

Intensification des transferts convectifs par décharge couronne dans un canal : modélisation du couplage électrohydrodynamique.

Sid'Ahmed OULD AHMEDOU, Michel HAVET

Laboratoire de Génie des Procédés-Environnement Agroalimentaire UMR CNRS 6144
Enitiaa, BP 82225, 44322 NANTES Cedex 03,
(auteur correspondant : havet@enitiaa-nantes.fr)

Résumé - Ce travail concerne l'intensification des transferts convectifs pour développer des procédés aérauliques plus économes en énergie. L'intensification provient de la décharge couronne générée par une électrode placée transversalement dans un canal. Nous avons résolu les équations de l'électrohydrodynamique en régime permanent dans une configuration bidimensionnelle. Notre outil numérique combine un algorithme de minimisation et la résolution des équations couplées par la méthode des éléments finis. Cet outil a permis d'analyser les effets du vent ionique sur l'écoulement et les transferts en fonction du potentiel électrique appliqué. Les résultats montrent, qu'à une faible vitesse d'air, le coefficient d'échange convectif peut être localement augmenté d'un facteur deux.

Nomenclature

b	mobilité ionique, $m^2.V^{-1}.s^{-1}$	R	rayon, m
d	distance inter électrode, m	R_c	rayon d'ionisation, m
D	diffusivité ionique, $m^2.s^{-1}$	T	température, K
\vec{E}	champ électrique, $V.m^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
E_0	champ électrique au fil, $V.m^{-1}$	α	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$
E_c	champ électrique d'ionisation, $V.m^{-1}$	ε_0	permittivité électrique du vide, $C.m^{-1}.V^{-1}$
H	hauteur du canal, m	ρ	masse volumique de l'air, $kg.m^{-3}$
\vec{J}	densité de courant, $A.m^{-2}$	ρ_c	densité de charge ionique, $C.m^{-3}$
L	longueur du canal, m	μ	viscosité dynamique de l'air, $Pa.s^{-1}$
p	pression, Pa	<i>Indices</i>	
q	flux de chaleur, W	0	fil
\vec{U}	vitesse, $m.s^{-1}$	p	paroi
V	potentiel, V		

1. Introduction

La convection forcée est le mode de transfert de chaleur le plus employé dans les procédés aérauliques du secteur agro-alimentaire. Que ce soit pour les traitements thermiques (cuisson, séchage) ou frigorifiques (réfrigération, congélation), le produit alimentaire, généralement placé dans un tunnel, est soumis à un écoulement d'air assurant les transferts. Le volume d'air ainsi brassé est conséquent et génère une forte consommation d'énergie. Des procédés alternatifs doivent être envisagés pour réduire cette consommation en intensifiant les transferts convectifs. Dans le cadre de ces procédés aérauliques, l'intensification des transferts peut s'envisager par la mise en œuvre d'un champ électrique de faible intensité. Parmi les techniques d'intensification, Allen et Karayiannis [1] souligne en effet le grand intérêt de l'électrohydrodynamique (EHD) et plus particulièrement celui du 'vent ionique' généré par une décharge couronne. Celle-ci se produit au voisinage d'une électrode de très faible rayon de courbure portée à un très fort potentiel électrique. Dans ces conditions, le champ électrique est suffisamment intense pour ioniser l'air. Bien que les phénomènes d'ionisation au voisinage du fil soient complexes, ils se concrétisent finalement par une génération d'ions unipolaires de même polarité que

l'électrode de décharge [2]. Ceux-ci se déplacent ensuite dans la zone de dérive vers une électrode collectrice, typiquement une plaque reliée à la terre. Le transfert de quantité de mouvement entre ions et molécules neutres est à l'origine du vent ionique [3]. Ces phénomènes ont déjà reçu beaucoup d'attention dans des configurations académiques. Les travaux évaluant l'influence du vent ionique sur les écoulements de couche limite et sur la convection naturelle sont particulièrement nombreux [1, 4, 5, 6]. Il a été clairement démontré l'intérêt du vent ionique sur l'accroissement des transferts de chaleur par convection naturelle [7, 8]. Par contre, les résultats sont contradictoires en convection forcée. Dans le cas du transfert de chaleur convectif le long d'une plaque plane, un effet combiné des forces électriques et d'inertie a déjà été observé [9]. D'autres études n'ont cependant pas permis d'observer un tel effet synergique sur les transferts de matière [10, 11].

En ce qui concerne plus spécifiquement l'intensification des transferts dans les écoulements en canal, la littérature est moins abondante. Une revue bibliographique a souligné que cette configuration était encore trop peu explorée malgré un intérêt évident lié à la création de zones tourbillonnaires [4]. Depuis, des travaux ont été menés dans des applications concernant les échangeurs de chaleur avec une électrode de décharge placée longitudinalement dans le canal [12, 13]. Le vent ionique génère alors une intensification des transferts aussi bien dans la zone d'entrée que dans la zone pleinement développée. Par contre, le cas d'une électrode transversale n'a pas fait l'objet d'investigations très poussées. Cette configuration est pourtant *a priori* intéressante pour intensifier les transferts dans les procédés aérauliques. Elle a d'ailleurs suscité de l'intérêt dans les procédés de précipitation électrostatique [14] et de séchage [15]. Nos travaux expérimentaux sur le séchage ont notamment révélé une très forte variation de la cinétique de séchage selon le potentiel appliqué et la vitesse de l'écoulement [15].

Afin d'obtenir une meilleure compréhension des mécanismes physiques dans le cas d'une électrode de décharge placée transversalement dans un canal, nous avons mené une étude numérique. L'objectif principal de ce travail consiste à modéliser les phénomènes électrohydrodynamiques dans cette configuration en considérant les différents couplages gouvernant les transferts. Nous présentons dans un premier temps ce modèle et la méthode de résolution que nous avons développée pour traiter ce problème couplé dans une géométrie bidimensionnelle. Nous présentons et discutons ensuite des résultats obtenus en terme principalement d'écoulement et d'intensification des transferts convectifs.

2. Modélisation

Nous considérons un canal dans lequel de l'air entre à température imposée. Un fil placé transversalement dans le canal constitue l'électrode de décharge (figure 1). Un flux de chaleur q_p est imposé sur la paroi inférieure du canal.

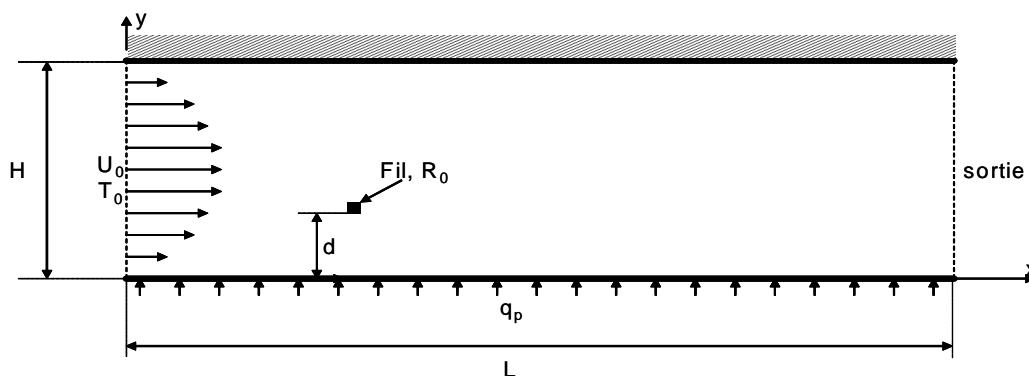


Figure 1 : Configuration bidimensionnelle étudiée

2.1. Modèle

Nous avons mis en oeuvre l'approche classique consistant à distinguer d'un point de vue électrique la zone de décharge au voisinage du fil et la zone de dérive [15, 16]. La zone

d'ionisation est assimilée à un producteur d'ions dont la valeur ne peut être connue *a priori*. Dans la zone de dérive, nous avons résolu les équations régissant les phénomènes électrohydrodynamiques (1-4). Ces équations fortement non linéaires indiquent que le champ électrique est modifié par la charge ionique (2) ; que celle-ci est diffusée et transportée par le champ électrique et l'écoulement (4).

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho_c}{\varepsilon_0} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (3)$$

$$\vec{J} = \rho_c b \vec{E} + \rho_c \vec{U} - D \nabla \rho_c \quad (4)$$

Les conditions aux limites pour le potentiel sont de type Dirichlet au fil ($V=V_0$) et à la plaque inférieure ($V=0$) et de type Neumann ailleurs ($\partial V / \partial n = 0$). Par contre, une procédure spécifique est requise pour déterminer la charge ionique au fil. La décharge couronne ne se produit en effet que lorsque le champ électrique local atteint une valeur seuil décrite par la loi semi-empirique de Peek (5). Nous l'avons appliquée, avec $\delta=1$ et $E_c = 3.10^6 \text{ V.m}^{-1}$, et associée à l'hypothèse de Kaptzov liant les champs électriques au fil et à l'interface entre les zones d'ionisation et de dérive (6). Elle ne fournit pas directement la densité de charge au fil mais il existe une valeur de cette densité de charge qui satisfait cette hypothèse. Pour la déterminer, nous avons mis en œuvre un algorithme de minimisation basée sur la méthode du simplex.

$$E_0 = E_c \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{R_0 \cdot \delta}} \right) \quad (5)$$

$$E_0 \cdot R_0 = E_c \cdot R_c \quad (6)$$

Nous avons également résolu les équations de conservation de la matière, de la quantité de mouvement et de l'énergie en régime laminaire, en considérant les propriétés thermophysiques de l'air constantes (7-9). L'effet du champ électrique est pris en compte dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement par la force de Coulomb $\rho_c \vec{E}$.

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (7)$$

$$\rho (\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{U} + \rho \vec{g} + \rho_c \vec{E} \quad (8)$$

$$\vec{U} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\alpha \nabla T) \quad (9)$$

Les conditions aux limites pour la température sont de type Dirichlet à l'entrée ($T=T_0$) et de type Neumann à la paroi inférieure (flux imposé) et ailleurs (conditions adiabatiques). En ce qui concerne la vitesse, des conditions classiques sont appliquées avec notamment un profil parabolique à l'entrée (vitesse moyenne u_0).

2.2. Résolution numérique

L'ensemble de ces équations aux dérivées partielles à été résolu en utilisant la méthode des éléments finis sous le solveur Comsol Multiphysics®. La procédure de minimisation, qui fait régulièrement appel au solveur et permet de déterminer la densité de charge au fil, a été développée sous Matlab®. Après une analyse de sensibilité des résultats au maillage nous avons choisi dans notre géométrie ($L=40 \text{ cm}$, $H=10 \text{ cm}$, $d=3 \text{ cm}$, $R_0=0,5 \text{ mm}$) 12000 éléments triangulaires avec un maillage raffiné près des parois et au voisinage du fil (figure 2).

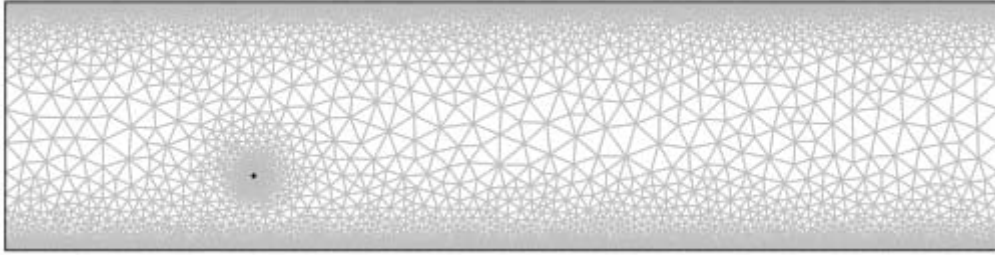


Figure 2 : *Maillage du domaine*

3. Résultats

Notre modèle et la procédure de résolution ont été préalablement validés pour la partie électrique dans une configuration fil/plaque sans écoulement transversal. Nous ne développons pas cet aspect ici et présentons directement les résultats obtenus dans le cas complet avec écoulement transversal. Il faut tout d'abord souligner que pour une géométrie fixée, il s'agit d'incrémenter progressivement la tension appliquée au fil pour déterminer le champ électrique d'ionisation puis l'évolution du courant en fonction de cette tension. Nous avons ainsi obtenu par notre procédure de minimisation la courbe caractéristique de notre configuration (figure 3). Elle possède une allure conventionnelle : à partir d'une tension seuil (ici 17 kV), l'ionisation se déclenche puis le courant augmente jusqu'à la tension de claquage.

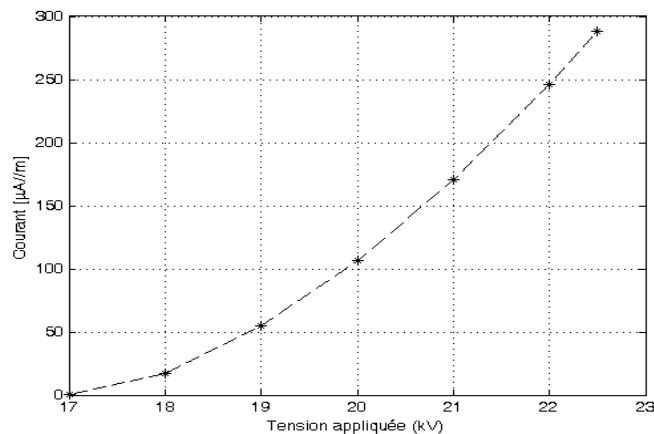


Figure 3 : *Courbe caractéristique Courant-Tension*

Cette courbe permet de choisir par la suite une tension de travail. Nous avons fixé dans un premier temps la tension appliquée au fil à 20 kV . Dans ces conditions et pour une vitesse d'entrée $u_0=0,23\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, nous obtenons les distributions de potentiel (figure 4) et de densité de charge (figure 5) qui témoignent de très forts gradients près de l'électrode de décharge. Le champ de vitesse résultant témoigne que l'écoulement transversal est complètement perturbé par le vent ionique (figure 6). La force de Coulomb est en effet prépondérante vis-à-vis des forces d'inertie. Ce résultat n'est cependant pas représentatif de l'ensemble des simulations réalisées. Pour des vitesses d'air supérieures, les forces d'inertie sont telles que le vent ionique altère moins, voire pas du tout, l'écoulement principal.

Pour une vitesse d'entrée fixée ($u_0=0,23\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), nous avons évalué l'influence de la tension appliquée sur l'évolution du coefficient d'échange convectif le long de la paroi inférieure (figure 7). Il apparaît clairement que dans la zone d'entrée, les perturbations engendrées par le vent ionique ne sont guère intéressantes. Par contre, en amont du fil le coefficient d'échange

est augmenté : le vent ionique, qui altère la couche limite, provoque une intensification d'autant plus prononcée que la tension appliquée est forte. Les résultats obtenus dans cette configuration permettent d'envisager désormais une étude plus approfondie des conditions favorables à l'intensification des échanges convectifs.

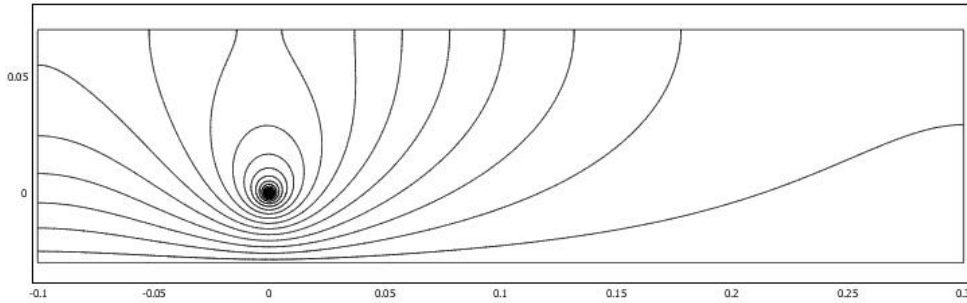


Figure 4 : Champ de potentiel (0-20kV par pas de 1,5 kV) ; $V_0=20$ kV et $u_0= 0,23$ m.s⁻¹

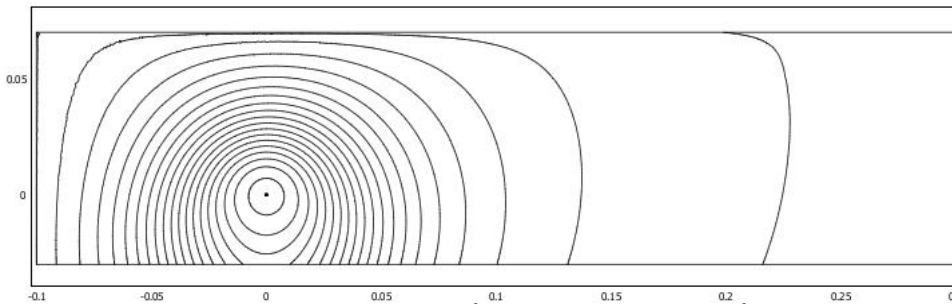


Figure 5 : Champ de densité de charge (0-25 $\mu\text{C.m}^{-3}$ par pas de 1,25 $\mu\text{C.m}^{-3}$) ; $V_0=20$ kV et $u_0= 0,23$ m.s⁻¹

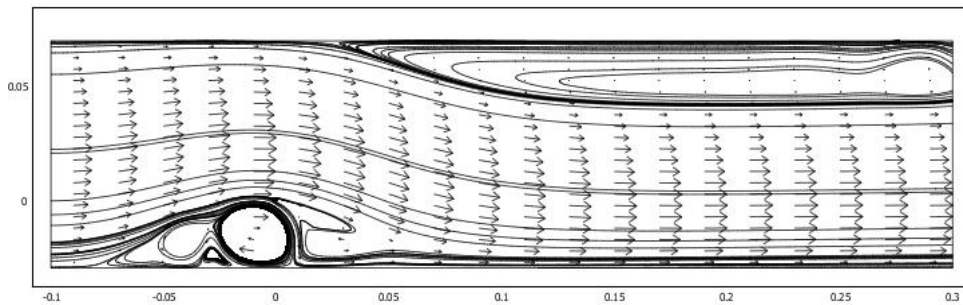


Figure 6 : Champ de vitesse et lignes de courant ; $V_0=20$ kV et $u_0= 0,23$ m.s⁻¹

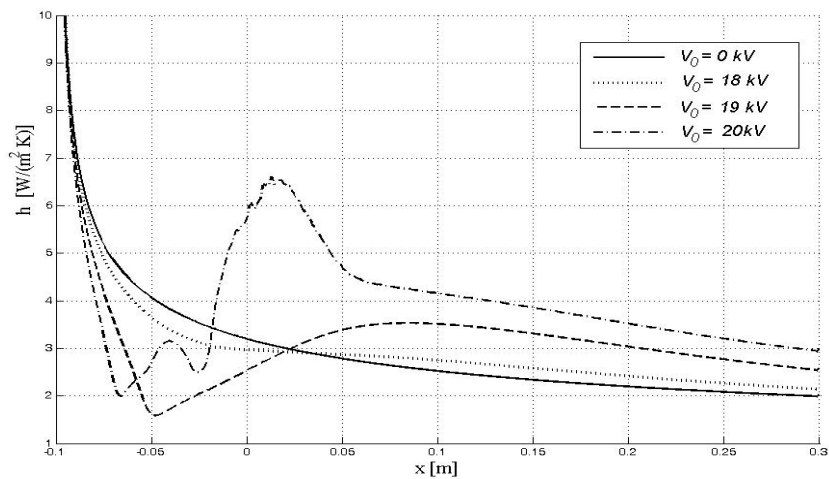


Figure 7 : Coefficient d'échange convectif local sur la paroi inférieure selon V_0 ; $u_0= 0,23$ m.s⁻¹

4. Conclusion

Nous avons développé un outil numérique permettant de résoudre les équations de l'électrohydrodynamique dans un canal. Cet outil a la particularité de déterminer la densité de charge au fil par minimisation. Les simulations réalisées dans le cas d'une électrode placée transversalement ont confirmé que la modification de l'écoulement par le vent ionique peut générer un accroissement local du coefficient d'échange convectif. Ce travail numérique, qui nous incite à mener une étude paramétrique plus exhaustive, va servir de base à la conception d'un banc expérimental visant à valider nos résultats et à déterminer les plages de fonctionnement (géométrie, potentiel, vitesse) pour lesquelles l'intensification par décharge couronne offrirait un potentiel intéressant dans les procédés aérauliques.

Références

- [1] P.H.G. Allen, T.G. Karayiannis, Electrohydrodynamic enhancement of heat transfer and fluid flow, *Heat Recovery Systems and CHP*, 15-5 (1995), 389-423
- [2] J. Chen, H. Davidson, Electron Density and Energy Distributions in the Positive DC Corona: Interpretation for Corona-Enhanced Chemical Reactions, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 22-2 (2002), 199-224
- [3] M. Rickarda, D. Dunn-Rankina, F. Weinberg, F. Carleton, Characterization of ionic wind velocity, *Journal of Electrostatics*, 63 (2005), 711-716
- [4] J.H. Davidson, F.A. Kulacki, P.F. Dunn, Convective heat transfer with electric and magnetic fields. In S. Kakaç, K. Shah, W. Aung, *Handbook of single-phase convective heat transfer*, Wiley Interscience publication, New-York, (1987).
- [5] S. Laohalertdecha, P. Naphon, S. Wongwises, A review of electrohydrodynamic enhancement of heat transfer, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11-5 (2007), 858-876
- [6] N. Kasayapanand, T. Kiatsiriroat, Numerical modeling of the electrohydrodynamic effect to natural convection in vertical channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34-2 (2007), 162-175
- [7] B.L. Owsenek, J. Seyed-Yagoobi, Theoretical and experimental study of electro-hydrodynamic heat transfer enhancement through wire-plate corona discharge, *Journal of Heat Transfer*, 119 (1997), 604-610.
- [8] B.L. Owsenek, J. Seyed-Yagoobi, R.H. Page, Experimental investigation of corona wind heat transfer enhancement with a heated horizontal flat plate, *Journal of Heat Transfer*, 117 (1995), 309-315.
- [9] S.E. Sadek, R.G. Fax, M. Hurwitz, The influence of electric fields on convective heat and mass transfer from a horizontal surface under forced convection, *Journal of Heat Transfer*, 94 (1972), 144-148.
- [10] F.C. Lai, R.K. Sharma, EHD-enhanced drying with multiple needle electrodes, *Journal of Electrostatics*, 63 (2005), 223-237.
- [11] F.C. Lai, M. Huang, D.S. Wong, EHD-enhanced Water Evaporation, *Drying Technology*, 22-3 (2004), 597-608.
- [12] M. Molki, P. Damronglerd, Electrohydrodynamic enhancement of heat transfer for developing air flow in square ducts, *Heat Transfer Engineering*, 27-1 (2006), 35-45
- [13] M. Molki, K.L. Bhamidipat, Enhancement of convective heat transfer in the developing region of circular tubes using corona wind, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47 (2004), 4301-4314
- [14] R. Baron, M. Havet, C. Sollic, D. Pierrat, G. Touchard, Numerical and Experimental Study of a Continuous Electrostatic Smoking Process, *IEEE Transactions on Industry Applications*, (2007). Sous presse.
- [15] S.A. Ould Ahmedou, O. Rouaud, M. Havet, Electrohydrodynamic enhancement of heat and mass transfer in food processes. in *CIGR Section VI International Symposium on food and agricultural products: processing and innovations*, 24-26 September 2007 Naples, Italy.
- [16] J.Q. Feng, Application of Galerkin finite-element method with Newton iterations in computing steady-state solutions of unipolar charge currents in corona devices, *Journal of Computational Physics*, 151 (1999), 969-989