

# Influence de la viscosité et de la conductivité thermique sur l'écoulement thermosolutale en convection naturelle dans un milieu poreux non Darcy rempli d'un nanofluide

A. AGHBARI<sup>1, a\*</sup>, H. ALI AGHA<sup>1, b</sup>, and D. SADAOUI<sup>1, c</sup>

1. Laboratoire de Mécanique, Matériaux et Energétique (L2ME), Faculté de Technologie, Université de Bejaia, 06000 Bejaia, Algérie.

<sup>a</sup>anisaghbari@hotmail.com, <sup>b</sup>hamzamedea20011@gmail.com, <sup>c</sup>sadaouidjamel@yahoo.fr.

## Résumé :

*Une analyse numérique a été réalisée pour étudier les effets de la viscosité et la conductivité thermique variables sous des conditions aux limites non uniformes, sur une plaque verticale immergée dans un milieu poreux non-Darcy en présence d'une réaction chimique. Le transfert couplé de chaleur et de masses dans la couche limite de convection naturelle avec un nanofluide visqueux sont pris en compte. De plus, la viscosité et la conductivité thermique sont supposées être en fonction de la fraction volumique de nanoparticules, tandis que le modèle de Darcy-Forchheimer est utilisé pour le milieu poreux. Les équations aux dérivées partielles sont transformées en équations différentielles ordinaires en utilisant des transformations de similarité appropriées et le système d'équations résultant est résolu numériquement par la méthode des différences finies via le solveur `bvp4c`. De nombreux résultats numériques sont affichés sous forme graphique pour illustrer l'influence des divers paramètres d'intérêt sur différents profils. L'étude numérique montre que les formes du champ d'écoulement, de la température et de la fraction volumique des nanoparticules sont influencées de manière significative par les paramètres de la viscosité, de la conductivité, de non Darcy, de la réaction et le coefficient de transfert de chaleur par convection. De plus, la dépendance des nombres de Nusselt et Sherwood sur ces paramètres est étudiée*

## Abstract :

*A numerical analysis was performed to study the effects of variables viscosity and thermal conductivity under non-uniform wall boundary conditions over a vertical plate embedded in a non-Darcy porous medium in the presence of chemical reaction. Coupled heat and mass transfer of the natural convective boundary layer with viscous nanofluid are considered. Further, the viscosity and thermal conductivity are assumed as the function of the nanoparticle volume fraction, while the Darcy-Forchheimer model is used for the porous medium. The governing partial differential equations are transformed into the ordinary differential equations using an appropriate similarity transformations and the resulting system of equations is then solved numerically by the finite-difference method via `bvp4c` solver. Many numerical results are displayed graphically to illustrate the influence of the various parameters of interest on different profiles. Numerical investigation show that the flow field, temperature and nanoparticle volume fraction shapes are significantly influenced by*

*variable viscosity parameter, non-Darcy parameter, reaction rate parameter and Convective heat transfer coefficient. Furthermore, the dependency of the Nusselt and Sherwood numbers on these parameters is investigated.*

**Mots clefs :** *Nanofluid; Variable viscosity; Variable conductivité thermique; Milieu poreux; Réaction chimique.*

## 1 Introduction

Ces dernières années, de nombreux chercheurs et développeurs se sont concentrés sur le refroidissement innovant et l'amélioration du transfert de chaleur dans les processus industriels. L'une des techniques prometteuses pour améliorer le transfert de chaleur dans les systèmes thermiques consiste à introduire de nouveaux constituants dans le fluide pour améliorer la capacité de transfert de chaleur du fluide lui-même. Ce fait a attiré de nombreuses recherches pour étudier les caractéristiques de transfert de chaleur dans ces mélanges colloïdaux obtenus en dispersant des particules de taille nanométrique dans un fluide de base tel que l'eau, l'éthylène ou le propylène glycol. Le terme «nanofluide» a été inventé pour la première fois par Choi [1] pour désigner une nouvelle classe de fluides caloporteurs basés sur la nanotechnologie. Ces mélanges de fluides ont fait l'objet d'une attention considérable en raison de leurs excellents performances thermiques et de leurs nombreux avantages dans plusieurs applications d'ingénierie Ahmadreza [2], tout en réduisant les problèmes d'érosion, de sédimentation et d'encrassement qui désavantagent les mélanges solide-liquide avec des particules plus grosses Das et al. [3].

Les études de la convection naturelle double diffusive en présence d'un milieu poreux font actuellement l'objet d'un intérêt croissant. Cet intérêt est dû aux nombreuses applications d'ingénierie (microélectronique, océanographie, enfouissement souterrain de déchets radioactifs, processus de chimie ...) Nield et Bejan [4], Buongiorno et Hu [5]. Cependant, la nécessité d'améliorer le transfert de chaleur a conduit au développement des nanofluides Cheng [6]. De nombreuses recherches ont été menées dans ce domaine. Nield et Kuznetsov [7] ont étudié numériquement le problème de la convection naturelle de Cheng-Minkowycz devant une plaque verticale dans un milieu poreux saturé par un nanofluide en suivant le modèle de Buongiorno [5]. Buongiorno [5] a conclu que l'effet du mouvement brownien et la thermophorèse sont les mécanismes dominants qui définissent la vitesse relative des nanoparticules. Khan et Aziz [8] ont étudié la convection naturelle double diffusive à partir d'une plaque verticale incrustée dans un milieu poreux saturé d'un fluide binaire contenant des nanoparticules. À des débits plus élevés, la loi de Darcy n'est pas applicable car l'effet d'inertie devienne important. Le modèle Darcy - Forchheimer décrit l'effet de l'inertie. Murthy et al. [9] ont discuté l'influence de l'effet de Soret sur la double diffusion en convection naturelle dans la région de la couche limite d'une plaque plane inclinée semi-infinie immergée dans un milieu poreux non-Darcy. Chen [10] a examiné le problème du transfert de chaleur et de masse combiné dans la convection naturelle MHD induite par la flottabilité à partir d'une surface inclinée perméable à température et à concentration variable, en tenant compte de l'effet de la dissipation visqueuse.

Il est bien connu que les caractéristiques du fluide peuvent varier avec la température. Il est donc nécessaire de prendre en compte la viscosité et la conductivité thermique du fluide pour pouvoir prédire avec exactitude les caractéristiques d'écoulement, le transfert de chaleur et de masse du fluide [11, 12]. L'étude de la littérature existante sur les nanofluides révèle que la viscosité ainsi que la conductivité thermique du nanofluide sont considérées comme des propriétés variables et varient fortement avec la fraction volumique des nanoparticules plutôt que la température [13, 14]. Khanafer et Vafai [15] ont mené des analyses à la fois expérimentales et théoriques pour analyser les propriétés

thermo-physiques des nanofluides. Lors d'une réaction chimique entre deux espèces (nanoparticules et fluides de base), de la chaleur est générée et, simultanément, une construction ou une destruction de nanoparticules est observée sur la couche limite en fonction du signe de la vitesse de réaction chimique. Dans la plupart des cas de réaction chimique, la vitesse de réaction dépend de la concentration de l'espèce. Une réaction est dite de premier ordre si la vitesse de réaction est directement proportionnelle à la concentration. Les interactions entre la viscosité variable et l'effet de la thermophorèse sur le transfert de chaleur et de masse en convection mixte en présence de la réaction chimique ont été étudiées par [16].

Toutefois, à la connaissance des auteurs, aucun travail n'a été consacré aux effets combinés de la viscosité et de la conductivité variables avec une réaction chimique dans de tels milieux sous des conditions de paroi non uniformes. Ainsi, l'amélioration de la fluidité et du transfert de chaleur nécessite une meilleure compréhension de la zone de la couche limite le long d'une plaque verticale semi-infinie incrustée dans un milieu poreux non-Darcy avec l'extension de Forchheimer saturée de nanofluide. Cela a motivé le travail en cours à étudier les effets des mécanismes du mouvement brownien et de la thermophorèse, selon les mécanismes dominants de Buongiorno [5] sur la structure de l'écoulement et les caractéristiques de transfert de chaleur et de masse. Des analyses de l'évolution des différents profils ont permis de montrer l'influence de l'effet de différents paramètres de contrôle et une étude du taux de transfert de chaleur et de masse en termes de nombre de Nusselt et de Sherwood est réalisée

## 2 Problème physique et analyse mathématique

En considère un problème à deux dimensions, d'un écoulement thermosolutal en convection naturelle le long d'une plaque verticale semi-infinie immergée dans un milieu poreux non Darcéen saturé d'un nanofluide, l'écoulement est supposé dans la direction  $x$ , et l'axe  $y$  coïncide avec la normale à la plaque, le modèle physique et le système de coordonnées sont représentés sur la figure (1). La surface de la plaque ( $y=0$ ) est en contact avec un fluide chaud caractérisé par une température  $T_f$  qui fournit un coefficient de transfert de chaleur  $h$ , la fraction volumique des nanoparticules  $\phi$  est  $\phi_w$ . Les valeurs ambiantes ( $y$  tend vers l'infini), pour la température  $T$  et la fraction volumique  $\phi$  sont désignées par  $T_\infty$  et  $\phi_\infty$  respectivement. En outre, la variation de la viscosité et la conductivité, la réaction chimique d'ordre 1, le mouvement Brownien et la thermophorèse sont incorporés. Le modèle de Darcy-Forchheimer est supposé validé. L'équilibre thermique local dans le milieu poreux homogène est également supposé. Les équations gouvernantes pour la couche limite, s'écrivent comme suit :

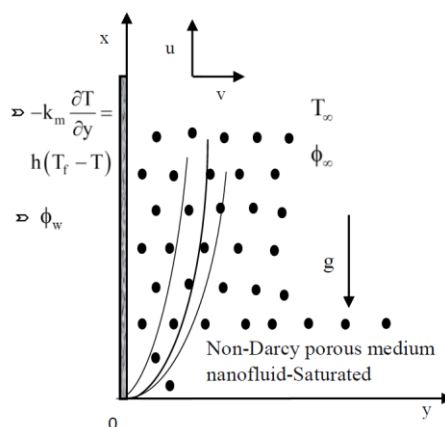


Figure 1 : Modèle physique et système de coordonnées.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\mu(\phi)}{K}u - \frac{\rho_{f\infty}c_f}{\sqrt{K}}u^2 + \left[ \begin{array}{l} (1-\phi_\infty)\rho_{f\infty}g\beta_T(T-T_\infty) \\ -(\rho_p - \rho_{f\infty})g(\phi - \phi_\infty) \end{array} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{(\rho c_p)_{nf}} \frac{\partial}{\partial y} \left( k_m(\phi) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \tau \left[ D_B \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \left( \frac{D_T}{T_\infty} \right) \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$\frac{1}{\phi} \left( u \frac{\partial \phi}{\partial x} + v \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = D_B \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \left( \frac{D_T}{T_\infty} \right) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - k_r(\phi - \phi_\infty) \quad (5)$$

Ici,  $p$  est la pression,  $u$  et  $v$ , les composantes de vitesse de Darcy,  $T$  la température et  $\phi$  la fraction volumique de nanoparticules. Les paramètres physiques sont notés  $K$  la perméabilité de milieu poreux avec la porosité  $\phi$ ,  $\rho_f$  la masse volumique,  $\beta_T$  le coefficient d'expansion thermique de fluide de base,  $g$  l'accélération gravitationnelle. La masse volumique des particules est  $\rho_p$ ,  $(\rho c_p)_{nf}$  la capacité thermique effective de nanoparticule, tandis que  $(\rho c_p)_f$  est la capacité thermique de fluide de base.  $\tau = \phi(\rho c_p)_p / (\rho c_p)_f$  est le rapport de la capacité thermique du nanofluide. Le coefficient de diffusion Brownienne est noté par  $D_B$ , le coefficient de diffusion thermophorétique  $D_T$ .

Les conditions aux limites associées sont aux équations ci-dessus sont :

$$y = 0: \quad v = 0, \quad -k_m \frac{\partial T}{\partial y} = h(T_f - T), \quad \phi = \phi_w \quad (6)$$

$$y \rightarrow \infty: \quad v = u = 0, \quad T \rightarrow T_\infty, \quad \phi \rightarrow \phi_\infty \quad (7)$$

Dans la présente étude, la conductivité thermique et la viscosité du nanofluide sont considérées en fonction de la fraction volumique locale des nanoparticules. Pour atteindre cet objectif, la viscosité du nanofluide et la conductivité thermique sont supposées être une fonction réciproque et linéaire de la fraction volumique locale des nanoparticules [17]. Par conséquent, la viscosité peut être écrite comme

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_\infty} (1 + \gamma(\phi - \phi_\infty)) \quad (8)$$

L'équation (8) peut être encore simplifiée comme

$$\frac{1}{\mu} = m_\mu (\phi - \phi_r) \quad (9)$$

où  $m_\mu$  et  $\phi_r$  donnés par

$$m_\mu = \frac{\gamma}{\mu_\infty}, \quad \phi_r = \phi_\infty - \frac{1}{\gamma} \quad (10)$$

Dans les équations. (9) et (10)  $\gamma$ ,  $\mu_\infty$ ,  $m_\mu$  et  $\phi_r$  sont des constants.

De plus, la conductivité thermique dépendante de la fraction volumique des nanoparticules est introduite

$$k_m(\phi) = k_{m,\infty} (1 + m_k(\phi - \phi_\infty)) \quad (11)$$

Où  $m_k = \frac{Nc}{(\phi_w - \phi_\infty)}$  et  $Nc$  est le paramètre de conductivité thermique variable,  $k_{m, \infty}$  est la conductivité thermique effective.

Nous introduisons la fonction de ligne de courant  $\psi$  défini par :

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (12)$$

En utilisant les transformations adimensionnelles suivantes :

$$s(\eta) = \frac{\psi(\eta)}{\alpha_m Ra_x^{1/2}}, \quad \theta(\eta) = \frac{T - T_\infty}{T_f - T_\infty}, \quad f(\eta) = \frac{\phi - \phi_\infty}{\phi_w - \phi_\infty} \quad (13)$$

Où  $Ra_x$  le nombre de Rayleigh local définit par :

$$Ra_x = \frac{(1 - \phi_\infty) \rho_{f\infty} K g \beta_T (T_f - T_\infty) x}{\alpha_m \mu} \quad (14)$$

et  $\eta$  la variable de similitude :

$$\eta = \frac{y}{x} Ra_x^{1/2} \quad (15)$$

Les équations (1-6) avec les variables de similarité ci-dessus, nous obtenons le système d'équations différentielles ordinaires suivant :

$$Nv(Nv - f).s'' + Nv.s' f' + (Nv - f)^2 2.Fo.s' s'' - (Nv - f)^2 [\theta' - Nr.f'] = 0 \quad (16)$$

$$(1 + Nc.f)\theta'' + \frac{1}{2}.s\theta' + Nc.\theta' f' + Nb.f'\theta' + Nt.(\theta')^2 = 0 \quad (17)$$

$$f'' + \frac{1}{2}.Le s f' + \frac{Nt}{Nb}.\theta'' - Cr.f = 0 \quad (18)$$

$Nr$  est le taux de flottabilité de nanoparticules  $Nr = (\rho_p - \rho_{f\infty})(\phi_w - \phi_\infty)/(1 - \phi_\infty)\rho_{f\infty}\beta_T(T_f - T_\infty)$ ,  $Nb$  est le paramètre de mouvement Brownien  $Nb = \tau D_B(\phi_w - \phi_\infty)/\alpha_m$ ,  $Nt$  est le paramètre de thermophorèse  $Nt = \tau D_T(T_f - T_\infty)/\alpha_m T_\infty$ ,  $Le$  est le nombre de Lewis pour le nanoparticules  $Le = \alpha_m/\varphi D_B$ .  $Fo$  représente le paramètre de Non Darcéen  $Fo = c_f \sqrt{K} \alpha_m Ra_x / \nu x$ .  $Nv$  et  $Nc$  sont respectivement le paramètre de la variable de la conductivité thermique et le paramètre de la variable de la viscosité  $Nv = \phi_r - \phi_\infty / \phi_w - \phi_\infty = -1/\gamma(\phi_w - \phi_\infty)$ ,  $Cr$  est le paramètre de la réaction chimique  $Cr = \kappa_0 x^2 / D_B Ra_x$ .

Les conditions initiales et aux limites sont devenues :

$$\eta = 0 : s(0) = 0, \quad \theta'(0) = -H(1 - \theta(0)), \quad f(0) = 1 \quad (19)$$

$$\eta \rightarrow \infty : s'(\infty) = \theta(\infty) = f(\infty) = 0 \quad (20)$$

Les quantités physiques d'intérêt qui définissent le taux de transfert de chaleur et de masse en termes de nombre de Nusselt local  $Nu_x$  et le nombre de Sherwood local régulier  $Sh_x$  :

$$Nu_x = \frac{xq_w}{k_m(T_f - T_\infty)}, \quad Sh_x = \frac{xq'_w}{D_B(\phi_w - \phi_\infty)} \quad (21)$$

Avec  $q_w$  est le flux thermique surfacique et  $q'_w$  est le flux massique à la surfacique.

En utilisant les variables adimensionnelles, on obtient :

$$\frac{Nu_x}{Ra_x^{1/2}} = -\theta'(0), \quad \frac{Sh_x}{Ra_x^{1/2}} = -f'(0) \quad (22)$$

### 3 Résultats et discussions

L'ensemble d'équations différentielles ordinaires couplées (16) - (18) sont fortement non linéaires et ne peut être résolu analytiquement, avec les conditions aux limites (19-20), ils forment un problème aux limites à deux points qui peut être résolu pour certaines valeurs des paramètres qui le régissant. La méthode des différences finies qui implémente la formule de Lobatto à trois étapes de collocation (III.A) et le polynôme de collocation fournit une solution continue qui est du quatrième ordre en précision, de manière uniforme dans l'intervalle d'intégration. La sélection du maillage et l'erreur de contrôle sont basés sur le résidu de la solution en continu. La technique de collocation utilise un maillage de points pour diviser l'intervalle en sous-intervalles d'intégration. Le solveur *bvp4c* détermine une solution numérique en résolvant un système d'équations algébriques résultant avec les conditions aux limites, et les conditions de collocation imposées sur tous les sous-intervalles. Le solveur estime alors l'erreur de la solution numérique sur chaque sous-intervalle. Si la solution ne satisfait pas aux critères de tolérance, le solveur adapte le maillage et répète le processus. L'utilisateur doit fournir les points du maillage initial ainsi qu'une approximation initiale de la solution aux points de maillage.

La validation de la méthode utilisée est vérifiée, par la comparaison des résultats numériques correspondants avec ceux obtenus par Noghrehabadi et al [17] via le nombre de Nusselt (tableau 1). Il ressort de ce tableau que les résultats actuels sont en bon accord avec ceux rapportés par les travaux cités

Tableau n° 1, Comparaison de nombre de Nusselt pour une convection naturelle devant une plaque verticale dans un milieu poreux Darcéen saturé d'un nanofluide avec  $Fo=0$ ,  $Nc=0$ ,  $Nt=10^{-6}$ ,  $Nb=10^{-5}$ ,  $Nr=10^{-3}$   $H \rightarrow \infty$ ,  $Cr=0$ .

$Nv$	Noghrehabadi et al [17]		Présent travail	
	$Le=1000$	$Le=2000$	$Le=1000$	$Le=2000$
2	0.4379	0.4396	0.43790	0.43962
10	0.4428	0.4421	0.44283	0.44314
20	0.4434	0.4435	0.44336	0.44352
200	0.4440	0.4440	0.44383	0.44383
$\rightarrow \infty$	0.4440	0.4440	0.44383	0.44383

Une étude paramétrique a été réalisée selon la méthode décrite précédemment, et un ensemble représentatif des résultats graphiques a été obtenu pour la vitesse adimensionnelle  $s'(\eta)$ , la température adimensionnelle  $\theta(\eta)$  et la fraction volumique des nanoparticules adimensionnelle  $\phi(\eta)$ .

L'impact de différentes valeurs du paramètre de la variable de la viscosité ( $Nv$ ) sur les profils de vitesse est représenté sur les Fig. 2. Il ressort clairement de la Fig. 2 que les profils de vitesse sont fortement influencés par le paramètre  $Nv$  situé au voisinage de la surface de la plaque. Mais, dans les zones éloignées de la surface de la plaque, dans la couche limite, les profils de vitesse sont peu affectés par  $Nv$ .

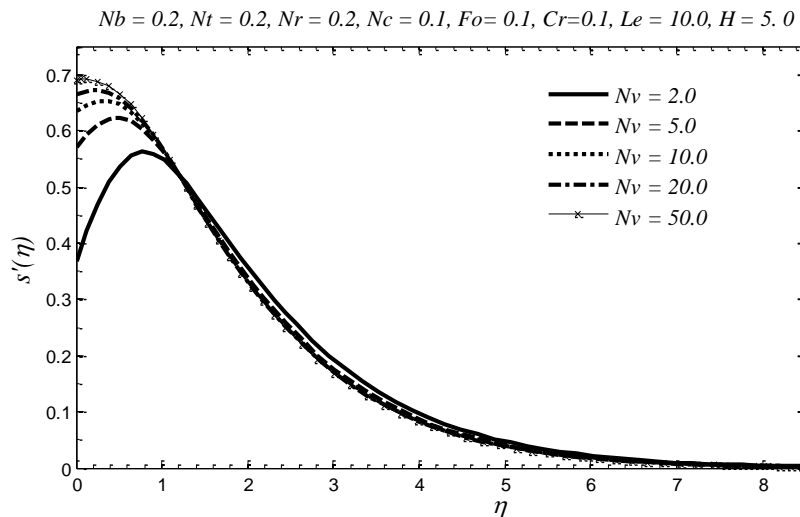


Figure 2 : Effet de  $Nv$  sur la vitesse adimensionnelle.

Les figures 3 et 4 illustrent l'effet du paramètre de la variable de la conductivité thermique  $Nc$  sur les profils adimensionnelle de température et de concentration dans la région de la couche limite. Une augmentation des valeurs du paramètre  $Nc$  augmente la magnitude des distributions de température (Fig. 3). Ceci est dû au fait que la conductivité thermique du nanofluid augmente près de la surface de la plaque lorsque les valeurs du paramètre  $Nc$  augmentent. Cependant, l'épaisseur de la couche limite solutale décélère avec l'amélioration des valeurs de  $Nc$ .

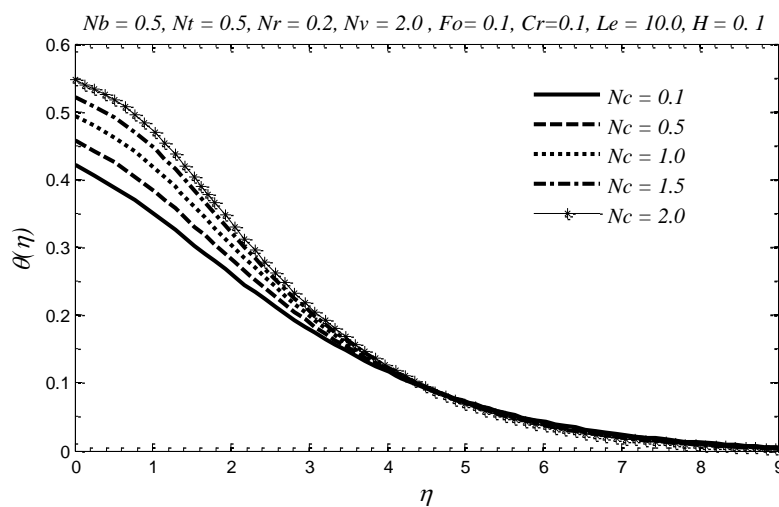


Figure 3 : Effet de  $Nc$  sur la température adimensionnelle.

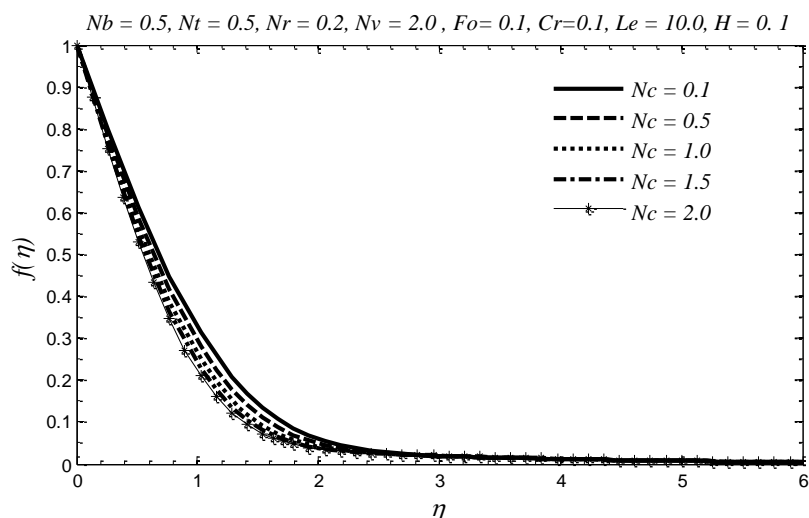


Figure 4 : Effet de  $Nc$  sur la fraction volumique des nanoparticules adimensionnelle.

Les profils de température et de concentration sont représentés sur les Fig. 5 – 6 pour diverses valeurs du paramètre de réaction chimique  $Cr$ . Il ressort de la figure 5 que les profils de température du fluide ont décéléré dans la couche limite avec les valeurs les plus élevées du paramètre de réaction chimique  $Cr$ . Les profils de concentration sont fortement influencés par le paramètre de réaction chimique. Le paramètre de réaction chimique  $Cr$  augmente signifie que la diffusivité moléculaire est moindre, ce qui diminue d'autant l'épaisseur de la couche limite solutale (Fig. 6).

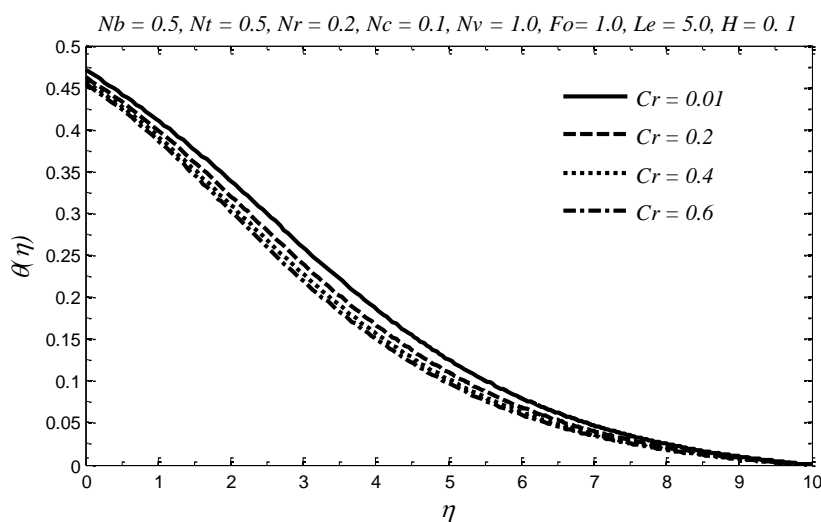


Figure 5 : Effet de  $Cr$  sur la température adimensionnelle.



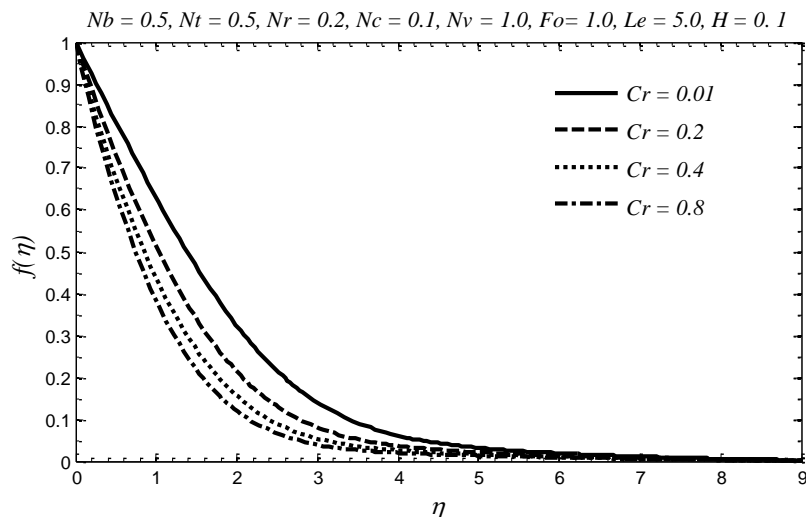


Figure 6 : Effet de  $Cr$  sur la la fraction volumique des nanoparticules.

Figure 7 représente les profils de la vitesse adimensionnelle pour différentes valeurs de paramètre Forchheimer  $Fo$  et le nombre de Lewis pour les nanoparticules  $Le$ . On constate que les profils de vitesse est énormément sensible à l'augmentation du nombre Forchheimer, qui conduit à diminuer la vitesse à proximité de la plaque en raison de l'effet de la trainée et d'inertie qui implique la réduction de l'épaisseur de la couche limite hydrodynamique. Tandis que l'épaisseur de la couche limite de quantité de mouvement s'agrandit, lorsque le paramètre de Lewis de nanoparticules  $Le$  augment. Ce pendant la présence de nanoparticules contribue à l'amélioration de la vitesse près de la paroi.

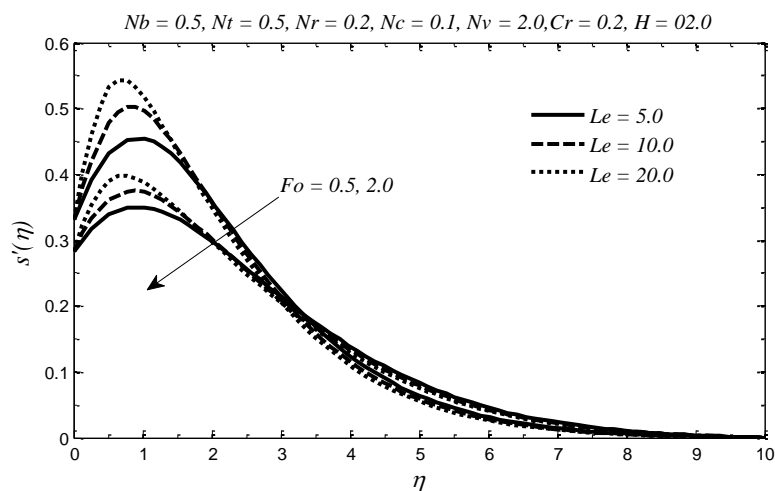


Figure 7 : Effet de  $Fo$  et  $Le$  sur la vitesse adimensionnelle.

Maintenant, l'attention est concentrée sur la façon dont les paramètres du problème régissant sur le nombre du Nusselt local  $Nu_x$  et le nombre Sherwood local de nanoparticules  $Sh_x$ . Le tableaux 2 est adressée à cet objectif.

On peut constater que le nombre de Nusselt augmente à mesure que le paramètres de convection ( $H$ ) augment. Concernant le taux de transfert massique,  $Nb$  est trouvé capable dans l'amélioration de ce paramètre d'intérêt. Comme le montre le tableau, la présence des effets d'inertie en terme de  $Fo$  peut être considéré comme un moyen de réduction de taux de transfert de chaleur, la même tendance est notée pour le taux de transfert de masse des nanoparticules.

Tableau n° 2, Valeurs de  $Nu_x/Ra_x^{1/2}$ ,  $Sh_x/Ra_x^{1/2}$  pour des valeurs sélectionnées de  $H$ ,  $Fo$ ,  $Nt$  et  $Nb$  avec ( $Nr=0.2$ ,  $Nc=0.1$ ,  $Nv=2.0$ ,  $Cr=0.2$ ,  $Le=10.0$ ).

$H$	$Fo$	$Nu_x/Ra_x^{1/2}$				$Sh_x/Ra_x^{1/2}$ (nanoparticules)			
		$Nb=0.1$		$Nb=0.5$		$Nb=0.1$		$Nb=0.5$	
		$Nt=0.1$	$Nt=0.5$	$Nt=0.1$	$Nt=0.5$	$Nt=0.1$	$Nt=0.5$	$Nt=0.1$	$Nt=0.5$
0.1		0.0642	0.628	0.0590	0.0577	0.7633	0.7609	0.8405	0.8640
0.5	0.2	0.1663	0.1536	0.1392	0.1289	1.0449	1.0052	1.1281	1.1634
100		0.3009	0.2511	0.2247	0.1921	1.2576	1.1712	1.3250	1.3556
	0.0	0.1685	0.1558	0.1418	0.1316	1.0596	1.0185	1.1475	1.1844
0.5	0.5	0.1633	0.1508	0.1361	0.1257	1.0261	0.9882	1.1037	1.1373
	1.0	0.1594	0.1470	0.1320	0.1216	1.0003	0.9650	1.0713	1.1028

#### 4 Conclusion :

Ce travail a examiné les effets de la réaction chimique, la viscosité et la conductivité thermique variables sur l'écoulement adjacent d'une paroi plane verticale, en convection libre, immergée dans un milieu poreux non Darcéen saturé d'un nanofluide. Les effets d'inertie sont pris en compte et le modèle de buongiorno a été utilisé.

- L'extension de Forchheimer joue un rôle important dans la diminution de la vitesse longitudinale près de la plaque.
- L'impact de la viscosité et la conductivité thermique variables en présence du mouvement brownien et de thermophorèse ont des effets importants sur les profils de la vitesse, la température et la fraction volumique des nanoparticules.
- Les caractéristiques de flux de transfert de chaleur et de masse peuvent être contrôlées en utilisant des nanoparticules. Ceci est illustré en examinant les deux paramètres clés: la thermophorèse et le mouvement brownien.

#### Références

- [1] S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in: D.A. Siginer, H.P. Wang (Eds.), Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, ASME FED, vol. 231/MD-vol. 66, (1995) 99–105.
- [2] A.B. Ahmadreza, Application of nanofluid for heat transfer enhancement, 2013. (PID: 2739168), EEE-5425.
- [3] S. Das, S. Choi, W. Yu, and T. Pradeep, Nanofluids: Science and Technology, 1st Édition, J.Wiley, 2008.
- [4] D.A. Nield, and A. Bejan, Convection in Porous Media, third ed., V Springer, New York, 2006.
- [5] J. Buongiorno, and W. Hu, Nanofluid coolants for advanced nuclear power plants, in: Proceedings of ICAPP '05, Seoul, May, (2005), 15–19, Paper No. 5705.
- [6] C.Y. Cheng, Natural convection boundary layer flow over a truncated cone in a porous medium saturated by a nanofluid. International Communication of Heat and Mass Transfer; 39, (2012), 231–235.

- [7] D.A. Nield, and A.V. Kuznetsov, The Cheng–Minkowycz problem for the double-diffusive natural convective boundary layer flow in a porous medium saturated by a nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*; 54, (2011), 374–378.
- [8] W.A. Khan, and A. Aziz, Double-diffusive natural convective boundary layer flow in a porous medium saturated with a nanofluid over a vertical plate: Prescribed surface heat, solute and nanoparticle fluxes. *International Journal of Thermal Sciences* 50, (2011), 2154–2160.
- [9] P. V. S. N. Murthy, A. Sutradhar, and Ch. RamReddy, Double-Diffusive Free Convection Flow Past an Inclined Plate Embedded in a Non-Darcy Porous Medium Saturated with a Nanofluid. *Transport in Porous Media*. 98, (2013), 553–564.
- [10] C.-H. Chen, Combined heat and mass transfer in MHD free convection from a vertical surface with Ohmic heating and viscous dissipation. *Int. J. Eng. Sci.* 42, (2004), 699–713.
- [11] T.C. Chaim, Heat transfer with variable thermal conductivity in a stagnation point flow towards a stretching sheet. *Int Commun Heat Mass Transfer* 23, (1996), 239–248.
- [12] H.F. Oztop, E. Abu-Nada, Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids. *Int J Heat Mass Transfer* 29, (2008), 1326–1336.
- [13] S.K. Das, S.U.S. Choi, W. Yu, T. Pradeep, *Nanofluids – science and technology*. Hoboken: John Wiley & Sons Publishers 2007.
- [14] M Chandrasekar, S. Suresh, A review on the mechanisms of heat transport in nanofluids. *Heat Transfer Eng* 30, (2009), 1136–1150.
- [15] K. Khanafer, K. Vafai, A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. *Int J Heat Mass Transfer* 54, (2011), 4410–28.
- [16] Muhaimin, R. Kandasamy, I. Hashim, Variable viscosity and thermophoresis effects on Darcy mixed convective heat and mass transfer past a porous wedge in the presence of chemical reaction, *Theoret. Appl. Mech.* 36, (2009), 29-46.
- [17] A. Noghrehabadi, M. Ghalambaz and A. Ghanbarzadeh, Effects of variable viscosity and thermal conductivity on natural-convection of nanofluids past a vertical plate in porous media. *Journal of Mechanics*, 30 (2014), 265-275.