

Etude de la température d'un jet de fluide chauffé par Effet Joule direct à hautes fréquences

Sami GHNIMI^{1*}, Jean-François MAINGONNAT², Nicolas FLACH-MALASPINA¹, Marlene DRESCH³, Guillaume Delaplace²

¹EDF R&D, Département Eco-efficacité des Procédés Industriels
Avenue des Renardières, Écuellles-77818 Moret-sur-Loing Cedex, France

²INRA, Laboratoire de Génie des Procédés et Technologies Alimentaires
369, Rue Jules Guesde-BP39-F-59651 Villeneuve D'Ascq, France

³ADEME, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
2 Square La Fayette, BP 90406, 49004 Angers, France.

* (auteur correspondant : sami.ghnimi@utc.fr)

Résumé - Deux méthodes de mesure de la température d'un jet de fluide, soumis à des hautes tensions (400-3800 V) et à des hautes fréquences (30 kHz) ainsi qu'à des fortes densités de courant, sont proposées. L'évolution de la température le long du jet a été déterminée par un capteur de température à fibre optique de contact ainsi que par caméra thermographique infrarouge. Un modèle analytique de distribution de la température le long du jet a été aussi proposé et validé par les deux méthodes de mesure expérimentales. Ces mesures sont primordiales pour l'étude des performances thermiques et énergétiques d'un nouveau procédé de chauffage ohmique à jet de fluide.

Nomenclature

A	section du jet, m^2	x	position axiale, m
a	rayon de la buse d'injection, m	U	tension électrique, V
c_p	chaleur massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	v	vitesse du jet, $m.s^{-1}$
F_r	nombre de Froude, [-]	v_0	vitesse initiale du jet, $m.s^{-1}$
g	accélération de la gravité, $m.s^{-2}$	<i>Symboles grecs</i>	
I	Intensité électrique, A	σ_0	conductivité électrique de référence, $S.m^{-1}$
k	facteur de température, K^{-1}	σ	conductivité électrique, $S.m^{-1}$
L	longueur du jet, m	<i>Indices et exposants</i>	
Q	débit massique, $Kg.s^{-1}$	EJD	effet Joule direct
T_e	température d'entrée, K	CMC	carboxymethylcellulose
T	température du jet, K		

1. Introduction

A l'heure actuelle, le traitement thermique des produits alimentaires est essentiellement réalisé à l'aide d'échangeurs de chaleur conventionnels. Bien que ces technologies présentent de nombreux avantages aujourd'hui bien connus [1,2], le traitement thermique des produits agro-alimentaires complexes en procédé continu reste problématique. En effet ceux-ci, basés sur un chauffage pariétal, font souvent intervenir des parois très chaudes au contact desquelles les fluides thermosensibles peuvent être détériorés (changement de goût, réaction indésirable, brûlage), avec l'apparition des phénomènes d'encrassement [3,4], une efficacité énergétique médiocre, un nettoyage fréquent des lignes de production, et enfin une hétérogénéité de traitement de fluide [5,6]. Dans ce contexte, le chauffage par effet Joule direct (EJD) encore appelé chauffage ohmique représente une alternative intéressante aux procédés conventionnels [7,8,9,10]. Le principe de ce procédé consiste à appliquer un courant électrique directement dans le produit s'écoulant entre une paire d'électrodes. Les

applications industrielles les plus réussies sont les lignes aseptiques APV et EMMEPIEMME, destinés au traitement thermique des produits alimentaires chargés en particules [11,12,13,14,15].

Pendant, le traitement thermique des fluides homogènes, fortement visqueux et encrassants, demeure problématique. La distribution non-uniforme des temps de séjour dans les réchauffeurs Ohmiques tubulaires peut impliquer une surchauffe des fluides traités et une tendance à l'encrassement à proximité des parois et des électrodes [16,17]. La solution développée dans ce travail permet de s'affranchir des problèmes hydrauliques dans un tube grâce à l'élimination des interfaces produit – paroi et l'absence de contrainte pariétale. Le principe de cette nouvelle technologie consiste à faire passer un courant électrique dans un jet de fluide s'écoulant en continu entre deux électrodes. Ce jet agit comme une résistance et le produit traversé par le courant est chauffé par effet Joule. Ces spécificités devraient permettre de limiter les phénomènes d'encrassement et ainsi augmenter les durées de production entre deux séquences de nettoyage. L'objectif de cette étude vise à valider des mesures de température d'un jet de fluide soumis à des hautes tensions, par caméra infrarouge et par un capteur de température à fibre optique de contact. Une simulation du profil de température du jet, est également réalisée.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Plate forme expérimentale

La plate forme expérimentale se compose des éléments suivants en série: une cuve de lancement, une pompe volumétrique (type PCM moineau) à l'entrée, un tube à passage de courant pour le préchauffage, une unité de chauffage ohmique à jet de fluide pour le chauffage des liquides, un échangeur de chaleur tubulaire pour le refroidissement et enfin une pompe péristaltique, à la sortie, pour garder le niveau de fluide constant dans la cellule ohmique (Figure 1). L'unité de chauffage ohmique est composée d'une cellule ohmique à jet de fluide et d'un module d'alimentation électrique à hautes fréquences (30 kHz) afin d'éviter la contamination des produits par des résidus issus des réactions d'électrolyse. Le module d'alimentation électrique des électrodes de 50 kW se présente comme une unité compacte et scellée en profilés et tôles d'acier ayant une entrée triphasée (380 V - 50 Hz), une sortie monophasée (400 à 3800 V - 30 kHz) et un commutateur de tension à 5 positions. Le module d'alimentation est aussi connecté à une alimentation en eau de refroidissement. La cellule Ohmique est composée de deux électrodes en acier inoxydable, dont l'électrode d'admission est reliée à la phase tandis que l'électrode de réception est reliée au neutre (Figure 2).

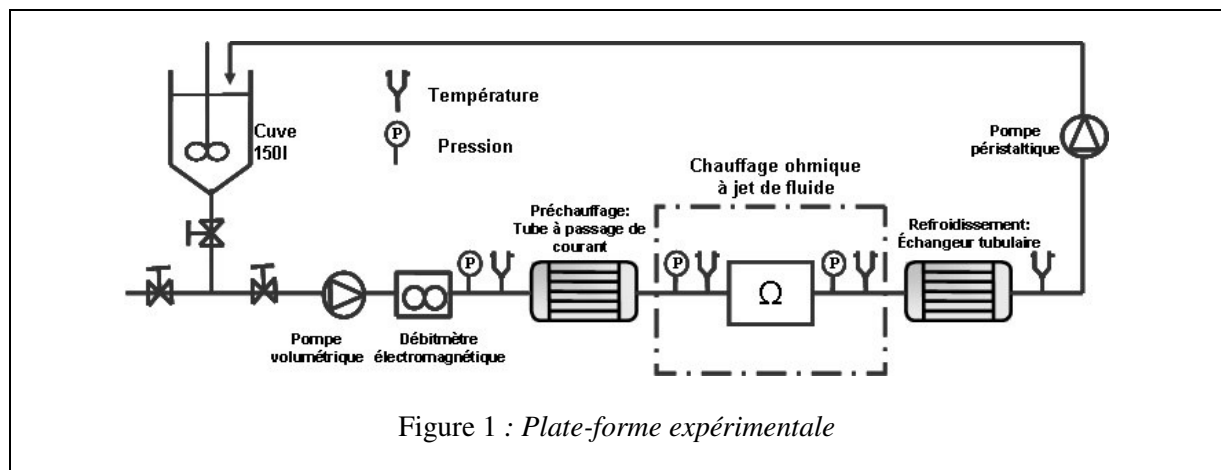


Figure 1 : Plate-forme expérimentale

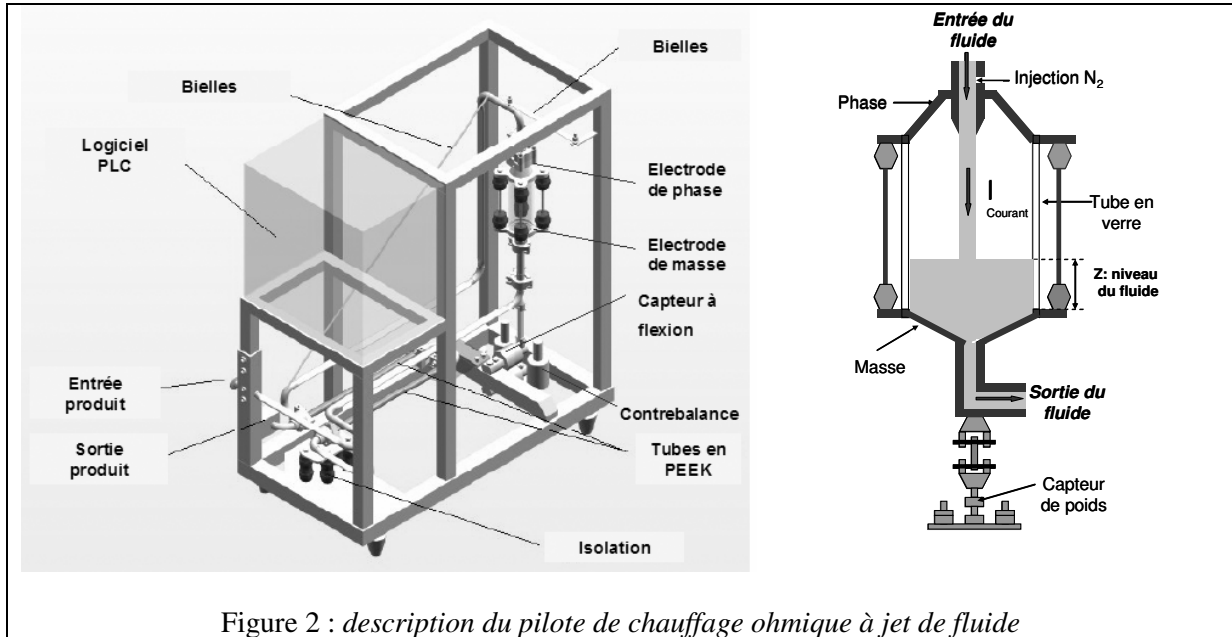


Figure 2 : description du pilote de chauffage ohmique à jet de fluide

2.2. Instrumentation et mesures

Les paramètres expérimentaux relevés sont le débit volumique (débitmètre électromagnétique, Promag30, précision $\pm 0,5\%$), les pressions relatives en entrée et sortie de procédé (manomètre Jumo, type 4AP30/242, 0/16 bars, précision $\pm 1\%$), les températures d'entrée et de sortie de chaque zone (sondes Sensor-Nite, type Pt100, précision $\pm 0,5\%$), le courant (sonde de courant, type PEARSON, bande passante 20 MHz, précision $\pm 0,1\%$), la tension d'alimentation (sonde haute tension, Tektronix, type P6015A, bande passante 75 MHz, précision $\pm 1\%$) et la puissance totale délivrée à l'alimentation électrique (Analyseur de réseau électrique triphasé, Chauvin Arnoux type C.A8334).

Les températures le long du jet de fluide, lors du chauffage Ohmique, ont été mesurées par caméra infrarouge (AGEMA, Thermovision@900 SW) conçue pour fonctionner dans la gamme de 2 à 5.6 μm des rayonnements infrarouges et ayant une étendue de mesure de 253 K à 773 K avec une précision de $\pm 1\%$. Le champ visuel est de $20^\circ \times 12.5^\circ$ et la résolution spatiale est de 1.7 mrad. Les images sont transférées vers l'unité de traitement en temps réel où elles sont stockées pour analyse.

De même ce profil thermique a été mesuré par un thermomètre à fibre optique de contact (GetSens, avec un logiciel d'analyse GetTempMKT). Ce système de mesure est composé d'une tête de mesure en GaAs, une fibre optique de longueur 1 m, un connecteur de conditionnement électrique/optique et un boîtier de traitement/transmission des signaux. Ce système possède 1 canal de mesure de température dont l'étendue est de 273 K à 623 K, avec une précision de $\pm 2\%$.

2.3. Conditions opératoires et fluide modèle

Vu que l'environnement du jet est électrique perturbé, les capteurs de température conventionnels ne sont pas adéquats à la mesure de température le long du jet de fluide. D'où l'usage de la caméra infrarouge et du thermomètre à fibre optique de contact. Le jet vertical s'écoulant entre les deux électrodes a été chauffé par effet Joule, en appliquant des tensions allant de 400 à 3800 V à des fréquences de l'ordre de 30 kHz. Le rayon de la buse (a) est de 0,065 m et la longueur (L) du jet est de 0,17 m. Le débit massique d'écoulement est de

$5,56 \cdot 10^{-2} \text{ kg.s}^{-1}$. Le fluide modèle utilisé est une solution aqueuse de Carboxyméthylcellulose à 2% (w/w).

3. Résultats et discussions

3.1. Méthodes de mesure de la température du jet de fluide chauffé par EJD

3.1.1. Méthode de mesure de la température par thermographie infrarouge

Le tube en verre, entre les deux électrodes, a été éliminé dans les mesures infrarouges. A partir des thermogrammes, la température tout au long du jet de fluide à différentes positions longitudinales a été déterminée. Tout en sachant que le fluide a été préchauffé par un tube à passage de courant de 288 K jusqu'aux alentours de 313 K puis chauffé par la cellule Ohmique à jet à la température voulue. Deux puissances électriques de chauffe ont été appliquées à savoir 1,9 kW et 3,1 kW, avec un débit massique constant et égal à $5,56 \cdot 10^{-2} \text{ kg.s}^{-1}$. Le profil de température du jet de CMC à 2% (w/w), pour les deux puissances de chauffe, est présenté dans la figure 3.

3.1.2. Méthode de mesure de la température par thermomètre à fibre optique de contact

Le tube en verre, entre les deux électrodes, a été percé (13 trous équidistants d'un centimètre) pour les mesures par fibre optique de contact. Le fluide a été préchauffé par un tube à passage de courant de 288 K jusqu'aux alentours de 296 K puis chauffé par la cellule Ohmique à jet à la température voulue. Deux puissances électriques de chauffe ont été appliquées à savoir 2 kW et 3 kW, avec un débit massique constant et égal à $5,56 \cdot 10^{-2} \text{ kg.s}^{-1}$. Le profil de température du jet de CMC à 2% (w/w) est présenté dans la figure 4.

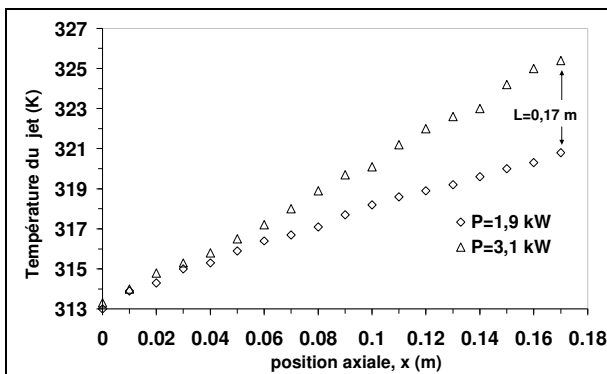


Figure 3 : profil de température du jet de CMC à 2% (w/w) mesuré par caméra infrarouge en fonction de la position axiale (x) et de la puissance de chauffe, $T_e=313 \text{ K}$, $\sigma_0=0,1060 \text{ S.m}^{-1}$, $k=0,0894 \text{ K}^{-1}$, $Q=5,56 \cdot 10^{-2} \text{ kg.s}^{-1}$

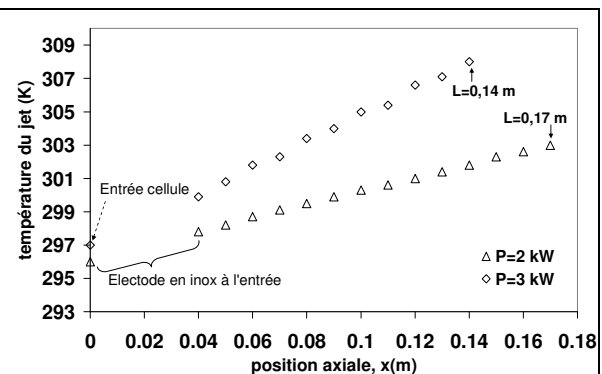


Figure 4 : profil de température du jet de CMC à 2% (w/w) mesuré par thermomètre à fibre optique, en fonction de la position axiale (x) et de la puissance de chauffe, $Q=5,56 \cdot 10^{-2} \text{ kg.s}^{-1}$, $\sigma_0=0,1060 \text{ S.m}^{-1}$, $k=0,0894 \text{ K}^{-1}$

3.2. Expression analytique du profil de température du jet de fluide chauffé par EJD

Pour le chauffage par effet Joule direct d'un fluide, l'équation de conservation de l'énergie peut être résolue avec des hypothèses simplificatrices afin d'obtenir l'expression analytique du profil de température le long du jet de fluide. Considérons le volume défini par le jet de fluide à chauffer, s'écoulant entre les deux électrodes (Figure 5). Le bilan enthalpique sur une longueur dx et de section A , se formule comme suit :

$$Qc_p dT = \sigma E^2 A dx = \frac{I^2}{\sigma A} dx \quad (1)$$

Le champ électrique moyen peut être déterminé par: $E = \nabla U = U / L$ (2)

La dissipation visqueuse est considérée négligeable devant le terme de génération de chaleur par effet Joule. La température d'entrée (T_e) et le profil de vitesse sur une section du jet sont supposés uniformes (écoulement iso-vitesse) :

$$\frac{v(x)}{v_0} = \left(1 + \frac{2g}{v_0^2} x\right)^{1/2} = \left(1 + \frac{2}{aF_r} x\right)^{1/2} ; F_r = \frac{v_0^2}{ga} \quad (3)$$

Les propriétés physiques (ρ , c_p) sont supposées indépendantes de la température sauf la conductivité électrique pour laquelle un modèle linéaire avec la température est défini comme:

$$\sigma = \sigma_0(1 + kT) \quad (4)$$

Le rayon et la section du jet varient en fonction de la longueur du jet, sous l'effet de la gravité et s'expriment respectivement comme:

$$\frac{r(x)}{a} = \left(1 + \frac{2}{aF_r} x\right)^{-1/4} ; A(x) = \pi a^2 \left(1 + \frac{2}{aF_r} x\right)^{-1/2} \quad (5)$$

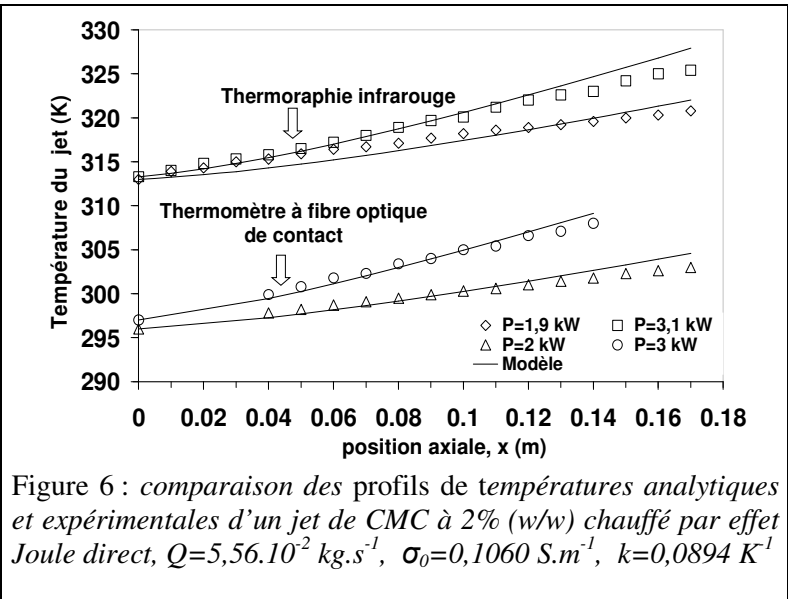
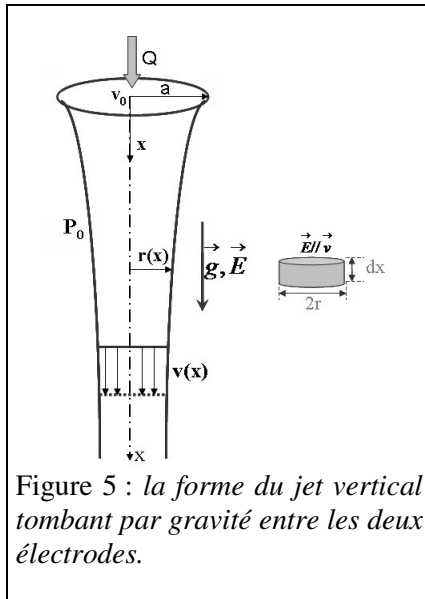
A partir de (4) et (5), l'équation (1) devient :

$$(1 + kT)dT = \frac{I^2}{\pi a^2 \sigma_0 Q c_p} \left(1 + \frac{2}{aF_r} x\right)^{1/2} dx \quad (6)$$

Après intégration nous obtenons un polynôme du second degré, présentant un déterminant positif qui donne une expression du profil de température en fonction de la position axiale (x):

$$\frac{k}{2} T^2 + T - \left(\frac{kT_e^2}{2} + T_e + \frac{I^2 F_r}{3\pi a Q C_p \sigma_0} \left(\left(1 + \frac{2}{aF_r} x\right)^{3/2} - 1 \right) \right) = 0 \quad (7)$$

$$T(x) = \frac{1}{k} \left[\left[1 + 2k \left(\frac{kT_e^2}{2} + T_e + \frac{I^2 F_r}{3\pi a Q C_p \sigma_0} \left(\left(1 + \frac{2}{aF_r} x\right)^{3/2} - 1 \right) \right) \right]^{1/2} - 1 \right] \quad (8)$$



La figure 6 illustre les profils de température le long du jet de CMC à 2% (w/w) obtenus analytiquement à partir de l'équation (8) et expérimentalement par thermomètre à fibre optique de contact et par thermographie infrarouge. L'écart moyen entre les deux températures, expérimentales et analytiques, est de l'ordre de 3%.

4. Conclusion

En conclusion, le profil de température longitudinal du jet de fluide, soumis à des hautes tensions (400-3800 V) et à des hautes fréquences (30 kHz), a été mesuré par deux méthodes différentes à savoir par capteur de température à fibre optique de contact et par caméra Infrarouge. Ces mesures ont aussi permis de valider un modèle analytique de la distribution de température le long du jet avec un écart moyen de 3%. Ce profil sert à déterminer la distribution de l'efficacité stérilisatrice ou pasteurisatrice de ce nouveau procédé, intégrant le couple temps-température subi par le produit lors du chauffage Ohmique.

Références

- [1] A. Cooper, Recover more heat with plate heat exchangers, *Chem. Eng.*, (1974), 280-285.
- [2] F. Delplace, J. C. Leuliet, D. Leviex, A reaction engineering approach to the analysis of fouling by whey proteins of a six-channels-per-pass plate heat exchanger, *J. Food. Eng.*, 34-1 (1997), 91-108.
- [3] A. E. Bergles, E. F. C. Somerscales, The effect of fouling on enhanced heat transfer equipment, *J. Enh. Heat. Trans.*, 2 (1995), 157-166.
- [4] S. D. Changani, M. T. Belmar-Beiny, P. J. Fryer, Engineering and chemical factors associated with fouling and cleaning in milk processing, *Exp. Ther. & Fluid Sci.*, 14 (1997), 392-406.
- [5] P. N Baptiste, F. A. R. Olivera, J. C. Olivera, S. K. Sastry, Dimensionless Analysis of Fluid-to-particle heat transfer coefficients, *J. Food. Eng.*, 31 (1997), 199-218.
- [6] M. Barigou, S. Mankad, P. J. Fryer, Heat Transfer in two-phase Solid-Liquid food flows: a review, *Trans IchemE, Part C.*, 76 (1998), 4-30.
- [7] A. Bhat, V. K. Joshi, Ohmic processing of foods, the concept, application, present status and future Outlook, *Alimentaria.*, 289 (1998), 83-88.
- [8] M. Berthou, C. Aussudre, Panorama sur le chauffage ohmique dans l'industrie agro-alimentaire, *Ind. Alim. & Agr.*, 31 (2000), 38.
- [9] M. A. Ayadi, Traitement thermique des fluides encrassant par la technologie du chauffage Ohmique en géométrie rectangulaire, *Thèse de doctorat*, Université Henri Poincaré, (2004).
- [10] A. Legrand, Faisabilité technologique du traitement thermique en continu des fluides chargés en particules en utilisant trois technologies de chauffage, *Thèse de doctorat*, Université de Technologie de Compiègne, (2004).
- [11] P. J. Fryer, A. A. P. de Alwis, E. Koury, A. G. F. Stapley, L. Zhang, Ohmic Processing of Solid-Liquid Mixtures: Heat generation and convection effects, *J. Food. Eng.*, 18 (1993).
- [12] W. G. Khalaf, S. K. Sastry, Effect of fluid viscosity on the Ohmic heating rate of solid-liquid mixtures, *J. Food. Eng.*, 27 (1996), 145-158.
- [13] C. S. Wang, S. B. Wu, Ohmic heating of fluid containing apple particulates, *Food. Sci. & Agr. Chem.*, 1 (1999), 154-161.
- [14] Y. Ben Abderahmen, J. P. Pain, Thermal behavior of a solid/liquid mixture in an Ohmic sterilizer-slip phase model, *Chem. Eng. Sci.*, 55 (2000), 1371-1384.
- [15] E. Godéreaux, F. Zuber, A. Goullieux, Processing and stabilization of cauliflower by Ohmic heating technology, *Inn. Food. Sci. & Emerg. Tech.*, 2 (2001), 279-287.
- [16] A. Ould El Moktar, Etude des phénomènes physiques couplés lors du chauffage volumique d'un liquide ionique en écoulement par conduction électrique directe. *Thèse de doctorat*, Université de Nantes, (1992).
- [17] J. El Hajal, Etude expérimentale et numérique de la convection mixte dans un écoulement de Poiseuille en présence d'une dissipation volumique d'énergie par conduction électrique directe, *Thèse de doctorat*, Université de Nantes, (1997).