette zone n'est pas lisse et présente quelques bosses. Cette zone pourrait donc correspondre, de par sa forme, à la trace d'un jet décollé venant se superposer au jet principal. Elle est intéressante car elle

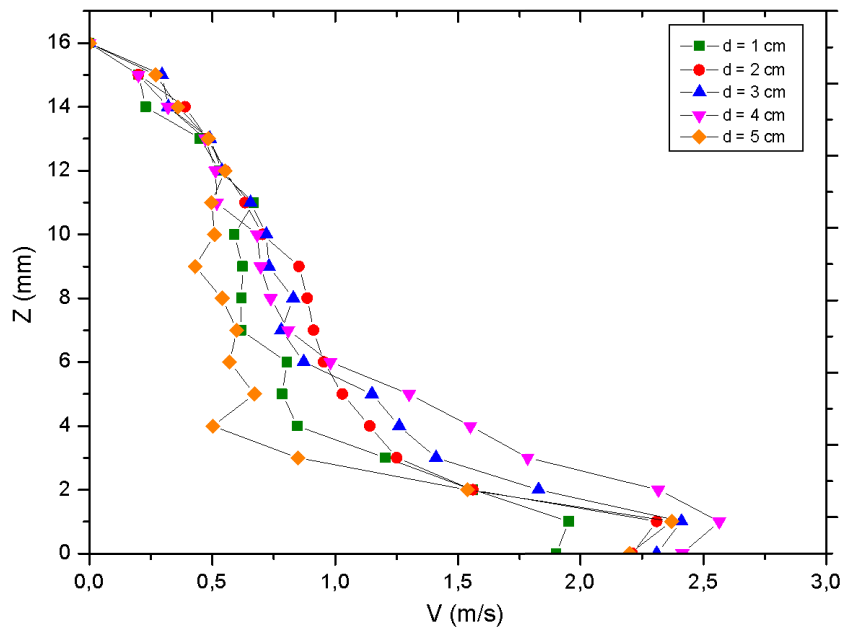


pourrait valider l'hypothèse de l'apparition de rouleaux de recirculation entre les DBDS provenant de l'interaction entre le vent co-courant produit en aval de la première DBDS et le vent contre-courant produit en amont de la deuxième DBDS (Figure 24). Le rouleau induit serait dans ce cas à l'origine du décollement d'une partie du jet (Figure 36).



**Figure 36.** Double circulation dans la zone du jet.

La Figure 37 démontre aussi l'existence d'une valeur de distance inter-DBDS optimale, égale à 4 cm dans nos conditions opératoires, pour laquelle la vitesse du vent électrique induite par la création du plasma est la plus grande.

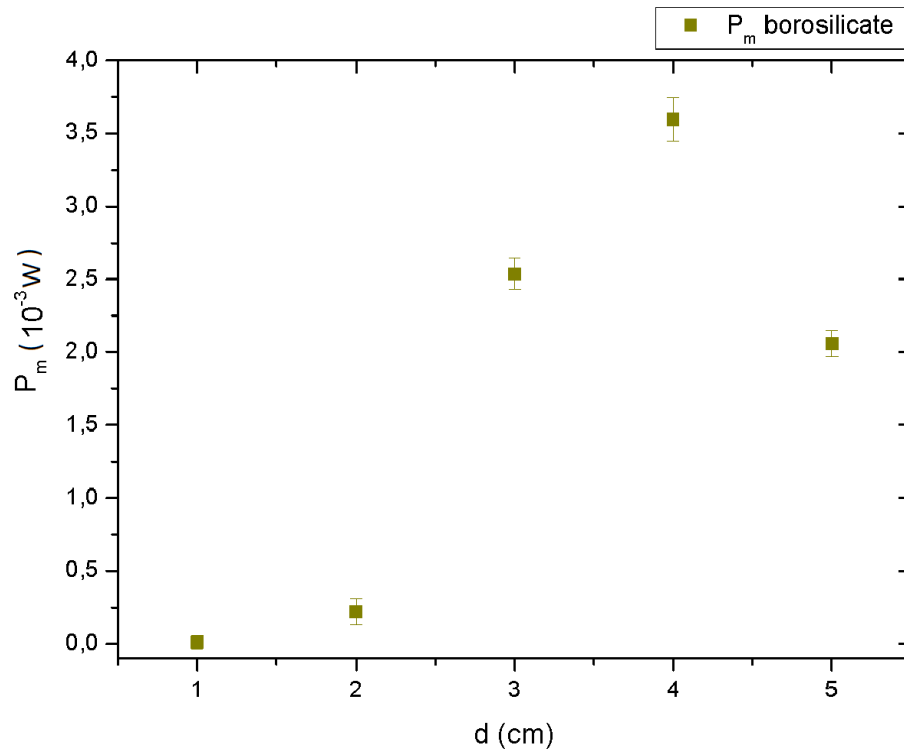


**Figure 37.** Profils de vitesse en fonction de la distance inter-DBDS (Mesures effectuées jusqu'à 16 mm en dessus de la 2<sup>ème</sup> DBDS et à  $f_0 = 5,4$  kHz pour le verre borosilicate).

### 2.5.2.3. Calcul de la puissance mécanique produite par la surface active à 2 DBDS

D'après les profils de vitesse établis dans la partie précédente, la puissance mécanique ( $p_m$  (W)) pour chacune des distances inter-DBDS est calculée aux conditions opératoires électriques constantes voire même densité linéique de puissance électrique.

A partir de ces données, la courbe de la puissance mécanique calculée est tracée en fonction de la distance inter-DBDS. Comme démontré dans la Figure 38, la densité de puissance mécanique obtenue varie de  $1,14 \times 10^{-5}$  à  $3,6 \times 10^{-3}$  W en passant par un maximum pour une distance inter-DBDS optimale égale à  $d = 4$  cm. Cette distance pour laquelle la densité de puissance mécanique est à son maximum, est un paramètre clé pour la conception d'une surface ou d'un canal actif à plusieurs DBDS.



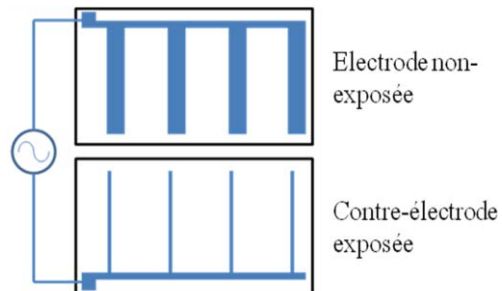
**Figure 38.** Puissance mécanique en fonction de la distance inter-DBDS d'une surface à deux DBDS ( $f_0 = 5,4$  kHz).

## 2.6. Conception et étude électromécanique du canal actif

### 2.6.1. Dispositif expérimental

A l'aide des résultats des études menées sur les surfaces actives et l'identification des paramètres géométriques optimaux pour la résine époxy et le Pyrex ©, nous avons conçu un canal composé de deux surfaces actives. La tenue mécanique étant un critère très important pour la conception du canal, le matériau diélectrique choisi est le Quartz car il a des propriétés électriques et thermiques proches du Pyrex© mais une meilleure tenue mécanique.

Le canal est constitué de deux plaques en Quartz parfaitement identiques de dimensions 150 mm × 150 mm × 1 mm. Chacune des surfaces actives est composée de quatre DBDS dont le matériau d'électrode est l'aluminium. Les électrodes ont les mêmes dimensions que dans l'étude précédente : leur longueur est identiquement égale à 120 mm, la largeur des contre-électrodes exposées est de 2 mm tandis que la largeur des électrodes non-exposées est de 5 mm. La distance inter-DBDS est, elle, de 40 mm.

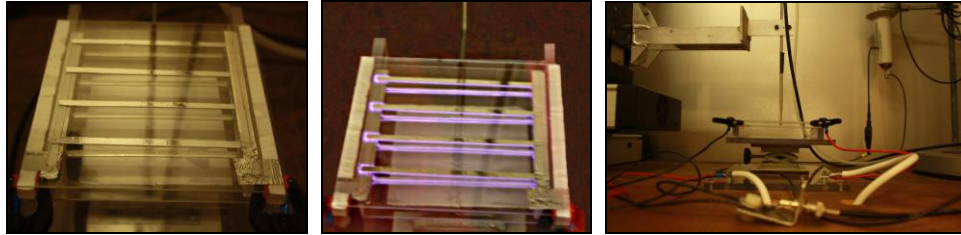


**Figure 39.** Configuration des électrodes des surfaces du canal actif.

Comme le montre la Figure 39, les contre-électrodes exposées des deux plaques sont placées de façon symétrique l'une en face de l'autre à l'intérieur du canal afin de générer un débit de gaz dans une même direction et un même sens.



**Figure 40.** Effet miroir du canal actif.



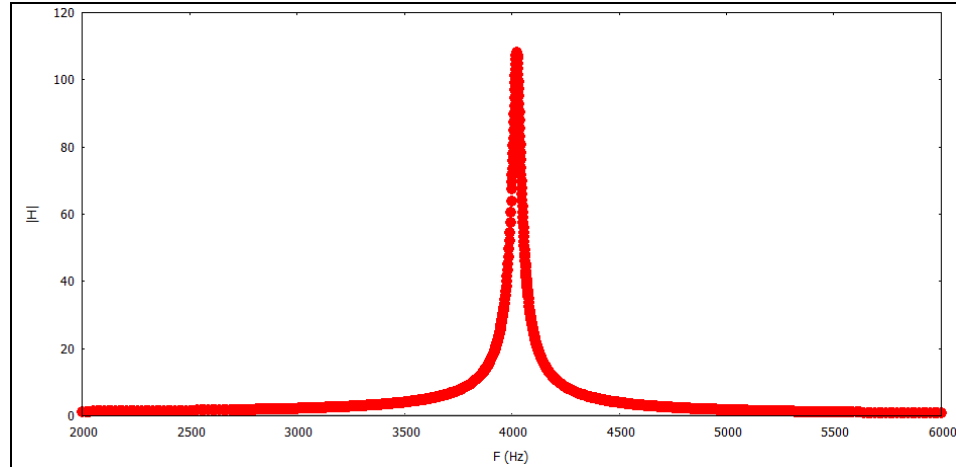
**Figure 41.** Photos du canal actif en absence du plasma (gauche), en présence du plasma (milieu) ainsi que son emplacement dans la cage de Faraday (droite).

Pour la conception d'un canal actif optimisé, l'influence d'un paramètre est importante à étudier : la hauteur du canal (hauteur séparant les deux surfaces actives). Nous menons trois séries d'expériences, chacune correspondant à une hauteur de canal différente :  $H = 25$  mm,  $H = 10$  mm, et  $H = 6$  mm. Pour chaque condition de hauteur, les expériences consistent à mener la même étude que précédemment, à savoir, la détermination de la fréquence de résonance du canal (invariante avec la hauteur), les calculs : i) de la puissance électrique injectée (invariante avec la hauteur), ii) du débit hydrodynamique du canal, iii) de la puissance mécanique produite et, iv) du rendement électromécanique.

### **2.6.2. Modélisation électrique du canal actif**

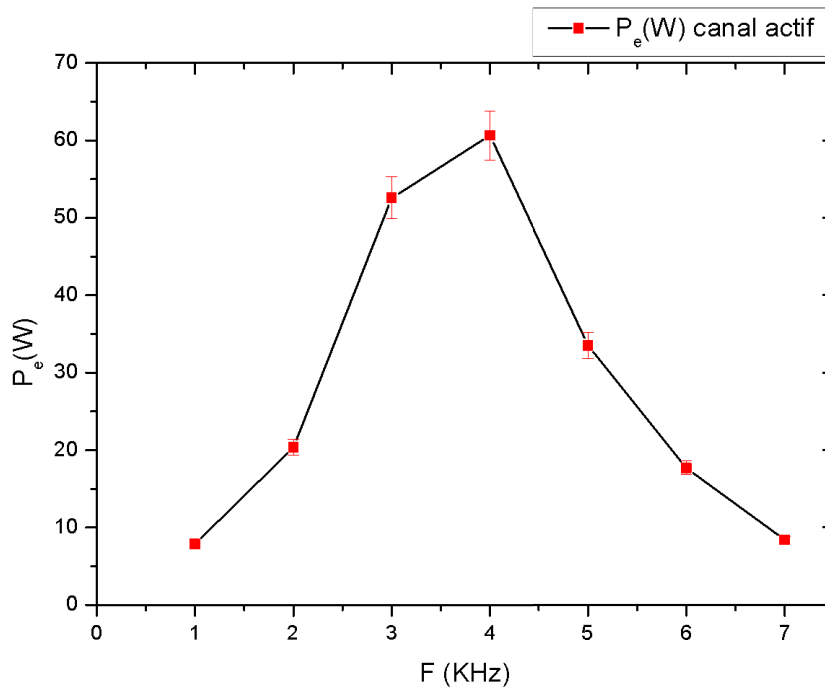
Nous suivons la même démarche théorique que précédemment pour tracer la fonction de transfert du système ainsi conçu et en déterminer la fréquence de résonance théorique. Pour ce faire, nous utilisons le modèle électrique équivalent d'une surface à 8 DBDS, Nous exprimons les termes relatifs à chacun des composants en prenant les propriétés du Quartz. Ce qui nous permet de calculer le module de la fonction de transfert du système, sachant que le générateur reste le même. La Figure 42 représente le module de cette fonction de transfert avec la fréquence. La courbe de transfert admet un maximum à 4 kHz, c'est la fréquence de résonance du canal. On remarque qu'il existe une similitude entre les fréquences de résonance obtenues dans les Figure 27 et Figure 42 pour deux configurations différentes. Nous pensons que cela est dû au fait qu'à partir d'un certain

nombre de DBDS, l'impédance de la surface active devient significativement inférieure à celle de l'alimentation, l'impédance du système tend alors vers celle de l'alimentation.



**Figure 42.** Evolution de la fonction de transfert du système équivalent électrique en fonction de la fréquence appliquée au canal actif.

Le calcul de la puissance électrique injectée dans le canal actif en fonction de la fréquence appliquée (aux mêmes réglages primaires que les surfaces actives en borosilicate ( $U_{GBF} = 1,5 \text{ V}$ ,  $G = +26 \text{ dB}$ )), à l'aide des mesures faites de courant et de tension, conduit au tracé de la courbe présentée en Figure 43. Cette courbe confirme une fréquence de résonance aux alentours de 4 kHz. La puissance électrique y est maximum, environ égale à 60 W, ce qui correspond à une densité linéique de puissance d'environ 0,62 W par cm d'électrode.

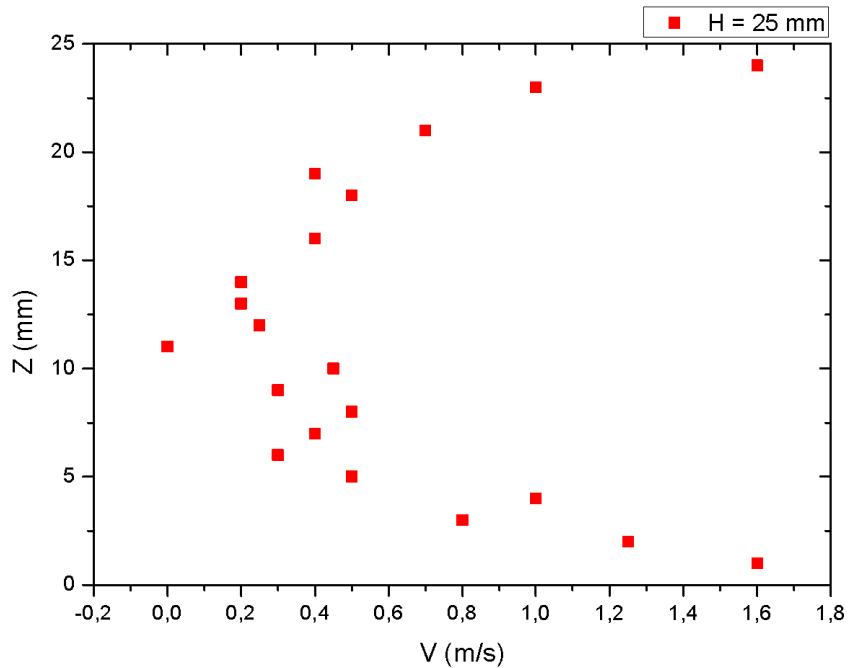


**Figure 43.** Evolution de la puissance électrique injectée en fonction de la fréquence appliquée (canal actif, 8 DBDS, distance inter-DBDS = 4 cm,  $P_e = 60$  W,  $H = 25$  mm).

### 2.6.3. Influence de la hauteur du canal actif

#### 2.6.3.1. $H = 25$ mm

La première valeur de hauteur testée est 25 mm. Celle-ci correspond à environ deux fois l'épaisseur de la couche de gaz mobilisée par une surface active seule. Une expérience de pompage à l'aide du canal actif a d'abord été effectuée en se plaçant à la fréquence de résonance. Un profil de vitesse du vent électrique produit a été tracé suivant Oz en Figure 44. Tout comme une surface seule, la vitesse maximum est obtenue en proche paroi (à environ 1 mm), elle est ici égale à 1,6 m/s.



**Figure 44.** Profil de vitesse du canal actif à H = 25 mm. Les coordonnées du point de mesure sont : x à 16 mm derrière la dernière bande, y au milieu du canal, z variable.

On remarque sur ce profil que la zone centrale du gaz a une vitesse nulle qui contribue à réduire le rendement de conversion, une hauteur plus faible serait donc plus appropriée.

Le profil de vitesse a été tracé pour différentes valeurs de y afin de calculer le débit de pompage du canal actif à H = 25 mm, d'une section de  $3,25 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  :

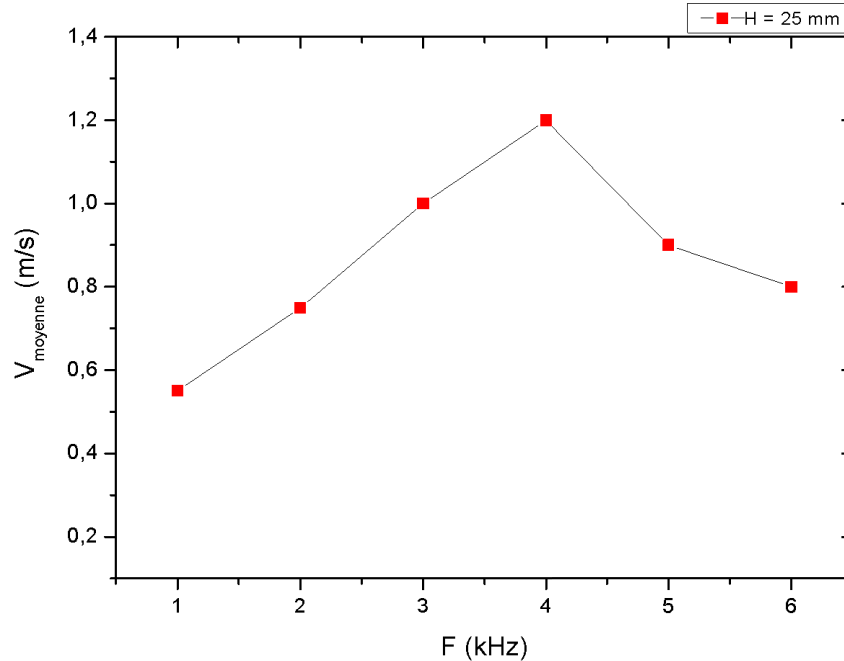
- La vitesse moyenne du vent électrique sur la section est de 0,62 m/s.
- Le débit total de pompage est de :  $Q = 6,7 \text{ m}^3/\text{h}$ .

La puissance mécanique produite peut aussi être calculée grâce à la valeur de la vitesse moyenne du vent électrique sur la section :  $P_{\text{mécanique}} = 0,5 \times \rho \times v^3 \times S = 4,23 \times 10^{-4} \text{ W}$ .

Telle que la masse volumique de l'air à la température ambiante  $\rho = 1,184 \text{ Kg}/\text{m}^3$ .

Plusieurs expériences de pompage ont ensuite été effectuées à des fréquences différentes afin de vérifier que la fréquence de résonance correspond bien au maximum du débit induit. La Figure 45 présente la variation de la vitesse moyenne du vent électrique

mesurée sur la section en fonction de la fréquence appliquée. La plus grande vitesse moyenne est obtenue à la fréquence de résonance.



**Figure 45.** Variation de la vitesse moyenne ( $V_{\text{moyenne}}$ ) en fonction de la fréquence appliquée ( $F$ ) pour  $H = 25$  mm.

### 2.6.3.2. $H = 10$ mm

Suite au résultat acquis à  $H = 25$  mm mettant en évidence une zone centrale immobile dans le profil de vitesse de l'air pompé, la hauteur du canal a été réduite à 10 mm afin de faire disparaître cette zone immobile. Le profil de vitesse obtenu est alors celui de la Figure 46. Nous constatons d'abord la disparition attendue de la zone immobile, mais aussi une uniformisation du profil vertical de vitesse. La vitesse maximum passe ici à 3 m/s alors qu'elle n'était que de 1,6 m/s à  $H = 25$  mm. De plus, la vitesse moyenne augmente significativement.

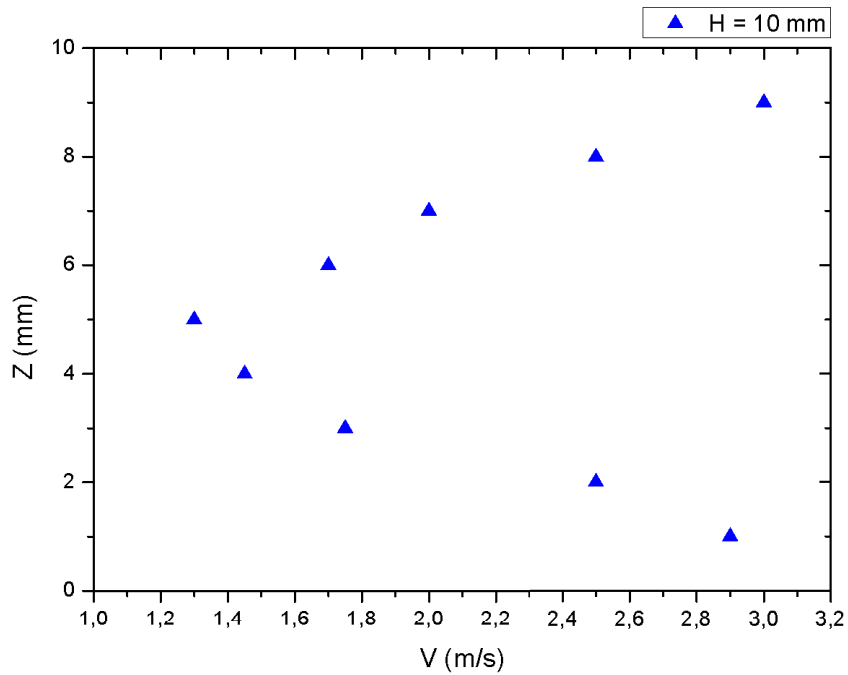
Tout comme à  $H = 25$  mm, le profil de vitesse a été tracé pour différentes valeurs de  $y$  afin de calculer le débit de pompage du canal actif à  $H = 10$  mm, d'une section de  $1,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  :

- La vitesse du vent électrique sur la section est de 2,12 m/s.



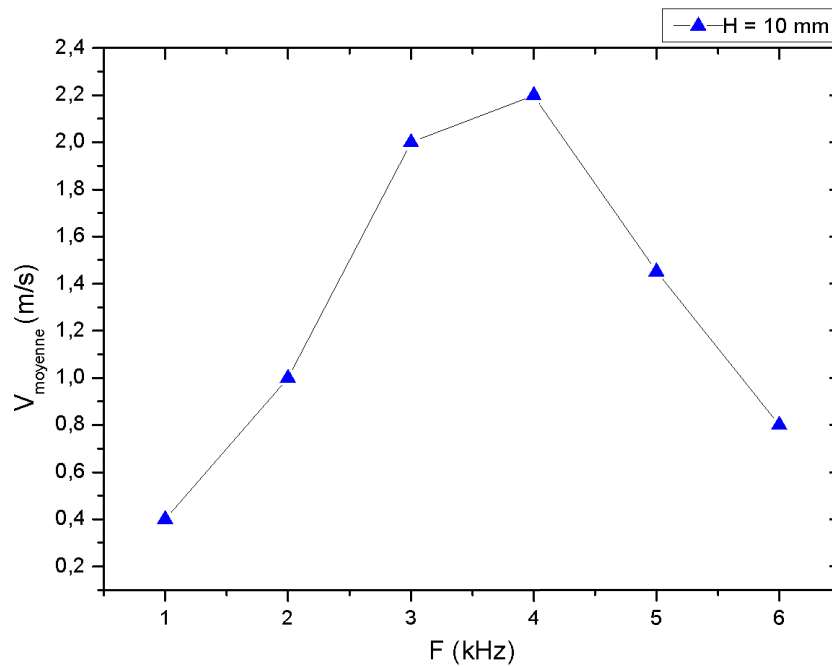
- Le débit de pompage est de :  $Q = 9,16 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Et de la même façon que précédemment, la puissance mécanique produite est calculée grâce à la valeur de la vitesse moyenne du vent électrique sur la section :  $P_{\text{mécanique}} = 6,77 \times 10^{-3} \text{ W}$ . Elle est seize fois supérieure à la puissance mécanique produite à  $H = 25 \text{ mm}$ .



**Figure 46.** Profils de vitesse du canal actif à  $H = 10 \text{ mm}$ . Les coordonnées des points de mesure sont :  $x$  à  $16 \text{ mm}$  derrière la dernière bande,  $y$  au milieu du canal,  $z$  variable.

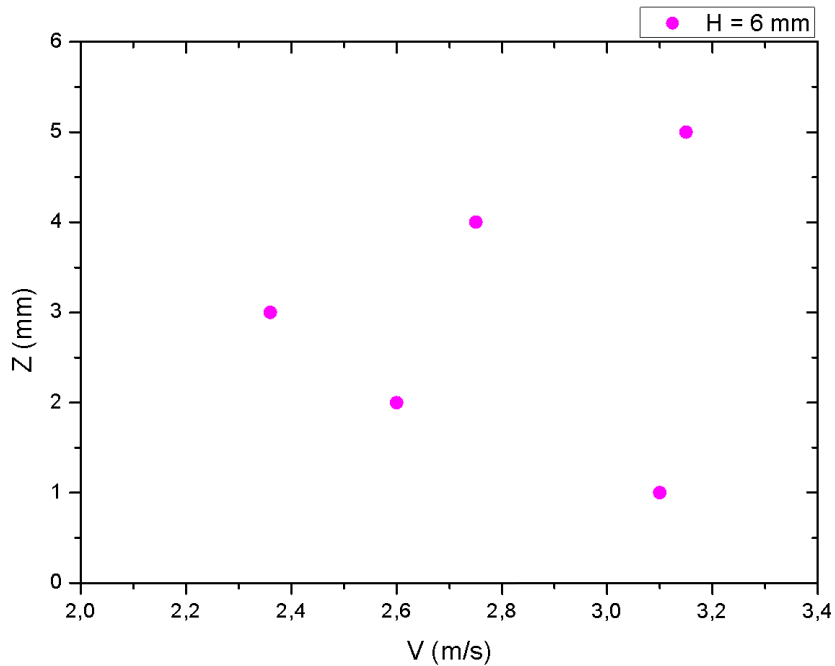
Là encore, comme à  $H = 25 \text{ mm}$ , des expériences de pompage ont ensuite été effectuées à des fréquences différentes afin de vérifier que la fréquence de résonance correspond bien au maximum de la vitesse moyenne et donc du débit de pompage. Comme le montre la Figure 47, c'est bien le cas.



**Figure 47.** Variation de la vitesse moyenne ( $V_{\text{moyenne}}$ ) en fonction de la fréquence appliquée ( $F$ ) pour  $H = 10$  mm.

### 2.6.3.3. $H = 6$ mm

Les résultats prometteurs à  $H = 10$  mm prouvent que la réduction de la hauteur du canal joue un rôle bénéfique sur l'efficacité de la conversion électromécanique du canal actif. Mais il est important de poursuivre cette réduction afin de voir si cette tendance se poursuit. Ainsi, la hauteur du canal a été réduite à 6 mm et un profil de vitesse a été tracé de la même façon que les cas précédents. La Figure 48 présente ce profil et montre que la réduction de la hauteur augmente encore les valeurs de vitesse. La vitesse maximum atteinte est maintenant de 3,3 m/s et le profil de vitesse s'uniformise davantage.



**Figure 48.** Profil de vitesse du canal actif à  $H = 6$  mm. Les coordonnées du point de mesure sont :  $x$  à 16 mm derrière la dernière bande,  $y$  au milieu du canal,  $z$  variable.

Tout comme à  $H = 25$  mm et  $H = 10$  mm, le profil de vitesse a été tracé pour différentes valeurs de  $y$  afin de calculer le débit de pompage du canal actif à  $H = 6$  mm, d'une section de  $7,2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  :

- La vitesse du vent électrique sur la section est de 2,79 m/s
- Le débit de pompage est de :  $Q = 7,23 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Et de la même façon que précédemment, la puissance mécanique produite est calculée grâce à la valeur de la vitesse moyenne du vent électrique sur la section :  $P_{\text{mécanique}} = 9,26 \times 10^{-3} \text{ W}$ .

On constate ainsi que malgré une hausse de la puissance mécanique induite, le débit de pompage est lui diminué lorsqu'on baisse la hauteur du canal en dessous d'une certaine valeur de la hauteur.

#### **2.6.3.4. Calcul du rendement**

Le calcul des puissances électriques et mécaniques permet de déterminer le rendement électromécanique du canal actif pour les trois hauteurs testées. Le rendement de conversion électromécanique est calculé comme suit :

$$\eta = \frac{P_m(W)}{P_e(W)} \quad (2.14)$$

Ci-dessous, les valeurs du rendement pour les trois cas :

Pour H = 25 mm :  $\eta = 7,05 \times 10^{-6}$

Pour H = 10 mm :  $\eta = 1,13 \times 10^{-4}$

Pour H = 6 mm :  $\eta = 1,54 \times 10^{-4}$

La puissance électrique injectée ne variant pas avec la hauteur, le rendement suit la tendance de la puissance mécanique produite, ce qui veut dire que le plus haut rendement est celui obtenu à H = 6 mm.

#### **2.6.4. Choix de la hauteur du canal optimale**

La comparaison des trois cas (Figure 49) montre que la meilleure hauteur entre les trois est 10 mm dans le cas où l'on souhaite concevoir une pompe monocanal, car bien que le rendement de conversion électromécanique soit moins bon qu'à H = 6 mm, le débit de pompage est lui notablement supérieur (Figure 50). Nous avons donc choisi cette hauteur de canal pour concevoir un prototype de pompe électrohydrodynamique en configuration monocanal, le débit de 10 m<sup>3</sup>/h étant un objectif du cahier des charges initial établi avec l'industriel. Bien entendu, pour la conception d'une pompe plus complexe, le choix optimal de configuration serait celui d'une pompe à multiple canaux superposés de hauteur caractéristique de canal plus faible (proche de 6 mm) permettant d'atteindre par la superposition un débit de pompage total de 10 m<sup>3</sup>/h. Cette solution nécessitant une étude complémentaire pour sa mise en œuvre (étude paramétrique de la superposition des canaux) n'a pas été étudié dans le cadre de cette thèse.

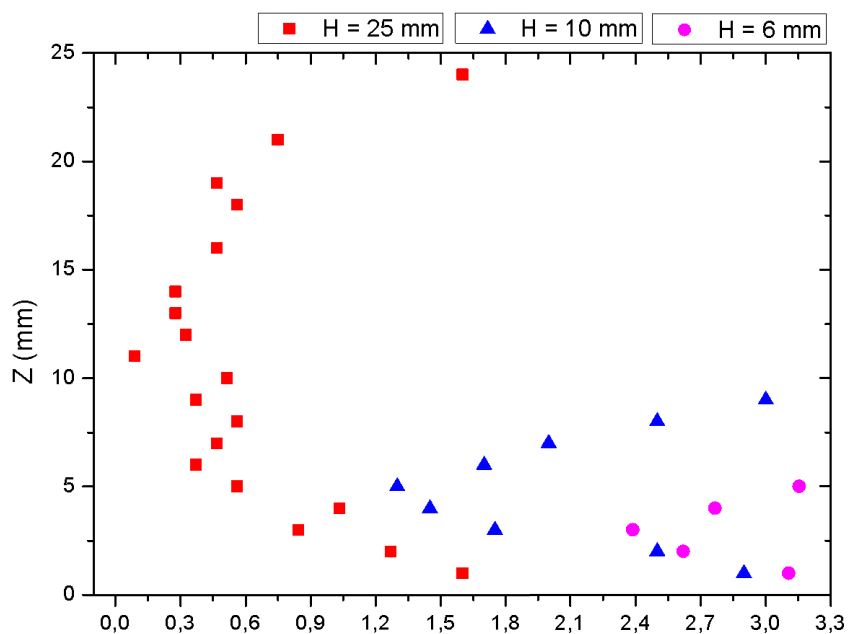


Figure 49. Les profils de vitesse pour les trois hauteurs H = 25 mm, H = 10 mm et H = 6 mm.

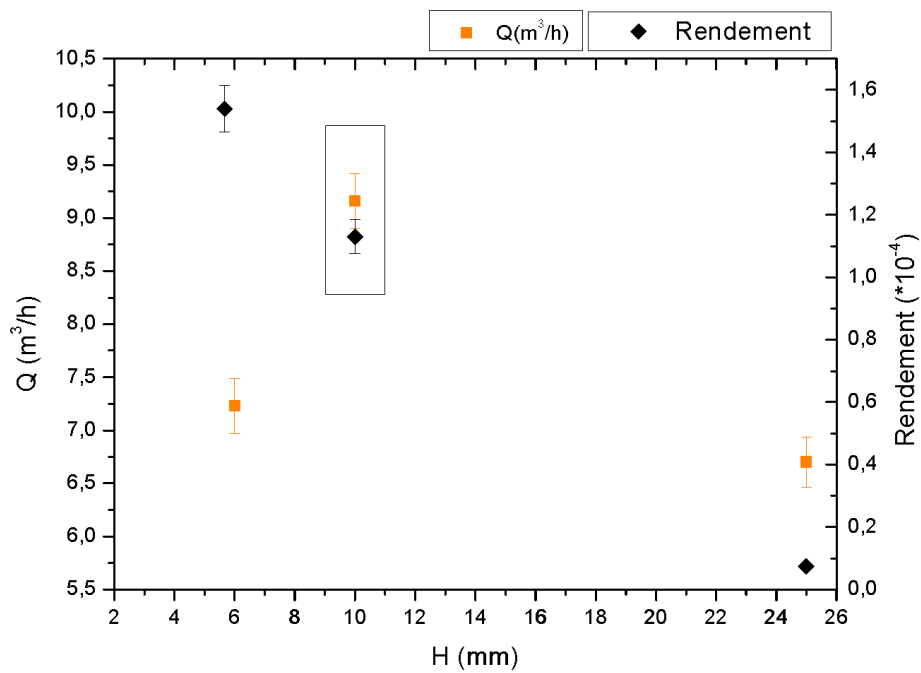


Figure 50. Q et rendement = f(H).

## 2.7. Conclusion

L'étude expérimentale a permis:

- D'apporter de nouveaux résultats sur la réponse fréquentielle du système physique {DBDS/générateur}.
- D'ébaucher un premier modèle électrique de dipôle équivalent permettant de comprendre la réponse fréquentielle et d'ouvrir la voie à une méthode d'optimisation du système {DBDS/générateur} basée sur l'accord fréquentiel de composants.
- De faire le choix du matériau le plus adapté pour la fabrication de surfaces actives et des paramètres géométriques optimaux : Quartz d'épaisseur d'1 mm, distance inter-DBDS de 4 cm dans une configuration des électrodes asymétrique : largeur d'électrode non exposée de 5 mm et largeur de l'électrode exposée de 2 mm.
- A partir du choix paramétrique approprié pour une surface active, d'effectuer la conception d'un canal aspirant à deux faces actives.
- De fabriquer et tester un canal actif d'une capacité de pompage d'environ 10 m<sup>3</sup>/h et ce dans une configuration monocanal.

Maintenant que le canal actif, l'élément principal d'une pompe active EHD, a été réalisé, caractérisé et optimisé sur le plan de la conversion électromécanique, il est à présent temps d'aborder le chapitre suivant dédié à la construction d'une pompe active EHD à proprement parlé et à son utilisation dans le traitement de l'air pollué par abattement en COV.