



**HAL**  
open science

# Écoulement électro-aérodynamique d'un aérosol de gouttelettes d'eau dans un réacteur de type pointe-plaque en vue de la récupération de composés chimiques

Étienne Defoort

► **To cite this version:**

Étienne Defoort. Écoulement électro-aérodynamique d'un aérosol de gouttelettes d'eau dans un réacteur de type pointe-plaque en vue de la récupération de composés chimiques. Energie électrique. Université de Poitiers, 2020. Français. NNT : 2020POIT2278 . tel-03214936

**HAL Id: tel-03214936**

**<https://theses.hal.science/tel-03214936>**

Submitted on 3 May 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THESE

Rqwt"nøqdvqpvkqp"fw" I tc fg" fg

FQEVGWT"FG"NøWPKXGTUKVG"FG"RQKVKG TU

(Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées)  
(Diplôme National - Arrêté du 25 mai 2016)

Ecole Doctorale : Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique et Énergétique  
SIMME (Poitiers)

Secteur de Recherche : Génie Électrique

Présentée par :

Etienne DEFOORT

\*\*\*\*\*

**ÉCOULEMENT ÉLECTRO-C ! TQF [ PCOKSWG"FOWP"C ! TQUQN"FG"  
IQWVVGNGVVGU"FOGCW"DANS UN RÉACTEUR DE TYPE POINTE-PLAQUE EN  
VUE DE LA RÉCUPÉRATION DE COMPOSÉS CHIMIQUES**

\*\*\*\*\*

Directeur·rice·s de Thèse : Éric MOREAU et Catherine BATIOU-DUPEYRAT

\*\*\*\*\*

Soutenue le 8 Décembre 2020 devant la Eq o o kuukqp"foGzc o gp

\*\*\*\*\*

## JURY

<b>Emmanuel ODIC</b>	Professeur, GeePs, Centrale-Supélec	Rapporteur
<b>Antoine ROUSSEAU</b>	Directeur de Recherche au CNRS, LPP, École Polytechnique	Rapporteur
<b>Éric ROBERT</b>	Directeur de Recherche au CNRS, GREMI, Université døQtn²cpu	Examineur
<b>Nicolas BENARD</b>	Maître de Conférences, PPRIME, Université de Poitiers	Examineur
<b>Catherine BATIOU-DUPEYRAT</b>	Professeure, IC2MP, Université de Poitiers	Examineur
<b>Éric MOREAU</b>	Professeur, PPRIME, Université de Poitiers	Examineur





**Titre:** Écoulement électro-dynamique d'un aérosol de gouttelettes d'eau dans un réacteur de type pointe-plaque en vue de la récupération de composés chimiques.

**Mots clés:** Décharge couronne, Décharge à barrière diélectrique (DBD), Vent ionique, Précipitation électrostatique, Images velocimétrie (PIV), Mist d'eau.

**Résumé:** Les décharges à couronne et à barrière diélectrique (DBD) en air à pression atmosphérique sont souvent utilisées en chimie car elles ont la capacité de produire des réactions chimiques hors-équilibre. Dans certaines conditions, elles peuvent générer un vent ionique. Dans cette thèse, l'effet d'injection d'un brouillard de gouttelettes d'eau dans de telles plasmas est étudié et appliqué pour la capture in situ d'espèces chimiques volatiles. L'objectif est d'étudier le mouvement de l'aérosol induit par la décharge et sa précipitation sur la paroi d'un réacteur de type pointe-plaque, au moyen d'un dispositif d'images velocimétrie (PIV) à haute fréquence (20 kHz). Premièrement, l'accélération de l'air par le phénomène de vent ionique est décrite, ce flux présentant des propriétés qui dépendent de la fréquence, de l'amplitude et de la forme d'onde du signal électrique. Deuxièmement, l'impact du brouillard de gouttelettes d'eau sur la décharge et le flux d'aérosol dans l'écart entre les électrodes sont analysés. Nous avons démontré que le déplacement des particules était majoritairement dû au vent ionique, mais que la précipitation électrostatique n'était pas négligeable, en particulier près de la plaque et dans les régions éloignées de l'axe du jet. Enfin, la quantité d'eau rassemblée dans différents dispositifs de décharge est évaluée. Appliquer le processus à la chimie n'a pas réussi car la décharge était instable dans un réacteur fermé en raison du film d'eau qui se forme sur la paroi du réacteur.

**Title:** Electro-aerodynamic flow of a water droplets aerosol in a point-to-plate reactor for chemicals compounds gathering.

**Keywords:** Corona discharge, Dielectric barrier discharge, Ionic wind, Electrostatic precipitation, Particles images velocimetry (PIV), Water mist.

**Abstract:** DC corona discharges and dielectric barrier discharges (DBD) in air at atmospheric pressure are often used in chemistry due to their capacity to produce non-equilibrium chemical reactions. In some conditions, they can generate an ionic wind. In this thesis, the effect of injecting a mist of water droplets into such plasmas is studied and applied for in situ volatile chemical species gathering. The objective is to study the motion of the aerosol induced by the discharge and its precipitation on the plate wall of a point-to-plate reactor, by means of a Particles Image Velocimetry (PIV) device at high frequency (20 kHz). First, the acceleration of air by the ionic wind phenomenon is described, this flow exhibiting properties that strongly depend on the electrical signal supplying the discharge (amplitude, frequency and waveform). Secondly, the impact of the water droplets mist on the discharge and the mist flow in the gap between electrodes are analyzed. We demonstrated that the particle movement was mainly due to ionic wind, but that the electrostatic precipitation phenomenon was not negligible, especially close to the plate and in the area far away from the jet axis. Lastly, the amount of water gathered in different discharge setups is evaluated. Applying the process to chemistry did not succeed because the discharge was unstable in a closed reactor due to the water film that takes place on the wall of the reactor.



# REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mes rapporteurs de ce manuscrit, Monsieur Eric ROUSSEAU et Emmanuel ODIC, puis Messieurs Eric ROBERT et Olivier VIGNON pour leurs remarques et leurs conseils avisés sur mes travaux et de leur implication malgré le contexte sanitaire de cette période.

Je remercie tout particulièrement mes directeur·rice·s de thèse, Monsieur Éric MOREAU et Madame Catherine BATIOU-DUPEYRAT. A Éric, pour tes conseils et ta bienveillance, pour m'avoir confié ta confiance pour ce projet. A Catherine, pour ton aide et ta confiance, pour m'avoir permis de mener à bien ce projet par ma thèse.

Je tiens également à remercier mes collègues de laboratoire, en particulier Patrick et Romain pour leur aide précieuse durant les expérimentations. Au même titre, je remercie Christian, Laurent, Richard et Ludovic pour leur implication dans la conception des réacteurs. Je remercie également Pierre-François et Francis pour avoir permis de mener à bien ce projet.

Je souhaite remercier mes camarades doctorants et ex-doctorants pour le climat humain et les échanges animés et constructifs que nous avons eu sur nos sujets respectifs. A tous les autres : Gwenaél, Yann, Paul, Arthur, Johan, Clément, Melissa, Gad, Michelle, Hervé, Fatma, Pierre, Agathe, Nishant et Larbi, pour leur convivialité et le soutien moral apporté pendant ces trois (quatre) années.

Je remercie enfin ma famille, en particulier mes parents, et mes amis, à commencer par mes frères et sœurs pour leur soutien et leurs encouragements dans les moments où j'en avais besoin.

# TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	5
TABLE DES MATIERES	6
LISTE DES FIGURES	8
1. INTRODUCTION	13
2. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	15
2.1 Les décharges électriques dans les gaz à pression atmosphérique	15
2.1.1 Origine et description du phénomène	15
2.1.2 Classifications des décharges	16
2.1.3 Applications directes	18
2.2 Les écoulements EHD	19
2.2.1 Mise en mouvement de fluide par champ électrique	19
2.2.2 Le vent ionique	20
2.2.3 Applications	21
2.3 La précipitation électrostatique	23
2.3.1 Bilan des forces sur une particule sphérique dans un précipitateur électrostatique	24
2.3.2 Mécanisme de charge des particules	25
2.3.3 Propriété des aérosols et granulométrie	27
2.3.4 Application et technologie de précipitateur	28
2.4 Conclusion	30
3 ETUDE DU VENT IONIQUE	31
3.1 Métrologie et instrumentation	31
3.1.1 Configurations étudiées	31
3.1.2 Installation électrique	33
3.1.3 Installation optique	33
3.1.4 Logiciel et post-traitement	34
3.2 Caractérisation électrique du système	34
3.2.1 Décharge couronne continue	34
3.2.2 Décharge à Barrière Diélectrique	37
3.3 Décharge couronne continue	41
3.3.1 Vitesse moyenne	41
3.3.2 Vitesse instantanée et régime instationnaire	44
3.4 Décharge à Barrière Diélectrique	48
3.4.1 Vitesse moyenne	48
3.4.2 Vitesse instantanée	50
3.4.3 Moyenne de phase	52
3.4.7 Analyse Spatio-temporelle	60
3.5 $\int \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_r \, ds$	62
3.5.1 Ecoulement moyen	62
3.5.2 Moyenne de phase	66

3.6	Conclusion sur le vent ionique	70
4	Caractérisation du brouillard de gouttelettes	71
4.1	Caractérisation du brouillard de gouttelettes	71
4.1.2	Granulométrie et concentration	71
4.1.3	Granulométrie et concentration	73
4.2	Impact sur les régimes de décharges	74
4.2.1	Impact sur les régimes de décharges	74
4.2.2	Caractéristiques courant tension	78
4.2.3	Puissance absorbée	79
4.3	Décharge couronne continue	81
4.3.1	Vitesse moyenne	81
4.3.2	Vitesse instantanée	84
4.4	Décharge à barrière diélectrique	89
4.4.1	Vitesse moyenne et fluctuante	89
4.4.2	Moyenne de phase	92
4.5	Analyse Spatio-temporelle	98
4.6	Écoulement moyen	100
4.6.1	Écoulement moyen	100
4.6.2	Moyenne de phase	100
4.7	Précipitation électrostatique	106
4.7.1	Signaux de vitesse en dehors du jet principal	107
4.7.2	Essai de Précipitation	108
4.8	Conclusion sur la dynamique du brouillard	110
5	CONCLUSION GENERALE	113
5.1	Cahier des charges initial	113
5.2	Première version du réacteur	114
5.2.1	Caractéristiques du réacteur	114
5.2.2	Essai préliminaire de collecte	116
5.3	Seconde version du réacteur	117
5.3.1	Caractéristiques du réacteur	117
5.3.2	Problèmes rencontrés et perspectives	118
5.4	Conclusion	120
6	CONCLUSION GENERALE	122
7	REFERENCES	126
	ANNEXE I : MESURE DU COURANT MOYEN	130
	Méthodes de mesures	130
	ANNEXE II : BILAN DES FORCES SUR LES PARTICULES	131
		132

# LISTE DES FIGURES

Figure 1. Caractéristiques courant-tension avec régimes de décharge intermédiaires pour des décharges positives continues symétriques (a) [2] et couronnes (b) [6]. ..... 17

Figure 2. Décharge couronne avec un gap de 25 mm pour différentes tensions positives appliquées. (a) Courant instantané. (b) Photographie iCCD. Issue de [27]. ..... 21

Figure 3. Caractéristiques courant-tension pour différentes tensions positives appliquées, positive à gauche, négative à droite. Issue de [27]. ..... 22

Figure 4. Caractéristiques courant-tension pour différentes tensions positives appliquées. Issue de [46]. ..... 23

Figure 5. Classification des aérosols, issue de [59]. ..... 28

Figure 6. Classification des principales géométries de précipitateur électrostatique ..... 29

Figure 7. Schéma du réacteur pointe-plan, la paroi diélectrique étant amovible et le gap réglable. Le support ..... 32

Figure 8. Caractéristiques courant-tension pour différentes tensions positives appliquées. Issue de [46]. ..... 33

Figure 9. Caractéristiques courant-tension de décharge couronne dans le réacteur pour les deux polarités et un gap de 15 mm (a) et en positif pour différents gaps (b). ..... 35

Figure 10. Courant en fonction du temps pour une décharge couronne à différentes valeurs de tension positive (a) et négative (b). ..... 36

Figure 11. Puissance moyenne consommée par une décharge couronne continue en fonction de la tension. ... 37

Figure 12. Caractéristiques courant-tension pour une décharge couronne continue en fonction de la tension et (c) représentent ..... 38

Figure 13. Courant en fonction de la tension pour une décharge couronne continue en fonction de la tension et (c) représentent ..... 39

Figure 14. Puissance moyenne consommée par une DBD en fonction de la tension pour différentes fréquences ..... 39

Figure 15. Puissance moyenne consommée par une DBD en fonction de la fréquence pour différentes tensions ..... 40

Figure 16. Caractéristiques courant-tension pour une décharge couronne continue en fonction de la tension et (c) représentent ..... 42

Figure 17. Caractéristiques courant-tension pour une décharge couronne continue en fonction de la tension et (c) représentent ..... 43

Figure 18. Profils de vitesse moyenne transversaux (y) en  $x = 7,5$  mm pour différentes tensions (a), et pour une tension de 8 kV à différentes distances de la pointe (b). ..... 43

Figure 19. Champs de vitesse instantanée pour une décharge couronne continue à + 6 kV (a) et - 6 kV (b), et ..... 44

Figure 20. Tension et courant de décharge à la mise sous tension continue à 6 kV du réacteur. .... 46

Figure 21. Cartes spatio-temporelles de la tension et du courant de décharge à la mise sous tension continue à 6 kV. .... 47

Figure 23. Champs de vitesse à 12 kV (b), et une fréquence de 200 Hz (c), 500 Hz (a et b) et 1000 Hz (d)..... 48

à différentes tensions (a) et à V = 12 kV pour différentes fréquences (b). ..... 49

Figure 25. Profils de vitesse moyenne verticaux (y) en x = 5 mm pour une DBD à 500 Hz pour différentes tensions (a) et à 12 kV pour différentes fréquences (b)..... 50

à tension sinus à 12 kV (a) et 14 kV (b, c et d), et une fréquence de 50 Hz (c), 500 Hz (a et b) et 2000 Hz (d). La vitesse moyenne est représentée en pointillés rouges. .... 51

appliqué, en rouge. Les lignes pointillées vertes correspondent aux instants choisis pour les champs de vitesse de la Figure 28. .... 53

lignes sombres marquent les seuils de 3 m/s et 3,5 m/s..... 54

(a) et 7,5 (b) mm. Les lignes pointillées vertes correspondent aux instants choisis pour les champs de vitesse de la Figure 28. .... 55

lignes sombres marquent les seuils de 3 m/s et 3,5 m/s..... 56

(a) et 7,5 (b) mm. Les lignes pointillées vertes correspondent aux instants choisis pour les champs de vitesse de la Figure 30. .... 57

Les lignes sombres marquent les seuils de 3,5 m/s et 4,6 m/s..... 58

(a) et 7,5 (b) mm. Les lignes pointillées vertes correspondent aux instants choisis pour les champs de vitesse de la Figure 32. .... 59

Figure 34. Cartes spatio-temporelles de la vitesse moyenne pour une DBD à 14 kV et 500 Hz avec différentes formes d'onde à différentes fréquences. Les lignes tirets larges séparent les périodes, les lignes pointillées fines marquent le passage de la polarité négative à positive..... 61

à 12 kV, pour différentes fréquences (a) et à 12 kV pour différentes fréquences (b). ..... 63

Figure 36. Profils de vitesse moyenne pour une DBD à 14 kV et 500 Hz avec différentes formes d'onde horizontaux en y = 0 (a) et verticaux en x = 5 mm (b), et évolution de la vitesse moyenne du jet produit par la même décharge en fonction de la fréquence (c)..... 63

Figure 37. Signaux de vitesse instantanée en x = 5 mm et y = 0 au cours du temps pour une DBD à 14kV à différentes fréquences (a) et à 14 kV pour différentes fréquences (b)..... 65

pris en x = 1,5 mm et y = 0. .... 66

pris en x = 1,5 mm et y = 0. En bleu, le délai entre le début de la demi-période positive et le passage du front de la bouffée positive en x = 1,5 mm. .... 67



Figure 40. Cartes spatio-temporelles de la vitesse des électrons et des ions pour une décharge couronne continue négative à différentes valeurs de tension. 69

Figure 41. Courant instantané pour une décharge couronne continue négative à différentes valeurs de tension. 72

Figure 42. Courant instantané pour une DBD alternative à 12 kV à une fréquence de 200 ou 1000 Hz pour les électrons et les ions. 73

Figure 43. Courant instantané pour une DBD alternative sinus à 12 kV et 500 Hz (a). Sur (b), les composantes impulsionnelles du courant et le bruit sont filtrés. 74

Figure 44. Courant instantané pour une décharge couronne continue négative à différentes valeurs de tension. 75

Figure 45. Courant instantané pour une DBD alternative à 12 kV à une fréquence de 200 ou 1000 Hz pour les électrons et les ions. 77

Figure 46. Courant instantané pour une DBD alternative sinus à 12 kV et 500 Hz (a). Sur (b), les composantes impulsionnelles du courant et le bruit sont filtrés. 78

Figure 47. Caractéristiques courant-tension de décharge couronne en présence et en absence d'une rampe croissante de tension positive (a) et négative (b). 79

Figure 48. Puissance moyenne consommée par une DBD en fonction de la tension (a) et de la fréquence (b) en présence d'une rampe croissante de tension positive. 80

Figure 49. Puissance moyenne consommée par une DBD en fonction de la tension (a) et de la fréquence (b) en absence d'une rampe croissante de tension positive. 80

Figure 50. Champ de vitesse des électrons et des ions pour une décharge couronne continue négative à différentes tensions positives. 81

Figure 51. Champ de vitesse des électrons et des ions pour une décharge couronne continue négative à différentes tensions positives pour les deux types de particules. 82

Figure 52. Profils de vitesse moyenne transversaux (y) en x = 7,5 mm (a) et 14,75 mm (b) pour différentes tensions continues et pour les deux types de particules. 83

Figure 53. Champs de vitesse instantanée à t = 1 ms pour une décharge couronne continue à + 6 kV pour les électrons et les ions. La pointe est mise sous tension à t = 0. 84

Figure 54. Champs de vitesse instantanée pour une décharge couronne continue à + 6 kV pour les électrons et les ions. La pointe est mise sous tension à t = 0. 84

Figure 55. Cartes spatio-temporelles de la vitesse des électrons et des ions pour une décharge couronne continue négative à différentes valeurs de tension. 86

Figure 56. Courant instantané pour une décharge couronne continue négative à différentes valeurs de tension. 87

Figure 57. Courant instantané pour une DBD alternative à 12 kV à une fréquence de 200 ou 1000 Hz pour les électrons et les ions. 88

Figure 58. Courant instantané pour une DBD alternative sinus à 12 kV et 500 Hz (a). Sur (b), les composantes impulsionnelles du courant et le bruit sont filtrés. 89

Figure 59. Profils de vitesse moyenne horizontaux (a), en y = 0, et transversaux (b), en x = 7,5 mm, pour une DBD sinus à 12 kV, différentes fréquences et pour les deux types de particules. 90

Figure 60. Cartes spatio-temporelles de la vitesse pour une DBD sinus à 12 kV et différentes fréquences, et pour les deux types de particules.	91
Figure 61. Cartes spatio-temporelles de la vitesse pour une DBD sinus à 12 kV et différentes fréquences, pour les deux types de particules. Les lignes pointillées verticales correspondent aux instants choisis pour les champs de vitesse de la Figure 61.	93
Figure 62. Cartes spatio-temporelles de la vitesse pour une DBD sinus à 12 kV et différentes fréquences, pour les deux types de particules. Les lignes pointillées verticales correspondent aux instants choisis pour les champs de vitesse de la Figure 61.	94
Figure 63. Cartes spatio-temporelles de la vitesse pour une DBD sinus à 12 kV et différentes fréquences, pour les deux types de particules. Les lignes pointillées verticales correspondent aux instants choisis pour les champs de vitesse de la Figure 63.	95
Figure 64. Cartes spatio-temporelles de la vitesse pour une DBD sinus à 12 kV et différentes fréquences, pour les deux types de particules. Les lignes pointillées verticales correspondent aux instants choisis pour les champs de vitesse de la Figure 63.	96
Figure 65. Cartes spatio-temporelles de la vitesse pour une DBD sinus à 12 kV et différentes fréquences, pour les deux types de particules. Les lignes pointillées verticales correspondent aux instants choisis pour les champs de vitesse de la Figure 65.	97
Figure 66. Cartes spatio-temporelles de la vitesse pour une DBD sinus à 12 kV et différentes fréquences, pour les deux types de particules. Les lignes pointillées verticales correspondent aux instants choisis pour les champs de vitesse de la Figure 65.	98
Figure 67. Cartes spatio-temporelles de la vitesse pour une DBD sinus à 12 kV et différentes fréquences, pour les 2 types de particules. Les tirets séparent les périodes, les pointillés marquent le passage de la même décharge selon la fréquence (c).	99
Figure 68. Cartes spatio-temporelles de la vitesse pour une DBD sinus à 12 kV et différentes fréquences, pour les 2 types de particules. Les tirets séparent les périodes, les pointillés marquent le passage de la même décharge selon la fréquence (c).	101
Figure 69. Cartes spatio-temporelles de la vitesse pour une DBD sinus à 12 kV et différentes fréquences, pour les 2 types de particules. Les tirets séparent les périodes, les pointillés marquent le passage de la même décharge selon la fréquence (c).	101
Figure 70. Cartes spatio-temporelles de la vitesse pour une DBD sinus à 12 kV et différentes fréquences, pour les 2 types de particules. Les tirets séparent les périodes, les pointillés marquent le passage de la même décharge selon la fréquence (c).	102
Figure 71. Cartes spatio-temporelles de la vitesse pour une DBD sinus à 12 kV et 50 Hz pour diverses fréquences, pour les 2 types de particules. Les tirets séparent les périodes, les pointillés marquent le passage de la même décharge selon la fréquence (c).	103
Figure 72. Cartes spatio-temporelles de la vitesse pour une DBD sinus à 12 kV et 50 Hz pour diverses fréquences, pour les 2 types de particules. Les tirets séparent les périodes, les pointillés marquent le passage de la même décharge selon la fréquence (c).	105
Figure 73. Cartes spatio-temporelles de la vitesse pour une DBD sinus à 12 kV et différentes fréquences, prise en y = 4 mm et x = 7,5 mm.	106
Figure 74. Moyenne, minimum et maximum de la composante horizontale de la vitesse, prise en y = 4 mm et x = 7,5 mm.	106
Figure 75. Moyenne, minimum et maximum de la composante horizontale de la vitesse, prise en y = 4 mm et x = 7,5 mm.	110
Figure 76. Schéma de la première version du réacteur.	115
Figure 77. Efficacité de collecte en éthanol. Correspond au ratio entre la concentration mesurée dans les condensats et la concentration maximale théorique.	117
Figure 78. Schéma de principe de la seconde version du réacteur (à gauche), photographie du réacteur isolé (au centre) et zoom sur la zone de décharge avec électrodes (à droite).	118

Différentes conditions expérimentales, pour une aiguille avancée de 5 mm (soit un gap effectif de 10 mm)..... 119

Figure I. (a) Caractéristiques courant-tension positive (en noir) et négative (en rouge). (b) Caractéristiques courant-tension positive (en noir) et négative (en rouge) pour une aiguille avancée de 5 mm (soit un gap effectif de 10 mm)..... 131

Figure II. (a) Caractéristiques courant-tension positive (en noir) et négative (en rouge) pour une aiguille avancée de 5 mm (soit un gap effectif de 10 mm)..... 133



dimension centimétrique.

brève revue de phénomènes du vent ionique et de la précipitation électrostatique qui en découle, ainsi

Le second chapitre présente la configuration du réacteur utilisé dans ce travail puis se concentre sur les décharges à pression atmosphérique dans une configuration pointe-plan (gap égal à 15 mm). Nous

le chapitre précédent en introduisant la présence de cet aérosol pour les caractéristiques de la décharge. La mise en mouvement des gouttelettes est là aussi mesurée par PIV. On

Il présente les différentes itérations de réacteur utilisé ainsi que les améliorations qui pourraient y être apportée. Les quelques expériences préliminaires qui ont été conduites sont brièvement rapportées, puis une analyse des dysfonctionnements et des

Enfin, une conclusion générale terminera ce document dans laquelle une synthèse des



précision que dans les études portant sur le plasma lui-même. Plusieurs autres grandeurs peuvent être dérivées de ces paramètres et des caractéristiques du milieu, parmi lesquelles :

J La longueur de Debye  $\lambda_D$  [m] :

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n e^2}}$$

avec  $\epsilon_0$  la permittivité du vide [ $F.m^{-1}$ ],  $k_B$  la constante de Boltzmann [ $J.K^{-1}$ ] et  $e$  la charge élémentaire [ $C$ ].  $\lambda_D$  est la longueur caractéristique de la zone de transition non-neutre entre le plasma et la surface des électrodes.

J  $\alpha$  :

$$\alpha = \frac{n_i}{n}$$

avec  $N$  la densité des espèces neutres du milieu [ $m^{-3}$ ]. Ce ratio indique la part des espèces ionisées dans le plasma.

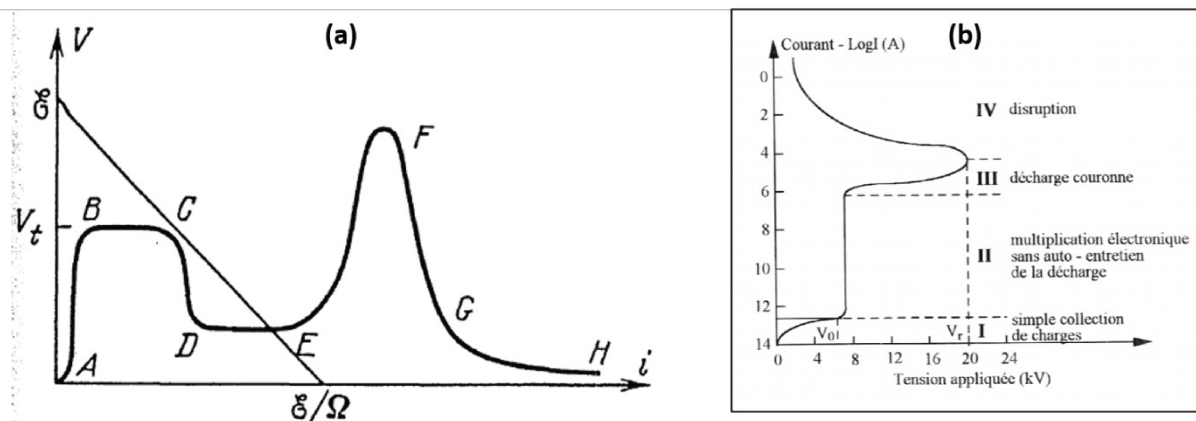
Ce dernier paramètre permet, avec la différence entre la température du gaz (et donc des ions)  $T_g$  et celle des électrons  $T_e$ , de distinguer deux grandes catégories de plasma :

- J Les plasmas thermiques (ou « chauds »), pour  $T_e \approx T_g$  et  $\alpha \approx 1$ . Dans ce type de plasma, la température des électrons et celle des espèces massives sont équivalentes. Ce type de plasma est classiquement produit dans les arcs électriques ou par élévation directe de la température du gaz.
- J Les plasmas non-thermiques (ou « froids »), pour  $T_e \gg T_g$  et  $\alpha \ll 1$ , faiblement ionisés et hors-équilibre thermodynamique, sont classiquement produits par les décharges électriques. En effet le champ électrique appliquant une même force sur les ions et les électrons, ces derniers acquièrent une énergie cinétique plus importante du fait de leur masse considérablement plus faible.

### 2.1.2 Classifications des décharges

Les paramètres externes, autres que la composition et la pression du milieu, pilotant la décharge sont la géométrie des électrodes, le niveau de tension appliqué entre elles, et le temps caractéristique de variation de cette tension. Dans le cas classique où seules deux électrodes sont présentes, sont distinguées les géométries symétriques avec deux électrodes de grand rayon de courbure en comparaison du gap (généralement plan-plan ou sphère-sphère).

faible rayon de courbure (pointe, fil ou lame généralement). La première configuration est susceptible de produire une décharge homogène dans tout le volume inter-électrodes, tandis que la seconde favorisera la décharge autour de l'électrode de faible rayon de courbure, ainsi donc appelée **décharge « couronne »**. L'intensité du champ électrique appliqué entre les électrodes pilote l'énergie fournie à la décharge. Dans le cas d'une géométrie symétrique, la relation entre courant et tension n'est pas monotone, traduisant l'apparition successive de différents régimes de décharge (Figure 1a). Pour une décharge couronne en revanche, cette courbe est plus régulière (Figure 1b). Enfin, la fréquence de variation du champ est déterminante, puisqu'au-delà d'une certaine valeur, tout ou partie des espèces chargées du plasma sont susceptibles d'osciller entre les électrodes sans être collectées. Pour des gaps centimétriques, ce seuil se situe aux alentours de  $10^4$  Hz. Dans la suite de ce document, seuls des signaux de tension continue ou avec une fréquence inférieure à ce seuil sont considérés.



**Fig. 8.4.**  $V - i$  characteristic of discharge between electrodes for a wide range of currents, and the loading line: (A) region of non-self-sustaining discharge, (BC) Townsend dark discharge, (DE) normal glow discharge, (EF) abnormal glow discharge, (FG) transition to arcing, (GH) arc

*Figure 1.* Caractéristiques courant-tension avec régimes de décharge intermédiaires pour des décharges positives continues symétriques (a) [2] et couronnes (b) [6].

Ainsi, lorsque l'on augmente progressivement la tension, différents régimes de décharge sont observés.

De 0 à  $V_0$ , un courant très faible peut-être mesuré, dû à la migration d'espèces chargées naturellement présentes dans l'espace inter-électrodes. Le rayonnement cosmique ou une autre source de radiation, d'origine naturelle ou artificielle peuvent en être la cause. Ce courant augmente dans un premier temps puis sature pour égaler le débit d'ionisation dans le volume de la source externe. Ce régime est dit « non-autonome », car la décharge dépend de cette source externe d'ionisation.

A partir de  $V_0$ , la tension « d'ignition », il y a amorçage de la décharge. Cet amorçage ou « breakdown » est intrinsèquement erratique car, en l'absence d'injection externe de charge, il dépend de la présence d'électrons libres dans le gap susceptibles d'être accélérés [7]. Néanmoins, une fois cet amorçage réalisé, la décharge est dite autonome car l'énergie cinétique des électrons est alors suffisante pour provoquer l'ionisation d'autres



de charge. Le courant croît alors avec la tension, la décharge adoptant différents régimes de décharge intermédiaires en fonction des conditions environnementales et de la

A partir de  $V_c$  « spark » élevé permanent se forme plus ou moins rapide des électrodes et est donc rarement souhaitable, sauf application particulière.

ici se produira donc préférentiellement là où le champ électrique rayon de courbure que le maximum théorique du champ électrique est atteint et vaut simplement  $E = V / r$  [8], avec  $r$  produit alors à bien plus faible tension que pour une géométrie symétrique. Le champ étant rapidement décroissant entre les deux électrodes, la décharge ainsi obtenue plus loin dans le gap à mesure que la tension augmente.

parois isolantes entre les électrodes; on parle alors de Décharge à Barrière Diélectrique (DBD). La présence de parois provoque une accumulation des charges et empêche leur neutralisation sur les électrodes, écrantant à terme le champ électrique et mettant fin à la décharge accumulées. Cette configuration permet également de former un plasma de surface dans le cas où les électrodes

### 2.1.3 Applications directes

Les applications directes des décharges plasma sont nombreuses et variées [12]. Parmi les utilisations industrielles les plus communes, on trouve leur emploi dans la neutralisation de surface [13] gravure et de nombreux usages en chimie [14] [15]. Dans les domaines liés à la recherche, on retrouve les décharges dans la microscopie électronique, la spectrométrie de masse, les lasers à gaz.

Dans le contexte climatique actuel [16] et la pénurie à venir concernant les matières organiques fossiles [17], la capture et séquestration du carbone (CSC) (Capture et Séquestration du Carbone) ou de la production croissante de biogaz (mélange de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>), issu de la fermentation de déchet agricole. Par le biais de différents procédés, il est possible de convertir ces gaz en molécules carbonées essentielles pour la chimie de base [18], comme le syngaz (mélange de CO et H<sub>2</sub>), le méthanol ou le gaz de synthèse. Cependant, le CO<sub>2</sub> étant particulièrement stable, son reformage est très gourmand en énergie. Le procédé de conversion. La référence pour la conversion du biogaz en syngaz est le procédé de reformage à sec sur catalyseur, platine ou nickel. Mais si ce procédé présente un bon taux de conversion des réactifs, la nécessité de travailler à haute température dégrade considérablement son efficacité énergétique (et son intérêt environnemental, si la source d'énergie est fossile).

De nombreuses études visent à améliorer ce procédé ou à développer de nouvelles méthodes de conversion, telles que l'utilisation de décharge plasma pour rompre les liaisons moléculaires et permettre de nouvelles réactions à basse température (reformage direct) [19] [20] [21] [22], l'activation catalytique [23], voire une combinaison des deux effets [24].

Le plasma est un état de la matière où les électrons sont ionisés, notamment le phénomène du vent ionique et la précipitation électrostatique.

## 2.2 Les écoulements EHD

### 2.2.1 Mise en mouvement de fluide par champ électrique

Une particule massive chargée électriquement placée dans un champ électrique subit une force  $F_q$  [N], proportionnelle à sa charge  $q$  [C] et au champ électrique  $E$  [V.m<sup>-1</sup>], correspondante à la force de Lorentz pour un champ magnétique nul :

La particule est alors en accélération. Si elle se trouve dans un fluide, un liquide diélectrique ou un gaz suffisamment dense, elle lui transmet alors de sa quantité de mouvement. On appelle Force ElectroHydroDynamique  $F_{EHD}$  [N.m<sup>-3</sup>] en fonction de la densité volumique de charge locale  $\rho_e$  [C.m<sup>-3</sup>] :

La différence principale entre les liquides et les gaz est que, dans les liquides, les charges sont libres de se déplacer, alors qu'elles sont liées aux molécules dans les gaz.

Les ions positifs sont bien plus importants et la vitesse des ions beaucoup plus rapide (dans la plupart des cas, la vitesse des ions positifs est de l'ordre de  $10^6$  m/s). La vitesse des ions négatifs est plus faible, de l'ordre de  $10^5$  m/s. La vitesse des ions positifs est donc plus élevée que celle des ions négatifs. La vitesse des ions positifs est donc plus élevée que celle des ions négatifs. La vitesse des ions positifs est donc plus élevée que celle des ions négatifs.

Dans la suite de ce manuscrit nous nous concentrerons sur les écoulements dans les gaz.

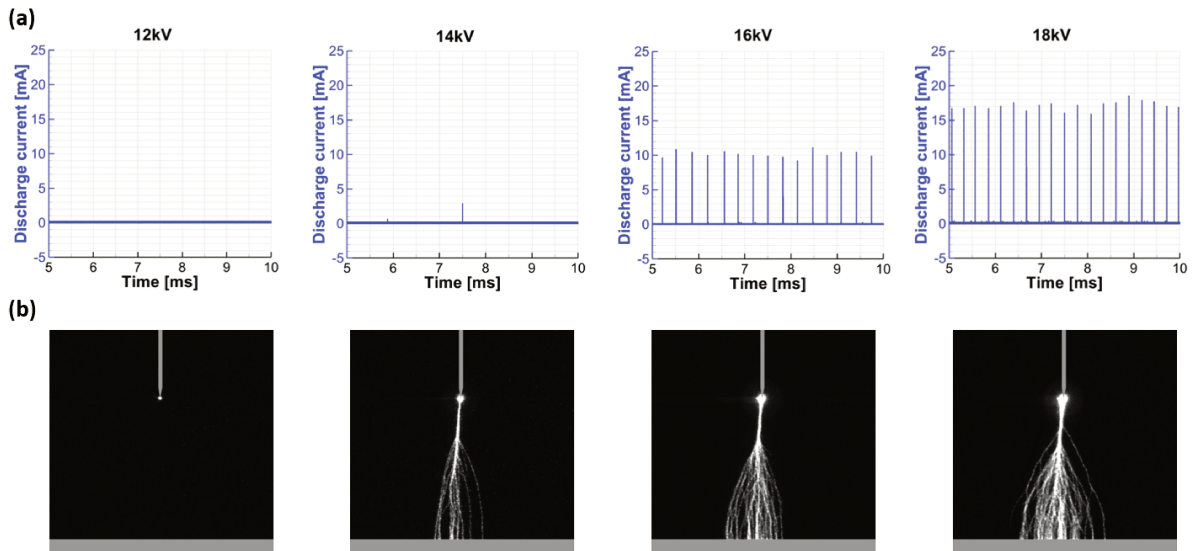
### 2.2.2 Le vent ionique

Le vent ionique est un écoulement de gaz ionisé. Dans un système à deux électrodes symétriques fonctionnant en continu ou à basse fréquence ( $< 10^4$  Hz), deux situations peuvent se présenter. Si l'électrode pointe est négative, les électrons migrent vers l'électrode pointe, ce qui crée un écoulement macroscopique dans le même sens que ces ions. En revanche, si le milieu est électropositif, comme les gaz rares (hélium, argon, etc.), les électrons migrent vers l'électrode plane, ce qui crée un écoulement macroscopique dans le même sens que ces ions. En revanche, si le milieu est électropositif, comme les gaz rares (hélium, argon, etc.), les électrons migrent vers l'électrode plane, ce qui crée un écoulement macroscopique dans le même sens que ces ions.

Il y a donc une décharge couronne [26] qui se forme autour de la pointe. Les ions positifs sont éjectés de la zone autour de la pointe et migrent vers la contre-électrode. Ce sont ces ions unipolaires présents en grande quantité qui créent un vent ionique volumique dans le gaz. Cette zone de dérive des ions ne peut être considérée comme un plasma car macroscopiquement non-neutre.

Il y a donc une décharge couronne [26] qui se forme autour de la pointe. Les ions positifs sont éjectés de la zone autour de la pointe et migrent vers la contre-électrode. Ce sont ces ions unipolaires présents en grande quantité qui créent un vent ionique volumique dans le gaz. Cette zone de dérive des ions ne peut être considérée comme un plasma car macroscopiquement non-neutre.

Par exemple, la Figure 2a montre une décharge en régime streamer et la Figure 2b montre des visualisations de la décharge réalisées à l'aide d'une caméra rapide (le régime streamer est composé de pics de courant qui se déplacent le long des électrodes de 25 mm).



*Figure 2. Décharge couronne avec un gap de 25 mm pour différentes tensions positives appliquées. (a) Courant instantané. (b) Photographie iCCD. Issue de [27].*

La [Figure 3](#) ci-contre montre des champs de vitesse du vent ionique produit à différentes valeurs de tension, pour une décharge positive sur la colonne de gauche et une décharge négative sur la colonne de droite. La topologie de l'écoulement dépend alors fortement de la polarité de la haute tension et de sa valeur.

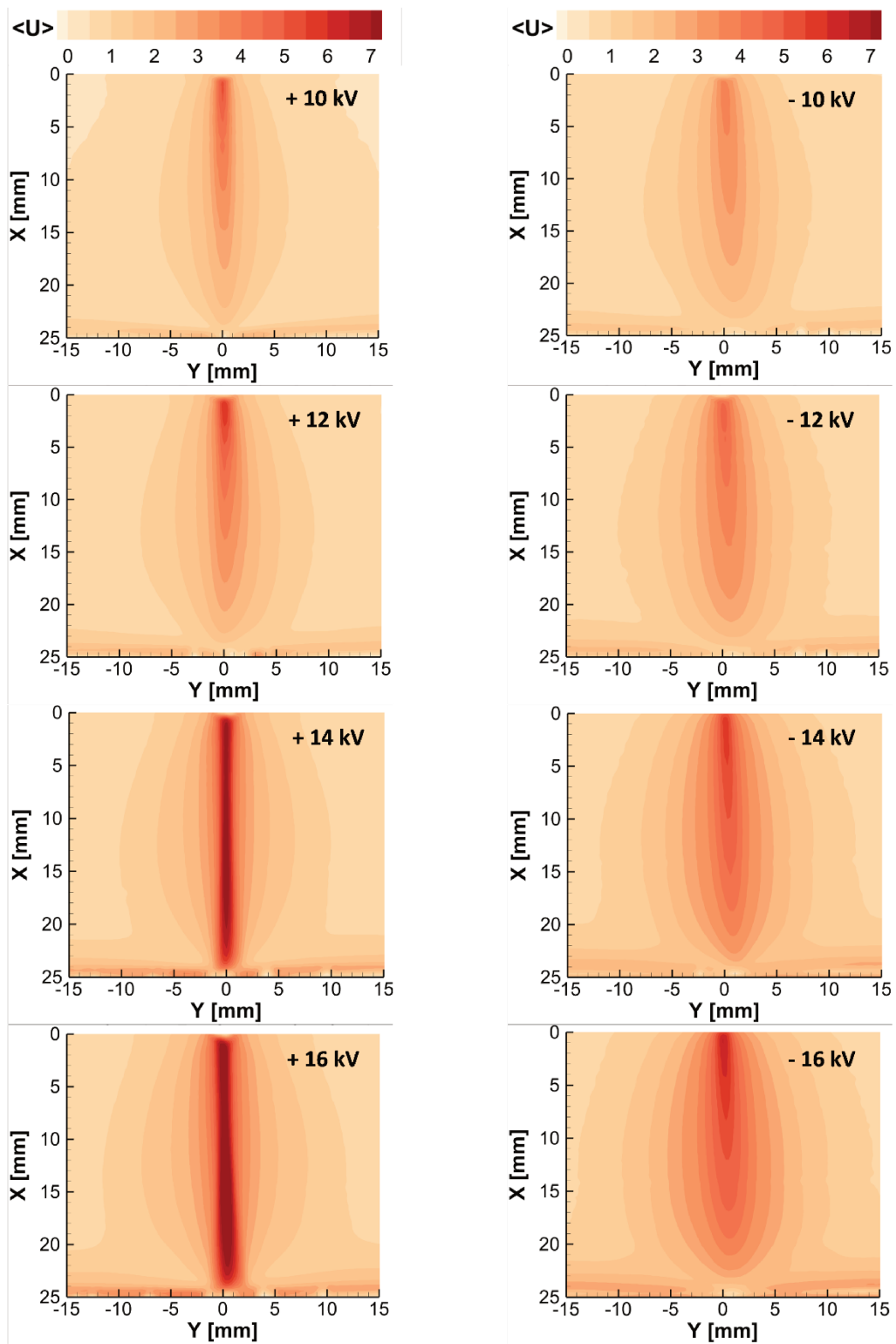
Dans le cas d'un champ alternatif, la polarité des ions dans la zone de dérive change également. Les ions d'une polarité présents dans le volume au moment de l'inversion du champ se neutralisent rapidement avec la vague suivante. Une force volumique nette est toujours produite tant que la fréquence est maintenue en dessous de la limite de  $10^4$  Hz. La vitesse de migration des ions dans l'air à pression atmosphérique étant de l'ordre de  $10^2$  m.s<sup>-1</sup> et le gap centimétrique, il en résulte **une durée de l'ordre de  $10^{-4}$  seconde entre l'émission d'un ion et sa collecte sur l'électrode opposée** [29].

Enfin, une décharge pouvant être générée le long d'une paroi à l'aide d'une DBD, il est possible de produire un écoulement en appliquant une force de surface, ce qui présente un avantage en termes de compacité et de possibilité d'intégration.

### 2.2.3 Applications

Cette capacité d'une décharge à produire un écoulement en l'absence de pièce mobile, avec d'autant plus d'efficacité que la dimension du système est réduite (à l'inverse des systèmes mécaniques), rend l'usage du vent ionique pertinent pour un grand nombre d'applications.

La plus directe est son utilisation comme simple pompe EHD [30], majoritairement en volume via une décharge couronne depuis une pointe vers une bague ou une grille [31] [32] [33], mais également via des décharges de surface placées de part et d'autre du conduit [34] [35] [36] [37].



*Figure 3. Vitesse moyenne obtenue par PIV d'une décharge couronne avec un gap de 25 mm pour différentes tensions appliquées, positive à gauche, négative à droite. Issue de [27].*

Le contrôle de la traînée peut être réalisé par la régulation de la tension appliquée à la surface du diélectrique [38] [39] [40]. Cette forme de contrôle peut permettre la régulation de la traînée [41] ou la régulation thermique de composants [42] ou encore de modifier la traînée appliquée sur un profil [44] [45].

La Figure 4 montre le vent ionique produit à la paroi du diélectrique par une DBD de surface provoquée par un signal de tension sinusoïdale à 22 kV et 1500 Hz [46]. Le vent ionique se comporte alors comme un jet de paroi, dont la vitesse maximale peut atteindre 7 à 8 m/s à quelques dixièmes de millimètres au-dessus de la paroi.

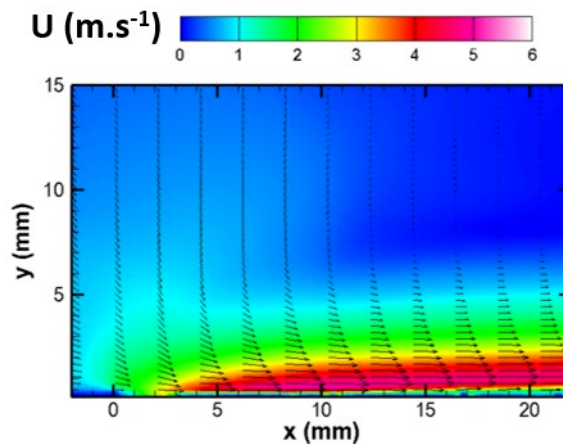


Figure 4 : Vent ionique produit à la paroi du diélectrique par une DBD de surface [46].

Dans la continuité du dernier point, certaines études explorent même la possibilité d'utiliser le vent ionique pour la propulsion des avions à réaction [47] [48] [49].

### 2.3 La précipitation électrostatique

Comme vu précédemment, un des usages dérivés des décharges plasma est leur capacité à charger toute surface à proximité [13]. Cette caractéristique peut être mise à profit pour charger de fines particules injectées ou déposées dans le volume intermédiaire. La manipulation des fumées est appelée « précipitation électrostatique ».

### 2.3.1 Bilan des forces sur une particule sphérique dans un précipitateur électrostatique

électrostatique, il y a une force électrostatique  $F_e$  qui provoque sa sédimentation.

avec  $F_g$  le poids,  $d_p$  le diamètre [m] et  $\rho_p$  la masse volumique [kg.m<sup>-3</sup>] de la particule. Cette dernière est transportée dans le précipitateur par un écoulement mais elle ne le suit pas forcément parfaitement et peut présenter une vitesse de dérive vers les parois du précipitateur. Elle subit donc une force de trainée  $F_r$  [N] qui dépend fortement de la taille de la particule. Deux nombres adimensionnels permettent de la caractériser : le facteur de Cunningham  $C_u$  qui tient compte du libre parcours moyen  $\lambda_g$  [m] pour les petites particules, et le nombre de Reynolds particulaire  $Re_p$  qui permet de déterminer le régime :

avec  $U$  et  $U_p$  les vitesses du fluide et de la particule [m.s<sup>-1</sup>] et  $C_f$  le coefficient de trainée. Le coefficient de trainée  $C_f$  est une fonction du nombre de Reynolds  $Re_p$  et du facteur de Cunningham  $C_u$ . Pour des particules de diamètre inférieur à 17 micromètres, ce qui donne une diminution de la force de trainée supérieure à 1% (et rapidement croissant) pour des particules de diamètre inférieur à 17 micromètres. Dans le cas, fréquent, où  $Re_p < 1$  et  $C_u \approx 1$ , on est en régime de Stokes, et la force de trainée se simplifie alors tels que :



Enfin, la particule subit bien évidemment une force électrostatique  $F_e$  [N]. Cette force est principalement due à la force de Lorentz  $F_q$  dans un champ uniforme décrit précédemment. Dans certaines situations il est nécessaire de tenir compte de la force diélectrophorétique  $F_{DEP}$  [N] :

$$F_{DEP} = \dots$$

avec  $\epsilon_0$  la permittivité du vide [F.m<sup>-1</sup>],  $\epsilon_r$  la permittivité relative du milieu et  $K$  la fonction de Clausius-Mossotti [50]. Cette dernière tient compte de la différence de permittivité (pour les particules diélectriques) ou de conductivité (pour les particules conductrices) de la particule avec le milieu (en toute rigueur, il faudrait utiliser la permittivité complexe de la particule dans le cas de champs alternatifs).

$$F_{DEP} = \dots$$

avec  $\sigma$  et  $\rho$  les conductivités du milieu et de la particule [S.m<sup>-1</sup>] et  $\epsilon_p$  la permittivité relative de la particule. Finalement, la force électrostatique est la somme de ces deux effets, force principale de la précipitation électrostatique dans le volume, et force diélectrophorétique due aux charges.

$$F_{DEP} = \dots$$

alors sur une particule individuelle dans un champ électrique uniforme  $E$  :

$$F_{DEP} = \dots$$

### 2.3.2 Mécanisme de charge des particules

Un précipitateur électrostatique a donc pour fonction de charger les particules qui le traverse, mais cette force étant dépendante de la charge portée par ces particules, il est nécessaire que celle-ci soit générée en amont. Deux mécanismes principaux de chargement des aérosols se mettent en place simultanément.

Le premier mécanisme de chargement des aérosols est la charge par diffusion, qui est due à la collision aléatoire des ions avec les particules [51]. La particule acquiert des charges par collision



la charge augmente moins les collisions supplémentaires sont probables car les ions de même polarité sont repoussés par la force de Coulomb. La charge par diffusion est prédominante pour les petites particules, de diamètre inférieur au micromètre, et est décrite par la formule de White :

$$Q = \frac{4\pi k q^* n_i}{k + D_i} C_i$$

avec  $k$  la constante de Boltzmann [ $J.K^{-1}$ ],  $q^*$  la constante de charge [ $C$ ] qui ne dépend que de la température et de la taille de la particule, et  $D_i$  la constante de temps de charge par diffusion [ $s$ ] qui dépend, en plus, de la concentration en ions  $n_i$  [ $m^{-3}$ ] et de leur vitesse due  $C_i$  [ $m.s^{-1}$ ].

Le second mécanisme de chargement des aérosols est la charge par champ, due à la déformation des lignes de champ à proximité et les fait traverser la particule, les espèces chargées migrant dans le milieu arrivent donc complètement le champ, donnant une limite supérieure à la charge possible. Ce phénomène, décrit par la formule de Pauthenier, est prédominant pour les particules de diamètre supérieur au micromètre :

$$Q = q_s \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\mu_i n_i}\right) \right)$$

avec  $q_s$  la charge de saturation [ $C$ ] qui est la charge pour laquelle le champs local est complètement écranté, et  $t$  la constante de temps de charge par champ [ $s$ ] qui dépend de la densité volumique  $n_i$  [ $C.m^{-3}$ ] et de la mobilité  $\mu_i$  [ $m^2.V^{-1}.s^{-1}$ ] des ions du milieu.

En réalité, les deux mécanismes de charges précédents, par diffusion et par champ, coexistent pour toute taille de particules [53]. Pour des tailles de particules de la

$$Q = \frac{4\pi k q^* n_i}{k + D_i} C_i + q_s \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\mu_i n_i}\right) \right)$$

Ces équations permettent de simuler la charge et la trajectoire de particules individuelles dans un champ électrique. Elles sont basées sur les principes de la mécanique des fluides et de l'électrostatique.

### 2.3.3 Propriété des aérosols et granulométrie

En effet, le bilan précédent montre bien que le diamètre, la densité et la charge d'un aérosol [54]. Il faut notamment considérer le fait que la particule soit solide (poudre, suie, pollen, etc.) ou liquide (spray ou brouillard), ces dernières étant alors potentiellement susceptibles d'être affectées par l'électrostriction, voire susceptibles de se déformer sous l'effet de la tension superficielle [N.m<sup>-1</sup>] [55]. Cette charge critique correspond à la limite de Rayleigh  $q_{\text{Rayleigh}} [C]$  :

$$q_{\text{Rayleigh}} = \dots$$

Le risque de désintégration des gouttelettes. La forme des particules peut également être affectée par les forces électrostatiques avec le milieu et le ratio surface sur volume des particules est fort [56]. Néanmoins, la précipitation électrostatique en elle-même (cas de fibres longues). La propriété de conductivité ou non des particules peut aussi avoir un effet en amont du système par chargement triboélectrique pour les particules isolantes (cas de fibres longues) ou sur les électrodes [58], ce qui peut modifier les conditions de fonctionnement du système (back-corona »).

Le régime de précipitation est caractérisé par une distribution granulométrique exprimée pour des classes de diamètre de particules (Figure 5) [59]. Ce diamètre dépend de la technique de mesure utilisée pour les particules non sphériques. Il existe différentes manières : en proportion du nombre de particules, du volume total de particules ou de la surface totale. Choisir la plus adaptée au problème à traiter. Enfin, il est souvent pratique de déterminer une taille de particule représentative (taille médiane) qui est parfois ardue et peut conduire à négliger des aspects importants (on peut penser à des suies de combustion, très polydispersées, dont la masse est concentrée dans les particules les plus fines). Les diamètres équivalents les plus utilisés sont le diamètre médian  $d_{50}$  qui varie de 0,1 à 100 µm et le diamètre équivalent de surface  $d_{s,50}$  qui varie de 0,1 à 100 µm.

est égal au diamètre d'une sphère de même ratio volume sur surface que la distribution considérée.

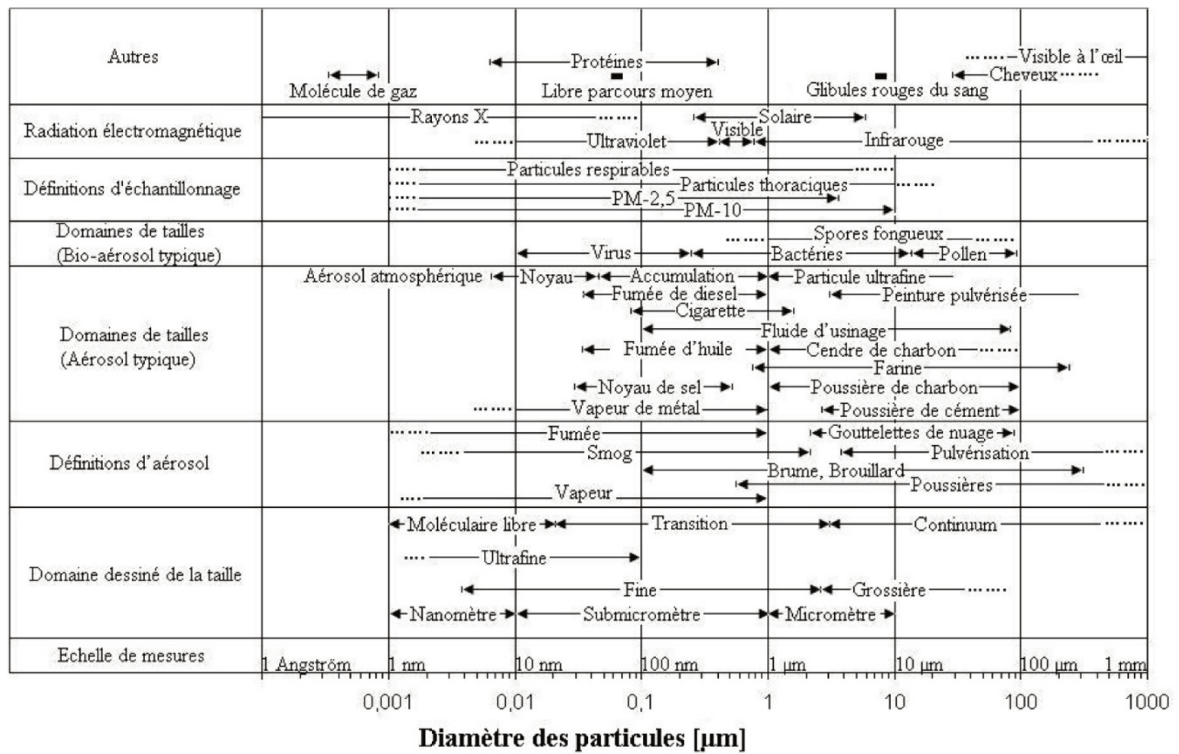
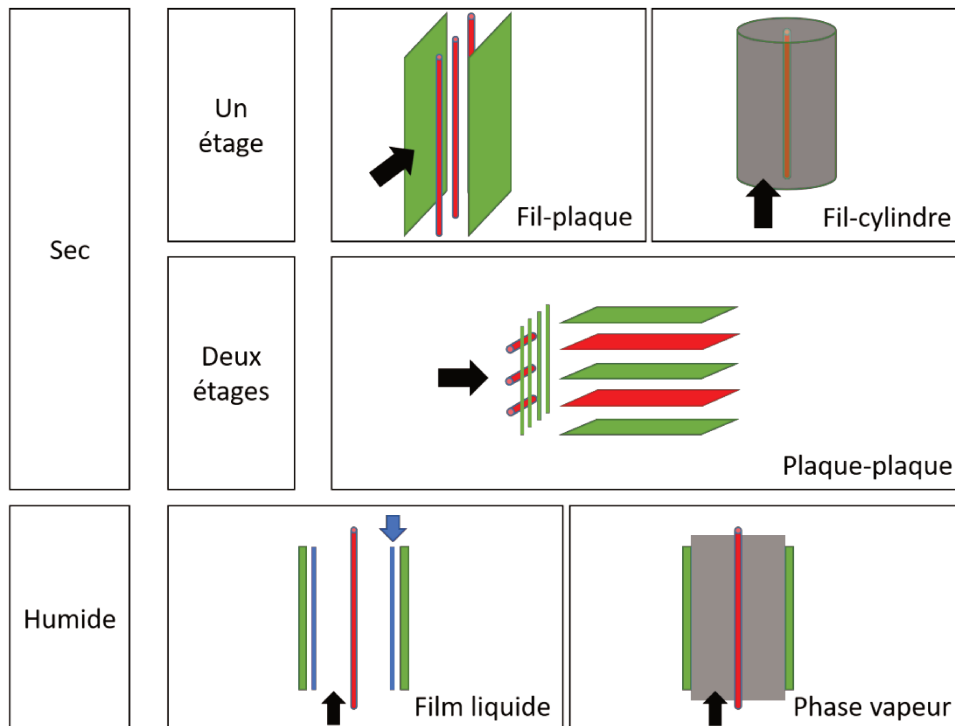


Figure 5. Classification des aérosols, issue de [59].

### 2.3.4 Application et technologie de précipitateur

La précipitation électrostatique est mise en œuvre dans différents procédés, le plus commun étant la filtration des suies dans les fumées de combustion ou, plus généralement, la suppression de tout polluant solide ou liquide présent dans un flux gazeux. Le système est composé de 3 fonctions principales : un étage amont permettant d'éliminer les plus grosses particules, généralement par filtration mécanique ou brûlage, un étage de chargement des particules par traversée d'un flux d'ions, généralement produit par décharge couronne, et un ou plusieurs étages précipitateurs dans lesquels un champ électrique dévie les particules vers des parois collectrices. Enfin, le système est généralement complété par un dispositif d'élimination régulier des dépôts pariétaux (frappage ou lavage par exemple). Les étages de chargement et de précipitation sont fréquemment confondus (Figure 6), en utilisant le même champ électrique pour produire la décharge couronne générant les ions et la précipitation des particules. Quelques précipitateurs, dits humides, fonctionnent avec un film d'eau continu sur les parois collectrices ou avec un flux gazeux saturé en vapeur d'eau [60]. Ils permettent d'éviter la formation d'une couche de particules isolantes sur les parois dans le premier cas, ou d'éliminer plus efficacement certains polluants liquides ou gazeux miscibles avec l'eau dans le second [61].



*Figure 6. Classification des principales géométries de précipitateur électrostatique.*

Ces systèmes de précipitateurs électrostatiques, ou électrofiltres, sont une technologie mature largement employée dans l'industrie pour le traitement de flux très importants. Plus récemment, des systèmes de plus petite dimension sont employés pour le traitement de l'air et peuvent être optimisés pour la filtration de particules précises (suies, mais aussi poussières, gouttelettes d'huile, pollens, voire virus et autres pathogènes). D'autres applications dérivent de la précipitation sur une paroi, il peut s'agir de séparer des particules de différentes tailles ou natures (conductrice et isolante par exemple) en différents flux ; on parle alors de séparateurs électrostatiques. Le principe peut également être utilisé dans le but d'agiter une phase dispersée sous forme d'aérosol afin de favoriser un mélange avec la phase gaz [15].

A travers ces principales applications, les électrofiltres emploient donc majoritairement des décharges couronne dans l'air et à pression atmosphérique. Ces décharges sont le plus souvent réalisées dans des configurations fil-plan, fil-cylindre ou pointe-plan [62], en combinaison d'une haute tension continue, généralement négative, dont parfois la polarité s'inverse régulièrement prenant la forme d'un signal carré très basse fréquence. La tension choisie est donc adaptée à la géométrie et au mélange à traiter pour éviter tout arc électrique. Néanmoins, pour se prémunir d'un tel risque, il est possible d'utiliser une décharge à barrière diélectrique et donc une tension alternative, avec la complexité supplémentaire de devoir prendre en compte l'oscillation des particules dans le système [63] [64]. Enfin, la présence d'une décharge produit également du vent ionique, généralement dans une direction orthogonale à l'écoulement principal, ce qui peut introduire des perturbations importantes [65], souhaitables ou non.

## 2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, les principaux concepts nécessaires au développement de cette décharge couronne pour la mise en mouvement et la décharges décrits en première partie pe dans celui-ci. Enfin, la dernière partie permet de dimensionner le système pour la manipulation du brouillard et les caractéristiques souhaitées pour celui-ci. De fait, connaissances pour la chimie du carbone.

# 3 ETUDE DU VENT IONIQUE

Ce chapitre se concentre sur la caractérisation du vent ionique produit dans un autre électrode de forme plane, Les configurations expérimentales ainsi que le matériel de mesure utilisé sont détaillées dans une première partie. Dans une seconde partie, sont présentées les mesures électriques effectuées sur ces configurations. Dans les troisième et quatrième parties, sont décrits les résultats obtenus respectivement avec une décharge couronne DC et une DBD. Enfin, la cinquième partie conclue ce chapitre.

## 3.1 Métrologie et instrumentation

### 3.1.1 Configurations étudiées

Les décharges étudiées sont obtenues entre une pointe et un plan car ces types de régime de fonctionnement, ce qui facilite grandement les mesures optiques. Un schéma de la configuration retenue est visible sur la [Figure 7](#).

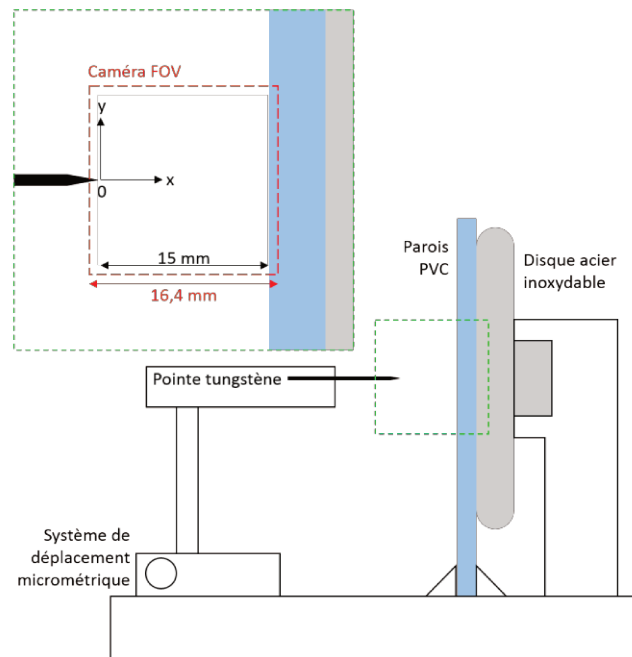
Le choix de la pointe est important car son rayon de courbure affecte très fortement les caractéristiques de la décharge. Pour que les expériences soient reproductibles, il faut que les expériences, ou bien être capable de maîtriser le rayon de courbure à la fabrication pour la question du choix du matériau. Les métaux les plus communément employés pour une électrode sont les suivants :

- Acier nickelé : le moins cher et le plus facile à se procurer, avec une finition propre du rayon de courbure initial. En réalité, cette solution est inappropriée pour du champ électrique en produisant une forme de brosse à l'extrémité de la pointe.
- Acier inoxydable : pour les forts rayons de courbure ou les décharges peu intenses. Le plasma est moins intense.
- Cuivre et alliage de cuivre : leur principal point faible est leur capacité à maintenir un rayon de courbure dans le temps, la décharge rongant progressivement le matériau. Ces matériaux sont moins robustes.
- Tungstène : cher et très difficile à usiner, mais extrêmement robuste, le tungstène est le matériau idéal pour les décharges intenses.

a été fait pour ces travaux. L'intégralité des expériences a été réalisée à l'aide d'une pointe en tungstène de 1 mm de diamètre et de 70  $\mu\text{m}$  de rayon de courbure initial, rodé à 100  $\mu\text{m}$  après quelques heures de fonctionnement de la décharge.

Le matériau de l'électrode plane est moins important ; En revanche sa forme doit permettre de minimiser les effets de bord et de ne pas dévier la décharge. En conséquence, un disque d'acier inoxydable de 80 mm de diamètre (beaucoup plus grand que la distance inter électrodes de 25 mm maximum dans cette étude), doté d'une extrémité arrondie de 5 mm de rayon, est utilisé.

Le choix du gap inter-électrodes résulte d'un compromis entre plusieurs facteurs. D'une part, l'étude physique sur le vent ionique pour laquelle un grand volume observable est préférable. D'autre part, l'application en tant que réacteur pour la chimie qui cherche à minimiser le volume mort et donc à réduire ce gap. Or la distance inter-électrodes conditionne la plage de tension utilisable et les régimes de décharges accessibles. Ici, la distance inter-électrodes est fixée à 15 mm.



*Figure 7. Schéma du réacteur pointe-plan, la paroi diélectrique étant amovible et le gap réglable. Le support (en blanc sur le schéma) n'est pas à l'échelle.*

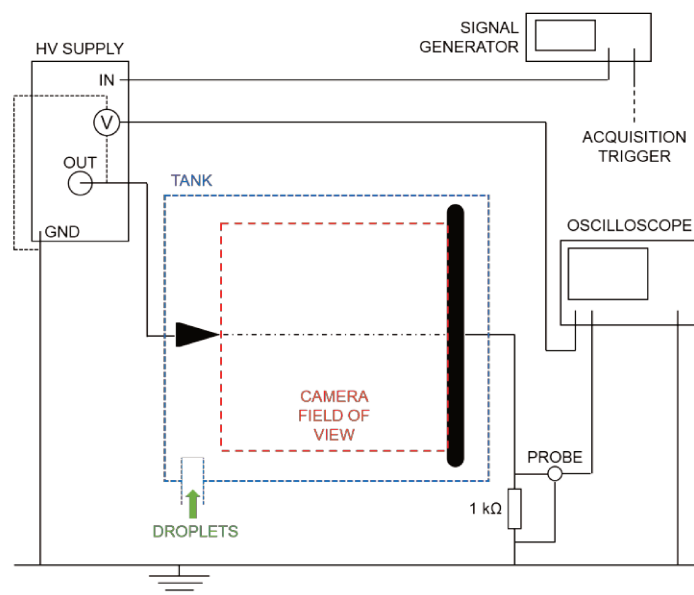
Enfin, certains essais sont réalisés avec une barrière diélectrique sur la contre-électrode. Le choix du matériau est guidé par trois contraintes. Électromécanique tout d'abord car la barrière doit pouvoir supporter une tension importante et ne pas se déformer sous l'effet de la charge ou de la température, pouvoir maintenir un passage à l'arc court entre elle et la pointe. Chimique ensuite car la surface ne doit pas être dégradée de manière trop importante par le plasma et notamment être résistante aux UV. Elle doit également résister aux éventuels solvants synthésés, méthanol et acide méthanoïque principalement, mais aussi être hydrophile et permettre le bon écoulement des condensats liquides. Optique enfin, car si la métrologie optique ne sera pas conduite au



travers du matériau, il serait souhaitable de pouvoir observer l'intérieur du réacteur. Aussi, un minimum de transparence de la paroi est donc recherché. Le matériau finalement retenu comme choix final est le PVC (polychlorure de vinyle) transparent avec une épaisseur significative de 5 mm. Il faut noter que dans ce cas le gap inter-électrodes est pris entre la pointe et la surface du diélectrique, et non plus entre la pointe et le disque métallique.

### 3.1.2 Installation électrique

Un schéma de l'installation électrique est présenté en [Figure 8](#). La pointe de tungstène est connectée à une alimentation haute-tension Trek 30kV/40mA qui amplifie le signal de tension fourni par un générateur de signaux Lecroy WaveStation 3082. Le disque en acier inoxydable est relié à la terre via une résistance de mesure de 1 k $\Omega$  aux bornes de laquelle le courant est mesuré à l'aide d'une sonde Lecroy PP018 500 Mhz. La tension est mesurée via le voltmètre intégré à l'amplificateur haute-tension. Les signaux sont tous enregistrés avec un oscilloscope numérique Lecroy WaveSurfer 24Xs-A 200 Mhz 2,5 GS/s.



[Figure 8](#). Schéma électrique de l'installation.

### 3.1.3 Installation optique

L'écoulement EHD est observé par Vélocimétrie par Image de Particules (PIV) à haute cadence d'acquisition (20 kHz), ce qui permet une résolution temporelle de 50  $\mu$ s. Le système pointe-plan et son support sont placés dans un réservoir transparent en PMMA (polyméthacrylate de méthyle) de dimension 790 x 370 x 370 mm<sup>3</sup>. Pour la caractérisation du vent ionique, les particules d'ensemencement utilisées sont de fines gouttelettes d'huile minérale diélectrique (Ondina) d'environ 0,3  $\mu$ m de diamètre (d32)



un laser pulsé Nd-YAG de 532 nm de Continuum Mesa. Les images sont enregistrées avec une caméra rapide de 20 kHz (Photron Fastcam SA-Z) et une définition de 1024 x 1024 px, pour une taille de champ de 16,4 mm de côté soit une résolution de 62,5 px/mm.

### 3.1.4 Logiciel et post-traitement

Le système de mesure (laser + caméra) est piloté depuis un ordinateur doté du logiciel DaVis (version 8.4.0) de LaVision. La synchronisation avec la décharge est réalisée sont stockées dans un premier temps dans la mémoire interne de la caméra, ce qui limite les données. Les données sont transférées sur un disque dur via les fenêtres de 50%. La taille finale des champs de vitesse est de 128x128 vecteurs soit un vecteur tous les 128  $\mu\text{m}$ .

## 3.2 Caractérisation électrique du système

Dans cette partie, le comportement électrique des différentes configurations du réacteur est testé. Ces essais permettent de connaître les plages de tension utilisables du réacteur, ainsi que la réponse en courant associé et la puissance électrique consommée. Sont présentés dans un premier temps, les essais pour une décharge couronne continue sans diélectrique, puis, dans un second temps, les essais pour une DBD.

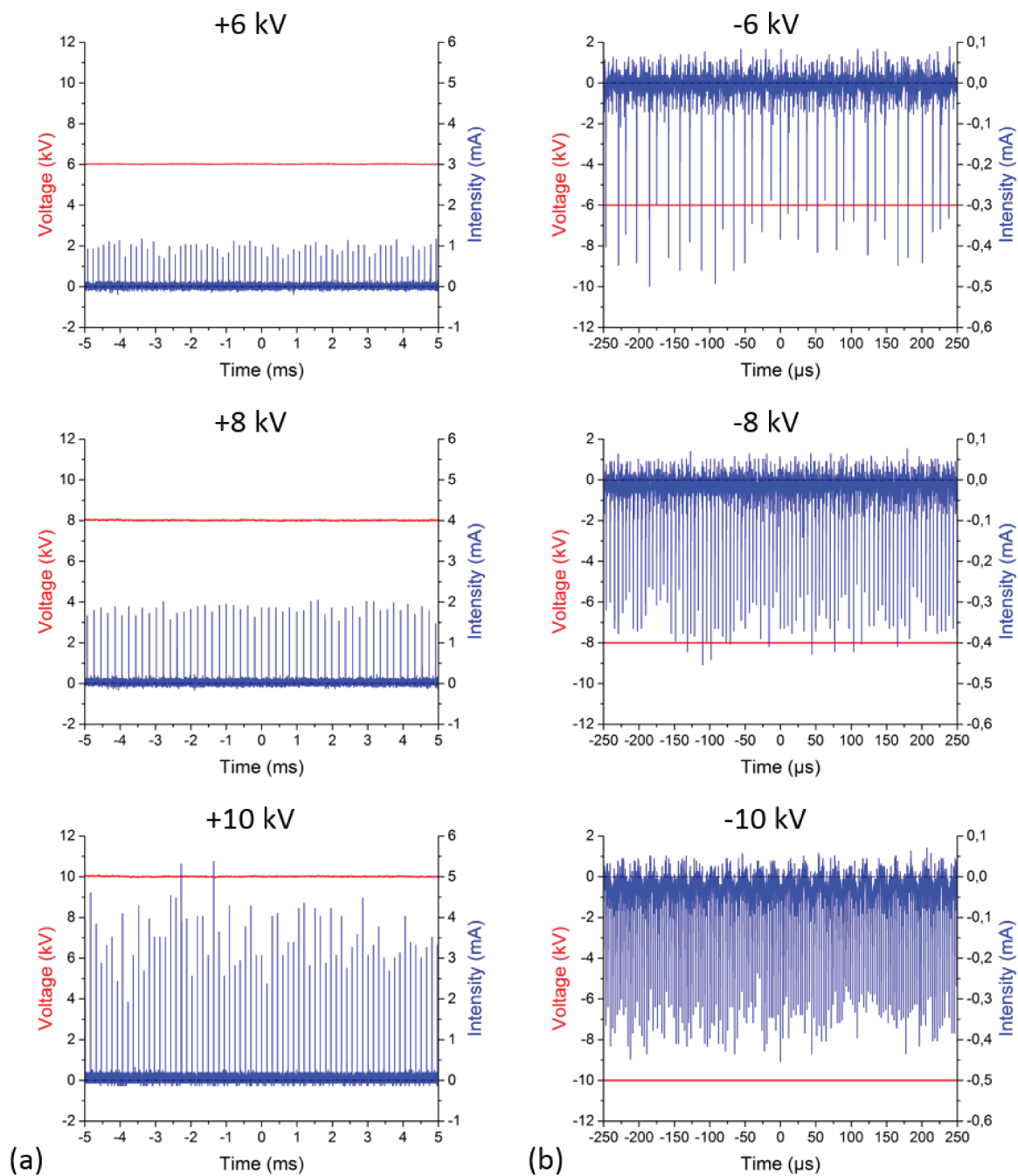
### 3.2.1 Décharge couronne continue

La caractéristique Courant-Tension (abrégé en I-V) continue est déjà bien connue et étudiée (voir Chapitre 2). La [Figure 9](#) montre la caractéristique I-V du réacteur en positif pour différents gaps et à 15 mm pour les deux polarités. Pour une tension V négative (a Townsend :

$$I = I_0 e^{kV} \quad (1)$$

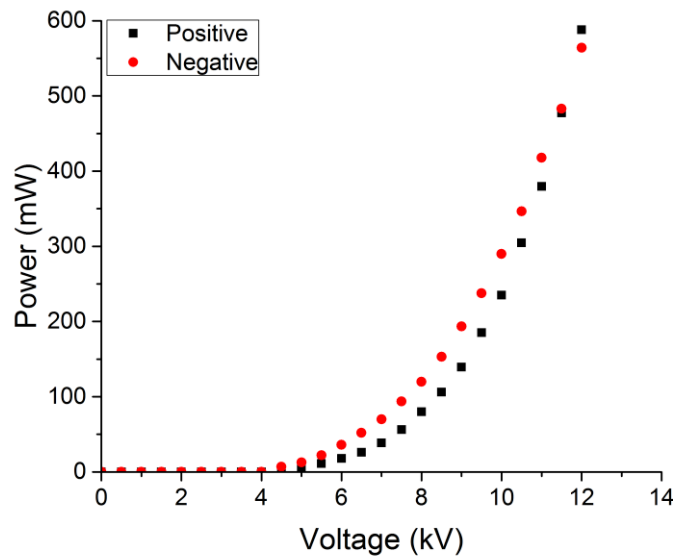
avec  $V_0$  une constante dépendante de la géométrie et du milieu gazeux. En revanche, avec une tension positive, la croissance du courant présente une tendance à saturer à une tension  $V_c$  (ici égale à environ 6,5 kV pour le gap de 15 mm). Cette nouvelle tendance suit une loi en puissance :





*Figure 10. Courant en fonction du temps pour une décharge couronne à différentes valeurs de tension positive (a) et négative (b).*

Pour ce qui est de la puissance électrique consommée par la décharge, elle est tout simplement égale au courant moyen multiplié par la tension (Figure 11). Cette puissance croît rapidement pour les deux polarités tout en restant relativement faible (inférieure au Watt). Le coût énergétique associé à tous les procédés utilisant une décharge continue augmente donc rapidement avec la tension.



**Figure 11.** Puissance moyenne consommée par une décharge couronne continue en fonction de la tension.

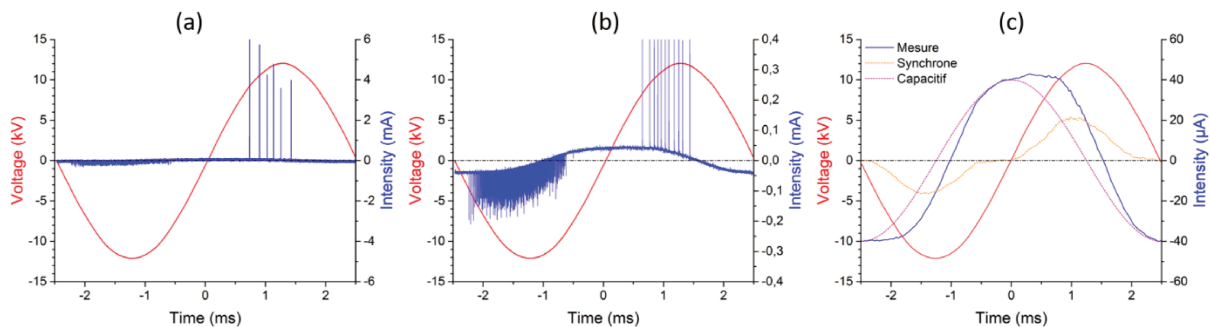
### 3.2.2 Décharge à Barrière Diélectrique

La polarité de la décharge sera neutralisée lors de la polarité opposée. La [Figure 12](#) montre trois exemples de signaux de courant instantané dans le réacteur pour un signal de tension sinus à une fréquence de 200 Hz et pour un gap de 15 mm, correspondant à trois échelles de mesure adaptée aux différentes composantes constituant ce courant.

Le courant pour une DBD est constitué de trois parties (c). La première est une composante capacitive (en violet), image de la dérivée de la tension, généralement de faible amplitude sauf lors des sauts de tension où le courant maximum est déterminé par  $\dot{V} = \frac{dV}{dt}$ . Pour un gap de 15mm, le courant capacitif associé à cette rampe est de 1 à 2 mA, ce qui correspond à une capacité du système de 2 à 4 pF. La deuxième est une composante impulsionnelle. Concernant la décharge positive, elle est constituée de streamers (a) similaires à ceux obtenus pour une décharge couronne continue, qui apparaissent pendant la demi-période positive. Une fréquence de streamer entre 4 et 7 kHz est à nouveau obtenue, avec une intensité maximale dépendante de la tension appliquée et de  $V_{max}$ . L'impulsionnelle est constituée de pics de Trichel (b) mais dont la fréquence dépend de la tension. Enfin, la dernière composante est le courant synchrone

(c), qui correspond au courant continu de quelques  $\mu\text{A}$  dans une décharge couronne DC. Sur la courbe de courant, elle se manifeste par une « bosse » (en orange) présente lorsque les décharges des alternances positive et négative de tension ont lieu.

Il faut noter que la tension à considérer pour les caractéristiques de ces deux dernières composantes est la différence de potentiel entre la pointe et la barrière diélectrique qui accumule des charges au cours du temps. Ainsi, si un potentiel positif constant est appliqué sur la pointe, la tension réelle dans le réacteur sera décroissante et donc l'amplitude des streamers également et cela jusqu'à extinction de la décharge. La forme d'onde appliquée a donc un impact sur les composantes du courant et donc sur les régimes de décharge.



*Figure 12. Courant en fonction du temps d'une DBD alternative à 200 Hz et 12 kV pour un signal sinus. (a), (b) et (c) représentent différents niveaux de zoom sur le courant, ainsi qu'un filtrage de la composante impulsionnel sur (c).*

Pour le signal sinusoïdal, les composantes de décharge positive et négative sont présentes à part égale tandis que la composante capacitive est minimisée. La Figure 13 présente les signaux de courant obtenus dans les mêmes conditions que 6a pour différentes formes d'onde. Ainsi, pour le signal triangulaire (a), les composantes positives et négatives sont plus faibles car la proportion de la période où la tension est supérieure à la tension d'ignition est plus basse. Le signal carré (b) a, à l'inverse, la particularité d'être une succession de signaux continus positifs et négatifs et de deux sauts de tension par période ce qui maximise les trois composantes du courant. Enfin, les signaux en dents de scie (c et d) présentent un saut de tension par période et une asymétrie entre les polarités, ce qui donne un poids plus important à la composante de la décharge qui précède le saut de tension, ceci correspond à une zone où la valeur absolue de la tension est croissante, négative pour une rampe descendante (c) et positive pour une rampe croissante (d).

La caractéristique puissance-tension (P-V) de la décharge est représentée sur la Figure 14 pour différentes fréquences et formes d'ondes. De manière similaire à la caractéristique I-V pour les décharges couronnes, la DBD ne consomme de la puissance en moyenne qu'à partir d'une tension d'ignition  $V_0$ , située entre 3,5 et 5 kV, laquelle diminue avec l'augmentation de la fréquence et change suivant les formes d'ondes.

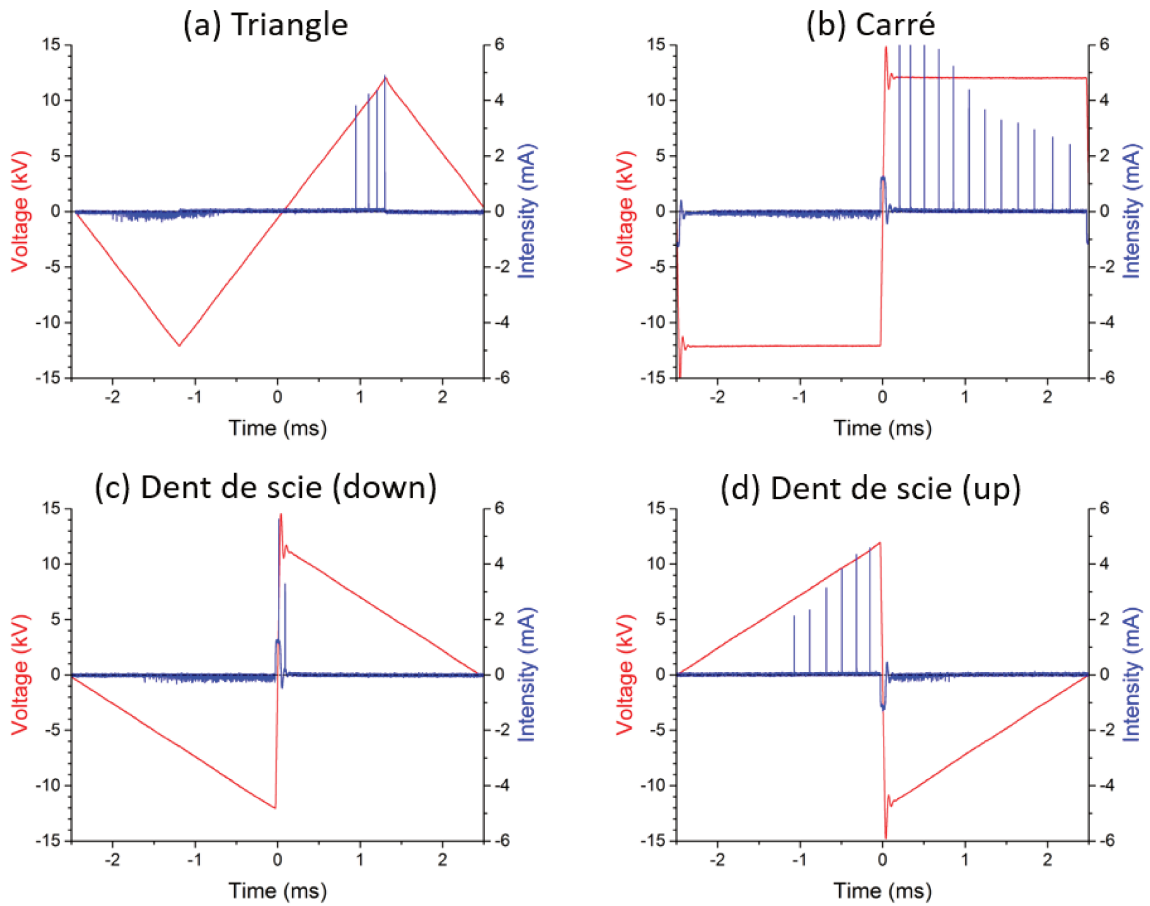


Figure 13. Courant en fonction du temps d'une DBD alternative à 200 Hz et 12 kV pour les formes d'ondes triangle (a), carré (b), en dents de scie montante (c) et descendante (d).

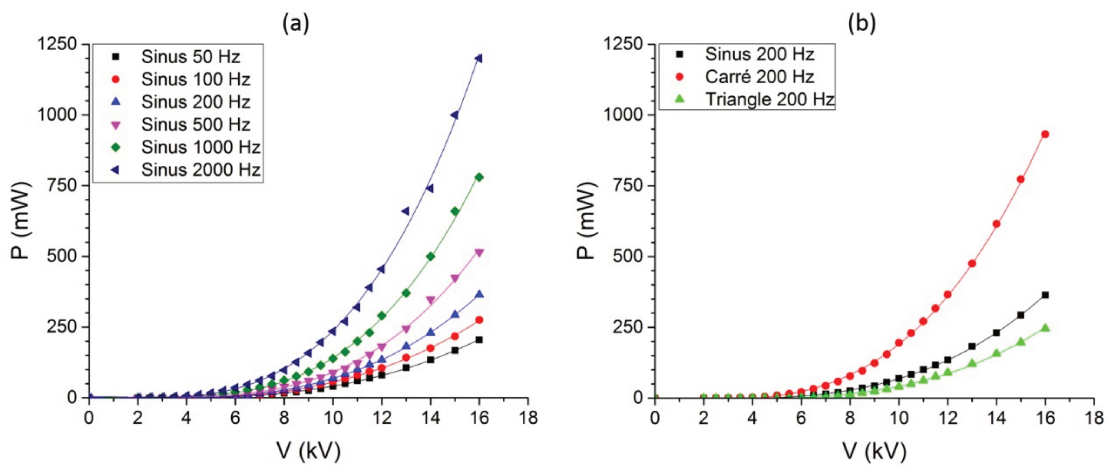
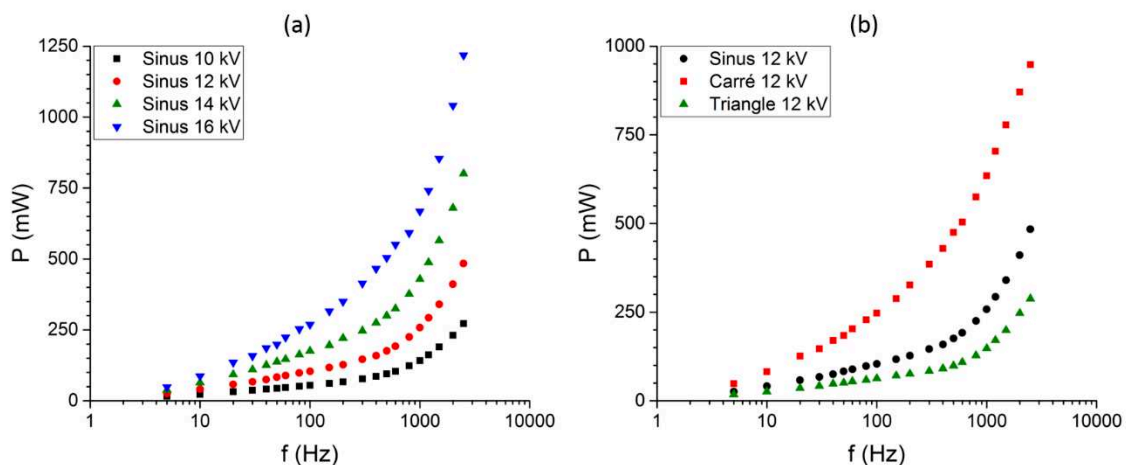


Figure 14. Puissance moyenne consommée par une DBD en fonction de la tension pour différentes fréquences (a) et formes d'ondes (b). Les lignes continues sont des régressions de polynôme cubique.

La puissance moyenne consommée par une DBD augmente avec la fréquence (a) et la tension crête. La puissance est fondamentale (b), le signal carré consommant environ 2 fois plus que le sinus pour une même tension crête, et 3 fois plus que le triangle. La puissance consommée par les signaux en dents de scie est similaire de celle consommée par le triangle et aurait été

avec la fréquence, la [Figure 15](#) révèle une croissance. Au-delà de 2500 Hz, l'augmentation de la puissance entraîne un effet de saturation (a). En revanche, le passage à un signal carré conduit à une croissance un peu plus rapide, en plus d'



**Figure 15.** Puissance moyenne consommée par une DBD en fonction de la fréquence pour différentes tensions (a) et formes d'onde (b).









la tension. Par ailleurs, si la vitesse moyenne augmente avec la tension pour les deux polarités, elle croît plus vite en négatif malgré un jet plus rapide en positif à 6 kV.

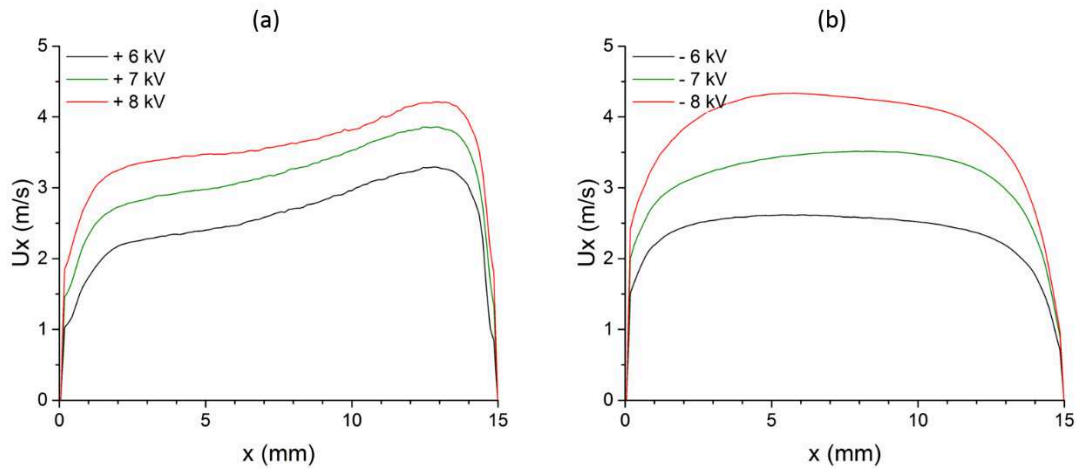


Figure 17. Profils de vitesse moyenne longitudinaux (x) en y = 0 mm pour différentes tensions continues positives (a) et négatives (b).

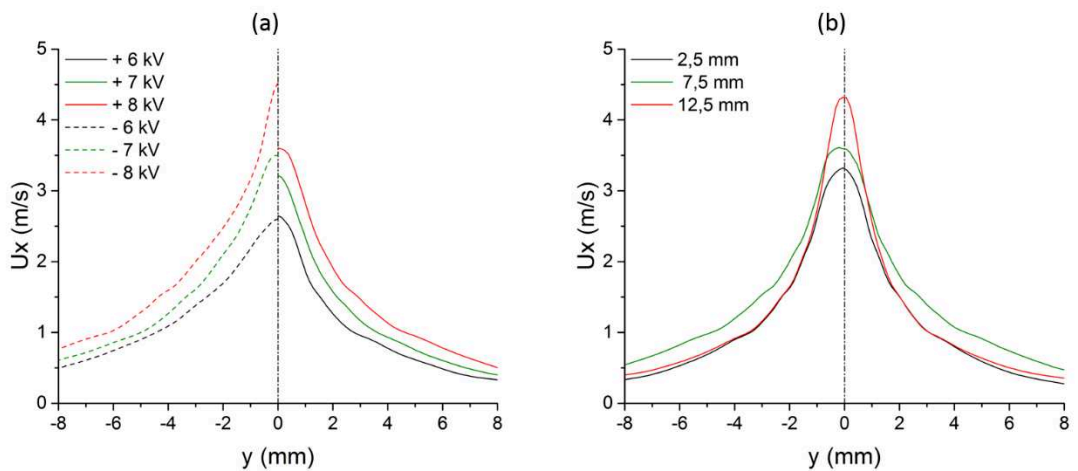


Figure 18. Profils de vitesse moyenne transversaux (y) en x = 7,5 mm pour différentes tensions (a), et pour une tension de 8 kV à différentes distances de la pointe (b).

Les profils de vitesse transversaux à la moitié du gap ( $x = 7,5 \text{ mm}$ ) sont représentés sur la Figure 18a. Pour faciliter la comparaison entre polarités, seule la moitié des profils est représentée, avec le positif en trait plein et le négatif en tirets. De manière générale, la vitesse est toujours maximale au centre du jet, en face de la pointe, même quand le jet est plus étendu et sa vitesse maximale croît plus vite avec la tension, cette augmentation étant principalement concentrée au centre du jet, alors que le jet positif accélère de façon plus progressive. Par le jet positif, puisque lors de celle-ci, la vitesse maximale croît plus vite avec la tension (environ +0,3 m/s par kV), la Figure 18b illustre l'augmentation de vitesse (environ +0,3 m/s par kV) au centre du jet.

du jet a accéléré de 0,7 m/s alors que le reste du jet est revenu à sa vitesse initiale (en  $x = 2,5$  mm). La présence de cette accélération alors que le jet commence à se disperser à contrer les effets visqueux du fluide.

### 3.3.2 Vitesse instantanée et régime instationnaire

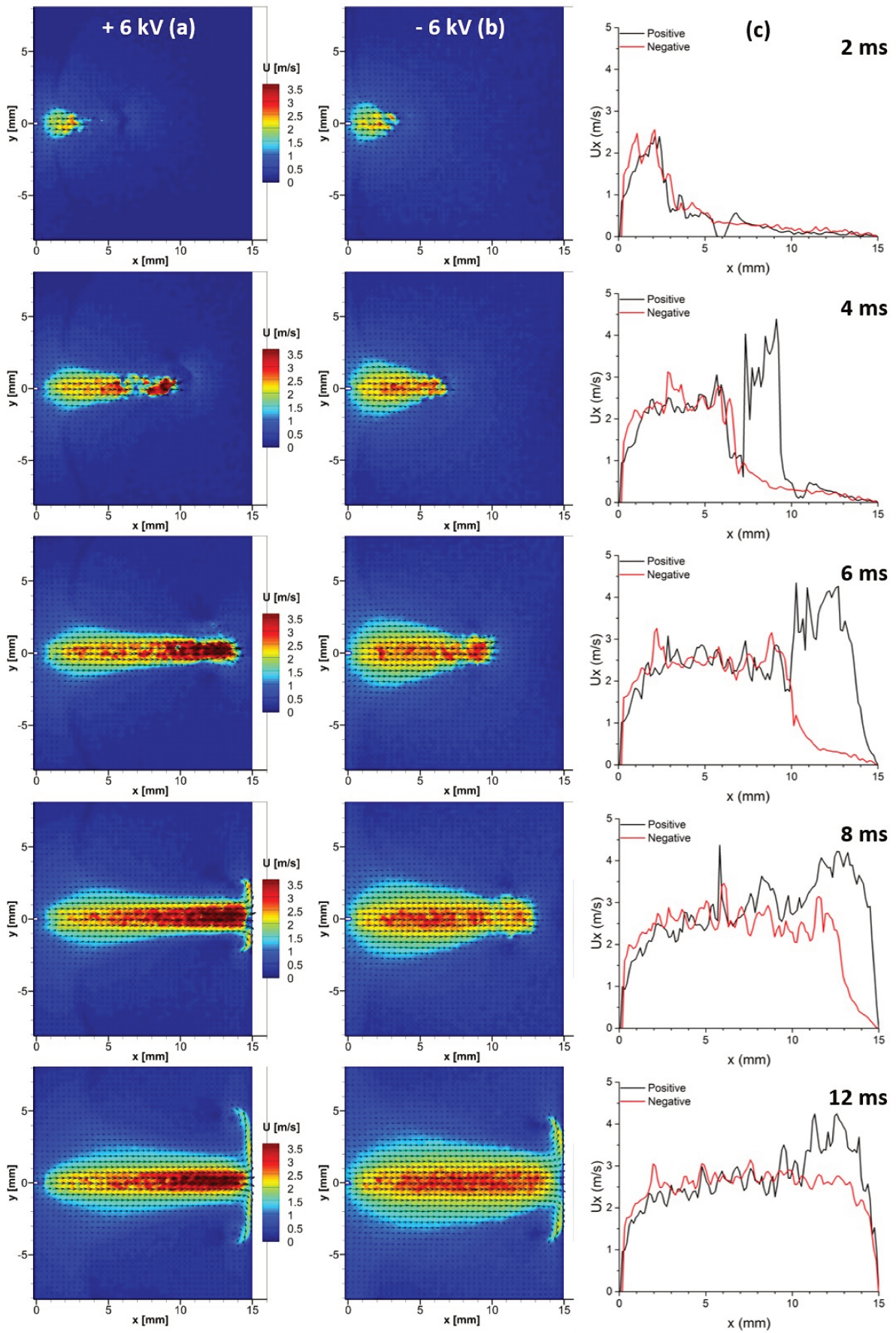
Cette sous-  
engendré par le vent ionique. Dans un premier temps, la [Figure 19](#) de tension en  $t = 0$  pour +6 kV et -6 kV à différents instants ( $t = 2, 4, 6, 8$  et 12 ms). Les colonnes de gauche (a) et du milieu (b) montrent les champs de vitesse pour les décharges positive et négative, respectivement. De plus, sur la colonne de droite (c), les profils de la composante horizontale de vitesse  $U_x$  ionique et la progression du front du jet.

Premièrement, dans le cas de la décharge positive (a), un jet fin part de la pointe et  $\dots$  -ci est atteinte au  $\dots$  millisecondes, résultant en un jet impactant générant une paire de  $\dots$  3 millisecondes, une zone de survitesse apparaît quelques millimètres en amont du jet (entre  $x = 7$  et 10 mm à  $t = \dots$  millisecondes. Cette zone de survitesse correspond à la partie accélérée sur la seconde moitié du jet observé précédemment sur les champs moyens ([Fig. 18](#)). Enfin, il y a  $\dots$  vaguelette  $\dots$  6,5 mm pour  $t = 2$  ms, et à  $x = 11$  mm pour  $t = 4$  ms) ; elle est rattrapée par le jet vers 5 millisecondes à environ 10 mm de la pointe.

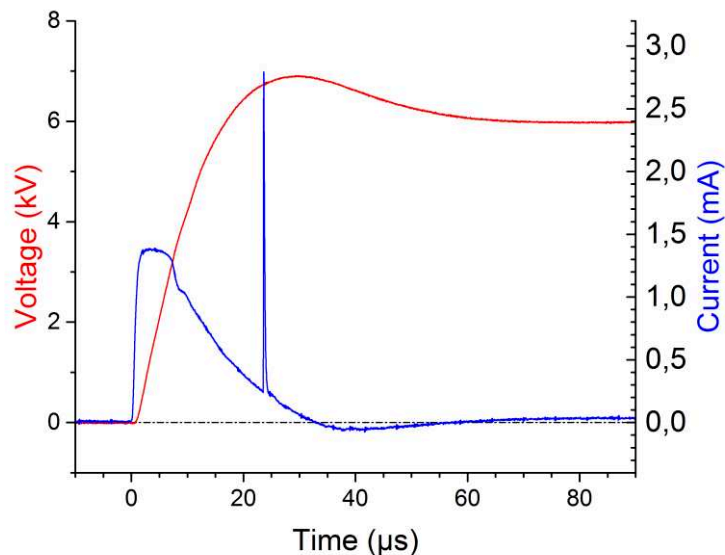
[Figure 19b](#)  $\dots$  pas de pic de vitesse aussi marqué, ni de zones de survitesse en amont du jet, renforçant  $\dots$  présence de streamers.

[Figure 19.](#) Champs de vitesse instantanée pour une décharge couronne continue à + 6 kV (a) et - 6 kV (b)  $\dots$  pointe (x) en  $y = 0$  (c). La pointe est mise sous tension à  $t = 0$ . (Ci-contre).





La zone de survitesse qui doit probablement prendre sa cause dans la brusque augmentation de la tension. En effet, sur la [Figure 20](#), qui représente la réponse en courant de la décharge à la mise sous tension (à + 6 kV), il apparaît deux phénomènes : la réponse capacitive à la rampe de tension, dont le pic principal situé de  $t = 0$  à  $30 \mu\text{s}$  appelle un courant maximum de 1,4 milliampères ; un streamer solitaire à  $t = 25 \mu\text{s}$  avec une amplitude de 2,8 mA. Ce streamer est toujours présent lors de la mise sous tension, mais avec une position (entre  $t = 10$  et  $30 \mu\text{s}$ ) et une amplitude (quelques milliampères) variables. Or, si la composante capacitive est présente et de même amplitude dans le positive. Il est alors raisonnable de penser que électrodes à proximité de la pointe électrique nouvellement imposé.



[Figure 20](#). Tension et courant de décharge à la mise sous tension continue à 6 kV du réacteur.

du jet sur une période plus longue, les cartes spatio-temporelles de la [Figure 21](#) représentent le module de la vitesse  $U$  en face de pointe ( $y = 0$ ) sur tout le gap (de  $x = 0$  à  $15 \text{ mm}$ ) en fonction du temps. Les stries visibles sur ces cartes marquent « bouffées » dans la littérature de la mécanique des fluides), de leur orientation dépend leur vitesse de propagation : plus la pente est faible plus la bouffée se déplace vite. car la strie associée (qui part de  $t = 0$ ) a une pente plus importante, cet effet étant plus marqué en négatif (b). Pour le jet positif (a) même distance de la pointe, sinon les premières zones toujours à la même valeur de  $x$ , ni avec une intensité constante. Par ailleurs, que ce soit en positif ou en négatif, il est rarement possible de suivre une bouffée individuelle sur plus

d'une dizaine de champs consécutifs, leur durée d'existence à une vitesse supérieure à la moyenne de l'écoulement étant trop courte. Enfin, il est intéressant de remarquer que la vitesse de propagation des bouffées (obtenue avec la pente des stries) est égale à la vitesse moyenne (temporelle et spatiale) du jet.

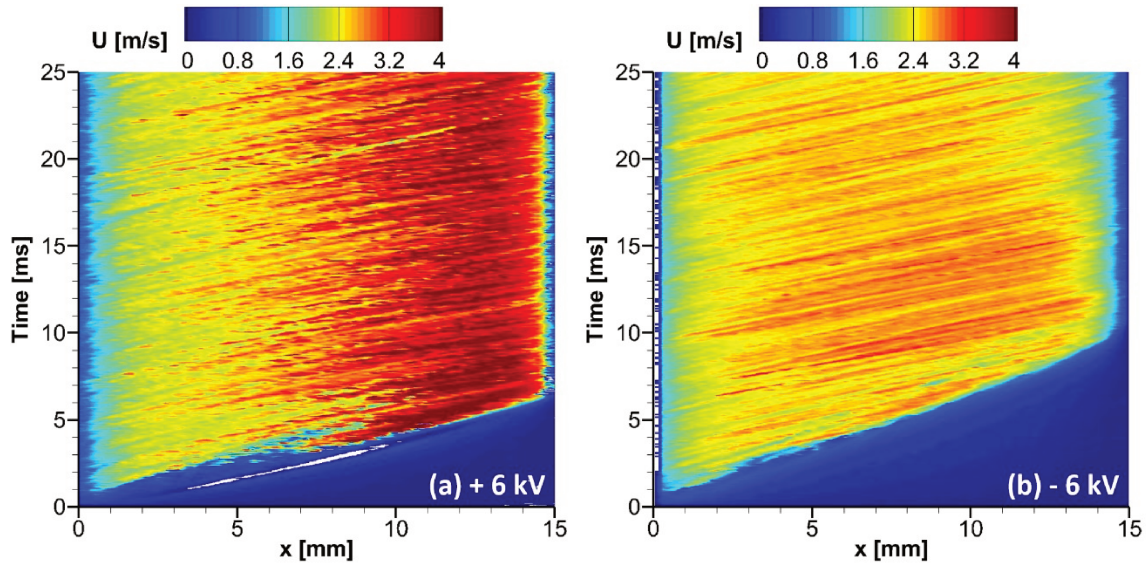


Figure 21. Cartes spatio-temporelles d'une décharge couronne continue à + 6 (a) et - 6 (b) kV.

Pour visualiser les fluctuations de la vitesse, l'écart type du signal permet de rendre compte des zones de fortes variations (Figure 22). Les fluctuations sont concentrées sur l'axe de la pointe ( $y = 0$ ), et elles sont plus fortes dans la seconde moitié du gap, à partir de 7 millimètres, ainsi qu'au bout de la pointe, vers  $x = 1,5$  mm. Pour la décharge positive, cela correspond aux zones d'accélération identifiées précédemment.

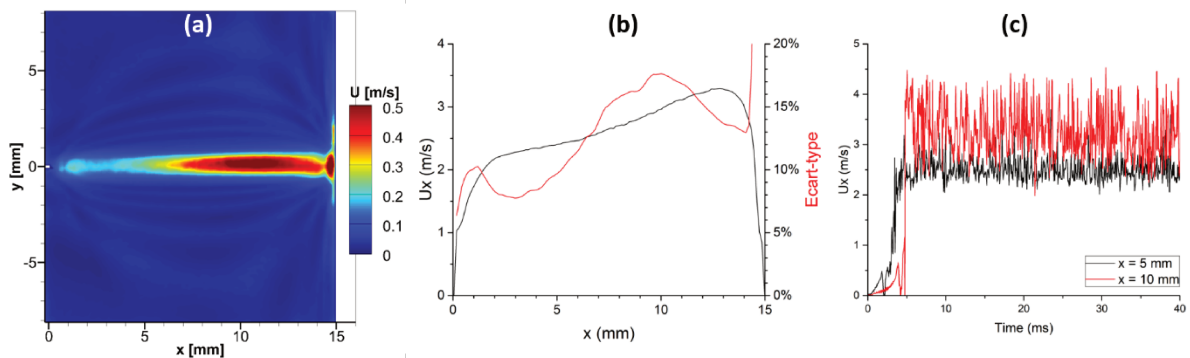


Figure 22. Champ d'écart-type de la vitesse (a), profil horizontal dans l'axe de la pointe ( $y = 0$ ) de la vitesse et de l'écart type normalisé (b) et vitesse horizontale en fonction du temps en ( $x = 5$  et  $10$  ;  $y = 0$ ) (c) d'une décharge couronne continue à + 6 kV.

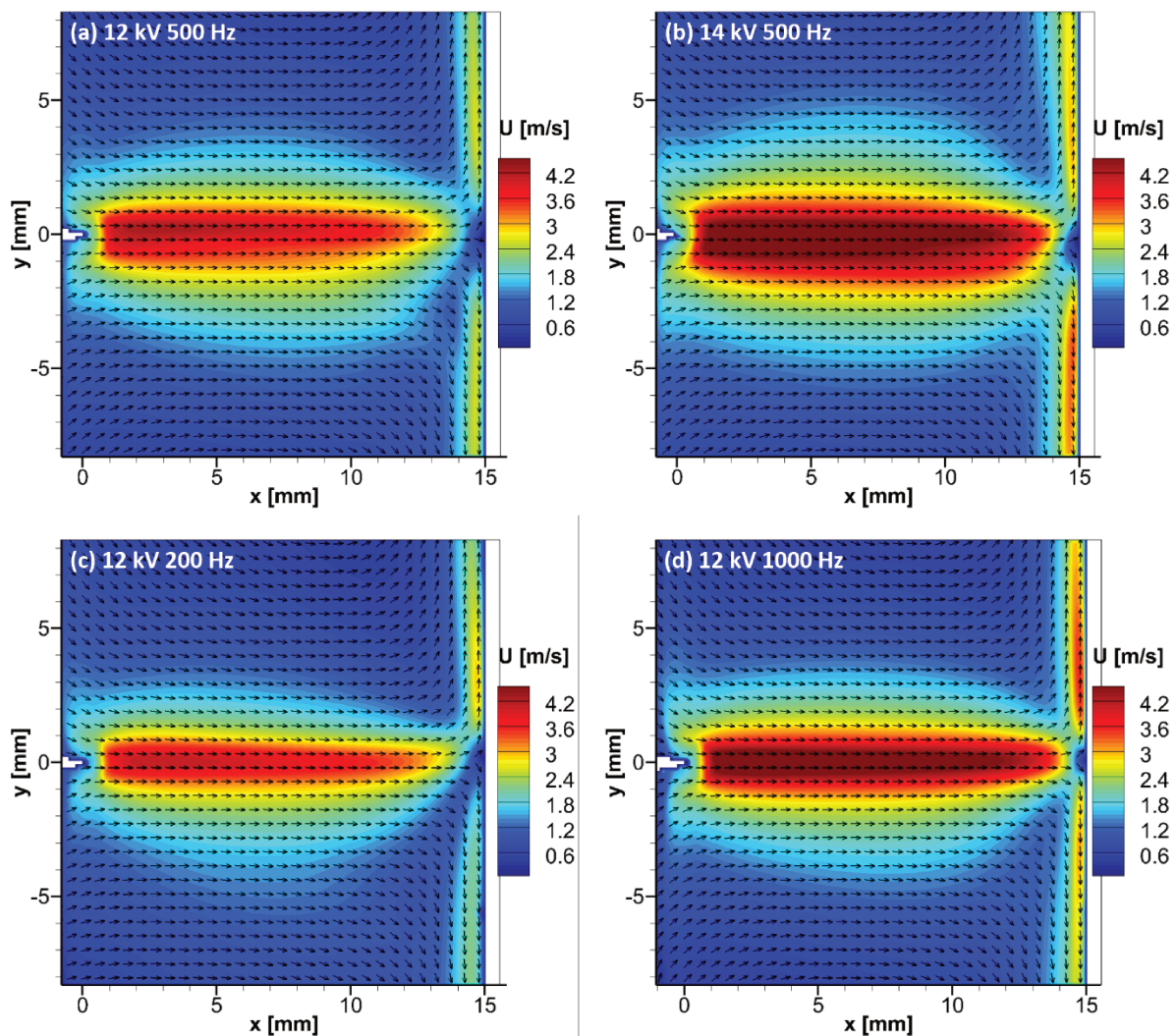


## 3.4 Décharge à Barrière Diélectrique

Cette partie présente les résultats des mesures par PIV obtenues pour des décharges à barrière diélectrique. Dans un premier temps, les caractéristiques de l'écoulement pour une forme d'onde sinusoïdale sont décrites puis, dans un second temps, ces caractéristiques sont comparées avec d'autres formes d'ondes.

### 3.4.1 Vitesse moyenne

Cette sous partie donne l'évolution des grandeurs moyennes de l'écoulement en fonction des paramètres de tension et de fréquence pour un signal sinusoïdal. Comme le montre la [Figure 17](#), en moyenne dans le temps, la DBD produit un jet de la pointe vers la plaque de manière similaire à une décharge couronne ([Figure 23](#)).



*Figure 23. Champs de vitesse moyenne d'une DBD pour un signal sinus à une tension de 12 kV (a, c et d) et 14 kV (b), et une fréquence de 200 Hz (c), 500 Hz (a et b) et 1000 Hz (d).*

façon significative la forme du jet, mais il est clair que la vitesse augmente avec la tension. De même, il semble que la vitesse augmente avec la fréquence ; à 12 kV, elle est plus importante à 500 Hz qu'à 100 Hz (d).

Les Figures 24 et 25 montrent les profils de vitesse horizontaux, respectivement, avec la tension (a) et la fréquence (b). Elles montrent que cette vitesse augmente avec les deux paramètres. Les profils horizontaux (Figure 24), en  $y = 0$ , confirment une vitesse décroissante avec la distance à la pointe, avec un maximum entre  $x = 5$  et  $10$  mm. Cette vitesse maximale est très différente de celles des décharges couronnes positives et négatives DC étudiées ci-avant, sans malheureusement que nous puissions la mesurer. De plus, la valeur de la tension et de la fréquence est très importante. Cette vitesse maximale sera discuté par la suite, cette plage de fréquence (aux environs de 500 Hz) correspond à une autre association de ces deux paramètres pourrait aboutir à une fréquence de transition différente.

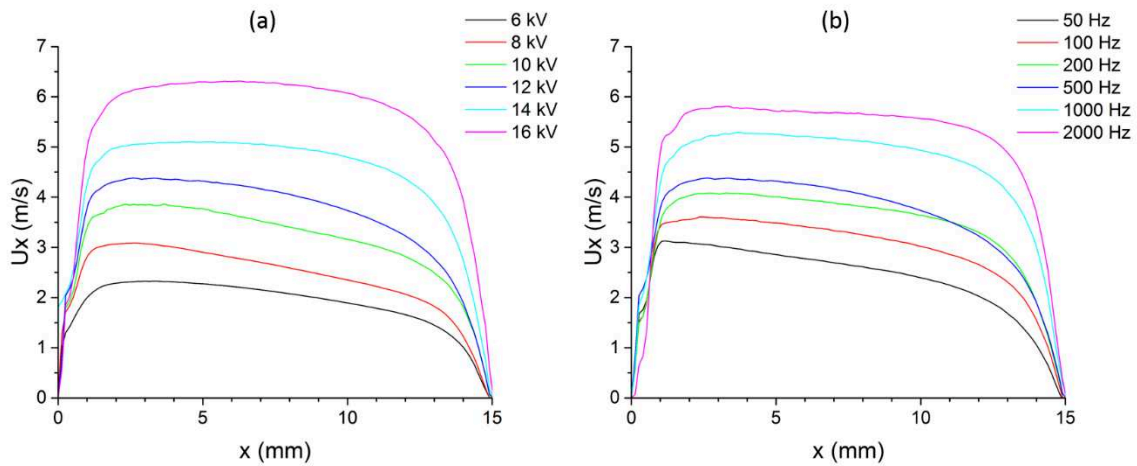


Figure 24 Profils de vitesse horizontaux en  $y = 0$  pour différentes tensions (a) et à  $V = 12$  kV pour différentes fréquences (b).

Les profils verticaux (Figure 25) montrent que la hausse due à la fréquence est concentrée sur le centre du jet. Comme décrit dans la partie suivante, la dissipation visqueuse des fluctuations dans le volume hors du jet en est la cause.



dire le taux d'ionisation des électrodes mais ne modifie pas de manière significative la dynamique temporelle de la charge. Les profils de vitesse moyenne verticaux ( $y$ ) en  $x = 5$  mm pour une DBD à 500 Hz pour différentes tensions (a) et à 12 kV pour différentes fréquences (b) sont présentés dans la Figure 25.

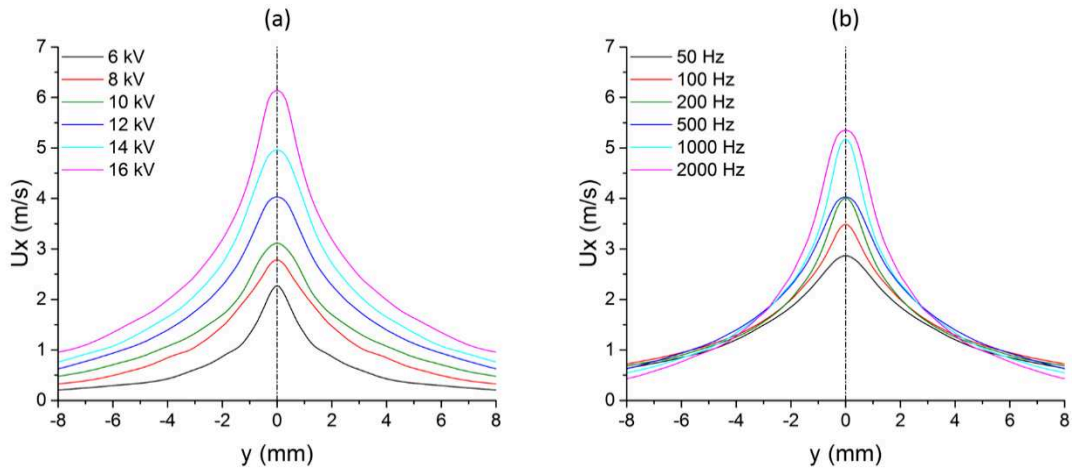
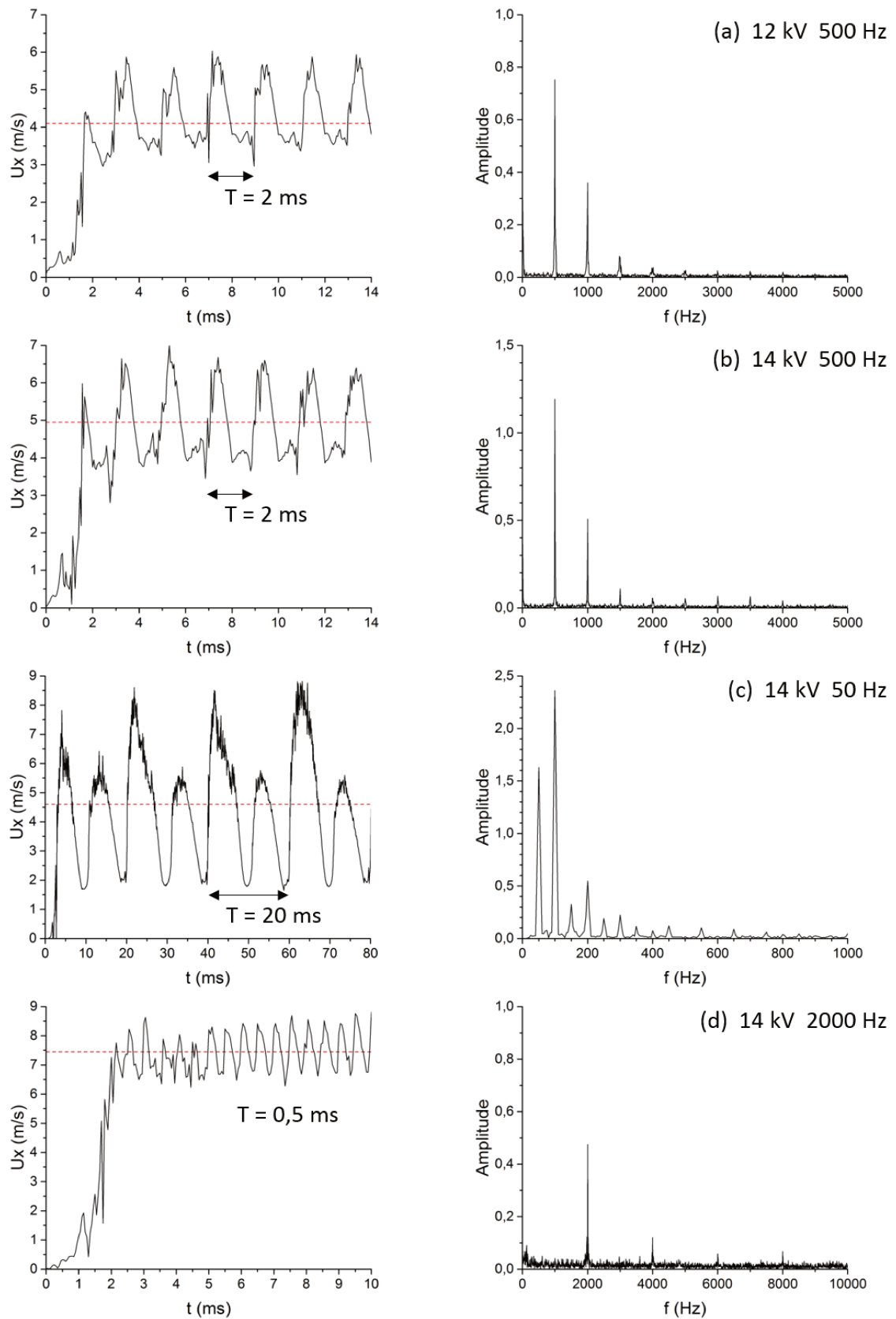


Figure 25. Profils de vitesse moyenne verticaux ( $y$ ) en  $x = 5$  mm pour une DBD à 500 Hz pour différentes tensions (a) et à 12 kV pour différentes fréquences (b).

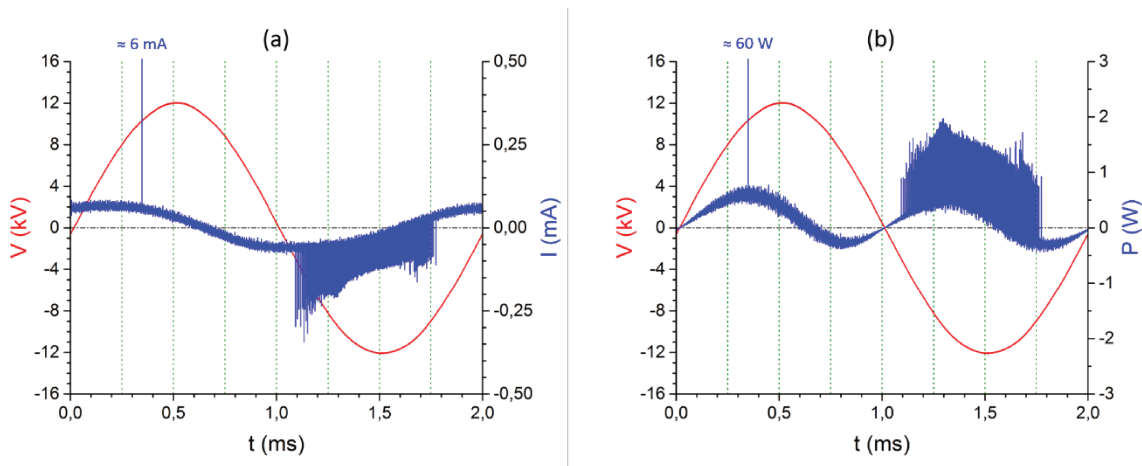
### 3.4.2 Vitesse instantanée

Dans cette sous partie, un regard est porté sur les signaux de vitesse instantanée  $u_x(t)$  pour différents cas, pris en  $x = 5$  mm et  $y = 0$ , ainsi que son spectre  $S(f)$ . La Figure 26 représente le signal de vitesse horizontale  $u_x(t)$  pour différents cas, pris en  $x = 5$  mm et  $y = 0$ , ainsi que son spectre  $S(f)$ . En (a), il est montré le signal  $u_x(t)$  pour une tension de 12 kV et une fréquence de 500 Hz. Pour avoir un signal périodique stable, la vitesse moyenne étant alors égale à environ 4 m/s. En (b), la fréquence est la même mais la tension est augmentée à 14 kV. Une fois le régime transitoire terminé, la vitesse moyenne est supérieure (5 m/s), comme vu précédemment, mais la dynamique du signal est inchangée, tout comme son spectre qui conserve les mêmes proportions entre les harmoniques. En revanche, (c) et (d) montrent le signal  $u_x(t)$  pour une tension de 12 kV et une fréquence de 2000 Hz. En conséquence, son spectre présente une première harmonique à 100 Hz plus forte que le fondamental à 2000 Hz. Pour les fréquences très élevées, ici 2000 Hz, le signal  $u_x(t)$  est plus triangulaire, ce qui se constate sur son spectre également.



*Figure 26. Signaux de vitesse d'une DBD en  $x=5$  mm et  $y=0$  dans le temps et leur spectre d'amplitude pour une tension sinus à 12 kV (a) et 14 kV (b, c et d), et une fréquence de 50 Hz (c), 500 Hz (a et b) et 2000 Hz (d). La vitesse moyenne est représentée en pointillés rouges.*

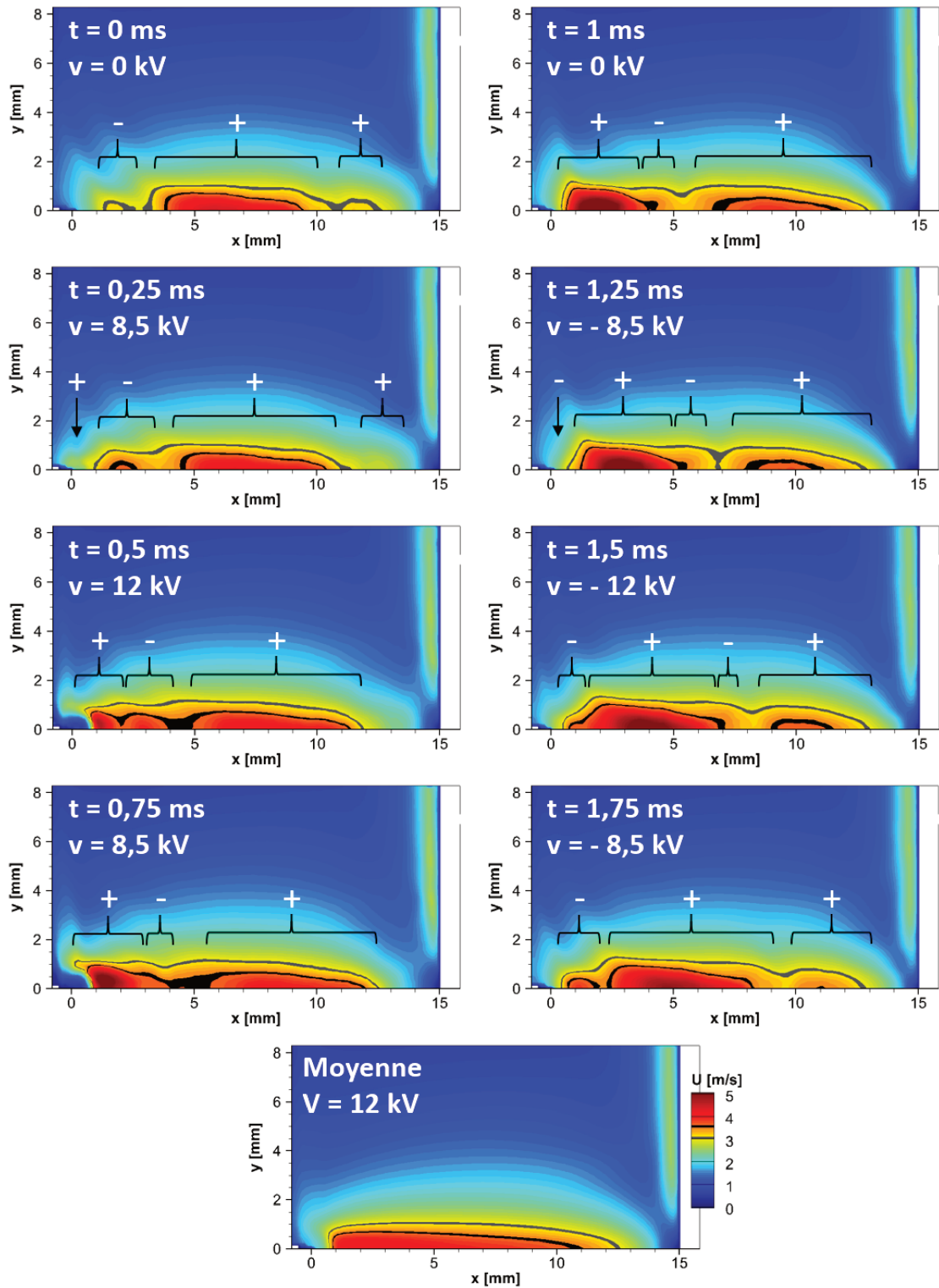




*Figure 27. Courant (a) et puissance (b) de décharge d'une DBD à 12 kV et 500 Hz, en bleu, et signal de tension appliqué, en rouge. Les lignes pointillées vertes correspondent aux instants choisis pour les champs de vitesse de la [Figure 28](#).*

La [Figure 28](#) montre le champ de vitesse moyenne ainsi que des moyennes de phases à 8 instants différents. Elle ne permet malheureusement pas de suivre précisément ces bouffées dans l'espace inter-électrodes au cours du temps car il faut visualiser et analyser beaucoup plus de phases pour comprendre la dynamique des phénomènes EHD. **L'interprétation qui va suivre n'est donc pas le résultat de l'analyse de la seule [Figure 28](#), mais de toutes les moyennes de phases, c'est-à-dire une phase toutes les 50 microsecondes.**

À  $t = 0$ , trois de ces bouffées sont identifiables dans le gap, deux petites à  $x = 1,5$  et  $11,5$  mm, et une grande entre  $x = 4$  et  $9$  mm. Ces bouffées sont le résultat des deux périodes de tension précédente puisqu'une bouffée met plusieurs millisecondes pour atteindre la plaque et que la fréquence est ici égale à 500 Hz. 250 microsecondes plus tard, la bouffée la plus proche de la paroi a quasiment disparu et les deux autres ont légèrement avancé. A ce stade, aucune nouvelle bouffée n'apparaît, bien que la décharge positive ait commencé puisque la tension appliquée est de 8,5 kV. À  $t = 0,5$  ms, au maximum de la tension (12 kV), une bouffée, appelé « positive », est en cours d'émission. Il faut noter que lors de la décharge positive, les particules d'huile proches de la pointe sont temporairement éjectées, ce qui empêche toute mesure de la vitesse dans une sphère d'un millimètre de rayon. À  $t = 0,75$  ms, cette bouffée n'accélère plus et commence à avancer dans le gap. À  $t = 1$  ms, la tension s'annule il n'y a donc plus de charges d'espace créées ni de champ électrique, les bouffées poursuivent donc leur mouvement à vitesse constante et la bouffée positive se détache de la pointe. Cette bouffée étant rapide, elle rattrape progressivement celle à  $x = 4,5$  mm. À  $t = 1,25$  ms, la décharge négative a commencé et une bouffée négative commence à se former en  $x = 1$  mm, juste derrière la positive mais beaucoup plus faible, ce qui la rend difficilement visible à ce stade sur ces représentations. À 1,5 ms, la bouffée négative continue d'accélérer et la positive s'allonge rapidement. À 1,75 ms, la décharge négative est terminée et la bouffée négative atteint sa vitesse maximum. Enfin au bout d'une période complète de 2 millisecondes, à  $t = 0$ , la tension s'annule à nouveau et toutes les bouffées ralentissent progressivement.



*Figure 28. Champs de vitesse en moyenne de phase d'une DBD sinus à 12 kV et 500 Hz à différents instants. Les lignes sombres marquent les seuils de 3 m/s et 3,5 m/s.*



Plusieurs remarques peuvent être faites. Premièrement, les bouffées positives sont nettement plus rapides et étendues que les bouffées négatives ; ce sont donc elles qui contribuent le plus à la vitesse moyenne du jet. Ce résultat est étonnant car à cette fréquence les streamers positifs sont peu nombreux et contribuent donc probablement à générer la charge positive (Partie 3) que la décharge couronne positive produit plus de vitesse que la décharge négative, ce résultat est finalement la bouffée positive perd lentement en vitesse, par dissipation visqueuse, après  $t = 1$  ms. La force est ensuite principalement inertiel.

Malheureusement, la représentation en champs de vitesse statique limite la résolution temporelle des phénomènes. En effet, seul un champ sur cinq (dans ce cas à 500 Hz) est enregistré et le suivi des bouffées comme cela serait le cas sur une vidéo ou une animation. Pour pallier à ceci, la Figure 29 illustre le cours du temps, mise en rapport avec le signal de tension.

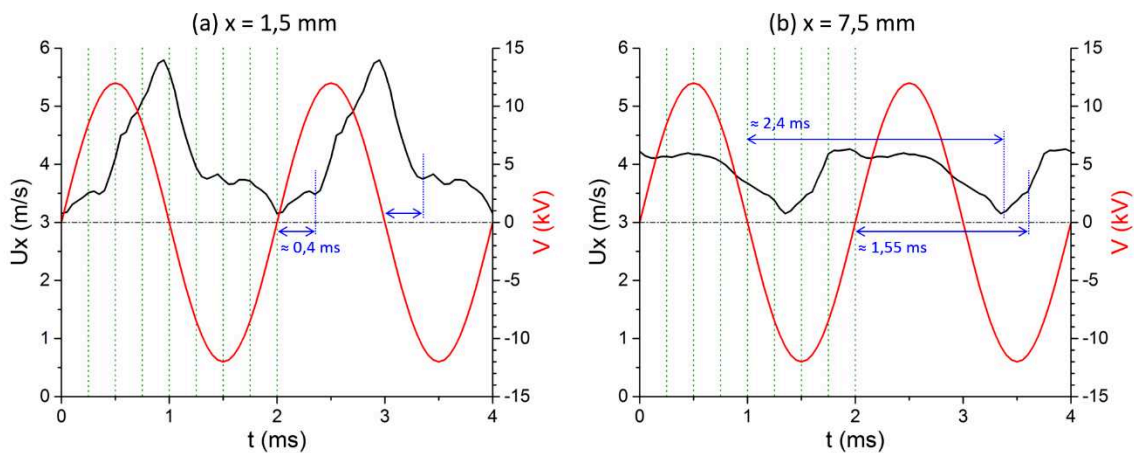


Figure 29 : Courbes de la vitesse  $U_x$  (m/s) et de la tension  $V$  (kV) en fonction du temps  $t$  (ms) à  $x = 0$  et  $x = 1,5$  (a) et  $7,5$  (b) mm. Les lignes pointillées vertes correspondent aux instants choisis pour les champs de vitesse de la Figure 28.

Comme déjà visible sur les signaux de vitesse instantanée (Fig. 26a), il y a une bouffée émise de vitesse par période, ce qui indique comme précédemment une bouffée émise par période. Sur (a) et (b), on voit que la bouffée positive est plus étendue que la bouffée négative. À  $x = 0$  et le point de mesure en  $x = 1,5$  mm, le maximum de vitesse de la bouffée passant par le point de mesure est atteint à  $t \approx 0,4$  ms.

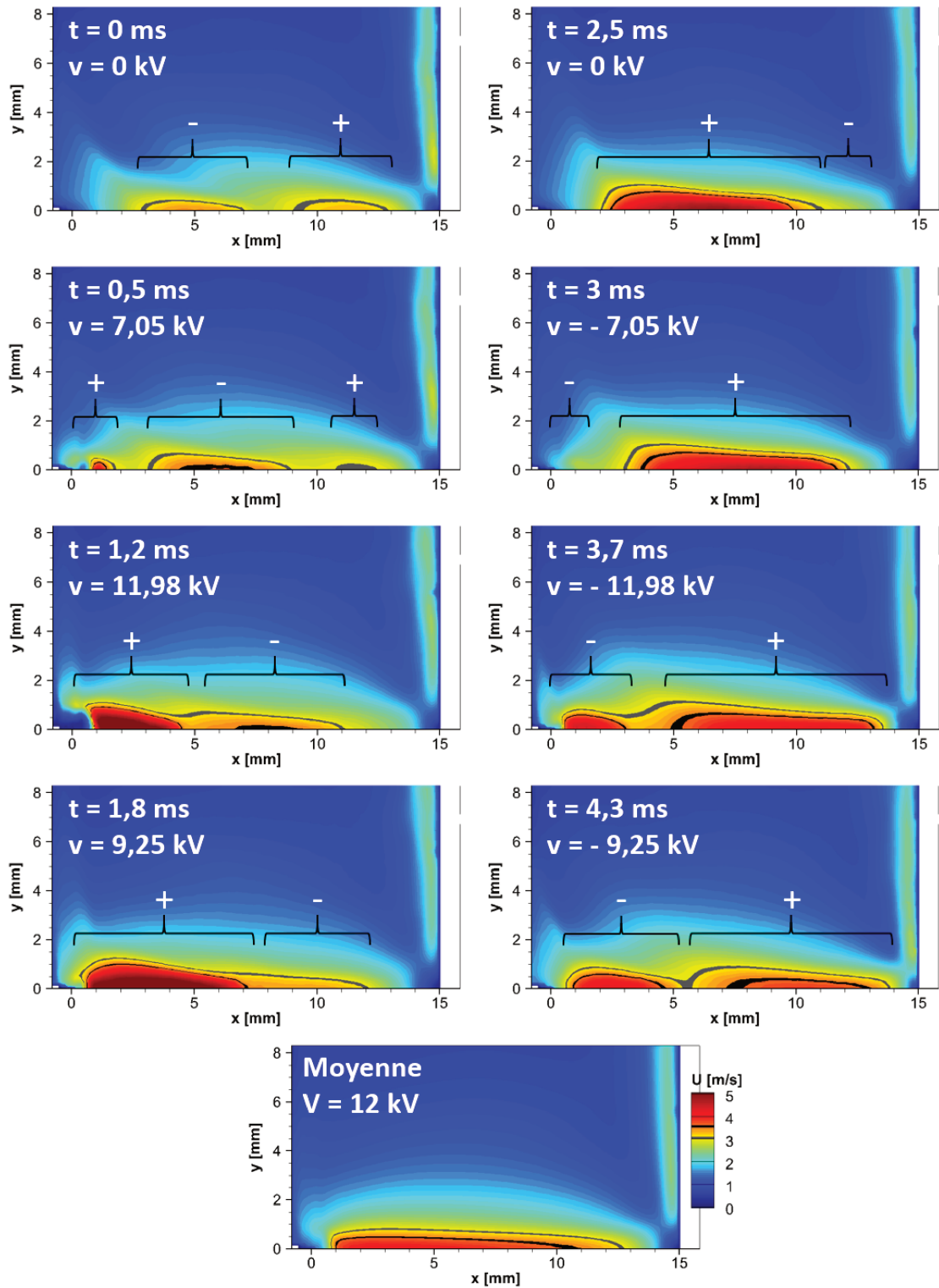


Figure 30. Champs de vitesse en moyenne de phase d'une DBD sinus à 12 kV et 200 Hz à différents instants. Les lignes sombres marquent les seuils de 3 m/s et 3,5 m/s.

La bouffée négative, bien que faible, est également visible sur (a) à  $t = 1,35$  et  $2$  ms. Elle présente le même décalage temporel par rapport à la tension  $V_i$  sur place à  $x = 1,5$  mm (Fig. 28 à  $t = 0$ ), et accélère à nouveau après  $t = 2$  ms, poussé par la bouffée positive en approche. En  $x = 7,5$  mm (b), le retard de la bouffée positive sur la tension est du fait de la viscosité du gaz. La bouffée négative est alors à peine visible entre  $t = 1,35$  et  $1,55$  ms, car elle est en train de fusionner avec la bouffée positive qui la rattrape progressivement.

### 3.4.5 Cas basse fréquence (sinus, 12 kV, 200 Hz)

À basse fréquence (sinus, 12 kV, 200 Hz), comme pour la Figure 30, les bouffées sont plus marquées et distinctes les unes des autres, tout d'abord positive démarre un peu avant  $t = 0,5$  ms et elle prend fin en se détachant de la pointe peu après  $t = 1,8$  ms. Les deux polarités ont ensuite un comportement similaire au cas précédent, elles

à  $x = 1,5$  mm (a) et  $7,5$  mm (b). Les lignes pointillées vertes correspondent aux instants choisis pour les champs de vitesse de la Figure 30.

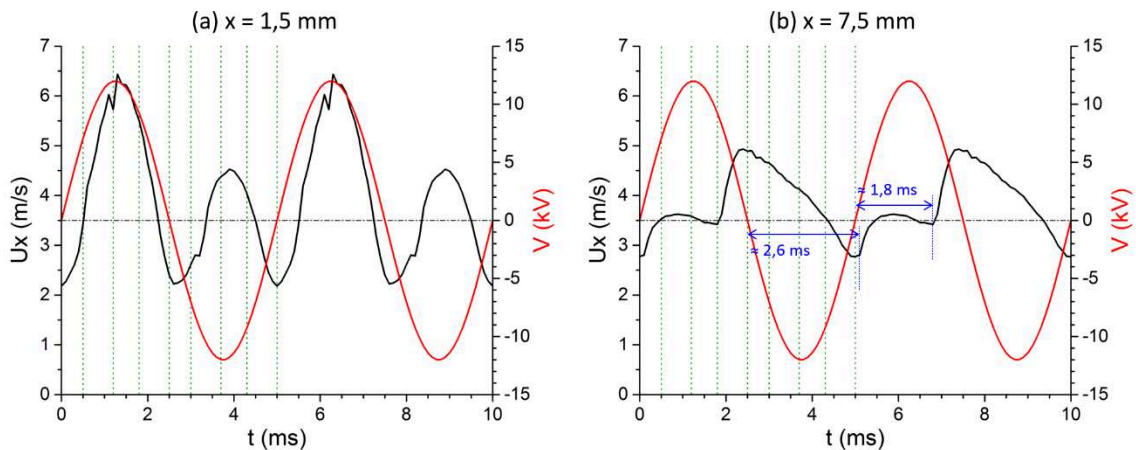


Figure 31 : à  $x = 1,5$  (a) et  $7,5$  (b) mm. Les lignes pointillées vertes correspondent aux instants choisis pour les champs de vitesse de la Figure 30.

En  $x = 1,5$  mm (a), la bouffée positive atteint un maximum de  $6,5$  m/s tandis que la négative ne dépasse pas  $4,5$  m/s, pour une vitesse moyenne de  $3,9$  m/s. À cette échelle de temps, les maxima de vitesse et de tension sont quasiment synchronisés, ainsi que les passages à zéro de la tension avec les minima de vitesse.



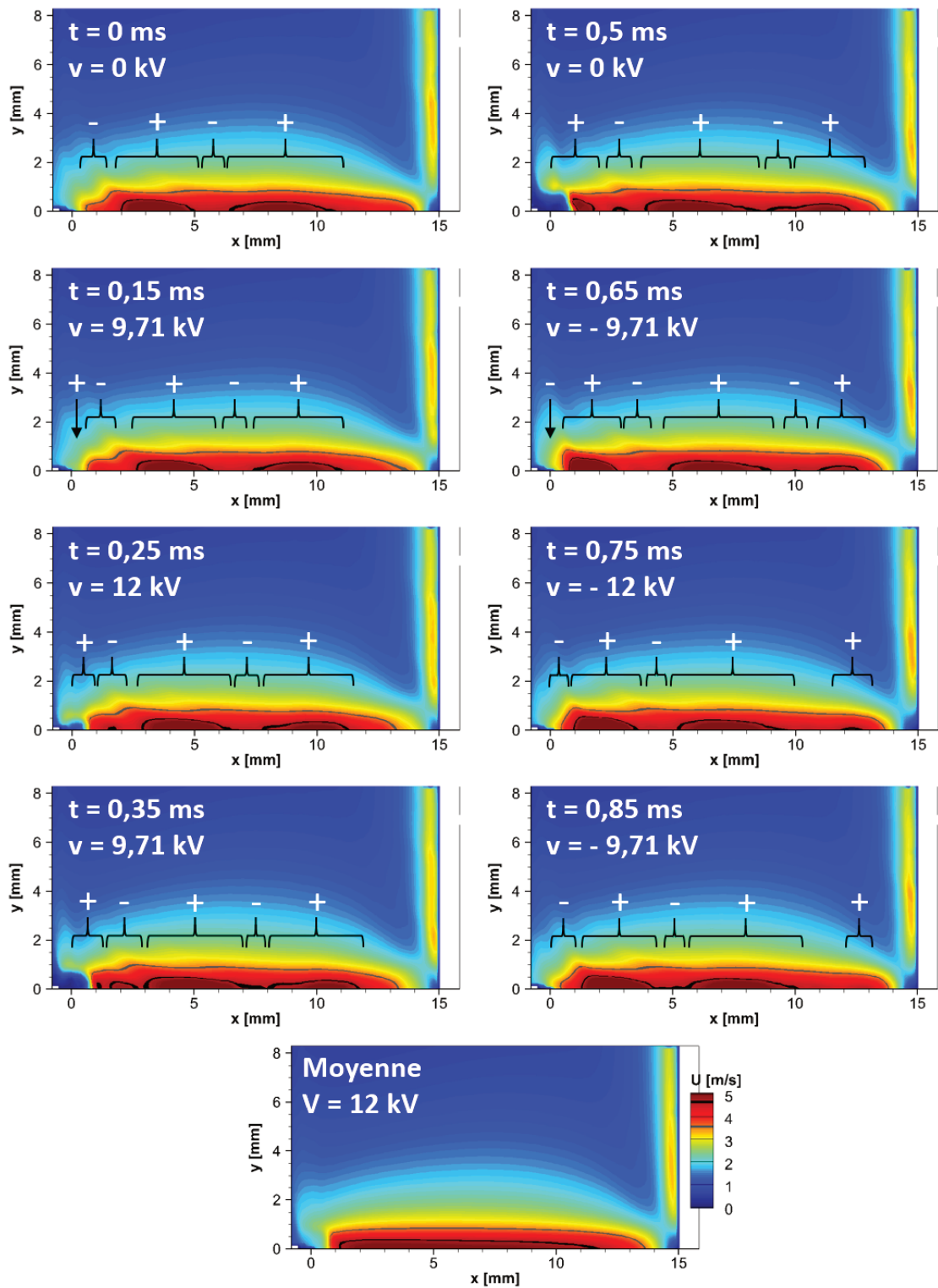


Figure 32. Champs de vitesse en moyenne de phase d'une DBD sinus à 12 kV et 1000 Hz à différents instants. Les lignes sombres marquent les seuils de 3,5 m/s et 4,6 m/s.

En  $x = 7,5$  mm (b), les bouffées se sont étalées et présentent une plus faible amplitude, pour une vitesse moyenne quasi-inchangée (3,8 m/s). De plus, la bouffée positive vitesse derrière la bouffée négative à  $t = 1,8$  ms comparée à la vitesse amont en  $t = 0$ . Pour millisecondes pour les pics négatifs, cette différence étant due à la différence de vitesse de propagation entre les bouffées des deux polarités.

### 3.4.6 Cas haute fréquence (sinus, 12 kV, 1000 Hz)

Pour les fréquences supérieures à 500 Hz, ici 1000 Hz pour la Figure 32, le jet se positive apparaît tardivement dans la période, vers  $t = 0,3$  ms, peu après le maximum de est plus est plus

Sur la Figure 33, en  $y = 0$  et  $x = 1,5$  mm (a), la bouffée positive atteint 6,8 m/s et présente est plus est plus du cas basse fréquence (Fig. 31a), les maxima de vitesse sont en opposition de phase avec le signal de tension. En  $x = 7,5$  mm (b) bouffée clairement visible (la positive) générant un signal quasi sinusoïdal de faible amplitude ( $\pm 0,6$  m/s), avec la même moyenne que précédemment (5 m/s) et un retard de 1,45 ms sur la tension, soit une période et demie.

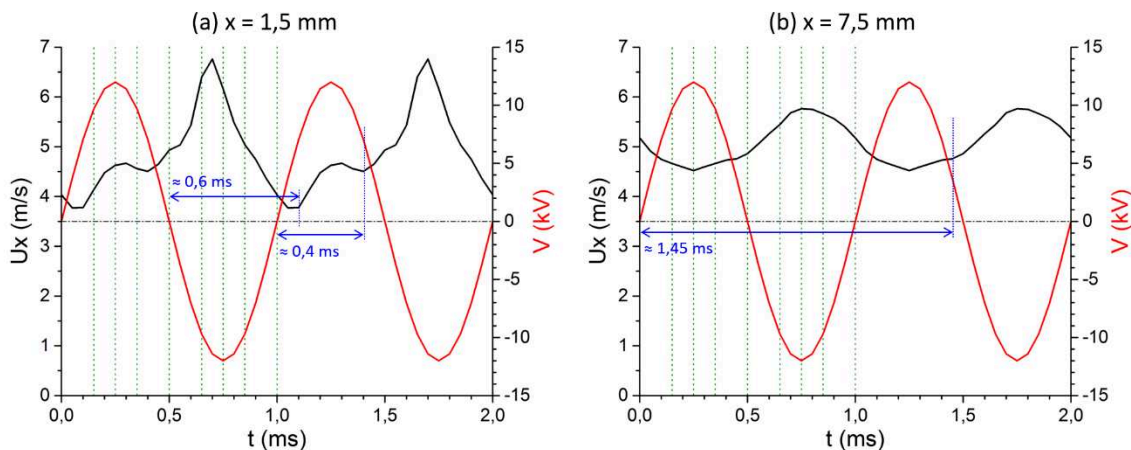
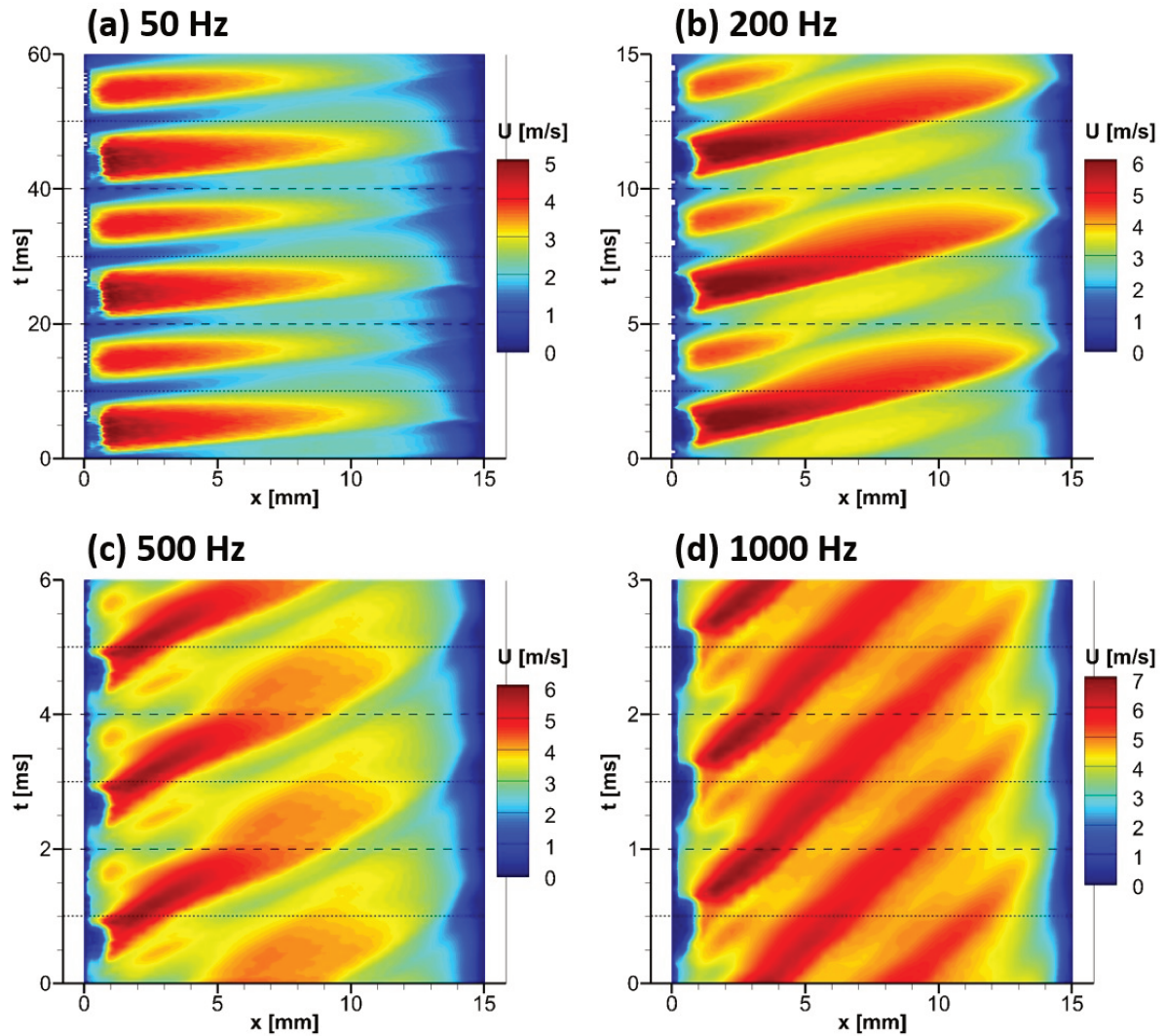


Figure 33 à  $y = 0$  et  $x = 1,5$  (a) et  $7,5$  (b) mm. Les lignes pointillées vertes correspondent aux instants choisis pour les champs de vitesse de la Figure 32.



Enfin, à haute fréquence (d), ici 1000 Hz, le nombre simultanée de bouffées dans l'espace inter-électrodes devient plus élevé, mais la durée d'existence des bouffées négatives devenant très courte, elles ne perturbent plus la production régulière des bouffées positives. Il est alors à nouveau possible d'extraire leur vitesse de leur pente, ce qui donne environ 5,7 m/s, égale à la vitesse moyenne calculée.



*Figure 34. Cartes spatio-temporelles de la vitesse suivant l'axe  $y = 0$  pour des DBD sinus à 12 kV et différentes fréquences. Les lignes tirets larges séparent les périodes, les lignes pointillées fines marquent le passage d'une polarité négative à positive.*

### 3.5 $\dot{V}_j \ll \dot{V}_i$

Cette dernière sous-  
 les différences vis-à-  
 induit.

#### 3.5.1 Ecoulement moyen

Au niveau de [Figure 35](#),  
 puissance électrique consommée (voir [Fig. 14b](#)), avec 0,91 W contre 0,35 W pour le signal  
 pointe mais sensiblement plus étroit pour les signaux triangles (c) et en dents de scie  
 down (d). Le coût énergétique est cependant un peu plus faible (0,21 et 0,23 W  
 respectivement). Pour le signal en dents de scie up, le jet moyen est très similaire à celui  
 de la dent de scie down, pour une consommation électrique de 0,25 W.

Sur la [Figure 36](#),  
 mm (b) des champs de vitesse précédents sont tracés. Pour les profils horizontaux (a),  
 que nous commenterons plus loin. Pour les autres signaux, la forme générale des profils  
 est à peu près la même, sauf à proximité de la pointe où la vitesse obtenue avec le signal  
 sinus atteint son maximum dès  $x = 2,5$  mm, tandis que le signal en dents de scie par  
 exemple atteint sa vitesse maximum vers  $x = 8,5$  mm. Cela montre bien que, en dépit du  
 fait que les profils aient une même allure générale,  
 négligeable sur la ré-  
 électrodes.

De plus, comme constaté sur les champs de vitesse, le signal carré engendre un jet  
 beaucoup plus rapide et atteint 7,5 m/s alors que la vitesse moyenne est de 5 m/s pour  
 celui du jet produit par le signal  
 carré montre une augmentation de la vitesse sur toute la largeur par rapport au cas sinus,  
 de +0,5 m/s en périphérie ( $y = 8$  mm) à +2,6 m/s au centre ( $y = 0$ )  
 pour les profils horizontaux, la vitesse au centre du jet ( $y = 0$ ) pour les signaux  
 triangulaires et en dents de scie est proche du cas sinus. Par contre, ces jets sont plus  
 étroits avec une réduction de  
 toujours par rapport au cas sinus.



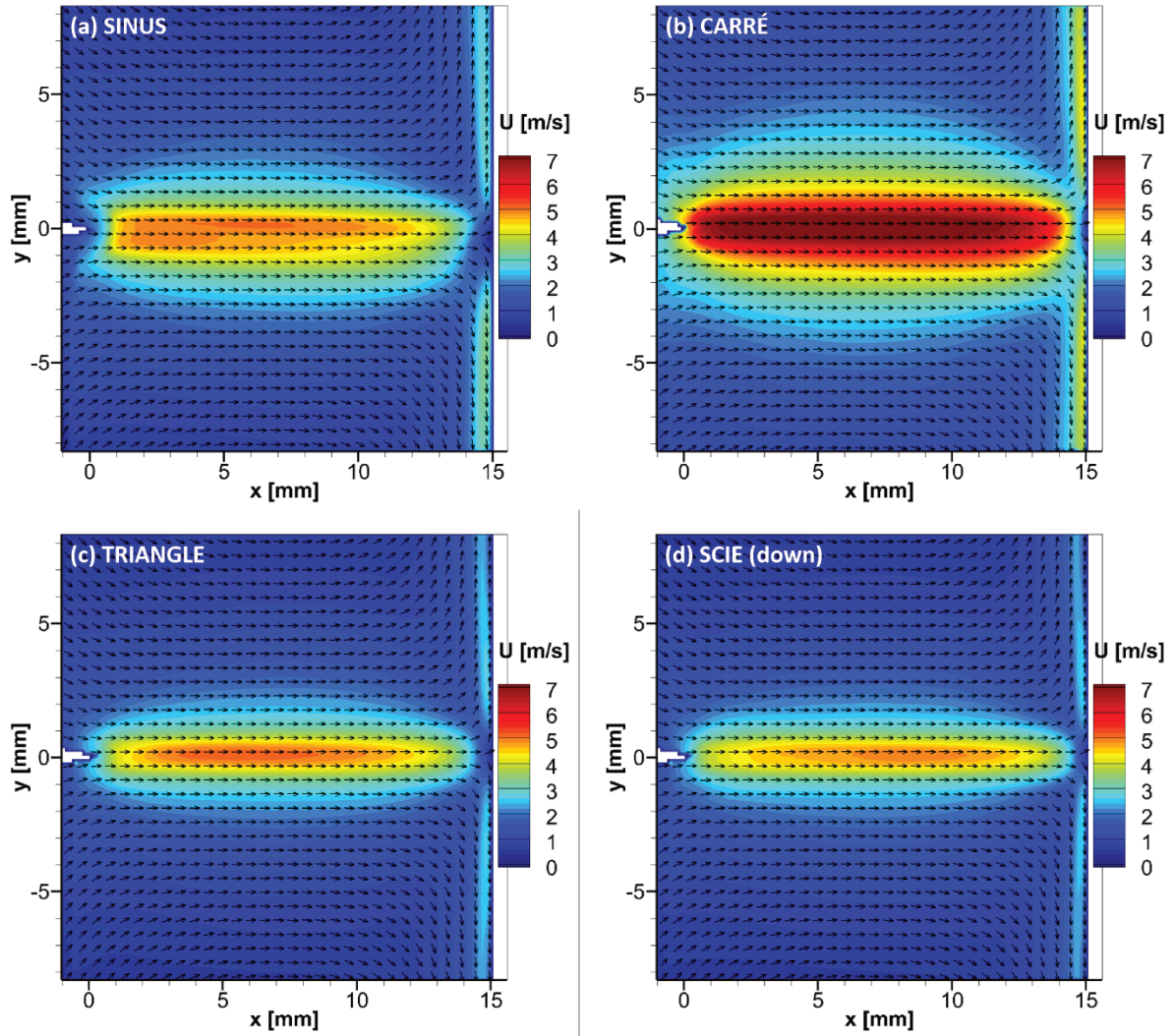


Figure 35. Champs de vitesse moyenne d'une DBD pour une tension alternative à 500 Hz de 14 kV, pour différentes formes d'ondes.

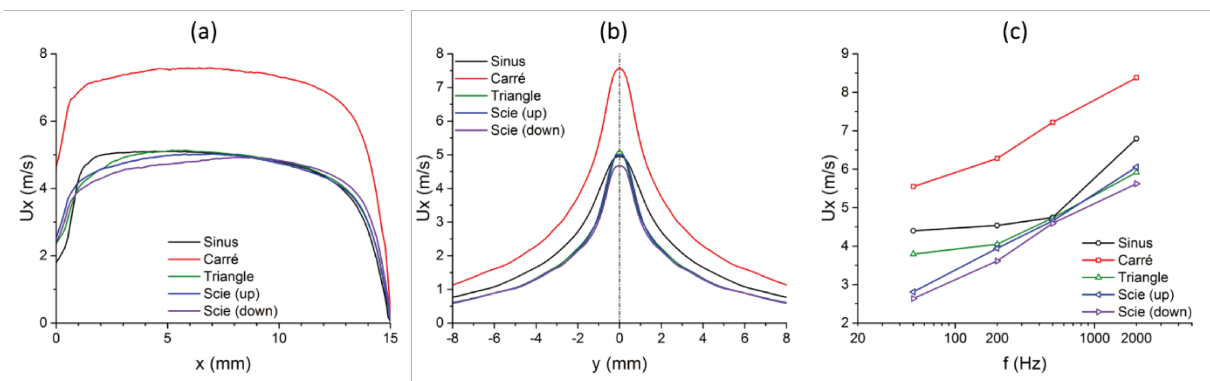
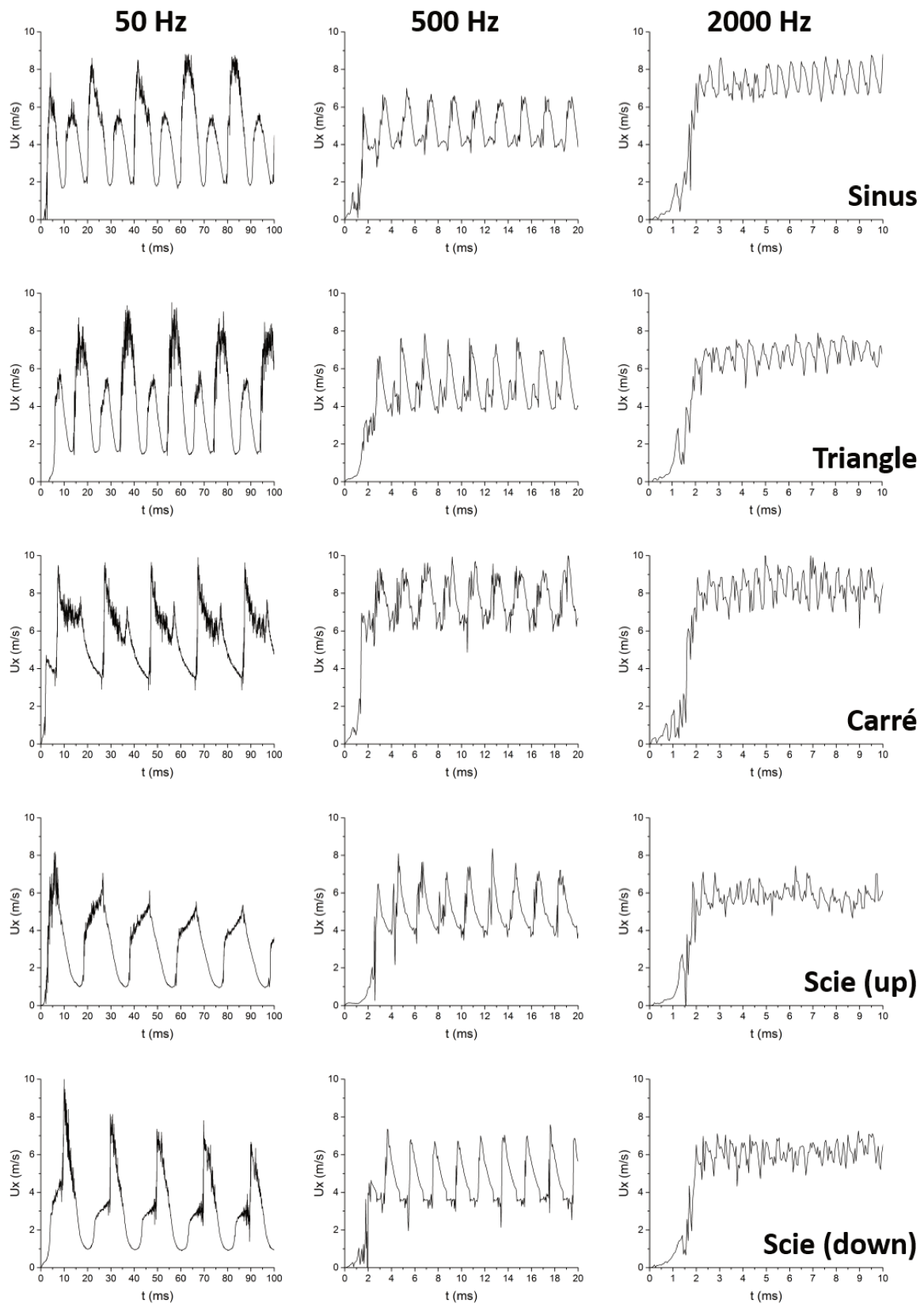


Figure 36. Profils de vitesse moyenne pour une DBD à 14 kV et 500 Hz avec différentes formes d'ondes, horizontaux en  $y = 0$  (a) et verticaux en  $x = 5$  mm (b), et évolution de la vitesse moyenne du jet produit par la même décharge en fonction de la fréquence (c).

Enfin, en considérant la moyenne spatiale des profils (a) la fréquence est tracée sur (c) est régulière, tandis que les signaux triangles et sinus présentent un changement de dynamique vers 200 Hz et vers 500 Hz, respectivement. Comme vue précédemment, cette par période.

En effet, ce phénomène est également présente, comme le montre la Figure 37. À basse fréquence (50 Hz), le jet émis avec un signal triangle est très une plus courte (la négative), qui sont rapidement décroissantes. Enfin, les signaux en période émise avant la brusque inversion de polarité pour la scie montante, et après signal relativement périodique. Enfin, à haute fréquence (2000 Hz), seul le signal triangle présente encore des jets plus erratiques ou mal résolus temporellement par la mesure PIV qui fonctionne à 20 kHz.

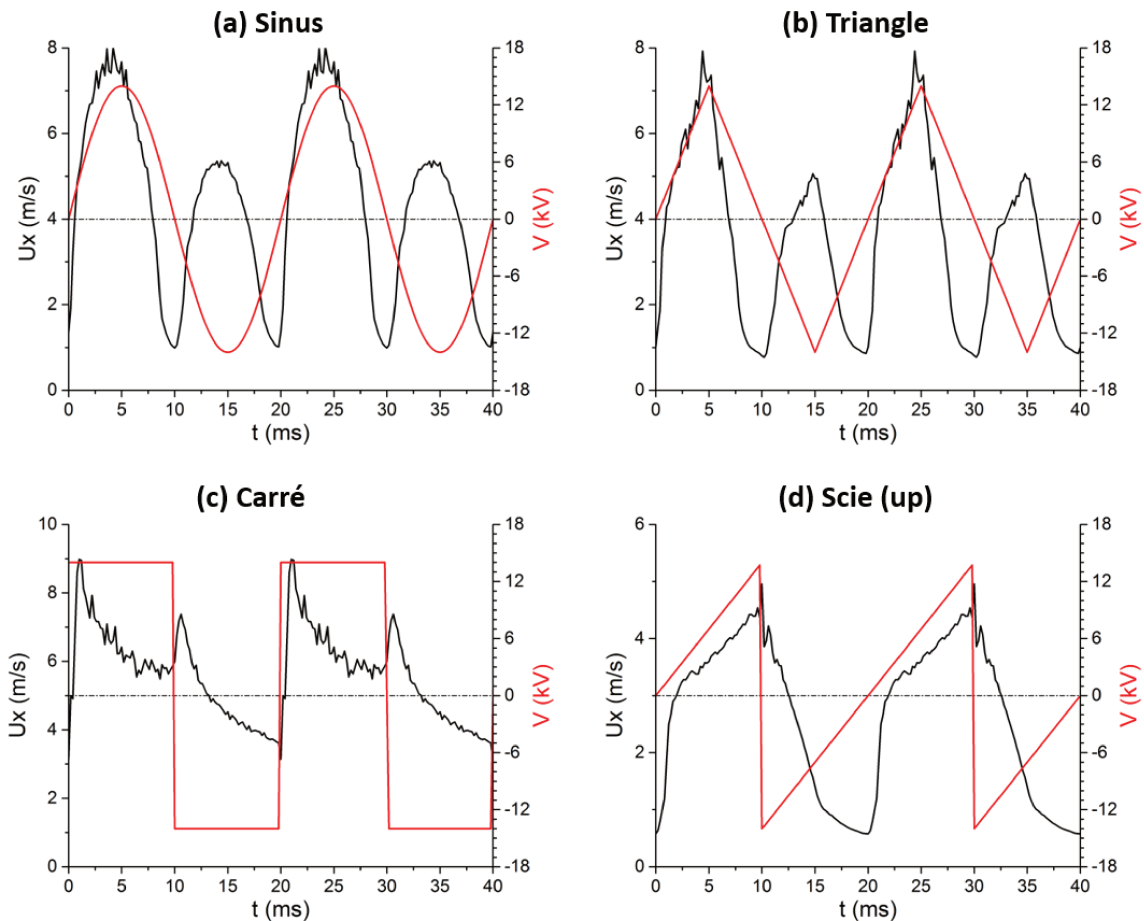


*Figure 37. Signaux de vitesse instantanée en  $x = 5$  mm et  $y = 0$  au cours du temps pour une DBD à 14kV à différentes formes d'ondes et fréquences.*



### 3.5.2 Moyenne de phase

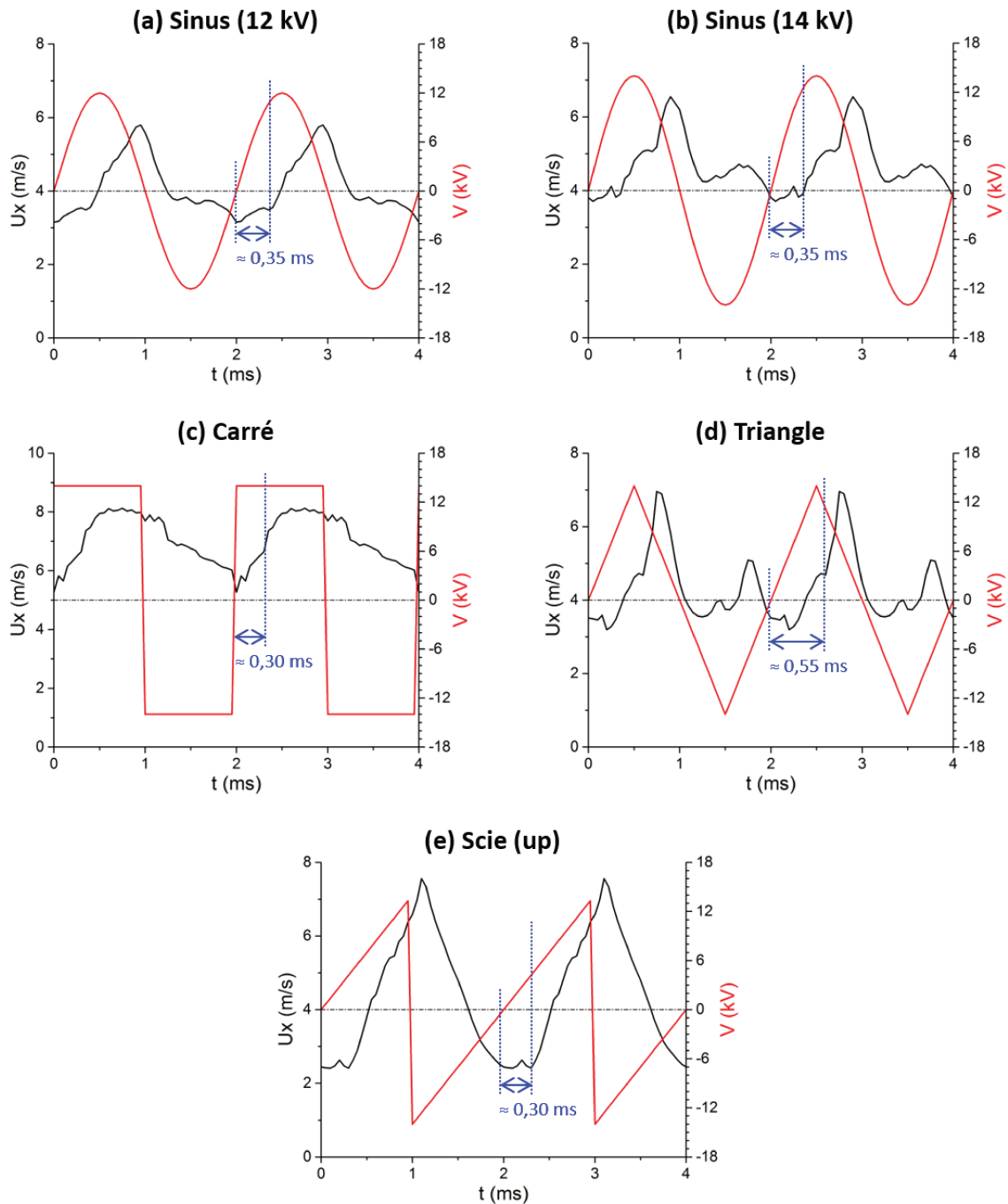
Comme précédemment, les signaux de vitesse sont moyennés par phase et mis en regard du signal de tension appliqué. Pour des signaux de fréquence 50 Hz, cette corrélation est portée sur la [Figure 38](#). À cette fréquence, pour les signaux sinus (a) et triangle (b), la vitesse est l'image de la valeur absolue de la tension lorsque celle-ci est croissante, puis elle diminue rapidement une fois le maximum passé. De plus, les bouffées émises durant la polarité négative ont toujours une vitesse maximum plus faible, ici équivalent aux deux tiers de la vitesse atteinte en positif. Pour le signal carré (c), la décharge est une succession de décharge continue alternative mais qui saturent rapidement durant une demi-période du fait de la présence de la barrière diélectrique, écrantant le champ électrique en accumulant des charges. **Lors des inversions de polarité, le champ se retrouve alors momentanément renforcé et la vitesse maximale du vent ionique également.** Ces charges sont progressivement neutralisées, puis changent de signe, ce qui entraîne une diminution du champ donc de la vitesse émise.



[Figure 38](#). Signaux de vitesse en moyenne de phase d'une DBD à 14 kV et 50 Hz pour différentes formes d'ondes pris en  $x = 1,5$  mm et  $y = 0$ .

Pour le signal en dent de scie montante (d), le motif du signal de vitesse est très similaire à celui présenté par le cas triangle sur la partie croissante de la tension (de  $t = 15$  à 25 ms

pour le triangle, de  $t = 10$  à  $30$  ms pour la dent de scie) mis bout à bout, mais avec une pente plus faible donc une croissance de la vitesse plus lente.



*Figure 39. Signaux de vitesse en moyenne de phase d'une DBD à 14 kV et 500 Hz pour différentes formes d'ondes pris en  $x = 1,5$  mm et  $y = 0$ . En bleu, le délai entre le début de la demi-période positive et le passage du front de la bouffée positive en  $x = 1,5$  mm.*

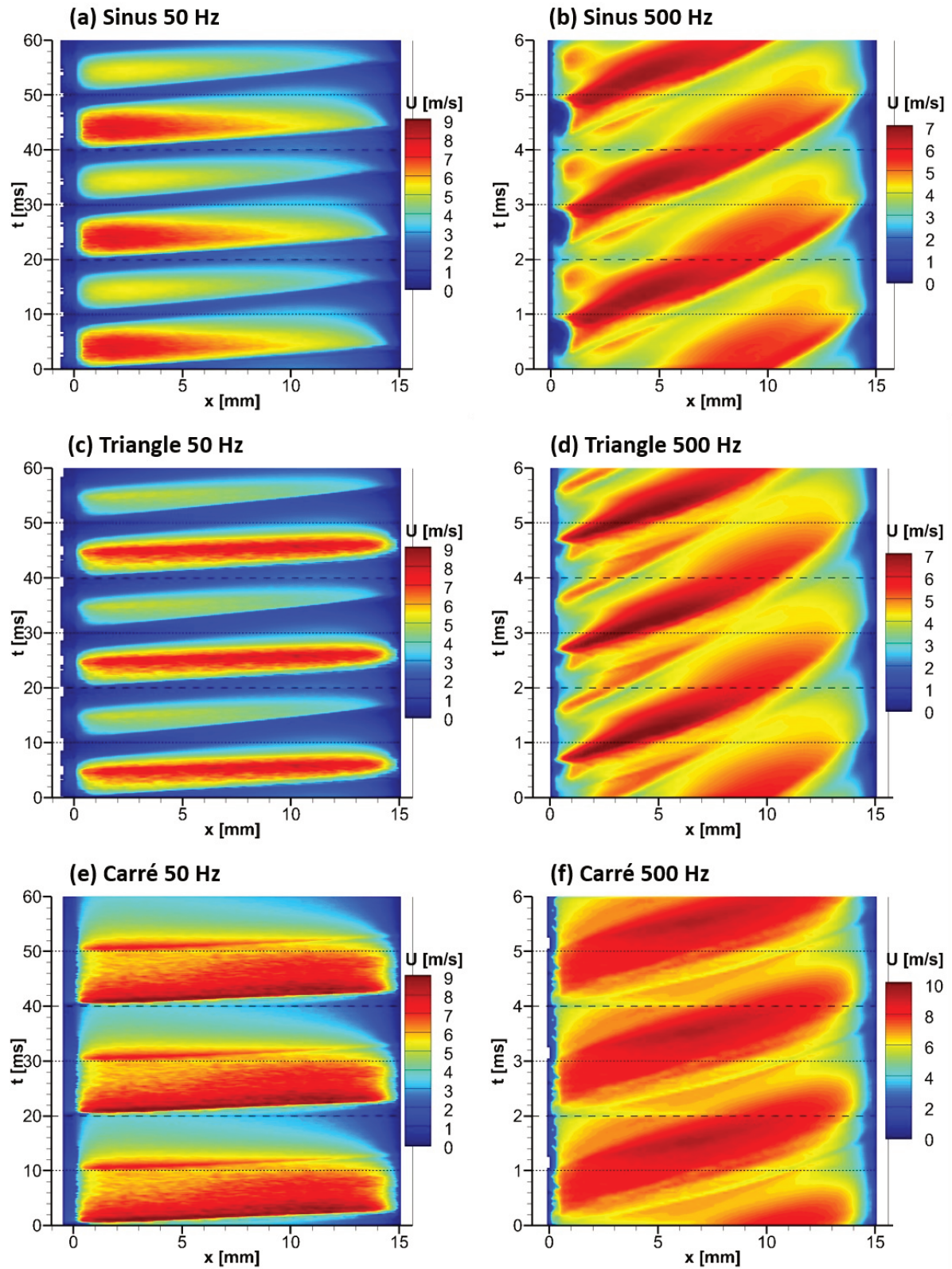
Pour la fréquence de 500 Hz, les signaux de tension et de vitesses sont mis en corrélations sur la [Figure 39](#). Tout d'abord, pour comparer avec ce qui a été présenté précédemment (voir [Fig. 33](#)), le signal sinus à 14 kV (Figure 39b) a globalement la même forme et présente le même déphasage, de 0,35 ms, qu'à 12 kV (Figure 39a), avec les bouffées plus

marquées, notamment la positive, et une vitesse moyenne plus élevée. Le signal carré (Figure 39c) génère toujours deux bouffées, plus courtes, distribuées similairement au signal sinus (Figure 39d) pendant la période. Pour la rampe montante (Figure 39e), la bouffée commence à être émise lorsque la tension dépasse quelques kilovolts et la vitesse augmente alors progressivement, puis diminue à la fin de la période.

Les cartes spatio-temporelles de la Figure 40 permettent ensuite de suivre la propagation des bouffées positives dans tous les cas prépondérants, comme présenté plus haut. Pour une fréquence de 50 Hz (a, c et e), les bouffées positives sont bien dissociées les unes des autres ce qui permet de visualiser leur particularité par rapport au signal sinus. Pour le triangle (c), les bouffées atteignent moins vite leur vitesse maximale après le maximum de tension passé. En revanche, et pour les bouffées positives appliquées dans la bouffée et la force visqueuse. Pour le carré (e), le jet produit est très polarisé. Néanmoins, la tension effective appliquée sur le gap étant décroissante du fait de la charge capacitive (pour les deux polarités). De plus, pour la bouffée positive, on retrouve un comportement continu.

A 500 Hz, pour le signal sinus (b) à 14 et à 12 kV, et les observations réalisées précédemment restent valables (voir Fig. 34). Pour le triangle (d), le comportement du jet produit est très similaire pour la bouffée positive. En revanche, la bouffée négative présente une vitesse plus élevée et ne ralentit pas aussi fortement au premier changement de polarité. Elle fusionne néanmoins aussi avec la bouffée positive après une période complète.

Le signal carré produit un jet similaire au cas continu (voir Partie 3.1) pendant la polarité positive, la vitesse y est homogène sur toute la traversée du gap et ne présente pas de variation au cours du temps pendant la décharge positive car celle-ci est trop brève pour que la bouffée négative, qui apparaît dès le changement de polarité ( $t = 1$  ms) et qui décroît rapidement en intensité. Comme pour le cas sinus, cette bouffée ralentit fortement à la fin de la période.



*Figure 40. Cartes spatio-temporelles de la vitesse suivant l'axe  $y = 0$  pour des DBD à 14 kV pour différentes fréquences et formes d'ondes. Les lignes tirets séparent les périodes, les lignes pointillées marquent le passage d'une polarité négative à positive.*

### 3.6 Conclusion sur le vent ionique

de géométrie pointe- tension périodique alternative, a été conduite. Ce vent ionique, dans cette configuration, perpendiculairement. Ce jet est constitué de zones de survitesse, appelées « bouffées »

courtes, de faible durée de vie, émises à fréquence rapide mais erratiques. Cette succession de bouffées résulte en un jet quasi-continu avec la tension. A basse fréquence et à proximité de la pointe, la forme des > converge vers le cas continu. Par ailleurs, dans tous les cas de figure, la partie positive de la décharge génère plus de vitesse qu' la seule à produire le jet. Enfin, si la vitesse à proximité de la pointe est pilotée par les variations de la tension, donc du champ électrique, au-delà de quelques millimètres le jet devient principalement inertiel.

Cet écoulement est mesuré par Vélocimétrie par Image de Particules (PIV) qui permet une bonne résolution spatiale et temporelle de la vitesse sur un plan 2D. Cette technique part sont suffisamment aux forces électrostatiques. Or, si les particules utilisées dans ce chapitre (des gouttelettes des éléments de réponse.

# 4 - " ° ! ½ ) " ~ &#) Łžž ° & ~ ~ | ° ) ° ) " | Ł' ~ ) " & ° ( | ) & \$ž ° ! °

Ce chapitre détaille les mécanismes qui mettent en mouvement des particules dans les caractéristiques électromécaniques des particules utilisées sont décrites. Dans une comparaison au vent ionique produit décrit dans le chapitre précédent. Dans la cinquième et sixième partie conclue ce chapitre.

## 4.1 Caractérisation du brouillard de gouttelettes

### 4.1.2 Les procédés de production

produire, en quantité et avec le niveau de qualité souhaité. Pour générer un aérosol liquide, différents procédés reposant sur des principes physiques divers peuvent être mis en œuvre.

Le procédé le plus simple qui consiste à faire passer un liquide sous pression dans une buse de forme particulière (qui dépend de la pression, du débit et du liquide en question), produisant ainsi un jet instable et divergent, généralement en forme de cône. Ce jet se désintègre en gouttelettes dans une enceinte de mélange puis peut être convecté avec un écoulement du gaz. Ce système présente plusieurs inconvénients majeurs : en général, pour une buse nécessitant des pressions élevées ; il nécessite également la mise en œuvre de pressions de l'ordre de dizaines de bars ; la plupart des systèmes sont conçus pour un usage industriel requérant des débits bien supérieurs au besoin des expériences à mener ici ; et enfin, ce procédé génère une dispersion granulométrique très large.

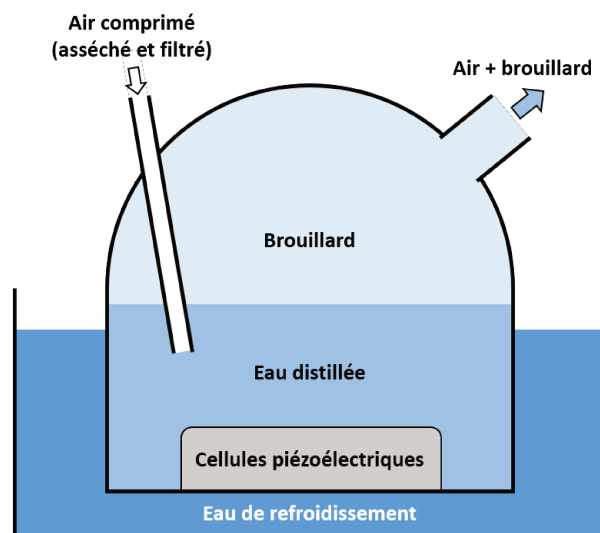
Le procédé par nébulisation par effet Venturi permet de diminuer la pression de liquide requise et peut permettre plusieurs points de vue. Par ailleurs, cela ne règle pas le problème de la forte dispersion granulométrique de



Il est également possible de générer des aérosols liquides par condensation sur des noyaux solides (à la manière du procédé de formation des nuages). Un problème se présente alors : ou bien le noyau reste dans la goutte et est susceptible de perturber son comportement électrique en plus de se déposer dans le réacteur, ou alors le noyau se dissout dans le liquide mais les propriétés de ce dernier sont alors susceptibles de changer.

Enfin, des vibrations mécaniques ultrasoniques peuvent servir à déstabiliser une nappe ou un jet liquide en les faisant entrer en résonance de manière à vaincre la tension de surface. Le plus pratique pour générer ces vibrations est d'utiliser une cellule piézoélectrique immergée dans un réservoir étanche puis de convecter le brouillard ainsi formé avec un flux de gaz. C'est la solution qui a été retenue dans cette étude car le système à utiliser à l'avantage d'être simple à mettre en place ([Figure 41](#)) et surtout, il permet de produire des gouttelettes quasiment monodisperses.

Pour réaliser le système de génération du brouillard d'eau, trois cellules piézoélectriques commerciales ont été placées au fond d'un bocal en verre rempli à mi-hauteur d'eau distillée. Un tube plongeur amène de l'air comprimé qui est ensuite évacué chargé de gouttelettes d'eau par un tuyau de grosse section, pour minimiser la coalescence de l'aérosol. Le bocal est placé dans un bac où circule de l'eau pour assurer son refroidissement car les cellules piézoélectriques produisent de la chaleur qu'il convient d'évacuer.



*Figure 41. Schéma du nébuliseur à ultrasons pour la production du brouillard d'eau.*

Une caractérisation du débit massique d'eau perdue par le nébuliseur en fonction du débit d'air en entrée est visible sur la [Figure 42](#), obtenue par pesée régulière du dispositif en fonctionnement. La concentration en eau diminue avec l'augmentation du débit d'air, pour un débit d'eau maximum d'environ 1,9 g/min atteint à 8,2 l/min d'air, soit 0,23 g/l. L'air étant sec à son entrée dans le système, une partie de cette eau passe sous forme de vapeur, de sorte qu'à la sortie il ne reste qu'environ 200 milligrammes d'eau liquide par





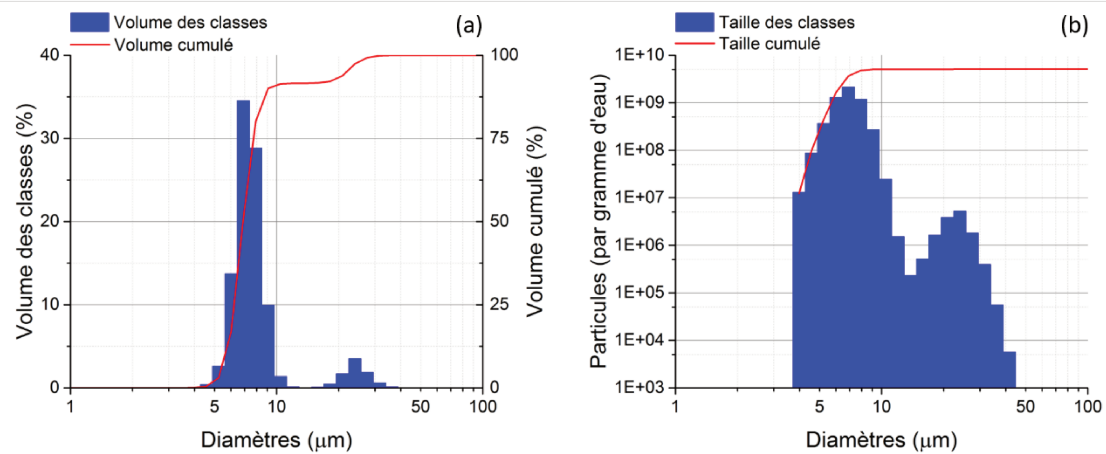


Figure 43. Distribution granulométrique des gouttelettes d'eau produites par le nébuliseur à ultrasons en proportion du volume (a) et en nombre pour un gramme d'eau (b).

## 4.2 Effet de l'humidité sur la décharge

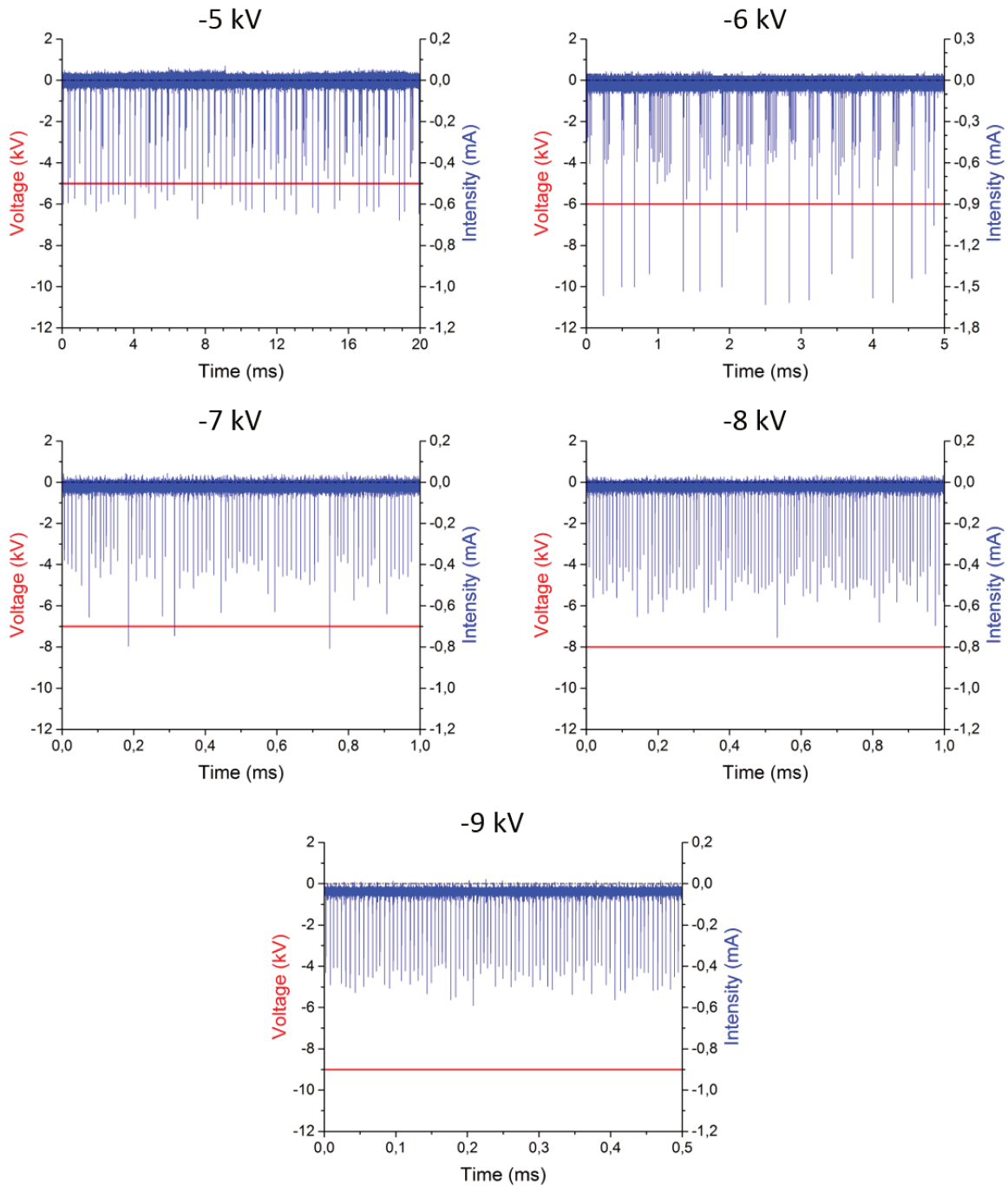
Cette partie analyse l'effet d'un air saturé en humidité et de la présence de gouttelettes d'eau liquide sur le comportement électrique des décharges employées, ces conditions atypiques étant peu documentées.

### 4.2.1 Impact sur les régimes de décharges

Tout d'abord, il faut préciser que ces conditions rendent les décharges électriques très instables, particulièrement pour le cas des décharges couronnes. L'absence de barrière entre les électrodes augmente en effet considérablement le risque de passage à l'arc durant les expériences avec l'eau ; c'est pourquoi la haute tension continue n'a pu être montée au-delà de 9 kV. Les mesures sont aussi parasitées par l'accumulation d'eau sur la pointe, modifiant ainsi sa géométrie, donc son rayon de courbure, et avec ce dernier les différents seuils d'ignition des décharges. Une première conséquence probable de cet effet est **l'impossibilité d'obtenir un régime de décharge streamer stable avec une tension positive**, continue ou non. Des streamers peuvent rarement survenir au cours d'une décharge positive, mais ni leur position (pour une tension alternative) ni leur fréquence (pour une tension continue) n'est reproductible. Pour les décharges négatives, en revanche, la réponse en courant est consistante mais présente quelques différences avec un cas sec.

Pour le cas des décharges couronnes continues, la [Figure 44](#) présente la réponse en courant instantané pour différentes tensions négatives. Contrairement au cas sec ([Fig.10b](#)) qui présentait un régime stable de pics de Trichel pour toute tension après l'ignition avec une amplitude constante et une fréquence en augmentation, la présence d'eau introduit un régime de décharge intermédiaire. En effet, juste après l'ignition à - 5 kV, se produit également ce qui ressemble à des pics de Trichel mais avec une dispersion

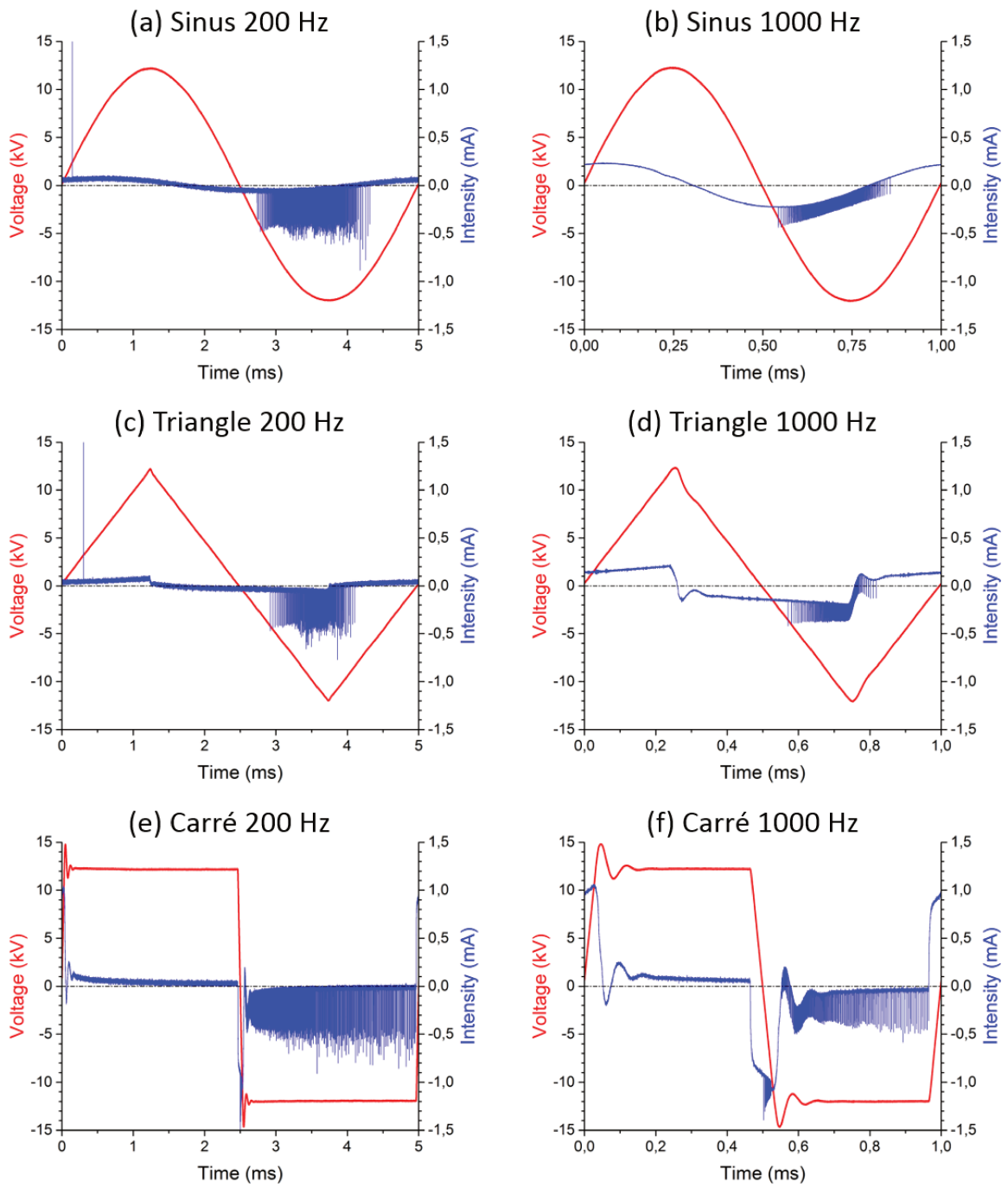
d'amplitudes plus grande (entre 200 et 700  $\mu\text{A}$ ), et une fréquence plus faible et irrégulière (de l'ordre de quelques kilohertz).



*Figure 44. Courant instantané pour une décharge couronne continue négative à différentes valeurs de tension.*

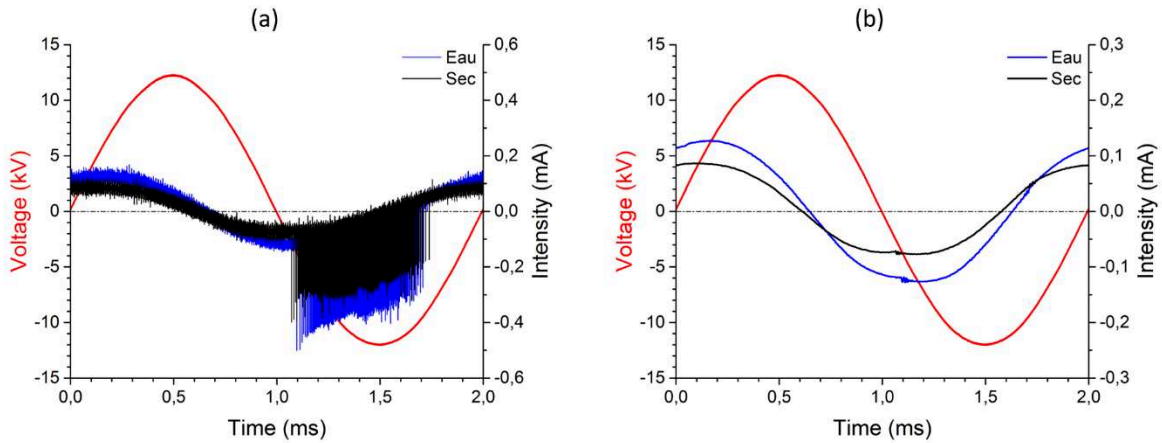
À - 6 kV, la différence d'amplitude s'accroît et les pics se scindent en deux groupes : un premier groupe de pics de forte amplitude ( $\approx 1,5 \text{ mA}$ ) et de faible fréquence ( $\approx 3 \text{ kHz}$ ), dont chacun est immédiatement suivi d'une série de pics du second groupe semblables aux pics de Trichel en termes d'amplitude (bien que toujours très dispersés) et de fréquence (quelques dizaines de kilohertz pour cette tension). À - 7 kV et - 8 kV, le même





*Figure 45. Courant instantané pour une DBD alternative à 12 kV à une fréquence de 200 ou 1000 Hz pour les formes d'ondes sinus (a et b), triangle (c et d) et carré (e et f).*

Enfin, le courant de décharge est comparé au cas  $V_i = 12 \text{ kV}$  et  $500 \text{ Hz}$  sur la [Figure 46](#). En filtrant la composante impulsionnelle (et le bruit), il est déphasé avec la tension appliquée est légèrement plus faible, ce qui augmente la puissance consommée par la décharge.



[Figure 46](#). Courant instantané pour une DBD alternative sinus à  $12 \text{ kV}$  et  $500 \text{ Hz}$  (a). Sur (b), les composantes impulsionnelles du courant et le bruit sont filtrés.

#### 4.2.2 Caractéristiques courant tension

La variabilité du courant de décharge est due à la présence de particules constantes. Ainsi la méthode de mesure du courant moyen employé au Chapitre 3 n'est pas adaptée à la mesure du courant de décharge (voir Annexe I). Une autre méthode est donc utilisée, décrite dans cette même annexe, pour le cas de la décharge à haute fréquence. Cette méthode a pour principal défaut sa faible résolution temporelle qui ne permet pas une bonne intégration des pics de courant, positif comme négatif, et sous-estime donc forcément la valeur réelle du courant moyen. Sur la [Figure 47](#), les caractéristiques I-V obtenues avec cette méthode sont représentées et comparées aux résultats du Chapitre 3 (points rouges). En positif comme en négatif, la caractéristique de courant en présence de décharge est linéaire, présente néanmoins une rupture de pente à  $4 \text{ mA}$  de courant lié à la présence de la décharge. Cette évolution, linéaire, présente néanmoins une rupture de pente à  $4 \text{ mA}$  de courant lié à la présence de la décharge. Si cette composante est supprimée en retranchant la tendance linéaire de la caractéristique, on obtient la courbe verte sur la [Figure 47](#). Pour le cas positif (a), il y a alors une très bonne correspondance

a priori, que le courant « linéaire » comparé avec les mesures de courant précédentes montre que si la tendance est sous-estimée pour des tensions plus élevées. Il serait attendu que la tendance suive à minima la loi de Townsend. Pour le cas négatif (b) la tendance est inférieure au cas sec à Trichel ; cette observation semble donc cohérente. Dans ce cas négatif, il y a par contre une assez bonne adéquation entre les mesures précédentes et ces résultats, légèrement sous-estimés comme déjà évoqué, mais la tendance suivant la loi de Townsend est respectée. Dans la suite de ce document, les valeurs de courant considérées pour les caractéristiques de décharge couronne en présence et en absence de liquide sont additionnées de la tendance linéaire initiale observée sur ces caractéristiques.

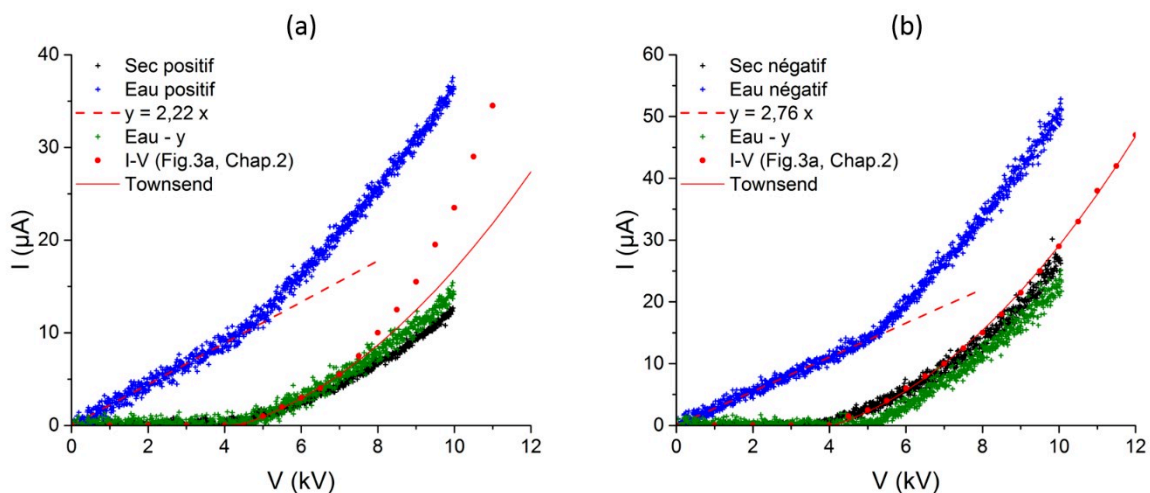


Figure 47. Caractéristiques courant-tension de décharge couronne en présence et en absence de liquide (a) et négative (b).

#### 4.2.3 Puissance absorbée

Avec la polarité opposée. Dans ce cas, les signaux à basse fréquence sont donc logiquement plus impactés.

La Figure 48 représente les caractéristiques P-V et P-f d



importante avec l'eau pour toute tension et toute fréquence malgré l'absence de streamer positif. Pour l'évolution avec la tension (a), la même croissance est observée avec une décharge qui semble s'initier plus tôt. Avec la fréquence (b), pour un signal sinus ou carré, le même comportement que précédemment est obtenu dans les hautes fréquences, en revanche pour les basses fréquences, la puissance consommée chute beaucoup moins rapidement, voire tend à se stabiliser.

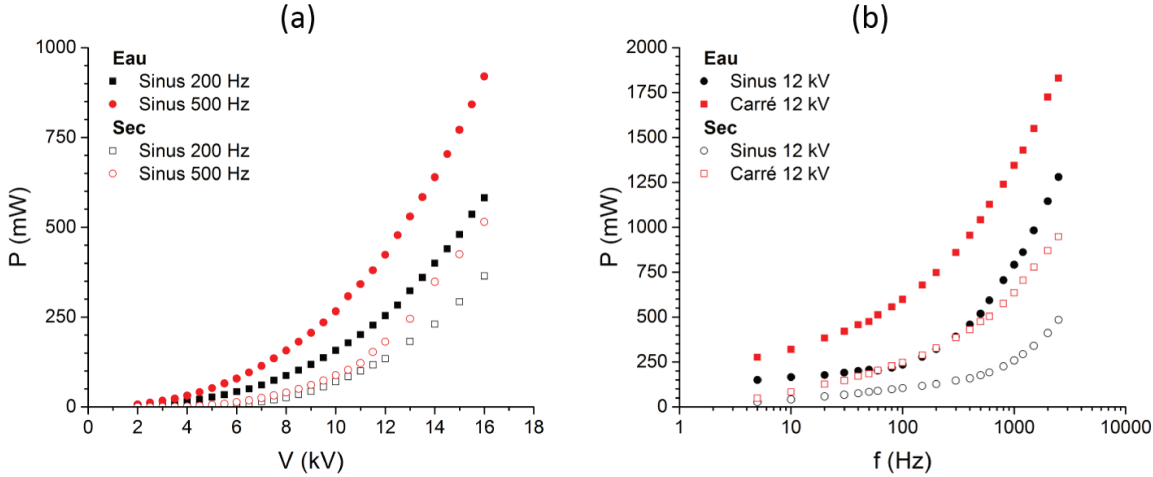


Figure 48. Puissance moyenne consommée par une DBD en fonction de la tension (a) et de la fréquence (b) en présence ou non d'eau.

La Figure 49 permet de constater que les mêmes rapports existent entre les différentes formes d'ondes. Le signal triangle consomme un peu moins de puissance qu'un signal sinus, tandis qu'un signal carré est beaucoup plus consommateur.

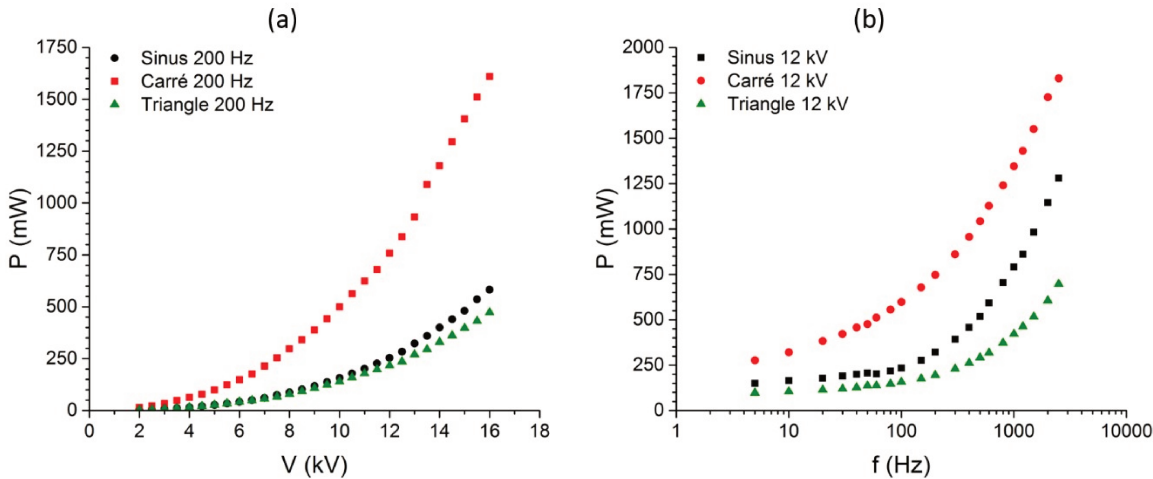


Figure 49. Puissance moyenne consommée par une DBD en présence d'eau en fonction de la tension (a) et de la fréquence (b) pour différentes formes d'ondes.

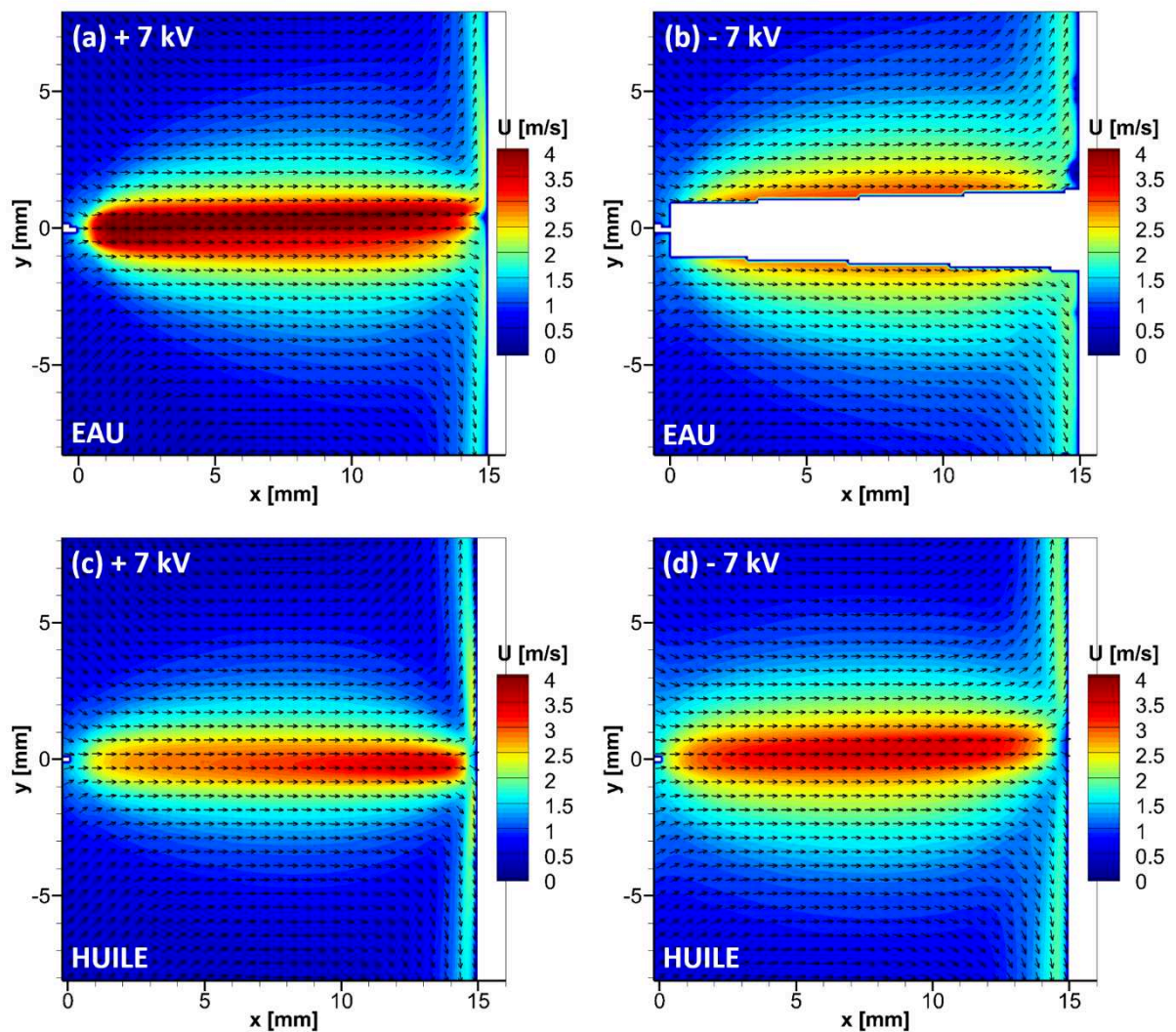


### 4.3 Décharge couronne continue

Cette partie présente les résultats des mesures de PIV réalisées avec le brouillard  $\text{Y}_2\text{F}_6$  et  $\text{Y}_2\text{O}_3$  pour les géométries et conditions expérimentales que pour les mesures de vent ionique avec les  $\text{Sf}_6$  et  $\text{Y}_2\text{F}_6$  à pouvoir comparer les résultats obtenus dans les deux environnements.

#### 4.3.1 Vitesse moyenne

Cette partie se concentre sur la vitesse moyenne du brouillard au cours de la décharge. La [Figure 50](#) montre les champs obtenus pour 7 kV en positif et négatif pour les deux types de particules.



**Figure 50** : Champs de vitesse moyenne du brouillard pour 7 kV en positif (a et c) et négatif (b et d) pour les deux types de particules.

La trajectoire des particules étant principalement horizontale, il y a peu de mélange entre les deux pics. La vitesse par un algorithme de PIV de façon fiable. Sur les images de particules brutes, leurs trajectoires sont fortement divergentes à proximité de la pointe, puis elles reprennent une forme de jet droit. Ainsi, seule la vitesse à la périphérie du jet est observable, mais similaire à celle du jet central. De plus, le jet en présence du brouillard

Pour le centre du jet ( $y = 0$ ), la vitesse augmente proportionnellement avec la tension et est quasi-constante dans tout le gap. Sur (b), la vitesse est globalement plus importante que le vent ionique, notamment au début du jet où les gouttelettes ont une très forte vitesse initiale. De plus, le jet avec

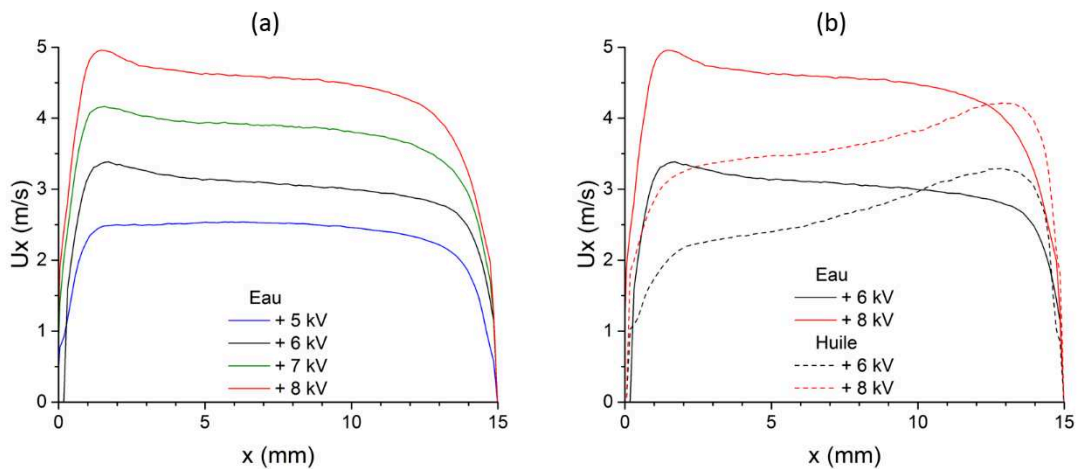


Figure 51 : Profils de vitesse axiale continue pour les deux types de particules.

Sur les profils horizontaux (Figure 52), à la moitié du gap soit  $x = 7,5$  mm (a), la vitesse du jet est plus importante que le vent ionique. À proximité de la paroi, en  $x = 14,75$  mm (b), les différences sont plus importantes. En effet, dans cette zone la vitesse est plus importante que le vent ionique. Cette vitesse croît également avec la tension dans

la vitesse est plus importante avec une polarité négative.

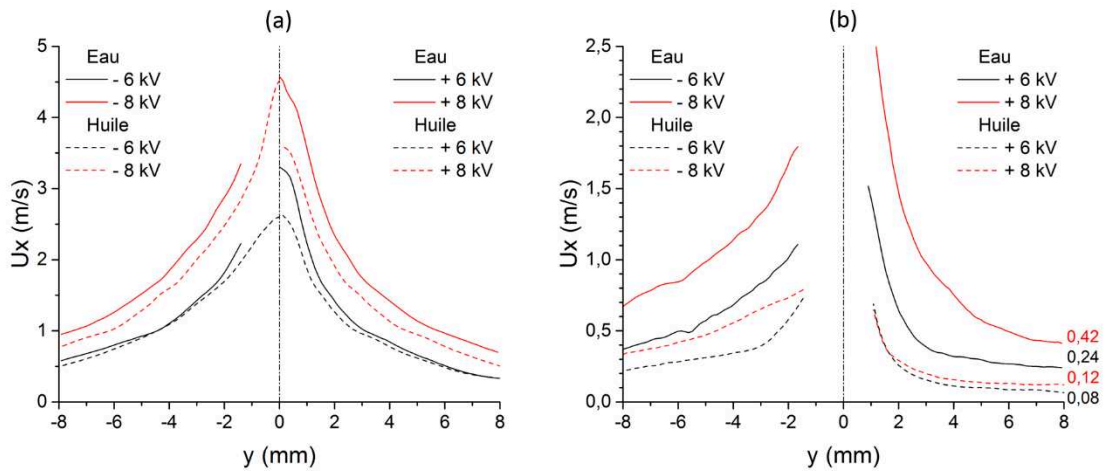


Figure 52. Profils de vitesse moyenne transversaux (y) en  $x = 7,5$  mm (a) et  $14,75$  mm (b) pour différentes tensions continues et pour les deux types de particules.

particules, les attirant vers cette même paroi.

Stokes donne une indication sur leur capacité à ... le plus défavorable est considéré pour le calcul, soit 100% prise comme le maximum de vitesse du jet.

avec  $\rho_g$  et  $\mu_g$  ... le diamètre de la ... entre 0,1 et 0,01 ... dans un régime de Stokes et le calcul du nombre correspondant est donc sensé.

avec L ...

extérieure), tandis que les particules (Figure 52) montre que la composante horizontale de la vitesse reste importante dans toute cette zone. Cela signifie que les forces de traînée et de gravité sont aussi au phénomène de précipitation électrostatique.

La répartition relative de chacune de ces deux forces sur les particules est donnée au Chapitre 2.3. Par exemple, pour une décharge positive continue à 7 kV, et en se plaçant au milieu du jet ( $x = 0 ; y = 7,5 \text{ mm}$ ), on trouve que la force de traînée est environ 75 fois plus importante que la force électrostatique. Les configurations sont données en annexe (Annexe II).

### 4.3.2 Vitesse instantanée

Cette sous-entendue à  $t = 1 \text{ ms}$  sur la Figure 53 et à différents instants ( $t = 2, 3, 4, 5$  et  $6 \text{ ms}$ ) sur la Figure 54. Le jet pour les gouttelettes précédentes sur la seconde colonne (b). La colonne (c) montre les profils horizontaux de la vitesse instantanée aux instants correspondants pour les deux types de particules.

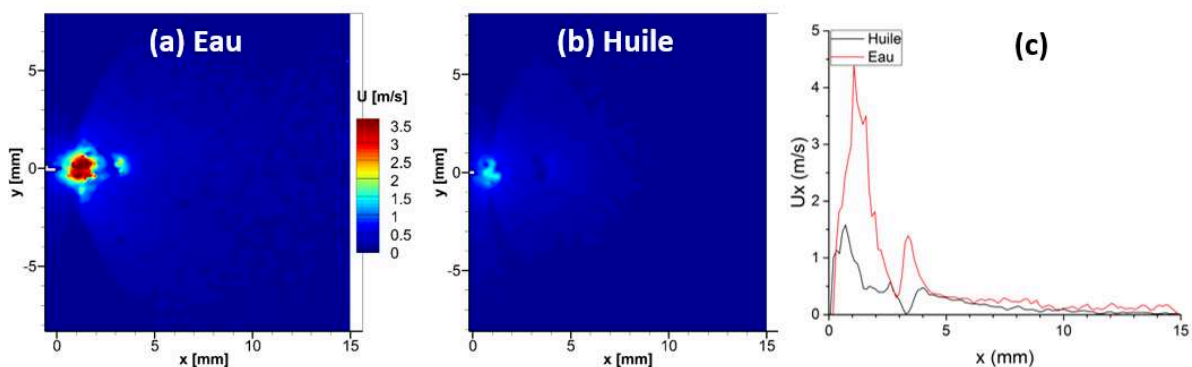
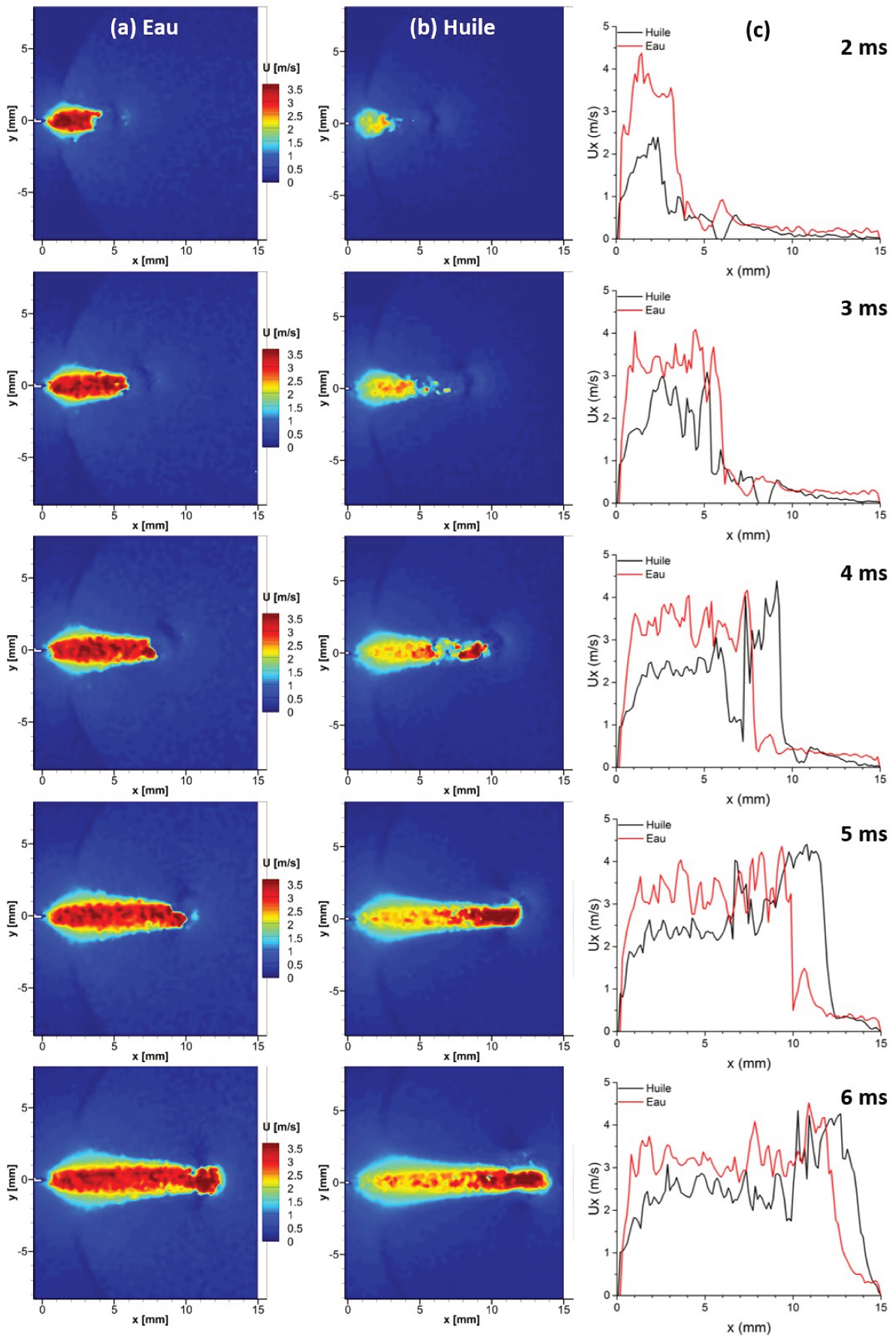


Figure 53 Champs de vitesse instantanée à  $t = 1 \text{ ms}$  pour une décharge couronne continue à + 6 kV (x) en  $y = 0$  (c). La pointe est mise sous tension à  $t = 0$ .

Figure 54. Champs de vitesse instantanée pour une décharge couronne continue à + 6 kV ( $\mu = 0$ ) (c). La pointe est mise sous tension à  $t = 0$ . (Ci-contre).





En effet, un déplacement mesurable des gouttelettes est observé dès la première image après  $t = 0$  est déjà en mouvement à une vitesse  $v \approx 3,2$  m/s. La bouffée initiale précédant le jet est « rattrape » le jet avec eau à mi-gap, vers  $t = 3,5$  ms. Les deux cas sont comparés dans la Figure 55.

De même que pour le vent ionique, la représentation sous forme de cartes spatio-temporelles de la pointe au cours du temps (Figure 55) permet de visualiser la propagation des structures du jet sous forme de stries dont la pente est constante sur tout le gap et une plus longue durée de vie de celle-ci. Dans ce cas aussi, la vitesse de propagation des bouffées est égale à leur vitesse calculée par la PIV, soit environ 3,7 m/s, à comparer à la vitesse moyenne du jet qui est de 3,2 m/s lorsque la tension appliquée est de + 6 kV.

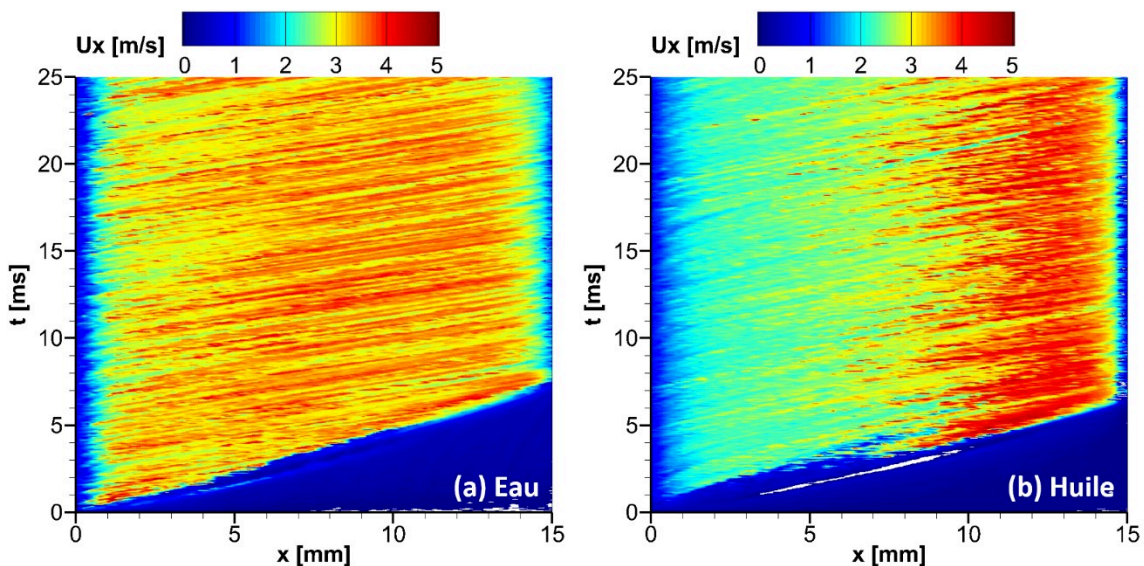


Figure 55. Cartes spatio-temporelles de la pointe au cours du temps pour l'eau (a) et l'huile (b). Les axes sont respectivement l'espace  $x$  (mm) et le temps  $t$  (ms). La couleur indique la vitesse  $U_x$  (m/s).

La Figure 56 illustre les structures du jet pour l'eau et l'huile. Les structures sont principalement concentrées sur la seconde moitié du gap, ce qui est cohérent avec la vitesse de propagation des bouffées à cet endroit, dont la vitesse diffuse progressivement, comme le montre la Figure 55.

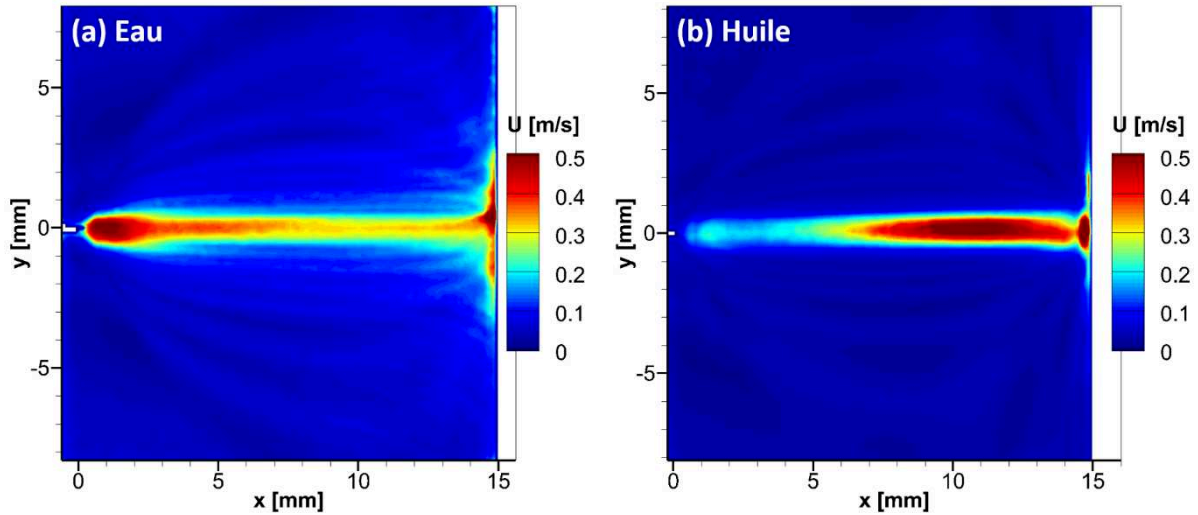


Figure 56 : Écoulements de brouillard d'eau (a) et d'huile (b) sous une décharge couronne continue. Les axes sont en mm. La légende indique la vitesse U en m/s.

En conclusion, on peut dire que soumis à une décharge couronne continue, le brouillard présente une forte similarité entre les écoulements. Néanmoins, certaines différences existent, notamment une plus faible fluctuation de la vitesse et une plus grande inertie des particules qui augmentent la vitesse horizontale à proximité de la paroi. Se superpose également une composante de précipitation électrostatique des particules du fait de la captation des électrons par les gouttelettes.





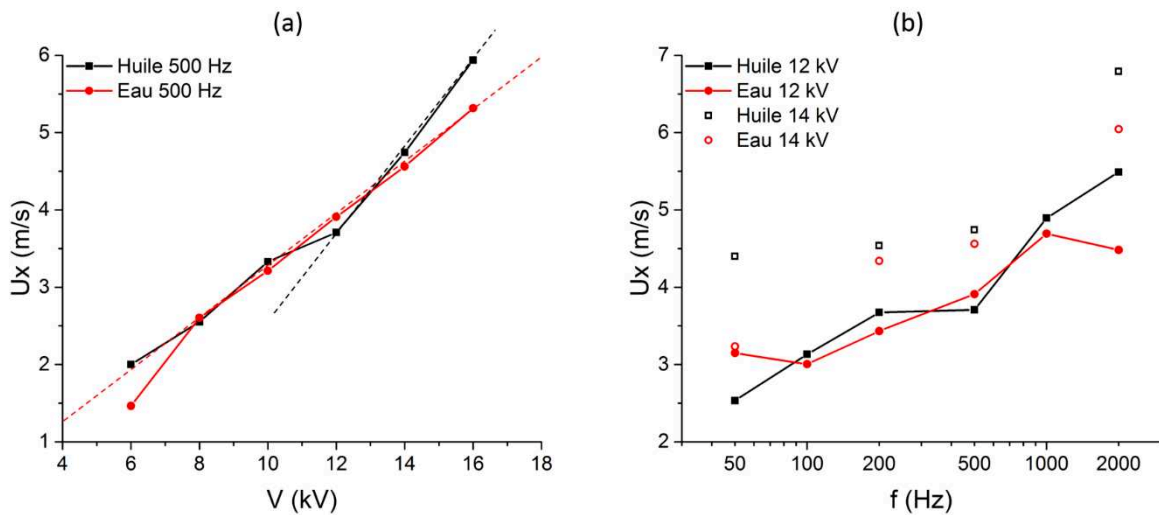
## 4.4 Décharge à barrière diélectrique

Dans cette partie, les résultats des mesures de PIV avec les décharges à barrière diélectrique en pr

### 4.4.1 Vitesse moyenne et fluctuante

Cette sous- en gouttelettes [Figure 57](#) représente les champs de vitesse moyenne pour les deux types de particules et trois fréquences : 50, 500 et 1000 Hz. Tout comme ralentit avec la distance à la pointe. À basse fr jet entre les deux types de particules est importante avec une augmentation de la vitesse Hz (c et d), le jet reste léger de vitesse au centre devient négligeable. Au-delà de 1000 Hz (e et f), le jet obtenu avec les

La [Figure 58](#) ci- les paramètres de tension (a) et de fréquence (b) du signal.



**Figure 58.** Évolution de la vitesse moyenne  $U_x$  en fonction de la tension (a) et de la fréquence (b), pour les deux types de particules.

Sur (a), cette vitesse augmente quasi-linéairement avec la tension, quel que soit le type de

précèdent, une rupture de pente vers 12 kV (pour une fréquence de 500 Hz), la vitesse du jet passe d'un régime de décharge à un régime streamer. Ceci est dû au fait que la décharge vers un régime streamer est favorisée par la présence de particules. Sur (b), à 12 kV, la vitesse en présence des particules est plus élevée que celle sans particules. Cependant, pour les fréquences extrêmes, le jet semble présenter un comportement différent, avec une augmentation de la vitesse à 50 Hz et une diminution à 2000 Hz. Cette augmentation de la vitesse à 50 Hz est due à la précipitation de la couronne DC. Là encore, il semble que ce phénomène soit dû à la précipitation de la couronne DC. à 500 Hz, la vitesse du vent ionique est plus élevée. Encore une fois, il est difficile de trouver une explication à ce phénomène. Sur les profils verticaux (b), la vitesse est principalement concentrée au centre du jet, même en diminution en périphérie du jet, au contraire de ce qui est constaté de la vitesse moyenne sur la Figure 58(b).

Les profils de vitesse de la Figure 59 permettent de pallier à ce défaut. Sur les profils horizontaux (a), on observe une légère diminution vers la paroi. Contrairement au vent ionique (avec les particules), la vitesse est plus élevée au centre du jet. La couronne DC présente sur le profil à 2000 Hz, révèle une forte instabilité du jet avec une forte diminution de la vitesse en périphérie du jet, ce qui est constaté de la vitesse moyenne sur la Figure 58(b).

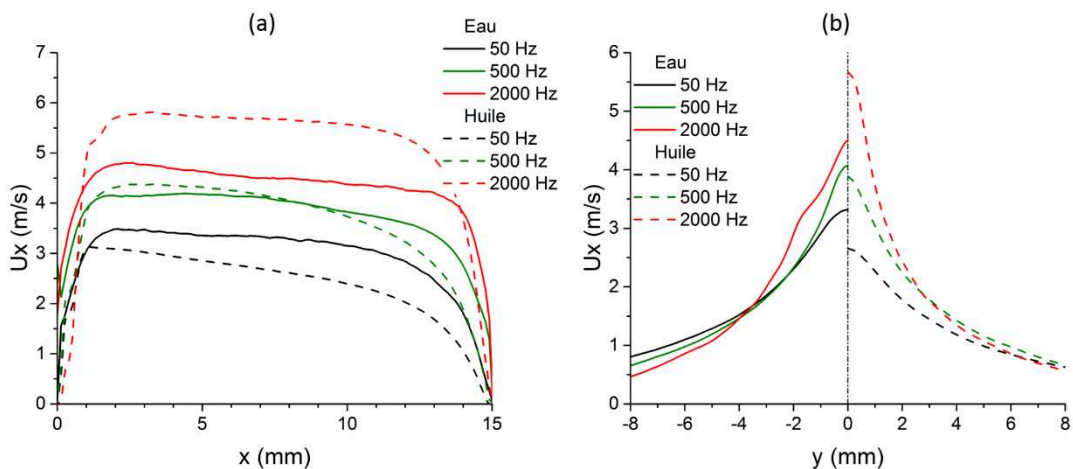


Figure 59. Profils de vitesse moyenne horizontaux (a), en  $y = 0$ , et transversaux (b), en  $x = 7,5$  mm, pour une DBD sinus à 12 kV, différentes fréquences et pour les deux types de particules.



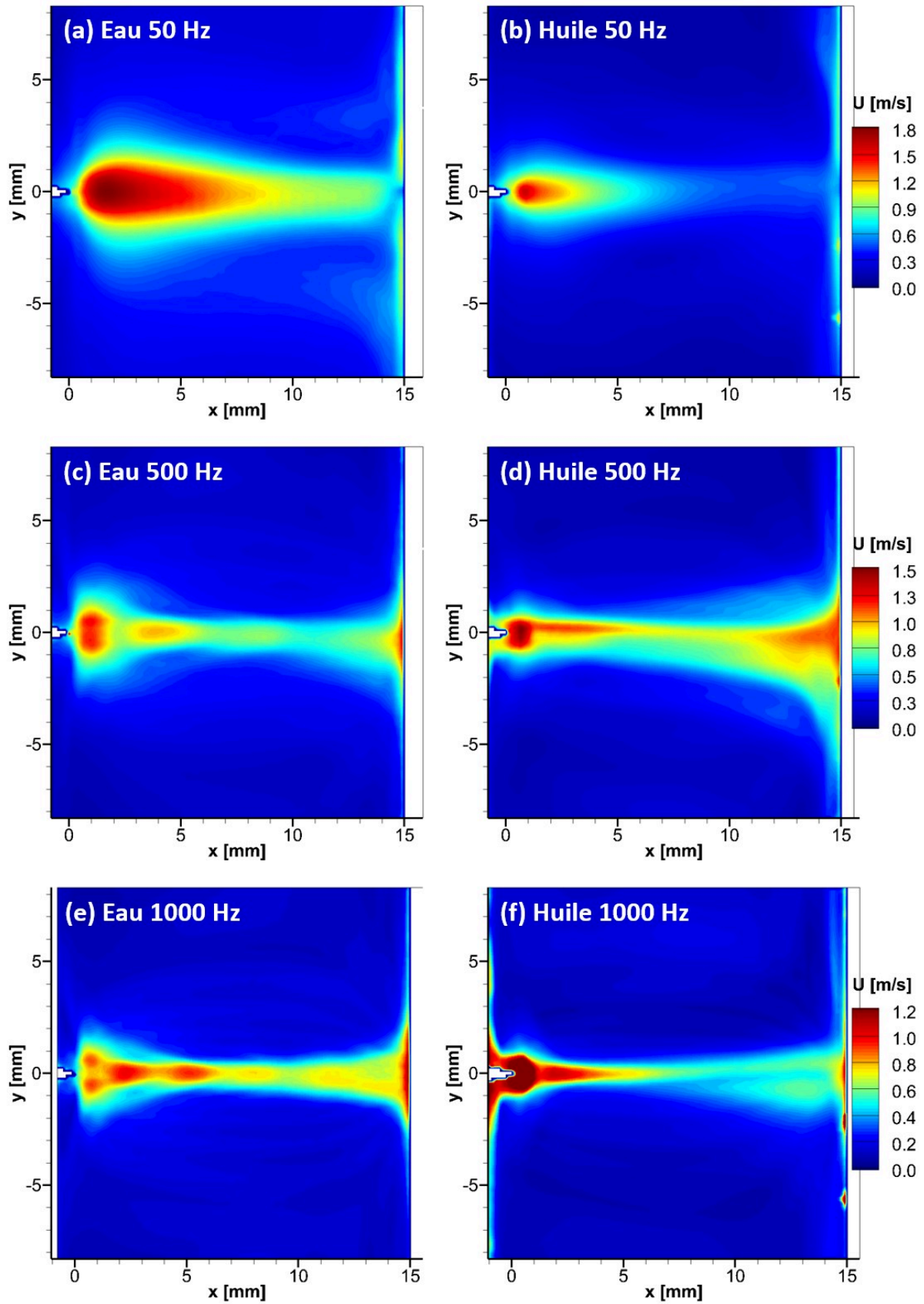


Figure 60 :  $\vec{U}$ -type de la vitesse pour une DBD sinus à 12 kV et différentes fréquences, et pour les deux types de particules.

Les zones de fortes fluctuations de la vitesse pour les différentes configurations sont visibles sur la [Figure 60](#) -type de la vitesse (valeurs RMS). À 50 Hz (a et b), les fluctuations sont maximales à proximité de la pointe, à l'échelle moyenne. Pour le vent ionique à 500 et 1000 Hz, ces fluctuations sont encore plus élevées à l'échelle électrode. Il faut noter que le maximum des RMS est constant avec la fréquence pour les configurations à l'échelle de la pointe. L'échelle de la pointe des fluctuations est la même à ces mêmes coordonnées. Leur amplitude diminue ensuite avec la fréquence, en valeur absolue comme en relatif. Aux fréquences supérieures, il apparaît une organisation spatiale des fluctuations sous forme de pics périodique de fort RMS qui sont absents dans le cas du vent ionique. Enfin, de façon générale, les fluctuations de vitesse sont plus élevées à l'échelle de la pointe que dans les autres zones. DBD est alimentée avec une tension qui varie dans le temps.

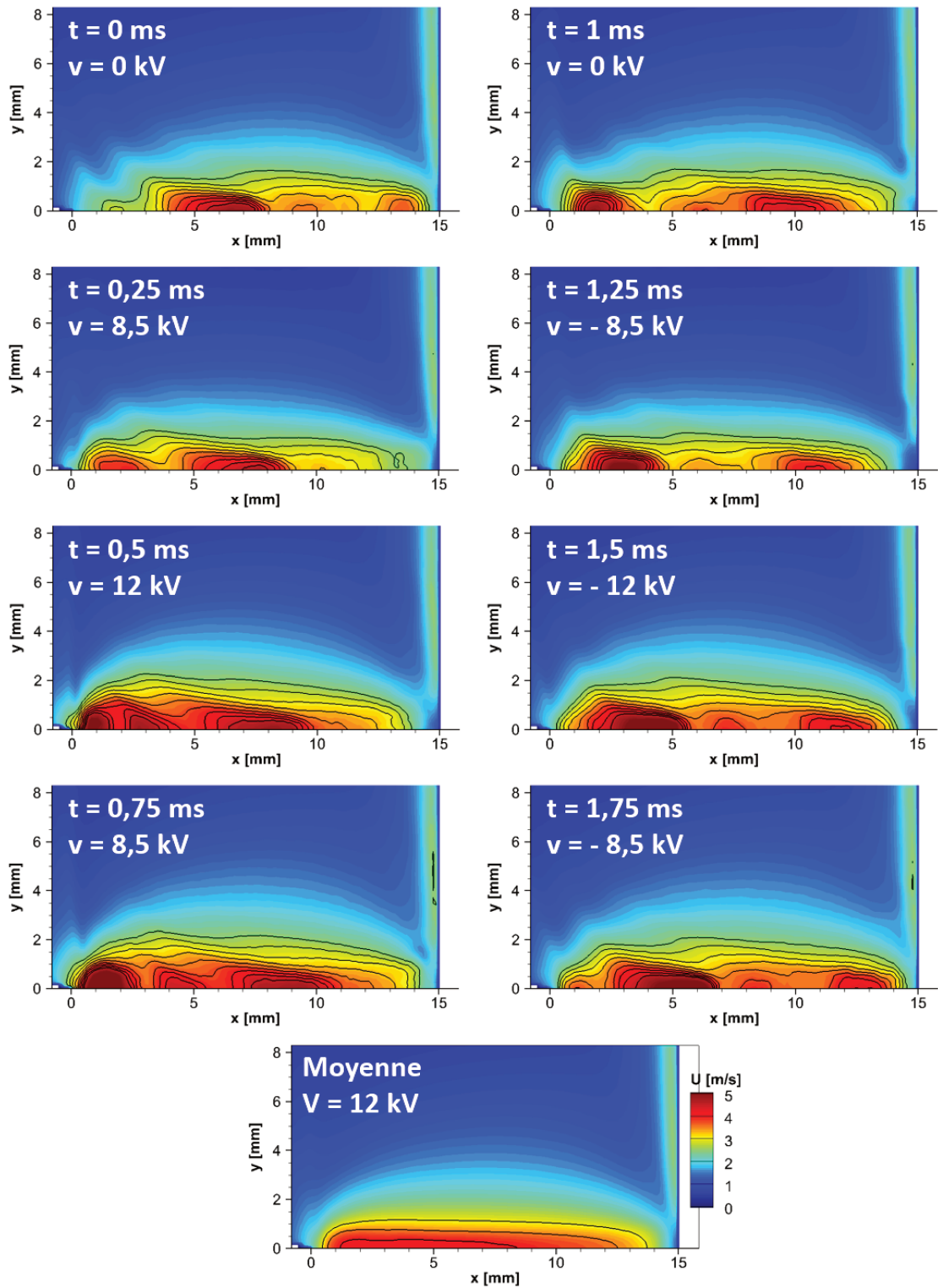
#### 4.4.2 Moyenne de phase

Cette sous-partie présente les résultats issus des champs de vitesse en moyenne de phase.

##### 4.4.2.1 Cas de référence (sinus, 12 kV, 500 Hz)

Pour le cas de base, ces champs sont représentés sur la [Figure 61](#). À  $t = 0$ , quatre bouffées sont présentes dans le gap, à  $x = \{2 ; 4,5 \text{ à } 8 ; 9,5 \text{ à } 10 ; 12,5 \text{ à } 15\}$  mm. À  $t = 250$  ns, la bouffée positive est terminée et la bouffée négative est en cours de formation. À  $t = 750$  ns, la décharge positive est terminée et toutes les bouffées présentes dans le champ commencent à ralentir. À  $t = 1,25$  ms, la décharge positive est terminée et la bouffée négative récemment formée est bien visible en  $x = 1$  mm. Ces bouffées ralentissent ensuite à nouveau et le cycle reprend.

À l'échelle de la pointe, ce qui est en accord avec les zones de forte variation de la vitesse visibles sur la [Figure 60](#). Les bouffées négatives, quant à elles, subsistent au-delà 5 mm et sont plutôt rattrapées par la bouffée positive peu après 10 mm. De plus, elles subissent, tout comme la positive, un ralentissement à l'échelle de la pointe.



*Figure 61. Champs de vitesse en moyenne de phase d'une DBD sinus à 12 kV et 500 Hz à différents instants pour les particules d'eau.*



La Figure 62 illustre les champs de vitesse  $U_x$  et de tension  $V$  mesurés au même point. À  $x = 1,5$  mm (a), ces deux signaux sont très proches sur toute la période, y compris au niveau du délai par rapport au signal de tension, avec tout de même une différence. Le pic de vitesse est atteint plus tôt, mais commence aussi à décroître plus tôt, dès le maximum de tension passée (délai pris en compte). Ces bouffées de vitesse sont par conséquent plus « courtes ». Le pic de vitesse correspond en réalité à la bouffée négative.

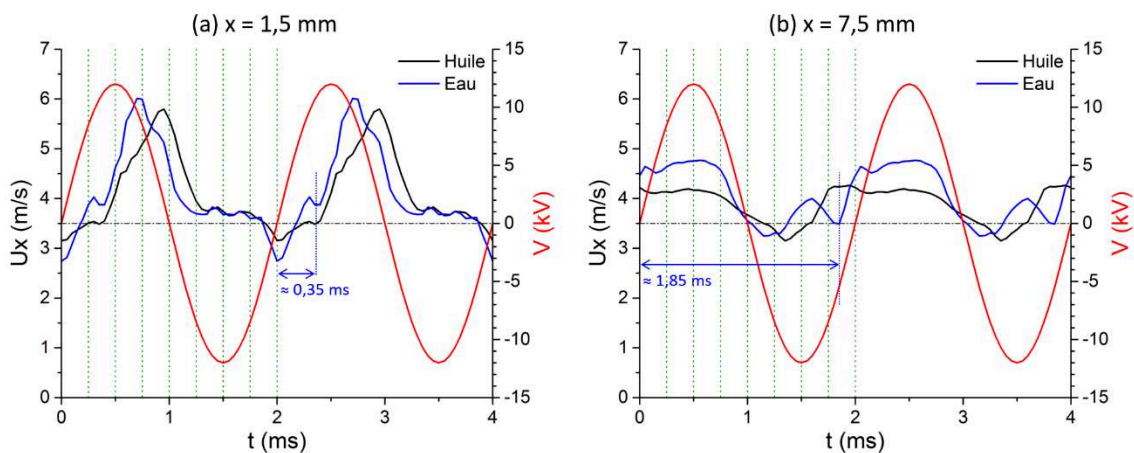


Figure 62 : Champs de vitesse  $U_x$  et de tension  $V$  mesurés au même point à  $x = 1,5$  (a) et  $7,5$  (b) mm. Les lignes pointillées verticales correspondent aux instants choisis pour les champs de vitesse de la Figure 61.

#### 4.4.2.2 Cas basse fréquence (sinus, 12 kV, 200 Hz)

Pour des fréquences plus faibles, sur la Figure 63, les bouffées sont plus marquées car mieux séparées les unes des autres. De ce fait, les bouffées positives (émises entre 0,5 et 1,5 ms) ne rattrapent plus du tout les négatives (émises entre 3 et 4 ms). À partir de  $t = 1,3$  ms, il apparaît également une troisième bouffée qui émerge de la positive et semble « pousser » la bouffée négative.

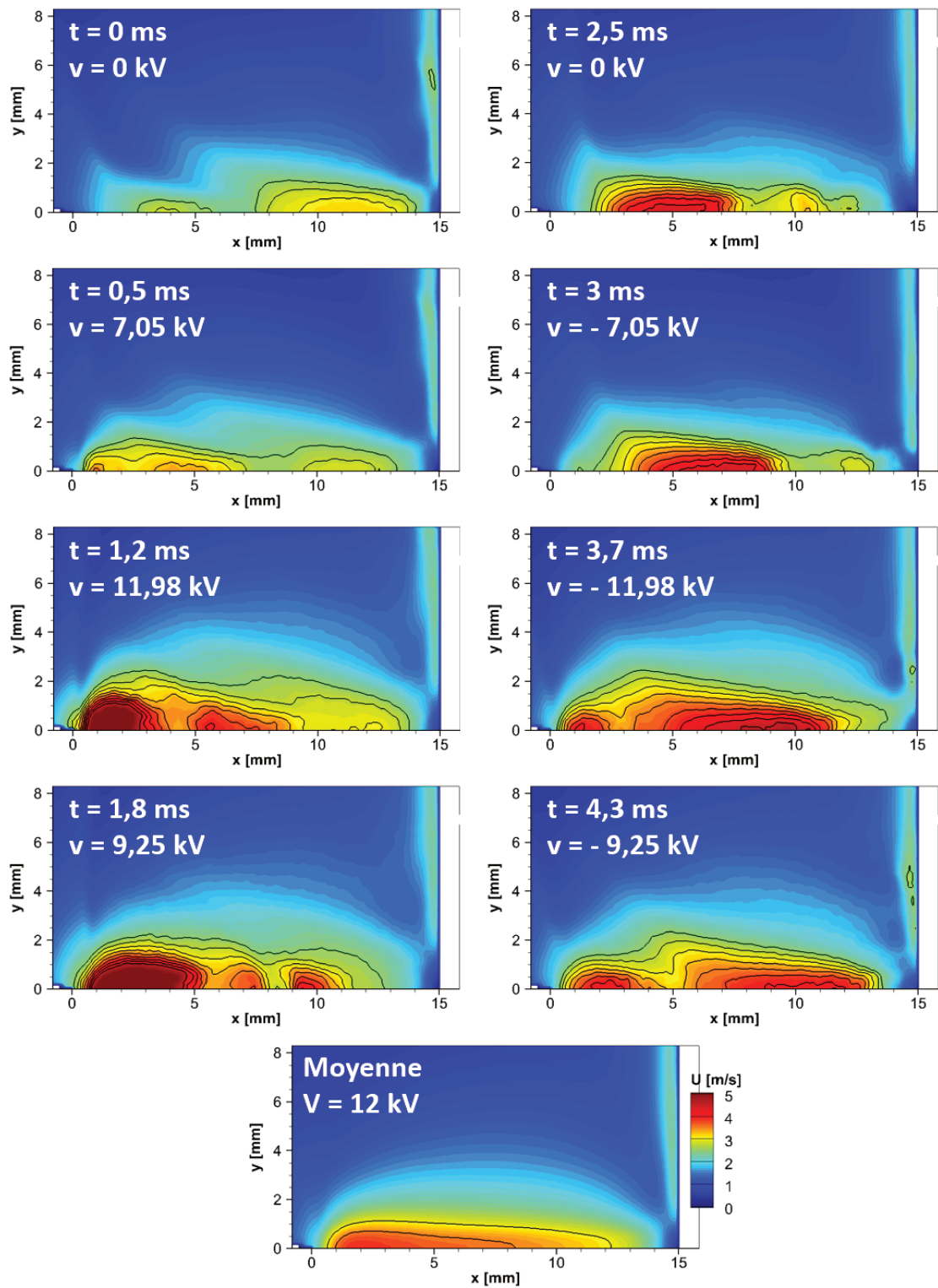
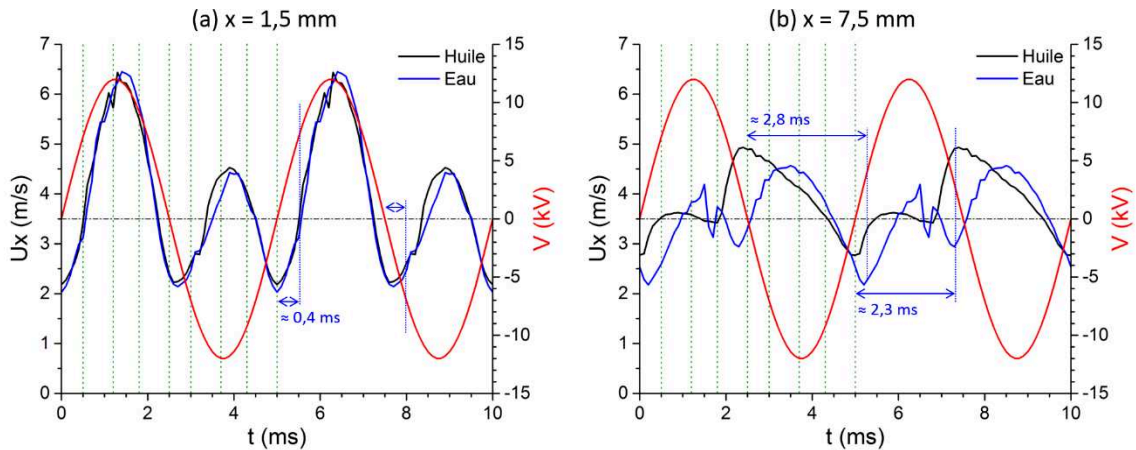


Figure 63. Champs de vitesse en moyenne de phase d'une DBD sinus à 12 kV et 200 Hz à différents instants pour les particules d'eau.

Sur les signaux de vitesse de la [Figure 64](#), à proximité de la pointe en  $x = 1,5$  mm (a), les bouffées positives de l'eau sont en phase avec les bouffées positives de l'huile, et inversement pour les bouffées négatives. À mi-gap (b), cette différence de phase est plus importante. Les bouffées positives de l'eau sont en phase avec les bouffées négatives de l'huile, et inversement pour les bouffées négatives de l'eau. Cela signifie que les bouffées positives de l'eau sont en phase avec les bouffées négatives de l'huile à mi-gap (entre  $t = 2$  et  $3$  ms). Cela signifie que la période de l'eau est plus courte que celle de l'huile.



**Figure 64** : Signaux de vitesse  $U_x$  (m/s) et de tension  $V$  (kV) en fonction du temps  $t$  (ms) à  $x = 1,5$  (a) et  $7,5$  (b) mm. Les lignes pointillées verticales correspondent aux instants choisis pour les champs de vitesse de la [Figure 63](#).

#### 4.4.2.3 Cas haute fréquence (sinus, 12 kV, 1000 Hz)

Enfin, pour des fréquences plus élevées, 1000 Hz sur la [Figure 65](#), les bouffées se suivent de près rapprochant le jet du cas moyen avec les bouffées qui conservent une vitesse de convection constante. Les comportements du jet sont par ailleurs les mêmes que pour les cas à basse fréquence.

Ces observations se vérifient sur les profils de vitesse de la [Figure 66](#), où la dynamique des deux jets est relativement similaire. Proche de la pointe (a), la vitesse des bouffées positives de l'eau est en phase avec les bouffées positives de l'huile, et inversement pour les bouffées négatives. À mi-gap (b), cette différence de phase est plus importante. Les bouffées positives de l'eau sont en phase avec les bouffées négatives de l'huile, et inversement pour les bouffées négatives de l'eau. Cette différence de phase négative (à  $t = 0,4$  ms) est très faible.

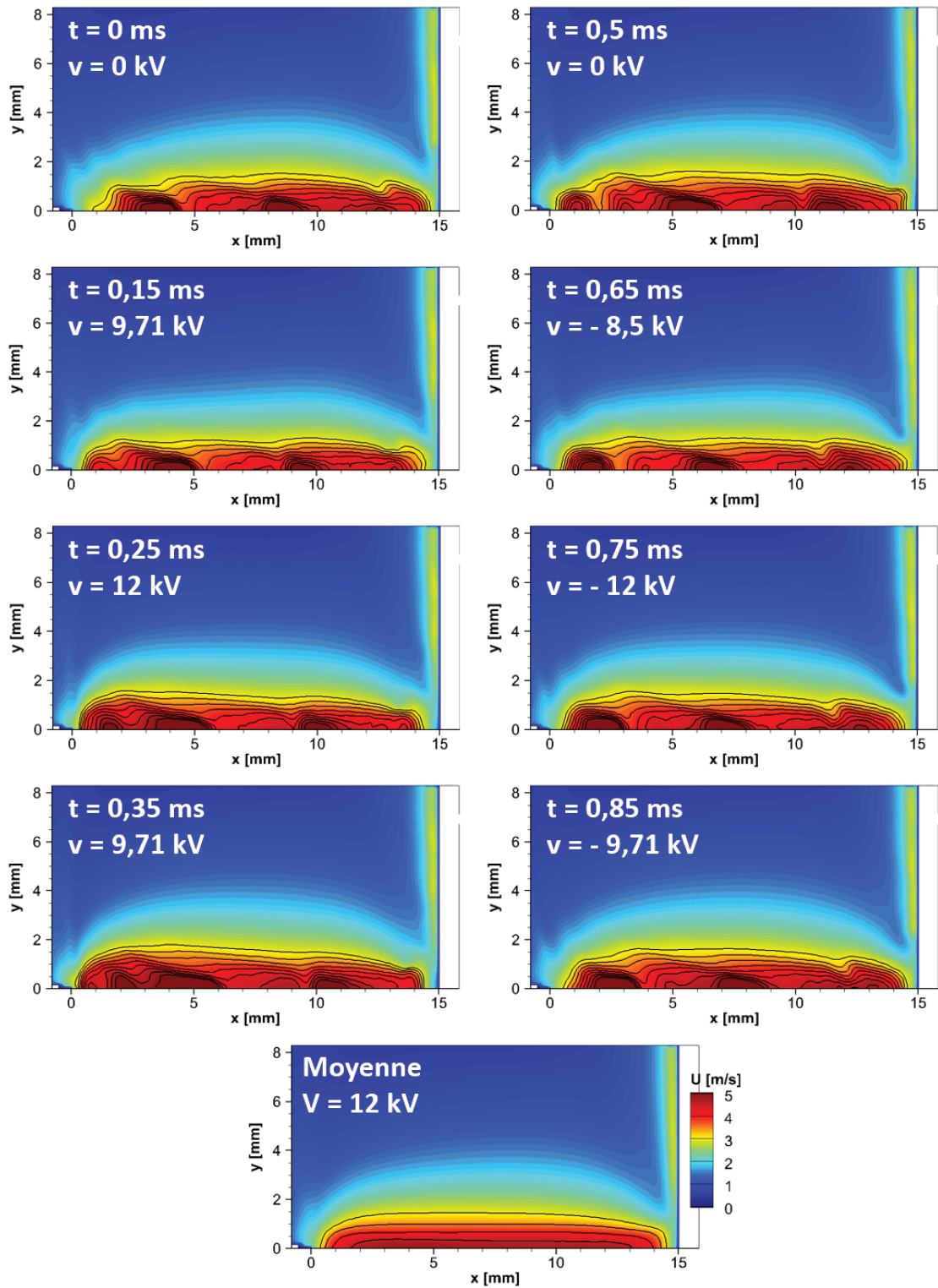


Figure 65. Champs de vitesse en moyenne de phase d'une DBD sinus à 12 kV et 1000 Hz à différents instants pour les particules d'eau.

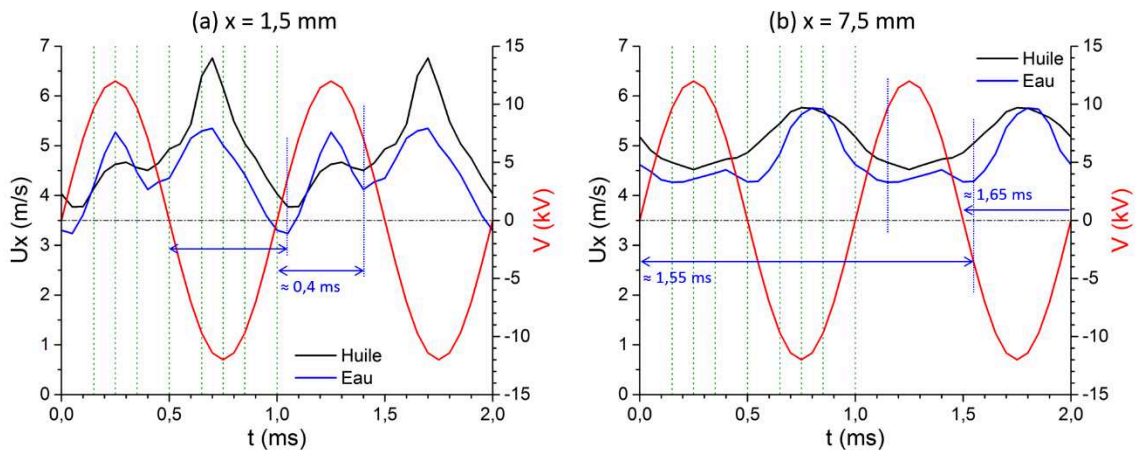


Figure 66 :  $U_x$  et  $V$  en fonction de  $t$  à  $x = 1,5$  (a) et  $7,5$  (b) mm. Les lignes pointillées verticales correspondent aux instants choisis pour les champs de vitesse de la Figure 65.

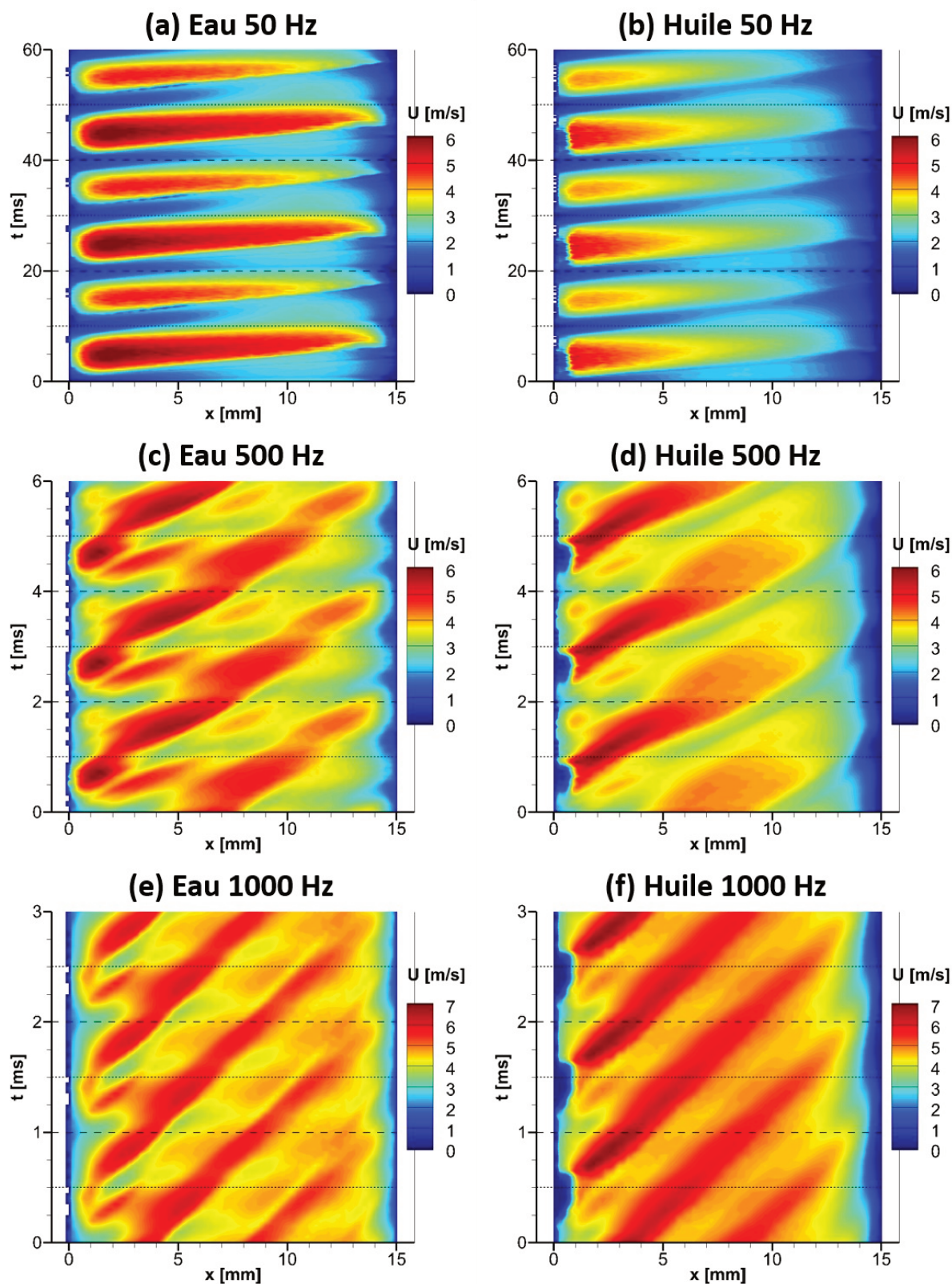
## 4.5 Analyse Spatio-temporelle

La Figure 67 synthétise les résultats précédents sur une représentation spatio-temporelle. On observe que les particules d'eau et d'huile se déplacent dans des directions opposées, ce qui est cohérent avec le signal sinusoïdal appliqué.

À 50 Hz (a et b), les instants de formation des bouffées ainsi que leurs trajectoires sont rapidement leur vitesse initiale par diffusion visqueuse comme un jet classique alors que leur trajectoire est rectiligne. Les particules d'eau et d'huile se déplacent dans des directions opposées, ce qui est cohérent avec le signal sinusoïdal appliqué. Les deux bouffées conservent leur trajectoire rectiligne (donc à vitesses de propagation constante) et parallèle (même vitesse de propagation pour les deux polarités) et ces oscillations répondent au signal sinus appliqué, quelle que soit la valeur absolue de la tension, quelle que soit la polarité du signal ou de la bouffée considérée.

À 500 Hz (c et d), plusieurs points sont à noter : la trajectoire globale des bouffées qui sont, ici aussi, assez semblable dans les deux cas. En effet, les bouffées d'eau et d'huile ne fusionnent pas, le jet avec les deux polarités se propage brutalement à mi-gap. Les deux bouffées conservent leur trajectoire rectiligne (donc à vitesses de propagation constante) et parallèle (même vitesse de propagation pour les deux polarités) et ces oscillations répondent au signal sinus appliqué, quelle que soit la valeur absolue de la tension, quelle que soit la polarité du signal ou de la bouffée considérée.

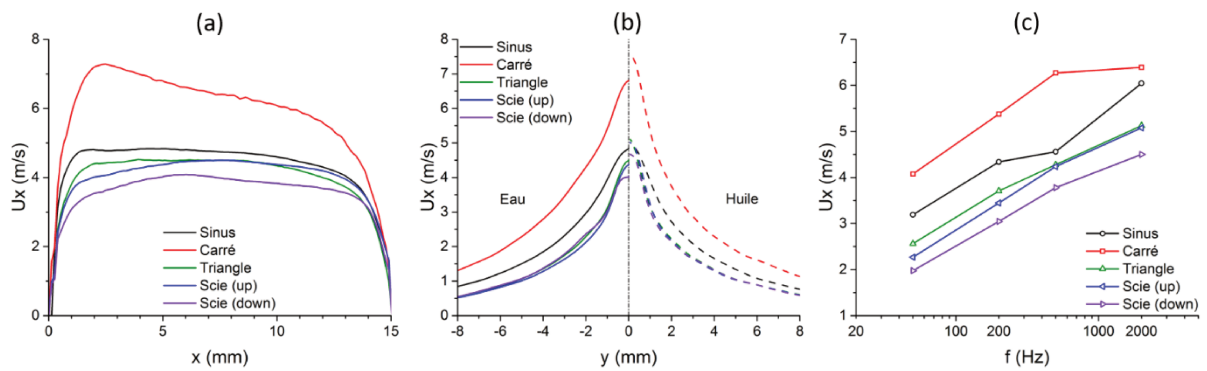




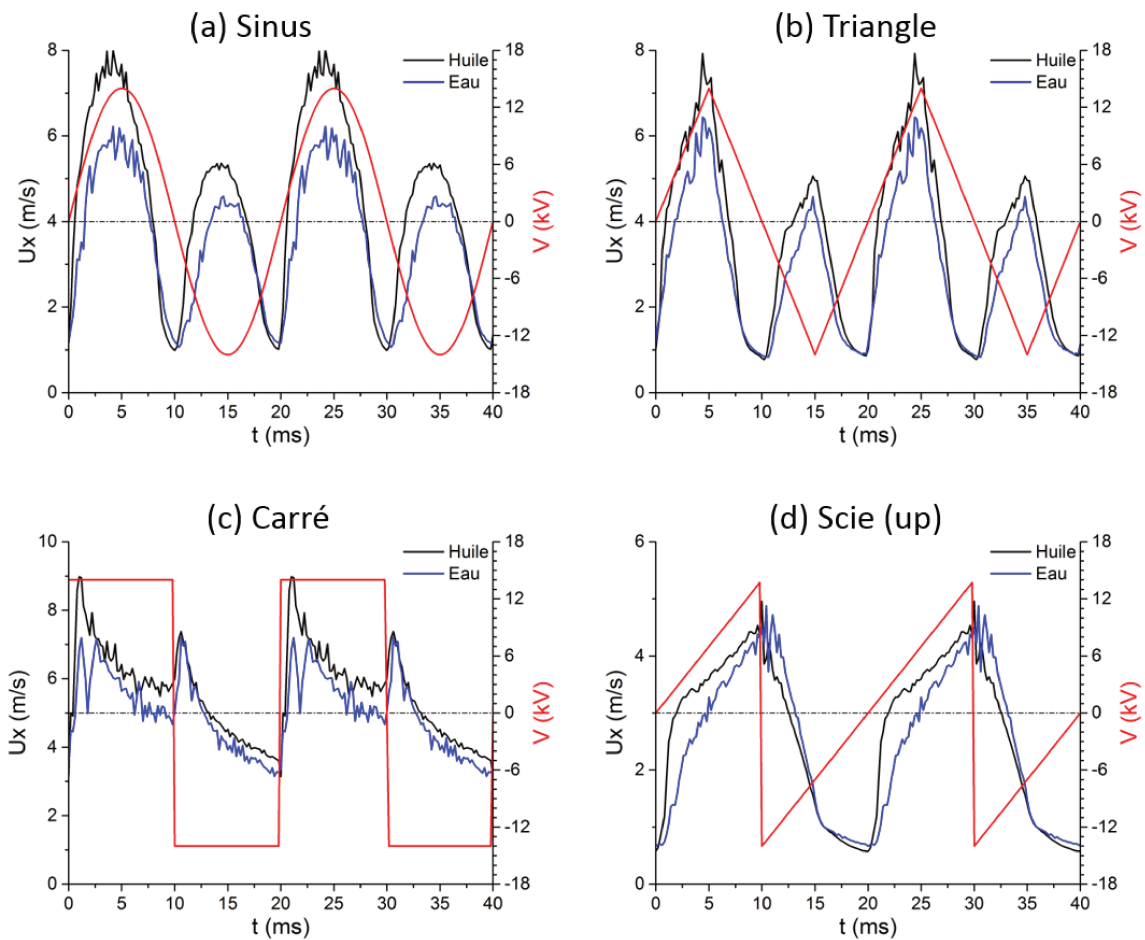
*Figure 67. Cartes spatio-temporelles de la vitesse suivant l'axe  $y=0$  pour des DBD sinus à 12 kV et différentes fréquences, pour les 2 types de particules. Les tirets séparent les périodes, les pointillés marquent le passage d'une polarité négative à positive.*







**Figure 68.** Profils de vitesse moy. pour une DBD à 14kV et 500Hz avec diverses formes d'ondes et des particules d'eau, horizontaux en  $y=0$  (a) et verticaux en  $x=5$  mm (b), et évolution de la vitesse moy. du jet produit par la même décharge selon la fréquence (c).

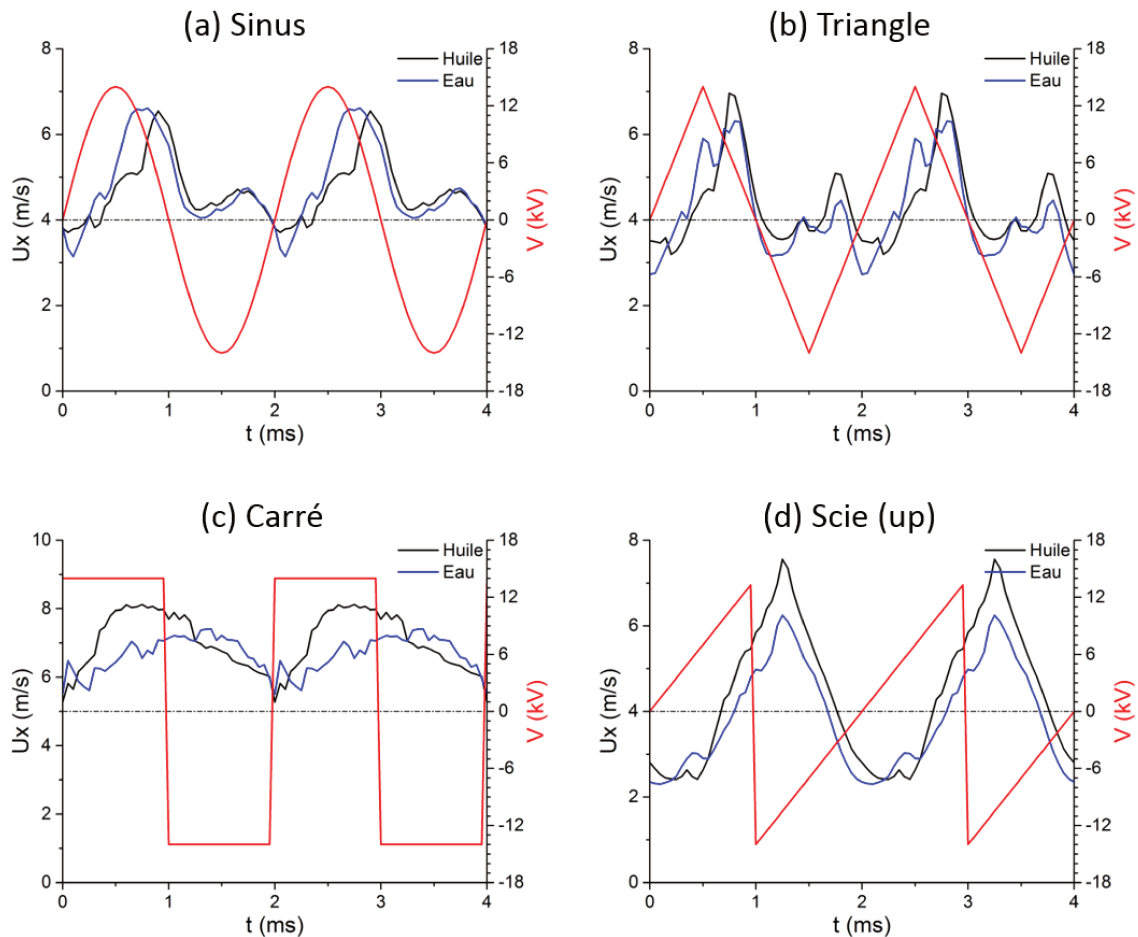


**Figure 69.** Signaux de vitesse en moyenne de phase d'une DBD à 14 kV et 50 Hz pour différentes formes d'ondes pris en  $x = 1,5$  mm et  $y = 0$ .

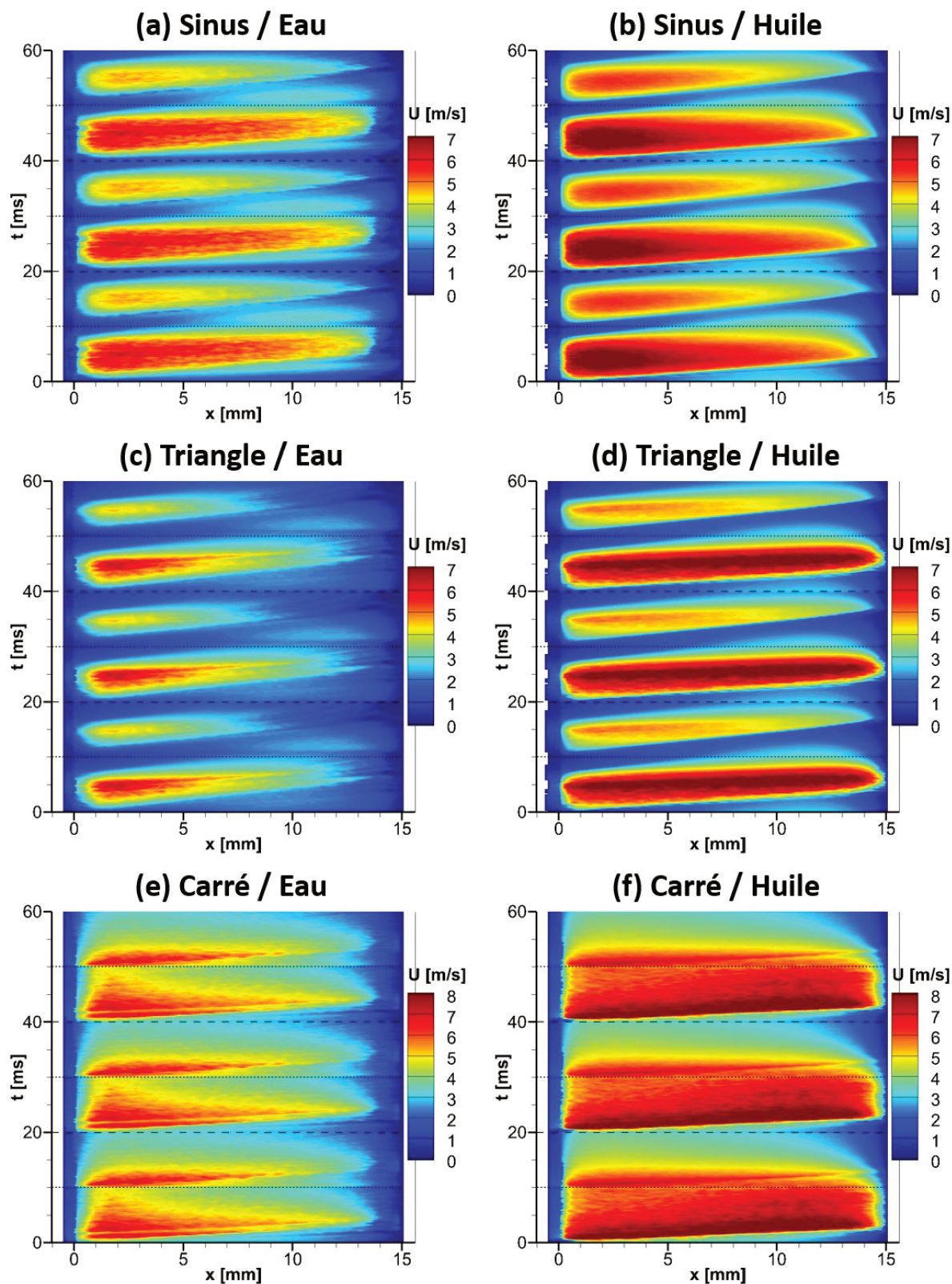
Néanmoins, la [Figure 58](#) montre que la vitesse du jet avec l'huile augmente plus rapidement avec la tension (a), surtout à basse fréquence (b), ce qui justifie ce comportement.

Au-delà de cette différence d'amplitude, tous les signaux de vitesse pour les particules d'eau suivent les mêmes évolutions temporelles que celles établies au Chapitre 3 pour le vent ionique. Une petite différence est tout de même à noter : lorsqu'une bouffée est en cours d'émission, sa vitesse croît légèrement moins vite pour l'eau que pour les particules d'huile. Cela est particulièrement visible pour le signal en dents de scie montante (d) qui présente la rampe de tension la plus faible et des signaux de vitesse de même amplitude. Cela pourrait s'expliquer de la façon suivante : **lorsqu'il y a une forte accélération du vent ionique du fait d'une forte pente de tension, les particules d'eau, plus grandes et plus massives, ne suivent plus parfaitement le vent ionique ; il y a alors un phénomène de glissement entre le vent ionique et les particules d'eau.**

La [Figure 70](#) représente les mêmes courbes pour des signaux de tension à 500 Hz.



[Figure 70](#). Signaux de vitesse en moyenne de phase d'une DBD à 14 kV et 500 Hz pour différentes formes d'ondes pris en  $x = 1,5$  mm et  $y = 0$ .



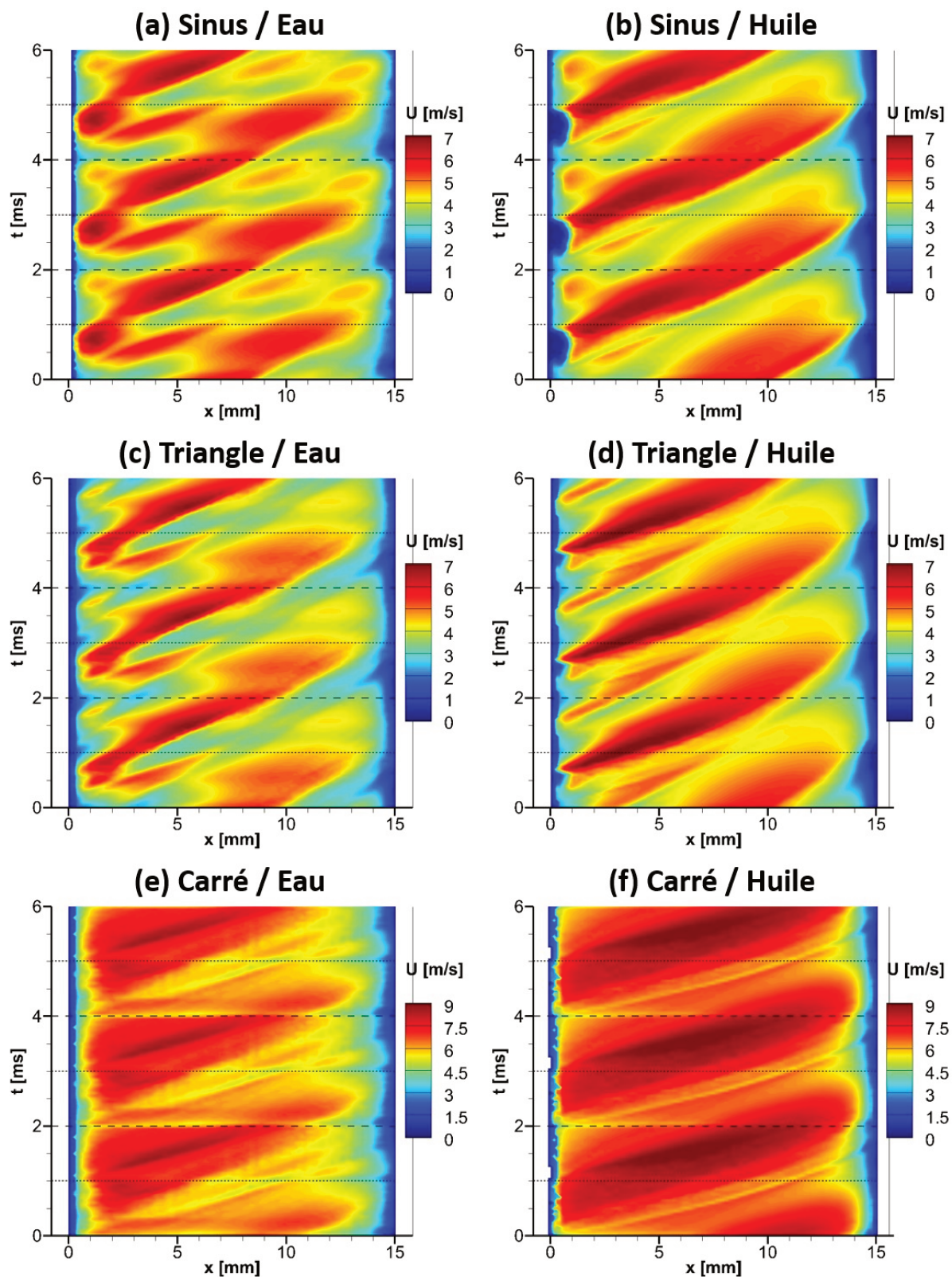
*Figure 71. Cartes spatio-temporelles de la vitesse suivant l'axe  $y=0$  pour des DBD à 14 kV et 50 Hz pour diverses formes d'ondes et les 2 types de particules. Les tirets séparent les périodes, les pointillés marquent le passage d'une polarité négative à positive.*



Pour le sinus (a), les signaux pour les deux types de particules apparaissent toujours au  $\sim 10^{-8}$  s. Si cette  $\sim 10^{-8}$  s. Pour le triangle (b), le constat  $\sim 10^{-8}$  s. Comme négatives) formant deux pics successifs, au moment maximum de tension puis 0,3 millisecondes plus tard. Cet effet est dû à la brusque inversion du champ électrique local au passage du pic maximum du signal triangle qui exerce alors une force de rappel sur les gouttelettes proches de la pointe. Pour le signal carré (c) et en dents de scie montante  $\sim 10^{-8}$  s. Pour le carré, un phénomène analogue au triangle se met en place,  $\sim 10^{-8}$  s. contrebalançant la forte accélération du vent ionique. Pour la dent de scie en revanche, cette pente est trop faible similairement au cas 50 Hz avec des particules qui suivent le  $\sim 10^{-8}$  s. plus faible.

$\sim 10^{-8}$  s. temporelles du jet. Pour une basse fréquence (50 Hz), sur la [Figure 71](#)  $\sim 10^{-8}$  s. Figure 67, la topologie du jet est très similaire dans les deux cas, mais le jet  $\sim 10^{-8}$  s. est encore plus faible, avec une vitesse des bouffées qui chute très vite dans le gap et une proportion faible du signal pendant lequel la décharge est active. Pour le signal carré (e et  $\sim 10^{-8}$  s. notamment pour la partie positive. Il y a en effet une baisse de vitesse importante dans le  $\sim 10^{-8}$  s. dernier semble se comporter sur la demi-période positive comme une décharge continue  $\sim 10^{-8}$  s. Voir [Fig. 16](#)).

$\sim 10^{-8}$  s. élevée, 500 Hz pour la [Figure 72](#), les différences  $\sim 10^{-8}$  s. signal de tension apparaît. En effet le jet  $\sim 10^{-8}$  s. maximum. Ce phénomène apparaît dans tout le gap simultanément, presque sans délai.



*Figure 72. Cartes spatio-temporelles de la vitesse suivant l'axe  $y=0$  pour des DBD à 14 kV et 500 Hz pour diverses formes d'ondes et les 2 types de particules. Les tirets séparent les périodes, les pointillés marquent le passage d'une polarité négative à positive.*



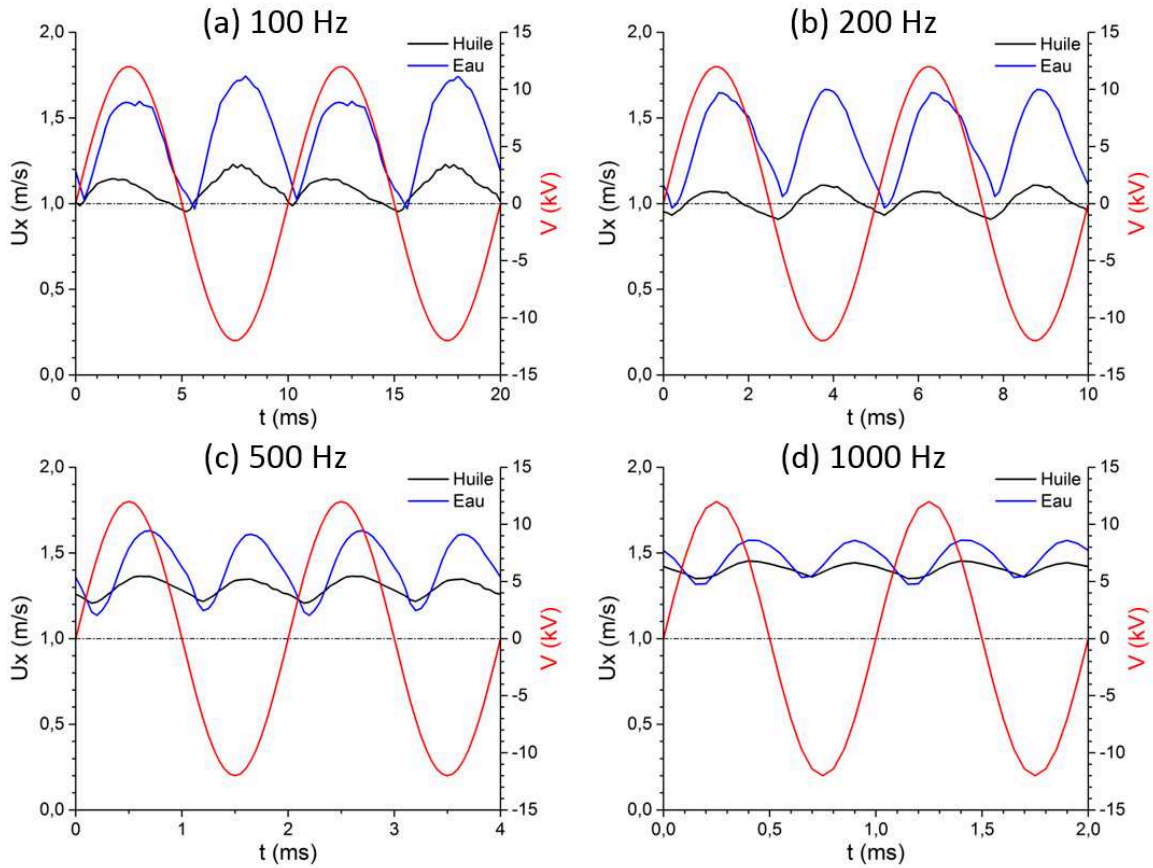


Figure 73. Moyenne, minimum et maximum de la composante horizontale de la vitesse, prise en  $y = 4$  mm et  $x = 7,5$  mm, pour différentes fréquences.

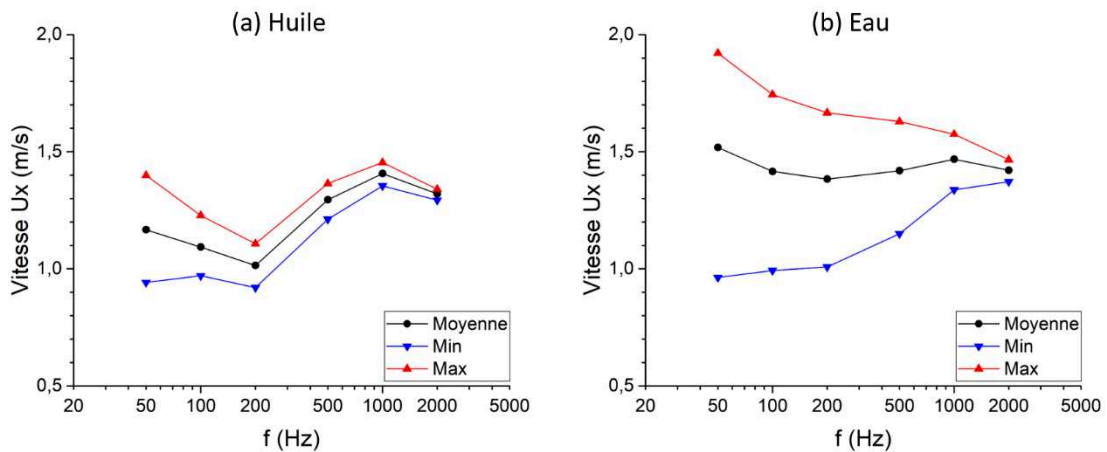


Figure 74. Moyenne, minimum et maximum de la composante horizontale de la vitesse, prise en  $y = 4$  mm et  $x = 7,5$  mm, pour différentes fréquences.

## 4.7 Précipitation électrostatique

électrostatique sur les  
Puis, dans un second temps, des essais de précipitation sont conduits pour déterminer les configurations les plus efficaces parmi les cas testés.

### 4.7.1 Signaux de vitesse en dehors du jet principal

Concernant les signaux de vitesse en dehors du jet principal, la mesure est réalisée aux coordonnées  $x = 7,5$  mm et  $y = 4$  mm pour toutes les configurations, donc au milieu du gap, de telle sorte que la composante axiale de la vitesse soit minimale, et suffisamment divisée par deux (pour le cas avec le jet le plus large, cela correspond plus généralement à une baisse de 4 à 5).

Dans cette zone, on retrouve une oscillation de la composante horizontale de la vitesse avec le signal de tension. La [Figure 73](#) présente ces signaux pour une tension sinus à 12 kV et différentes fréquences. Comme précédemment, on retrouve un délai entre tension pour les décharges positives et décharges négatives, avec ici aucune différence produit au centre du jet ne se retrouve donc pas quelques millimètres en dehors. Cette oscillation avec la tension mais la dynamique est similaire. Ces signaux de vitesse peuvent être décrits par deux paramètres, la vitesse minimale des signaux, identique pour les deux types de amplitude des oscillations. Il semble que la vitesse minimale évolue donc différemment pour les deux types de particules.

est plus lisible sur la [Figure 74](#), présentant grandeurs en fonction de la fréquence : la vitesse moyenne et les vitesses minimales et maximales des oscillations. La vitesse minimale est constante autour de 1 m/s à basse fréquence, pour les deux types de particules, puis augmente après 200 Hz. La vitesse maximale est pilotée par la courbes de vitesse minimale et maximale, et cette amplitude décroît nettement avec la fréquence. La vitesse minimale évolue donc différemment pour les deux types de particules.

que la vitesse minimale est quasiment constante, puis une augmentation après 200 Hz.

Concernant le dernier point à 2000 Hz, le manque de résolution temporelle explique peut-être que la vitesse moyenne reparte à la baisse.

Les oscillations est partiellement compensée par constante. vitesse minimale.

La vitesse minimale semble correspondre à la diffusion visqueuse du jet. Mais il a été Fig. 57 et 59b composante de précipitation. Le faible temps de réponse entre le signal électrique et celui de la vitesse, identique pour toutes les fréquences qui plus est, exclut que les oscillations ionique ( 5 m.s<sup>-1</sup>) depuis la pointe [0 ; 0], le délai visible serait alors supérieur à la milliseconde pour atteindre le point de coordonnées [7,5 ; 4]. De plus, sur les Figures 21b, visqueuse du jet devrait être la même dans les deux cas.

Ces oscillations en périphérie du jet sont donc principalement causées par la précipitation électrostatique des particules. Si la vitesse de base est imputable au vent ionique, alors la précipitation ne semble pas exercer (dans cette gamme de fréquences) des particules dans cette zone est suffisamment faible pour que la charge suive le signal de tension, à la hausse comme à la baisse.

#### 4.7.2 Essai de Précipitation

modifié les conditions de la décharge avec une vitesse « non nulle et la présence de parois supplémentaires (voir Chapitre 5.3). À la place, les essais ont été menés de la même façon que lors des mesures de PIV avec la géométrie ouverte dans un aquarium 10<sup>4</sup> particules par centimètre- ; réalisé. temps de résidence fixe, comparable pour toutes les configurations.

Le protocole expérimental est donc le suivant. Le réacteur est placé au centre de l'aquarium. Un béccher est positionné en dessous de la paroi collectrice dont la forme

)<sup>a</sup>; -Q @ E Q - E E Y ; - S à blanc », sans décharge, permet de déterminer la masse  $Y_i \pm \text{Eoc} \text{E} \dot{Y}^S$ ; ; E Q @ Y ; ; - S Y ; - S o e Y ; a - S Y a - ; - S Q Z S - ; - Q @ - Y ; ; Q d Y S Y - a Y S - - S ; - Y ; ; E Q @ ; - « Y ; - E E Y - E E - d Y pesé. Pendant ces 20 premières minutes, à peine 100 mg  $\pm$  50 mg est collecté. Z ; - S Y - renouvelé avec cette fois- d - S ; - Y ; - Y ; - E Y a q e - d S ; - S ; Y ; - moyenne de 700 mg  $\pm$  50 mg et un débit moyen de 10 mg/min après saturation. Cette valeur sera donc soustraite à tout essai ultérieur. Ces essais sont donc menés avec 20 S ; - Y ; - Q - Y S E - Y Y Y ; - S o e Y ; - Y ; - S Y E o e Q - a Y S - ; - d ; - Néanmoins, ces essais ne peuvent traduire que des ordres de grandeur et des tendances. - S Y ; ; - Y ; - Y a « - E E E E - d - Q Y Q Y E - E ; a S Y a - ; forte S o e Y E Y - « Y Q Y - - Q o S ; @ ; a Y - S ; - S Y M e E Y @ S ; a Y ; - concentration de brouillard constante pendant une aussi longue période avec notre dispositif.

Les résultats de ces essais sont présentés sur la [Figure 75](#). Z ; Y E Y @ S - Y ; Y ; S - E o e - E E ; S Y o Y ; - S Y ; @ ; a - S ; o e S E - ; a q e Y S a - ; o e Y a ; - - - , pour ; - Q @ ; - Y « Y ; - S ; - ; o e E a minima. Ceci est logique puisque les particules sont alors amenées à changer de polarité plus souvent lorsque la fréquence augmente et ne - S Y ; a - ; - S ; - S o e Y S Y a - a Y S - q e ; Y ; - ; - S - d Y - Y ; - autour de 6 m.s<sup>-1</sup>, les particules sont forcément confrontées à une inversion de la polarité de la décharge pour des fréquences - S E Y a - . - f n # @ q e - > Y a - S @ q e E ; d e - S Y ; - S Y @ ; - S - S o e Y ; Y o - S o S - S - S o e S - Y ; - S o e - d S ; @ ; a - - S a - - E o e ; @ ; a - S o S Y ; - S les mêmes essais réalisés avec une décharge couronne DC (non-visible sur cette figure) montrent un débit de précipitation bien supérieur, entre 8 et 23 g.h<sup>-1</sup> pour des tensions de 6 à 10 kV, et entre 16 et 18 g.h<sup>-1</sup> pour des tensions de - 6 à - S \* Z S Q @ ; Y « Y ; Y « S - M @ o e Y E E o e Y ; @ ; - ; - S - Y ; - S - Y ; - S - k S Y est brève, plus la précipitation est favorisée, en lien avec le point précédent sur le changement de charge. Le signal triangle se trouve ainsi être très peu performant dans ce rôle, et q e - ; - Y a - S - o e S - S - a - S Y - - S Y - @ ; - Y ; - récupérer la plus E S a Y ; - - S a - Y E - Y ; S - " E S @ « - o e q e S - ; - E o e énergétique (b), pour laquelle on rapporte le débit précédent à la puissance électrique de - S Y E o e Q q e - a - ; - Q @ ; - Y « Y ; - a Y a - Y - o e - S - ; - ; - S o e Y ; - S de leur faible consommation, tandis que le signal carré est pénalisé par la sienne. Z ; - S o e Y E o e Q Y S - Y S ; o e S ; a - S Y a - Y ; - S E - ; a q e Y S a - - - - S - puissance consommée augmente avec cette dernière. Pour les décharges couronne, ; - S o e Y E Y o e Y u e avec la tension et varie de 80 à 50 g/Wh pour des tensions de 6 à 10 kV, et de 160 à 80 g/Wh pour des tensions de - 6 à -8 kV.

)<sup>a</sup>; - E o e Y a o e q e S a - Y ; - S Y ; - E o e Y S Y a - S ; o e S Y ; - S ; - S ; - S ; - S Y ; @ ; a - S E ; ctrode (et sur toutes les autres surfaces du dispositif par ailleurs), le volume collecté sur celle-ci au bout de plusieurs heures de précipitation est a E E S ; ; - a ; - o @ ; - S - S o e S - - d - E o e ; @ Y S - ; ; E Q @ ; - S o e Y ; - Y ; - E S - E o e quement choisies pour minimiser la précipitation électrostatique, ceci était un comportement attendu.

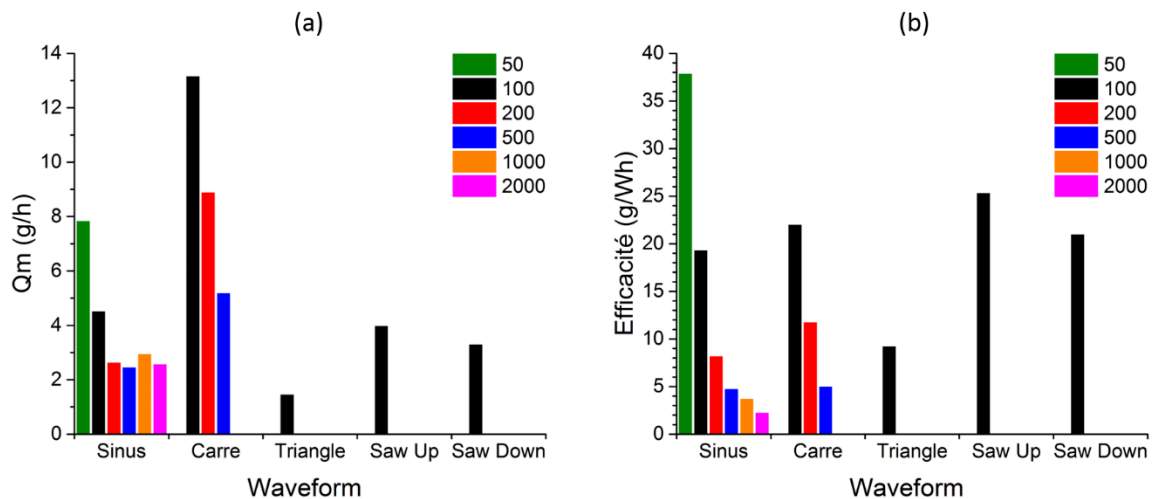


Figure 75. Débit massique (a) et efficacité (b) en fonction de la forme d'onde et de la concentration en particules.

## 4.8 Conclusion sur la dynamique du brouillard

Le brouillard est caractérisé par une majorité de fines particules situées entre 5 et 10 microns de diamètre pour une concentration de l'ordre de 1 à 2 millions de particules par centimètre cube, soumis à une décharge couronne continue ou à une décharge à barrière diélectrique. Cet écoulement est comparé au vent ionique caractérisé au chapitre précédent dans les mêmes configurations.

Les résultats montrent que les gouttelettes changent de comportement et deviennent plus instables, particulièrement dans le cas d'une décharge à barrière diélectrique. La perturbation de la fréquence des pics de Trichel à certaines valeurs de tensions (entre 5 et 8 kV) est en revanche peu affectée. Dans tous les cas, la puissance consommée par la décharge est liée à la précipitation des gouttelettes. Le jet en présence du brouillard est plus instable et présente des fluctuations de débit plus importantes.

Dans le cas de décharge couronne continue, cette forte précipitation des gouttelettes est observée. Le jet en présence du brouillard est plus instable et présente des fluctuations de débit plus importantes. Les résultats montrent que la puissance consommée par la décharge est liée à la précipitation des gouttelettes. Le jet en présence du brouillard est plus instable et présente des fluctuations de débit plus importantes.





périphérie du jet sont donc principalement causées par la précipitation électrostatique  
contre le vent ionique pour impacter la paroi.

# 5 APPLICATION A UN PROCÉDE

## 1, ( & , ( # " , flt l / ) I

La synthèse de molécules organiques par plasma à partir de biogaz décrit au Chapitre 2. A ce propos, le système de réacteur à décharge à basse pression (DBD) a été choisi. L'objectif principal de ce travail est de réaliser la synthèse de molécules organiques par plasma à partir de biogaz. Néanmoins, des problèmes majeurs rencontrés tout au long de ces essais ont conduit à la réalisation de travaux réalisés dans le cadre de cette thèse ont été effectués.

### 5.1 Cahier des charges initial

Pour mener ces expériences il fallait, dans un premier temps, prévoir la conception du réacteur avant toute mise en fabrication. Cinq aspects étaient à prendre en compte : le volume traité, le temps de résidence, la compatibilité des matériaux, la concentration du gaz et la configuration du réacteur.

La configuration en DBD était prévue. Une configuration en DBD était prévue. Une configuration en DBD était prévue. Une configuration en DBD était prévue. Une configuration en DBD était prévue.

Le brouillard précipité est un problème majeur. Le brouillard précipité est un problème majeur. Le brouillard précipité est un problème majeur. Le brouillard précipité est un problème majeur. Le brouillard précipité est un problème majeur.

La concentration du brouillard précipité a été décrite dans la première partie du Chapitre 4, et elle montrait que la concentration du brouillard précipité est un problème majeur.

dépend du débit de gaz porteur. Or, il faut pouvoir découpler le débit de liquide de celui du gaz, le réacteur doit donc intégrer cette problématique car le gaz contenant les molécules à collecter ne peut pas être utilisé comme gaz porteur pour les gouttelettes. Il faut aussi prendre en compte la précipitation du brouillard qui doit avoir lieu dans la zone de décharge.

Les réactifs ou produits à capter, un éventuel gaz porteur de ces molécules (air sec, azote, hélium ou argon) et aussi le gaz porteur du brouillard, pouvant être le même ou non que le précédent, doivent être mélangés en amont de la zone de décharge. Il reste alors à déterminer la distance entre les électrodes sachant que ce mélange doit avoir lieu avant la décharge. Un autre point à estimer, et qui rejoint les aspects précédents, est la vitesse du gaz au passage de la zone de décharge, qui va dépendre du débit total et de la section du réacteur, et qui conditionne le temps de résidence. Une autre préoccupation est la possibilité de molécules pouvant présenter un risque chimique (comme le méthanol).

Un film liquide sur une ou plusieurs parois du réacteur et à une accumulation par gravité en bas de celui-ci. Lors de la décharge, ces effluents liquides doivent pouvoir être récupérés, en minimisant leur mélange avec la phase gazeuse, pour être collectés. Les effluents gazeux doivent être évacués par gravité.

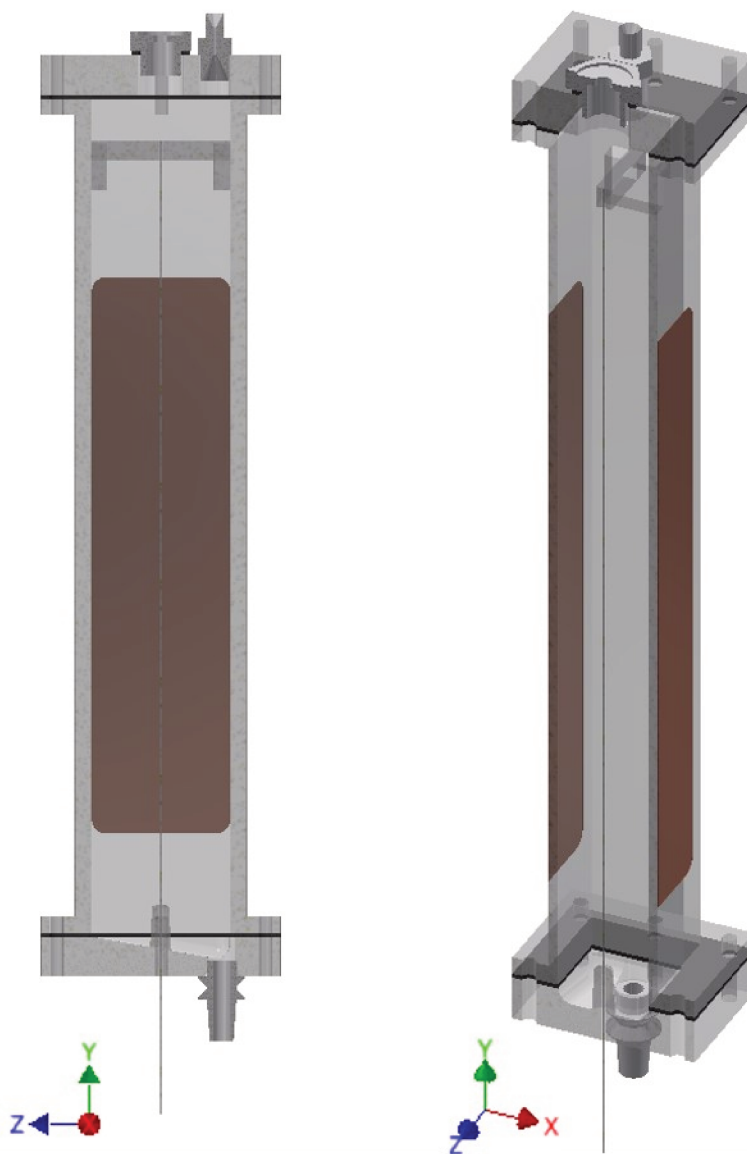
## 5.2 Première version du réacteur

De ces problématiques, un premier design de réacteur a été imaginé. Cette partie décrit ses caractéristiques et les choix qui ont été faits lors de sa conception, puis les essais qui y ont été menés.

### 5.2.1 Caractéristiques du réacteur

La [Figure 76](#) présente le schéma du réacteur. La configuration choisie pour les électrodes est un fil de tungstène de diamètre 0,1 mm, une configuration bien éprouvée pour la précipitation électrostatique (Voir Chapitre 2.3). Il est construit en PMMA de dimensions 50x300 mm<sup>3</sup> en PMMA construit en un seul bloc pour prévenir toute fuite. Les extrémités sont fermées par des brides de fixation.

intègre deux entrées, l'une centrée et de grand diamètre pour le passage du brouillard et de son gaz porteur, l'autre dotée d'un raccord de gaz standard pour l'injection d'espèces chimiques. La bride inférieure présente une surface inclinée pour l'évacuation des condensats liquides vers une unique sortie. L'électrode active est constituée d'un fil de tungstène de 200  $\mu\text{m}$  de diamètre fixé en partie haute du corps de réacteur par un barreau transversal en PMMA. Le fil traverse la bride inférieure via une excroissance qui lui permet de ne pas être en contact direct avec l'écoulement liquide. L'électrode de masse est constituée de deux feuilles adhésives en cuivre de 50×200 mm<sup>2</sup> disposées de part et d'autre à l'extérieur du corps du réacteur. L'épaisseur des parois en PMMA servant de barrière diélectrique est de 3 mm, et le gap entre ces parois et le fil est de 15 mm.



*Figure 76. Schéma de la première version du réacteur.*

## 5.2.2 Essai préliminaire de collecte

Le brouillard injecté dans le réacteur est produit tel que décrit au Chapitre 4.1, avec de l'espèce chimique de test. Les condensats sont séparés du gaz par gravité en sortie du réacteur dans un flacon laveur placé dans un bac à glace.

Le brouillard injecté dans le réacteur est produit tel que décrit au Chapitre 4.1, avec de l'espèce chimique de test. Les condensats sont séparés du gaz par gravité en sortie du réacteur dans un flacon laveur placé dans un bac à glace.

Pour chaque essai, trois échantillons de 1 gramme sont prélevés et testés par chromatographie en phase gaz pour en déterminer la concentration massique en éthanol. Cette concentration est ensuite rapportée à la concentration maximale théorique pour la réaction chimique. Les résultats sont présentés sur la Figure 77. Ce taux très élevé suggère un mélange très fort des phases gazeuse et liquide, même en l'absence de réaction chimique ; le seul rôle de la décharge est de créer de petites gouttelettes qui sont collectées pendant 20 minutes, pendant lesquelles les condensats ne sont pas récupérés (via une vanne bypass du flacon laveur). Puis la collecte des condensats est réalisée pendant 6 minutes et demie, ce qui permet de récolter une dizaine de millilitres par essai.

Pour chaque essai, trois échantillons de 1 gramme sont prélevés et testés par chromatographie en phase gaz pour en déterminer la concentration massique en éthanol. Cette concentration est ensuite rapportée à la concentration maximale théorique pour la réaction chimique. Les résultats sont présentés sur la Figure 77. Ce taux très élevé il suggère un mélange très fort des phases gazeuse et liquide, même en l'absence de réaction chimique ; le seul rôle de la décharge est de créer de petites gouttelettes qui sont collectées pendant 20 minutes, pendant lesquelles les condensats ne sont pas récupérés (via une vanne bypass du flacon laveur). Puis la collecte des condensats est réalisée pendant 6 minutes et demie, ce qui permet de récolter une dizaine de millilitres par essai.

En premier lieu, la grande proximité des phases fait buller la phase gazeuse dans le moindre liquide collecté par précipitation. Quelques centimètres de tuyau, prend certainement le pas sur toute optimisation amont. En revanche, il se peut que la décharge, bien que de faible puissance, modifie chimiquement



























