

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Energétique

ETUDE D'UN ECOULEMENT

SUBSONIQUE AVEC DECHARGES COURONNES

Par

wassila GUEBLI

Devant le jury composé de :

M. M.Merzouk	MCA/USD de Blida	Président
M. A.Hamid	MCA/USD de Blida	Examineur
M. B.Laribi	MCA/U de Khemis Meliana	Examineur
M. D.Semmar	MCA/USD de Blida	Rapporteur

Blida, Janvier 2012

ملخص

تستطيع البلازما السطحية أن تؤثر على الطبقة المحدودة للسيلان على طول الجانب. تجرى حاليا في مختبرات دراسات معمقة حول مختلف أنواع محركات البلازما . الهدف من هذا في مجال الديناميكا الهوائية هو القدرة على التحكم في الانتقال من ثابت إلى الهائج. خفض قوة الجذب, تحسين مستوى قوة الرفع, التخفيف من الضجيج , هذا ما يمثل فوائد اقتصادية جد هامة .

في هذا النص, الهدف من البحث هو استعمال محركات البلازما, و ذلك بإبراز خصائصها الفيزيائية وتأثيرها على السيلا. استعملت شكلان من المحركات, طلق كوروني حبل- حبل و طلق سطحي ذو قطب شريطي.

الهواء الأيوني المنبعث من هذه المحركات له سرعة ضعيفة, هذه الخاصية الميكانيكية استعملت لتعديل الطبقات المحدودة.

الدراسة العددية للتدفق للطبقات المحدودة تحت تأثير الطلق الكوروني تمت عن طريق برنامج "الفلوينت" مع اخذ بالاعتبار المعطيات الكهربائية المختلفة.

RESUME

Les plasmas atmosphériques de surface peuvent agir sur la couche limite d'un écoulement le long d'un profil. Différents types d'actionneurs plasma sont actuellement étudiés dans des laboratoires spécialisés. Les objectifs dans le domaine aérodynamique peuvent être de contrôler la transition laminaire-turbulent, la diminution de traînée, l'augmentation de la portance, la réduction du bruit et de la consommation.

Dans ce contexte, l'objet de ce travail est d'utiliser des actionneurs plasmas en caractérisant leurs propriétés physiques et leurs effets sur des écoulements. Deux configurations ont été utilisées : décharge couronne type fil-fil et décharge surfaciques à électrodes en bande. Le vent ionique induit par ces actionneurs est de faible vitesse (quelques m/s). Cette propriété mécanique a été utilisée pour modifier la couche limite se développant sur une plaque plane. Les décollements de bord d'attaque de l'écoulement de profils ont été retardés voire supprimés.

La simulation numérique d'un écoulement de couche limite au dessus d'une plaque plane soumise à une décharge couronne est réalisée par l'intermédiaire du code de calcul commercial FLUENT, en prenant en considération les paramètres électriques.

ABSTRACT

Surface plasmas can modify the boundary layer of a flow along an airfoil. Several types of plasma actuators are being studied in different laboratories. In aerodynamic applications, these plasma actuators could be used to increase performance and reduce energy consumption, by controlling the transition between laminar and turbulent regimes, reducing drag, controlling lift and reducing noise.

The aim of this study was to develop plasma actuators. The physical properties and their effects on subsonic flows were characterized. Two configurations were used: DC corona discharge and DC surface discharge with strip electrode. The ionic wind induced by these actuators was quite slow (a few m/s). This mechanical property was used for modifying the boundary layer evolving on a flat plate. Flow separations on airfoil leading edge have been delayed or deleted by plasma actuators.

The numerical simulation of the physical phenomena of corona discharge is realized with FLUENT code, taking into consideration the electrical parameters.

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant tous ces années d'étude.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur D. Semmar Docteur d'état, pour avoir assuré la direction de ce mémoire, pour sa confiance constante et pour ses encouragements tout au long de ces trois années de travail.

Je remercie tout particulièrement Monsieur M.Merzouk pour l'honneur qu'il m'a fait en tant que président de jury de ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Docteur A.Hamid, Professeur, université de Blida et monsieur Dr.B.Laribi, Professeur, université de Khemis Meliana, pour avoir manifestés un grand intérêt pour le sujet en acceptant d'être examinateurs de cette thèse.

Pour terminer, j'adresse mon grand amour à mes chère parents, mes beaux-parents et ma magnifique famille : mon époux et mes deux yeux Abdelmoumen et Yesser. C'est grâce à leur amour et leurs sacrifices que cette thèse a été menée à bonne fin. Mon plus grand souhait dans cette vie, c'est de les voir toujours à côté de moi, en bonne santé, heureux et que la paix soit avec eux.

TABLE DES MATIERES

RESUME

REMERCIEMENTS

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

INTRODUCTION	14
1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE CONTROLE DES ECOULEMENTS	17
1.1. Introduction	17
1.2. Contrôle de la transition laminaire-turbulent	18
1.2.1. Description de la transition Laminaire – Turbulent	18
1.2.2. Phénomène de transition de la couche limite	19
1.2.3. Méthodes de contrôle	19
L'aspiration	20
Le soufflage	20
Les MEMS	22
1.3 Couches de mélange planes bidimensionnelles	23
1.3.1 Descriptions	23
1.3.2 Méthodes de contrôle	25
1.4. Contrôle d'écoulement par plasma	26
1.4.1. Contrôle par décharge couronne	26
1.4.2 Contrôle par décharge a barrière diélectrique	28
1.5. Conclusion	31
2. LES DECHARGES ET LES ACTIONNEURS PLASMAS	32
2.1. Introduction	32
2.2. Notions générales sur les plasmas	32
2.2.1 Définition	32
2.2.2. Les processus physico-chimiques internes	33
2.2.2.1. Les chocs élastiques et inélastiques	33

2.2.3. Paramètres caractéristiques d'un plasma	35
2.2.4. Classification des plasmas	36
2.3. Les décharges électriques dans les gaz	38
2.3.1. Définition	38
2.3.2. Mécanismes de formation des décharges électriques	39
2.3.3. Décharges électriques à pression atmosphérique	41
2.3.3.1. Décharge couronne	41
2.3.3.2. Décharge à barrière diélectrique	46
2.4. Le vent ionique	49
2.4.1. Historique	49
2.4.2. Vitesse du vent électrique	49
2.5. Les différents types d'actionneurs plasmas surfaciques	51
2.5.1. L'actionneur à Décharge Couronne (DC)	52
2.5.2. L'actionneur à Décharge à Barrière Diélectrique (DBD)	57
2.6. Conclusion	61
3. APPROCHE THEORIQUE DU COUPLAGE AERODYNAMIQUE PLASMA	62
3.1. Introduction	62
3.2. Mise en équation générale	62
3.2.1. Les Equations d'électro-aérodynamiques pour le cas incompressibles, stationnaire et laminaire	62
▲ Les équations d'électrostatique	64
3.2.2. La turbulence	66
3.3. Conclusion	67
4. MODELISATION ET RESOLUTION NUMERIQUE D'ECOULEMENT SOUMIS A DES DECHARGE COURONNE SURFACIQUES	68
4.1. Introduction	68
4.2. Les configurations étudiées	68
4.2.1. Configuration électrodes filaires	68
4.2.2. Configuration électrodes en bandes	70
4.3. Explication physique du vent ionique	70
4.4. Modélisation numérique	71

4.4.1. Présentation de code Fluent	71
4.4.2. Procédure sous "Fluent"	73
4.4.2.1. Simple précision ou double précision	73
4.4.2.2. Choix de la formulation du solveur	73
4.4.2.3. Domaine d'étude et conditions aux limites pour les deux Configurations	74
4.4.2.4. Hypothèses et mise en équations	77
4.4.2.5. Maillage de domaine de calcul	82
4.4.2.6 Schémas de discrétisation	85
4.4.2.7 Choix du schéma d'interpolation de la pression	86
4.4.2.8 Choix de la méthode de couplage Pression Vitesse	86
4.4.2.9 Facteurs de relaxation	87
4.4.2.10 Intégration des équations électrostatiques dans Fluent	88
4.5 Conclusion	89
5. RESULTATS ET DISCUSSION	90
5.1. Introduction	90
5.2. Cas d'une décharge couronne fil-fil	90
5.2.1. Écoulement laminaire sans et avec décharge	90
5.2.2. Validation des résultats	93
5.2.2.1 Influence de la valeur de α	93
5.2.2.2 Influence de la vitesse d'entrée U_0	96
5.2.3. Epaisseur de la couche limite	98
5.2.4. La réduction de la trainée	100
5.2.5. Écoulement turbulent sans et avec décharge	102
5.3. Cas d'électrodes en bandes	105
5.3.1. Écoulement laminaire sans et avec décharge	105
5.3.2. Validation des résultats	108
5.3.2.1 Effets de l'actionneur sur la plaque plane en incidence	108
5.3.3. Réduction de la couche limite	113
5.3.3. L'influence de la décharge sur la trainée	115
5.3.4. L'effet de la turbulence	117
5.4. Conclusion	119

CONCLUSION	120
APPENDICE	121
A. Liste des symboles et des abréviations	122
B. les paramètres de contrôle de la 1 ^{ère} configuration sous fluent	124
REFERENCES	141

LISTE DES ILLUSTRATIONS GRAPHIQUES ET TABLEAUX

- Figure 1.1** Couche limite se développant sur une plaque plane : passage de l'état laminaire au turbulent 18
- Figure 1.2** Principe de l'aspiration de couche limite (Comolet, 1994) 20
- Figure 1.3** principe de soufflage tangentiel de la couche limite (Comolet, 1994) 21
- Figure 1.4** Visualisation de l'écoulement d'air de 0.2 m/s autour d'un cylindre, dans le cas d'un soufflage continu normal à l'aval du cylindre (Tensi *et al.* 2002). La valeur C_{μ} correspond au débit d'air soufflé par rapport à l'écoulement principal 21
- Figure 1.5** Actionneur piézoélectrique de microjets synthétiques (Leplat, 2006) 22
- Figure 1.6** Prototype d'un actionneur à microjets synthétiques. (ONERA D) 23
- Figure 1.7** Visualisation des structures primaires créées par un écoulement d'hélium à 10 m/s (en haut) et un écoulement de nitrogène à 3,78 m/s (en bas), d'après Brown et Roshko (1974) 24
- Figure 1.8** Reconstitution tridimensionnelle des structures primaires et secondaires de la couche de mélange plane, d'après Lasheras *et al.* (1986) 24
- Figure 1.9** Visualisations d'une couche de mélange plane bidimensionnelle excitée à 40 et 80 Hz, d'après Wygnanski (2000) 25
- Figure 1.10** Évolution de l'épaisseur de couche limite le long d'une plaque plane à 20 m/s avec et sans décharge [11] 27
- Figure 1.11** Profils de vitesses avec et sans décharge dans la couche limite d'une plaque plane pour trois vitesses extérieures différentes 27
- Figure 1.12** Visualisation d'une couche limite manipulée par des actionneurs DBD placé dans le sens de l'écoulement (a) et (b) Traînée d'une plaque plane équipée d'un réseau d'actionneurs générant des vents en contre-sens ou dans le même sens que l'écoulement principal [20] 28
- Figure 1.13** Visualisation des tourbillons générés par le réseau d'électrodes utilisé par Jukes *et al.* A deux instants différents 29

Figure 1.14	Visualisation de l'écoulement autour d'un profil d'aile NACA 0015 mis à 12° d'incidence sans action (a) et (b) avec action d'un réseau de 8 actionneurs DBD déphasés placés sur l'extrados d'après Roth[27]	30
Figure 2.1	Classification des plasmas en fonction de leur densité de particules chargées et de leur température	38
Figure 2.2	Caractérisation tension-courant d'une décharge électrique [5]	40
Figure 2.3	Configurations typiques pour la formation de décharges couronnes	42
Figure 2.4	Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne [2]	43
Figure 2.5	Effet de couronne en tension négative	45
Figure 2.6	Effet de couronne en tension positive	46
Figure 2.7	a) Exemple de configuration de DBD avec deux diélectriques solides ; b) son schéma électrique équivalent	47
Figure 2.8	Étapes de la formation d'une micro-décharge dans une DBD [15]	48
Figure 2.9	Vitesse axiale du vent ionique à 2 cm de la pointe (distance inter-électrodes de 4cm, ddp de 40 kV et intensité de 0,04 mA) [32]	50
Figure 2.10	Couronne positive (à gauche), négative (à droite) et vent ionique	51
Figure 2.11	Schéma de l'actionneur plasma à décharge couronne de surface (configuration de Léger, [37])	53
Figure 2.12	Photographie de la décharge couronne de surface en régime "streamer" (a), en régime "filamentaire" (b) et en régime "glow" (c)	54
Figure 2.13	Comportement de la décharge en fonction de l'humidité relative (a) et de la vitesse de l'écoulement extérieur (b) ([32])	55
Figure 2.14	Évolution du courant pour une décharge couronne en fonction du diélectrique utilisé [38]	56
Figure 2.15	Composante horizontale de la vitesse du vent électrique induit en fonction du courant de décharge [32]	57
Figure 2.16	Sens de l'écoulement induit par la force <i>paraélectrique</i> (a) [45] et configuration géométrique des électrodes utilisée par Roth pour établir la <i>OAUGDP</i> (b) [20]	59
Figure 2.17	Profils de vitesse induite par l'actionneur DBD (a) et évolution du maximum de vitesse (b) en fonction de la tension appliquée [46]	60
Figure 4.1	Représentation schématique de la 1 ^{ère} configuration de deux	

électrodes filaires	69
Figure 4.2 Représentation schématique de la 2 ^{ème} configuration de deux	
électrodes bandes	70
Figure 4.3 Couronne positive (à gauche), négative (à droite) et vent ionique	71
Figure 4.4 zone inter électrode	75
Figure 4.5 Domaine d'étude et conditions aux limites	75
Figure 4.6 L'espace inter électrode	76
Figure 4.7 Maillage du domaine non structuré (69850 nœuds) de configuration	
fil-fil	83
Figure 4.8 Maillage du domaine non structuré (92233 nœuds) de configuration	
électrodes en band	84
Figure 5.1 contours de vitesse calculés sans décharge avec $U = 5\text{m/s}$	91
Figure 5.2 contours de vitesse calculés avec décharge à $U = 5\text{m/s}$	
($V_a=+22\text{kV}$ et $V_c=-10\text{kV}$)	91
Figure 5.3 profile de vitesse sans et avec décharge à 3cm de l'anode avec	
une vitesse d'entrée de 5m/s ($V_a=+22\text{kV}$ et $V_c=-10\text{kV}$)	92
Figure 5.4 profils de vitesse sans et avec décharge à 1cm en aval de la	
cathode avec une vitesse d'entrée de 5m/s	94
Figure 5.5 profils de vitesse à 1cm en aval de la cathode avec $U_0 = 5\text{m/s}$ et	
pour différents valeurs du courant de décharge	94
Figure 5.6 profile de vitesse sans décharge à 1cm en aval de la cathode avec	
une vitesse d'entrée de 5m/s	95
Figure 5.7 profile de vitesse avec décharge à 1cm en aval de la cathode	
avec une vitesse d'entrée de 5m/s ($V_a=+30\text{kV}$ et $V_c=-10\text{kV}$)	96
Figure 5.8 Profils de vitesse a 5,10 et 17m /s, sans (—) et avec (—)	
décharge, 1cm e aval de la cathode, et $\alpha = 0.5 \cdot 10^{-3}$	97
Figure 5.9 Profils de vitesse expérimentaux, pour $U_0 = 5,10$ et 17m /s , sans (—)	
et avec (—) décharge, 1cm en aval de la cathode	97
Figure 5.10 Profil de vitesse a $U_0 = 5\text{m/s}$ sans décharge pour différents position	
sur la plaque	99

Figure 5.11 Profil de vitesse a $U_0 = 5\text{m/s}$ avec décharge pour différents position sur la plaque	99
Figure 5.12 Évolution de l'épaisseur de la couche limite sans et avec décharge en fonction de l'abscisse pour une vitesse d'entrée de 5m/s	100
Figure 5.13 La trainée a $x = 7\text{cm}$ en absence et en présence de la décharge	101
Figure 5.14 La trainée a $x = 7\text{cm}$ expérimentale, en absence et en présence de la décharge pour déférentes vitesses d'écoulements	102
Figure 5.15 Profil de vitesse sans et avec décharge à 35m/s	103
Figure 5.16 Profil de vitesse sans et avec décharge à 40m/s	103
Figure 5.17 Profil de vitesse sans et avec décharge à 45m/s	104
Figure 5.18 Le contour de champ de vitesse pour une vitesse d'entrée de 50m/s ; (a) sans décharge, (b) avec décharge	104
Figure 5.19 Profil de vitesse sans et avec décharge à 50m/s	105
Figure 5.20 contours de vitesse calculée sans décharge avec $U_0 = 4\text{m/s}$	106
Figure 5.21 contours des iso valeurs de vitesse calcule sans décharge à $U_0 = 4\text{m/s}$	106
Figure 5.22 contours de vitesse calculé avec décharge a $U_0 = 4\text{m/s}$	107
Figure 5.23 contours des iso valeurs de vitesse calculé avec décharge à $U_0 = 4\text{m/s}$	107
Figure 5.24 profile de vitesse avec décharge à 1cm en aval de la cathode avec une vitesse d'entrée de 4m/s ($V_a = + 30\text{kV}$ et $V_c = -10\text{kV}$)	108
Figure 5.25 Champs de vitesse et lignes de courant avec et sans décharge pour un angle d'attaque de $2,5^\circ$ et une vitesse de 8m/s . expérimentale (en haut) et calculée, ($V_a = + 40\text{kV}$ et $V_c = -10\text{kV}$)	109
Figure 5.26 Champs de vitesse et lignes de courant avec et sans décharge pour un angle d'attaque de $2,5^\circ$ et une vitesse de 14 m/s .expérimentale	

en haut) et calculée, ($V_a=+ 40\text{kV}$ et $V_c=-10\text{kV}$)	110
Figure 5.27 Champs de vitesse et lignes de courant avec et sans décharge pour un angle d'attaque de 5° et une vitesse de 4 m/s .expérimentale (en haut) et calculée, ($V_a=+ 40\text{kV}$ et $V_c=-10\text{kV}$)	111
Figure 5.28 Champs de vitesse et lignes de courant avec et sans décharge pour un angle d'attaque de 5° et une vitesse de 8 m/s .expérimentale (en haut) et calculée, ($V_a=+ 40\text{kV}$ et $V_c=-10\text{kV}$)	112
Figure 5.29 Profil de vitesse a $U_0 = 4\text{m/s}$ sans décharge pour différents position sur la plaque	113
Figure 5.30 Profil de vitesse a $U_0 = 5\text{m/s}$ avec décharge pour différents position sur la plaque	114
Figure 5.31 Évolution de l'épaisseur de la couche limite sans et avec décharge en fonction de l'abscisse pour une vitesse d'entrée de 4m/s	114
Figure 5.32 Evolution de la trainée sur la plaque plane d'incidence nulle, 40 mm en aval du bord d'attaque, en fonction de la vitesse de l'écoulement sans et avec décharge	116
Figure 5.33 Evolution expérimentale de la trainée sur la plaque plane d'incidence nulle, 40 mm en aval du bord d'attaque, en fonction de la vitesse de l'écoulement sans et avec décharge (courant de 0,8 mA/m)	116
Figure 5.34 Profil de vitesse a $U_0 = 35\text{m/s}$ sans et avec décharge	117
Figure 5.35 Profil de vitesse a $U_0 = 45\text{m/s}$ sans et avec décharge	118
Figure 5.36 Profil de vitesse a $U_0 = 50\text{m/s}$ sans et avec décharge	118
Tableau 2.1 Principales caractéristiques des régimes de fonctionnement LF et MC de la DBD	60
Tableau 4.1 Choix du modèle de turbulence	80
Tableau 4.2 valeurs par défaut de constantes empiriques utilisées pour le modèle k- ϵ	82

INTRODUCTION

La thématique de ce projet se situe à la frontière de deux domaines scientifiques que sont la Mécanique des Fluides et la Physique des Plasmas. Ces domaines sont très distincts et l'interaction entre eux ne porte pas de nom officiel. Cette thématique a reçu le nom d'Electrofluidodynamique. A l'origine, les études étaient essentiellement axées sur l'électrisation par écoulement ou la mise en mouvement d'un liquide sous l'effet d'une différence de potentiel. Les recherches concernant ces phénomènes sont encore d'actualité.

Le contrôle d'écoulement est un thème de recherche capital pour les avionneurs, tant sur le plan économique qu'environnemental. Parmi les nombreuses problématiques industrielles relatives aux avions, le contrôle d'écoulement au-dessus d'une aile est primordial car il conditionne ses performances aérodynamiques. En effet, une diminution de 10% de la traînée d'un avion civil entraîne une réduction de la consommation en carburant de 50 millions de litres durant le cycle de vie de l'appareil [52]. Les enjeux sont aussi environnementaux, les directives émises par la Commission Européenne concernant la pollution et les nuisances sonores autour des aéroports étant de plus en plus sévères. Une réduction de la traînée va de pair avec une réduction de la consommation et une diminution des émissions polluantes.

L'expression "contrôle d'un écoulement" désigne l'ensemble des actions qui consistent à modifier les propriétés de l'écoulement pour l'amener à un état souhaité. Le contrôle vise la plupart du temps à éliminer ou à retarder le décollement de la couche limite. Pour palier à ces contraintes, une importante activité de recherche est menée dans le monde afin de remplacer les dispositifs de contrôle actuellement disponibles.

L'objectif à terme est d'employer des systèmes de contrôle actif de conception moins complexe et moins pénalisants en terme de poids, permettant en plus un contrôle en temps réel, avec un temps de réponse court. Différents systèmes sont à l'étude, parmi lesquels on trouve par exemple les actionneurs fluidiques ou les MEMS.

Depuis quelques années, les décharges électriques établies dans l'air à pression atmosphérique sont employées pour contrôler les écoulements. Dans ce cas, la décharge fait partie intégrante d'un dispositif que l'on nomme actionneur plasma. L'actionneur plasma consiste à appliquer une différence de potentiel entre au moins deux électrodes placées à la surface d'un obstacle. Sous l'effet du champ électrique (par extension des forces coulombiennes), un écoulement résultant d'un transfert de quantité de mouvement entre les espèces chargées et les neutres du gaz environnant, apparaît au-dessus de l'obstacle : le vent électrique. L'actionneur plasma est donc un convertisseur d'énergie qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. La décharge électrique est alors employée comme système de contrôle capable d'effectuer, par l'intermédiaire du vent électrique, un soufflage tangentiel de la couche limite afin de modifier ses propriétés, et ainsi l'amener dans un état souhaité.

Le Chapitre 1 présente une revue bibliographique sur le contrôle d'écoulement par plasma en général. Ce chapitre comporte également des notions importantes d'aérodynamique, ainsi que la description des principaux dispositifs de contrôle d'écoulement utilisés actuellement.

Le Chapitre 2 présente une étude centrée sur les décharges électriques de surface employées comme actionneur plasma. Nous y présentons les notions nécessaires à la compréhension de la physique des plasmas et des décharges électriques, tout en expliquant le phénomène de vent électrique, qui à l'origine des actionneurs plasmas. Puis, nous dressons une liste des principaux actionneurs plasmas utilisés actuellement.

Dans le Chapitre 3, La méthode de couplage des problèmes aérodynamique et électrique a été mise en œuvre. Le quatrième chapitre relatif à la modélisation et

résolution numérique d'écoulement soumis a des décharge couronne surfaciques. Consiste une étude basé sur la simulation numérique du comportement stationnaire d'une décharge couronne dans l'air a pression atmosphérique, effectuée à l'aide du logiciel FLUENT.

Les résultats et la validation des résultats sont considéré dans le dernier chapitre aussi une analyse détaillée de ces résultats est traité dans ce chapitre. Une conclusion générale termine ce mémoire. Elle synthétise naturellement l'ensemble des résultats.

CHAPITRE 1

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE CONTROLE DES ECOULEMENTS

1.1. Introduction

Le contrôle des écoulements suscite de nombreux intérêts économiques car il répond à des exigences industrielles. Les enjeux sont donc considérables et ces objectifs industriels peuvent se traduire par une augmentation de portance, une réduction de traînée, un recul de l'incidence de décrochage, par exemple. Toutefois, ces améliorations aérodynamiques ne peuvent pas être acquises ensemble la plupart du temps. Toute la difficulté du contrôle repose alors sur le choix du meilleur compromis afin d'optimiser au maximum les performances de l'écoulement.

Contrôler un écoulement consiste à modifier ses caractéristiques pour l'amener dans un état souhaité. La transition, le décollement, la turbulence sont autant de phénomènes sur lesquels il est possible d'agir. Le dispositif qui va interagir avec l'écoulement pour lui donner le comportement souhaité est appelé actionneur. On distingue deux grandes stratégies de contrôle : Les méthodes passives et Les méthodes actives.

La première consiste à modifier la forme de la surface sur laquelle l'écoulement se développe. L'avantage de cette stratégie est qu'elle ne nécessite aucun apport d'énergie. L'inconvénient est qu'elle n'est pas amovible, donc définitive et inutile pour certaines conditions d'écoulements.

La deuxième méthode nécessite un apport extérieur d'énergie. Il peut s'agir d'une énergie de type Pneumatique : soufflage, aspiration, jets pulsés, jets synthétiques, Mécanique : parois mobiles, volets, becs, ou Électrique : plasmas froids ou chauds. Leur avantage est qu'elles sont amovibles et contrôlables à tout moment. Par contre,

l'inconvénient du contrôle actif est qu'il coûte de l'énergie. Le bilan énergétique n'est pas toujours favorable.

Dans ce premier chapitre, on étudiera les méthodes actives utilisées pour le contrôle de la transition de la couche limite, et donc par voie de conséquence le décollement, aussi les phénomènes liés à la turbulence des écoulements. Enfin, nous terminons par une revue bibliographique du contrôle par plasma.

1.2. Contrôle de la transition laminaire-turbulent

1.2.1. Description de la transition Laminaire – Turbulent

L'expérience montre qu'une couche limite laminaire ne peut s'étendre sur une longueur infinie. Soumise à des instabilités (turbulence, aspérités de paroi...), la couche limite laminaire va devenir turbulente après une zone de transition (Figure 1.1). Ce passage à l'état turbulent a plusieurs conséquences. Le coefficient de frottement de l'obstacle est augmenté par rapport au cas laminaire. La couche limite turbulente qui s'épaissit plus rapidement que la couche limite laminaire, résiste mieux aux gradients de pression adverses.

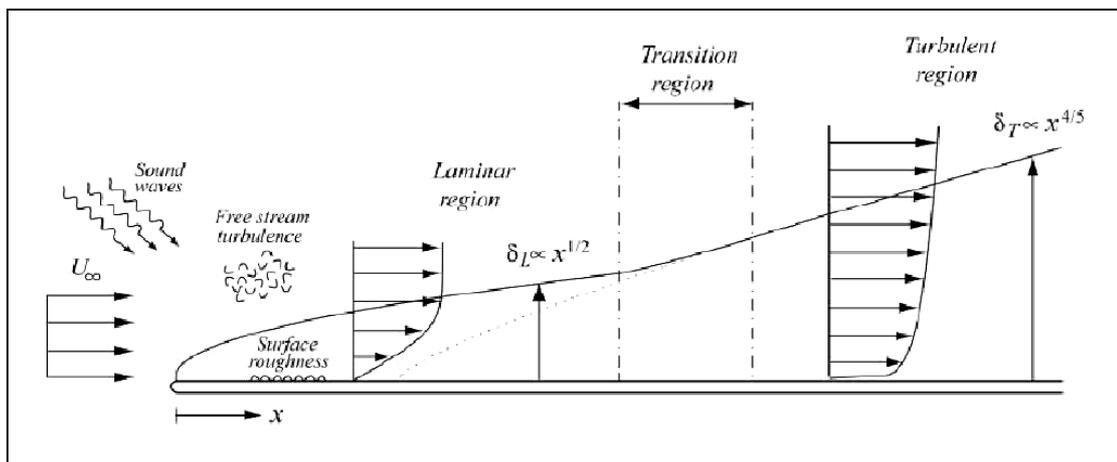


Figure 1.1 : Couche limite se développant sur une plaque plane : passage de l'état laminaire au turbulent.

1.2.2 Phénomène de transition de la couche limite

En général, le mécanisme de transition laminaire-turbulent est le résultat d'une réponse de la couche limite à des perturbations. Ces dernières ont différentes origines qui peuvent être le taux de turbulence de l'écoulement libre, l'état de surface (rugosités) ou encore des vibrations de la paroi. En 1887, Rayleigh émit l'idée que la turbulence provenait de l'instabilité de l'écoulement laminaire du fait de la croissance de petites perturbations régulières. En effet, il existe dans une couche limite laminaire des ondes de Tollmien-Schlichting. C'est leur amplification puis leur déformation tridimensionnelle qui conduit la couche limite à la transition.

Lorsque le nombre de Reynolds dépasse une valeur critique (R_{ec}), on observe une transition de la couche limite laminaire vers la turbulence. La zone de transition délimite deux régions de l'écoulement aux caractéristiques bien distinctes :

- La partie laminaire, située en amont de la transition où les particules présentent des trajectoires prévisibles que l'on peut suivre individuellement.
- La partie turbulente, en aval de la transition, où l'écoulement est plus désordonné.

Les ondes d'instabilités peuvent avoir différentes origines : amplification, au sein de la couche limite, de perturbations provenant de l'écoulement extérieur, état de surface ou vibrations de la paroi.

1.2.3 Méthodes de contrôle

En aérodynamique, le décollement est un phénomène qu'on cherche généralement à éviter sauf cas précis comme pour les avions où on provoque volontairement (aérofreins) le décollement à l'aide d'aérofreins situés sur les ailes. L'action des aérofreins augmente la traînée et diminue la portance ce qui permet de raccourcir les distances d'atterrissage.

La technique du contrôle consiste à modifier le profil de vitesse au sein de la couche limite pour provoquer la transition de l'état laminaire à l'état turbulent. Gad-el-Ak, 2000 propose une synthèse de l'état de l'art dans tous les domaines de la mécanique des fluides : transition, retardement du décollement, réduction de traînée, augmentation de la portance, contrôle de la turbulence et du bruit, ou encore l'augmentation des transferts de chaleur. Les principales méthodes sont donc:

L'aspiration

La méthode envisagée a été introduite par Prandtl en 1904 et consiste en l'aspiration de la couche limite qui a pour conséquence de réduire l'accroissement de son épaisseur. La figure 1.2 montre l'influence de cette méthode sur la couche limite. Les travaux ultérieurs ont démontré un impact très important sur la traînée cependant la technique reste très coûteuse énergétiquement et les problèmes d'obturation des trous sont difficilement solubles.

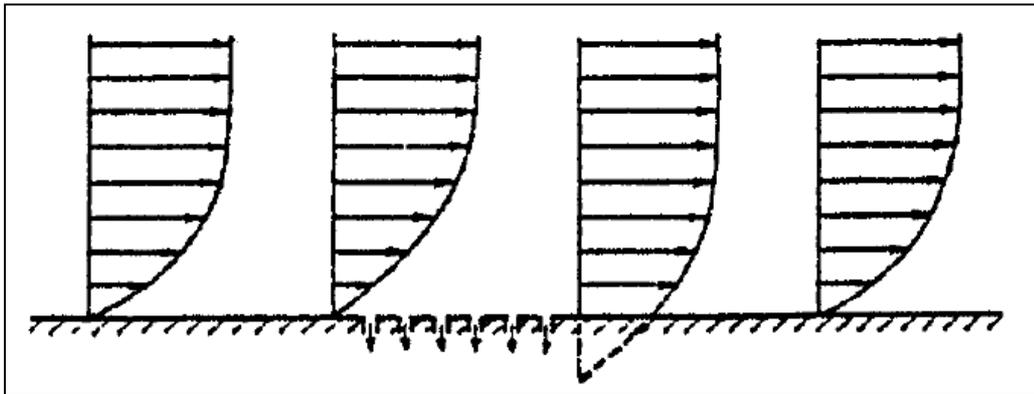


Figure 1.2 : Principe de l'aspiration de couche limite (Comolet,1994).

Le soufflage

Le soufflage consiste à injecter de la quantité de mouvement de manière normale ou tangentielle à la paroi à l'aide d'un jet d'air. Le soufflage tangentiel (Figure 1.3) est de loin la méthode la plus utilisée, notamment au bord d'attaque pour éviter le décollement lors d'abaissements des volets hypersustentateurs des avions. Mais l'apport énergétique nécessaire est très important puisqu'il faut que la vitesse du fluide soufflé soit supérieure à la vitesse locale.

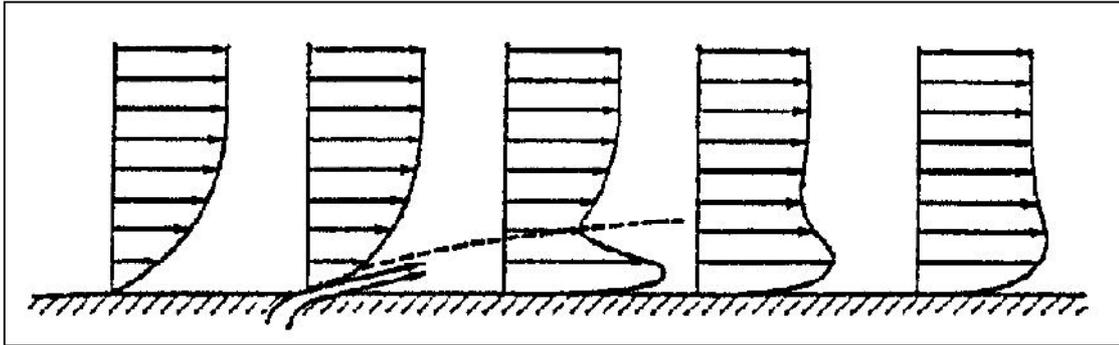


Figure 1.3 : principe de soufflage tangentiel de la couche limite (Comolet,1994).

Tensi *et al.* (2002) ont annulé le décollement autour d'un cylindre à l'aide d'un soufflage normal continu à l'aval du cylindre (Figure 1.4).

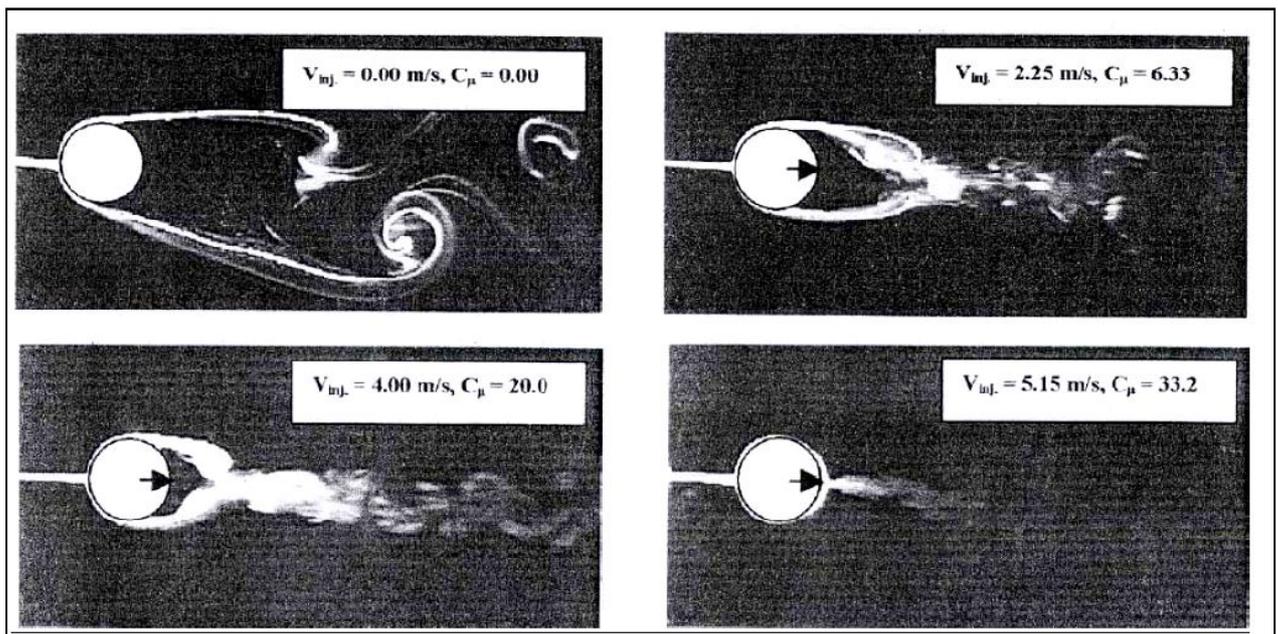


Figure 1.4 : Visualisation de l'écoulement d'air de 0.2 m/s autour d'un cylindre, dans le cas d'un soufflage continu normal à l'aval du cylindre (Tensi *et al.* 2002). La valeur C_{μ} correspond au débit d'air soufflé par rapport à l'écoulement principal.

Les MEMS

Actuellement, une nouvelle série d'actionneurs de petite taille est en train de se développer et qui sont appelés MEMS (MicroElectroMechanical Systems). Parmi leurs modes de fonctionnement on retrouve le soufflage ou les jets synthétiques. L'idée est de reprendre le principe de contrôle efficace des microjets, mais en y rajoutant un paramètre de fréquence afin d'exciter les fréquences d'émission tourbillonnaire de bord d'attaque. Une étude prospective a ainsi conduit à utiliser des diaphragmes piézoélectriques pour générer par vibration une succession d'aspiration et de soufflage. Ils sont placés en vis à vis, chaque paire ayant sa propre cavité acoustique dont les dimensions sont rigoureusement égales (Fig.1.5).

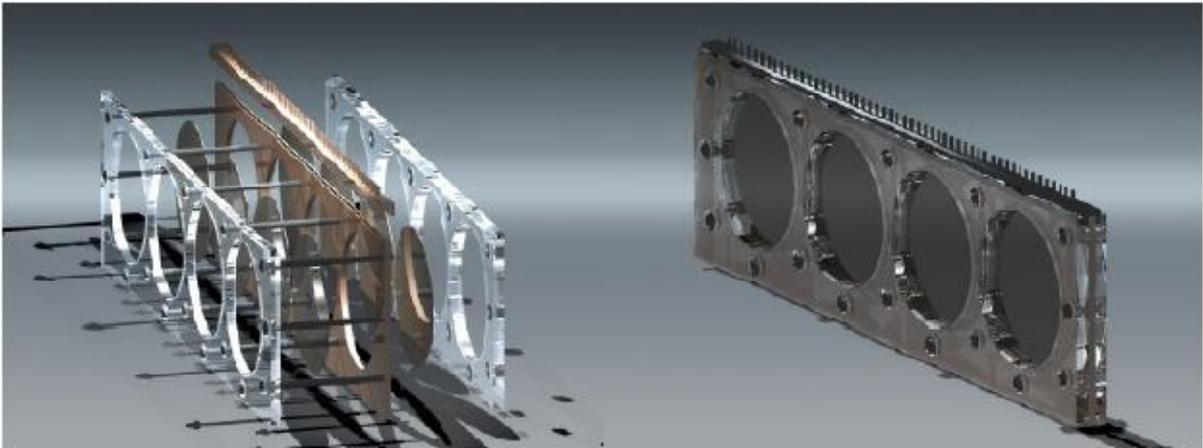


Figure 1.5 : Actionneur piézoélectrique de microjets synthétiques ([Leplat, 2006](#)).

Les dimensions de l'actionneur sont 94,5 mm×13 mm×47 mm (L × l × h), ce qui rend ce prototype implantable dans l'espace réduit qu'impose la géométrie du profil ONERA D (Fig.1.6). De plus, les matériaux composants l'actionneur sont facilement portables à la technologie MEMS, ce qui réduirait considérablement ses dimensions à l'ordre du millimètre. Les perspectives dégagées par cette étude prospective sont très encourageantes et de futurs travaux sont sur le point de débuter à l'IMFT sur la réalisation d'un MEMS à jet synthétique capable de contrôler le décollement.



Figure 1.6 : Prototype d'un actionneur à microjets synthétiques. (ONERA D)

1.3 Couches de mélange planes bidimensionnelles

1.3.1 Descriptions

La couche de mélange plane se forme entre deux écoulements parallèles de vitesses ou de viscosités différentes qui se rencontrent à l'aval d'une plaque séparatrice mince. Cette zone est appelée couche de mélange cisailée libre. Au sein de la couche de mélange se développent deux types de structures tourbillonnaires. Il y a d'abord les grosses structures transversales, dites structures primaires, résultant de l'étirement des instabilités transversales de Kelvin-Helmoltz liées au caractère inflexionnel du profil de vitesse, que celui-ci soit laminaire ou turbulent. Ces structures primaires (Figure 1.7) ont été mises en évidence par Brown et Roshko (1974) et par Roshko (1976).

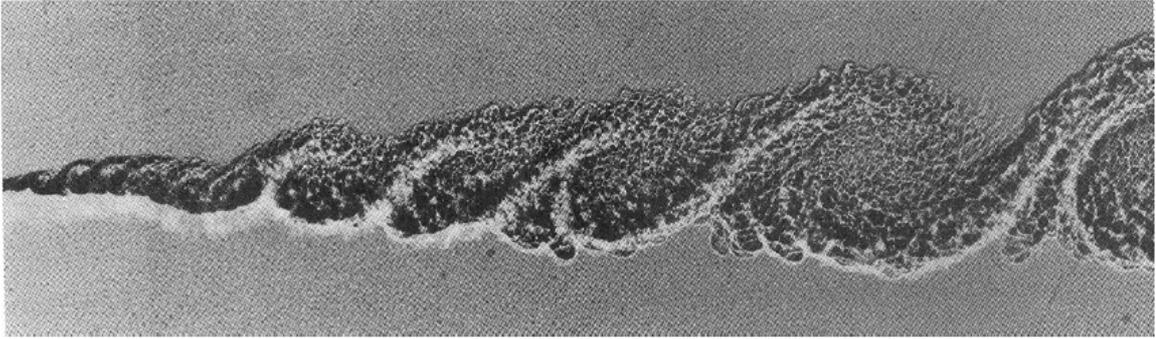


Figure 1.7 : Visualisation des structures primaires créées par un écoulement d'hélium à 10 m/s (en haut) et un écoulement de nitrogène à 3,78 m/s (en bas), d'après Brown et Roshko (1974).

Les structures secondaires, mises en évidence par les travaux de Bernal et Roshko (1986) et ceux de Lasheras et Choi (1988), sont des petits tourbillons contra-rotatifs longitudinaux qui prennent naissance entre les structures primaires. La Figure 1.8 propose une reconstitution en trois dimensions des structures primaires et secondaires au sein d'une couche de mélange.

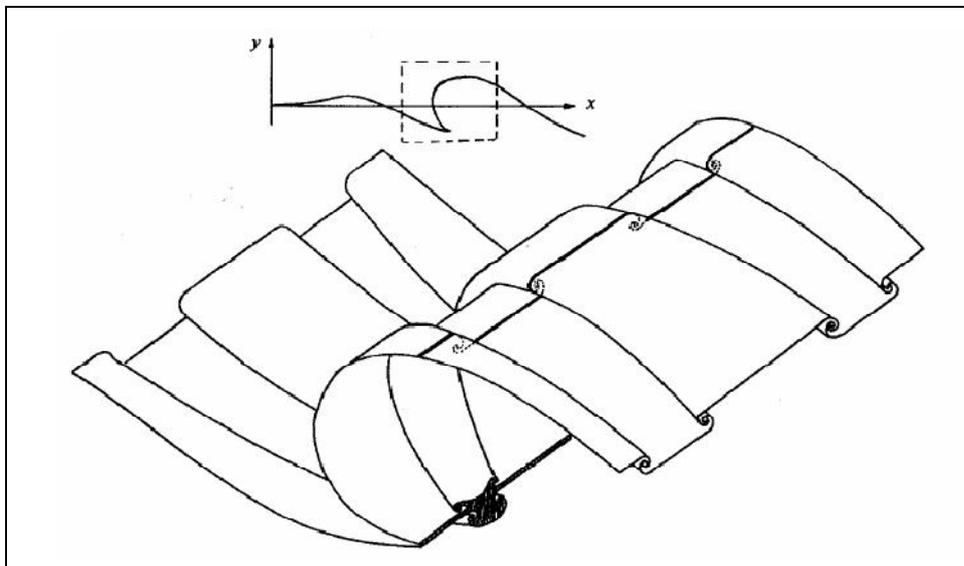


Figure 1.8 : Reconstitution tridimensionnelle des structures primaires et secondaires de la couche de mélange plane, d'après Lasheras *et al.* (1986).

1.3.2 Méthodes de contrôle

La structure de la couche de mélange, son élargissement, ses propriétés d'entraînement, sont très sensibles aux excitations et peuvent être contrôlées par des perturbations artificielles. Oster et Wygnansky (1982) ont montré que le taux d'accroissement de la couche de mélange est sensible à une excitation périodique, même lorsque l'excitation est si petite qu'elle ne peut contribuer à l'énergie initiale des fluctuations. Ils ont montré à l'aide de perturbations introduites au bord de fuite par un mince volet pivotant, que lorsque les oscillations sont de faible amplitude, l'épaisseur de couche de mélange augmente plus rapidement. Les structures primaires de grande amplitude apparaissent avec un espacement régulier et une fréquence de passage égale à la fréquence d'excitation.

D'autres méthodes de contrôle par jet synthétique (Ghosh et Smith 2002) ou par excitations acoustiques (Huang et Ho, 1990; Zohar et Ho, 1996) ont également fait l'objet d'études. Toutes montrent que les couches de mélange sont très sensibles, même à de faibles excitations, et que l'évolution des structures peut être contrôlée (Figure 1.9).

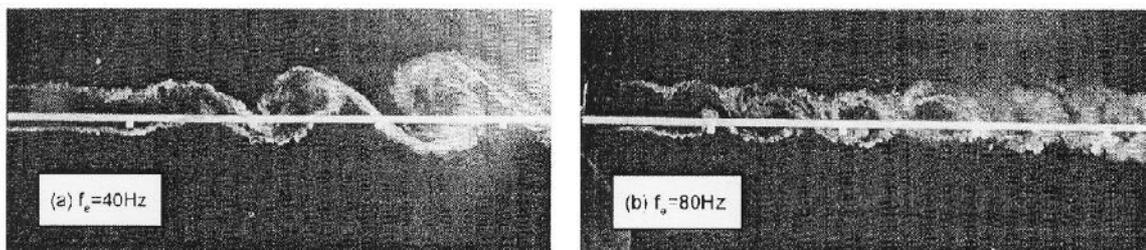


Figure 1.9 : Visualisations d'une couche de mélange plane bidimensionnelle excitée à 40 et 80 Hz, d'après Wygnanski (2000).

1.4. Contrôle d'écoulement par plasma

L'utilisation de plasmas froids constitue une méthode active de contrôle et a été très peu étudié jusqu'en 2000. Depuis, la discipline s'est considérablement développée, particulièrement aux Etats-Unis. En France, les Universités d'Orléans et Toulouse, ainsi que l'ONERA, commence à s'intéresser à cette nouvelle technologie. Nous proposons ici une brève revue des travaux concernant le contrôle des écoulements par décharges couronnes d'abord et par décharges à barrières diélectriques ensuite.

1.4.1. Contrôle par décharge couronne

Dans le milieu des années 60, l'idée de contrôler un écoulement en utilisant l'effet *corona* s'est imposé pour un certain nombre de chercheurs. Velkoff et Ketchman [6] publient un article concernant le contrôle d'un écoulement au-dessus d'une plaque plane par effet *corona*, réussissant ainsi à mettre en évidence le déplacement en aval de la zone de transition de la couche limite.

Soetomo [10] a observé l'influence d'une décharge couronne continue et alternative (60 Hz) sur la traînée d'une plaque de verre pour des Reynolds de l'ordre de 103. Il observe une réduction de traînée spectaculaire mais les vitesses étudiées sont relativement faibles (< 2 m/s).

Depuis la fin des années 90, le domaine du contrôle d'écoulement par plasma a connu un essor très important. Le Laboratoire d'Études Aérodynamiques de l'Université de Poitiers s'est positionné comme un acteur majeur de la recherche dans ce domaine.

Léger et al. [11] ainsi que Moreau et al. [19] ont étudié l'effet d'un actionneur de type décharge couronne (DC) sur une couche limite de plaque plane à des vitesses allant jusqu'à 25 m/s ($Re = 0.375 \times 10^6$). Après avoir sondé la couche limite avec une sonde de pression en verre, ils montrent que l'actionneur modifie clairement les profils de vitesse ainsi que plusieurs paramètres de couche limite, par exemple son épaisseur (Figure 1.10).

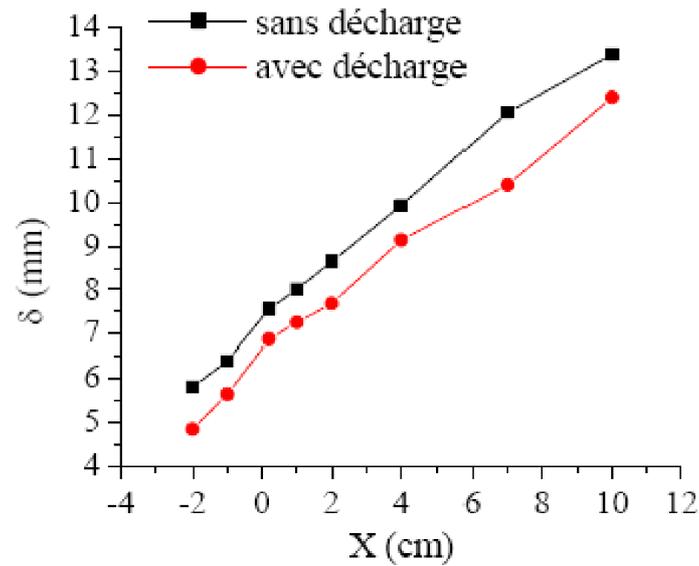


Figure 1.10 : Évolution de l'épaisseur de couche limite le long d'une plaque plane à 20 m/s avec et sans décharge [11].

La Figure 1.11 montre plusieurs profils de vitesse à 1 cm en aval de l'actionneur lorsque l'actionneur est éteint puis lorsqu'il est allumé, et ce, pour différentes vitesses extérieures. Les auteurs remarquent que l'effet de l'actionneur diminue lorsque la vitesse extérieure augmente, ce qu'ils expliquent par le fait que la puissance mécanique ajoutée par l'actionneur reste constante là où celle de l'écoulement augmente avec la vitesse.

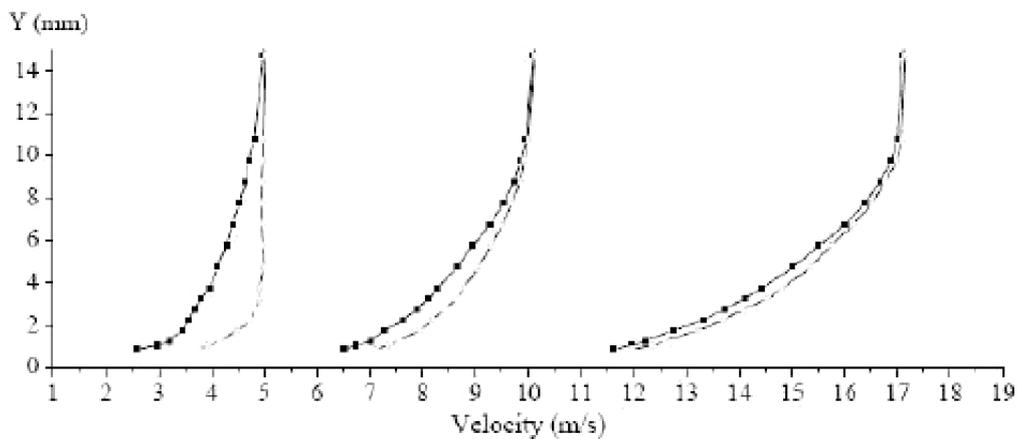
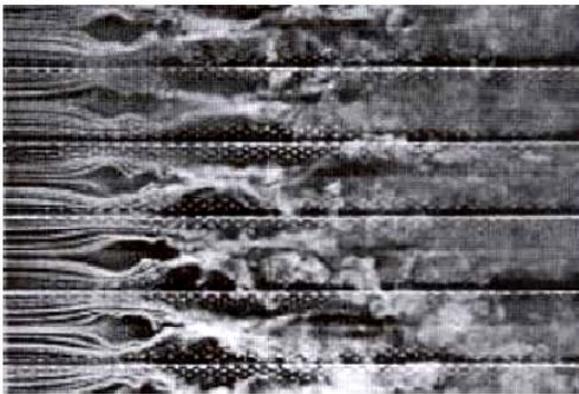


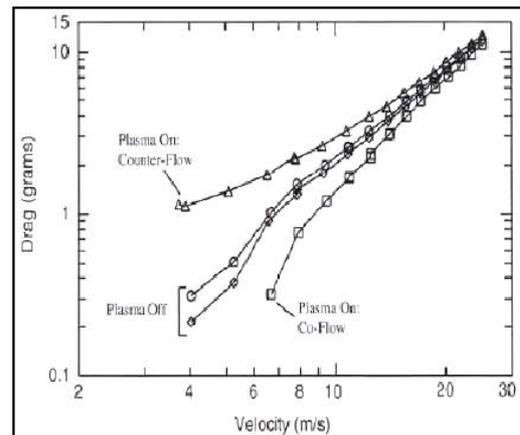
Figure 1.11 Profils de vitesses avec et sans décharge dans la couche limite d'une plaque plane pour trois vitesses extérieures différentes.

1.4.2 Contrôle par décharge a barrière diélectrique

En parallèle des études réalisées avec un actionneur plasma de type DC surfacique, des chercheurs ont mené des travaux sur la plaque plane en utilisant l'actionneur plasma de type DBD. Roth et al. [20] ont publié un article complet sur l'effet d'un tel actionneur sur une couche limite. Le but de leur étude était de montrer que la force EHD induite par l'actionneur DBD est suffisante pour modifier la turbulence de paroi et la traînée de frottement. Pour cela, les auteurs ont réalisés plusieurs visualisations d'écoulements ainsi que des mesures de vitesse et de traînée. Ils ont également étudié l'effet de l'orientation du vent électrique induit (contre-sens, même sens et perpendiculaire) à la direction de l'écoulement principal (Figure 1.12).



(a)



(b)

Figure 1.12 : Visualisation d'une couche limite manipulée par des actionneurs DBD placé dans le sens de l'écoulement (a) et (b) Traînée d'une plaque plane équipée d'un réseau d'actionneurs générant des vents en contre-sens ou dans le même sens que l'écoulement principal [20].

En suivant la même idée, Jukes et al. ([24]-[25]) ont également essayé de réduire la traînée de frottement en appliquant des oscillations de vent électrique dans la

direction de l'envergure. Les auteurs utilisent pour cela une configuration d'actionneurs DBD ressemblant à celle utilisée par Roth à la différence que leur montage permet d'orienter le vent électrique vers la gauche ou la droite. La Figure 1.13 montre des visualisations par tomographie de l'écoulement induit dans l'air ambiant (sans écoulement principal) par le réseau d'électrodes. On observe clairement une série de tourbillons corotatifs dont le sens de rotation dépend du sens du vent électrique induit.

En présence d'un écoulement extérieur, les auteurs mesurent une réduction de traînée conséquente de l'ordre de 40 %. Toutefois, l'expérience a été menée à très basse vitesse (2 m/s).

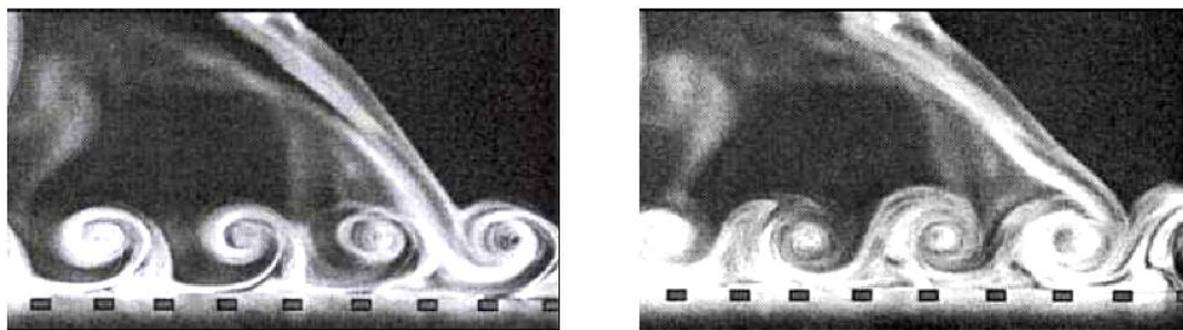


Figure 1.13 : Visualisation des tourbillons générés par le réseau d'électrodes utilisé par Jukes et al. A deux instants différents.

La configuration type *aile* est probablement la plus étudiée par la communauté scientifique. Deux aspects sont particulièrement examinés : le premier est la réduction de la traînée de frottement dans le but de réduire la consommation de kérosène et/ou accroître le rayon d'action des avions. Le second est le contrôle du décollement qui se produit sur l'extrados des profils mis en incidence.

La première étude concernant le contrôle d'écoulement par plasma sur un profil assimilé à une aile a été publiée en 2000 par Shcherbakov [26]. Les auteurs ont disposé de part et d'autre d'un profil d'aile, deux réseaux d'électrodes du même type que ceux utilisés par Roth et al. [20]. Placé dans une soufflerie à veine ouverte à incidence nulle, les couches limites se développant ainsi sur la paroi du profil peuvent être soit naturellement laminaires sur une grande partie de la corde, soit turbulentes en disposant une rugosité au bord d'attaque.

A 35 m/s, une réduction de traînée de 5,3% est obtenue lorsque l'actionneur plasma est enclenché dans le cas où la couche limite est turbulente tandis que celle-ci n'excède pas 0.8% dans le cas laminaire. Cette étude est l'une des rares où la traînée de frottement est étudiée car la majorité des travaux concerne plutôt le contrôle du décollement.

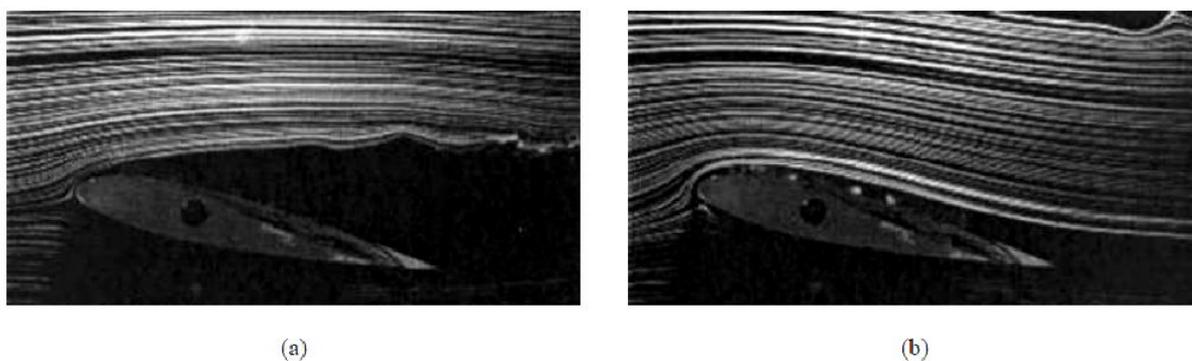


Figure 1.14 : Visualisation de l'écoulement autour d'un profil d'aile NACA 0015 mis à 12° d'incidence sans action (a) et (b) avec action d'un réseau de 8 actionneurs DBD déphasés placés sur l'extrados d'après Roth [27].

Pour le contrôle du décollement, on peut citer Roth [27] qui a examiné l'effet d'un actionneur DBD seul mais également l'influence d'un réseau de huit actionneurs déphasés, placés sur l'extrados d'un profil NACA 0015 en incidence. L'auteur réalise des visualisations de l'écoulement pour plusieurs incidences à une vitesse assez faible. La Figure 1.14 présente une de ces visualisations lorsque le profil est positionné à 12° d'incidence. En l'absence d'action, on voit que l'écoulement naturel décolle largement à partir du bord d'attaque, puis en enclenchant les actionneurs l'écoulement se rattache sur l'extrados. Avec des angles d'attaque plus grands ($\alpha > 12^\circ$), les actionneurs parviennent à retarder le décollement à défaut de l'annuler complètement.

1.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons passé en revue les différentes stratégies pour contrôler un écoulement en insistant essentiellement sur les méthodes actives. Leur but est de contrôler la transition de la couche limite, et donc par voie de conséquence le décollement, mais aussi les phénomènes liés à la turbulence des écoulements. Les principaux inconvénients de ces méthodes sont qu'elles présentent souvent des parties mobiles, ce qui entraîne des problèmes liés à l'usure mécanique, ainsi que des difficultés à rendre les systèmes avionnables du fait de leur complexité. Cependant, le développement actuel de la technologie des MEMS étant très encourageant, les recherches dans cette voie sont ainsi relancées.

Ensuite, nous avons décrit la configuration aérodynamique de la couche de mélange plane où le contrôle de l'état collé ou décollé est primordial pour le développement de l'écoulement.

Enfin, nous avons terminé ce chapitre par une revue bibliographique du contrôle des écoulements par plasmas. Cette discipline est également prometteuse car l'actionneur plasma présente l'avantage d'être robuste et simple à mettre en œuvre.

CHAPITRE 2

LES DECHARGES ET LES ACTIONNEURS PLASMAS

2.1. Introduction

L'objet de ce chapitre est d'effectuer une courte synthèse sur les décharges électriques surfaciques à pression atmosphérique.

Puisque les décharges électriques sont un type de plasmas, nous allons dans un premier temps présenter quelques généralités sur ceux-ci. Puis, nous évoquerons les différents paramètres et processus physiques qui interviennent au sein des plasmas, permettant ainsi leur classification. Nous détaillerons plus amplement les décharges électriques dans les gaz à pression atmosphérique. Enfin, nous terminerons par une revue des différents actionneurs plasmas surfaciques employés pour le contrôle d'écoulement.

2.2. Notions générales sur les plasmas

2.2.1 Définition

Le plasma est nommé "quatrième état de la matière" après les états solides, liquides et gazeux. Historiquement, le terme plasma a été introduit la première fois par le physicien américain Irving Langmuir en 1928. Le plasma est défini comme un gaz ionisé globalement neutre.

Un plasma est un gaz qui a été soumis à une énergie suffisante pour dissocier les électrons des atomes. On parle alors du phénomène d'ionisation. Les particules ainsi formées ont un comportement différent des molécules neutres puisqu'elles sont sensibles au champ électromagnétique.

Chaque particule chargée développe un tel champ autour d'elle et agit sur les autres particules de manière à minimiser l'énergie. Une source externe peut également produire un champ électromagnétique et modifier le mouvement des espèces chargées. Lorsque l'ionisation est suffisante, soit un nombre d'électrons par unité de volume comparable à celui des molécules neutres, le gaz devient alors un fluide conducteur qu'on appelle plasma. Un plasma est défini comme étant analogue à un gaz. Il est constitué de particules chargées, d'ions et d'électrons tels que cet ensemble soit globalement électriquement neutre. Les plasmas sont extrêmement répandus dans l'univers puisqu'ils représentent plus de 99% de la matière connue. Par la suite, les plasmas ont toujours suscité un vif intérêt en vue d'applications aussi bien dans l'industrie (torche à plasma) que dans la vie quotidienne (téléviseurs à écran plasma). Néanmoins, cette discipline se heurte à une étude théorique assez complexe. C'est pourquoi, nous nous limiterons par la suite à donner et décrire quelques éléments fondamentaux qui nous permettront de bien situer le cadre général des décharges électriques (décharge couronne et décharge à barrière diélectrique) utilisées dans cette thèse.

2.2.2. Les processus physico-chimiques internes

2.2.2.1. Les chocs élastiques et inélastiques

Un plasma est le siège de processus réactifs entre particules qui le composent.

Soumis à un champ électrique, par conséquent à la force de Coulomb, les particules chargées vont entrer en collision avec les molécules environnantes. On distingue alors les collisions élastiques des collisions inélastiques.

Dans les chocs élastiques, les atomes conservent la même structure interne. Ceux-ci n'échangent pas d'énergie entre eux ni même avec le milieu extérieur, seuls leurs vecteurs vitesse respectifs changent en direction et en norme. Globalement, l'énergie cinétique du système reste inchangée.

A contrario, dans les chocs inélastiques, l'énergie interne des particules change. L'énergie de la particule incidente, dans ce cas, est suffisante pour que la particule heurtée passe à un niveau excité ou soit ionisée. Les chocs inélastiques sont donc la source d'un nombre de réactions physicochimiques qui vont modifier les propriétés macroscopiques du gaz.

Les phénomènes élémentaires principaux sont l'*excitation*, l'*ionisation*, l'*attachement* pour les phénomènes dit ionisants ; la *recombinaison* et le *détachement* pour les phénomènes déionisants.

➤ Phénomènes ionisants

- L'*excitation* : ce phénomène se produit lorsqu'un atome a acquit suffisamment d'énergie pour qu'un des électrons passe à un orbital supérieur. L'atome passe alors de son état fondamental à un état excité.
- L'*ionisation* : elle advient quand l'énergie absorbée par un atome lors du choc inélastique est suffisante pour qu'un de ses électrons soit soustrait à l'attraction du noyau formant ainsi un ion positif. L'électron ainsi libéré peut alors s'apparier à un autre atome pour former un ion négatif (attachement) ou s'éloigner à l'infini.
- L'*absorption* : ce processus se produit au moment où un atome absorbe un photon et se retrouve dans un état excité ou ionisé.

➤ Phénomènes désionisants

- La *recombinaison* est le phénomène inverse de l'ionisation et se produit quand un ion positif rencontre un électron ou lorsque deux ions de signes contraires se rencontrent. Ceci aboutit à la formation d'atomes neutres stables.
- Le *détachement* : il se produit lorsqu'un ion négatif perd un électron supplémentaire suite à un choc.
- L'*émission* est le phénomène qui survient quand un atome se désexcite en émettant un photon.

2.2.3. Paramètres caractéristiques d'un plasma

Bien que l'étude des plasmas se heurte à des théories plutôt complexes, il est tout de même possible d'introduire un certain nombre de paramètres permettant leur classification. Ces paramètres sont les suivants :

- La *densité électronique* : la densité électronique n_e est le nombre d'électrons libres par unité de volume (cm^{-3}).
- La *degré d'ionisation* : le degré d'ionisation α représente le rapport du nombre d'électrons libres n_e sur le nombre de particules totales $n_e + N$ (N étant le nombre de particules neutres par unité de volume). Le degré d'ionisation est alors donné par :

$$\alpha = \frac{n_e}{n_e + N} \quad (2.1)$$

Un degré d'ionisation nul, signifie qu'on a affaire à un gaz neutre ; si $\alpha \ll 1$ le plasma est dit faiblement ionisé alors que si $\alpha \approx 1$ on dit que le plasma est fortement ionisé.

- *Température électronique T_e* : est la température électronique qui correspond à la température absolue en Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) des électrons. On utilise aussi parfois l'énergie électronique kT_e (en électronvolt eV) avec k la constante de Boltzmann. Dans la nature, les plasmas tels que les étoiles ont une température d'environ 10^7 $^{\circ}\text{K}$ et l'ionosphère terrestre de 100 $^{\circ}\text{K}$.
- La *fréquence de Langmuir* : cette fréquence est caractéristique des oscillations des charges électriques présentes dans les milieux conducteurs et ces oscillations se produisent, à faible température électronique, à la pulsation suivante :

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{m_e \epsilon_0}} \quad (2.2)$$

où $m_e = 9,1.10^{-31}$ kg est la masse atomique de l'électron.

- Le *libre parcours moyen* : le libre parcours moyen λ correspond à la distance moyenne parcourue par une particule chargée entre deux collisions. Celui-ci dépend de la vitesse des particules, de même que la probabilité de collision.
- La *longueur de Debye* : la longueur de Debye λ_d définit la longueur à partir de laquelle le champ électrique Coulombien issue d'une particule chargée est neutralisé par un ensemble de particules de signe opposé dans le volume environnant. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{kT_e \epsilon_0}{n_e e^2}} \quad (2.3)$$

avec ϵ_0 la permittivité du vide ($8,84.10^{-12}$ F/m) et e la charge d'un électron ($1,6.10^{-19}$ C).

2.2.4. Classification des plasmas

Dans un plasma, chaque espèce qui le compose (ions, électrons et neutres) peut avoir son propre distribution de vitesse et donc sa propre énergie d'agitation thermique. Les électrons ont une masse beaucoup plus faible que les ions, ils ont donc moins d'inertie par conséquent ils sont plus *réactifs*. Il est donc plus facile de transmettre de l'énergie aux électrons qu'aux espèces plus lourdes. On va différencier alors les plasmas dans lesquels :

- Seuls les électrons ont acquis relativement d'énergie pour effectuer des réactions, ce sont les plasmas froids également appelés plasma bitempérature ou plasma hors équilibre.
- Les ions ont la même énergie que les électrons et influencent donc le comportement du plasma, ce sont les plasmas chauds.

Cette dénomination de plasmas froid ou chaud peut surprendre mais elle trouve son origine dans le fait qu'en physique des plasmas, on mesure généralement l'énergie cinétique des électrons ou des ions par leur température (ou leur énergie). Dans le cas des plasmas froids, la température des électrons est très supérieure à celle des ions ($T_e \gg T_i$). Les ions sont considérés comme froids car ils sont à la même température que les neutres du gaz environnant ($T_i = T \approx 300$ K). Les décharges que l'on utilise dans nos travaux appartiennent à la catégorie des plasmas froids.

Pour identifier les différents plasmas, Hollahan et Bell [3] ont réalisé une classification de ceux-ci en fonction de la densité électronique, de l'énergie électronique et de la longueur de Debye (Figure 2.1).

Les plasmas produits par des décharges électriques dans les gaz recouvrent une gamme de faible longueur de Debye (10^{-8} à 10^{-3} m), correspondant à des températures relativement faibles ($\leq 5 \cdot 10^4$ K) et des densités électroniques élevées ($\geq 10^8$ cm⁻³).

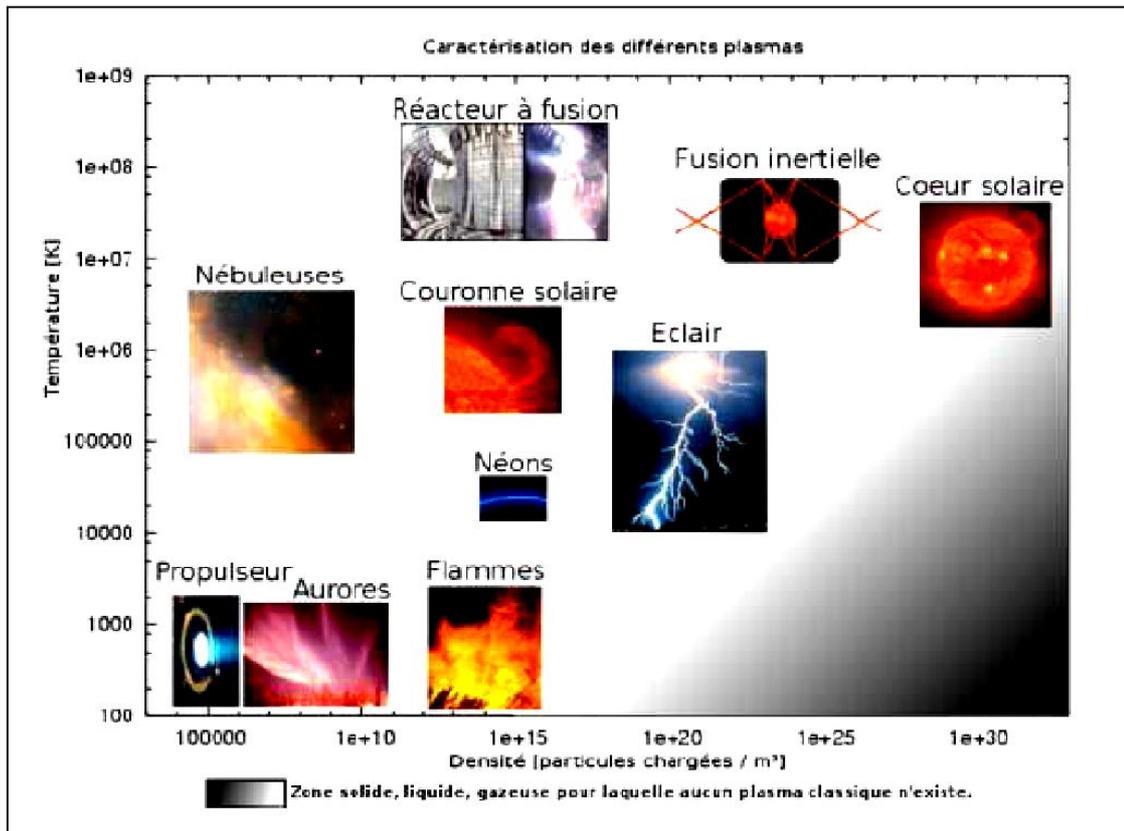


Figure 2.1 : Classification des plasmas en fonction de leur densité de particules chargées et de leur température

2.3. Les décharges électriques dans les gaz

2.3.1. Définition

A l'origine, le terme de « décharge dans un gaz » (gaz discharge en anglais) ou simplement « décharge » fait référence au phénomène physique se manifestant entre les deux électrodes d'un condensateur dans un circuit fermé. En effet, si la tension est suffisamment élevée, un courant traverse le gaz entre les deux électrodes, celui-ci se retrouvant ainsi ionisé. Par la suite, le terme de décharge a été étendu à tous les processus d'ionisation d'un gaz sous la contrainte d'un champ électrique ou électromagnétique. Les phénomènes et les caractéristiques des décharges dépendent de nombreux paramètres comme la nature du champ électrique (continu ou alternatif), la nature et la pression du gaz (Paschen [4]) ou encore des distances caractéristiques (distance inter-électrodes par exemple).

2.3.2. Mécanismes de formation des décharges électriques

Nous allons présenter ici les différents régimes de formation et d'entretien d'une décharge électrique entre deux électrodes obtenue dans un tube à la pression de 1 Torr (1 Torr = $1,32 \cdot 10^{-3}$ atm.) contenant un gaz noble : le *néon* (d'après Delcroix et Bers [5]). On applique alors une différence de potentiel V entre les électrodes, et on mesure le courant qui passe dans le circuit électrique.

La Figure 2.2 présente la caractéristique tension-courant de cette décharge électrique. Nous pouvons y voir plusieurs régimes de décharge.

➤ *Le régime non-autonome*

Pour les faibles valeurs de courant, la décharge ne se produit que s'il existe une source extérieure émettant des charges. A ce stade, la présence d'ions s'explique essentiellement par la radioactivité naturelle ou le rayonnement cosmique. Si la cathode est isolée de tout rayonnement électromagnétique alors la décharge est interrompue, celle-ci ne s'entretient pas d'elle-même, elle est dite *non-autonome*.

➤ *Entretien de la décharge et avalanche électronique*

Lorsque la tension atteint une valeur seuil V_d , le champ est assez intense pour qu'un électron acquiert suffisamment d'énergie cinétique et ionise une particule environnante selon la formule suivante :



Les deux électrons ainsi libérés peuvent à leur tour ioniser des molécules environnantes en initiant une réaction d'ionisation en chaîne que l'on nomme avalanche électronique. Il en résulte une multiplication du nombre d'électrons mais celle-ci n'est pas suffisante pour que la décharge soit autoentretenu.

A ce stade, une source d'ionisation secondaire est nécessaire, on parle de régime de Townsend non entretenu.

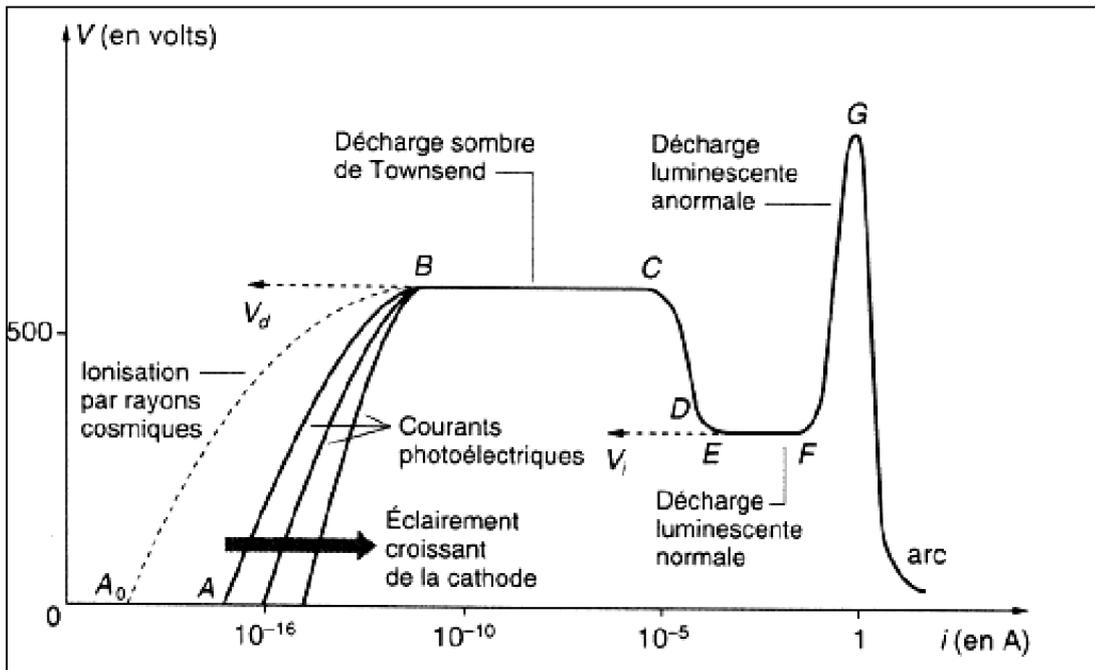


Figure 2.2 : Caractérisation tension-courant d'une décharge électrique [5].

➤ *Régime auto-entretenu :*

Pour que la décharge soit auto-entretenu, il est nécessaire que tout électron quittant la zone d'ionisation soit remplacé. Chaque électron doit créer suffisamment d'ions positifs, de photons et d'espèces métastables pour qu'au moins l'un d'eux puisse produire un nouvel électron. La décharge devient autonome et vérifie alors le critère de Townsend :

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \tag{2.5}$$

Où α et γ sont les coefficients d'émission électronique primaire et secondaire de Townsend, d la distance inter-électrodes.

➤ *Décharge sombre de Townsend et décharge luminescente :*

Dans la zone de potentiel constant (BC), les densités électroniques restent faibles et les phénomènes de charge d'espace sont négligeables. La décharge est donc très faiblement lumineuse, elle est appelée décharge sombre de Townsend. Si l'augmentation du courant se poursuit, une chute de potentiel est alors observée pour

atteindre un palier (EF). Le tube devient lumineux mais l'illumination n'est pas homogène à cause des phénomènes de charge d'espace. Cette zone correspond à une décharge nommée luminescente normale. Puis si l'intensité croît d'avantage, on entre dans la région FG où toute la surface de la cathode est utilisée pour la décharge. Cette décharge dite luminescente anormale est caractérisée par une augmentation rapide du potentiel.

➤ *Régime d'arc :*

Ce dernier régime, appelé aussi *régime disruptif*, est caractérisé par un courant de décharge conséquent. De ce fait toute l'énergie passe par un canal préférentiel dans l'espace inter-électrode. Il s'en suit des effets thermiques importants, aussi bien dans le gaz que sur les électrodes. Les arcs électriques peuvent être naturels, comme la foudre, ou générés de façon industrielle pour la soudure à l'arc par exemple.

2.3.3. Décharges électriques à pression atmosphérique

Les décharges électriques sont généralement établies à basse pression (tube néon par exemple) car elles sont faciles à obtenir et sont stables. Au contraire, les décharges à pression atmosphérique sont plus difficiles à maîtriser. Cependant, celles-ci possèdent tout de même de nombreuses applications (soudure à arc, torche à plasma...). Parmi les différentes décharges à pression atmosphérique, nous allons en détailler deux plus amplement : la décharge couronne et la décharge à barrière diélectrique.

2.3.3.1. Décharge couronne :

Les décharges couronnes (ou décharges à effet corona) apparaissent généralement à pression atmosphérique et sont faiblement lumineuses. Elles sont caractérisées par la présence d'une zone de champ intense proche d'une ou des deux électrodes où les charges sont créées et d'une zone de dérive où les charges se déplacent. Les décharges couronnes les plus connues se produisent entre une pointe portée à un potentiel positif ou négatif et un plan relié à la masse (figure 2.3.a et b). Dans ce type de décharge l'électrode pointe est dite active car il se crée dans

la région autour un fort champ électrique qui permet l'ionisation des espèces. Ce phénomène apparaît lorsque le rayon de courbure est faible devant l'espace inter-électrodes. Par exemple, il ne se manifestera une décharge couronne dans l'air entre deux électrodes fils de rayon r (figure 2.3.c) et séparées par une distance d uniquement si $d > 5,85r$ [8]. Le plan est une électrode passive et sert à collecter les charges qui ont dérivé sous l'action du champ électrique.

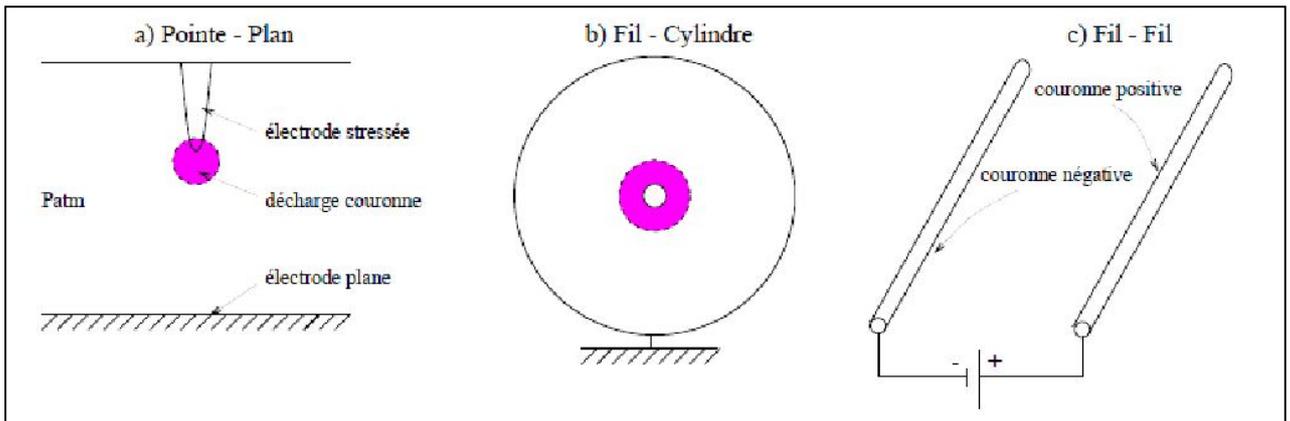


Figure 2.3: Configurations typiques pour la formation de décharges couronnes

La dissymétrie des électrodes conduit à un champ électrique inhomogène dans l'espace inter-électrodes. En l'absence de charge d'espace, **Hartmann (1977)** a établi une expression du champ électrique E en fonction du potentiel appliqué à la pointe le long de l'axe de symétrie x :

$$E(x) = \frac{V}{(x + r/2) \ln \left[\frac{2d + r}{r} \right]} \quad (2.6)$$

Avec V le potentiel, d la distance inter-électrodes, r le rayon de courbure de la pointe et x l'abscisse du point considéré par rapport à l'extrémité de la pointe prise comme origine. Dans une configuration fil-plaque, **Lacoste et al. (2004)** ont utilisé :

$$(2.7)$$

Avec E_i le champ électrique $E(x) = E_i \frac{r}{x}$ du fil que l'on peut déterminer par la formule empirique de Peek (157),

Le signe du potentiel appliqué à la pointe et l'existence ou non d'une seconde électrode active (figure 2.3.c) jouent un rôle sur les mécanismes et les régimes des décharges couronnées [9]. La figure 2.4 montre une caractéristique typique et met en évidence les quatre différents régimes des décharges couronnées qui apparaissent lorsque l'on augmente progressivement la tension aux bornes du générateur.

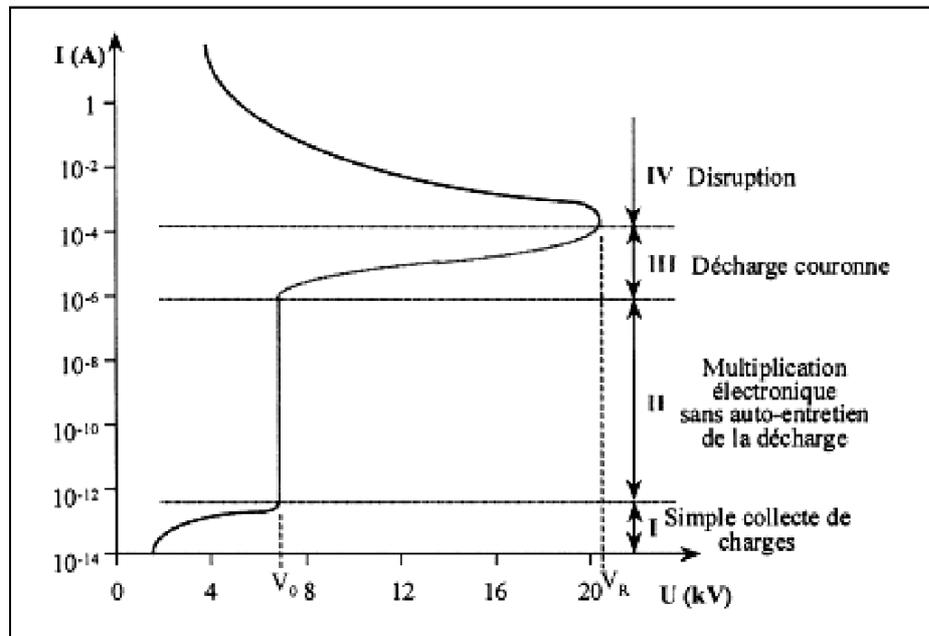


Figure 2.4: Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne [2]

- Régime I : Collecte de charges

Dans le premier régime, le courant recueilli est dû à une simple collecte de charges naturellement présentes dans le milieu. Elles ont été créées par des sources extérieures telles que les rayons cosmiques ou la désintégration spontanée d'espèces présentes. Cette décharge n'est pas autoentretenu et est impossible si le milieu est isolé de l'environnement extérieur.

- Régime II : Régime impulsionnel

Le deuxième régime de décharge que l'on rencontre est également non-autonome. Il diffère du premier régime par le fait que le champ électrique imposé est ici suffisamment puissant pour déclencher des avalanches électroniques. Le courant électrique varie très rapidement avec la tension et se présente sous la forme d'impulsions de courant. Ces dernières sont dues à la création de charges d'espace provoquant une diminution du champ électrique local ce qui empêche la formation de

nouvelles avalanches électroniques tant que les charges n'ont pas été évacuées. Les impulsions de courant sont donc régulières et leur fréquence est caractéristique du temps de dérive des charges d'espace.

- Régime III : Régime luminescent

Le troisième régime correspond à une décharge auto-entretenu, l'intensité du courant est constante.

Dans la littérature, certains auteurs parlant des décharges couronnes se réfèrent implicitement à ce régime, d'autres adoptent la terminologie de « décharge luminescente » pour spécifier ce régime.

- Régime IV : Régime disruptif

Lorsque l'on augmente encore la tension, la décharge devient de nouveau impulsionnelle jusqu'à l'apparition du phénomène de claquage. A ce moment, toute l'intensité passe très rapidement dans une étincelle et le potentiel aux bornes des électrodes chute rapidement. Ce régime est très dangereux pour l'intégrité du matériel d'alimentation. Il est également possible de stabiliser ce régime d'arc dont l'application principale est la soudure à l'arc.

Les différences entre les régimes des décharges pointe positive ou négative interviennent surtout aux niveaux des régimes impulsionnel et luminescent.

- Décharge couronne négative :

Les électrons libres naturels et ceux créés lors des avalanches électroniques sont repoussés par la cathode vers la zone de champ électrique plus faible tel qu'illustré à la Figure 2.5a. Ceux-ci se recombinent rapidement avec les molécules neutres et forment des ions négatifs (Figure 2.5b). Pendant ce temps, les ions positifs créés lors des avalanches électroniques s'approchent de la cathode dans la zone de champ intense (Figure 2.5c). Ils sont captés avant que les ions négatifs ne s'éloignent suffisamment de la cathode pour ne plus modifier le champ électrique dans la zone active. Les ions négatifs forment alors la charge d'espace négative (Figure 2.5.d).

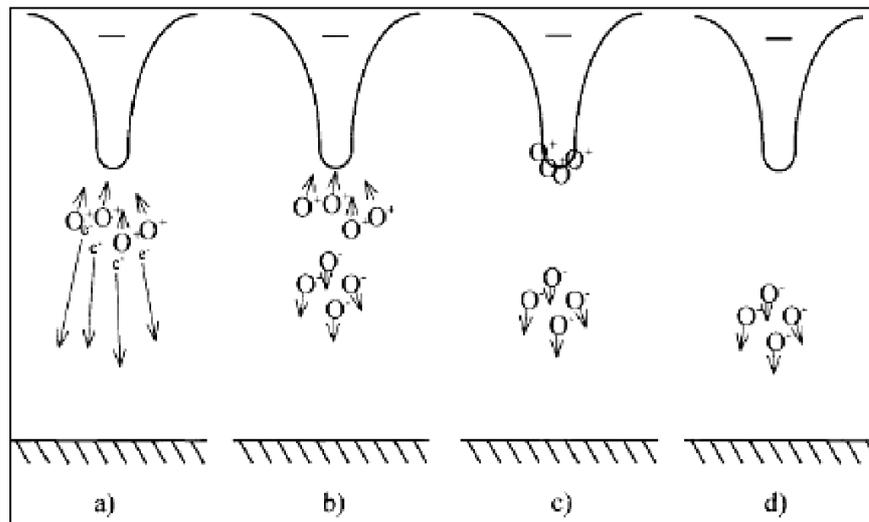


Figure 2.5 : Effet de couronne en tension négative

➤ Décharge couronne positive :

En tension positive, les électrons libres naturels et ceux créés lors des avalanches électroniques se déplacent vers l'anode dans la zone où le champ électrique est le plus intense tel qu'illustré à la Figure 2.6a. Ils sont rapidement captés par l'anode, ce qui a pour effet de laisser dans l'espace entre les électrodes les ions positifs, autre produit des avalanches électroniques (Figure 2.6b). Les ions positifs sont plus lourds et, par le fait même, plus lents que les électrons. Ces ions positifs forment la charge d'espace positive qui se déplace vers la cathode, où le champ électrique est moins intense (Figure 2.6c).

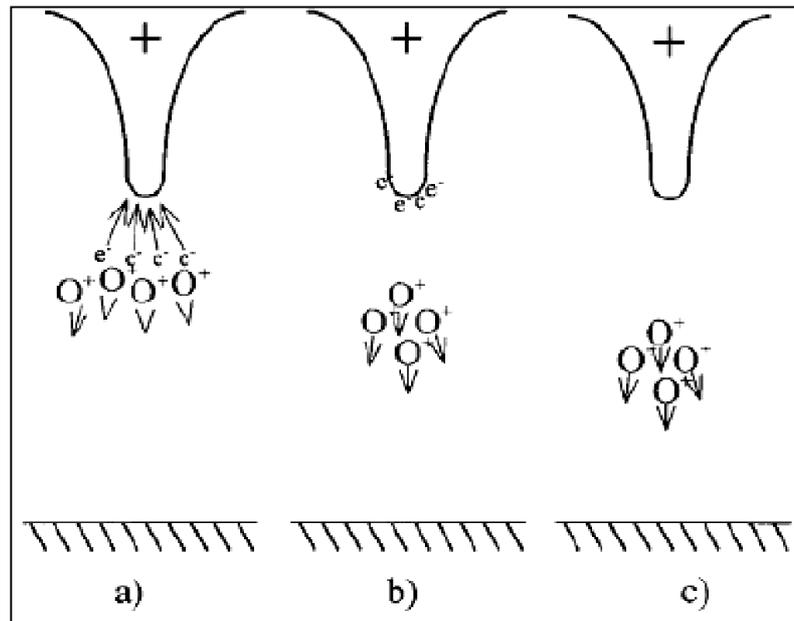


Figure 2.6 : Effet de couronne en tension positive

2.3.3.2 Décharge à barrière diélectrique :

Les décharges à barrières diélectriques (DBD), également appelées décharges silencieuses, permettent de générer un plasma hors-équilibre thermodynamique à des pressions proches de la pression atmosphérique [21][22]. Pour les applications qui nécessitent soit un grand flux de matière, soit des fortes pressions qui favorisent la cinétique des réactions souhaitées, les DBD présentent certains avantages vis-à-vis des décharges d'arc plus classiques.

Une décharge contrôlée par barrière diélectrique est une source de plasma froid hors d'équilibre, c'est-à-dire un gaz ionisé globalement neutre dans lequel les électrons créés possèdent une énergie (quelques eV) ou une température très supérieure à celle des ions et des particules neutres du gaz (300 K) qui restent majoritaires [23]. Le terme de DBD regroupe toutes les configurations de décharges pour lesquelles un courant transite entre deux électrodes métalliques séparées par un gaz et par au moins une couche d'un matériau isolant (diélectrique solide).

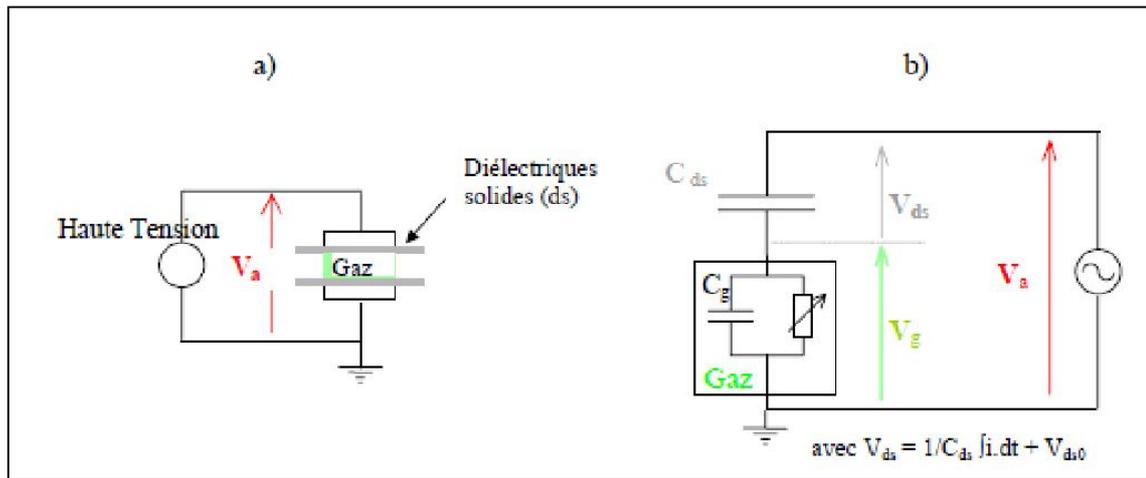


Figure 2.7 : a) Exemple de configuration de DBD avec deux diélectriques solides ; b) son schéma électrique équivalent.

Le rôle des diélectriques est donc de limiter la charge, c'est-à-dire l'intégrale du courant pouvant transiter dans la décharge et ainsi de prévenir la formation d'un arc comme cela peut arriver entre deux électrodes métalliques à la pression atmosphérique [8]. En contrepartie, la présence d'un diélectrique impose l'utilisation d'une tension alternative ou pulsée.

➤ Régimes de décharge :

Pour les DBD, deux régimes de fonctionnement sont observables. Le premier est constitué d'une multitude de microdécharges couvrant toute la surface du diélectrique et le deuxième d'une décharge homogène.

▪ *Décharge silencieuse :*

C'est la première qui a été observée. Le diélectrique joue le rôle d'un condensateur en série avec le plasma, ce qui a un effet stabilisateur et conduit à un grand nombre de microdécharges de petite impulsion dans tout l'espace inter-électrodes. Ces microdécharges ont un diamètre de quelques centaines de micromètres, un temps de vie de 100 ns. Ces caractéristiques dépendent de la nature et de la pression du gaz (Eliasson et Kogelschatz, [12]). La Figure 2.8 illustre un exemple où les deux électrodes sont recouvertes d'un isolant. Les électrodes forment un nuage suivi d'un filament de charges positives issues des avalanches

(Figure 2.8a). Les charges négatives traversent l'espace inter-électrodes et sont bloquées sur la surface isolante. Leur accumulation entraîne la formation d'un champ électrique local inverse stoppant les avalanches électroniques et le flux de courant après quelques nanosecondes (Eliasson et Kogelschatz [13], et Kanazawa et al. [14], Figure 2.8b).

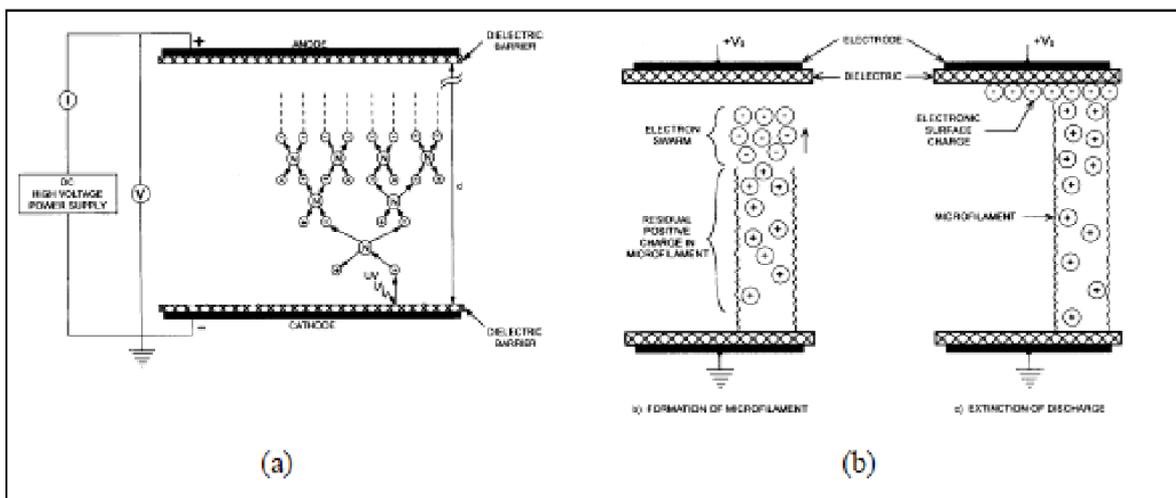


Figure 2.8 : Étapes de la formation d'une micro-décharge dans une DBD [15].

- *Décharge lumineuse homogène* :

Récemment, des scientifiques ont montré qu'il était possible d'obtenir des décharges lumineuses homogènes contrôlées par une barrière diélectrique dans l'air à pression atmosphérique [18, 17]. En appliquant des champs électriques de quelques kV à des fréquences de l'ordre du kHz et avec des distances inter-électrodes de 0,5 à 3 cm (Roth, [15]). Dans ce cas, la décharge silencieuse est remplacée par un régime lumineux homogène (d'un point de vue macroscopique). En remplaçant l'électrode plane par une grille, Okazaki et al. [16] ont obtenu des décharges lumineuses avec une fréquence de l'ordre de 50 Hz. Dans tous les cas, la décharge est contrôlée par une barrière diélectrique qui rend la décharge de courte durée et une répartition de charges telle que les microdécharges soient rares (Massines et al. [17]). Contrairement aux décharges silencieuses. Massines et al. ont montré que ce type de décharge est caractérisé par un courant de décharge périodique, et que celui-ci a la même structure que les décharges observées à basse pression.

2.4 Le vent ionique

2.4.1 Historique

Le premier scientifique à mettre en évidence l'existence du vent ionique est Francis Hauksbee qui rapporte une faible sensation de soufflage sur son visage lorsqu'il y approche un tube chargé (1709). Par la suite, Wilson et Hamilton (1750) mettent au point la célèbre expérience du « tourniquet électrique » et démontrent la possibilité d'utiliser ce vent. Toutefois, il faut attendre 1938 pour que Faraday, dans un ouvrage consacré aux décharges électriques, affirme implicitement que le vent ionique est un processus de transfert de quantité de mouvement par friction ou collisions entre les ions dérivant sous l'action du champ électrique et les particules neutres du milieu. En 1961, Robinson [29] propose le premier modèle du vent ionique créé par une décharge couronne et obtient que le vent ionique v_i créé par une décharge couronne dépend du courant électrique i :

$$v_i \sim \sqrt{i} \quad (2.8)$$

2.4.2 Vitesse du vent électrique

Au vue de la différence de masse entre les électrons et les ions, et ce malgré une fréquence de collision électron-neutre beaucoup plus élevée que celle entre les ions et les neutres, le transfert de quantité de mouvement est pratiquement entièrement dû aux ions. Au moyen d'un modèle assez simple, négligeant la viscosité et admettant un rendement de 100% dans le transfert d'énergie cinétique lors des chocs, Roth [30] a montré un rapport de 800 entre la vitesse due aux collisions électron-neutre et celle due aux collisions ion-neutre.

Dans le cas des décharges couronnes en volume pointe plan, Goldmann et al. Expriment la vitesse du vent ionique en fonction de la racine de l'intensité sous la forme suivante [31] :

$$v_g = \sqrt{\frac{Id}{\mu_g \rho_g A_g}} \quad (2.9)$$

Où A_g est la section de la décharge. Cette variation de la vitesse est retrouvée par Moreau [32] qui montre également que la décharge couronne positive est plus performante (figure 2.9).

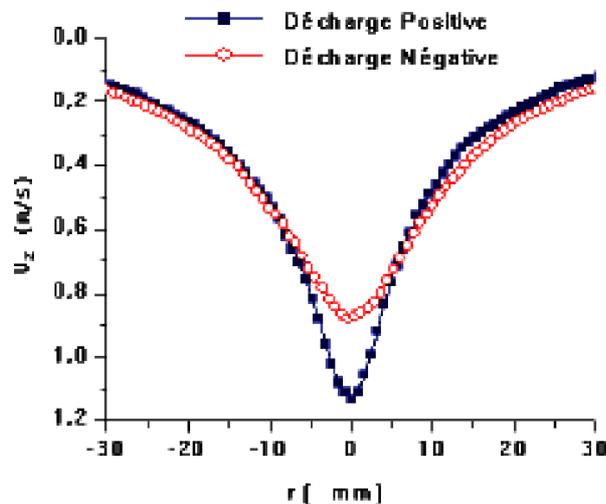


Figure 2.9: Vitesse axiale du vent ionique à 2 cm de la pointe (distance inter-électrodes de 4 cm, ddp de 40 kV et intensité de 0,04 mA) [32]

Si on considère une électrode portée à un fort potentiel négatif (Figure 2.10). Une avalanche électronique se produit, créatrice d'un nombre élevé d'ions positifs et d'électrons. Les ions positifs sont absorbés à la cathode tandis que les électrons s'en éloignent rapidement. Ayant atteint une zone de champ électrique plus faible, ces électrons s'attachent rapidement aux molécules d'oxygène de l'air pour former des ions négatifs. Ces ions dérivent alors en s'écartant de leur zone de production. Ce mouvement se traduit par la création d'un vent ionique.

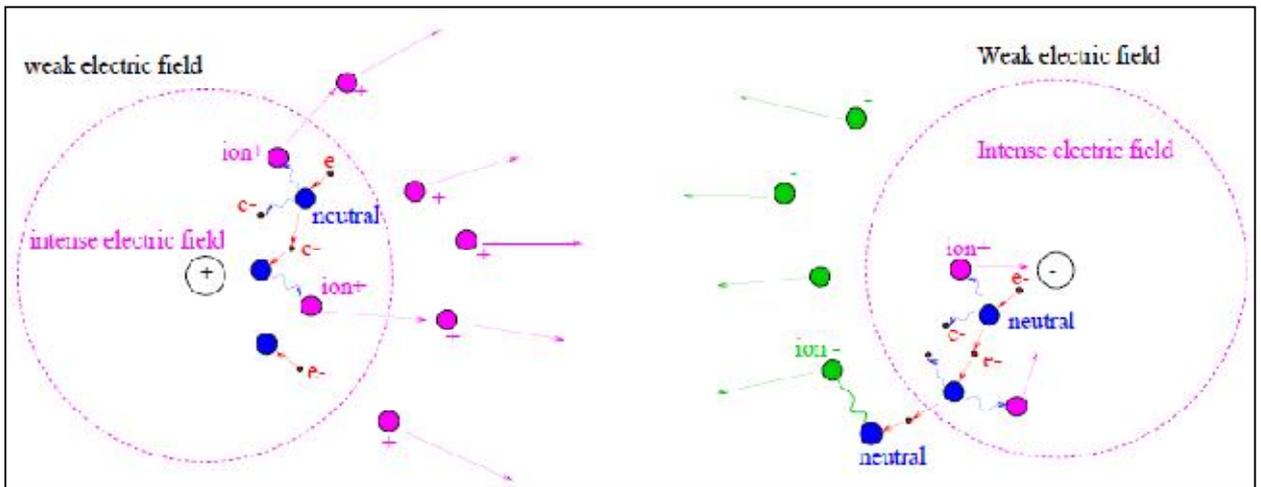


Figure 2.10 : Couronne positive (à gauche), négative (à droite) et vent ionique

2.5. Les différents types d'actionneurs plasmas surfaciques

Les actionneurs plasmas de surface ont été développés récemment (milieu des années 90) et font l'objet de nombreuses études expérimentales et numériques. Le fait que ces décharges soient surfaciques induit d'importantes différences par rapport aux décharges volumiques. En effet, l'interaction entre le plasma et la surface du diélectrique contribue à la modification des phénomènes électrostatiques (déviation des lignes de champs, dépôt de charges à la surface de l'isolant, etc.) ainsi que de la physico-chimie du plasma.

Toutefois, nous nous contenterons de présenter dans cette section les différents actionneurs plasmas surfaciques existant à ce jour et leurs propriétés électromécaniques connues. De plus, si ces actionneurs ne sont pas basés sur le même principe de fonctionnement, ils ont un but commun : ajouter de la quantité de mouvement à l'air environnant au niveau de la paroi où la décharge est appliquée.

2.5.1 L'actionneur à Décharge Couronne (DC)

Les actionneurs plasmas à décharge couronne de surface ont pris leur essor dans le milieu des années 90 avec l'émergence d'autres nouveaux moyens de contrôle actif d'écoulement. Les premiers travaux concernant la modification de l'écoulement au dessus d'une plaque plane par application d'une décharge continue de surface ont été réalisés par Soetomo [10] puis par Léger et al. ([33], [34]-[11]). Nous allons donc résumer les résultats obtenus sur cette configuration dans les sections suivantes.

➤ *Descriptions de l'actionneur DC de surface :*

Initialement, dans les premières configurations testées (Artana et al.) les électrodes étaient posées en vis-à-vis à la surface d'une plaque de PMMA et distantes l'une de l'autre de 4 cm. Cependant, cette décharge fut difficile à stabiliser. Ceci est probablement dû au fait que les électrodes sont directement en regard, ce qui rend la décharge sensible aux imperfections des électrodes.

Le schéma de la Figure 2.11 donne une représentation d'une décharge stable, d'un point de vue disruptif. La décharge est établie entre deux électrodes placées à l'intérieur de rainures usinées dans un matériau isolant. Cette configuration a été finalement retenue suite aux travaux de Léger durant sa thèse [33]. Par la suite Laberge ([35]-[36]) a effectué une large étude paramétrique sur les différentes grandeurs géométriques liées à cette configuration, afin d'augmenter le vent électrique induit ainsi que la stabilité de la décharge. Ainsi, après avoir testé plusieurs diamètres d'électrodes, plusieurs distances inter-électrodes et plusieurs diélectriques, il conclut que les courants les plus grands (donc les vitesses de vent électrique les plus grandes) sont générés pour une distance inter-électrodes de 4 cm, sur une plaque en PMMA (Plexiglas) et pour des électrodes dont la dissymétrie est la plus grande possible (les valeurs optimum sont 0,4 mm pour l'anode et 2 mm pour la cathode).

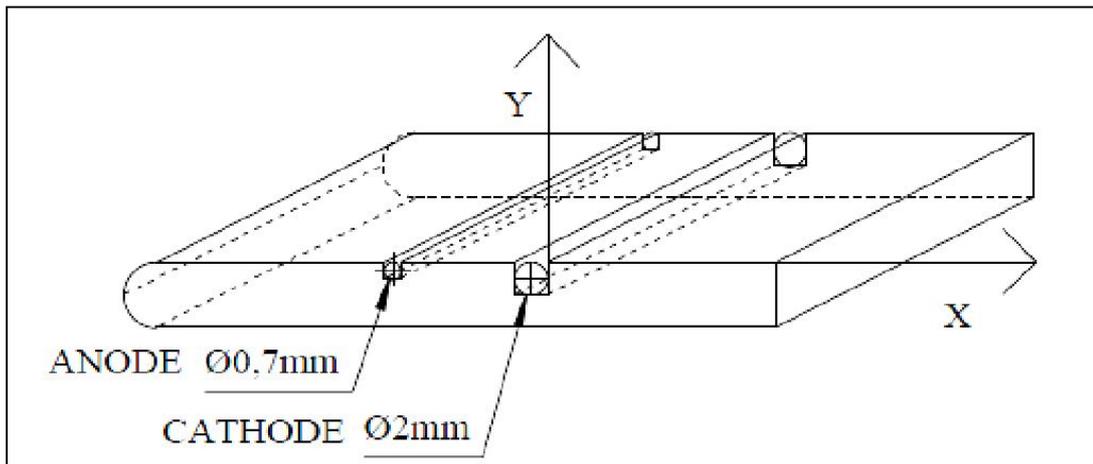


Figure 2.11 : Schéma de l'actionneur plasma à décharge couronne de surface (configuration de Léger, [37]).

➤ *Propriétés électriques :*

Lorsqu'on applique une différence de potentiel entre les deux électrodes la décharge DC, (Figure 2.11) un courant de décharge apparaît et cinq régimes de décharge peuvent être observés :

- **SPOT** : ($i \leq 0.2 \text{ mA/m}$, $P \leq 15 \text{ mW/cm}^2$) ; La décharge est concentrée en quelques points lumineux visibles sur les électrodes. Leur nombre augmente avec la différence de potentiel. Ces points lumineux apparaissent sur les défauts de forme des électrodes. Ils entraînent des concentrations locales de lignes de champ, créant ainsi une zone préférentielle de décharge.
- **STREAMER CORONA** : ($0.2 \leq i \leq 0.8 \text{ mA/m}$, $15 \leq P \leq 50 \text{ mW/cm}^2$) ; Pour des différences de potentiel plus importantes, un régime caractérisé par une luminosité plus ou moins homogène sur tout l'espace inter-électrode apparaît. La décharge prend la forme d'une zone bleue collée sur la paroi isolante (Figure 2.12a). Comme dans le régime précédent, les défauts de forme peuvent rendre des zones de décharge plus ou moins lumineuses et parfois entraîner la formation de décharges filamenteuses (Figure 2.12b).

- **GLOW CORONA** : ($0.5 \leq i \leq 2.5 \text{ mA/m}$, $50 \leq P \leq 200 \text{ mW/cm}^2$) ; Dans ce régime, on peut observer un nombre important de points lumineux, presque adjacents et formant ainsi une zone d'ionisation sur les électrodes (Figure 2.12c). Comparé au régime "streamer", l'espace inter-électrodes n'est plus lumineux (dans le domaine du visible). Ce régime est beaucoup plus stable et permet d'atteindre des valeurs de courant beaucoup plus importantes que les régimes précédents.

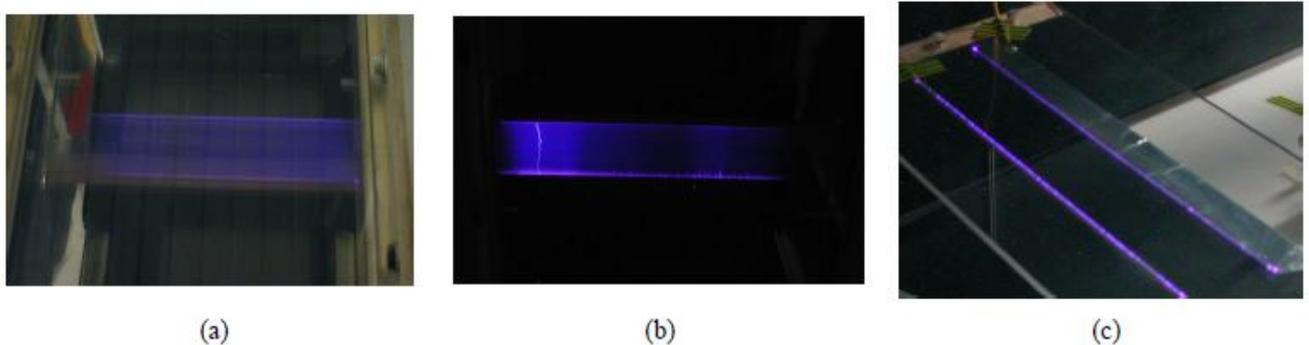


Figure 2.12 : Photographie de la décharge couronne de surface en régime "streamer" (a), en régime "filamentaire" (b) et en régime "glow" (c).

- **Régime FILAMENTARY** : Dans ce régime, quelques points autorisent la formation d'une décharge concentrée en un canal appelé *filament*. Ce type de décharge prend naissance de manière prioritaire sur les irrégularités de forme des électrodes et sont très instables. Les décharges filamentaires apparaissent pour des densités de courant supérieur à 0,6 mA/m.
- **Régime ARC** : Dans ce régime, toute la puissance passe par un canal de faible résistance, ce qui entraîne un fort appel de courant et une hausse locale de la température (passage à l'arc). Ce plasma est localement fortement inhomogène.

➤ *Paramètres influents :*

Puisque la décharge est établie dans l'air ambiant, celle-ci est dépendante des conditions atmosphériques et plus exactement de l'humidité relative de l'air, de la pression et de la vitesse de l'écoulement extérieur. La Figure 2.13a montre que le courant de décharge diminue lorsque l'humidité augmente et que l'humidité favorise le régime *streamer*. Puis pour une valeur donnée du champ électrique, on peut voir avec la Figure 2.13b que le courant augmente avec la vitesse de l'écoulement. Comme avec l'humidité, l'augmentation de la vitesse de l'écoulement favorise le régime *streamer*.

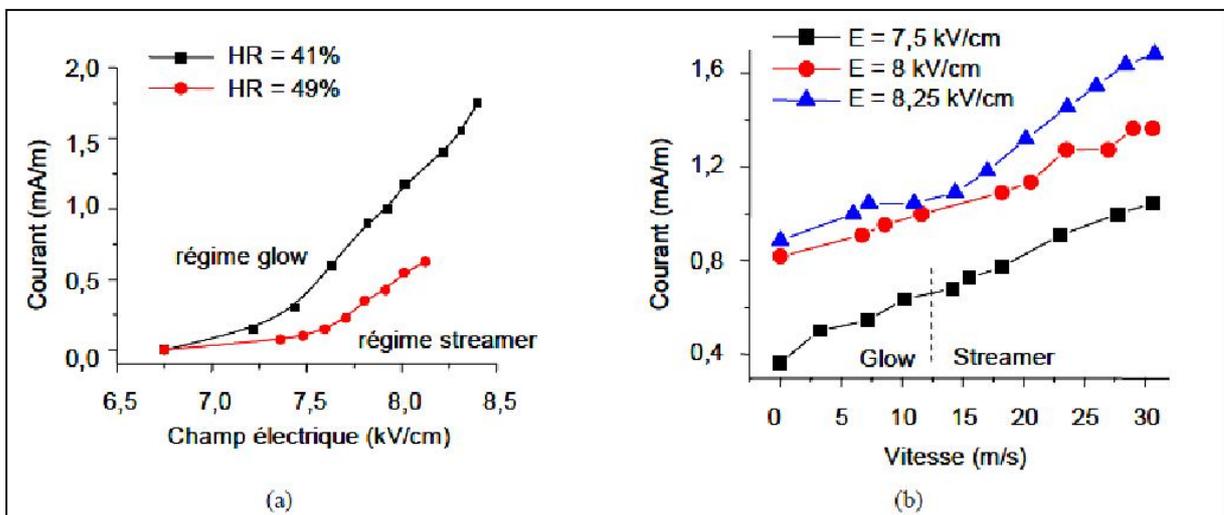


Figure 2.13 : Comportement de la décharge en fonction de l'humidité relative (a) et de la vitesse de l'écoulement extérieur (b) ([32]).

Le dernier paramètre jouant un rôle important dans les caractéristiques de la décharge est la nature du diélectrique. La Figure 2.14 illustre l'évolution de la densité de courant en fonction du taux d'humidité de l'air et de la nature du diélectrique. Celle-ci a une allure complètement différente si l'isolant de l'actionneur est en verre ou en PMMA. Il semble donc que le matériau et l'humidité de l'air soit deux paramètres fortement liés.

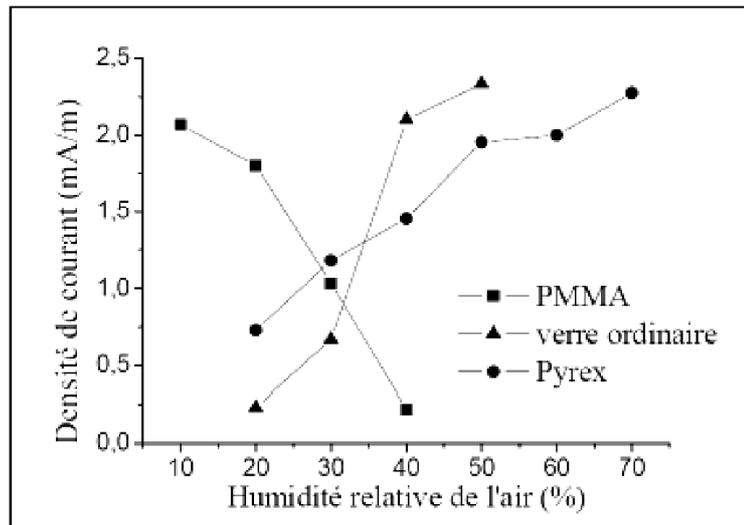


Figure 2.14 : Évolution du courant pour une décharge couronne en fonction du diélectrique utilisé [38].

➤ *Propriétés mécaniques :*

Pour le contrôle d'écoulements, l'actionneur DC de surface est généralement utilisé dans les régimes *streamer corona* et *glow corona*, en ayant comme ordres de grandeurs électriques : $E \approx 8 \text{ kV/cm}$, $i \approx 1 \text{ mA/m}$ et $P \approx 70 \text{ mW/cm}^2$.

La Figure 2.15 présente un profil de vitesse induit par le vent électrique, pour différentes valeurs du courant de décharge. Elle montre que la vitesse du vent électrique augmente avec le courant de décharge, la vitesse maximum du vent électrique ($\approx 3.5 \text{ m/s}$) est obtenue proche de la paroi, pour $0.5 \text{ mm} < y < 2 \text{ mm}$.

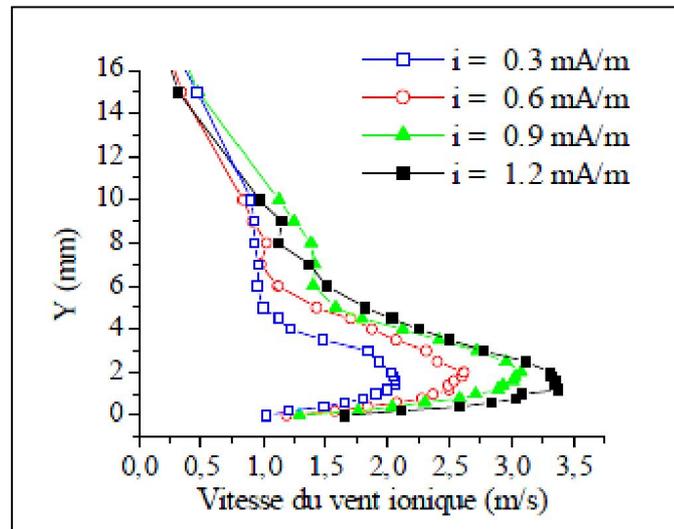


Figure 2.15 : Composante horizontale de la vitesse du vent électrique induit en fonction du courant de décharge [32].

2.5.2 L'actionneur à Décharge à Barrière Diélectrique (DBD)

Vers le début des années 90, le Pr Roth met au point un dispositif capable de générer une décharge à barrière de surface luminescente et stable à pression atmosphérique. Il dépose alors plusieurs brevets et baptise ce dispositif "One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma" (OAUGDP TM). Il remarque alors que ce dispositif peut générer un écoulement de quelques m/s tangentiellement à la paroi de l'isolant et soumet alors l'idée qu'une telle décharge peut servir à contrôler un écoulement de couche limite, dans des articles qui ont aujourd'hui valeur de référence ([20] et [39]). Toutefois, les premiers auteurs à avoir présenté un dispositif générant une décharge à barrière diélectrique de surface à pression atmosphérique sont Masuda et Washizu [40]. Mais leur étude est complètement éloignée de toute considération aérodynamique ; leurs recherches portent sur la charge de particules.

Depuis les premiers travaux de Roth, de nombreuses équipes internationales se sont lancées dans l'étude de l'actionneur DBD. Aux Etats-Unis, nous pouvons citer les premiers travaux entrepris par les équipes des professeurs Corke et al. [43] et Enloe et al. [44]. Le premier ayant étudié le contrôle de l'écoulement autour d'un profil d'aile, tandis que le second a plutôt étudié l'actionneur seul (sans écoulement

externe). En France, l'actionneur DBD est étudié par un groupement de laboratoires qui est constitué du LEA de Poitiers ([45] et [46]), de l'ONERA DMAE à Toulouse et enfin du LME - GREMI à Orléans.

Dans les sections suivantes, les principales caractéristiques électriques et mécaniques connues de l'actionneur à DBD vont être présentées.

➤ *Descriptions de l'actionneur DBD de surface :*

Cette décharge est établie à la surface d'une plaque isolante, entre au moins deux électrodes asymétriquement disposées de part et d'autre du diélectrique (Figure 2.16a). L'électrode de la face supérieure, appelée électrode active, est reliée à un haut potentiel alternatif tandis que celle de la partie inférieure est mise à la terre. La Figure 2.16b montre les trois premières configurations géométriques testées par Roth. Dans ce cas les électrodes sont des dépôts métalliques très fins. Une haute tension sinusoïdale à valeur moyenne nulle est appliquée entre les électrodes placées sur la face supérieure du diélectrique et la ou les électrodes inférieures mises à la terre. Les grandeurs électriques caractéristiques de la décharge sont les suivantes : haute tension de plusieurs kV à des fréquences de 1 à 20 kHz, une distance inter-électrodes de quelques mm, une puissance électrique consommée de l'ordre de 500 W/m² de plasma. Roth désigne l'origine de la mise en mouvement de l'air à la surface du plasma par l'action de la force paraélectrique. Cette force est donnée par l'expression :

$$F = \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \right) \quad (2.10)$$

où E est le champ électrique, ϵ_0 la constante diélectrique de l'air et x la direction horizontale vers la gauche sur la Figure 2.16a (schéma d'après Corke et al., [45]). Cette force est donc proportionnelle au gradient du carré du champ électrique. En utilisant une dissymétrie dans la configuration des électrodes, on crée un gradient de champ donc un écoulement. Toutefois, l'explication théorique de cette force ne fait pas l'unanimité dans la communauté scientifique et de nombreux chercheurs pensent que celle-ci est erronée. La mise en mouvement de l'air environnant la

décharge serait due à un phénomène similaire au vent électrique induit par la décharge couronne.

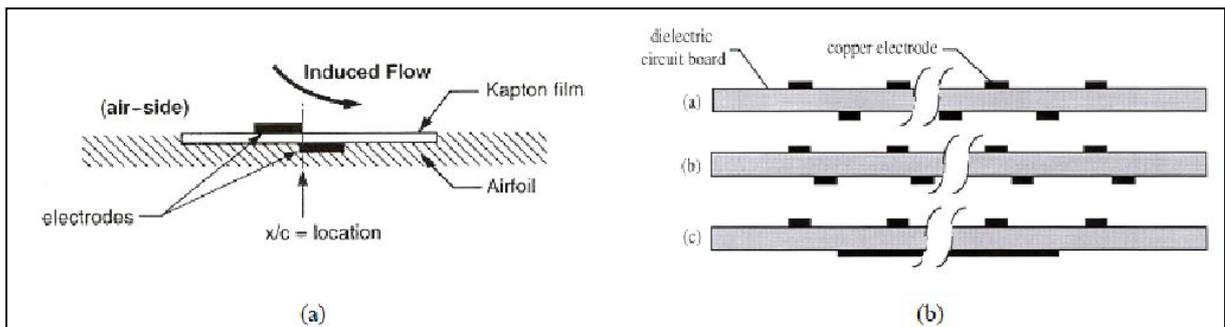


Figure 2.16 : Sens de l'écoulement induit par la force *paraélectrique* (a) [45] et configuration géométrique des électrodes utilisée par Roth pour établir la *O AUGDP* (b) [20].

➤ *Propriétés mécaniques*

Les actionneurs DBD induisent un vent électrique identique à celui généré par les actionneurs à décharges couronnes de surface. Et comme pour les décharges DC, ils existent plusieurs régimes de fonctionnement de la DBD. Leonov et al. [47] en recensent deux : le premier, le mode LF pour long filament. Et le second, le mode MC pour multi-coronas. Ces deux régimes ont des caractéristiques électromécaniques distinctes dont les principales sont données dans le tableau 2.1. Cependant, les grandeurs électriques fournies par les auteurs sont valables dans leur configuration.

La DBD peut générer les vitesses données pour le régime MC avec des valeurs de tension et fréquence proches du mode LF, i.e. $V=20$ kV et $f= 1$ kHz [46]. Les profils de vitesse de la Figure 1.18a ont été réalisés à l'aide d'une sonde de Pitot en verre par Pons et al. [46] sur du verre de 4 mm d'épaisseur. Pour une abscisse donnée, la vitesse maximale du vent électrique augmente avec la valeur de l'amplitude de la tension. Deux raisons peuvent expliquer l'augmentation de la vitesse. Les ions ont d'une part plus d'énergie car le champ électrique extérieur est plus intense, par conséquent la quantité de mouvement transmise au milieu environnant est plus importante. D'autre part, la distance parcourue par les ions est probablement plus longue.

Tableau 2.1 : Principales caractéristiques des régimes de fonctionnement LF et MC de la DBD.

Mode de la décharge	LF	MC
Courant maximum (mA/cm)	300	3
Tension typique (kV)	10	2
Durée d'une impulsion (µs)	0.5	2
Fréquence (kHz)	1	70
Puissance électrique (W/cm)	1.5	0.7
Vitesse induite (m/s)	< 0.3	1-8

A partir de ces profils de vitesse, on peut tracer l'évolution du maximum de vitesse du vent électrique en fonction de la tension appliquée V aux bornes de la décharge. La Figure 2.17b indique que cette évolution augmente linéairement avec V , de telle sorte que :

$$U_{\max} \propto (V - V_0) \quad (2.11)$$

où V_0 est la tension seuil pour initier le plasma. Toutefois, cette expression est vérifiée pour un signal de type sinusoïdal.

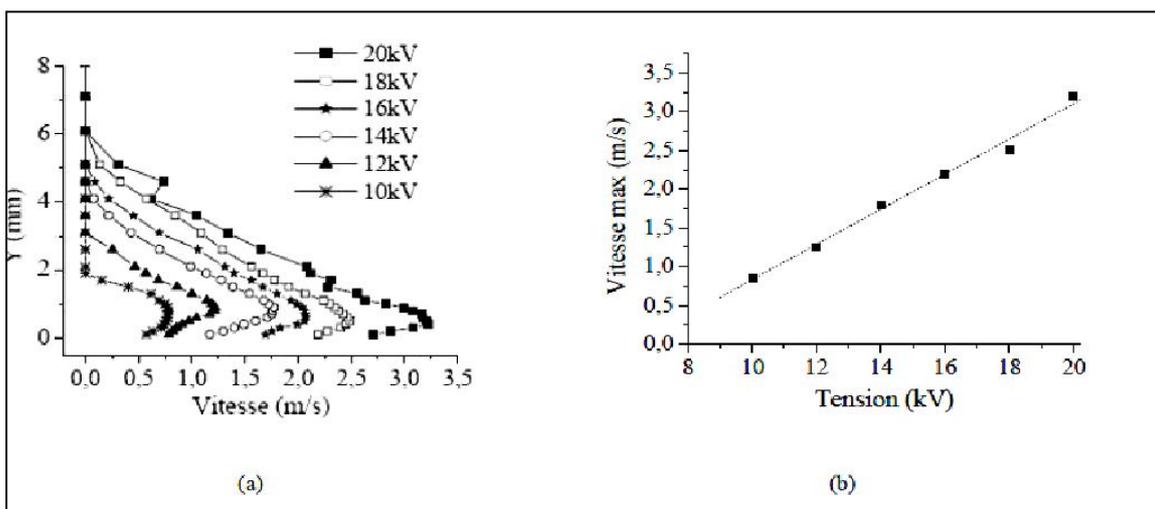


Figure 2.17 : Profils de vitesse induite par l'actionneur DBD (a) et évolution du maximum de vitesse (b) en fonction de la tension appliquée [46].

2.6. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'avoir une vue d'ensemble sur le domaine de la physique des plasmas. Les phénomènes complexes liés à la formation, l'entretien ou la dissipation de ce quatrième état de la matière y ont été décrits.

Nous avons également introduit et expliqué le phénomène de vent électrique, cette mise en mouvement de l'air qui accompagne la formation des décharges électriques sous certaines conditions. Cet écoulement s'explique par le transfert de quantité de mouvement entre les espèces chargées et les particules neutres du gaz environnant, les premières étant accélérées par les forces de Coulomb. Basés sur ce phénomène, les actionneurs plasma ont pour but de modifier la vitesse de l'écoulement dans la couche limite qui se développe sur les profils aérodynamiques, en créant une décharge électrique de surface.

Malgré le fait que l'électro-aérodynamique soit une thématique de recherche relativement jeune, nous avons pu constater l'ampleur de l'effort de recherche consacré à ce domaine d'étude depuis quelques années.

Ces actionneurs sont prometteurs car ils possèdent l'avantage d'être facilement contrôlable, dans la mesure où la grandeur d'entrée est électrique : leur action peut donc être modulé de façon très simple.

CHAPITRE 3

APPROCHE THEORIQUE DU COUPLAGE AERODYNAMIQUE PLASMA

3.1. Introduction

Dans le présent chapitre, on fait un rappel théorique sur les équations d'électrohydrodynamiques dans les cas laminaire et turbulent, pour mieux voir le couplage Aérodynamique – Plasma et l'origine de ce couplage.

L'aérodynamique est régie par les équations de Navier-Stokes sur la conservation de la masse et l'équation de transport de la quantité de mouvement avec prise en compte d'une force volumique électrique dont, toute la difficulté est de pouvoir déterminer la force qui s'applique sur un écoulement donné afin d'estimer l'effet d'un actionneur à décharges couronnes.

3.2. Mise en équation générale

3.2.1. Les Equations d'électro-aérodynamiques pour le cas incompressibles, stationnaire et laminaire

Le système est constitué des équations de mécanique des fluides et de celles de l'électrostatique.

En électricités, Coulomb proposait une loi analogue concernant la force d'attraction ou de répulsion entre deux "charges" électrique. Les ions sont soumettre à une force de Colomb F tel que son expression est :

$$F = \rho_c E \quad (3.1)$$

Avec : ρ_c la densité de charge

E le champ électrique

Les ions sont dirigée vers les parois est entre en collision avec les molécules de fluide qui transfère un mouvement a ces derniers.

C'est équivalent à une force qui agit directement sur le fluide, alors les équations de base de champ d'écoulement incompressible en terme dimensionnelle sont :

La continuité :
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.2)$$

L'équation de Navier-Stokes avec le terme de force électrique $\rho_c E_i$:

$$\rho \left[\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + F_i \quad (3.3)$$

Ou : $F_i = \rho_c E_i$

Avec ρ : la densité de fluide. p : la pression.

u_i : Composante de vitesse dans les trois directions.

μ : La viscosité dynamique.

▲ Les équations d'électrostatique

La distribution de potentiel électrostatique et la distribution de la charge en espace sont données par les équations suivantes de maxwell :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x_i^2} = -\frac{\rho_c}{\epsilon_0} \quad (3.4)$$

Tel que :

$$\rho_c^2 = \epsilon_0 \frac{\partial \rho_c}{\partial x_i} \frac{\partial V}{\partial x_i} = -\epsilon_0 \frac{\partial \rho_c}{\partial x_i} E_i \quad (3.5)$$

Donc le champ électrique \mathbf{E} dérive du potentiel électrique scalaire V

$$E_i = -\frac{\partial V}{\partial x_i} \quad (3.6)$$

On a l'expression de la densité de courant \mathbf{J} qui fait apparaitre les trois modes de transfert : conduction ; convection et diffusion :

$$J_i = \rho_c \beta E_i + U \rho_c - D \nabla \rho_c \quad (3.7)$$

D est le coefficient de diffusivité d'ions.

Il convient d'ajouté l'équation de conservation de la charge électrique

$$\frac{\partial J_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.8)$$

Avec : $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ la permittivité de l'air.

$\beta = 1,4311 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{Vs}$ La mobilité des ions en air (McDaniel and Mason, 1973).

Un dispositif important de cette formulation théorique du problème est que les équations électriques peuvent être résolues indépendamment des équations régissant l'écoulement.

La nature de la force électrique est la clé pour comprendre comment la décharge couronne agit sur l'écoulement.

Une formulation mathématique de la force électrique résulte de l'expression de la densité de courant en terme de potentiel scalaire et vectoriel ψ et \vec{R} respectivement :

$$j_i = \left(\frac{\partial \psi}{\partial x_i} + \varepsilon_{ijk} \frac{\partial R_k}{\partial x_j} \right) \quad (3.9)$$

L'importance de cette formulation se trouve dans le rôle des deux termes qui modifiait l'écoulement de gaz. Remplacent cette expression dans l'équation de Navier-Stokes :

$$\rho \left[\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{1}{\beta} \varepsilon_{ijk} \frac{\partial R_k}{\partial x_j} \quad (3.10)$$

La composante irrotationnelle de la force, $-\frac{1}{\beta} \frac{\partial \psi}{\partial x_i}$ n'apparaît plus dans l'équation du mouvement excepté comme pression modifiée, Ainsi cette composante de la force électrique n'a aucun effet sur le champ de vitesse mais elle affecte simplement la distribution de pression dans le gaz.

La composante rotationnelle de la force, $-\frac{1}{\beta} \varepsilon_{ijk} \frac{\partial R_k}{\partial x_j}$ est la source de toutes les modifications électriquement induites d'écoulement, y compris les écoulements secondaires, la production de vorticité et la turbulence.

3.2.2. La turbulence

La turbulence est une propriété d'un écoulement, non du fluide utilisé. Il n'existe pas de véritable définition de la turbulence. On la caractérise par ses propriétés.

Quand l'écoulement est turbulent, les grandeurs physiques macroscopiques (vitesse, pression) varient de façon rapide et aléatoire. Un écoulement turbulent est nécessairement rotationnel : ainsi, un champ acoustique, même aléatoire, n'est pas turbulent. Un écoulement turbulent est donc un écoulement à grand nombre de Reynolds :

▲ Apparition de la turbulence :

Aux grands nombres de Reynolds, un écoulement laminaire peut devenir turbulent au voisinage d'un obstacle, ou d'une aspérité.

L'interaction de la force électrique avec l'écoulement turbulent est décrite par les équations convenables de turbulence.

La première étape dans l'analyse est de décomposer les variables instantanées d'écoulement en leurs composants moyens et de fluctuation ; c'est la décomposition de Reynolds :

$$\begin{aligned}u_i &= \bar{u}_i + u'_i \\P &= \bar{P} + P' \\j_i &= \bar{j}_i + j'_i\end{aligned}\tag{3.11}$$

Puisque la théorie d'EHD suppose que la force de corps et la densité de courant électrique instantané sont complètement indépendants de l'écoulement de fluide, la source de densité de courant fluctuant doit être à l'origine électrique.

Les équations classiques de Reynolds pour le mouvement moyen sont :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.12)$$

Et

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u'_i u'_j}) - \bar{J}_i / \beta \quad (3.13)$$

L'effet de la moyenne engendre bien entendu une perte d'information, caractérisée ici par l'apparition d'une corrélation inconnue $\overline{u'_i u'_j}$ appelée tenseur de Reynolds.

Proviennent du non linéarité des équations de Navier Stokes.

Pour résoudre ce problème de fermeture, il est nécessaire d'introduire des relations constitutives pour relier le tenseur de Reynolds $\overline{u'_i u'_j}$ à d'autres corrélations ou moyennes connues ou calculables.

3.3. Conclusion

Les équations régissant les phénomènes électrohydrodynamiques dans les cas laminaire et turbulent sont donc composées des équations classiques de la mécanique des fluides et de l'électrostatique. On peut dire que les deux systèmes sont couplés.

CHAPITRE 4

MODELISATION ET RESOLUTION NUMERIQUE D'ECOULEMENT SOUMIS A DES DECHARGE COURONNE SURFACIQUES

4.1. Introduction

La simulation des phénomènes électro-aérodynamiques produits par les actionneurs à décharges couronne décrits au chapitre 2, nécessite un modèle prenant en compte à la fois la physique des décharges et celle de l'aérodynamique. Dans la recherche courante, on ne prévoit pas pour modéliser l'interaction des ions et des molécules au niveau moléculaire, mais trouver plutôt l'effet global d'un champ électrique sur l'écoulement d'air.

Le travail présenté dans ce chapitre consiste une étude basée sur la simulation numérique du comportement stationnaire d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique. La prise en compte de l'influence du champ électrique sur l'écoulement se fait par l'ajout dans les équations de Navier-Stokes d'un terme de force électrique.

La simulation numérique est effectuée à l'aide du logiciel FLUENT V6.3.

4.2. Les configurations étudiées

4.2.1. Configuration électrodes filaires

La première configuration étudiée a été celle utilisée par Léger (2003) représentée sur la figure (4.1).

Constitué d'une plaque plane, a bord d'attaque arrondi et équipée de deux fines électrodes fils placées à l'intérieur de rainures usinées dans un matériau isolant sur la face supérieure. Ces deux électrodes sont reliées à une alimentation haute tension qui permet de créer une décharge couronne sur la face supérieure de la plaque plane, plongée dans un écoulement d'air.

La plaque est réalisée par un matériau isolant en PMMA (PolyMéthyl-MéthAcrylate), joue le rôle d'un diélectrique, 50cm de large et 21.5cm longue et d'épaisseur de 25mm.

Les électrodes sont séparées de 40mm. L'anode est un fil de cuivre de diamètre 0.7mm placé 10 cm en aval de bord d'attaque ; portée d'un potentiel positif. La deuxième électrode est la cathode 2mm de diamètre portée à un potentiel négatif. La plaque est positionnée dans un écoulement dont la vitesse varie de 5 à 45m/s.

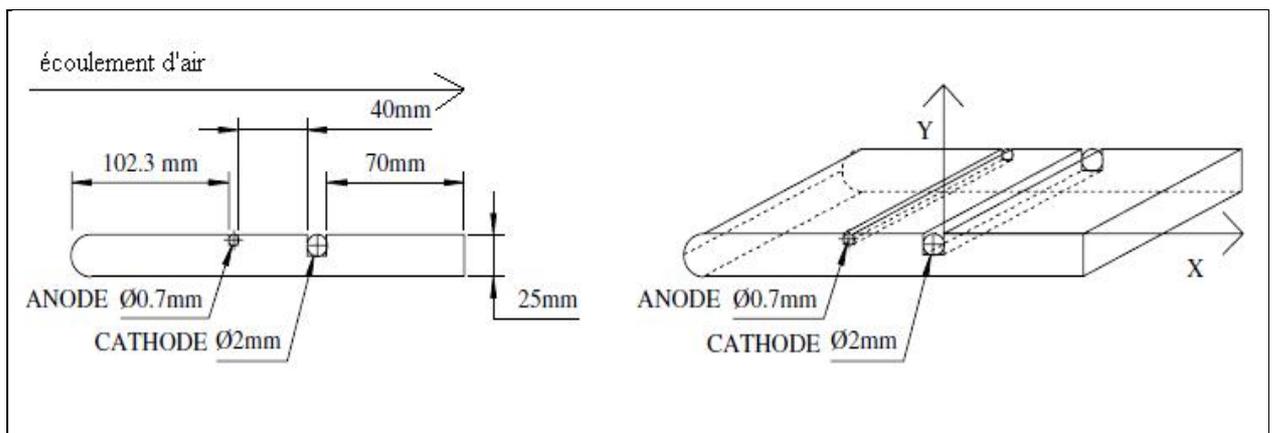


Figure 4.1 : Représentation schématique de la 1^{ère} configuration de deux électrodes filaires.

4.2.2. Configuration électrodes en bandes

Dans cette deuxième configuration, les électrodes sont des fines bandes de cuivre adhésives de 35 μm d'épaisseur, de 175 mm de longueur et 25 mm de largeur. Cette configuration est présentée en figures 4.2.

Les électrodes en bandes sont de chaque côté du bord d'attaque arrondi de la plaque plane ; cette plaque est en PVC d'épaisseur de 15mm et 21.3cm de longueur.

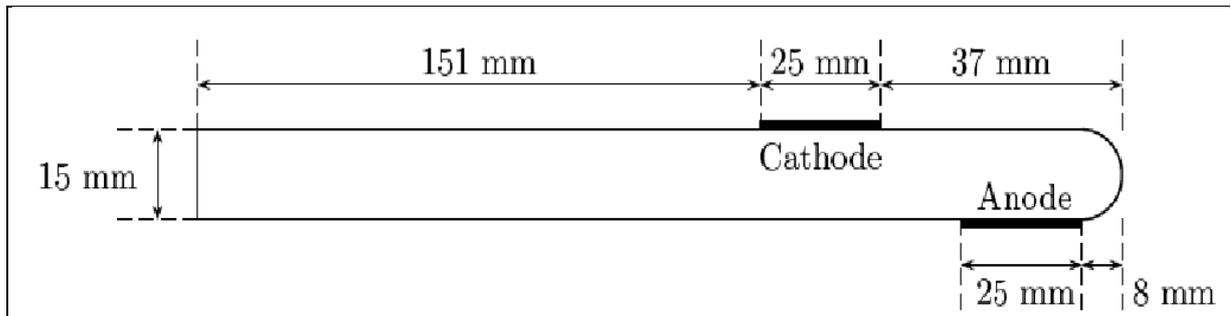


Figure 4.2 : Représentation schématique de la 2^{ème} configuration de deux électrodes bandes.

4.3. Explication physique du vent ionique :

Afin d'expliquer l'action des décharges couronnes sur l'aérodynamique, il apparaît utile de décrire de façon qualitative les phénomènes se développant autour de telles électrodes stressées.

Considérons ainsi une électrode portée à un fort potentiel électrique et plongée dans l'air à la pression atmosphérique. Cette configuration est schématisée sur la Figure 4.3. Un électron présent initialement dans l'atmosphère, du fait par exemple du rayonnement cosmique, est accéléré par le champ électrique créé et gagne ainsi de l'énergie. Dans son mouvement en direction de l'anode, cet électron entre en collision avec un neutre. Si le champ électrique est suffisant, l'électron aura atteint un niveau d'énergie capable d'ioniser la molécule neutre. On dispose alors d'un nouvel électron et d'un ion positif. Les deux électrons sont à nouveau accélérés et capables d'arracher des électrons aux neutres percutés. Les électrons formés lors d'une telle avalanche électronique sont absorbés à l'anode tandis que les ions positifs dérivent en direction opposée. Dans l'espace lointain, il ne subsiste ainsi qu'un courant d'ions positifs. En dérivant, les ions entrent en collision avec les molécules neutres de l'air. Une grande fraction de ces collisions est purement élastique : les ions cèdent une

partie de leur quantité de mouvement aux neutres. La mise en mouvement des neutres est ce que l'on appelle vent ionique.

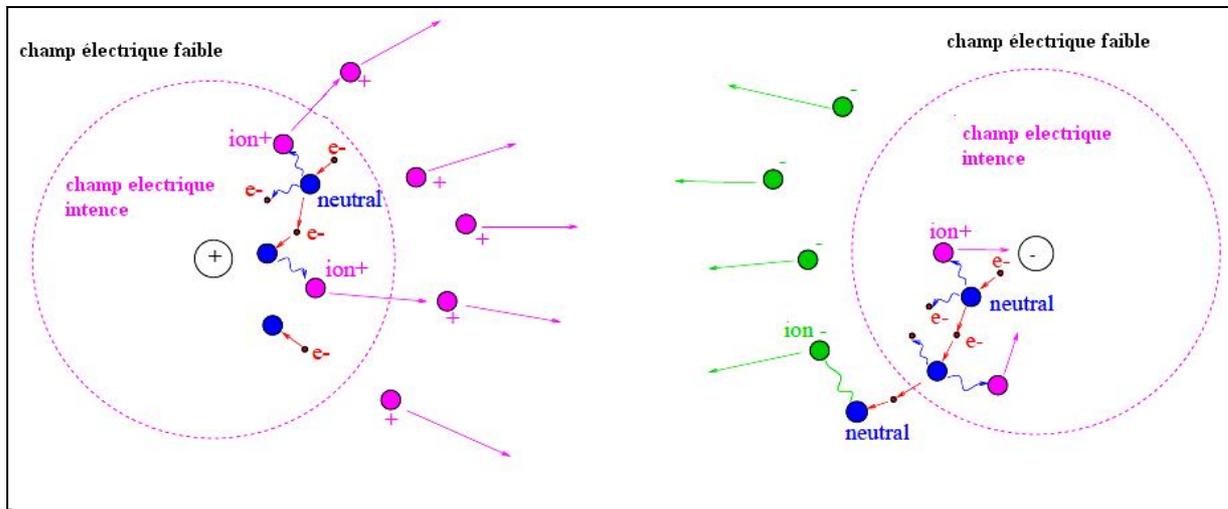


Figure 4.3 : Couronne positive (à gauche), négative (à droite) et vent ionique

4.4. Modélisation numérique

Le calcul numérique a été fait à l'aide de code de calcul Fluent 6.3 qui utilise la méthode des volumes finis. Le problème a été traité en plan 2D pour toutes les configurations.

4.4.1. Présentation de code Fluent

"Fluent" est un code de calcul pour modéliser les écoulements des fluides et les transferts thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles non structurées, qui peuvent être produites pour des géométries complexes, avec une facilité relative. Les types de mailles supportées sont des mailles, en 2D, triangulaires ou quadrilatérales, ou en 3D tétraédriques/hexaédriques/pyramidales, et les mailles (hybrides) mélangées.

"Fluent" est écrit en langage de programmation C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offertes par ce langage (allocation de la mémoire dynamique). En outre, il utilise une architecture qui lui permet de s'exécuter en tant que plusieurs processus simultanés sur le même poste de travail ou sur des postes séparés, pour

une exécution plus efficace. "Fluent" s'utilise à travers une interface graphique. L'utilisateur avancé peut adapter ou augmenter aux besoins l'interface en écrivant des macros et des fonctions de menu, afin d'automatiser certaines procédures.

Ainsi, à titre non exhaustif, il a les capacités de modélisation suivantes:

- Ecoulements 2D ou 3D.
- Etats permanents ou transitoires.
- Ecoulements incompressibles ou compressibles incluant toute vitesse de régimes (subsoniques, transsoniques, supersoniques et hypersoniques).
- Ecoulements non visqueux, laminaires ou turbulents.
- Ecoulements Newtonien ou non.
- Transfert de chaleur forcé, par conduction, par convection ou radiatif.
- Les écoulements avec changements de phases.
- Ecoulements en milieu poreux.

Ce code de calcul emploie *la méthode des volumes finis* comme procédé de discrétisation. Les équations intégrales qui gouvernent l'écoulement, tels que l'équation de continuité, l'équation de conservation de la masse, celle de l'énergie ainsi que d'autres scalaires, comme la turbulence, sont résolues par cette méthode. En utilisant cette technique basée sur un volume de contrôle, "Fluent" passe par les étapes suivantes:

- Division du domaine en volumes de contrôle discrets en utilisant une grille (maillage) de calcul.
- Intégration des équations gouvernantes sur les volumes de contrôle individuels, afin de construire les équations algébriques pour les variables discrètes dépendantes, (les inconnues), telles que les vitesses, pression, température ...
- Linéarisation des équations discrétisées et solution du système d'équations linéaires résultant, pour pouvoir mettre à jour les valeurs des variables dépendantes (inconnues).

Lors de calculer les certaines valeurs doivent être évaluées à la frontière des cellules. une interpolation est alors nécessaire, et peut être réalisée suivant différents schémas.

4.4.2. Procédure sous "Fluent"

Le logiciel permet aussi de réordonner les nœuds, les surfaces et les cellules en mémoire, de telle façon qu'ils aient la même disposition dans la grille et dans la mémoire, pour améliorer les performances du calcul et l'efficacité de l'accès à la mémoire.

4.4.2.1. Simple précision ou double précision

"Fluent" offre deux modes de calcul: le mode "double précision" et le mode "simple précision".

Dans le mode "double précision", les nombres à virgule flottante sont représentés en utilisant 64 bits, alors que le mode "simple précision" utilise une représentation à 32 bits. Le revers de cette précision est que le premier mode requiert beaucoup plus de mémoire. En outre, Le mode "double précision" est préconisé, entre autres, pour les écoulements impliquant des longueurs d'échelles très disparates.

4.4.2.2. Choix de la formulation du solveur

En démarrant "Fluent" on peut choisir entre plusieurs formulations du solveur:

- La formulation "Pressure based ", ou isolée (implicite): Cette formulation résout les équations de continuité, de quantité de mouvement et quand c'est nécessaire celle de l'énergie, séquentiellement, c'est-à-dire ils sont découplées les unes des autres (implicite par défaut). Le solveur isolé est classiquement employé pour les écoulements incompressibles à modérément compressibles.
- La formulation "Density based", ou couplée soit implicite ou explicite: Cette option permet aux équations gouvernantes d'être résolues simultanément, c'est-à-dire couplées les unes avec les autres. Cependant, les autres scalaires, tels que les quantités de la turbulence, sont traités isolément. Initialement, ce mode a été conçu pour les écoulements compressibles à grandes vitesses. Ce qui lui donne un avantage pour le traitement des

écoulements hautement couplés (forte interdépendance entre la densité, l'énergie et les moments) avec des forces de volumes (ex. flottabilité et forces de rotation). Il faut signaler que le solveur couplé implicite requiert presque le double de la mémoire qu'utiliserait le solveur isolé, alors que le solveur couplé explicite vient au milieu, en terme de besoins en ressources, Mais convergera plus lentement que la formulation implicite et n'est conseillé que pour les écoulements instationnaire.

4.4.2.3. Domaine d'étude et conditions aux limites pour les deux configurations

L'objectif de la simulation numérique est de développer un outil informatique pour modéliser l'écoulement d'air, le champ électrique induit par le processus de décharge électrique et l'interaction entre les deux. L'effet des différents paramètres régissant le champ électrique sera étudié. Le système d'équation couplé sera résolu pour calculer la force électrique qui s'applique au fluide.

➤ La première configuration

On effectue le calcul d'un écoulement bidimensionnel pour les deux régimes laminaire et turbulent sur la plaque plane avec prise en charge des forces électriques. Le domaine de calcul est divisé en deux zones. La 1^{ère} zone est celle de champ lointain et la 2^{ème} zone est la zone inter électrode, on la modélise par un parallélépipède dont les bords d'attaque favorisent l'écoulement comme montré dans la figure (4.4). Cette espace est caractérisé par une longueur de 4cm et une hauteur h de 1.5mm.

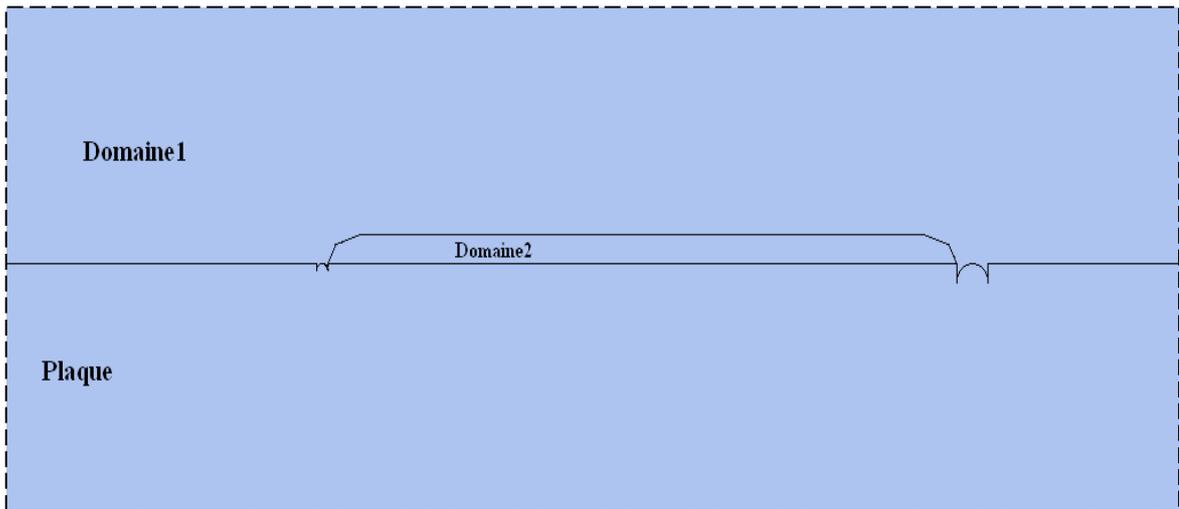


Figure 4.4 : zone inter électrode

Les conditions limites sont une condition d'adhérence a la paroi, l'écoulement est dans le sens de l'anode vers la cathode avec une vitesse U_0 , et une condition de glissement sur la frontière (voir figure 4.5).

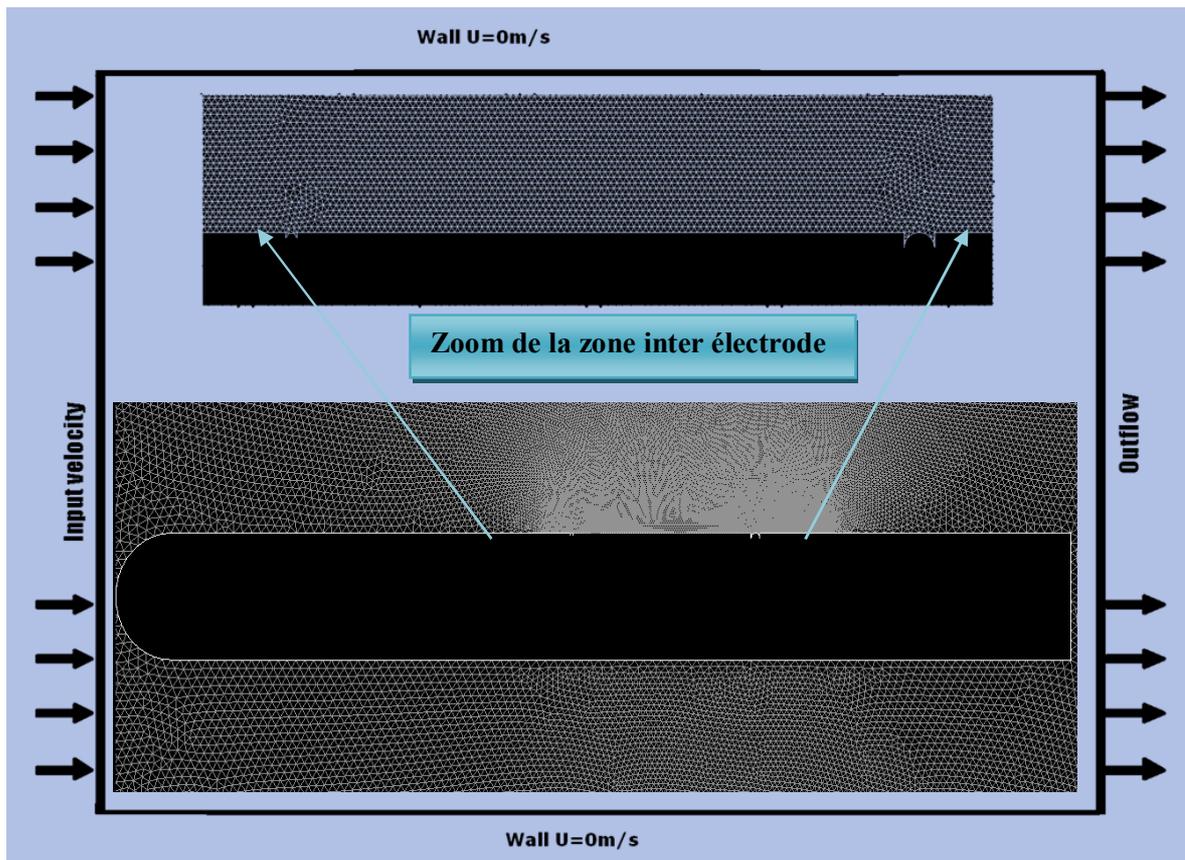


Figure 4.5 : Domaine d'étude et conditions aux limites

➤ La deuxième configuration

En suit les mêmes étapes pour la deuxième configuration tel que cette fois si les électrodes sont en band de cuivre étendu sur l'intrados et l'extrados de la plaque plane à coté du bord d'attaque, (voir figure 4.2).

La décharge couronne surfacique établie dans la configuration d'écrite précédemment induit un écoulement par le mouvement des ions dans l'espace inter-électrodes. Ceux-ci se déplaçant a proximité de la paroi de l'anode vers la cathode, ils contournent la géométrie circulaire du bord d'attaque de la plaque plane, (voir figure 4.6).

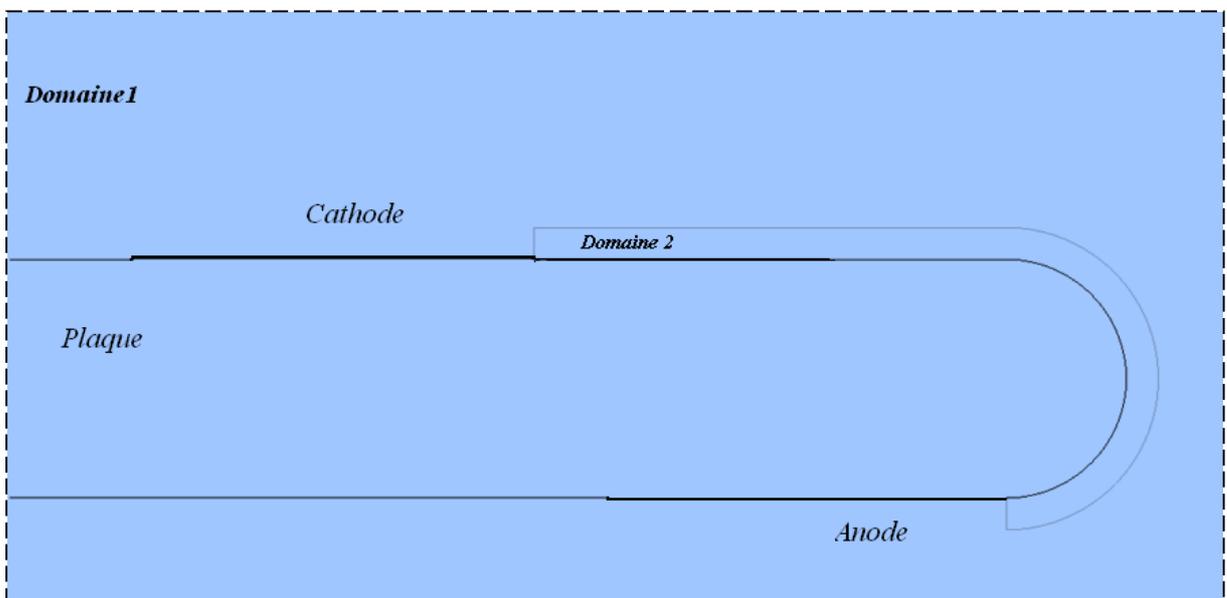


Figure 4.6 : L'espace inter électrode

Les conditions limites sont les mêmes que la première configuration ; a chaque fois en change la vitesse d'entré U_0 .

4.4.2.4. Hypothèses et mise en équations

Le modèle développé et basé sur les hypothèses suivantes, appliquée pour les deux configurations :

- Ecoulement bidimensionnel, stationnaire et incompressible.
- Uniquement la force de coulomb et présente.
- La diffusion des ions et négligeable.
- Le coefficient de conduction électrique ne dépend pas du champ électrique.
- La mobilité des ions est constante et indépendante de l'intensité du champ électrique.

En plus des hypothèses ci-dessus, nous devons déterminer le régime d'écoulement, laminaire ou turbulent, ainsi qu'éventuellement le modèle de turbulence à utiliser.

- Écoulement laminaire

En prenant compte des hypothèses, le problème peut donc être décrit par le système d'équations (Eq. 3.2) pour la continuité (Eq. 3.3) pour la conservation de quantité de mouvement avec le terme de force électrique.

La détermination de la force électrostatique, dépend directement de la détermination de potentiel électrique.

La prise en compte de l'influence du champ électrique sur l'écoulement se fait par l'ajout dans les équations de Navier –stokes d'un terme de force électrique tel que

$$\vec{F}_e = \alpha \vec{E}, \alpha \text{ étant une constante à déterminer.}$$

Cette approche néglige la présence d'une décharge dans la mesure où elle ne prend pas en compte explicitement de la présence d'espèces chargées dans le calcul du champ électrique.

En tenant compte de la définition de potentiel électrique (3.6) et l'équation de continuité (3.3), et par substitution de l'expression de la densité de courant (3.7) dans l'équation (3.8), on peut obtenir l'équation de la charge suivante :

$$\nabla \cdot (-D\nabla\rho_c - \beta\rho_c\nabla\phi) + U \cdot \nabla\rho_c = 0 \quad (4.1)$$

Le terme de conduction dans l'équation (3.7) est dominant devant les termes de convection et de diffusion pour un système décrivant l'écoulement d'air dans une couronne induite, et ces termes sont souvent négligés dans la littérature pour les simulations numériques.

On obtient alors l'équation simplifiée suivante :

$$\nabla \cdot (\beta\nabla\phi\rho_c) = 0 \quad (4.2)$$

Avec l'hypothèse que la densité de charge est constante dans la zone inter électrode, on retrouve l'équation (3.4) sous la forme :

$$\nabla \cdot (\sigma\nabla\phi) = 0 \quad (4.3)$$

Où σ représente la conductivité électrique.

Donc le modèle mathématique associé au domaine 2 (figure 4.4 ; 6) est donné par :

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho\vec{u}) &= 0 \\ \rho\vec{u}\nabla \cdot (\vec{u}) &= -\nabla p + (\bar{\tau}) + \alpha\vec{E} \\ \Delta\phi &= 0 \\ \vec{E} &= \nabla\phi \end{aligned} \quad (4.4)$$

Et le modèle mathématique pour le domaine 1 est donné par les équations :

$$\nabla \cdot (\rho\vec{u}) = 0$$

$$\rho \vec{u} \nabla \cdot (\vec{u}) = -\nabla p + (\bar{\tau}) \quad (4.5)$$

$$\Delta \phi = 0$$

- Écoulement turbulent

Bien qu'il existe des modèles théoriques permettant de justifier la turbulence y compris dans les zones de fort viscosité, ces théories conduisent à l'utilisation de modèle k-ε.

Rappelons brièvement que les modèles de turbulence sont rendue nécessaires par les échelles de longueur extrêmement petites (échelle de Kolmogorov, typiquement de l'ordre de 10^{-4} m), qui rende impossible des simulations directes dans la plupart des applications, compte tenu des capacités actuelles des ordinateurs. Afin de contourner ce problème, des grandeurs moyennes sont utilisées. En turbulence, toute grandeur est supposée pouvoir s'écrire comme la somme d'une valeur moyenne et d'une fluctuation de moyenne nulle.

$$\Phi = \bar{\Phi} + \Phi'$$

En introduit ces quantité dans l'équation de Navier-stokes, on obtient l'équation utilisé par FLUENT V6.3 pour modéliser les écoulements turbulents.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (4.6)$$

L'influence de la turbulence sur l'écoulement moyen est constituée par le dernier terme, la dérivée de tenseur de Reynolds. Afin de fermer le nouveau système d'équation ainsi crée, le logiciel FLUENT propose trois model de turbulence :

- Modèle de turbulence à une équation de transport: Le modèle Spalart-Allmaras.

- Modèles de turbulence à deux équations: Le modèle $k-\varepsilon$ Standard et ses variantes RNG (ReNormalisation Group) et les modèles $k-\omega$ Standard et $k-\omega$ SST.
- Modèle de turbulence à 5 équations (7 équations en 3D): Le modèle des tenseurs de Reynolds RSM (Reynolds Stress Model)

Tableau 4.1 : Choix du modèle de turbulence

Modèles	Avantages	Inconvénients
Spalart-Allmaras	Economique (1 equ). Bon pour les écoulements moyennement complexes.	N'est pas largement testé.
STD $k-\varepsilon$	Robuste, économique et relativement précis.	Résultats médiocre pour des écoulements complexes (fort gradient de pression, rotation et swirl).
RNG $k-\varepsilon$	Bon pour des écoulements moyennement complexes (impact de jet, séparation d'écoulements, écoulements secondaires...)	Limité par l'hypothèse de viscosité turbulente isotrope.
Realizable $k-\varepsilon$	Offre les mêmes avantages que le RNG. Recommandé dans le cas des turbomachines.	Limité par l'hypothèse de viscosité turbulente isotrope.
Reynolds Stress Model (RSM)	Le modèle le plus complet Physiquement (transport et l'anisotropie de la turbulence sont tenu en compte)	Requiert plus de temps CPU. Les équations de quantité de mouvement et turbulence sont étroitement liées.
SST et Standard $k-\omega$	Modèle le plus recommandé pour les problèmes liés aux turbomachines, meilleur que le Realizable $k-\varepsilon$.	Nécessite une plus grande résolution du maillage aux frontières (pas de lois aux murs).

Dans notre cas on a *choisi le modèle $k-\varepsilon$ standard* Ce modèle met l'accent sur les mécanismes affectant l'énergie cinétique turbulente en se basant sur la modélisation de deux équations de transport. Le premier est celle de l'énergie cinétique turbulente (k) et la deuxième est son taux de dissipation visqueuse (ε) dans ce modèle, l'hypothèse de Boussinesq permet de relier le tenseur de Reynolds aux grandeurs moyennes de l'écoulement :

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = \rho \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (4.7)$$

Avec :

μ_t : viscosité turbulente, une fonction a l'échelle de vitesse.

δ_{ij} : Symbole de Kronecker.

$$k : \text{Énergie cinétique de turbulence, tel que } k = \frac{\overline{u_i' u_j'}}{2} \quad (4.8)$$

Et on a l'expression de la dissipation visqueuse turbulente :

$$\varepsilon = 2\nu \overline{s'_{ij} s'_{ij}} \quad (4.9)$$

Ou : s_{ij} et le tenseur des vitesses de déformation

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.10)$$

Dans le modèle $k - \varepsilon$, la viscosité turbulente a pour expression :

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.11)$$

C_μ Est une constante (voir tableau 4.1)

Si on néglige la gravite et régime stationnaire, les valeurs de k et ε sont déterminées en tout point par la résolution des équations de transport.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (4.12)$$

Et

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\varepsilon 1} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.13)$$

Ou G_k est le terme de production de k :

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (4.14)$$

Les constantes empiriques $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k et σ_ε sont données dans le Tableau 4.1

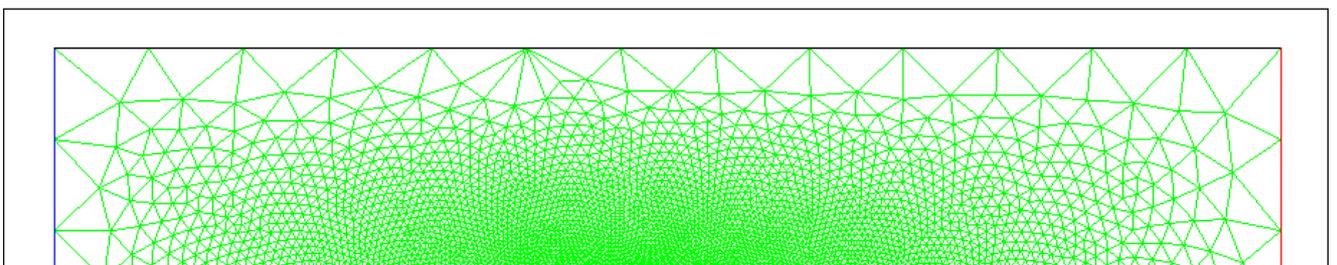
Tableau 4.2 : valeurs par défaut de constantes empiriques utilisées pour le modèle k-ε.

$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	C_μ	σ_k	σ_ε
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

4.4.2.5. Maillage de domaine de calcul

La création des géométries ainsi que le maillage sont faites sous le logiciel **Gambit 2.3.16**. ce logiciel propose des solutions étendues pour les géométries les plus compliquées. Certaines règles s'appliquent lors de la construction d'un maillage, en terme de taille et de formes de cellules, pour limiter les erreurs purement numériques.

Le maillage utilisé et le domaine de calcul pour cette simulation sont montrés aux figures suivantes (4.7) et (4.8). Il s'agit d'un maillage non structuré avec cellules triangulaires pour assurer un minimum de diffusion numérique.



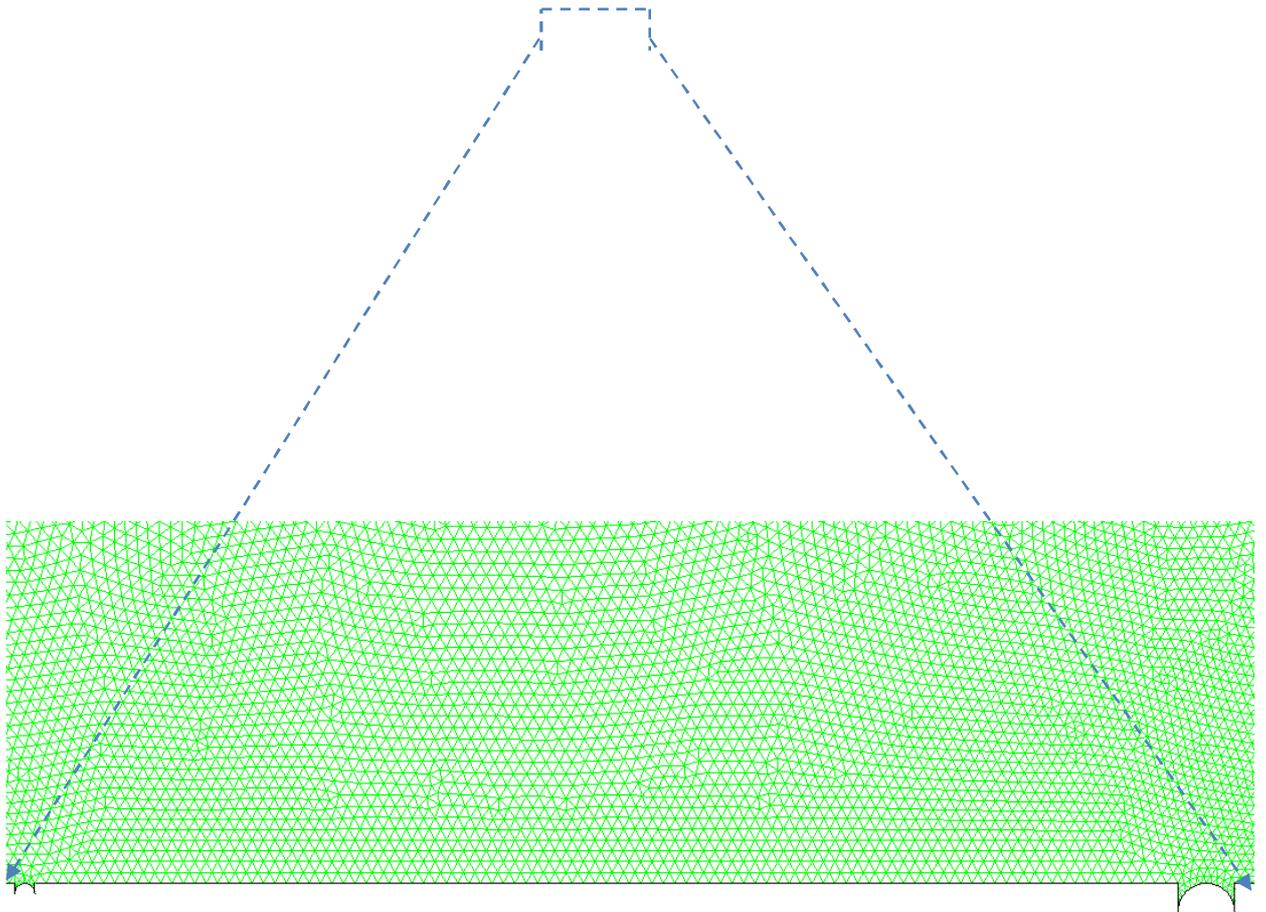


Figure 4.7 : Maillage du domaine non structuré (69850 nœuds) de configuration fil-fil



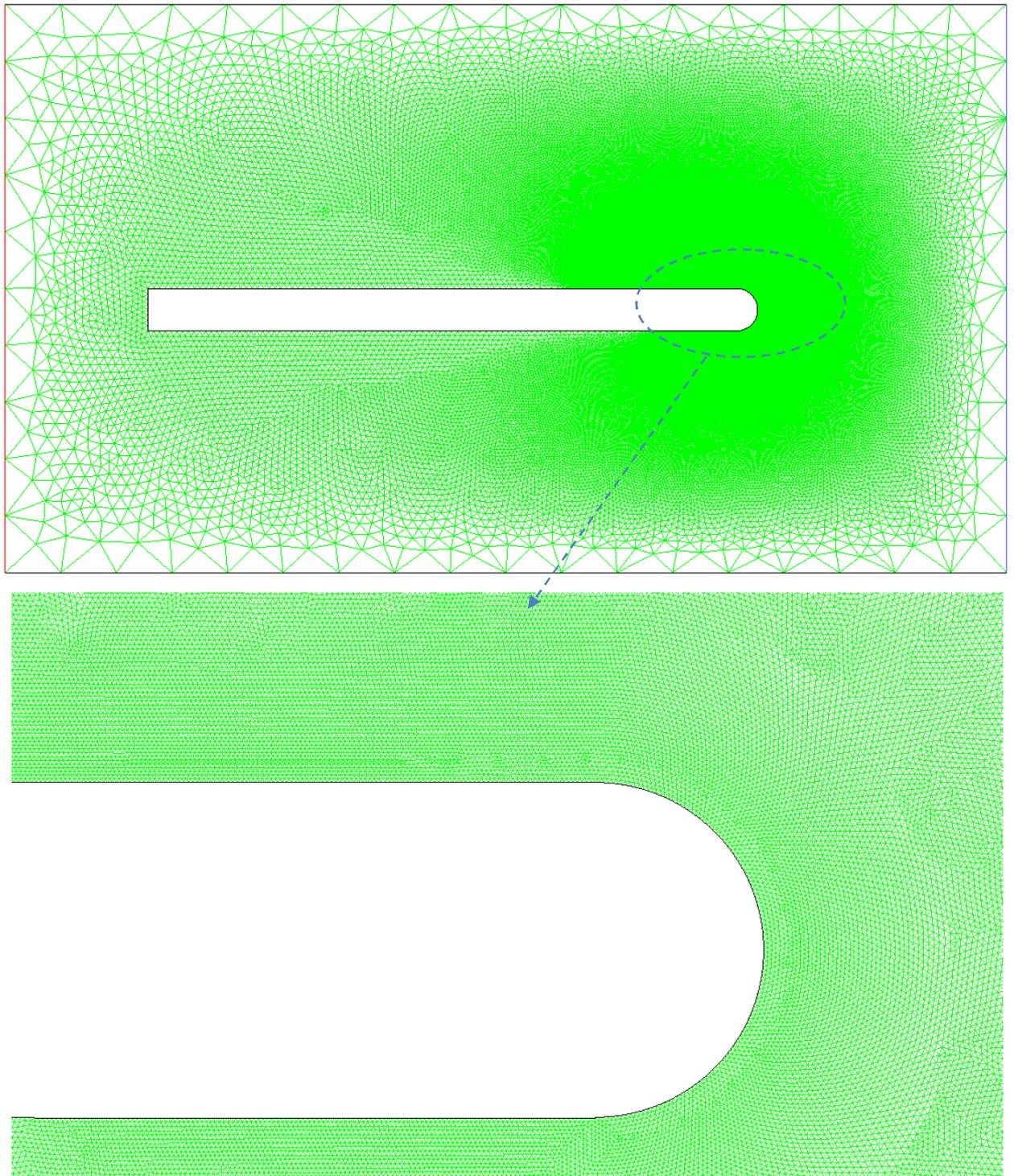


Figure 4.8 : Maillage du domaine non structuré (92233 nœuds) de configuration électrodes en band

Au chargement de maillage sous Fluent, nous devant mettre la géométrie à l'échelle. Le logiciel permet de réordonner les nœuds, les surfaces, et les cellules en mémoire, de telle façon qu'ils aient la même disposition dans la grille et dans la mémoire, pour améliorer les performances de calcul et l'efficacité de l'accès à la mémoire.

4.4.2.6 Schémas de discrétisation

Sous "Fluent", les variables stockées au centre de la cellule doivent être interpolées aux faces du volume de contrôle. Il est possible de choisir entre différents schémas de discrétisation pour les termes convectifs des équations gouvernantes, alors que les termes visqueux sont automatiquement discrétisés au second ordre pour plus de précision. Il reste que la discrétisation au premier ordre procure une meilleure convergence. Alors que le "Second Order Upwind Scheme" est de rigueur pour les écoulements non alignés au maillage.

Il existe aussi d'autres schémas de discrétisation:

- Le schéma "QUICK" (Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinetics): Il procure une meilleure précision que le schéma au second ordre pour les écoulements rotationnels et tourbillonnaires (Swirling) avec un maillage régulier. Cependant, il ne s'applique pas à un maillage triangulaire.
- Le schéma "Power Law" est plus précis que le "First Order Upwind Scheme" pour les écoulements à très bas nombres de Reynolds < 5 . Sinon, il procure en général le même degré de précision.

4.4.2.7. Choix du schéma d'interpolation de la pression

Pour la plupart des cas, le schéma "Standard" est acceptable. Pour des écoulements spécifiques, on peut choisir parmi les options suivantes:

- Le schéma force de volume pondéré "Body-Force-Weighted" est recommandé pour les écoulements impliquant d'importantes forces de volume (ex. convection naturelle à haut nombre de Rayleigh).
- Le schéma "PRESTO!" (Pressure Staggering Option): est approprié pour les écoulements hautement tourbillonnaires, à grande vitesse de rotation ou les écoulements dans des domaines fortement courbés
- Le schéma au second ordre est à utiliser pour les écoulements compressibles et pour améliorer la précision en écoulements incompressibles.
- Le schéma linéaire "Linear" est disponible comme alternative au cas où les autres options ont des difficultés de convergence ou génèreraient des comportements non physiques.

4.4.2.8 Choix de la méthode de couplage Pression Vitesse

Si les vitesses sont définies aux nœuds d'un volume de contrôle ordinaire (comme les autres scalaires: pression, température), il est démontré qu'un champ de pression hautement non uniforme agira comme un champ uniforme sur les équations de quantité de mouvement discrétisées, Verstege (1995). La solution passe par la définition des vitesses sur une grille décalée "Staggered grid" et l'emploi d'algorithmes tels que "SIMPLE" pour résoudre ce lien ou couplage entre la pression et la vitesse. La famille des algorithmes "SIMPLE" est essentiellement une procédure d' "estimation et correction" pour le calcul de la pression sur la "grille décalée" des composantes de la vitesse. "Fluent" propose trois méthodes pour le couplage pression vitesse (seulement avec la formulation "isolé"):

- Les deux premières, très similaires, sont la méthode "SIMPLE" (Semi-Implicit Method for a Pressure Linked Equations) et la méthode "SIMPLEC" (SIMPLE Consistent). Cette dernière méthode se différencie de la première par le fait qu'on peut lui assigner un facteur de relaxation (correction) de pression

proche de 1, ce qui accélère la convergence dans la plupart des cas, mais peut conduire à des instabilités de la solution.

- Méthode "PISO" (Pressure-Implicit with Splitting of Operators): Cette méthode fait partie des algorithmes de la famille "SIMPLE". Elle est recommandée pour les écoulements instationnaires ou pour les maillages contenant des cellules très obliques "highly skewed".

4.4.2.9 Facteurs de relaxation

Afin de contrôler et réduire le changement produit durant chaque itération d'une variable de l'écoulement, ϕ "Fluent" permet d'agir sur les facteurs de relaxation assignés à un nombre de variables comme suit:

$$\begin{cases} \phi = \phi_{old} + \alpha \times \Delta\phi \\ \Delta\phi = \phi_{comp} - \phi_{old} \end{cases} \quad (4.15)$$

Où: ϕ_{old} Ancienne valeur de ϕ

$\Delta\phi$ Changement dans la valeur de ϕ

ϕ_{comp} Valeur de ϕ calculée.

α Facteur de relaxation.

Le code de calcul offre les meilleures valeurs des facteurs de relaxation pour une large gamme d'écoulements. Néanmoins, si on voit qu'au cours du calcul les résidus commencent à s'amplifier, il est préférable de réduire ces derniers. Par contre, si on observe une convergence très lente mais sûre là, on pourra les augmenter prudemment, surtout le facteur de relaxation lié à l'équation de continuité.

4.4.2.10 Intégration des équations électrostatiques dans Fluent

La forme générale de l'équation de transport pour une grandeur scalaire arbitraire ϕ_j qui peut être résolue par Fluent, est définie par :

$$\frac{\partial \rho \Phi_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i \Phi_j - \Gamma_j \frac{\partial \Phi_j}{\partial x_i} \right) = S_{\phi_j}; j=1,2,\dots,N \quad (4.16)$$

Où Γ_j et S_{ϕ_j} sont le coefficient de diffusion et le terme source donné par l'utilisateur pour chaque équation de grandeur scalaire.

Pour convertir l'équation (4.3) dans la forme d'équation (4.16), les variables sont définies comme suit :

$$\Phi_1 = \phi \quad ; \quad \Gamma_1 = \sigma \quad ; \quad S_1 = 0 \quad ; \quad u_1 = 0 \quad (4.17)$$

La prise en compte de l'influence du champ électrique sur l'écoulement se fait par l'ajout d'un terme de force électrique $\vec{F}_e = \alpha \vec{E}$ dans les équations de Navier-stokes, où α est une constante à déterminer.

L'une des contributions majeures de la présente étude est la réalisation et l'intégration sous Fluent d'un module de calcul supplémentaire écrit en langage C qui permet au code de reconnaître les grandeurs physique électrostatique de l'équation (4.17) afin de résoudre simultanément le potentiel électrique et le vecteur vitesse, en tenant compte de l'effet des forces électrostatiques dans l'équation de mouvement. Ces grandeurs sont représentées par des codages pour pouvoir les introduire dans Fluent.

Le code écrit contient des macros de Fluent suivants :

- ❖ Un macro UDF pour définir le terme source ;
- ❖ Un macro UDF pour définir le terme convective ;
- ❖ Un macro UDF pour calculer la conductivité électrique ;
- ❖ Un macro UDS (user-defined scalar) pour définir la grandeur scalaire le potentiel électrique ;

- ❖ Un macro UDM (user-defined memories) pour définir et calculer les forces électriques qui seront introduites sous forme de terme source dans les équations de Navier-stokes ;

4.5 Conclusion

Généralement pour résoudre le système d'équations (4.4), (4.5) et (4.6) il faut suivre les étapes suivantes :

- 1) Placez les conditions de frontière des équations régissantes convenablement.
- 2) Placez les valeurs initiales pour le potentiel électrique aux électrodes et aussi pour le champ de vitesse.
- 3) Lancer le sélectionneur d'équation potentiel de poisson et celui de l'équation de quantité de mouvement.
- 4) Résolvez l'équation potentielle et l'équation d'état simultanément, et continuez jusqu'à ce qu'une solution d'état d'équilibre soit trouvée.
- 5) Comparez la solution trouvée aux résultats expérimentaux.

CHAPITRE 5

RESULTATS ET DISCUSSION

5.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats obtenue par le code de calcul FLUENT, qui permet de résoudre les équations de la mécanique de fluide avec pris en compte les forces extérieures.

Il s'agit de modélisé une expérience réalisée qui a mis en évidence la possibilité d'utiliser une décharge comme un actionneur en vue de contrôle l'écoulement

5.2. Cas d'une décharge couronne fil-fil

5.2.1. Écoulement laminaire sans et avec décharge

On effectue le calcul d'un écoulement bidimensionnel avec un régime laminaire sur une plaque plane en incidence nulle. Pour cela, on a pris un maillage non structuré de 69850 nœuds ; les calculs sont faits pour plusieurs vitesses d'entrée. On applique des tensions de +22kv à l'anode et de -10kv à la cathode. Pour ce calcul, on a choisi $h = 1.5$ mm suis aux travaux de [19], qui est la limite de développement de la couche limite et un α arbitraire de l'ordre de 10^{-3} utilisée par [50].

La figure 5.1 et 5.2 représente les iso valeurs de vitesse le long du profil considéré pour une vitesse de 5 m/s, sans et avec décharge électrique respectivement.



Figure 5.1 : contours de vitesse calculés sans décharge avec $U = 5\text{m/s}$

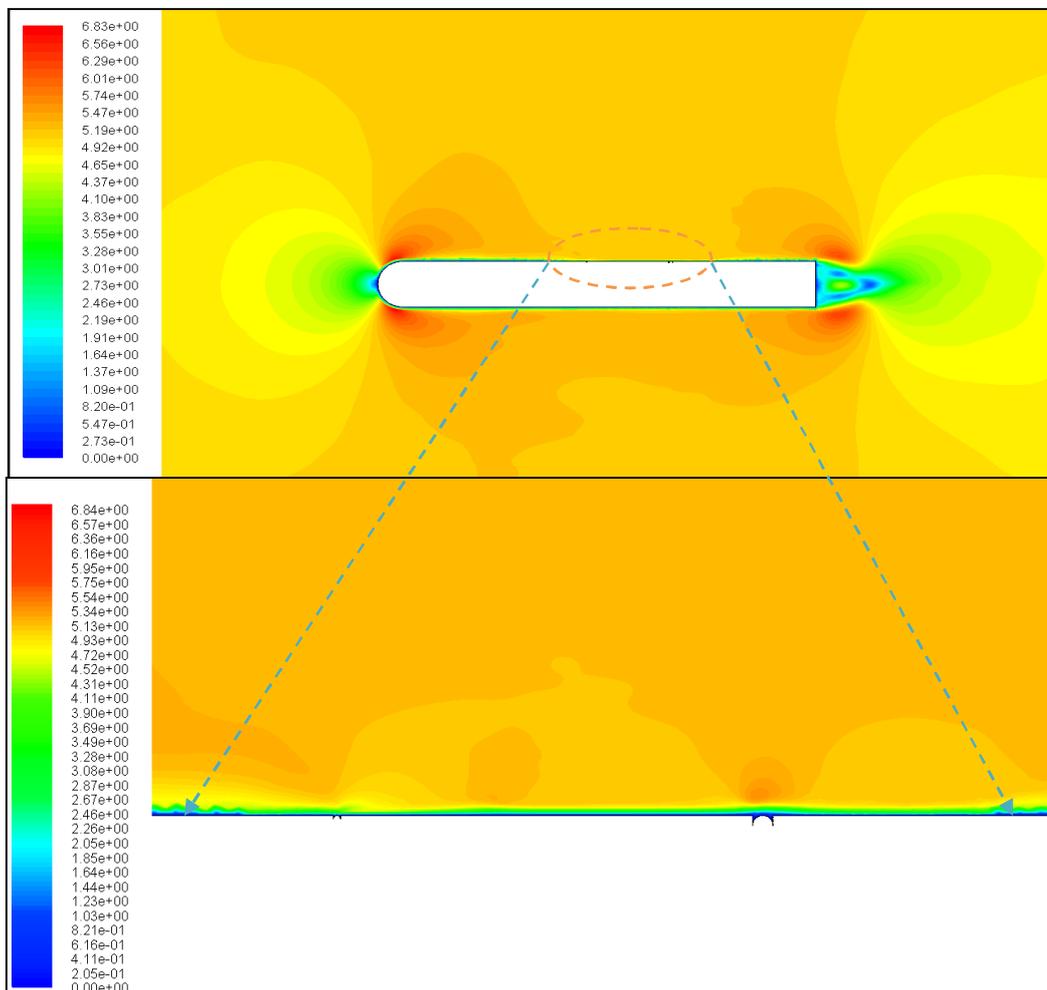


Figure 5.2 : contours de vitesse calculés avec décharge à $U = 5\text{m/s}$ ($V_a = +22\text{kV}$ et $V_c = -10\text{kV}$)

On remarque bien sur la figure 5.1 le décollement de la couche limite sur l'extrados lorsque la décharge est désactivée ; l'écoulement est bien établi dans la zone inter-électrode. Tandis que, dans la figure 5.2 en a un recollement de la couche limite dans cette zone.

Sur la figure 5.3 on voit bien la différence de la vitesse sans et avec décharge. On remarque l'augmentation de la vitesse ; ca s'explique par l'ajout d'une vitesse supplémentaire qu'on l'appel vitesse du vent ionique. Elle favorise le recollement de la couche limite.

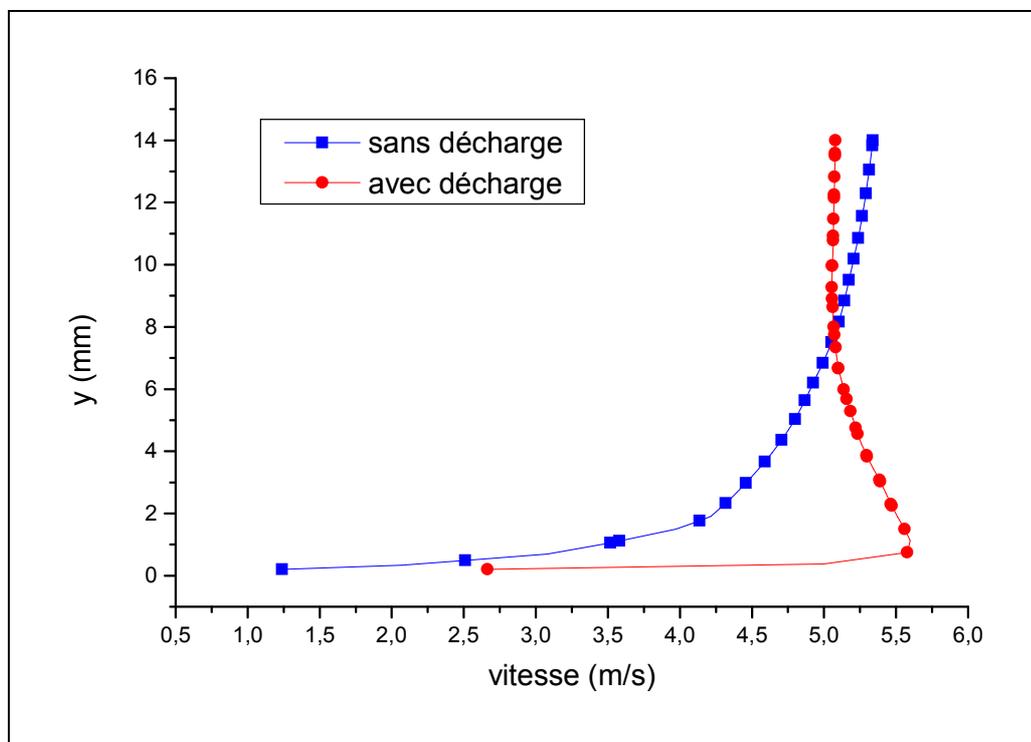


Figure 5 .3: profil de vitesse sans et avec décharge à 3cm de l'anode avec une vitesse d'entrée de 5m/s ($V_a=+22kV$ et $V_c=-10kV$)

5.2.2. Validation des résultats :

Les résultats obtenus sont comparés aux travaux expérimentaux d'Eric Moreau, Luc Léger, Gérard Touchard (2006).

Comme les équations de l'électrostatique dépendent du coefficient α , il faut donc déterminer ce coefficient pour valider les résultats calculés.

Le raffinement du maillage non structuré nous a permis de se rapprocher mieux de la solution expérimentale.

5.2.2.1. Influence de la valeur de α :

La constante α est liée directement à la conductivité électrique σ et la mobilité d'ions par la relation suivante :

$$\alpha = \sigma / \mu_e \quad (5.1)$$

Les mêmes conditions expérimentales sont utilisées dans notre cas ; une vitesse d'entrée de 5m/s ($Re = 68\,500$) est imposée et les valeurs des potentiels aux électrodes sont fixés : +30kv pour l'anode et de -10kv pour la cathode.

Sur la figure 5.4, on représente les profils de vitesse pour des différentes valeurs de α ; on voit bien que les résultats numériques dépendent de ce paramètre.

Dans les figures 5.4 et 5.5 on voit bien l'accord entre les résultats numériques et expérimentaux, en présence et en absence de la décharge électrique. On peut observer dans la figure 5.4 que les résultats numériques sont particulièrement sensibles aux valeurs de α .

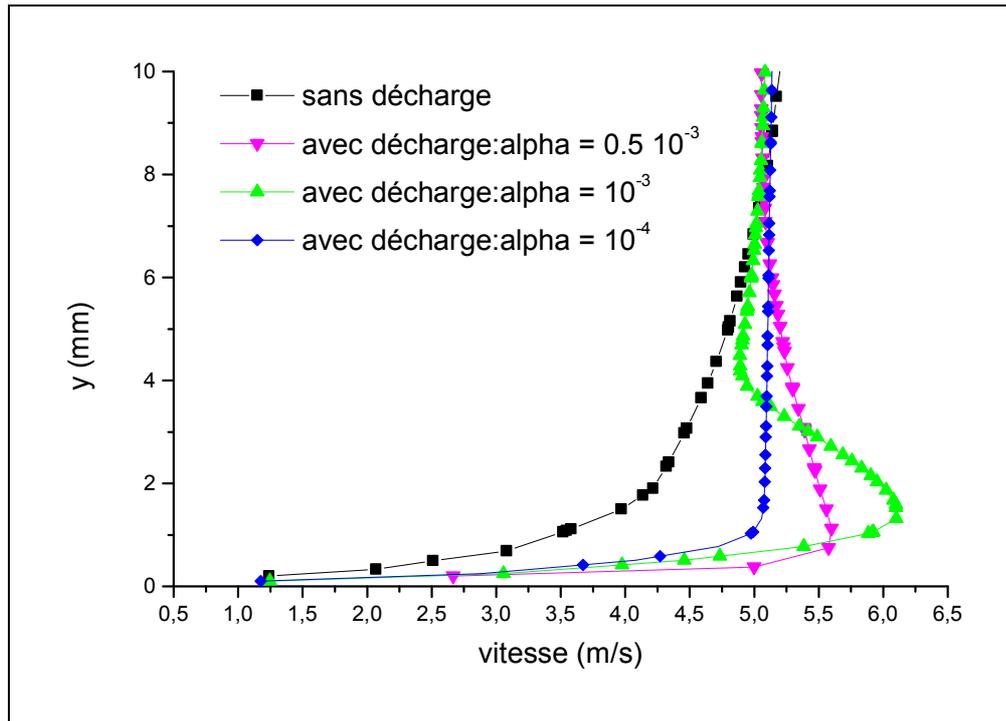


Figure 5.4 : profils de vitesse sans et avec décharge à 1cm en aval de la cathode avec une vitesse d'entrée de 5m/s

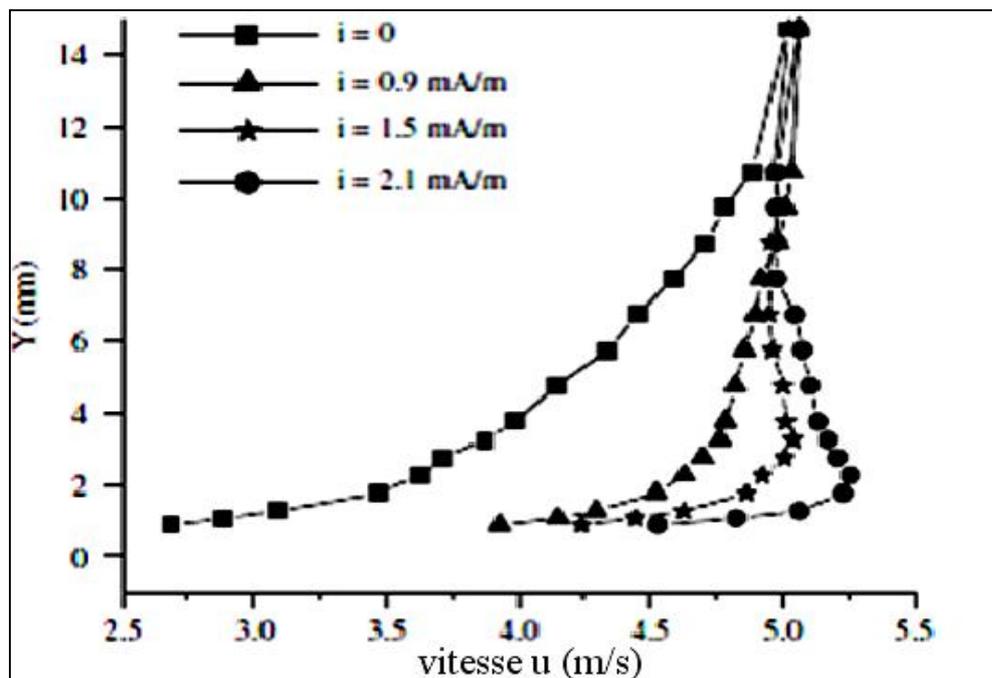


Figure 5.5 : profils de vitesse à 1cm en aval de la cathode avec $U_0= 5\text{m/s}$ et pour différents valeurs du courant de décharge.

On choisira dans la suite de nos calculs $\alpha = 0.5 \cdot 10^{-3}$ qui se rapproche le mieux des résultats expérimentaux.

Sur la figure 5.6 en remarque un petit décalage entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques. Par contre dans le cas avec décharge (figure 5.7) en voit une bonne concordance avec les résultats expérimentaux, a cause de l'accélération de la vitesse transversales qui est la plus dominantes.

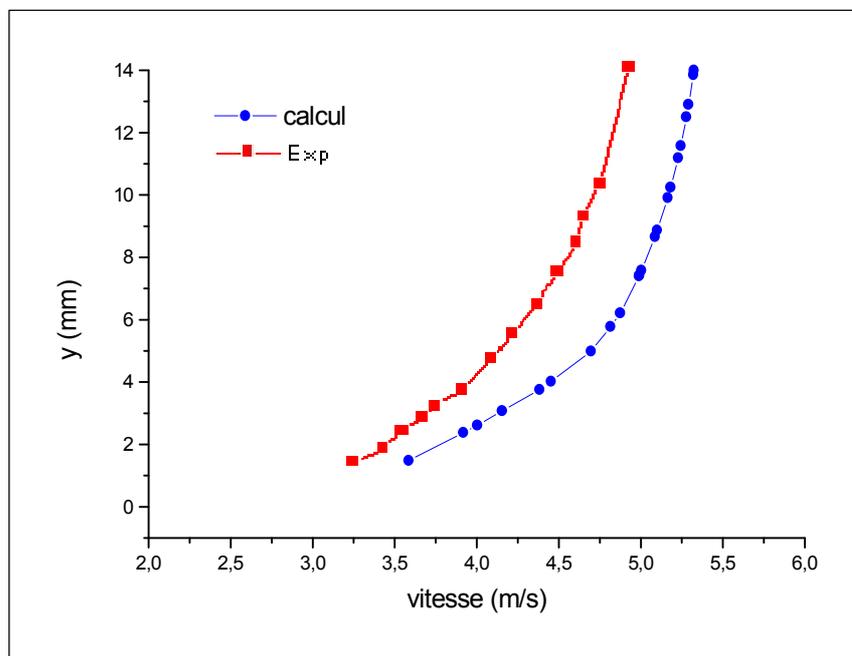


Figure 5.6 : profile de vitesse sans décharge à 1cm en aval de la cathode avec une vitesse d'entrée de 5m/s.



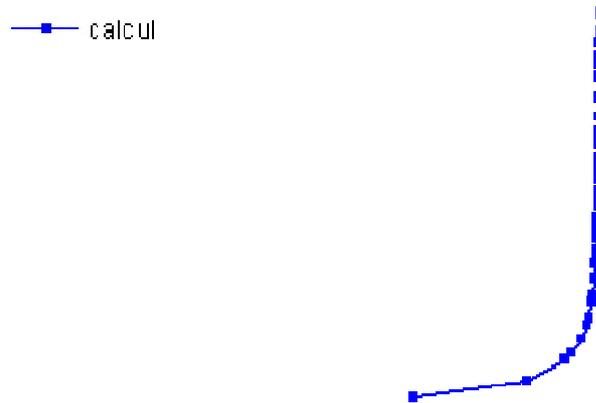


Figure 5.7 : profile de vitesse avec décharge à 1cm en aval de la cathode avec une vitesse d'entrée de 5m/s ($V_a=+30kv$ et $V_c=-10kv$).

5.2.2.2. Influence de la vitesse d'entrée U_0 :

La Figure 5.8 montre plusieurs profils de vitesse à 1 cm en aval de la cathode sans et avec décharge électrique, pour différentes vitesses extérieures allant de 5 m/s à 17m/s. on remarque que l'effet de la décharge diminue lorsque la vitesse extérieure augmente, ce qu'ils expliquent par le fait que la puissance mécanique ajoutée par l'actionneur reste constante là où celle de l'écoulement augmente avec la vitesse. la figure 5.9 montre les profils de vitesse expérimentaux donnée par Moreau (2006).

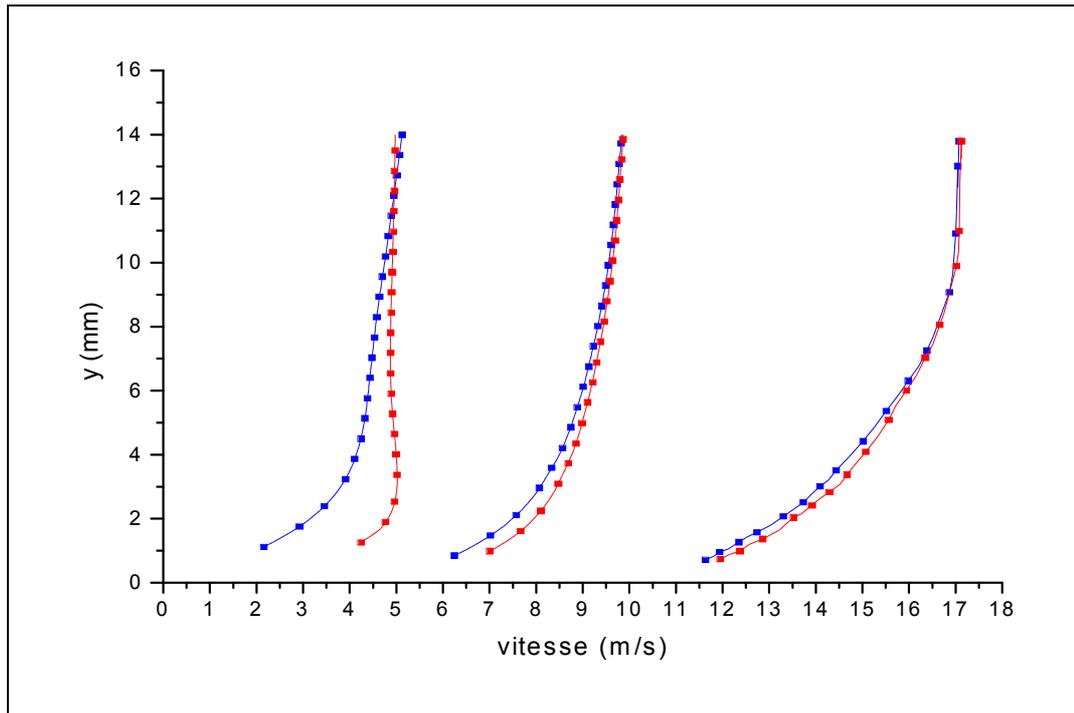


Figure 5.8 : Profils de vitesse a 5,10 et 17m /s, sans (—■—) et avec (—■—) décharge, 1cm en aval de la cathode, et $\alpha = 0.5 \cdot 10^{-3}$

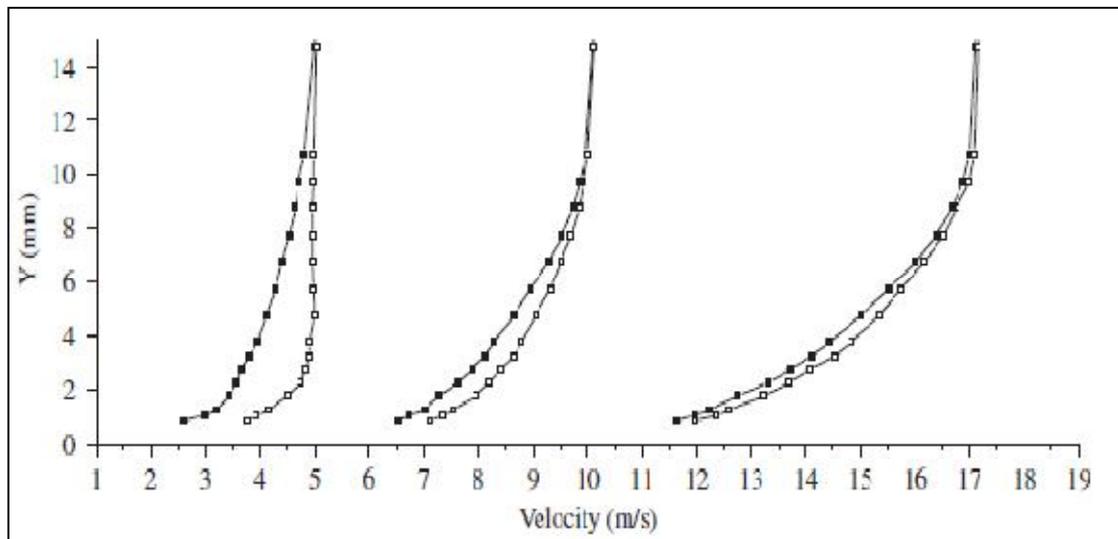


Figure 5.9 : Profils de vitesse expérimentaux, pour $U_0 = 5, 10$ et 17 m /s, sans (—■—) et avec (---■---) décharge, 1cm en aval de la cathode

5.2.3. Epaisseur de la couche limite

A partir des profils de vitesse relevée a 4cm avant la cathode et 6cm derrière la cathode pour une décharge constante de 30kv et une vitesse de 5m/s, nous avons pu déterminée l'épaisseur de la couche limite lorsque la vitesse atteint 99% de la vitesse a l'infini.

La figure 5.10 montre les profils de vitesse obtenus pour différentes abscisses .ces mesure nous a permet de tracée l'épaisseur de la couche limite sans décharge.

Sur la figure 5.11 montre les profils de vitesse avec décharge obtenue pour différente abscisse sur la plaque. Le vent ionique modifie la vitesse de l'écoulement dans la zone proche de la paroi. Cet effet dépend principalement du maximum de vitesse produit par l'actionneur par rapport à la vitesse de l'écoulement. Cette figure confirme le recollement de la couche limite avec une augmentation de la vitesse dans la zone inter électrode.

La figure 5.12 montre l'évolution de l'épaisseur de la couche limite en fonction de l'abscisse sans et avec décharge électrique, pour un écoulement de 5m/s.

On voie un accroissement classique d'épaisseur de la couche limite laminaire sans décharge électrique ; lorsque l'actionneur est en marche, on distingue une réduction dans la couche limite. A $x = 6$ cm, proche de bord de fuit, la couche limite est réduite de 60% pour un écoulement de 5m/s.

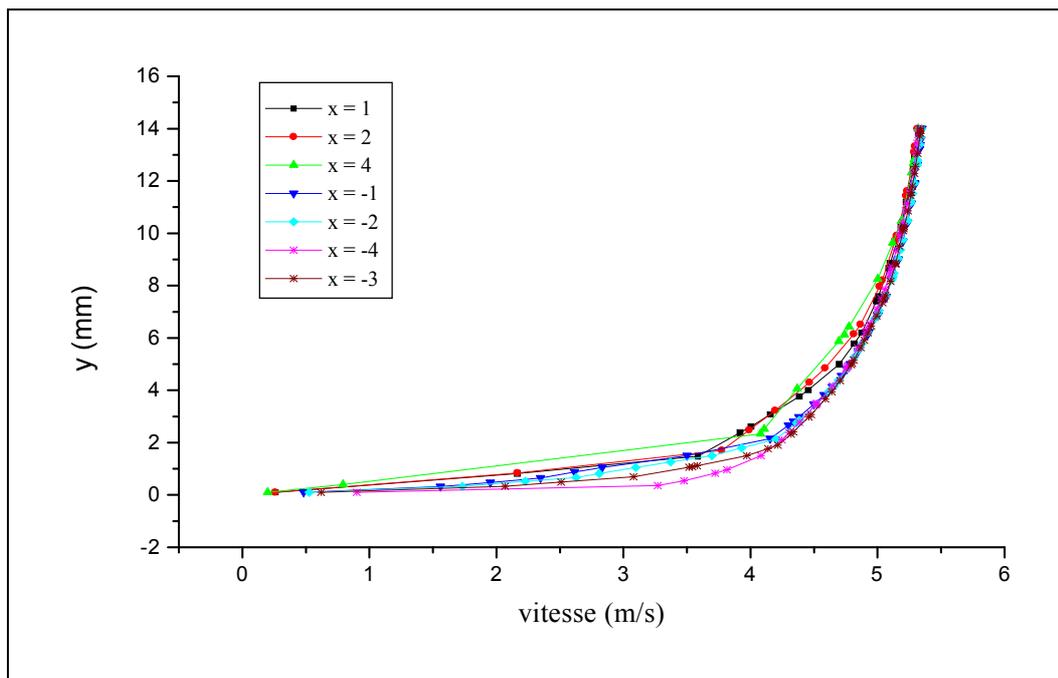


Figure 5.10 : Profil de vitesse a $U_0 = 5\text{m/s}$ sans décharge pour différents position sur la plaque.

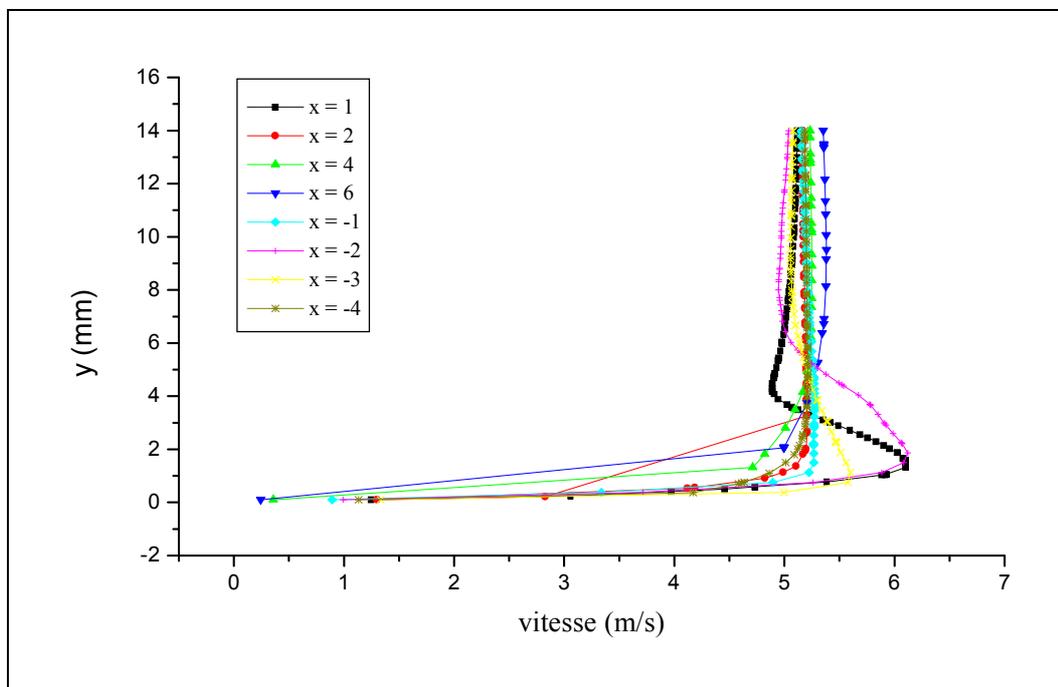


Figure 5.11 : Profil de vitesse a $U_0 = 5\text{m/s}$ avec décharge pour différents position sur la plaque.

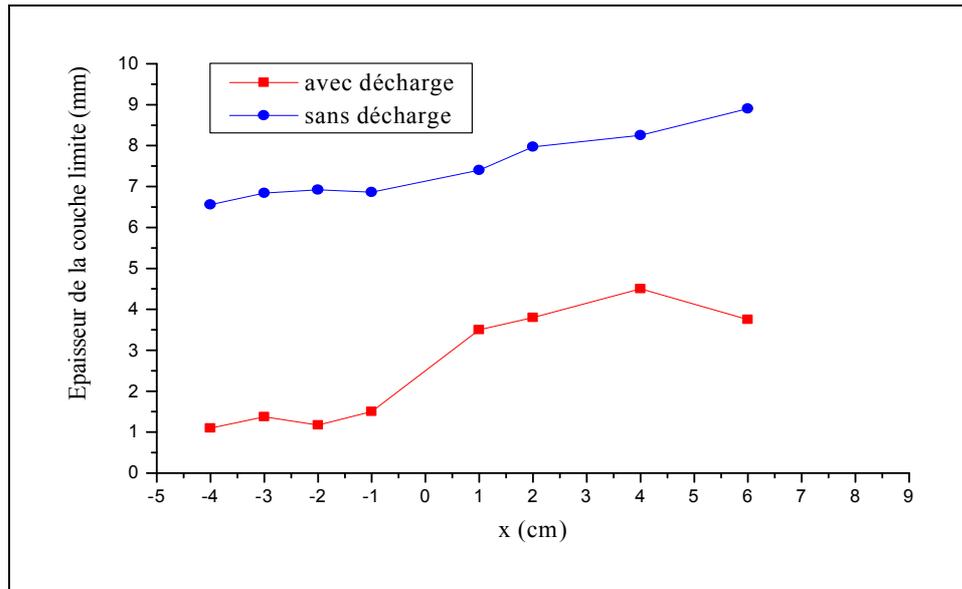


Figure 5.12 : Évolution de l'épaisseur de la couche limite sans et avec décharge en fonction de l'abscisse pour une vitesse d'entrée de 5m/s

5.2.4. La réduction de la traînée

Puisque le fluide adhère à la paroi, les forces de frottement retardent le mouvement du fluide à l'intérieur de la couche limite. Dans le cas d'une plaque plane à incidence nulle, la traînée à une abscisse x donnée peut être déterminée à partir des profils de vitesse avec la formule suivante [49] (Schlichting (1968)) :

$$D(x) = b \rho \int_{y=0}^{\infty} u(U_0 - u)dy \quad (5.2)$$

Avec :

- ♣ b la largeur de la plaque (ici 50 cm)
- ♣ ρ la masse volumique de l'air (kg.m^{-3})
- ♣ u la vitesse locale (m.s^{-1})
- ♣ U_0 la vitesse de l'écoulement principal (m.s^{-1})

Dans la figure 5.13 on voit bien l'évolution de la trainée au bord de fuite ($x = 7\text{cm}$) sans et avec décharge pour des vitesses allant de 5 à 25m/s.

Cette figure (5.13) montre une réduction de trainée de 16.3 % quand la décharge est activée.

La figure 5.14 montre l'évolution de la trainée calculée par E .Moreau et al.

D'après ces résultats expérimentaux on voit une ressemblance avec les résultats calculés.

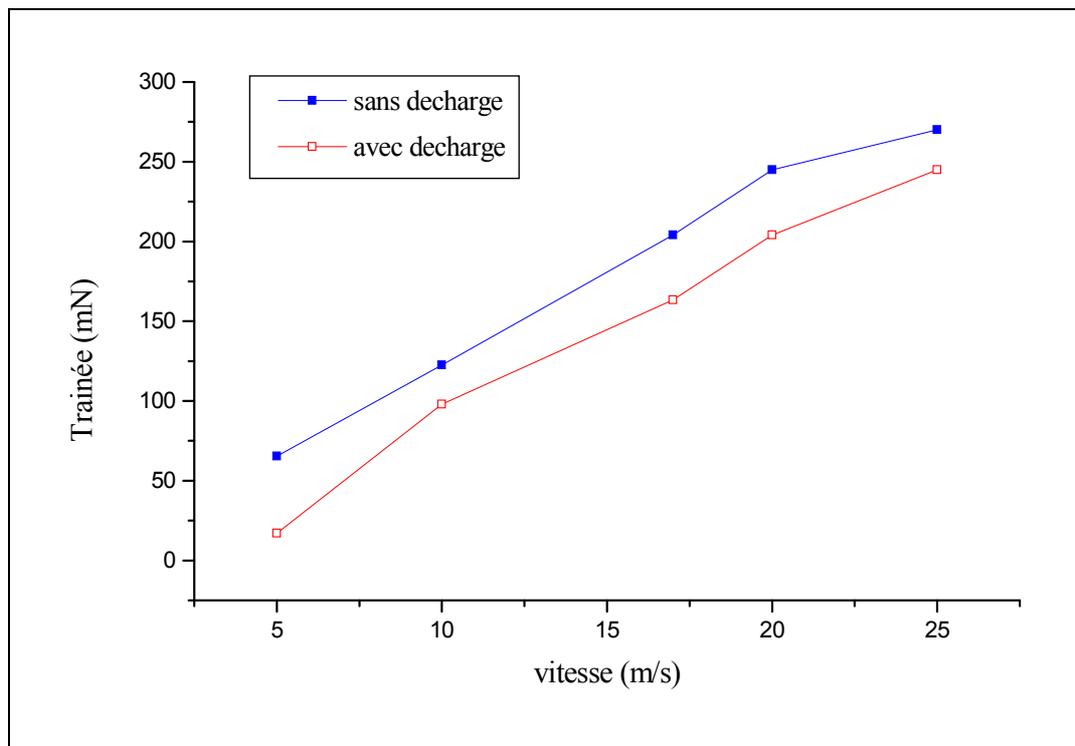


Figure 5.13 : La trainée a $x = 7\text{cm}$ en absence et en présence de la décharge

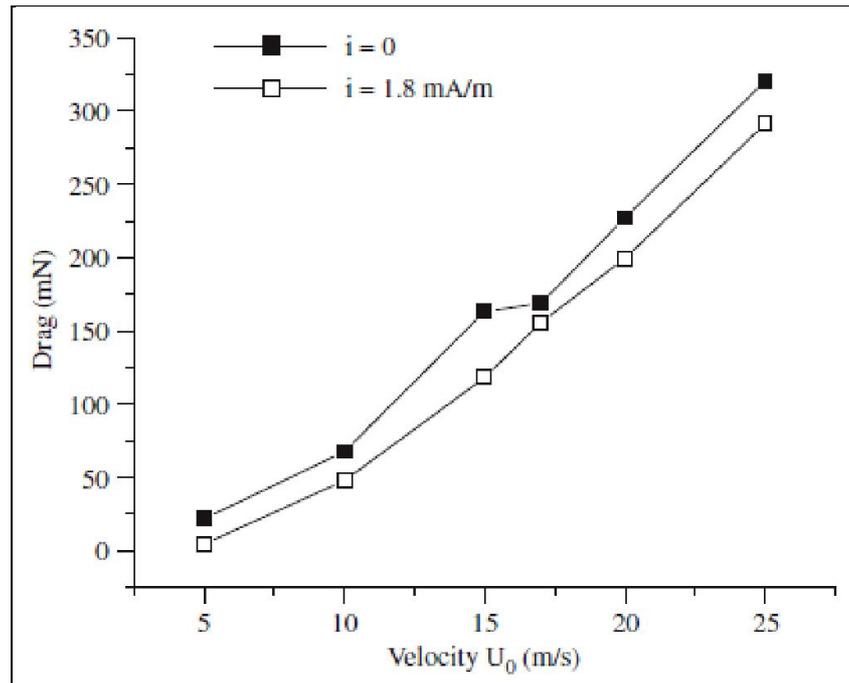


Figure 5.14: La traînée a $x = 7\text{cm}$ expérimentale, en absence et en présence de la décharge pour différentes vitesses d'écoulements

5.2.5. Écoulement turbulent sans et avec décharge

On place le profil dans un écoulement turbulent (le modèle $k-\epsilon$) stationnaire à des vitesses d'entrée de 35 m/s jusqu'à 50m/s, et de viscosité $\mu = 1.3611 \times 10^{-6} \text{ kg/ms}$ et masse volumique $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$. donc un nombre de Reynolds supérieur a $5 \cdot 10^5$.

On applique des tensions de +40kv a l'anode et de -10kv a la cathode.

Les détails de calcule sont mentionné dans annexe 5.3.

Les figures 5.15, 5.16, 5.17 et 5.19 Montre les profile de vitesse a différentes valeurs : 35m/s ,40m/s, 45m/s et jusqu'à 50m/s.

On voit bien dans ces figures qu'il n'y a pas beaucoup une grande différence entre les profile de vitesse sans décharge et avec décharge, on peut dire que la vitesse de l'écoulement est forte par rapport a la vitesse du vent ionique. Ces ce qu'on voit dans la figure 5.18, le contour de champ de vitesse.

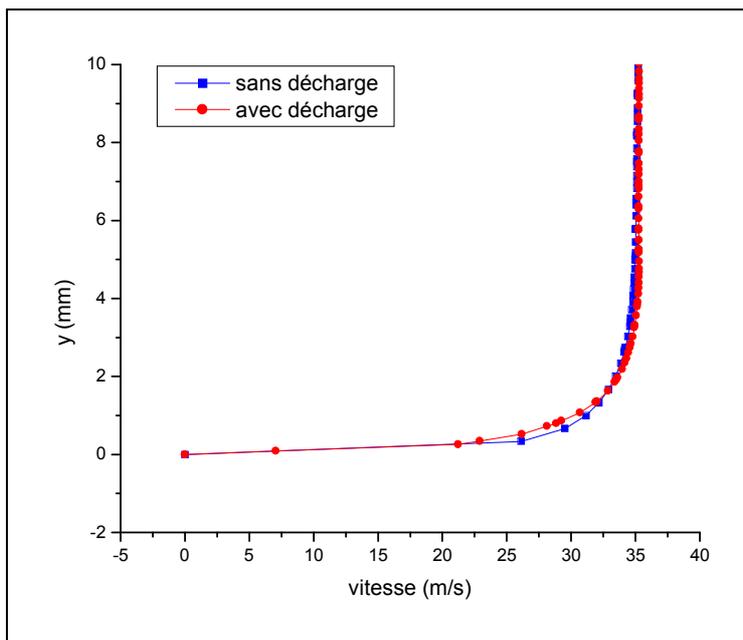


Figure 5.15 : Profil de vitesse sans et avec décharge à 35m/s

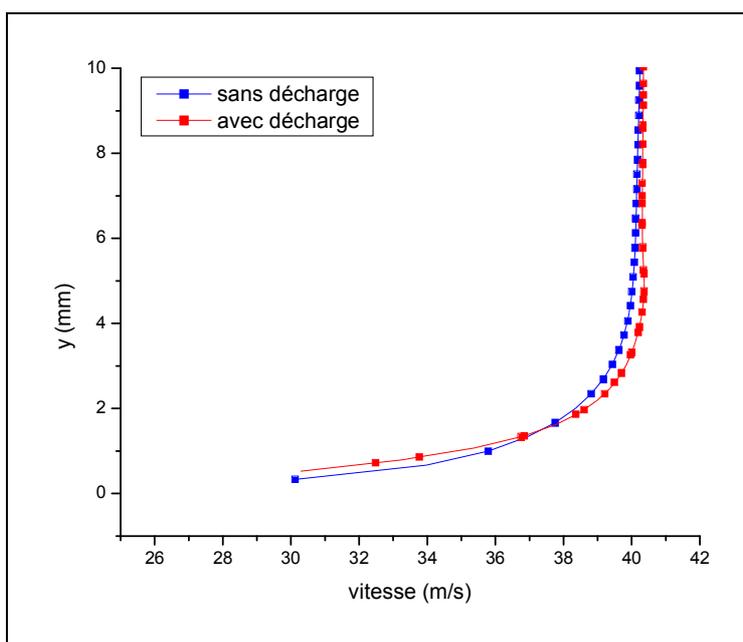


Figure 5.16 : Profil de vitesse sans et avec décharge à 40m/s

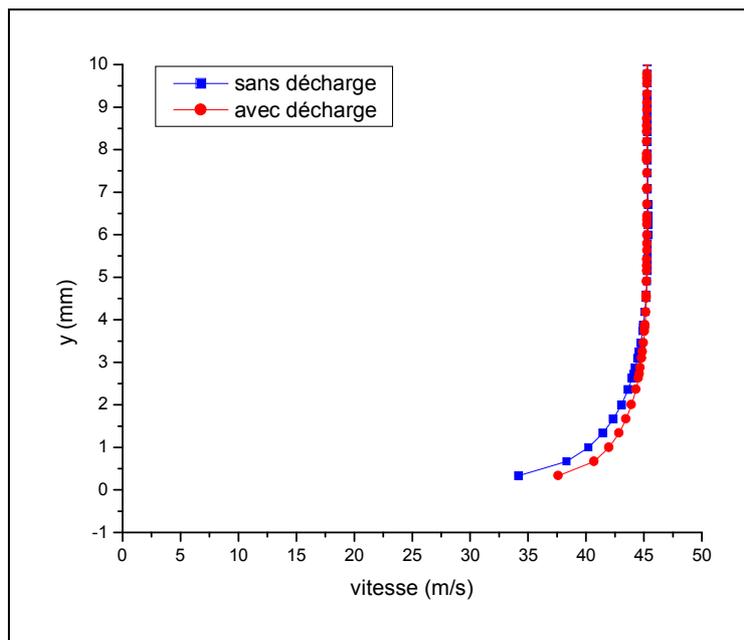


Figure 5.17 : Profil de vitesse sans et avec décharge à 45m/s

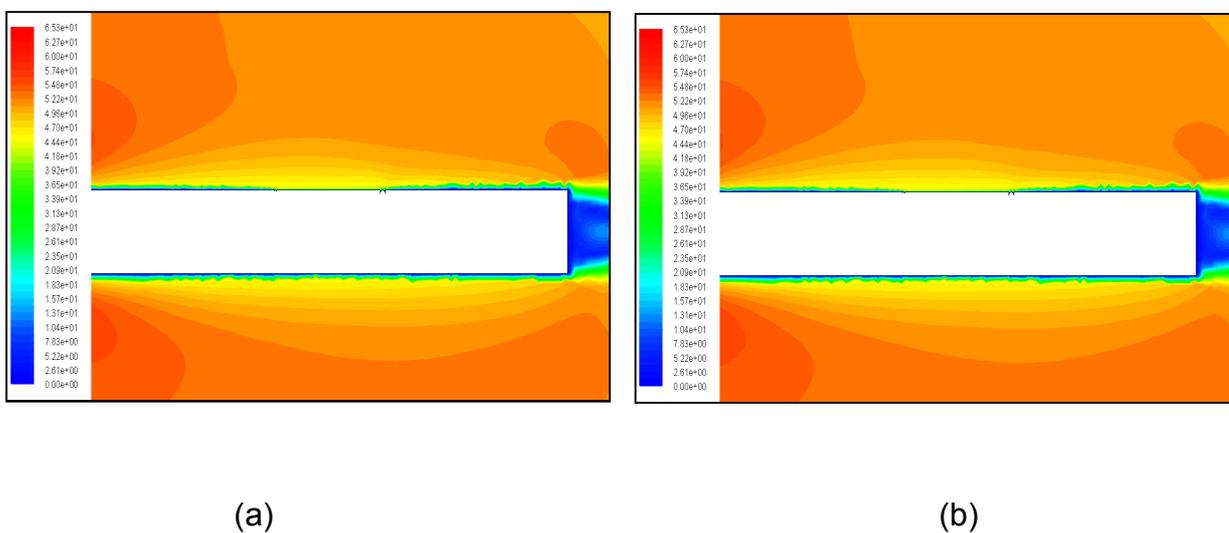


Figure 5.18 : Le contour de champ de vitesse pour une vitesse d'entrée de 50m/s ; (a) sans décharge, (b) avec décharge

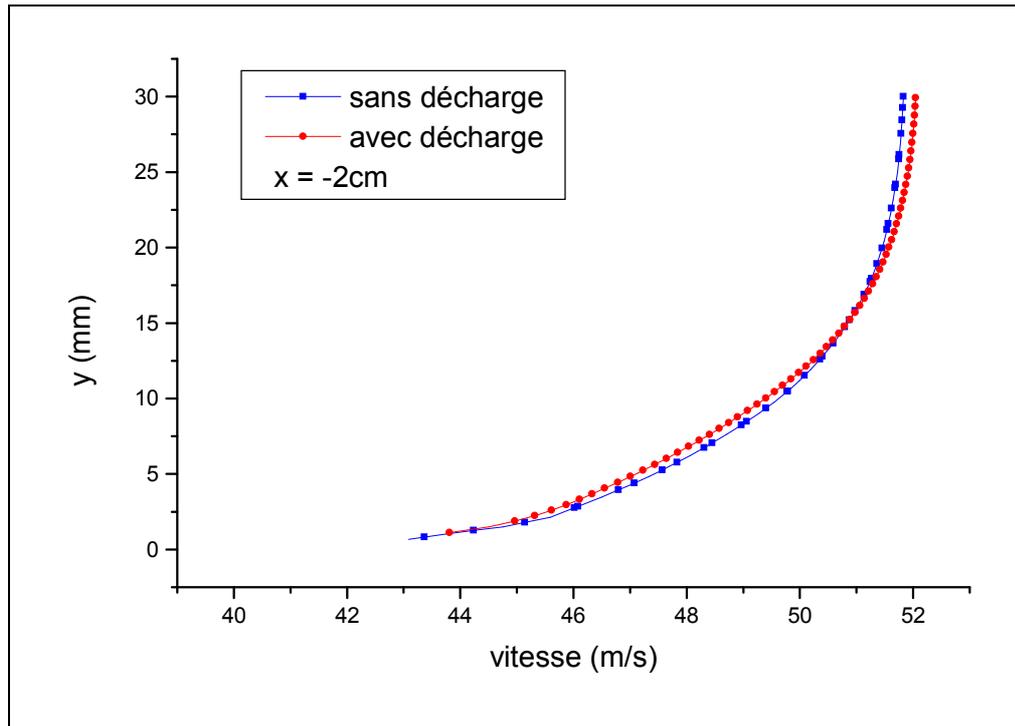


Figure 5.19 : Profil de vitesse sans et avec décharge à 50m/s

5.3. Cas d'électrodes en bandes

5.3.1. Écoulement laminaire sans et avec décharge

On développe nouvelle configuration, tel que les électrodes sont des fines bandes de cuivre adhésives (35 μm d'épaisseur), de 175 mm de longueur et 25 mm de largeur. L'écoulement étant bidimensionnelle laminaire. On a pris un maillage non structuré de 92233 nœuds. En appliquant une tension d'environ 40 kV ,avec prise en considération la hauteur de la zone de décharge h qui est egale a 1.5 mm. Et une vitesse d'entrée de 4m/s ,8m/s et 14m/s.

Dans la figure 5.20 et 5.21 on voit le champ de vitesse et les iso valeurs des vecteurs vitesses, calculée sans décharge avec un écoulement amont de 4m/s.

La figure 5.20, montre bien la répartition de l'écoulement sur la plaque et que la couche limite est bien établie, par contre dans la figure 5.22 on remarque un recollement de la couche limite, comme si que l'écoulement est aspirée par la décharge, qui contournant le bord d'attaque de la plaque plane.

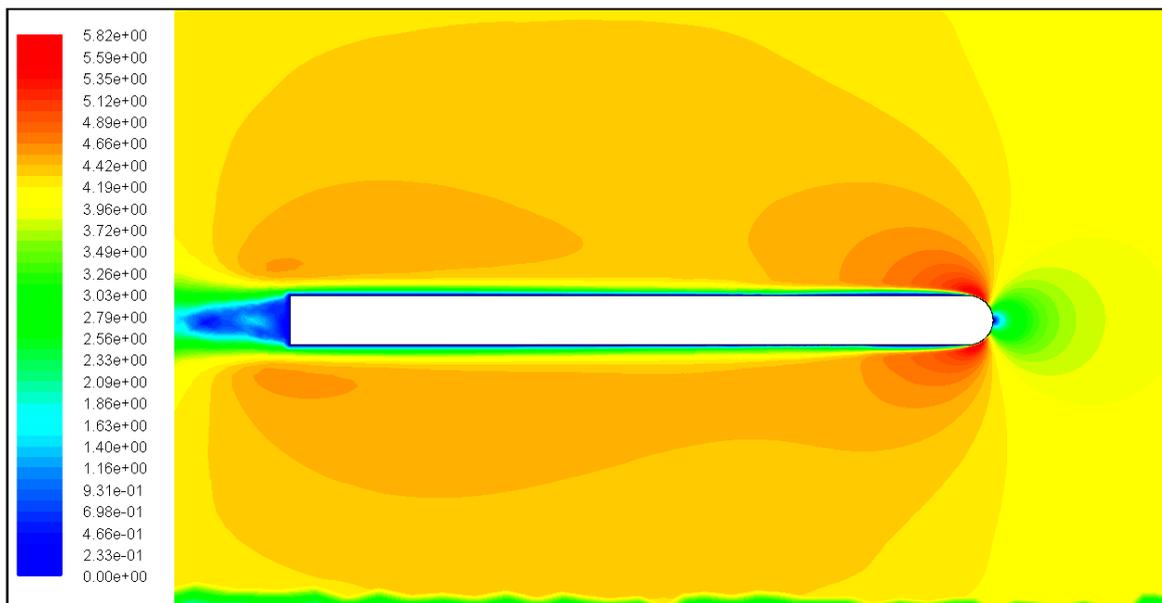


Figure 5.20 : contours de vitesse calculée sans décharge avec $U_0 = 4\text{m/s}$

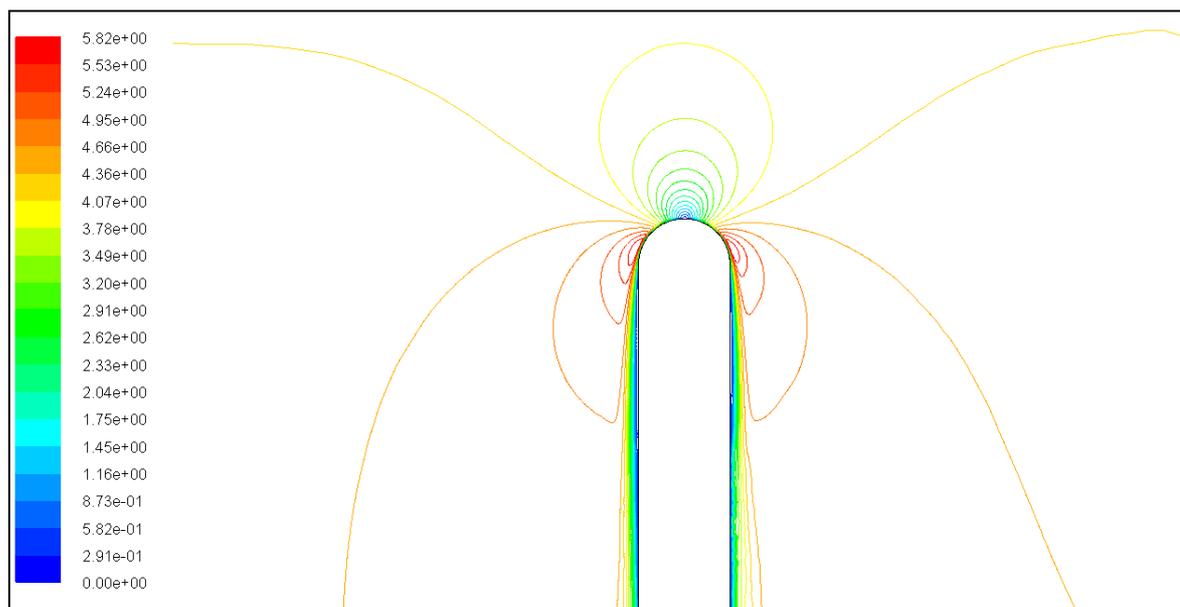


Figure 5.21 : contours des iso valeurs de vitesse calcule sans décharge à $U_0 = 4\text{m/s}$



Figure 5.22: contours de vitesse calculé avec décharge a $U_0 = 4\text{m/s}$

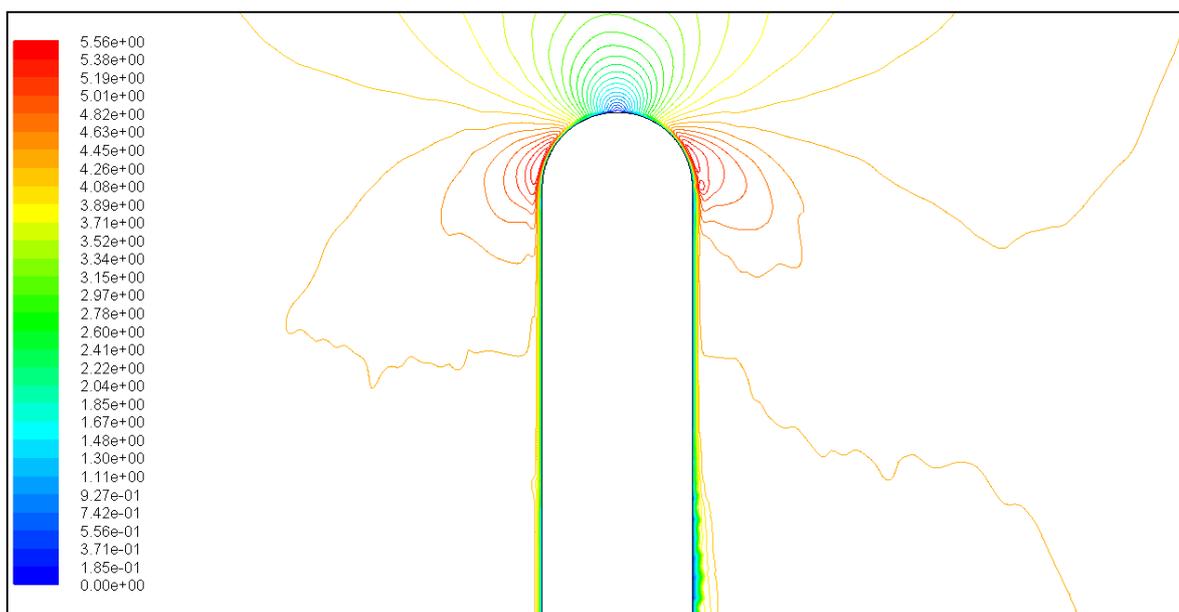


Figure 5.23 : contours des iso valeurs de vitesse calculé avec décharge à $U_0 = 4\text{m/s}$

Dans la figure 5.24 on remarque bien l'augmentation de la vitesse en présence de la décharge dans la zone inter électrodes.

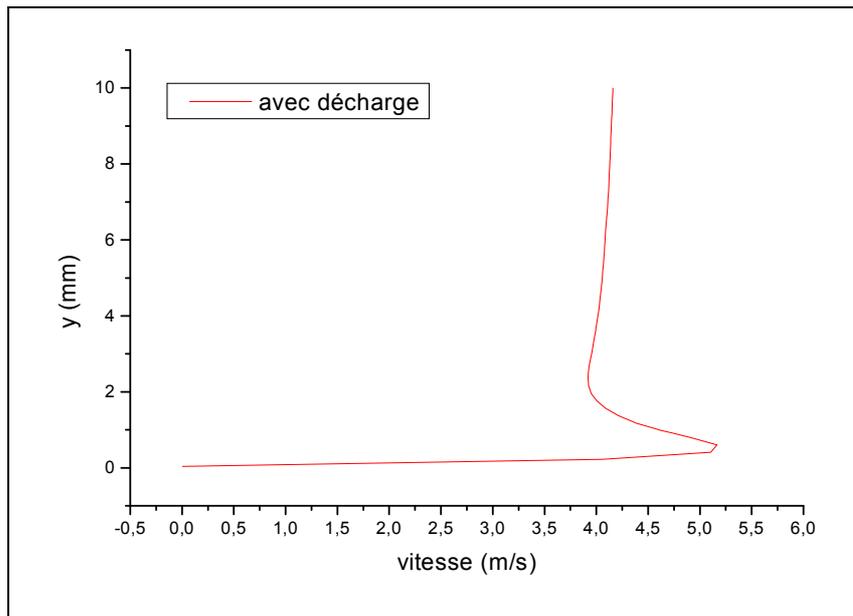


Figure 5.24 : profile de vitesse avec décharge à 1cm en aval de la cathode avec une vitesse d'entrée de 4m/s ($V_a=+ 30\text{kV}$ et $V_c=-10\text{kV}$)

5.3.2. Validation des résultats

Pour la deuxième configuration, on a comparé nos résultats par les travaux expérimentaux de Pierre Magnier (2007).

Pour mieux voir le développement de la couche limite dans la zone inter électrodes, et les performances de l'actionneur, on a augmenté la hauteur h de la zone de décharge a $h = 2\text{mm}$ dans la suite de nos travaille .

5.3.2.1. Effets de l'actionneur sur la plaque plane en incidence

Les essais ont été calculée pour trois vitesses d'écoulement de 4 m/s (nombre de Reynolds de 53 000), 8 m/s ($Re = 107\ 000$) et 14 m/s ($Re = 187\ 000$). La plaque est positionnée a des incidences comprises entre 0° et 5° . On appliquant une tension de 40kv a l'anode et -10kv a la cathode. Les figures 5.25, 5.26, 5.27 et 5.28 montrent que la configuration des électrodes placées en bord d'attaque permet de nettement modifier l'écoulement sur la plaque plane. En voie bien une ressemblance entre les résultats expérimentale et calculée.

L'importance de l'effet de la décharge sur l'écoulement est plus ou moins grande selon le type de régime d'écoulement. Ainsi la décharge fait disparaître les petits

bulbes de bord d'attaque ($\alpha = 0^\circ$ et $Re = 53 \times 10^3$, $\alpha = 2,5^\circ$ et $Re = 187 \times 10^3$), alors que les plus gros bulbes ne sont que réduits ($\alpha = 2,5^\circ$ et $Re = 107 \times 10^3$). Pour les écoulements moyennement séparés, le détachement qui est dû à l'éclatement d'un bulbe de bord d'attaque est fortement réduit en présence de la décharge ($\alpha = 2,5^\circ$ et $Re = 53 \times 10^3$, $\alpha = 5^\circ$ et $Re = 53 \times 10^3$, $\alpha = 5^\circ$ et $Re = 107 \times 10^3$).

2.5°, 8 m/s, SANS décharge

2.5°, 8 m/s, AVEC décharge

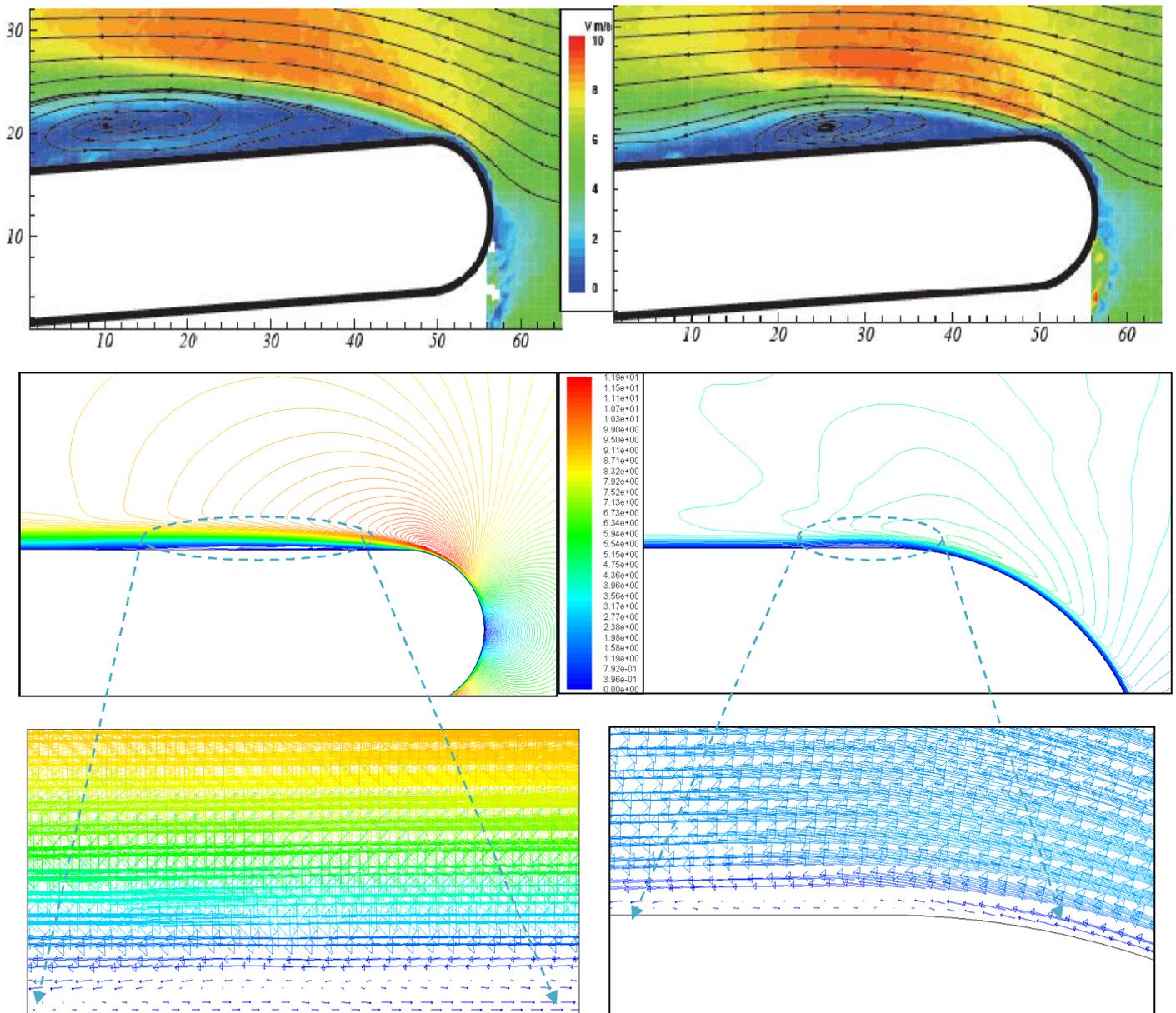


Figure 5.25 : Champs de vitesse et lignes de courant avec et sans décharge pour un angle d'attaque de 2,5° et une vitesse de 8m/s.expérimentale (en haut) et calculée, ($V_a=+ 40kV$ et $V_c=-10kV$)

2.5°, 14 m/s, SANS décharge

2.5°, 14 m/s, AVEC décharge

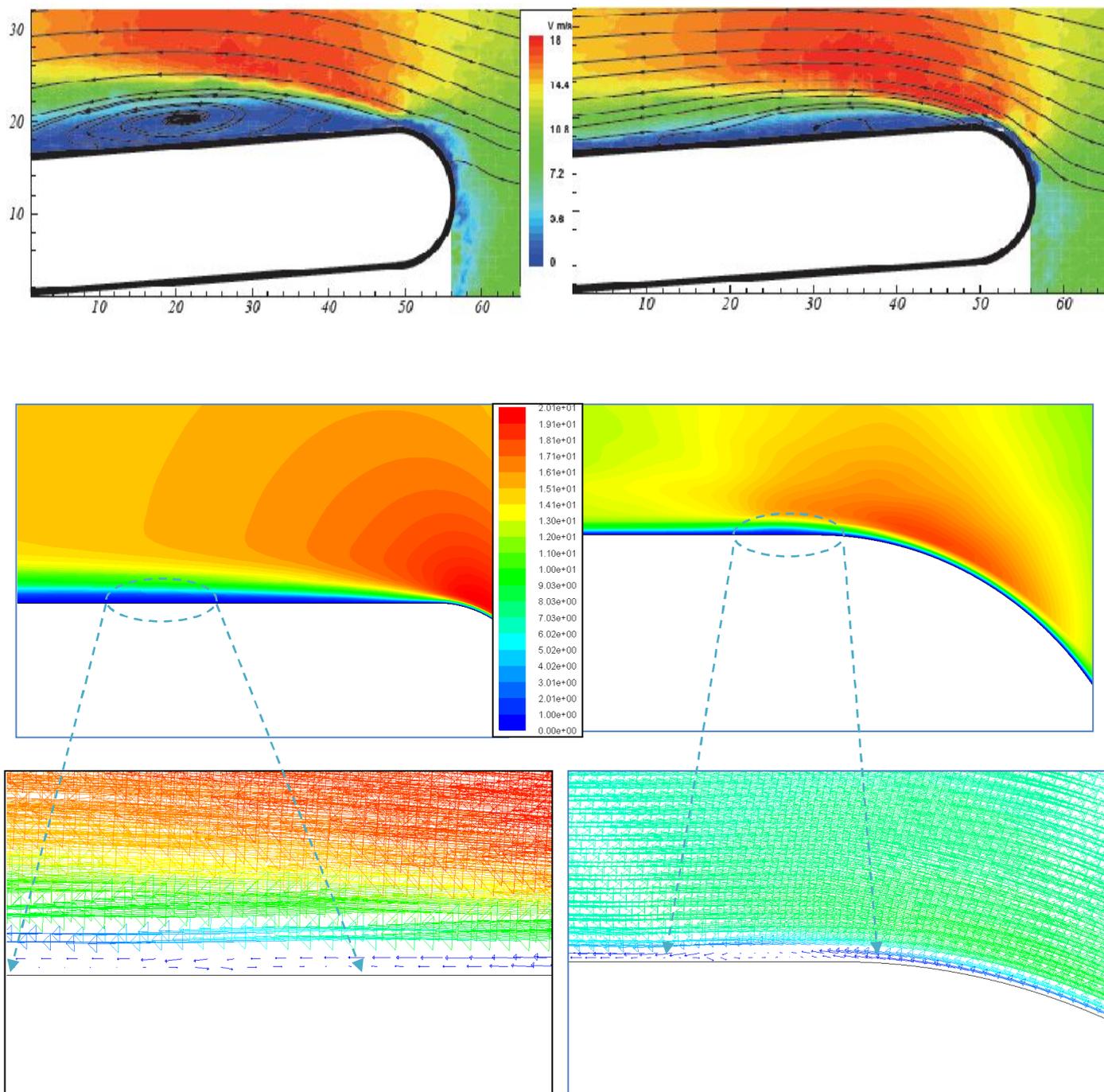


Figure 5.26 : Champs de vitesse et lignes de courant avec et sans décharge pour un angle d'attaque de 2,5° et une vitesse de 14 m/s .expérimentale (en haut) et calculée, ($V_a = +40\text{kV}$ et $V_c = -10\text{kV}$)

5°, 4 m/s, SANS décharge

5°, 4 m/s, AVEC décharge

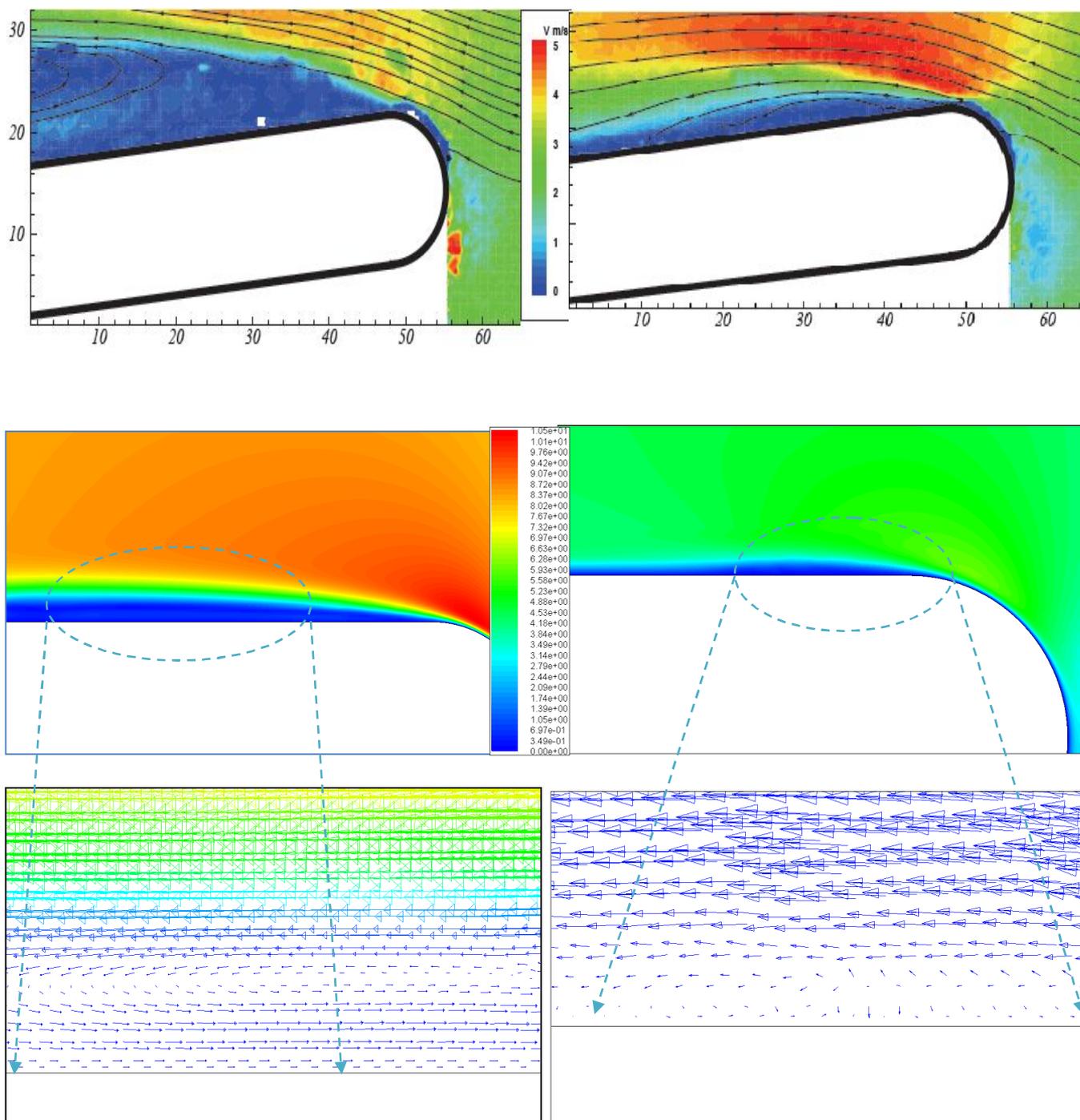


Figure 5.27: Champs de vitesse et lignes de courant avec et sans décharge pour un angle d'attaque de 5° et une vitesse de 4 m/s .expérimentale (en haut) et calculée, ($V_a = +40\text{kV}$ et $V_c = -10\text{kV}$)

5°, 8 m/s, SANS décharge

5°, 8 m/s, AVEC décharge

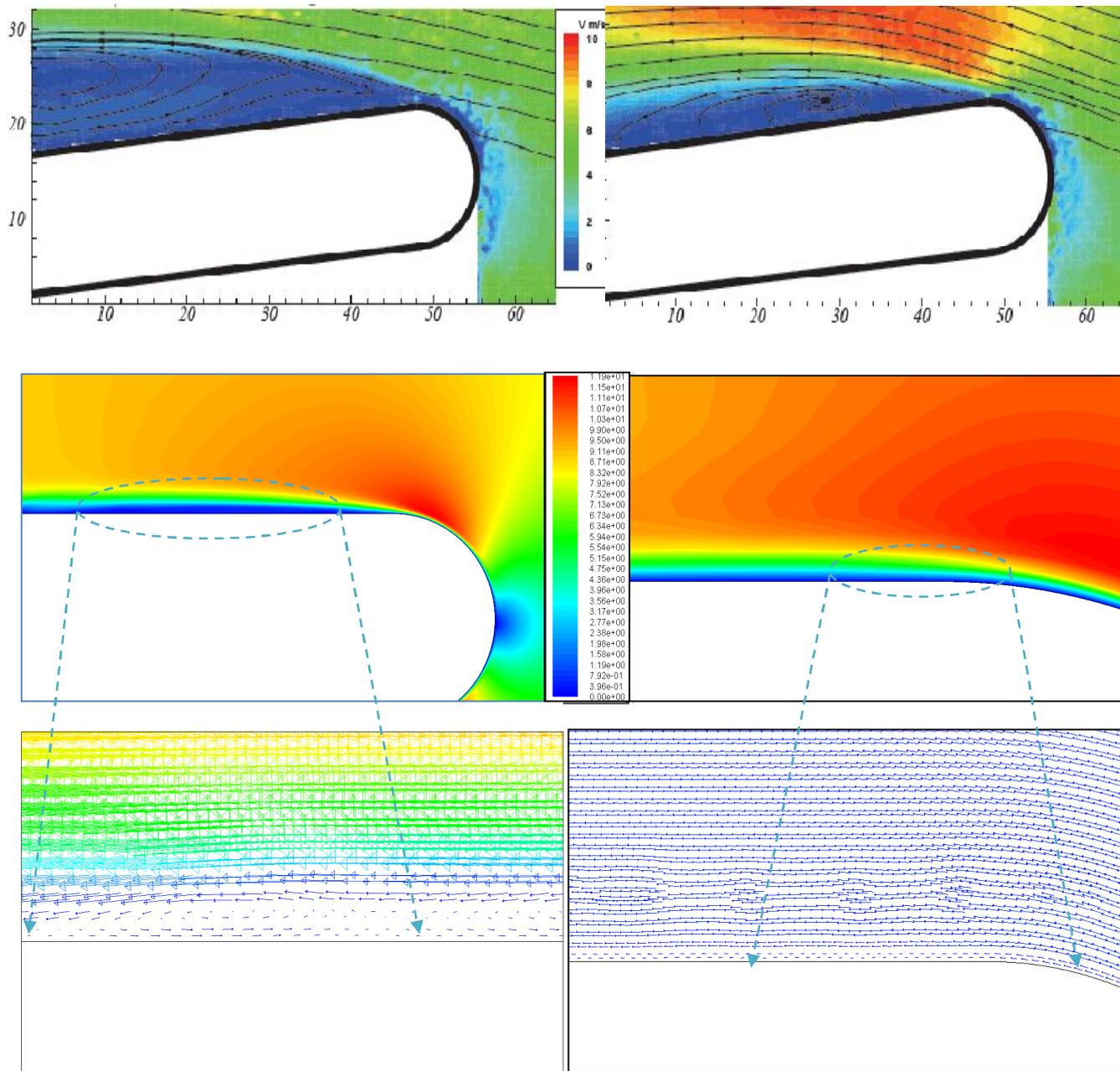


Figure 5.28 : Champs de vitesse et lignes de courant avec et sans décharge pour un angle d'attaque de 5° et une vitesse de 8 m/s .expérimentale (en haut) et calculée, ($V_a=+ 40\text{kV}$ et $V_c=-10\text{kV}$)

5.3.3. Réduction de la couche limite

Les figures 5.29 et 5.30 montre les profils de vitesse obtenus pour différentes abscisses sur la plaque plane a incidence nulle sans et avec décharge électrique avec une intensité de 40kv.ces profils de vitesse confirment le développement de la couche limite sur la plaque plane.

La figure 5.31 montre l'évolution de l'épaisseur de la couche limite avec et sans décharge, et pour une vitesse d'écoulement de 4m/s.

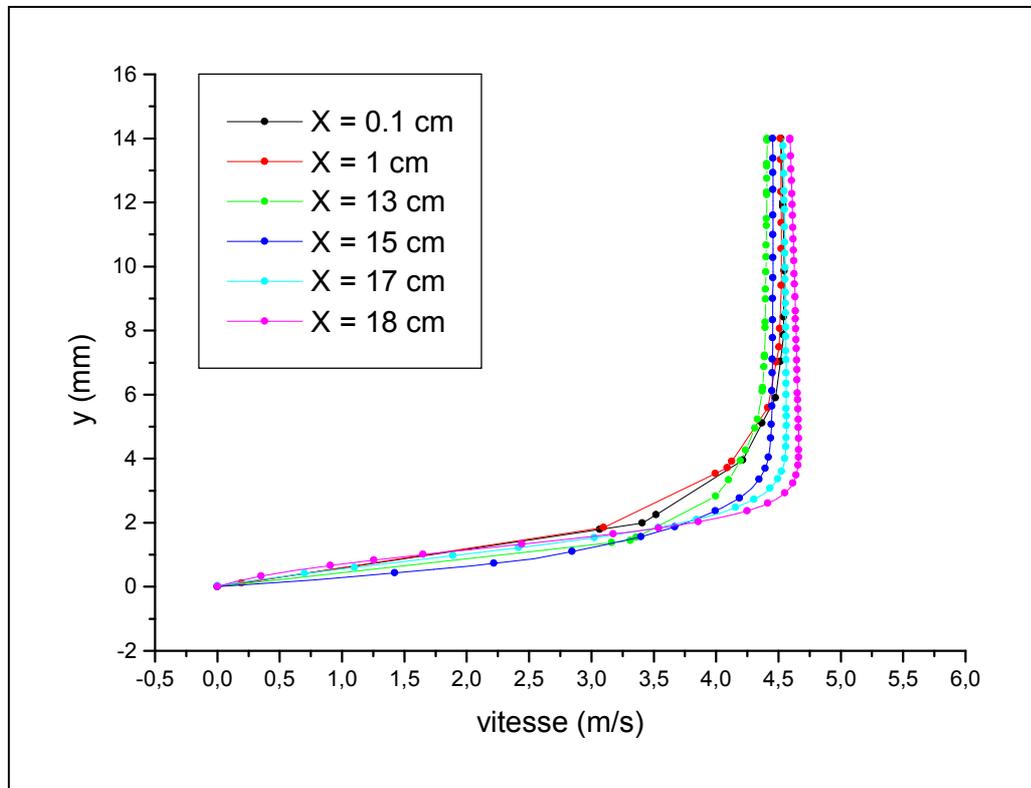


Figure 5.29 : Profil de vitesse a $U_0 = 4\text{m/s}$ sans décharge pour différents position sur la plaque.

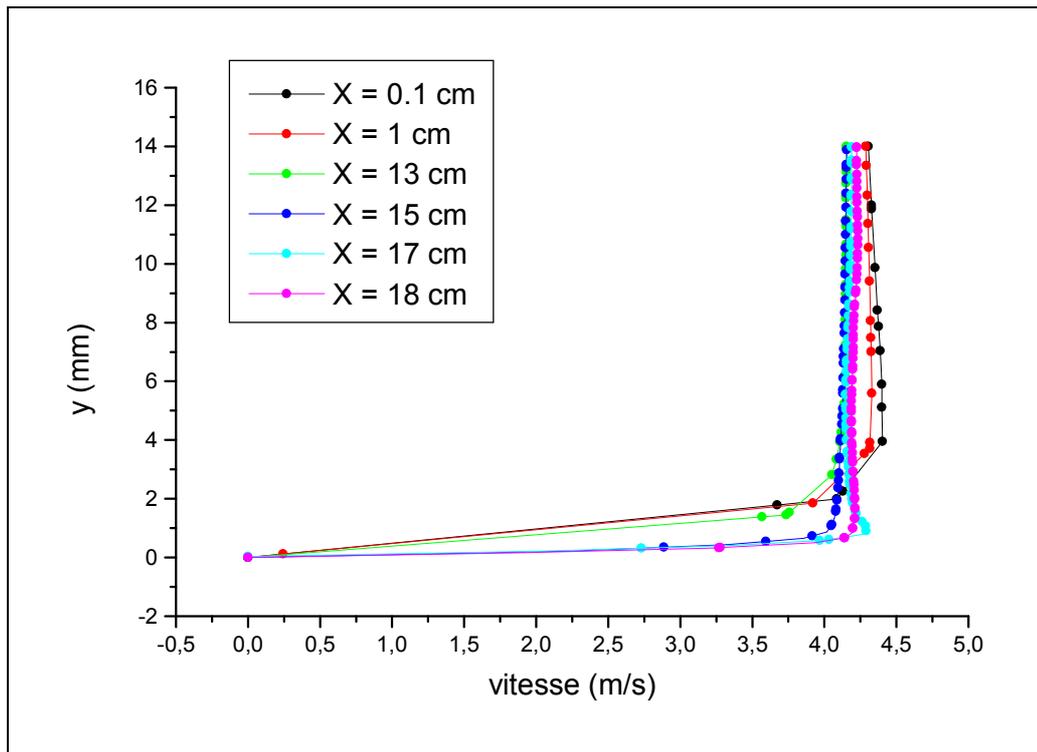


Figure 5.30 : Profil de vitesse a $U_0 = 5\text{m/s}$ avec décharge pour différents position sur la plaque.

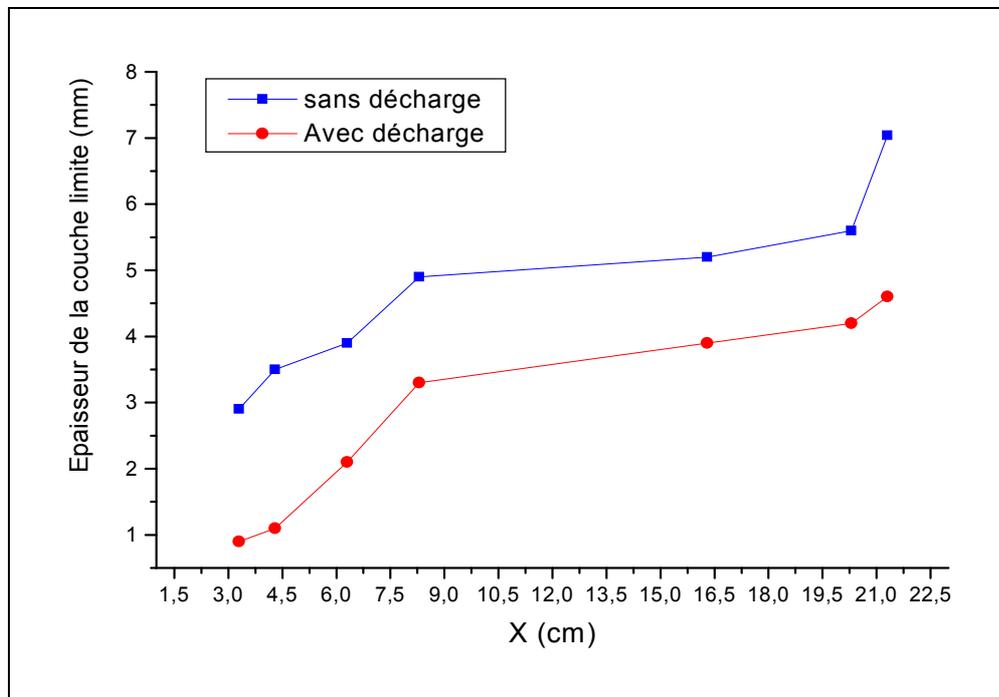


Figure 5.31 : Évolution de l'épaisseur de la couche limite sans et avec décharge en fonction de l'abscisse pour une vitesse d'entrée de 4m/s

5.3.3. L'influence de la décharge sur la trainée

La réduction des bulbes et de la séparation de l'écoulement sur la plaque plane en incidence par la décharge couronne a pour conséquence une variation de la valeur des efforts qui lui sont appliqués. Dans le cas d'une plaque plane à incidence nulle, la trainée d'une face du bord d'attaque à une abscisse x donnée peut être déterminée à partir des profils de vitesse avec la formule (5.2) de Schlichting (1968).

Avec la formule 5.2, l'effort de trainée appliqué à la plaque plane, à l'abscisse $x = 40$ mm en aval du bord d'attaque, est calculé pour les trois vitesses étudiées pendant ces essais (figure 5.32). Pour chaque vitesse d'écoulement, la valeur de la trainée est réduite par application de la décharge. Pour une vitesse de 14 m/s, elle est réduite de 27,2 %.

En effet, en ajoutant de la quantité de mouvement à proximité de la paroi, l'actionneur plasma permet d'agir sur les bulbes de bord d'attaque. Ainsi la trainée induite par cette recirculation de fluide est fortement réduite par la réduction du bulbe.

Ceci confirme les résultats obtenus par Pierre MAGNIER (2007) dans la figure 5.33 (jusqu'à 17,6% de réduction). On voit bien qu'il y a une bonne concordance entre les résultats numériques et expérimentaux.

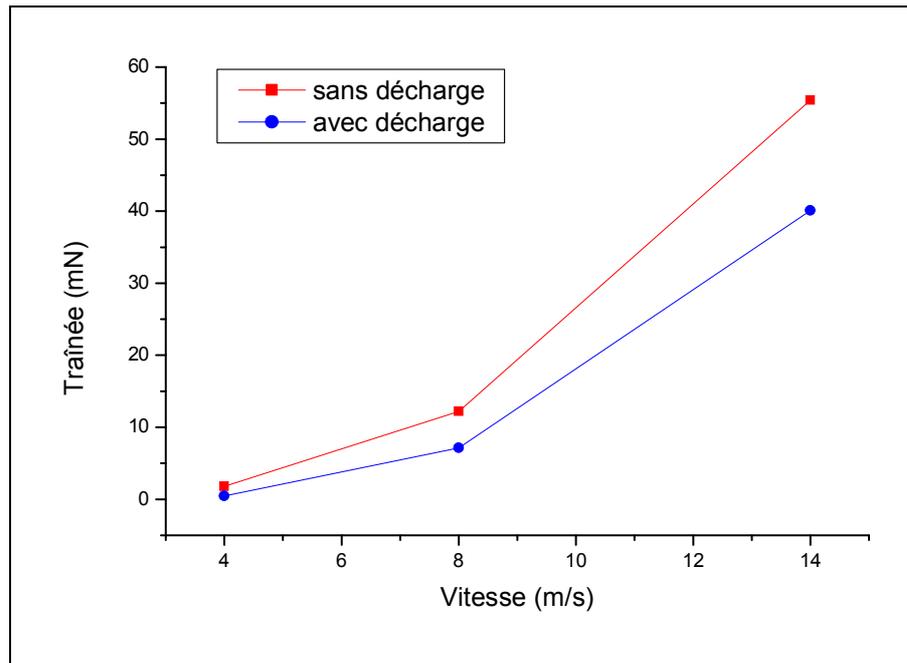


Figure 5.32 : Evolution de la trainée sur la plaque plane d'incidence nulle, 40 mm en aval du bord d'attaque, en fonction de la vitesse de l'écoulement sans et avec décharge

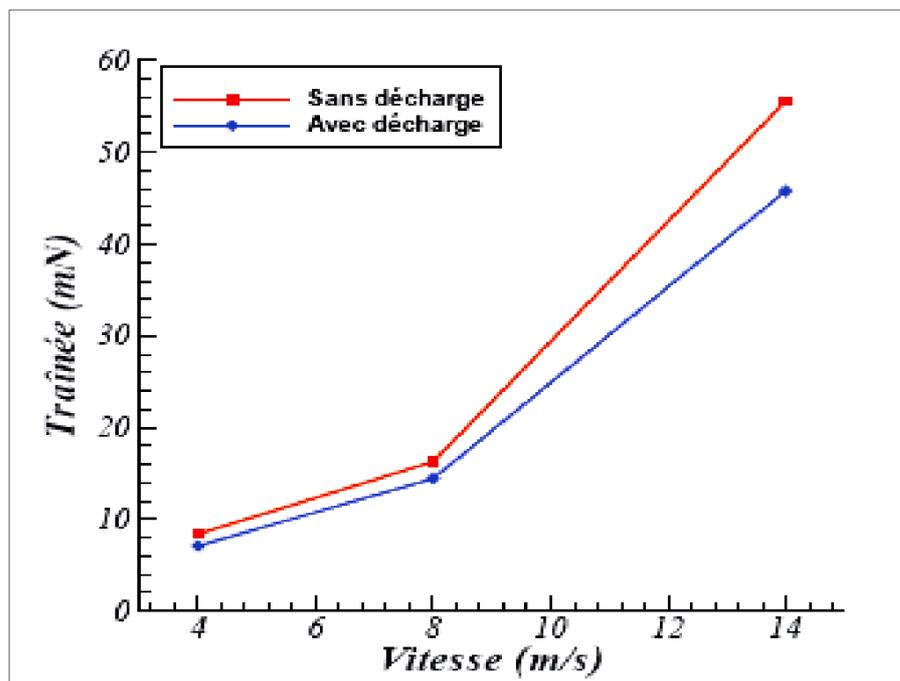


Figure 5.33 : Evolution expérimentale de la trainée sur la plaque plane d'incidence nulle, 40 mm en aval du bord d'attaque, en fonction de la vitesse de l'écoulement sans et avec décharge (courant de 0,8 mA/m)

5.3.4. L'effet de la turbulence :

On a effectuée les mêmes conditions de turbulence sur cette 2ème configuration, à des vitesses d'entrée de 35 m/s jusqu'à 50m/s. avec une tension de 50kv.

Les figures 5.34, 5.35 et 5.36 montre les profile de vitesse pour les cas 35m/s, 45m/s et 50m/s, respectivement.

On voit une très petite différence entre le profile de vitesse sans et avec décharge électrique, mais pas grande.

On peu dire que la vitesse de l'écoulement est très forte devant la vitesse du vent ionique.

On peu remarqué dans ces figures, quand on augmente la vitesse de l'écoulement extérieure, le profile de vitesse avec décharge augmente aussi, ces tout a fait le contraire dans le cas laminaire.

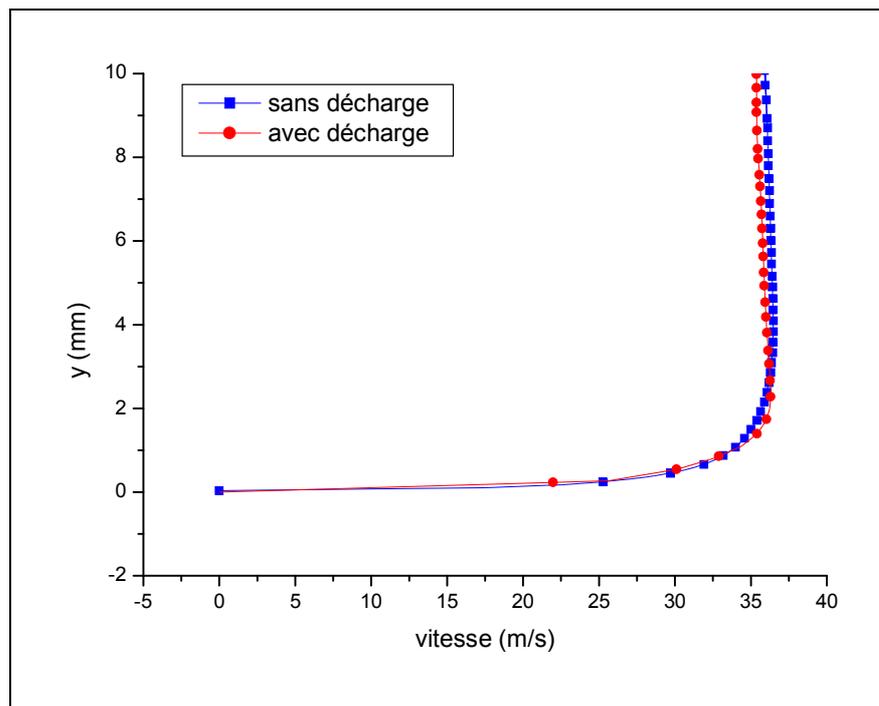


Figure 5.34 : Profil de vitesse a $U_0 = 35$ m/s sans et avec décharge

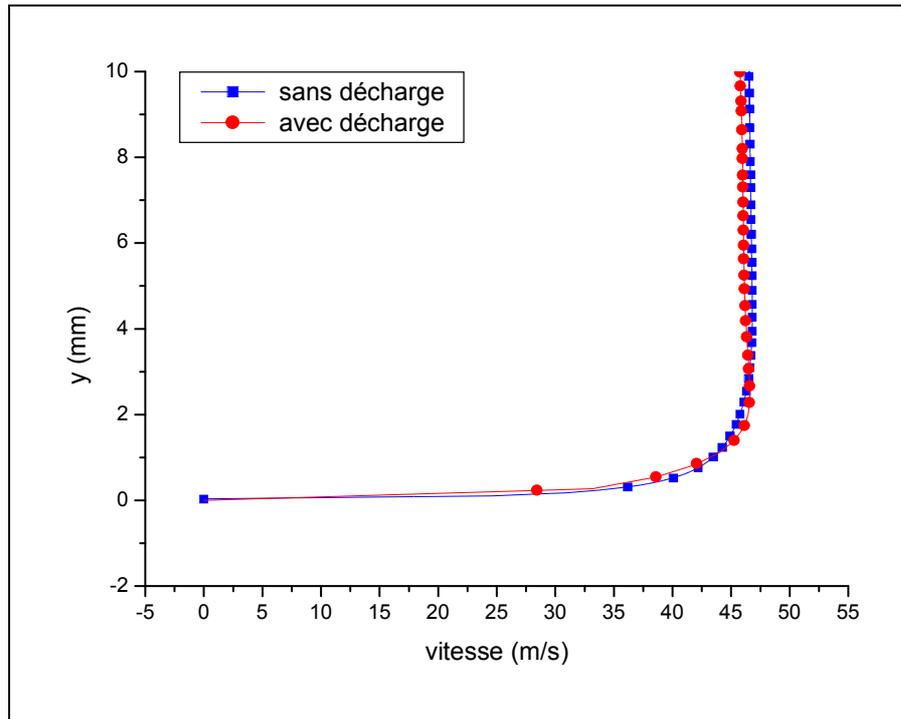


Figure 5.35 : Profil de vitesse a $U_0 = 45 \text{ m/s}$ sans et avec décharge

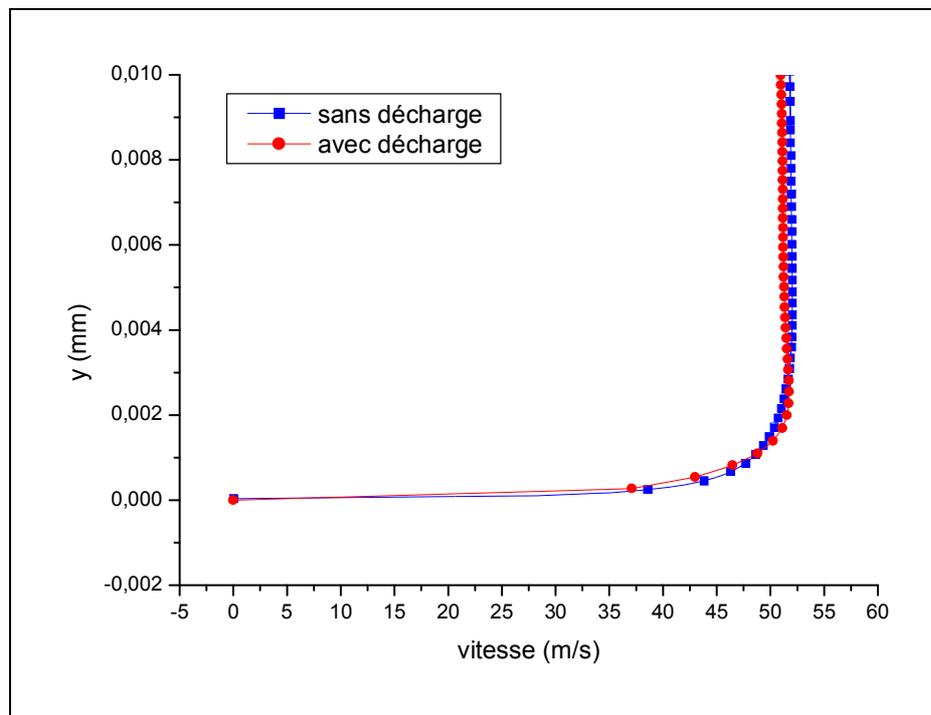


Figure 5.36 : Profil de vitesse a $U_0 = 50 \text{ m/s}$ sans et avec décharge

5.4. Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté les résultats concernant l'effet de la décharge dans un écoulement subsonique, pour les deux régimes d'écoulement laminaire et turbulent, on a utilisée deux type de décharge, couronne fil –fil et surfacique en bande, pour mieux étudie l'écoulement sur le profil en bord d'attaque jusqu'au bord de fuite.

La résolution sous fluente nous a permet de mieux voire l'influence de la décharge électrique et le comportement de l'écoulement en présence de plasma.

CONCLUSION

Dans le contexte industriel actuel, la réduction des coûts financiers et énergétiques est un objectif essentiel des programmes de recherche dans les industries des transports. L'optimisation de l'aérodynamique et son contrôle s'inscrivent dans cette optique. De nombreuses méthodes d'actions sur des écoulements ont été développées, notamment l'utilisation de plasmas non-thermiques surfaciques. L'étude menée durant ce projet, présentée dans ce mémoire, consiste à étudier des actionneurs plasmas, nommés communément actionneurs électrohydrodynamiques, pour modifier des écoulements subsoniques.

L'actionneur plasma consiste à générer un plasma froid à la surface d'un obstacle pour y modifier les caractéristiques d'un écoulement. La décharge est donc établie dans l'air en appliquant une haute tension entre deux électrodes placées sur la paroi de l'obstacle. Sous l'effet des forces coulombiennes, un écoulement apparaît tangentiellement à la paroi ; c'est le « vent ionique ». L'idée est donc d'employer le vent ionique comme dispositif de contrôle.

Notre travail a donc consisté, dans un premier temps, à étudier deux types de décharges électriques : la décharge couronne fil-fil où les deux électrodes filaires placées dans des rainures sur une plaque, alimentées par une tension de 40KV aux bords. Et la décharge à électrodes en bande, alimentées par une tension continue à été étudiée. Une différence de potentiel entre deux électrodes placées de part et d'autre du bord d'une plaque a été appliquée. Le plasma contourne ce bord et reste stable et d'aspect homogène pour une tension de l'ordre de + 40 kV.

Sur une plaque plane, l'actionneur en band de faible puissance et induit une vitesse faible par rapport à l'écoulement principal permet d'agir sur la couche limite en excitant les instabilités et en provoquant la transition laminaire-turbulente. Ceci a été confirmé par l'analyse des résultats sur une plaque plane (jusqu'à 7.5° et $Re = 187 \times 10^3$), où la séparation complète des écoulements est retardée voire empêchée par un actionneur placé en bord d'attaque. Puis dans un second temps, il s'agissait de valider ses possibilités.

Les équations régissant les phénomènes électrofluidodynamiques sont composés des équations classiques de la mécanique des fluides et d'électrostatique. Une stratégie de couplage d'un module pour la génération de plasma et d'un autre pour l'effet sur l'aérodynamique a été validée.

La simulation numérique est effectuée à l'aide du logiciel FLUENT dans sa version 6.3. Il permet la résolution des équations de la mécanique des fluides avec la prise en compte des forces électriques. Il est possible de définir dans FLUENT des fonctions et des scalaires qui sont ajoutés par un module de calcul, programmé avec le langage C.

Bien que les résultats numériques dépendent de paramètre α , on a observé un bon accord entre les résultats numériques et expérimentale, qui font l'objet de dernier chapitre. En l'absence de décharge, le profil de vitesse obtenue est caractéristique de celui d'une couche limite laminaire et en turbulent. En présence d'une décharge, l'écoulement subit une accélération dans la zone pariétale entre les électrodes, la décharge induit une réduction de l'épaisseur de la couche limite de 60% pour un écoulement de 5m/s et une réduction de traînée de 16.3 % au bord de fuite.

Pour la deuxième configuration, les résultats montrent que l'actionneur permettait de réduire les bulbes et les décollements autour de la plaque pour des incidences jusqu'à $7,5^\circ$ et des vitesses jusqu'à 14 m/s ($Re = 187 \times 10^3$), et réduire la traînée de 27,2 % pour une vitesse de 14 m/s.

Compte tenu de ce qui a été mis en évidence dans ce travail, il serait également très intéressant et utile de réfléchir à des configurations de décharges de surface susceptibles d'augmenter la force EHD. Par exemple configuration à plusieurs électrodes où l'on sépare la production du plasma de l'extraction d'ions, signaux de tension pulsés, également pour séparer production du plasma et extraction d'ions, systèmes ou des décharges en série permettent d'exercer un transfert de quantité de mouvement sur une longueur plus importante le long de la surface.

APPENDICE

A. LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

D	: Coefficient de diffusivité d'ions	$(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
E	: Champ électrique	(V/m)
F	: Force électrique	(N)
G_k	: Terme de production de k	
h	: Limite de développement de la couche limite	(m)
J	: Densité de courant électrique	$(\text{A} \cdot \text{m}^{-2})$
k	: Énergie cinétique de turbulence	$(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2})$
\vec{R}	: Potentiel vectoriel	
P	: Pression	(Pa)
T	: Température	(k)
U_0	: Vitesse d'entrée	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
u_i	: Composantes de la vitesse dans les trois directions	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
\bar{u}_i	: Composantes de la vitesse moyenne	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
\bar{u}'_i	: Composantes de la vitesse de fluctuation	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
$\overline{u'_i u'_j}$: Tenseur de Reynolds	
V	: Tension	(V)
α	: Coefficient	
β	: Mobilité d'ions	(m^2 / Vs)
δ_l	: Épaisseur de la couche limite laminaire	(m)
δ_t	: Épaisseur de la couche limite turbulente	(m)
δ_{ij}	: Symbole de Kronecker	

ε_0	: Permittivité de l'air	
μ	: Viscosité dynamique	(Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)
μ_t	: Viscosité turbulente	(Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)
ρ	: Densité d'air	(Kg.m ⁻³)
ρ_c	: Densité de charge	(C.m ⁻³)
σ	: Conductivité électrique	(S.m ⁻¹)
τ	: Tenseur de contrainte	
ϕ	: Grandeur scalaire	
ψ	: Potentiel scalaire	

Abréviations :

CFD	: Computational Fluid Dynamics (Mécanique des Fluides Numérique)
DC	: Décharge Couronne
DBD	: Décharge a Barrière Diélectrique
EHD	: Electro-Hydro-Dynamique
MEMS	: Micros Electro-Mechanical Systems
ONERA	: Office National d'Etude et de Recherche Aérospatiales
OAUGDP	: One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma
PMMA	: Poly Methyl-Méth Acrylate
PVC	: polyvinyl chloride
UDF	: User Defined Function
UDS	: User Defined Scalar
UDM	: User Defined Memory

B. LES PARAMETRES DE CONTROLE DE LA 1^{ER} CONFIGURATION SOUS FLUENT

Le fichier « report summary » de fluent indiquant les paramètres de contrôle de la 1^{er} configuration pour les cas sans et avec décharge respectivement, en laminaire et en turbulent

a) Sans décharge

FLUENT
Version: 2d, pbns, lam (2d, pressure-based, laminar)
Release: 6.3.26
Title:

Models

Model	Settings
Space	2D
Time	Steady
Viscous	Laminar
Heat Transfer	Disabled
Solidification and Melting	Disabled
Species Transport	Disabled
Coupled Dispersed Phase	Disabled
Pollutants	Disabled
Pollutants	Disabled
Soot	Disabled

Boundary Conditions

Zones

name	id	type
fluid_potel	2	fluid
fluid_sup	3	fluid
limitpotentiel	4	interior
anode	5	wall
cathode	6	wall
profil	7	wall
norsud	8	wall
outlet	9	outflow
inlet	10	velocity-inlet
default-interior	12	interior
profil:001	1	wall
default-interior:011	11	interior

Boundary Conditions

fluid_potel Condition	Value
Material Name	air
Specify source terms?	no
Source Terms	()
Specify fixed values?	no
Fixed Values	()
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone (m/s)	0
Y-Velocity Of Zone (m/s)	0
Rotation speed (rad/s)	0
X-Origin of Rotation-Axis (cm)	0
Y-Origin of Rotation-Axis (cm)	0
Deactivated Thread	no
Porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	0
Relative Velocity Resistance Formulation?	yes
Direction-1 Viscous Resistance (1/m ²)	0
Direction-2 Viscous Resistance (1/m ²)	0
Choose alternative formulation for inertial resistance?	no
Direction-1 Inertial Resistance (1/m)	0
Direction-2 Inertial Resistance (1/m)	0
C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	1

fluid_sup

Condition	Value
Material Name	air
Specify source terms?	no
Source Terms	()
Specify fixed values?	no
Fixed Values	()
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone (m/s)	0
Y-Velocity Of Zone (m/s)	0
Rotation speed (rad/s)	0
X-Origin of Rotation-Axis (cm)	0
Y-Origin of Rotation-Axis (cm)	0
Deactivated Thread	no
Porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	0
Relative Velocity Resistance Formulation?	yes
Direction-1 Viscous Resistance (1/m ²)	0
Direction-2 Viscous Resistance (1/m ²)	0
Choose alternative formulation for inertial resistance?	no
Direction-1 Inertial Resistance (1/m)	0
Direction-2 Inertial Resistance (1/m)	0
C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	1

limitpotentiel

Condition Value

anode

Condition	Value
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Rotation Speed (rad/s)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (cm)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (cm)	0
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

cathode

Condition	Value
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Rotation Speed (rad/s)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (cm)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (cm)	0
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

profil

Condition	Value
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Rotation Speed (rad/s)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (cm)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (cm)	0

X-component of shear stress (pascal) 0
 Y-component of shear stress (pascal) 0
 Specularity Coefficient 0

norsud
 Condition Value

 Wall Motion 0
 Shear Boundary Condition 0
 Define wall motion relative to adjacent cell zone? yes
 Apply a rotational velocity to this wall? no
 Velocity Magnitude (m/s) 0
 X-Component of Wall Translation 1
 Y-Component of Wall Translation 0
 Define wall velocity components? no
 X-Component of Wall Translation (m/s) 0
 Y-Component of Wall Translation (m/s) 0
 Rotation Speed (rad/s) 0
 X-Position of Rotation-Axis Origin (cm) 0
 Y-Position of Rotation-Axis Origin (cm) 0
 X-component of shear stress (pascal) 0
 Y-component of shear stress (pascal) 0
 Specularity Coefficient 0

outlet

Condition Value

 Flow rate weighting 1

inlet

Condition Value

 Velocity Specification Method 2
 Reference Frame 0
 Velocity Magnitude (m/s) 5
 X-Velocity (m/s) 0
 Y-Velocity (m/s) 0
 X-Component of Flow Direction 1
 Y-Component of Flow Direction 0
 X-Component of Axis Direction 1
 Y-Component of Axis Direction 0
 Z-Component of Axis Direction 0
 X-Coordinate of Axis Origin (cm) 0
 Y-Coordinate of Axis Origin (cm) 0
 Z-Coordinate of Axis Origin (cm) 0
 Angular velocity (rad/s) 0
 is zone used in mixing-plane model? no

profil:001

Condition Value

 Wall Motion 0
 Shear Boundary Condition 0
 Define wall motion relative to adjacent cell zone? yes
 Apply a rotational velocity to this wall? no
 Velocity Magnitude (m/s) 0
 X-Component of Wall Translation 1
 Y-Component of Wall Translation 0

```

Define wall velocity components?          no
X-Component of Wall Translation (m/s)     0
Y-Component of Wall Translation (m/s)     0
Rotation Speed (rad/s)                   0
X-Position of Rotation-Axis Origin (cm)   0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (cm)   0
X-component of shear stress (pascal)      0
Y-component of shear stress (pascal)      0
Specularity Coefficient                    0

```

Solver Controls

Equations

```

Equation      Solved
-----

```

```

Flow          yes

```

Numerics

```

Numeric                               Enabled
-----

```

```

Absolute Velocity Formulation         yes

```

Relaxation

```

Variable      Relaxation Factor
-----

```

```

Pressure      0.30000001
Density       1
Body Forces   0.5
Momentum      0.1

```

Linear Solver

```

Solver      Termination   Residual Reduction
Variable    Type             Criterion          Tolerance
-----

```

```

Pressure    V-Cycle          0.1
X-Momentum  Flexible         0.1                0.7
Y-Momentum  Flexible         0.1                0.7

```

Pressure-Velocity Coupling

```

Parameter      Value
-----

```

```

Type           SIMPLEC
Skewness Correction  2

```

Discretization Scheme

```

Variable      Scheme
-----

```

```

Pressure      Standard
Momentum      Second Order Upwind

```

Solution Limits

```

Quantity                               Limit
-----

```

```

Minimum Absolute Pressure              1
Maximum Absolute Pressure              5e+10
Minimum Temperature                    1

```

Maximum Temperature 5000

Material Properties

Material: air (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	1.225
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1006.43
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	1.7894e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	k	constant	78.6
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0
Speed of Sound	m/s	none	#f

b) Avec décharge

FLUENT

Version: 2d, pbns, lam (2d, pressure-based, laminar)

Release: 6.3.26

Title:

Models

Model	Settings
Space	2D
Time	Steady
Viscous	Laminar
Heat Transfer	Disabled
Solidification and Melting	Disabled
Species Transport	Disabled
Coupled Dispersed Phase	Disabled
Pollutants	Disabled
Pollutants	Disabled
Soot	Disabled

Boundary Conditions

Zones name	id	type
fluid_potel	2	fluid
fluid_sup	3	fluid
limitpotentiel	4	interior
anode	5	wall
cathode	6	wall
profil	7	wall
norsud	8	wall
outlet	9	outflow
inlet	10	velocity-inlet
default-interior	12	interior
profil:001	1	wall
default-interior:011	11	interior

Boundary Conditions

```
fluid_potel
Condition
-----
Material Name                air
Specify source terms?       yes
Source Terms                  ((mass) (x-
momentum ((profile udf udf_source_fx) (inactive . #f) (constant . 0))) (y-
momentum ((profile udf udf_source_fy) (inactive . #f) (constant . 0)))
(uds-0 ((constant . 0) (inactive . #f) (profile ))))
Specify fixed values?       no
Fixed Values                  ((x-velocity
(inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (y-velocity (inactive . #f)
(constant . 0) (profile )) (uds-0 (inactive . #f) (constant . 0) (profile
)))
Motion Type                   0
X-Velocity Of Zone (m/s)     0
Y-Velocity Of Zone (m/s)     0
Rotation speed (rad/s)       0
X-Origin of Rotation-Axis (cm) 0
Y-Origin of Rotation-Axis (cm) 0
Deactivated Thread           no
Porous zone?                 no
X-Component of Direction-1 Vector 1
Y-Component of Direction-1 Vector 0
Relative Velocity Resistance Formulation? yes
Direction-1 Viscous Resistance (1/m2) 0
Direction-2 Viscous Resistance (1/m2) 0
Choose alternative formulation for inertial resistance? no
Direction-1 Inertial Resistance (1/m) 0
Direction-2 Inertial Resistance (1/m) 0
C0 Coefficient for Power-Law 0
C1 Coefficient for Power-Law 0
Porosity                     1
```

fluid_sup

```
Condition
-----
Material Name                air
Specify source terms?       no
Source Terms                  ()
Specify fixed values?       no
Fixed Values                  ()
Motion Type                   0
X-Velocity Of Zone (m/s)     0
Y-Velocity Of Zone (m/s)     0
Rotation speed (rad/s)       0
X-Origin of Rotation-Axis (cm) 0
Y-Origin of Rotation-Axis (cm) 0
Deactivated Thread           no
Porous zone?                 no
X-Component of Direction-1 Vector 1
Y-Component of Direction-1 Vector 0
Relative Velocity Resistance Formulation? yes
Direction-1 Viscous Resistance (1/m2) 0
Direction-2 Viscous Resistance (1/m2) 0
```

```

Choose alternative formulation for inertial resistance? no
Direction-1 Inertial Resistance (1/m) 0
Direction-2 Inertial Resistance (1/m) 0
C0 Coefficient for Power-Law 0
C1 Coefficient for Power-Law 0
Porosity 1
    
```

limitpotentiel

Condition Value

```

-----
anode
Condition Value
-----
Wall Motion 0
Shear Boundary Condition 0
Define wall motion relative to adjacent cell zone? yes
Apply a rotational velocity to this wall? no
Velocity Magnitude (m/s) 0
X-Component of Wall Translation 1
Y-Component of Wall Translation 0
Define wall velocity components? no
X-Component of Wall Translation (m/s) 0
Y-Component of Wall Translation (m/s) 0
(0)
(((constant . 30000) (profile )))
Rotation Speed (rad/s) 0
X-Position of Rotation-Axis Origin (cm) 0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (cm) 0
X-component of shear stress (pascal) 0
Y-component of shear stress (pascal) 0
Specularity Coefficient 0
    
```

cathode

```

Condition Value
-----
Wall Motion 0
Shear Boundary Condition 0
Define wall motion relative to adjacent cell zone? yes
Apply a rotational velocity to this wall? no
Velocity Magnitude (m/s) 0
X-Component of Wall Translation 1
Y-Component of Wall Translation 0
Define wall velocity components? no
X-Component of Wall Translation (m/s) 0
Y-Component of Wall Translation (m/s) 0
(0)
(((constant . -10000) (profile )))
Rotation Speed (rad/s) 0
X-Position of Rotation-Axis Origin (cm) 0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (cm) 0
X-component of shear stress (pascal) 0
Y-component of shear stress (pascal) 0
Specularity Coefficient 0
    
```

Solver Controls

```

-----
Equations
Equation Solved
    
```

```

-----
Flow                yes
User Scalar 0      yes

Numerics
Numeric                                Enabled
-----
Absolute Velocity Formulation  yes

Relaxation
Variable          Relaxation Factor
-----
Pressure          0.60000002
Density           1
Body Forces       0.5
Momentum          0.1
User Scalar 0     0.5

```

En turbulent

a) Sans décharge :

```

FLUENT
Version: 2d, pbns, ske (2d, pressure-based, standard k-epsilon)
Release: 6.3.26
Title:

```

Models

```

-----
Model                Settings
-----
Space                2D
Time                 Steady
Viscous              Standard k-epsilon turbulence model
Wall Treatment       Standard Wall Functions
Heat Transfer        Disabled
Solidification and Melting Disabled
Species Transport    Disabled
Coupled Dispersed Phase Disabled
Pollutants           Disabled
Pollutants           Disabled
Soot                 Disabled

```

Boundary Conditions

```

-----
Zones

name                id  type
-----
fluidsup            2  fluid
fluidpotel          3  fluid
inlet               4  velocity-inlet
outflow             5  outflow
nordsud             6  wall
profil              7  wall
cathode             8  wall
anode               9  wall
profil:001          10 wall
default-interior    12 interior
default-interior:001 1  interior
default-interior:011 11 interior

```

Boundary Conditions

fluidsup Condition	Value
Material Name	air
Specify source terms?	no
Source Terms	()
Specify fixed values?	no
Fixed Values	()
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone (m/s)	0
Y-Velocity Of Zone (m/s)	0
Rotation speed (rad/s)	0
X-Origin of Rotation-Axis (cm)	0
Y-Origin of Rotation-Axis (cm)	0
Deactivated Thread	no
Laminar zone?	no
Set Turbulent Viscosity to zero within laminar zone?	yes
Porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	0
Relative Velocity Resistance Formulation?	yes
Direction-1 Viscous Resistance (1/m ²)	0
Direction-2 Viscous Resistance (1/m ²)	0
Choose alternative formulation for inertial resistance?	no
Direction-1 Inertial Resistance (1/m)	0
Direction-2 Inertial Resistance (1/m)	0
C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	1

fluidpotel

Condition	Value
Material Name	air
Specify source terms?	no
Source Terms	()
Specify fixed values?	no
Fixed Values	()
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone (m/s)	0
Y-Velocity Of Zone (m/s)	0
Rotation speed (rad/s)	0
X-Origin of Rotation-Axis (cm)	0
Y-Origin of Rotation-Axis (cm)	0
Deactivated Thread	no
Laminar zone?	no
Set Turbulent Viscosity to zero within laminar zone?	yes
Porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	0
Relative Velocity Resistance Formulation?	yes
Direction-1 Viscous Resistance (1/m ²)	0
Direction-2 Viscous Resistance (1/m ²)	0
Choose alternative formulation for inertial resistance?	no
Direction-1 Inertial Resistance (1/m)	0
Direction-2 Inertial Resistance (1/m)	0
C0 Coefficient for Power-Law	0

C1 Coefficient for Power-Law 0
 Porosity 1

```

inlet
Condition                                     Value
-----
Velocity Specification Method                 2
Reference Frame                             0
Velocity Magnitude (m/s)                    35
X-Velocity (m/s)                            0
Y-Velocity (m/s)                            0
X-Component of Flow Direction               1
Y-Component of Flow Direction               0
X-Component of Axis Direction               1
Y-Component of Axis Direction               0
Z-Component of Axis Direction               0
X-Coordinate of Axis Origin (cm)            0
Y-Coordinate of Axis Origin (cm)            0
Z-Coordinate of Axis Origin (cm)            0
Angular velocity (rad/s)                    0
Turbulent Specification Method              0
Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)            1
Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)          1
Turbulent Intensity (%)                     0.1
Turbulent Length Scale (cm)                 1
Hydraulic Diameter (cm)                     1
Turbulent Viscosity Ratio                   10
is zone used in mixing-plane model?         no
    
```

```

outflow
Condition                                     Value
-----
Flow rate weighting                           1
    
```

```

nordsud
Condition                                     Value
-----
Wall Motion                                  0
Shear Boundary Condition                    0
Define wall motion relative to adjacent cell zone? yes
Apply a rotational velocity to this wall?   no
Velocity Magnitude (m/s)                   0
X-Component of Wall Translation              1
Y-Component of Wall Translation              0
Define wall velocity components?            no
X-Component of Wall Translation (m/s)        0
Y-Component of Wall Translation (m/s)        0
Wall Roughness Height (cm)                  0
Wall Roughness Constant                     0.5
Rotation Speed (rad/s)                      0
X-Position of Rotation-Axis Origin (cm)      0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (cm)      0
X-component of shear stress (pascal)         0
Y-component of shear stress (pascal)         0
Specularity Coefficient                      0
    
```

```

profil
Condition                                     Value
-----
Wall Motion                                  0
Shear Boundary Condition                    0
    
```

```

Define wall motion relative to adjacent cell zone?  yes
Apply a rotational velocity to this wall?          no
Velocity Magnitude (m/s)                          0
X-Component of Wall Translation                    1
Y-Component of Wall Translation                    0
Define wall velocity components?                   no
X-Component of Wall Translation (m/s)              0
Y-Component of Wall Translation (m/s)              0
Wall Roughness Height (cm)                         0
Wall Roughness Constant                           0.5
Rotation Speed (rad/s)                             0
X-Position of Rotation-Axis Origin (cm)            0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (cm)            0
X-component of shear stress (pascal)               0
Y-component of shear stress (pascal)               0
Specularity Coefficient                            0

```

cathode

```

Condition                                          Value
-----
Wall Motion                                       0
Shear Boundary Condition                         0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?  yes
Apply a rotational velocity to this wall?          no
Velocity Magnitude (m/s)                          0
X-Component of Wall Translation                    1
Y-Component of Wall Translation                    0
Define wall velocity components?                   no
X-Component of Wall Translation (m/s)              0
Y-Component of Wall Translation (m/s)              0
Wall Roughness Height (cm)                         0
Wall Roughness Constant                           0.5
Rotation Speed (rad/s)                             0
X-Position of Rotation-Axis Origin (cm)            0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (cm)            0
X-component of shear stress (pascal)               0
Y-component of shear stress (pascal)               0
Specularity Coefficient                            0

```

anode

```

Condition                                          Value
-----
Wall Motion                                       0
Shear Boundary Condition                         0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?  yes
Apply a rotational velocity to this wall?          no
Velocity Magnitude (m/s)                          0
X-Component of Wall Translation                    1
Y-Component of Wall Translation                    0
Define wall velocity components?                   no
X-Component of Wall Translation (m/s)              0
Y-Component of Wall Translation (m/s)              0
Wall Roughness Height (cm)                         0
Wall Roughness Constant                           0.5
Rotation Speed (rad/s)                             0
X-Position of Rotation-Axis Origin (cm)            0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (cm)            0
X-component of shear stress (pascal)               0
Y-component of shear stress (pascal)               0
Specularity Coefficient                            0

```

profil:001

Condition	Value
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (cm)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rad/s)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (cm)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (cm)	0
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

Solver Controls

Equations

Equation	Solved
Flow	yes
Turbulence	yes

Numerics

Numeric	Enabled
Absolute Velocity Formulation	yes

Relaxation

Variable	Relaxation Factor
Pressure	0.60000002
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.5
Turbulent Kinetic Energy	0.60000002
Turbulent Dissipation Rate	0.60000002
Turbulent Viscosity	0.5

Linear Solver

Solver	Termination	Residual Reduction		
Variable		Type	Criterion	Tolerance
Pressure		V-Cycle	0.1	
X-Momentum		Flexible	0.1	0.7
Y-Momentum		Flexible	0.1	0.7
Turbulent Kinetic Energy		Flexible	0.1	0.7
Turbulent Dissipation Rate		Flexible	0.1	0.7

Pressure-Velocity Coupling

Parameter	Value
Type	SIMPLEC
Skewness Correction	2

Discretization Scheme

Variable	Scheme
Pressure	Standard
Momentum	First Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	First Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	First Order Upwind

Quantity	Limit
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5e+10
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000

b) Avec décharge

FLUENT
 Version: 2d, pbns, ske (2d, pressure-based, standard k-epsilon)
 Release: 6.3.26
 Title:

Models

Model	Settings
Space	2D
Time	Steady
Viscous	Standard k-epsilon turbulence model
Wall Treatment	Standard Wall Functions
Heat Transfer	Disabled
Solidification and Melting	Disabled
Species Transport	Disabled
Coupled Dispersed Phase	Disabled
Pollutants	Disabled
Pollutants	Disabled
Soot	Disabled

Boundary Conditions

Zones name	id	type
fluid_potel	2	fluid
fluid_sup	3	fluid
limitpotentiel	4	interior
anode	5	wall
cathode	6	wall
profil	7	wall
norsud	8	wall
outlet	9	outflow
inlet	10	velocity-inlet
default-interior	12	interior

```

profil:001          1    wall
default-interior:011  11  interior

```

```

Boundary Conditions
fluid_potel

```

Condition	Value
Material Name	air
Specify source terms?	yes
Source Terms	((mass) (x-momentum ((profile udf udf_source_fx) (inactive . #f) (constant . 0))) (y-momentum ((profile udf udf_source_fy) (inactive . #f) (constant . 0))) (k (epsilon) (uds-0 ((constant . 0) (inactive . #f) (profile)))))
Specify fixed values?	no
Fixed Values	((x-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (y-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (uds-0 (inactive . #f) (constant . 0) (profile)))
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone (m/s)	0
Y-Velocity Of Zone (m/s)	0
Rotation speed (rad/s)	0
X-Origin of Rotation-Axis (cm)	0
Y-Origin of Rotation-Axis (cm)	0
Deactivated Thread	no
Laminar zone?	no
Set Turbulent Viscosity to zero within laminar zone?	yes
Porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	0
Relative Velocity Resistance Formulation?	yes
Direction-1 Viscous Resistance (1/m ²)	0
Direction-2 Viscous Resistance (1/m ²)	0
Choose alternative formulation for inertial resistance?	no
Direction-1 Inertial Resistance (1/m)	0
Direction-2 Inertial Resistance (1/m)	0
C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	1

Condition	Value
Material Name	air
Specify source terms?	no
Source Terms	()
Specify fixed values?	no
Fixed Values	()
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone (m/s)	0
Y-Velocity Of Zone (m/s)	0
Rotation speed (rad/s)	0
X-Origin of Rotation-Axis (cm)	0
Y-Origin of Rotation-Axis (cm)	0
Deactivated Thread	no
Laminar zone?	no
Set Turbulent Viscosity to zero within laminar zone?	yes
Porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1

Y-Component of Direction-1 Vector	0
Relative Velocity Resistance Formulation?	yes
Direction-1 Viscous Resistance (1/m ²)	0
Direction-2 Viscous Resistance (1/m ²)	0
Choose alternative formulation for inertial resistance?	no
Direction-1 Inertial Resistance (1/m)	0
Direction-2 Inertial Resistance (1/m)	0
C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	1

limitpotentiel
 Condition Value

 anode
 Condition Value

Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (cm)	0
Wall Roughness Constant	0.5
(0)	
((constant . 40000) (profile))	
Rotation Speed (rad/s)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (cm)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (cm)	0
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

cathode
 Condition Value

Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (cm)	0
Wall Roughness Constant	0.5
(0)	
((constant . -10000) (profile))	
Rotation Speed (rad/s)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (cm)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (cm)	0
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

Solver Controls

Equations

Equation	Solved
Flow	yes
Turbulence	yes
User Scalar 0	yes

Relaxation

Variable	Relaxation Factor
Pressure	0.60000002
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.5
Turbulent Kinetic Energy	0.60000002
Turbulent Dissipation Rate	0.60000002
Turbulent Viscosity	0.5
User Scalar 0	0.40000001

REFERENCES

1. http://fr.wikipedia.org/wiki/Physique_des_plasma
2. Parissi L., Etude d'un procédé de traitement d'air chargé en composés organiques volatiles par décharge moyenne fréquence avec barrière diélectrique : mécanismes mis en œuvre et recherche d'optimisation, Thèse de l'université de Paris VI, 1999.
3. Hollohan JR et Bell AT, 1974, "Techniques and applications of plasma chemistry", Wiley-Interscience, New York.
4. Paschen F, 1889, "Sur la différence de potentiel nécessaire à la formation d'arc électrique dans de l'air, de l'hydrogène et du gaz carbonique sous différentes pressions", Wied. Annales de physique, Vol. 37, pp. 69 – 96.
5. Delcroix J-L et Bers A, 1994, "Physiques des plasmas", CNRS éditions.
6. Velkoff H et Ketchman J, 1968, "Effect of an electrostatic field on boundary layer transition", AIAA Journal, Vol. 16, pp. 1381-1383.
7. Jen-Shih Chang, Phil A. Lawless and Toshiaki Yamamoto.,1991, "Corona Discharge Processes" IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 19, No. 6, Decembre, 1991
8. Raiser Y.P., Gas discharge physics, ed. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1991.
9. Goldman M. and Goldman A., Corona discharges, Gaseous electronics, Academic Press, New York, 1978.

10. Soetomo F, 1992, "The influence of High Voltage Discharge on Flat Plate Drag at Low Reynolds Number Air Flow", M.S. Thesis, Iowa State University.
11. Léger L, Moreau E et Touchard G, 2002, "Electrohydrodynamic airflow control along a flat plate by a DC surface corona discharge – Velocity profile and wall pressure measurements", Proc. 1st AIAA Flow Control Conference (St Louis, June 2002), AIAA Paper 2002-2833.
12. Eliasson B et Kogelschatz U, 1991, "Modeling and Application of Silent Discharge Plasmas", IEEE Trans. Plasma Sc., Vol. 19, No. 2, pp. 309–323.
13. Eliasson B et Kogelschatz U, 1988, "UV excimer radiation from dielectric barrier discharge", Appl. Phys B, Vol. 46, pp 299–303.
14. Kanazawa S, Kogoma M, Moriwaki T et Okazaki S, 1988, "Stable glow plasma at atmospheric pressure", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 21, 838 – 840.
15. Roth JR, 2001, "Industrial Plasma Engineering", Vol. 2, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia.
16. Okazaki S, Kogoma M, Uehara M et Kimura Y, 1993, "Appearance of stable glow discharge in air, argon, oxygen and nitrogen at atmospheric pressure using a 50 Hz source", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 26, pp. 889 – 892.
17. Massines F, Rabehi A, Decomps P, Gabri RB, Ségur P et Mayoux C, 1998, "Experimental and theoretical study of a glow discharge at atmospheric pressure controlled by dielectric barrier", J. Applied Physics 83, n° 6, pp. 2950 – 2957.
18. Roth J.R., Liu C. and Laroussi M., Experimental generation of a steady-state glow discharge at atmospheric pressure, Paper 5P21, 19th IEEE International Conference on Plasma Science, 1992.

19. Moreau E, Léger L et Touchard G, 2006, "Effect of a DC surface non-thermal plasma on a flat plate boundary layer for airflow velocity up to 25 m/s", J. of Electrostatics, Vol. 64, pp. 215-225.
20. Roth JR, Sherman DM et Wilkinson SP, 1998, "Boundary layer flow control with a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma", AIAA Paper n° 98-0328, Reno, NV.
21. Eliasson B and Egli W, 1987, Helv. Phys. Acta. 60 N°2 241-47
22. Kogelschatz U, Eliasson B and Egli W, 1997, Invited paper ICPIG, Toulouse, France ; J. Phys. IV, Colloque C4, France C4 47-66
23. Eliasson B and Kogelschatz U, 1991, IEEE Transactions on Plasma Science 19 309-23
24. Jukes TN, Choi KS, Johnson GA et Scott SJ, 2004, "Turbulent boundary layer control for drag reduction using surface plasma", Proc. of the 2nd AIAA Flow Control Conference, Portland, OR, AIAA Paper 2004-2216.
25. Jukes TN, Choi KS, Johnson GA et Scott SJ, 2006, "Turbulent drag reduction by surface plasma through spanwise flow oscillation", Proc. of the 3rd AIAA Flow Control Conference, San Francisco, CA, AIAA Paper 2006-3693.
26. Shcherbakov YV, Isanov NS, Baryshev ND, Frolovskij VS et Syssoev VS, 2000, "Drag reduction by AC streamer corona discharges along a wing like profile plate", Proc. of the 38th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, AIAA Paper 2000-2670.
27. Roth JR, 2003, "Aerodynamic flow acceleration using paraelectric and peristaltic electrohydrodynamic effects of a one atmosphere uniform glow discharge plasma", Physics of Plasmas, Vol. 10, No. 5, pp. 2117-2126.

28. Comolet R, 1994, "Mécanique expérimentale des fluides, Dynamiques des fluides réels, turbomachines", 4ème édition, MASSON, Paris.
29. Robinson M. Movement of air in the electric wind of the corona discharge, AIEE Transaction, vol. 80, pp. 143-150, 1961
30. Roth JR, 1998, "Electrohydrodynamically induced airflow in a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma", 25th IEEE International conference on plasma science, Raleigh, North Carolina.
31. Goldman M., Goldman A. and Sigmond R.S., The corona discharge, its properties and specific uses, Pure and Appl. Chem., vol. 57(9), pp. 1353-1362, 1985.
32. Moreau E., Application des plasmas non thermiques au contrôle des écoulements, Mémoire d'habilitation à la recherche, 2004.
33. Léger L, 2003, "Contrôle actif d'un écoulement d'air par un plasma froid surfacique", Thèse Univ. Poitiers, France.
34. Léger L, Moreau E, Artana G et Touchard G, 2000, "Modification de l'écoulement d'air autour d'une plaque plane par une décharge couronne", Proc. Colloque de la Société Française d'Electrostatique (Montpellier, France, juillet 2000), pp. 97 – 101.
35. Labergue A, 2005, "Étude de décharges électriques dans l'air pour le développement d'actionneurs plasmas – Application au contrôle de décollements d'écoulements", Thèse Univ. Poitiers.
36. Labergue A, Moreau E et Touchard G, 2005, "A parametric study of surface corona discharge along an insulating flat plate at atmospheric pressure", Proc. Annual Report CEIDP, pp. 490 – 494, Nashville, USA.

37. Léger L, Moreau E, Artana G et Touchard G, 2001, "Influence of a DC corona discharge on the airflow along an inclined flat plate", *Journal of Electrostatics*, Vol. 50 – 51, pp. 300 –306.
38. Louste C, Moreau E et Touchard G, 2003, "Influence of an insulating flat plate on a DC surface corona discharge at various air relative humidity", *Proc .Electrostatics 2003 (23–27mars 2003)*, Edimbourg, Scotland.
39. Roth JR, Sherman DM et Wilkinson SP, 2000, "Electrohydrodynamic flow control with a glow discharge surface plasma", *AIAA Journal*, Vol. 38, pp. 1172–9.
40. Masuda S et Washizu M, 1979, "Ionic charging of very high resistivity spherical particle", *Journal of Electrostatics*, Vol. 6, pp. 57 – 67.
41. Corke TC et Matlis E, 2000, "Phased plasma arrays for unsteady flow control", *Proc. of 38th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, AIAA Paper 2000-2323*.
42. Enloe CL, McLaughlin TE, Van Dyken RD, Kachner KD, Jumper EJ et Corke TC, 2003, "Mechanisms and responses of a single dielectric barrier plasma", *AIAA Paper 2003-1021*.
43. Pons J, Moreau E et Touchard G, 2004, "Electrical and aerodynamic characteristics of atmospheric pressure surface barrier discharges in ambient air", *Proc. of the ISNTPT – 4*.
44. Forte M, 2004, "Étude expérimentale d'un actionneur plasma pour le contrôle actif d'un écoulement", *Rapport de DEA, Univ. de Poitiers, France*.
45. Corke TC, Jumper EJ, Post ML, Orlov DM et McLaughlin TE, 2002, "Application of weakly ionised plasmas as wing flow control devices", *AIAA Paper 2002-350*.
46. Pons J, Moreau E et Touchard G, 2005, "Asymmetric surface dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure: electrical properties and induced airflow characteristics", *J.Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 38, pp. 3635 – 3642.

47. Leonov SB, Yarantsev DA, Gromov VG et Kuriachy AP, 2005, "Mechanisms of flow control by near surface electrical discharge generation", Proc. of the 43th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, AIAA Paper 2005-780.
48. Etude et caractérisation de plasmas destinés au contrôle actif d'écoulements gazeux subsoniques de Binjie DONG ; Laboratoire Groupe de Recherches sur l'Énergétique des Milieux Ionisés ; université d'Orléans 2008.
49. H. Schlichting, Boundary Layer Theory, Mc Graw Hill, New York, 1968.
50. D.Semmar, J.M.Bauchire, D.Hong et N.Ait Messaoudene, Theoretical study based on the numerical simulation of the steady state behavior of a corona discharge in pure air, 2008.
51. Pierre MAGNIER, Étude expérimentale du contrôle d'écoulements aérodynamiques subsoniques par action de plasmas froids surfaciques à pression atmosphérique, 2007.
52. Hefner JN, 1988, "Dragging down fuel cost", Aerospace America, Vol. 26.