



HAL
open science

Etude de la surchauffe parietal dans un échangeur de chaleur à effet Joule direct avec et sans encrassement

Luc Fillaudeau, Vassily Maury, Frédéric Semet, Pascal Debreyne

► **To cite this version:**

Luc Fillaudeau, Vassily Maury, Frédéric Semet, Pascal Debreyne. Etude de la surchauffe parietal dans un échangeur de chaleur à effet Joule direct avec et sans encrassement. SFT 2006, May 2006, Ile de Ré, France. <hal-02310099>

HAL Id: hal-02310099

<https://hal.science/hal-02310099v1>

Submitted on 4 Jun 2020

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.



HAL Authorization

Etude de la surchauffe pariétale dans un échangeur de chaleur à Effet Joule Direct avec et sans encrassement.

Luc FILLAUDEAU^{1*}, Vassily MAURY², Frédérique SEMET², Pascal DEBREYNE².

¹INSA (Institut National des Sciences Appliquées) -LBB (Laboratoire Biotechnologie – Bioprocédé) – 135, avenue de Rangueil - 31077 TOULOUSE cedex 4

²INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) -LGPTA (Laboratoire de Génie des Procédés et Technologie Alimentaire) - 369, Rue Jules Guesde – BP39 - 59651 VILLENEUVE D’ASCQ cedex

*(auteur correspondant : Luc.Fillaudeau@insa-toulouse.fr)

Résumé –Les performances thermiques d'un chauffage ohmique de géométrie plane ($\vec{E} \perp \vec{v}$) ont été étudiées en fonction du régime d'écoulement ($50 < Re < 5000$), de la puissance de chauffe ($0 < P < 15kW$) et de la conductivité électrique du fluide ($0,1 < \sigma_{20^\circ C} < 2S/m$). En premier lieu, une corrélation empirique évaluant la différence de température entre la paroi et le fluide, $T_w - T_b$, a été établie et quantifie la surchauffe pariétale induite en l'absence d'encrassement. En second lieu, la simulation numérique des profils de température (fluide, dépôt, électrode) en présence d'un dépôt de type laitier démontre un effet boule de neige des mécanismes d'encrassement due à un couplage effet Joule / transfert convectif.

Nomenclature :

Lettres Latines			
<i>C</i>	Chaleur spécifique, [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]	<i>v</i>	Vitesse, [m.s ⁻¹]
<i>e</i>	Distance entre électrodes, [m]	<i>x, y</i>	Positions axiale et longitudinale, [m]
<i>E</i>	Champ électrique, [V.m ⁻¹]	Lettres grecques	
<i>g</i>	Gravité, [m.s ⁻²]	α	Coefficient directeur, [°C.kW ⁻¹]
<i>I</i>	Intensité, [A]	λ	Conductivité thermique, [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
<i>L</i>	Longueur, [m]	ρ	Masse volumique, [kg.m ⁻³]
<i>m</i>	Facteur de température, [°C ⁻¹]	σ	Conductivité électrique, [S.m ⁻¹]
<i>P</i>	Puissance, [W]	Φ_v	Dissipation visqueuse, [W/m ³]
<i>Q</i>	Débit volumique, [m ³ .s ⁻¹]	Indices	
<i>Re</i>	Nombre de Reynold, [/]	<i>b</i>	Produit (bulk)
<i>S</i>	Surface des électrodes, [m ²]	<i>d</i>	Dépôt
<i>S_p</i>	Section de passage, [m ²]	<i>e</i>	Entrée
<i>T</i>	Température, [°C]	<i>lin</i>	Linéaire
<i>U</i>	Potentiel électrique, [V]	<i>s</i>	sortie
		<i>w</i>	Paroi (wall) d'électrode

1 Introduction

Le chauffage par Effet Joule Direct (EJD), dénommé chauffage ohmique, se définit comme un chauffage purement volumique et à résistance directe par opposition au chauffage classique par conduction – convection [1]. Il consiste à appliquer un courant électrique directement dans le produit s'écoulant entre une paire d'électrodes. La chaleur générée est une fonction directe de la géométrie des cellules, la conductivité électrique du produit et la tension appliquée. Les couplages entre les phénomènes hydrodynamique, électrique, et thermique sont fondamentaux [2]. L'absence théorique de paroi chaude devrait constituer un avantage majeur pour les applications alimentaires, en autorisant des cinétiques de montée en température rapides et homogènes et en limitant la dégradation de composés thermosensibles par surchauffe (changement de goût, réaction indésirable, brûlage) et l'encrassement des surfaces des électrodes (performances thermiques constantes) [3].

Dans ce travail, une analyse des performances thermiques d'un chauffage par EJD de géométrie plane (3 cellules actives en série, section rectangulaire, $L=246$, $l=76$ et $e=15\text{mm}$, $\vec{E}\perp\vec{v}$) en fonction du régime d'écoulement ($50 < Re < 5000$), de la puissance de chauffe ($0 < P < 15\text{kW}$) et de la conductivité électrique du fluide ($0,1 < \sigma_{20^\circ\text{C}} < 2\text{S/m}$) a été réalisée. La différence de température paroi de l'électrode - fluide, $T_w - T_b$, en condition propre est estimée à partir de la corrélation empirique établie. Ensuite, une simulation numérique (code de calcul SPC v1.0) des profils thermiques (fluide, dépôt, électrode) en fonction de la longueur de l'échangeur a été réalisée pour différentes épaisseurs de dépôt (0 à 4mm) lors de la pasteurisation du lait entier. Les résultats montrent que l'existence d'une surchauffe pariétale pouvant induire la formation d'un dépôt entraîne une augmentation de la surchauffe pariétale due à un effet Joule généré dans le dépôt stagnant. En conséquent, un effet boule de neige des phénomènes d'encrassement entraîne une instabilité des variables thermiques et électriques.

2 Etude expérimentale de la surchauffe pariétale en l'absence d'encrassement.

2.1 Matériels & Méthodes : plate-forme expérimentale et plan d'expérience.

La plate-forme expérimentale se compose de cinq éléments en série : (i) une cuve de lancement (250l), (ii) une pompe volumétrique (Inoxpa, type K320SD, $Q_{max}=800\text{l/h}$), (iii) un chauffage par effet Joule direct, (iv) un refroidisseur (échangeur de chaleur tubulaire, Actitube 1") et (v) une vanne de contre-pression en sortie d'installation. Le chauffage par effet Joule comprend trois cellules actives de géométrie rectangulaire ($L=246$, $l=76$ et $e=15\text{mm}$), référencées n°1, 2 et 3, mises en série et disposées verticalement dans le sens de la largeur (Figure 1). Les électrodes disposées de part et d'autre de l'épaisseur des entretoises assurent une fonction de guide hydraulique et de chauffage (puissance maximale: 15kW , $U_{max}=100\text{V}$, $I_{max}=170\text{A}$). Des jonctions à 180° assurent la connexion entre chaque cellule. Les paramètres expérimentaux relevés sont le débit volumique (débitmètre électromagnétique, Khrono, type IFM1080K, précision $\pm 0,5\%$), les pressions relatives en entrée et sortie de procédé (manomètre JUMO, type 4AP30, précision $\pm 1\%$), les températures (sonde Sensor-Nite, type Pt100 ref. 2327, précision $\pm 0,2^\circ\text{C}$) et conductivités électriques (conductimètre Kémotron, type 9111, précision $\pm 0,1\%$) du fluide en entrée et sortie du chauffage. Les températures pariétales le long de l'échangeur ont été déterminées grâce à l'implantation de sondes de température (sonde Corame, thermocouple type J isolés électriquement, réf: J05X, précision $\pm 0,5^\circ\text{C}$, référencé ThC-0 à 12). Parallèlement les grandeurs électriques (tension et intensité) sont mesurées, la tension est déterminée entre les électrodes de la 3^{ème} cellule (Voltmètre 0-250V, Sineax U504, Chauvin Arnoux) et l'intensité sur la seconde phase du transformateur électrique (Camille Bauer, Ampèremètre 0-200A, type AC22). Les fluides modèles utilisés sont respectivement, (i) l'eau et (ii) une solution de saccharose 50%w/w. L'ensemble des propriétés physiques des fluides (ρ , C , λ , μ) a été déterminé expérimentalement et comparé à la littérature (Handbook of Chemistry and Physics, site : www.univ-reims.fr). Les conductivités électriques des solutions (σ) ont été ajustées (3 conductivités par solution G1, G2 et G3) par ajout de chlorure de sodium et modélisées en fonction de la température, recouvrant ainsi la plage de variation des fluides agroalimentaires.

2.2 Profil de température et bilan enthalpique

L'équation de conservation de l'énergie (1) peut être résolue avec des hypothèses simplificatrices afin d'obtenir des expressions analytiques du profil de température (2) et de l'écart à la linéarité [4].

$$\rho \cdot C \cdot \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) + \sigma \cdot |\nabla U|^2 + \Phi_v \quad (1)$$

$$Tb(x) = \frac{1}{m} \cdot \left[(1 + m \cdot Tbe) \cdot \text{Exp} \left(\frac{m \cdot \sigma_0 \cdot S_p \cdot E^2}{Q \cdot \rho \cdot C} \cdot x \right) - 1 \right] \quad (2)$$

Premièrement, l'établissement des bilans thermiques et électriques (3), sur 160 points de fonctionnement démontre une égalité entre ces deux termes globaux avec un écart moyen ($P_{elec} - P_{ther} / P_{ther}$) $< \pm 5\%$, soit un rendement énergétique proche de 100% (Figure 2).

$$Q \cdot \rho \cdot C \cdot dT = \sigma_0 \cdot (1 + m \cdot T) \cdot E^2 \cdot S_p \cdot dx \text{ avec } E = \frac{U}{e} \quad (3)$$

Deuxièmement, l'expression analytique du profil de température du fluide, Tb , et les mesures des températures de paroi des électrodes, Tw , grâce aux thermocouples (ThC-0 à 12), permettent de comparer et discuter de l'évolution des profils de température (Tb , Tw) en fonction de la position axiale et de la hauteur (Figure 3). Nous retenons le critère de la différence de température, $Tw - Tb \approx Tw - Tb_{lin}$. La différence de température, $Tw - Tb$, augmente en fonction de la puissance de chauffe. Ce point est fondamental et doit être contrôlé et modélisé si le traitement de fluides thermosensibles est envisagé. Généralement les profils de température, $Tb(x)$ et $Tw(x)$ se développent quasi parallèlement, soit une valeur, $Tw - Tb$, sensiblement constante le long de l'échangeur. Cependant sous certaines conditions d'écoulement et de chauffage, une divergence importante des profils de température, $Tw(x)$ et $Tb(x)$, est observée et se caractérise par des températures pariétales différentes en haut et bas d'une même section [2, 5]. La thermodépendance des propriétés physiques induit des effets d'agitation surimposés à l'écoulement principal, entraînant le développement d'un phénomène de convection mixte. Dans nos conditions, nous considérons que la convection mixte est présente si l'écart type des températures pariétales d'une même section (ex: ThC-5, 6 et 7) est supérieur à 5 fois la précision des thermocouples [6].

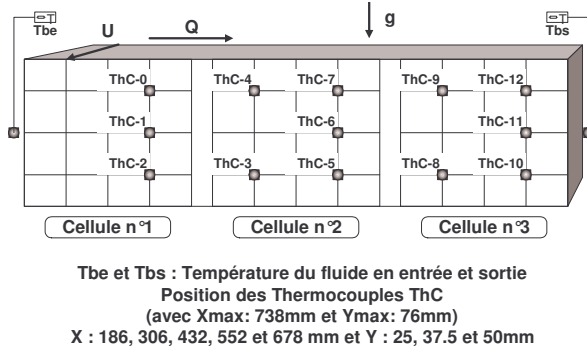


Figure 1: Implantation des thermocouples sur les électrodes en fonction de la longueur et de la hauteur (position: x, y et g: gravité).

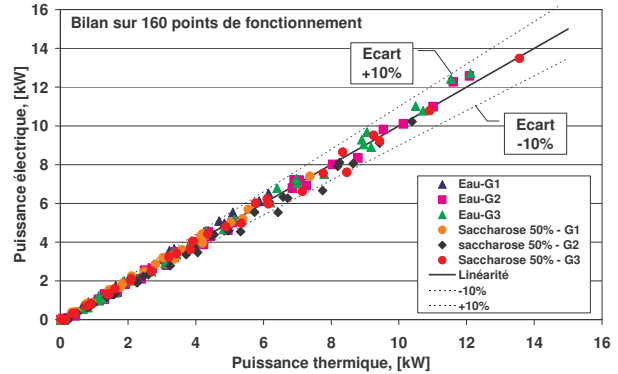


Figure 2: Bilan enthalpique à partir des variables électriques et thermiques. (Fluides : Eau et Saccharose 50%, Conductivités : G1, G2 et G3, Q: 150 à 700l/h, Tbe=20°C).

2.3 Analyse de la surchauffe pariétale

Une différence de température paroi - fluide, $Tw - Tb$, faible est une condition nécessaire pour l'utilisation du chauffage par EJD en agroalimentaire. L'enjeu majeur réside dans l'obtention d'une différence inférieure à celle communément appliquée dans les échangeurs de chaleur conventionnels (convection, conduction). La quantification et la modélisation de ces différences de température apparaissent donc essentielles. La figure 4 présente l'évolution de $Tw - Tb$ pour l'ensemble du plan d'expérience (régime d'écoulement, puissance, conductivité électrique) en excluant les phénomènes de convection mixte. Une croissance de la différence

de température, T_w-T_b (valeur maximale proche de $+10^\circ\text{C}$) est observée lorsque la puissance de chauffe augmente et le nombre de Reynolds diminue. A régime d'écoulement défini, l'évolution de T_w-T_b exhibe une allure quasi linéaire en fonction de la puissance de chauffe. Le coefficient directeur ($a=(T_w-T_b)/P$) est calculé et une corrélation empirique ($\alpha=40,5.Re^{-0,65}$ avec $R^2= 0,8963$) qui permet d'estimer la différence de température, T_w-T_b , délimitant le domaine de chauffage dit "volumique" ($T_w-T_b < 2^\circ\text{C}$).

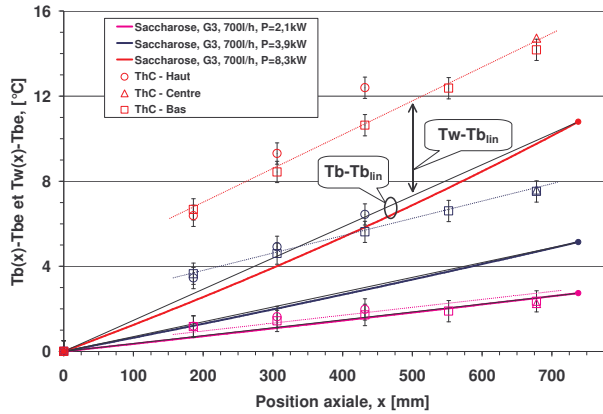


Figure 3 : Profil de températures du fluide ($T_b(x)-T_{be}$, $T_{b_{lin}}(x)-T_{be}$ et $T_w(x)-T_{be}$) en fonction de la longueur (x) et de la puissance (Saccharose 50%, conductivité: G3, Q : 700l/h, $T_{be}=20^\circ\text{C}$).

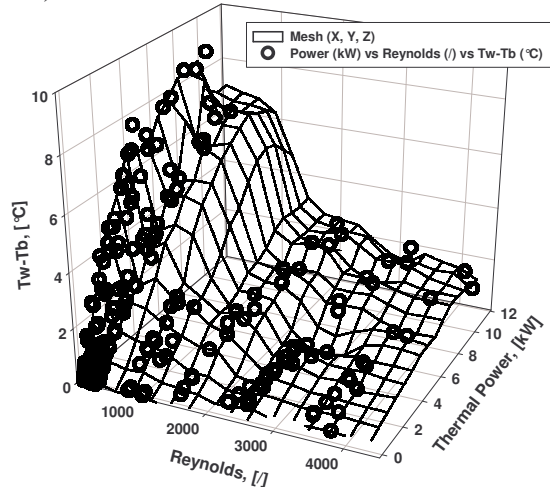


Figure 4 : Différence de température (T_w-T_b) en fonction de la puissance et du régime d'écoulement (Eau et Saccharose 50%, conductivités : G1, G2 et G3, position $x=432\text{mm}$, $T_w=ThC-7$).

3 Analyse numérique de la surchauffe pariétale en présence d'un encrassement

3.1 Principe du code SPC v1.0 et méthodes de résolution

SPC v1.0 (dépôt APP, n°87.75.436, Logibox: 21015) a pour objectif de simuler les performances thermiques des procédés continus lors de la stabilisation des fluides alimentaires complexes. Ce code vise à : (i) simuler les performances thermiques (profil thermique du fluide, de peau et de dépôt) et hydrauliques (perte de charge) d'un échangeur, (ii) prendre en compte l'incidence d'un dépôt encrassant, (iii) intégrer l'évolution qualitative (chimique et microbiologique) du produit au travers de plusieurs cinétiques de réaction, (iv) comparer l'efficacité et les conditions de fonctionnement de plusieurs technologies de chauffage : chauffages conventionnels méthodique (1) et anti-méthodique (2), chauffage par effet Joule Indirect (3), chauffages par Effet Joule Direct: $\vec{E} \perp \vec{v}$ (4) et $\vec{E} // \vec{v}$ (5).

Le code source développé s'appuie sur l'analyse théorique des différentes technologies de chauffage. L'établissement des équations fondamentales de la thermique, la prise en compte des corrélations semi-empiriques entre invariants de similitudes pour les procédés considérés et la thermodépendance des propriétés physiques des fluides constituent un système d'équations différentielles pouvant être résolu par des méthodes numériques, facilement programmable si les conditions d'initialisation et les critères de convergence (respect des bilans matière et thermique) sont imposés. La résolution numérique des systèmes d'équations différentielles (thermique, hydraulique, chimique, dépôt encrassant) se fait par discrétisation unidimensionnelle en fonction de la longueur d'échangeur par la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 qui assure un bon compromis entre précision et rapidité.

3.2 Simulation numérique des profils de températures lors d'un encrassement de type laitier.

La détermination des températures locales lors du chauffage par EJD est fondamentale pour analyser le fonctionnement du procédé et peut être obtenue soit par des mesures physiques [7] soit par une simulation numérique. Dans nos conditions, la pasteurisation haute de lait entier (passage de 50°C à 92°C, $Q = 200 \text{ l/h}$, $t_s = 15\text{-}16\text{sec}$) en présence d'un dépôt à la surface des électrodes (épaisseur de 0 à 4 mm, $\lambda_{th} = 0,6 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$, $\sigma_{20^\circ C} = 0,15 \text{ S/m}$) a été simulée. L'échangeur à EJD ($\vec{E} \perp \vec{v}$) constitué de 3 cellules actives de section rectangulaire placées en série ($L=246$, $l=76$ et $e=15\text{mm}$) a été discrétisé par 100 pas. La corrélation semi-empirique retenue pour estimer le coefficient de transfert par convection est celle de *Churchill et Ozoë (1973)*. Le logiciel SPC v1.0 permet d'accéder localement aux variables thermiques et hydrauliques, aux invariants de similitude et aux propriétés physiques des fluides.

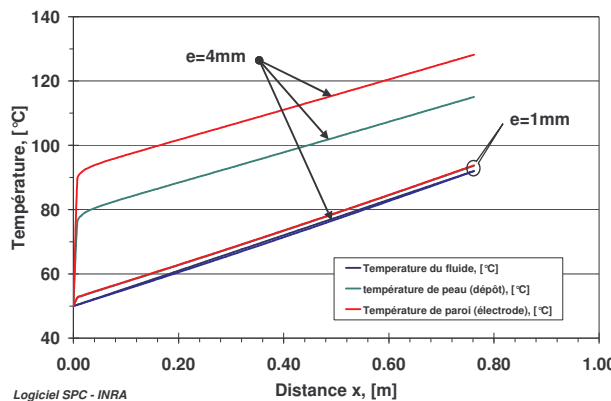


Figure 5 : Evolution des températures (fluide, dépôt, paroi de l'électrode) en fonction de la distance, x , pour $e=1$ et 4mm .

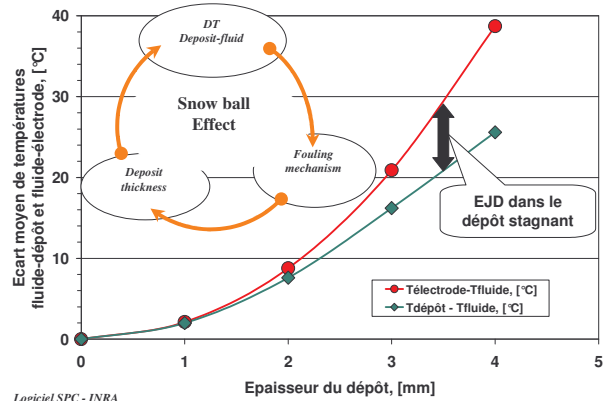


Figure 6 : Evolution des différences de température fluide – dépôt et fluide - électrode en fonction de l'épaisseur de dépôt.

La figure 5 illustre l'évolution des températures du fluide, T_b , du dépôt, T_d et de l'électrode, T_w en fonction de la longueur d'échangeur pour des épaisseurs de dépôt de 1 et 4mm. Sur un élément de longueur dx , l'effet Joule généré dans le dépôt stagnant est directement proportionnel à son épaisseur; la quantité de chaleur générée doit alors être évacuée vers le fluide par un transfert convectif. L'équilibre thermique entre le fluide, le dépôt et l'électrode résulte des propriétés physiques (ρ , C , λ , μ) et électriques (σ) du fluide et du dépôt ainsi que des conditions d'écoulement à l'interface fluide – dépôt définissant l'intensité du coefficient de convection. L'évolution des écarts moyens, $T_w - T_b$ et $T_d - T_b$, en fonction de l'épaisseur de dépôt (Figure 6) montrent que l'effet Joule au sein du dépôt entraîne une surchauffe pariétale importante et donc un effet boule de neige des phénomènes d'encrassement. Ce mécanisme, spécifique de la technologie considérée (EJD, $\vec{E} \perp \vec{v}$) est due à un couplage irréversible entre un effet Joule direct au sein du dépôt et un transfert convectif à sa surface. Ces simulations numériques confortent les résultats expérimentaux obtenus lors de la stérilisation du lait entier [3, 4] et rapportant l'instabilité des variables thermiques et hydrauliques en fonction de la formation d'un dépôt encrassant à la surface des électrodes.

4 Conclusions

Les technologies alternatives offrent de nombreuses perspectives pour la stabilisation et la conservation des aliments en procédés continus. Le chauffage par Effet Joule Direct présente des avantages indéniables dès qu'une cinétique de montée en température rapide est recherchée ou pour assurer un traitement thermique homogène. Le travail présenté porte sur

une technologie de chauffage par EJD de géométrie plane (3 cellules actives en série, section rectangulaire, $L=246$, $l=76$ et $e=15\text{mm}$, $\vec{E} \perp \vec{v}$). Premièrement, la différence de température électrode – fluide, $T_w - T_b$, a été étudiée avec des fluides modèles en l'absence d'encrassement pour une large plage de conditions opératoires. Deuxièmement, l'impact d'un dépôt à la surface des électrodes sur les profils de température (fluide, dépôt, électrode) a été analysé grâce à la simulation numérique de la pasteurisation du lait.

Au travers de notre plan d'expérience, la technologie étudiée révèle que plusieurs phénomènes doivent être évités lors du traitement de fluides agroalimentaires encrassant :

1. **L'apparition de la convection mixte.** La convection mixte apparaît rédhibitoire pour le traitement thermique de fluides agroalimentaires thermosensibles et exhibant un pouvoir encrassant. Elle entraîne (i) une hétérogénéité du traitement thermique sur une même section et (ii) une surchauffe locale importante génératrice d'encrassement. Ces phénomènes ont été étudiés dans des configurations comparables [2, 5].
2. **Une différence de température, $T_w - T_b$ élevée.** Le contrôle de cette différence de température est essentiel car elle peut amorcer un mécanisme d'encrassement. La corrélation empirique établie permet d'estimer cette valeur et montre l'existence de conditions de chauffage quasi volumique si le régime d'écoulement est turbulent.
3. **Le développement d'un dépôt encrassant.** La simulation numérique de conditions de fonctionnement en présence d'un dépôt démontre la difficulté de traiter un fluide alimentaire encrassant dans un tel système. L'analyse des mécanismes met en évidence un couplage dominant entre les transferts thermiques induits par l'effet Joule direct dans le dépôt et les phénomènes convectifs étroitement liés à l'hydrodynamique locale à sa surface. La démonstration d'un effet boule de neige des phénomènes d'encrassement est alors synonyme d'une instabilité des variables thermiques et électriques du procédé.

En conclusion, le chauffage par EJD étudié présente un rendement énergétique remarquable et proche de 100%. Cependant, sa mise en œuvre pour le traitement thermique de fluides agroalimentaires sera restreinte aux conditions suivantes : (i) un régime d'écoulement turbulent afin d'éviter les phénomènes de convection mixte et d'obtenir une surchauffe pariétale la plus faible possible et (ii) le traitement de fluides présentant un faible potentiel encrassant et générant un dépôt d'épaisseur et conductivité électrique faibles.

Références :

1. Aussudre C., Berthou M. et Terrien P., Présentation des techniques de chauffage des fluides par effet Joule dans l'industrie., DER – EDF, HE - 25/98/015, (1998).
2. Ould-El-Moctar A., Peerhossaini H., Le Peurian P., Bardon J.P., Ohmic heating of complex fluids, Int. J. Heat Mass Transfer, 36(12), (1993), 3143-3152.
3. Fillaudeau L., Delaplace G., Leuliet J.C., Tissier J.P., Berthou M., Chopard F., Ohmic heating to achieve UHT sterilisation of milk - Comparison with plate heat exchanger and definition of a heat dissipation coefficient, ExHFT-5, Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics 2001, Ed. G.P. Celata, P.Di Marco, A. Goulas and A. Mariani, (ISBN: 88-467-0459-2), vol. I, (2001), 713-718.
4. Fillaudeau L., Chauffage des fluides agroalimentaires par effet Joule direct : conductivité électrique et expressions analytiques des profils de température, Ind. Alim. Agr., 26, (2004), 9-18.
5. El-Hajal J, Ould El Moctar A., Peerhossaini H., Convection mixte dans un écoulement de Poiseuille vertical: étude comparative de chauffage volumique et pariétal à flux constant, Int. Comm. Heat Mass Transfer, 25(3), (1998), 309-319.
6. Beuf M., Legrand A., Fillaudeau L., Leuliet J.C., Berthou M., Terrien P., Critère d'apparition de la convection mixte en régime laminaire dans un échangeur tubulaire à flux de chaleur constant (TPC), Récent Progrès en Génie des Procédé (Coord. Strock A., Boudrant J., Tondeur D.), Ed. Lavoisier Tech & Doc, Paris, vol. 15, (2001), 67-74.
7. Ye X., Ruan R., Chen P., Chang K., Ning K., Taub I.A., Doona C., Accurate and fast temperature mapping during ohmic heating using proton resonance frequency shift MRI thermometry. J. Food Eng., 59, (2003), 143-150.