

Convection mixte tridimensionnelle naturelle et rotatoire autour d'un cône

Raymond RANDRIANARIVELO^{1*}, Germain BEZANDRY¹, Ulrich CANISSIUS² et Edouard ALIDINA¹

¹ Université d'Antsirananana, Faculté des Sciences, Laboratoire de Mécanique des Fluides et Systèmes Energétiques Appliqués (LMFSEA), BPO, Madagascar

² Ecole Normale Supérieure pour l'Enseignement Technique 2, Laboratoire de Mécanique et de Métrologie (LMM), BPO, Madagascar

* Correspondance, courriel : raymrandria2211@gmail.com

Résumé

Le présent travail porte sur l'étude de l'écoulement convectif mixte tridimensionnel naturel et rotatoire autour d'un cône de révolution tournant par rapport à un axe fixe avec une vitesse angulaire constante. Notre étude est focalisée sur les effets de l'action combinée de la convection naturelle et rotatoire sur les aspects du champ dynamique et thermique de la convection. A l'aide d'un modèle numérique, les équations de continuité, de Navier-Stokes et de conservation de l'énergie sont résolues par une méthode implicite aux différences finies et l'algorithme de Thomas.

Mots-clés : convection mixte, tridimensionnelle, cône, coefficients C_i , poids (C_{nat} , C_{rot}).

Abstract

Mixed three-dimensional convection natural and rotational around a cone

This present work, wear on the study of the flow mixed convective three-dimensional natural and rotational around a cone of revolution rotating to a fixed axis with a constant angular velocity. Our study focused into the effects of the combined action of the natural convection and rotational on the aspects of field dynamic and thermal of the convection. With the help of a numeric models, the equations of continuity, Navier-Stkes and conservation of the energy were resolved by a implicit method at the differences finished and from the Thomas' algorithm.

Keywords : mixed convection, three-dimensional, cone, coefficients C_i , weight (C_{nat} , C_{rot}).

Nomenclatures

Lettres latines		Lettres grecques	
a	diffusivité thermique. ($m^2.s^{-1}$)	λ	conductivité thermique. ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
Cf_x	coefficient de frottement suivant x	ϑ_0	demi-angle au sommet du cône. (rad)
Cf_φ	coefficient de frottement suivant Φ	ω	vitesse angulaire de rotation. (rad.s ⁻¹)

C_p	<i>chaleur massique. (J. kg⁻¹ .K⁻¹)</i>	φ	<i>coordonnée azimutale. (rad)</i>
h	<i>coefficient d'échange par convection</i>	ν	<i>viscosité cinématique. (m².s⁻¹)</i>
L	<i>longueur de la génératrice du cône. (m)</i>	τ_φ	<i>contrainte de frottement suivant φ</i>
Ri	<i>nombre de Richardson</i>	τ_x	<i>contrainte de frottement suivant x</i>
$Re\omega$	<i>nombre de Reynolds</i>	Ω^+	<i>vitesse angulaire réduite</i>
Pr	<i>nombre de Prandtl</i>	ν	<i>viscosité cinématique du fluide</i>
Gr	<i>nombre de Grashof</i>	β	<i>coefficient d'expansibilité du gaz</i>
g	<i>intensité de la pesanteur</i>	Exposants / indices	
Nu	<i>nombre de Nusselt</i>	$+$	<i>grandeurs adimensionnelles</i>
T	<i>températures de la paroi (K)</i>		
T_∞	<i>température du fluide loin de la paroi. (K)</i>		
T_p	<i>température de la paroi. (K)</i>		
T^+	<i>température réduite</i>		
V_x	<i>composante méridienne de la vitesse</i>		
V_y	<i>composante normale de la vitesse</i>		
V_φ	<i>composante azimutale de la vitesse. (m.s⁻¹)</i>		
x, y, z	<i>coordonnées cartésiennes. (m)</i>		
r	<i>distance normale du projeté M d'un point du fluide à l'axe de révolution du cône</i>		
V_{ref}	<i>vitesse de référence</i>		
s_x, s_φ	<i>facteurs de configuration géométrique</i>		

1. Introduction

Les transferts thermiques autour des corps à symétrie de révolution ont fait l'objet de nombreuses études [5] étant donné leur intérêt théorique et pratique entre autres, dans les séchoirs, les machines et les fours rotatifs. Particulièrement pour le cône de révolution, [1] a consacré une étude numérique de la convection naturelle autour d'un cône de révolution incliné. Il a étudié l'influence de l'angle d'inclinaison du cône sur le transfert thermique et a montré l'existence d'un point privilégié au voisinage duquel la composante normale est indépendante de l'angle d'inclinaison. [2] ont réalisé l'étude de la convection mixte autour d'une sphère : ils ont mis en évidence d'une part l'influence de la variabilité des propriétés physiques du fluide sur les transferts d'impulsion et de chaleur et d'autre part la possibilité d'écrire d'une manière unique les équations pour les diverses dominances. Le travail de [3] portait sur les transferts par convection forcée laminaire autour d'un cône de révolution fermé sur sa partie supérieure par une calotte sphérique et incliné par rapport à la verticale. Il a déterminé la distribution de la vitesse extérieure à la couche limite en utilisant la méthode des singularités. Notre objectif est d'analyser par une simulation numérique, les transferts simultanés d'impulsion et de chaleur entre la paroi et le fluide, d'un écoulement laminaire en convection mixte tridimensionnelle naturelle et rotatoire, autour d'un cône de révolution incliné, tournant par rapport à un axe fixe. L'étude est alors orientée dans deux directions :

- mettre en évidence les contributions individuelles de chaque prédominance dans la convection mixte, afin d'en dégager des écritures unifiées des équations-bilan de transfert dans la couche limite, des conditions aux limites à la paroi et à l'infini, du nombre de Nusselt et des coefficients de frottement ;
- d'analyser par une simulation numérique, l'influence de deux convections combinées sur les comportements thermique et dynamique d'un écoulement laminaire en convection mixte le long d'un cône isotherme.

2. Méthodologie

2-1. Modèle physique et formulation mathématique du problème

Considérons un cône de révolution tournant uniformément dans un volume infini de fluide newtonien avec une vitesse angulaire ω autour de son axe (OO') incliné d'un angle α par rapport à la verticale ($O, \overline{e_{z_0}}$) et compté positivement à partir de cet axe (**Figure 1**). Sa paroi est maintenue à une température constante T_p , différente de la température T_∞ du fluide loin de la paroi qui est également constante.

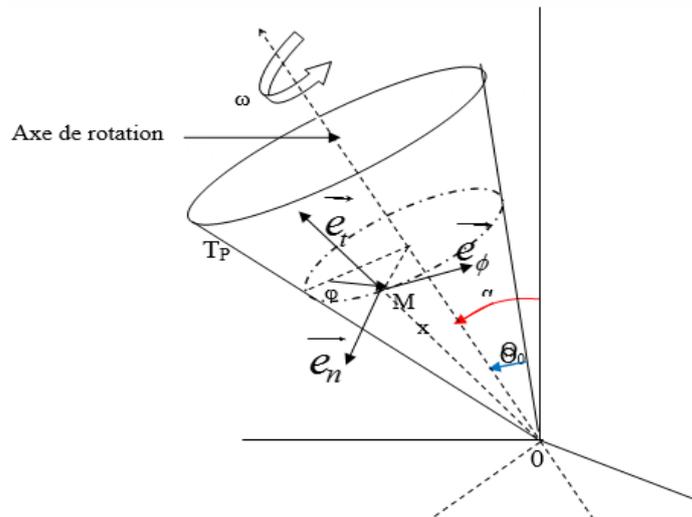


Figure 1 : Schéma du modèle physique

2-2. Formulation mathématique du problème

2-2-1. Hypothèse simplificatrices

Nous avons adopté les hypothèses suivantes afin de développer notre modèle numérique :

- L'écoulement est permanent et en régime laminaire ;
- Le fluide est Newtonien et incompressible ;
- Les propriétés physiques du fluide sont constantes, hormis la masse volumique, dans l'équation du mouvement, qui dépend de la température ;
- La fonction de dissipation visqueuse est négligeable.

2-2-2. Équations générales de conservation

- **Équation de continuité**

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\phi}{\partial \phi} + \frac{V_x}{r} \frac{dr}{dx} = 0 \tag{1}$$

- **Équations de la quantité de mouvement**

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{V_\phi}{r} \frac{\partial V_x}{\partial \phi} - \frac{V_\phi^2}{r} \frac{dr}{dx} = \beta (T - T_\infty) g S_x + \nu \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \tag{2}$$

$$V_x \frac{\partial V_\varphi}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_\varphi}{\partial y} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{V_x V_\varphi}{r} \frac{dr}{dx} = \beta (T - T_\infty) g S_\varphi + \nu \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial y^2} \quad (3)$$

• **Équations de la chaleur**

$$V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (4)$$

A ces **Équations** s'ajoutent les conditions aux limites :

- à la paroi $y = 0$

$$T = T_p \quad V_x = 0 \quad V_y = 0 \quad V_\varphi = r\omega \quad (5)$$

- loin de paroi $y \rightarrow \infty$

$$T = T_\infty \quad V_x = 0 \quad V_y = 0 \quad V_\varphi = 0 \quad (6)$$

2-2-3. Formulations adimensionnelles

D'une part, afin de mettre en évidence les contributions individuelles de chaque prédominance dans la convection mixte : les coordonnées, les vitesses et la température adimensionnelles seront représentées par leurs barycentres $C_i, i \in [1, 6]$ issus de chaque type de convection dominante, affectés des poids C_{nat}, C_{rot} . Ces poids permettent de basculer d'une prédominance à une autre en leur attribuant respectivement la valeur 1 ou 0, selon que la convection en question qui lui correspond prévaut ou non [3]. Dans notre cas de convection mixte, $C_{nat} = 1$ et $C_{rot} = 1$. D'autre part, les écritures des équations-bilan de transfert dans la couche limite, des conditions aux limites à la paroi et à l'infini, du nombre de Nusselt et des coefficients de frottement seront unifiés moyennant les coefficients $C_i, i \in [1, 6]$, ces coefficients ayant la même définition que précédemment :

2-2-3-1. Nombres adimensionnels

$$R_{e\omega} = \frac{L^2 \omega}{\nu} : \text{nombre adimensionnel de Reynolds de l'écoulement rotatoire, relatif à } \omega$$

$$G_r = \frac{g \beta (T_p - T_\infty) L^3}{\nu^2} : \text{nombre de Grashof}$$

$$Ri = \frac{Gr}{R_{e\omega}^2} : \text{nombre adimensionnel de Richardson relatif à l'écoulement rotatoire}$$

$$Nu = - \frac{L}{T_p - T_\infty} \left[\frac{\partial T}{\partial y} \right]_{y=0} : \text{nombre de Nusselt}$$

2-2-3-2. Coordonnées, vitesses et température adimensionnelles

$$x_+ = \frac{x}{L} \quad y_+ = \frac{\left(C_{nat} Ri^{\frac{1}{4}} + C_{rot} \right) R_{e\omega}^{\frac{1}{2}}}{C_{nat} + C_{rot}} \frac{y}{L} \quad \varphi_+ = \varphi \quad r_+ = \frac{r}{L} \quad (7)$$

$$V_x^+ = \frac{\left(C_{nat} \frac{L}{v} \frac{Ri^{-\frac{1}{2}}}{R_{e\omega}} + \frac{C_{rot}}{L\omega} R_{e\omega}^{\frac{1}{4}} \right)}{C_{nat} + C_{rot}} V_x \quad V_y^+ = \frac{\left(\frac{C_{nat} L R_{e\omega}^{-\frac{1}{2}} Ri^{-\frac{1}{4}}}{v} + \frac{C_{rot} R_{e\omega}^{\frac{3}{4}}}{L\omega} \right)}{C_{nat} + C_{rot}} V_y \quad (8)$$

$$V_\varphi^+ = \frac{\left(C_{nat} \frac{L}{v} \frac{Ri^{-\frac{1}{2}}}{R_{e\omega}} + \frac{C_{rot}}{L\omega} (R_{e\omega})^{\frac{1}{4}} \right)}{C_{nat} + C_{rot}} V_\varphi \quad T^+ = \frac{T - T_\infty}{T_p - T_\infty} \quad (9)$$

2-2-3-3. Coefficients de convection C_j

$$C_1 = \frac{(C_{nat} + C_{rot} R_{e\omega}^{\frac{1}{4}})}{C_{nat} + C_{rot}} \quad C_2 = \frac{(C_{nat} + C_{rot} \frac{Ri}{R_{e\omega}^{\frac{1}{2}}})}{C_{nat} + C_{rot}} \quad (10)$$

$$C_3 = \frac{(C_{nat} \frac{1}{Ri^{\frac{1}{2}}} + C_{rot} R_{e\omega}^{\frac{1}{4}})}{C_{nat} + C_{rot}} \quad C_4 = \frac{(C_{nat} + C_{rot} R_{e\omega}^{\frac{1}{4}})}{C_{nat} + C_{rot}} \frac{1}{Pr} \quad (11)$$

$$C_5 = - \frac{(C_{nat} R_{e\omega}^{\frac{1}{2}} Ri^{\frac{1}{4}} + C_{rot} R_{e\omega}^{\frac{1}{2}})}{C_{nat} + C_{rot}} \quad C_6 = 2 \frac{(C_{nat} R_{e\omega}^{-\frac{1}{2}} Ri^{-\frac{1}{4}} + C_{rot} R_{e\omega}^{-\frac{3}{4}})}{C_{nat} + C_{rot}} \quad (12)$$

2-2-3-4. Équations adimensionnelles

• **Équation de continuité**

$$\frac{\partial V_x^+}{\partial x_+} + \frac{\partial V_y^+}{\partial y_+} + \frac{1}{r_+} \frac{\partial V_\varphi^+}{\partial \varphi_+} + \frac{V_x^+}{r_+} \frac{dr_+}{dx_+} = 0 \quad (13)$$

• **Équations de la quantité de mouvement**

$$V_x^+ \frac{\partial V_x^+}{\partial x_+} + V_y^+ \frac{\partial V_x^+}{\partial y_+} + \frac{V_\varphi^+}{r_+} \frac{\partial V_x^+}{\partial \varphi_+} - \frac{V_\varphi^{+2}}{r_+} \frac{dr_+}{dx_+} = C_2 S_x T^+ + C_1 \frac{\partial^2 V_x^+}{\partial y_+^2} \quad (14)$$

$$V_x^+ \frac{\partial V_\varphi^+}{\partial x_+} + V_y^+ \frac{\partial V_\varphi^+}{\partial y_+} + \frac{V_\varphi^+}{r^+} \frac{\partial V_x^+}{\partial \varphi_+} + \frac{V_x^+ V_\varphi^+}{r^+} \frac{dr^+}{dx^+} = C_2 S_\varphi T^+ + C_1 \frac{\partial^2 V_\varphi^+}{\partial y_+^2} \quad (15)$$

• **Équation de la chaleur**

$$V_x^+ \frac{\partial T^+}{\partial x_+} + V_y^+ \frac{\partial T^+}{\partial y_+} + \frac{V_\varphi^+}{r^+} \frac{\partial T^+}{\partial \varphi_+} = C_4 \frac{\partial^2 T^+}{\partial y_+^2} \quad (16)$$

A ces **Équations** s'ajoutent les conditions aux limites :

• à la paroi : $y_+ = 0$

$$T^+ = 1 \quad V_x^+ = 0 \quad V_y^+ = 0 \quad V_\varphi^+ = C_3 r^+ \quad (17)$$

• à l'infini : $y_+ \rightarrow \infty$

$$T^+ = 0 \quad V_x^+ \rightarrow 0 \quad V_\varphi^+ \rightarrow 0 \quad (18)$$

2-2-3-5. Nombre de NUSSELT et coefficients de frottement

$$\text{Nombre de Nusselt : } Nu = -C_5 \left(\frac{\partial T^+}{\partial y_+} \right)_{y_+=0} \quad (19)$$

$$\text{Coefficients de frottement : } C_{f_x} = C_6 \left(\frac{\partial V_x^+}{\partial y_+} \right)_{y_+=0} \quad C_{f_\varphi} = C_6 \left(\frac{\partial V_\varphi^+}{\partial y_+} \right)_{y_+=0} \quad (20)$$

2-3. Résolution numérique

Nous discrétisons par la méthode implicite aux différences finies, les **Équations** de continuité, de quantité de mouvement et de la chaleur associées aux conditions aux limites. Par ailleurs, les **Équations** de quantité de mouvement et de la chaleur sont mises sous la forme : $A_j X_{j-1} + B_j X_j + C_j X_{j+1} = D_j$, $2 \leq j \leq J_{\max} - 1$, et sont résolues par l'algorithme de Thomas. La composante normale v^+ de la vitesse est déduite de l'**Équation** de continuité :

$$V^+ \left(\begin{smallmatrix} i+1 \\ k, j+1 \end{smallmatrix} \right) = V^+ \left(\begin{smallmatrix} i+1 \\ k, j \end{smallmatrix} \right) - \Delta y_+ \left[\frac{U^+ \left(\begin{smallmatrix} i+1 \\ k, j \end{smallmatrix} \right) - U^+ \left(\begin{smallmatrix} i \\ k, j \end{smallmatrix} \right)}{\Delta x_+} + \frac{W \left(\begin{smallmatrix} k+1 \\ j+1, j \end{smallmatrix} \right) - W \left(\begin{smallmatrix} k-1 \\ i+1, j \end{smallmatrix} \right)}{r_{i+1}^+ (2\Delta \varphi_+)} + \frac{U^+ \left(\begin{smallmatrix} i+1 \\ k, j \end{smallmatrix} \right)}{\Delta x_+} \left(1 - \frac{r^+ (i)}{r^+ (i+1)} \right) \right] \quad (21)$$

Le critère de convergence, vérifié simultanément pour T^+ , U^+ , V^+ , et W^+ , est :

$$\left| \frac{\max (F^{n+1} - F^n)}{\max (F^n)} \right| \leq 10^{-6} \quad (22)$$

Les dérivées partielles des expressions de Nusselt local et des coefficients de frottement pariétal sont approchées par une discrétisation à trois points.

3. Résultats et discussion

Nous fixons : $Pr = 0.72$, $\Delta x = 0.0025$, $\Delta y = 0.0001$, longueur de la génératrice $L = 1$ m, $R_{e\omega} = 500$. Nous comparons les résultats relatifs à la convection naturelle autour d'un cône issus de notre code de calcul à ceux obtenus par [5]. Les **Figures 2a et 2b** représentant la variation de la composante méridienne adimensionnelle en fonction de la coordonnée normale y_+ , montrent que nos résultats sont en bon accord avec ceux de la littérature, l'écart relatif ne dépassant pas 5 %. La **Figure 3** représente, l'évolution et la rapidité avec laquelle U^+ croît jusqu'à son maximum caractérisé par un pic puis décroît. La même **Figure** montre que, plus x_+ augmente en valeur c'est à dire plus on s'éloigne du sommet du cône, plus la vitesse méridienne U^+ diminue. En effet, les frottements successifs le long de la paroi font que U^+ régresse. La **Figure 4** illustre l'évolution de la vitesse normale V^+ pour plusieurs valeurs de x_+ : plus on se rapproche du sommet du cône plus la vitesse augmente et que plus les particules fluides sont plus fortement repoussées de la paroi vers l'extérieur du cône. Ce qui s'explique par le fait que les frottements consécutives le long de la paroi diminuent la vitesse. Plus on s'éloigne du sommet O, plus le rayon du cône augmente et la **Figure 5** montre que la vitesse azimutale est fonction croissante de x_+ . La **Figure 6** présente l'évolution de la température T^+ en fonction de y_+ pour plusieurs valeurs de x_+ . D'abord, plus on s'éloigne du sommet, plus la température diminue jusqu'au milieu du cône puis à partir de $x_+ = 0.5$, il y a inversion de la tendance. Sur la **Figure 7** est révélée la variation de la composante méridienne U^+ en fonction de y_+ pour plusieurs valeurs de la coordonnée azimutale φ_+ .

On observe d'abord que U^+ est fonction décroissante de φ_+ mais à partir de $\varphi_+ = 90$ il y a inversion c'est-à-dire qu'elle devient fonction croissante de φ_+ . A la **Figure 8** indiquée la variation de la vitesse normale V^+ fonction de y_+ pour plusieurs valeurs de φ_+ . Le mouvement des fluides est marqué, d'abord par un refoulement, puis par une aspiration au voisinage de $\varphi_+ = 90$. A la **Figure 9** est représentée l'évolution de la vitesse réduite azimutale en fonction de y_+ pour plusieurs valeurs de φ_+ . Nous notons que cette vitesse varie en sens inverse de φ_+ mais à partir de $\varphi_+ = 90$, c'est le contraire qui se produit : W^+ croît lorsque φ_+ croît. Il apparaît que de par l'inclinaison du cône, l'adhérence du fluide à la paroi est moindre à partir de $\varphi_+ = 90$ et de ce fait, la vitesse azimutale prend en importance. La **Figure 10** illustre l'évolution de la température T^+ en fonction de y_+ pour plusieurs valeurs de φ_+ . On remarque que la température adimensionnelle est fonction croissante de φ_+ . A la **Figure 11**, le coefficient de frottement décroît au fur et à mesure que x_+ augmente c'est-à-dire quand on passe du sommet O vers le haut ; en effet la vitesse méridienne, une des responsables du frottement pariétal est fonction décroissante de x_+ . La même constatation s'observe à la **Figure 12**, seulement pour ce dernier la variation est faible. A la **Figure 13**, nous avons représenté la variation du nombre de Nusselt qui marque le transfert de chaleur de la paroi vers le milieu fluide en fonction de x_+ pour plusieurs valeurs de Ri et nous constatons que au fur et à mesure que Ri augmente, la chaleur transmise l'est également. Nous pouvons en conclure la prépondérance de l'échange de chaleur en convection naturelle vis à vis de la convection rotatoire.

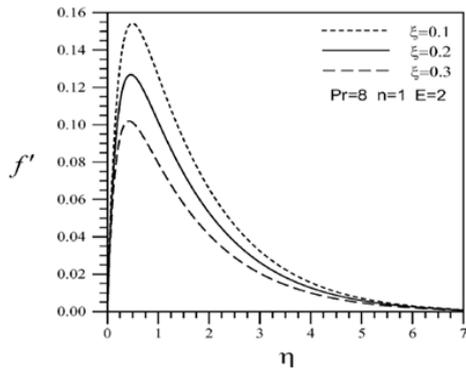


Figure 2a : Résultat de CHING Yang Cheng [5]

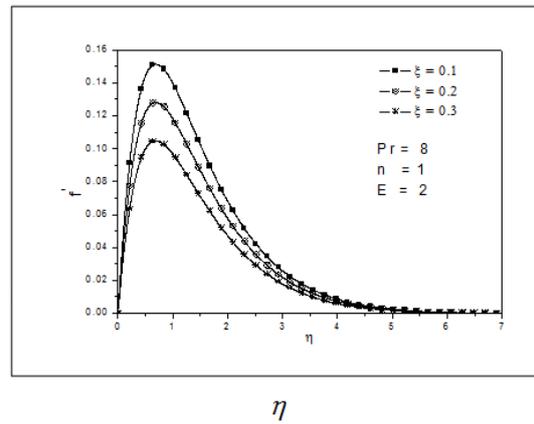


Figure 2b : Notre résultat

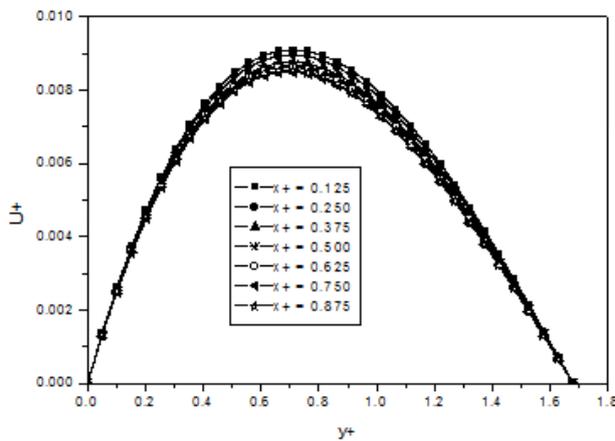


Figure 3 : Vitesse réduite suivant x en fonction de y^+ pour plusieurs valeurs de x^+ ;
 $\theta_0 = 20^\circ, \varphi = 20^\circ, Ri = 1$

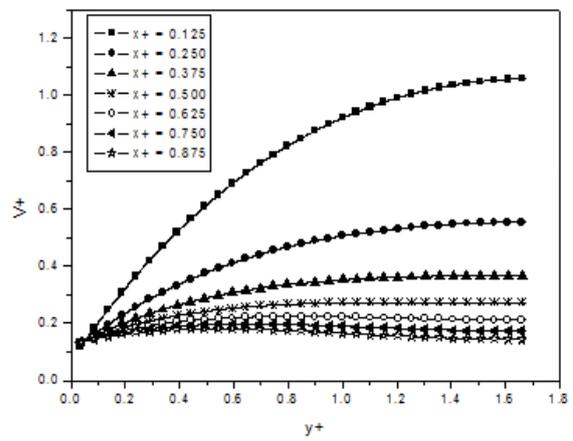


Figure 4 : Vitesse réduite suivant y en fonction de y^+ pour plusieurs valeurs de x^+ ;
 $\theta_0 = 20^\circ, \varphi = 20^\circ, Ri = 1$

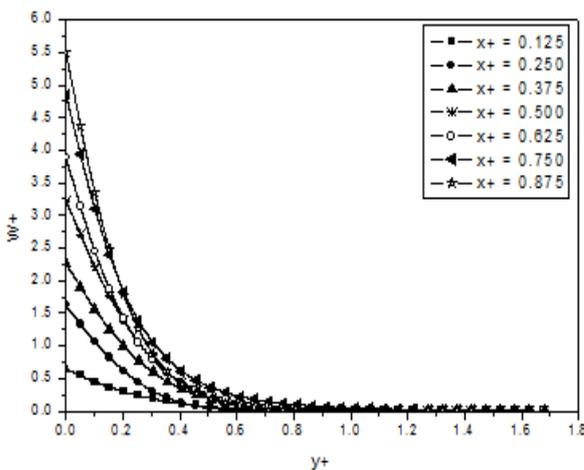


Figure 5 : Vitesse réduite suivant φ en fonction de y^+ pour plusieurs valeurs de x^+ ;
 $\theta_0 = 20^\circ, \varphi = 20^\circ, Ri = 1$

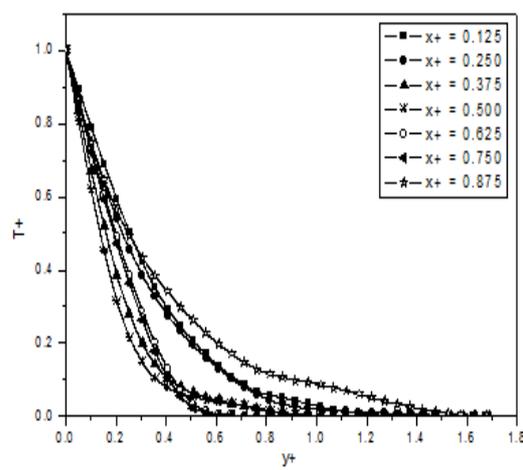


Figure 6 : Température réduite en fonction de y^+ pour plusieurs valeurs de x^+ ;
 $\theta_0 = 20^\circ, \varphi = 20^\circ, Ri = 1$

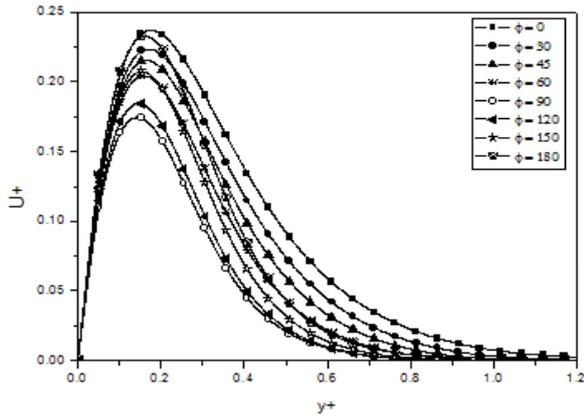


Figure 7 : Vitesse réduite suivant x en fonction de y^+ pour plusieurs valeurs de φ^+ ;
 $\theta_0 = 20^\circ$, $x^+ = 0.5$; $Ri = 1$

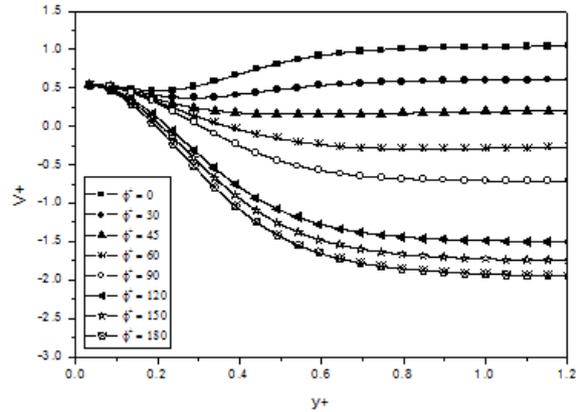


Figure 8 : Vitesse réduite suivant y en fonction de y^+ pour plusieurs valeurs de φ^+ ;
 $\theta_0 = 20^\circ$, $x^+ = 0.5$; $Ri = 1$

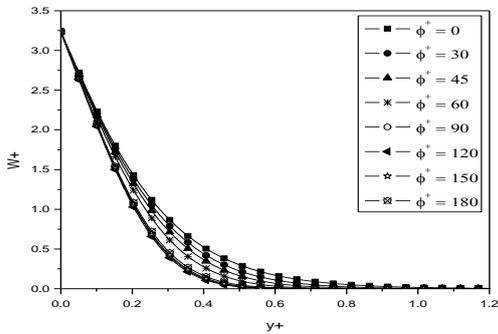


Figure 9 : Vitesse réduite suivant φ en fonction de y^+ pour plusieurs valeurs de φ^+ ;
 $\theta_0 = 20^\circ$, $x^+ = 0.5$; $Ri = 1$

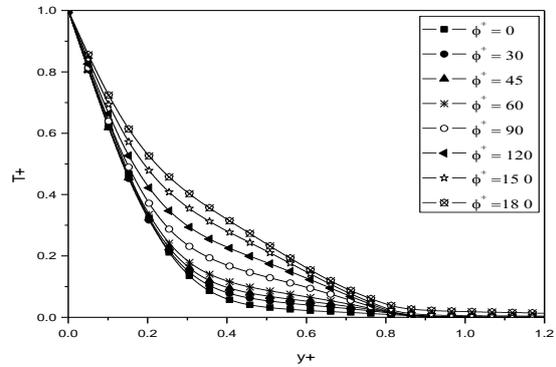


Figure 10 : Température réduite en fonction de y^+ pour plusieurs valeurs de φ^+ ;
 $\theta_0 = 20^\circ$, $x^+ = 0.5$; $Ri = 1$

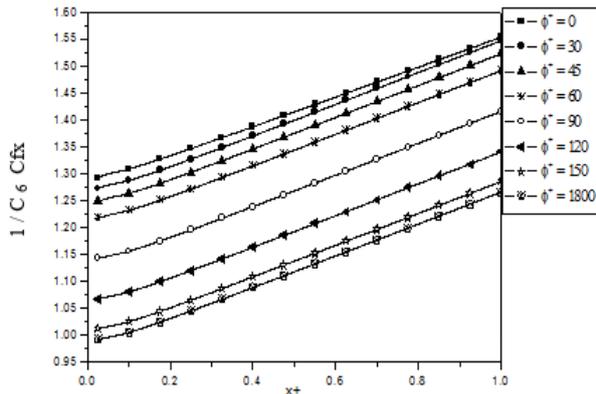


Figure 11 : Coefficient de frottement suivant x en fonction de x^+ pour plusieurs valeurs de φ^+ ; $\theta_0 = 20^\circ$, $\varphi = 20^\circ$; $Ri = 1$

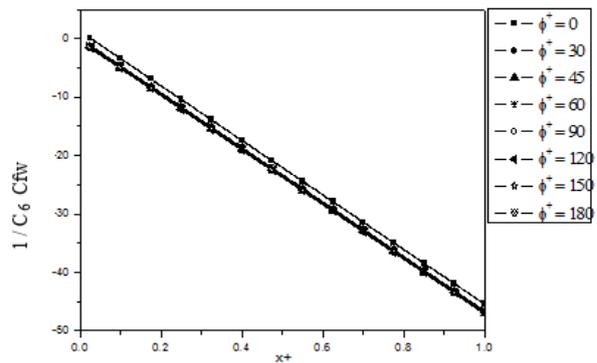


Figure 12 : Coefficient de frottement suivant φ en fonction de x^+ pour plusieurs valeurs de φ^+ ; $\theta_0 = 20^\circ$, $x^+ = 0.5$; $Ri = 1$

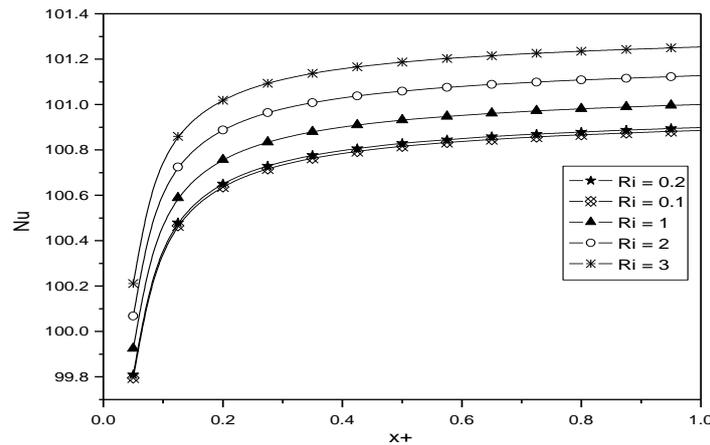


Figure 13 : Variation de nombre de Nusselt en fonction de x_+ pour plusieurs valeurs de Ri ; $\theta_0 = 20^\circ$, $\varphi = 20^\circ$

4. Conclusion

Ce travail porte sur l'étude numérique de l'écoulement et des transferts simultanés d'impulsion et de chaleur en convection mixte, naturelle et rotatoire autour d'un cône de révolution incliné dont la paroi est maintenue à une température constante. Les contributions individuelles de chaque prédominance dans la convection mixte ont été d'abord mises en évidence afin d'en dégager des écritures unifiées des équations-bilan de transfert dans la couche limite, des conditions aux limites à la paroi et à l'infini, du nombre de Nusselt et des coefficients de frottement. Ensuite, par une simulation numérique, nous avons analysé l'influence des deux convections combinées sur les comportements thermique et dynamique d'un écoulement laminaire en convection mixte le long d'un cône isotherme ; de cela, nous avons pu noter d'une part, l'impact des coordonnées méridiennes ou azimutales sur les composantes méridiennes, normales, azimutales des vitesses, les coefficients de frottement et le nombre de Nusselt dont la variation est très faible puis, l'existence de points d'inversion : $x_+ = 0.5$ pour la température et $\varphi_+ = 90$ pour les vitesses.

Références

- [1] - U. CANISSIUS, Etude Numérique de la Convection Naturelle Autour d'un Cône de Révolution Incliné, Thèse de Doctorat de l'Université d'Antsiranana, Madagascar, (2016)
- [2] - CH. R. R. RAMINOSOA, M. DAGUENET, Convection mixte autour d'une sphère : influence de la variabilité des propriétés physiques du fluide, *Rev. Gén. Therm.*, 389 (1994) 315 - 322
- [3] - F. A. RAKOTOMANGA, Contribution à l'Etude des Transferts Thermiques Convectifs Tridimensionnels Autour d'un Cône de Révolution, Thèse de Doctorat, Université d'Antsiranana, Antsiranana, (2013)
- [4] - E. ALIDINA, Contribution à l'Etude des Ecoulements Tridimensionnels Laminaires et Permanents Autour de l'Ellipsoïdes de Révolution : Ecoulement d'un Fluide Parfait et Convection Mixte d'un Fluide Newtonien en Couche Limite, Thèse de Doctorat, Université d'Antananarivo, (1997)
- [5] - C. S. BALLA, KISHAN NAIKOTI, Finite element analysis of magnetohydrodynamic transient free convection flow of nanofluid over a vertical cone with thermal radiation, SAGE journals, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N : *Journal of Nanomaterials, Nanoengineering Nanosystems*, (2014)

- [6] - Y. C.CHING, Free Convection Heat Transfert from a Non isothermal. Permeable Cone Suction and Temperature Dependent Viscosity, *Journal of applied Science and Engineering*, Vol. 18, N°1 (2015) 17 - 24
- [7] - S. CANDEL, Cours de Mécanique des Fluides, Dunod, Paris, (1995)
- [8] - O. LOUISNARD, Cours de Mécanique des Fluides
- [9] - R. LAURENT, Différences Finies pour la Résolution Numérique des Equations de la Mécanique des Fluides
- [10] - L. MIEUSSENS, Cours de Fortran 90, Institut de Mathématiques de Bordeaux, Université de Bordeaux, (2011)
- [11] - M. S. RAKOTOMALALA, Etude des Transferts dans la Couche Limite Entourant un Corps à Symétrie de Révolution Tournant dans un Fluide en Présence d'un Ecoulement Axial et d'une Convection Naturelle, Thèse de Doctorat, Université de Nince - Sophia Antipolis U.F.R Faculté des Sciences, France, (1994)
- [12] - BAPUJI PULLEPU, K. EKAMBAVANAN, ALI. J. CHAMKHA, Unsteady laminar natural convection flow past an isothermal vertical cone, *Int. J. Heat and Technology*, 25 (2) (2007) 17 - 28
- [13] - D. ANILKUMAR, S. ROY, Unsteady mixed convection flow on a rotating cone in a rotating fluid, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 155, Issue 2, (2004) 545 - 561
- [14] - S. NADIM, S SALEEM, Mixed convection flow of Eyring-Powell fluid along a rotating Cone, *Results in Physics*, 4 (2014) 54 - 62